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

Радіоелектроніка Інформатика Управління

Радиоэлектроника Информатика Управление

Radio Electronics Computer Science Control

2016/3

ISSN 1607-3274
9 771607 327005 63 >

Запорізький національний технічний університет

Радіоелектроніка, інформатика, управління

Науковий журнал

Виходить чотири рази на рік
№ 3(38) 2016
Заснований у січні 1999 року.
Засновник і видавець – Запорізький національний технічний університет.
ISSN 1607-3274 (друкований), ISSN 2313-688X (електронний).
Запоріжжя
ЗНТУ
2016

Запорожский национальный технический университет

Радиоэлектроника, информатика, управление

Научный журнал

Выходит четыре раза в год
№ 3(38) 2016
Основан в январе 1999 года.
Основатель и издатель – Запорожский национальный технический университет.
ISSN 1607-3274 (печатный), ISSN 2313-688X (электронный).
Запорожье
ЗНТУ
2016

Zaporizhzhya National Technical University

Radio Electronics, Computer Science, Control

The scientific journal

Published four times per year
№3(38) 2016
Founded in January 1999.
Founder and publisher – Zaporizhzhya National Technical University.
ISSN 1607-3274 (print), ISSN 2313-688X (on-line).
Zaporizhzhya
ZNTU
2016

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. Свідоцтво 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 CC ліцензією CC-BY.

Опублікованими статтям присвоюється унікальний ідентифікатор цифрового об'єкта DOI.

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 / РИНЦ, Google Scholar, Index Copernicus, INSPEC, ISSN, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat, ВІНІТІ, 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) **резензування** штатними редакторами і незалежними рецензентами – провідними вченими за профілем журналу.

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор – Погосов В. В., д-р фіз.-мат. наук, Україна

Заст. головного редактора – Субботін С. О., д-р. техн. наук, Україна

Члени редколегії:

Андроулідакіс Й., д-р філософії, Греція
Безрук В. М., д-р техн. наук, Україна
Бодянський Є. В., д-р техн. наук, Україна, редактор розділу з управління
Васильєв С. М., д-р фіз.-мат. наук, академік РАН, Росія
Гімпілевич 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
Лебедєв 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
Піза Д. М., д-р техн. 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 03.10.2016.

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

© Запорізький національний технічний університет, 2016

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 CC лицензией CC-BY.

Опубликованным статьям присваивается уникальный идентификатор цифрового объекта DOI.

Журнал реферируется 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, ВИНИТИ, 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 – Погосов В. В., д-р физ.-мат. наук, Украина

Зам. главного редактора – Субботин С. А., д-р. техн. наук, Украина

Члены редколлегии:

Андроулидакис 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
Папшицький М., д-р философии, Польша
Пиза Д. М., д-р техн. 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 03.10.2016.

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, 2016

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 КВ №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 abstracted and indexed in leading international and national abstractig 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 / РИНЦ, 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: V. V. Pogosov, Doctor of Science in Physics and Mathematics, Ukraine

Deputy Editor-in-Chief: S. A. Subbotin, 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
D. M. Piza, Doctor of Science in Engineering, 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, Academican of Russian Academy of Sciences, Russia
E. N. Zaitseva, Ph.D, Slovakia

Recommended for publication by the Academic Council of ZNTU, protocol № 2 dated 03.10.2016.

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, 2016

ЗМІСТ

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ.....7

Курапов С. В., Чеченя В. С.
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОВЕДЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ В ОБЛАСТИ BGA КОМПОНЕНТ.....7

Пиза Д. М., Лаврентьев В. Н., Семенов Д. С.
МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ КЛАССИФИЦИРОВАННОЙ ОБУЧАЮЩЕЙ ВЫБОРКИ ДЛЯ АВТОКОМПЕНСАТОРА ПОМЕХ ПРИ ВРЕМЯ-ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛОВ.....18

МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.....23

Шергин В. Л.
СВЯЗЬ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ САМОПОДОБИЯ, УСТОЙЧИВОСТИ И ДОЛГОСРОЧНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПРИРАЩЕНИЙ ФРАКТАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ЛЕВИ.....23

НЕЙРОІНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ.....30

Бодянський Є. В., Дейнеко А. О., Куценко Я. В.
ПОСЛІДОВНЕ НЕЧІТКЕ КЛАСТЕРУВАННЯ НА ОСНОВІ НЕЙРО-ФАЗЗІ ПІДХОДУ.....30

Гороховатский В. А., Гороховатский А. В., Берестовский А. Е.
СТРУКТУРНОЕ РАСПОЗНАВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДЕЛЕЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ И САМООРГАНИЗАЦИИ ПРИЗНАКОВ.....39

Субботин С. А.
ПОСТРОЕНИЕ ПОЛНОСТЬЮ ОПРЕДЕЛЕННЫХ НЕЙРО-НЕЧЕТКИХ СЕТЕЙ С РЕГУЛЯРНЫМ РАЗБИЕНИЕМ ПРОСТРАНСТВА ПРИЗНАКОВ НА ОСНОВЕ ВЫБОРОК БОЛЬШОГО ОБЪЕМА.....47

ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ.....54

Бісікало О. В., Висоцька В. А.
ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ СИНТАКСИЧНОГО АНАЛІЗУ РЕЧЕНЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КЛЮЧОВИХ СЛІВ УКРАЇНОМОВНОГО ТЕКСТУ.....54

Ковнир А. Э., Степаненко К. Э., Ильяшенко М. Б.
УВЕЛИЧЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАСФОКУСИРОВАННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗА СЧЕТ ИСПРАВЛЕНИЯ ОШИБКИ ОКРУГЛЕНИЯ.....66

Литвин В. В., Демчук А. Б., Оборська О. В.
МАТЕМАТИЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОДАННЯ ВІДЕОКОНТЕНТУ ДЛЯ ОСІБ З ВАДАМИ ЗОРУ.....73

Фауре Э. В., Швыдкий В. В., Щерба В. А.
КОМБИНИРОВАННОЕ ФАКТОРИАЛЬНОЕ КОДИРОВАНИЕ И ЕГО СВОЙСТВА.....80

Федушко С. С.
РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ ВЕРИФІКАЦІЇ СОЦІАЛЬНО-ДЕМОГРАФІЧНИХ ДАНИХ УЧАСНИКА ВІРТУАЛЬНОЇ СПІЛЬНОТИ.....87

УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ.....93

Авдєєв В. В.
ТОЧНІСТЬ І ЗАПАС СТІЙКОСТІ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ РАКЕТИ.....93

Мамедов К. Ш., Мамедова А. Г.
ПОНЯТИЯ СУБОПТИМИСТИЧЕСКОГО И СУБПЕССИМИСТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЙ И ПОСТРОЕНИЕ ИХ В ИНТЕРВАЛЬНОЙ ЗАДАЧЕ БУЛЕВОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ.....99

CONTENTS

RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS.....7

Kurapov S. V., Chechenja V. S.
MATHEMATICAL MODEL OF CONNECTION TRACING IN THE AREA OF BGA COMPONENTS.....7

Piza D., Lavrentiev V., Semenov D.
METHOD OF FORMING OF THE CLASSIFIED TRAINING SAMPLE FOR AUTOMATIC CANCELLER OF THE INTERFERENCES WHEN USING TIME-SPACE FILTERING OF SIGNALS.....18

MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELLING.....23

Shergin V. L.
RELATIONSHIP BETWEEN THE PARAMETERS OF SELF-SIMILARITY, STABILITY AND LONG-RANGE DEPENDENCY OF FRACTAL LEVÝ MOTION.....23

NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS.....30

Bodyanskiy Ye. V., Deineko A. O., Kutsenko Ya. V.
SEQUENTIAL FUZZY CLUSTERING BASED ON NEURO-FUZZY APPROACH.....30

Gorokhovatsky V. A., Gorokhovatskyi A. V., Berestovskyi A. E.
STRUCTURAL IDENTIFICATION OF IMAGE RECOGNITION BASED WITH MODELS OF INTELLECTUAL SELF-ORGANIZATION FEATURES.....39

Subbotin S. A.
BUILDING A FULLY DEFINED NEURO-FUZZY NETWORK WITH A REGULAR PARTITION OF A FEATURE SPACE BASED ON LARGE SAMPLE.....47

PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES.....54

Bisikalo O. V., Vysotska V. A.
SENTENCE SYNTACTIC ANALYSIS APPLICATION TO KEYWORDS IDENTIFICATION UKRAINIAN TEXTS.....54

Kovnir A. E., Stepanenko K. E., Ilyahsneko M. B.
DEFOCUSED IMAGE RESTORATION CONFIDENCE INCREASING BY IMPROVING ROUNDING ERRORS CORRECTIONS.....66

Lytvyn V. V., Demchyk A. B., Oborska O. V.
MATHEMATICAL AND SOFTWARE SUBMISSION VIDEO CONTENT FOR VISUALLY IMPAIRED PEOPLE.....73

Faure E. V., Shvydkyi V. V., Shcherba V. O.
COMBINED FACTORIAL CODING AND ITS PROPERTIES.....80

Fedushko S. S.
DEVELOPMENT OF VERIFICATION SYSTEM OF SOCIO-DEMOGRAPHIC DATA OF VIRTUAL COMMUNITY MEMBER.....87

CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS.....93

Avdejev V. V.
ACCURACY AND STABILITY FACTOR OF A ROCKET ROTATION STABILIZATION SYSTEM.....93

Mamedov K. Sh., Mamedova A. H.
DEFINITIONS OF SUBOPTIMISTIC AND SUBPESSIMISTIC SOLUTIONS AND THEIR CONSTRUCTION IN THE INTERVAL BOOLEAN PROGRAMMING PROBLEM.....99

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

РАДИОЕЛЕКТРОНИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 519.172

Курапов С. В.[1], Чеченя В. С.[2]

[1]*Канд. физ.-мат. наук, доцент Запорожского национально университета, Запорожье, Украина*
[2]*Аспирант Запорожского национального университета, Запорожье, Украина*

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОВЕДЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ В ОБЛАСТИ BGA КОМПОНЕНТ

В статье рассмотрена проблема проектирования радиоэлектронной аппаратуры плоских конструктивов в области BGA. Показано, что трассировка плоских конструктивов в области BGA не дает требуемых результатов из-за отсутствия универсальной математической модели и зачастую осуществляется вручную. Поэтому в данной работе представлена универсальная математическая модель, основанная на теоретико-множественном описании расположения соединений между контактами BGA компонент для вывода их на периферию, что очень важно при проектировании плоских конструктивов. Также в работе приведено детальное описание общего рисунка схемы для схем с матричным расположением контактов, таких как BGA, как для непересекающихся соединений, так и описание расположения пересекающихся соединений. Предложен метод определения пересечения проводников для расположения пересекающихся соединений. Показано, что кортеж элементов схемы может быть использован для описания проведения соединений, проверки загрузки макродискретов и определения пересечения проводников. Предложенная универсальная математическая модель может снизить трудоемкость и время проектирования топологии плоских конструктивов, а также может быть использована для разработки топологий микроэлектромеханических структур различного назначения.

Ключевые слова: BGA компонент, схема, рисунок, макродискрет, кортеж, множество, канал.

НОМЕНКЛАТУРА

МПУ – многозондовое подключающее устройство;
ЭК – электронные компоненты.
$a,b,c,d,e,f\ldots$ – линии уровня;
$M_1\ldots = <b_1,b_2,b_3,a_1>$– макродискрет;
$L_{b\ldots} = <\boldsymbol{b_1},\boldsymbol{b_2},a_1,\boldsymbol{b_3}>$– кортеж;
q – ребра;
s – след соединения;
w – топометрические линии;
pr( ) – проекции соединений;
$B_{1\ldots} = \{M_1,M_4,M_9,M_{16}\}$ – вертикальные каналы;
$\Gamma_{1\ldots} = \{M_1,M_2,M_5,M_{10}\}$– горизонтальные каналы;

ВВЕДЕНИЕ

Современной базой проектирования плоских конструктивов являются системы автоматизации проектирования. Существующие системы, такие как ACCEL EDA P-CAD 2002, Protel DXP, OrCAD 9.2, Allegro, SPECCTRA, TOPOR, осуществляют множество функций. Это и размещение компонент на поверхности плоского конструктива, проведение соединений, расчет помехоустойчивости и т.д.

Несмотря на очевидный прогресс в технологии автоматической трассировки плоских конструктивов, по отзывам самих конструкторов [1], в лучшем случае приходиться вносить значительные коррективы в полученное автоматизированное решение вручную, в худшем – и вовсе разводить плату вручную. Это вызвано тем, что в основу применяемых математических методов моделирования положены только геометрические свойства, с полным игнорированием топологических свойств проведения соединений [2]. Так как в основе большинства алгоритмов автотрассировки лежит геометрический алгоритм С.Ли. В современных системах САПР в библиотеку компонентов заложены только геометрические параметры. В то время как такое чисто топологическое свойство как пересечение соединений учитывается в недостаточной степени. Все это привело к тому, что современные математические модели в системах проектирования плоских конструктивов можно отнести к последовательным алгоритмам. Для таких систем характерен слепой неуправляемый поиск, с огромными вычислительными временными затра-

© Курапов С. В., Чеченя В. С., 2016
DOI 10.15588/1607-3274-2016-3-1

тами. Мало того, в результате получается только один вариант решения, причем, как правило, далекий от оптимального. При таком подходе вопросы многовариантного решения задачи даже не затрагиваются. Все это говорит о необходимости смены парадигмы методов математического моделирования [2,3].

Что касается математических моделей для описания соединений с BGA компонентами, то их просто не существует. Авторами предлагается серия статей описания и применения разработанной математической модели для построения рисунка соединений плоского конструктива с BGA компонентами. В следующих работах будут представлены методы и алгоритмы проведения соединений плоских конструктивов в области BGA компонент с пересечением и без пересечения проводников с различными стратегиями разводки на основе предложенной математической модели.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью данной работы является создание математической модели для описания рисунка схемы проведения соединений в области BGA компонент, которая будет основана на теоретико-множественных методах дискретной математики. Приводится подробное описание общего рисунка, как для непересекающихся соединений, так и описание расположения пересекающихся соединений. Приведено описание топологического способа определения пересечения соединений.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Плоским конструктивом будем называть техническое устройство (конструкцию), где непересекающиеся соединения между элементами устройства и сами элементы расположены в параллельных (эквидистантных) плоскостях. Это могут быть печатные платы, интегральные микросхемы, БИС, СБИС и т.д.

Характерной особенностью современных сложных электронных устройств является применение микросхем большой и сверхбольшой степени интеграции. Это и чипы программируемой логики, и однокристальные процессоры, и множество других устройств. По мере усложнения микросхем растет и число выводов, как информационных, так и питания. Обычные типы корпусов для выводного монтажа, например QFP или SOP, уже не могут обеспечить должное количество паяных соединений и их качественный монтаж в связи со значительным увеличением линейных размеров и массы корпуса. Поэтому особенно большое распространение получили компоненты в корпусах BGA [4]. Микросхемы в корпусе BGA относительно недороги и отличаются малыми размерами [5].

Но, несмотря на популярность применения, трассировка печатных плат с участием корпусов BGA проблематична. Современные программные средства не в состоянии справится с поставленной задачей, сложности возникают из-за большого количества слоев трассируемых соединений, малых значений толщины проводников и расстояний между ними, специфики межслойных соединений и ряда других факторов [6].

Проблему проведения соединений частично решают шаблоны трассировки, но как бы ни было эффективным использование шаблонов [7], процесс трассировки не обходится без проведения соединений вручную, а в некоторых случаях и вовсе весь процесс трассировки осуществляется вручную.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

3.1 Модель корпуса BGA

Математическую модель для BGA компонент и проведения соединений можно представить в виде циклического фрагмента с контактами, расположенными по концентрическим окружностям *a, b, c, d, e, f* …(рис. 1, 2).

Рассмотрим компонент BGA для корпуса с 324 матрично-расположенными контактами, которые представлены в 18-ти горизонтальных и вертикальных рядах. Такое расположение контактов определяет симметрию относительно центра. Симметрия расположения позволяет рассматривать контакты и проведение соединений только в одной четверти математической модели корпуса (рис. 3 а, б).

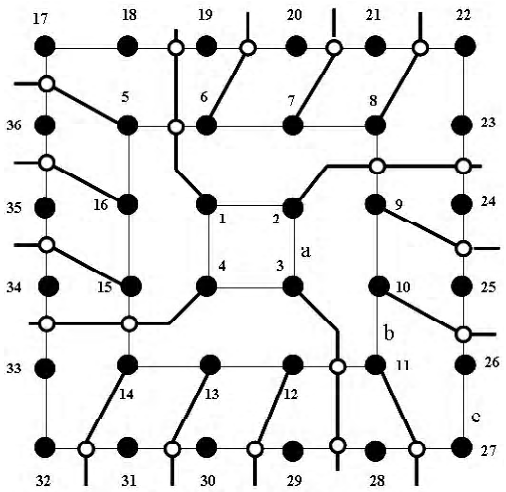


Рисунок 1 – Фрагмент корпуса на 36 выводов и проведение соединений

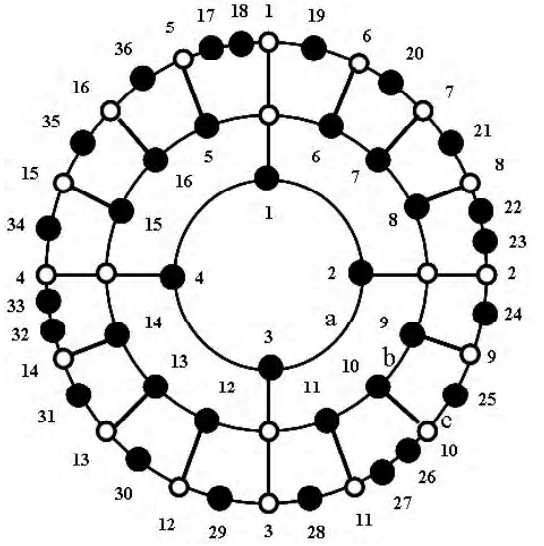


Рисунок 2 – Топологическая модель корпуса на 36 выводов и проведение соединений

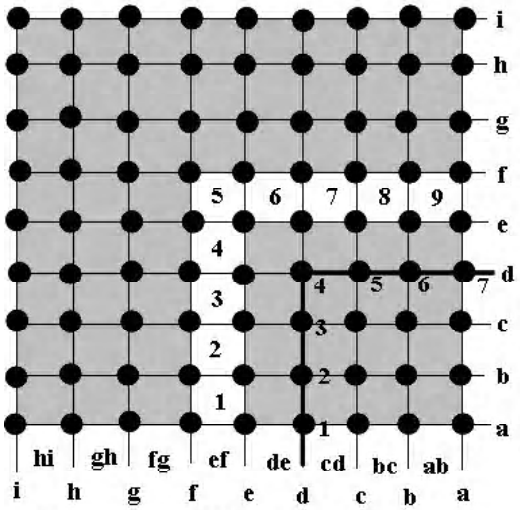
Математическая модель представляет собой совокупность концентрических окружностей, количество которых определяется расположением рядов матрично-расположенных контактов (рис. 2). Концентрические окружности можно характеризовать как проведенные линии от центра симметрии и называть их *линиями уровня* (рис. 3), обозначаемые латинскими буквами *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *f*,…, количество которых определяется количеством рядов матрично-расположенных контактов (рис. 4).

Например, линия уровня B – это множество B = $=\{b_1,b_2,b_3\}$, линия уровня C – это множество C = $=\{c_1,c_2,c_3,c_4,c_5\}$ (рис. 4).

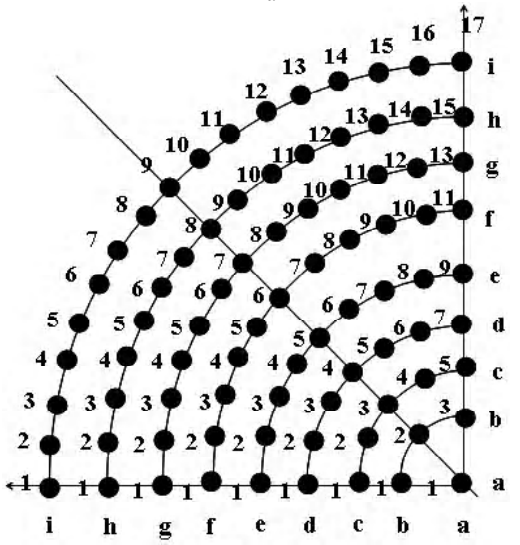
Парная совокупность линий уровня образует центральные каналы, как часть ограниченного пространства R^2. Центральные каналы будем обозначать двумя буквами, например, *de* – это канал, ограниченный линией уровня *d* и линией уровня *e* (рис. 3).

Каждый центральный канал состоит из макродискретов.

Определение 1. ***Макродискрет*** представляет собой четырехугольник, в углах которого расположены четыре контакта (рис. 5).



а



б

Рисунок 3 – Верхняя левая часть корпуса BGA с 324 матрично-расположенными контактами

По расположению в центральных каналах различают диагональные макродискреты, макродискреты ниже диагонали и макродискреты выше диагонали.

Множество макродискретов будем нумеровать от центра на периферию (рис. 6).

Подмножества макродискретов образуют вертикальные и горизонтальные каналы рис. 7 а, б.

Принадлежность контактов в макродискретах всегда можно определить из рис. 6.

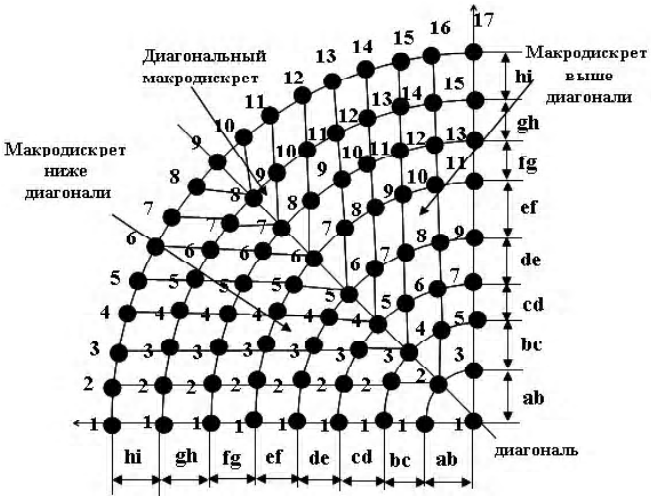


Рисунок 4 – Математическая модель корпуса BGA для проведения соединений

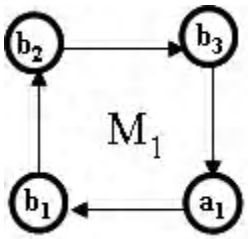


Рисунок 5 – Макродискрет $M_1 = \langle b_1,b_2,b_3,a_1 \rangle$

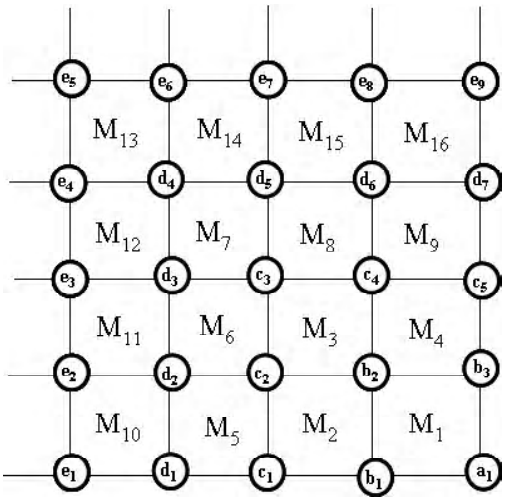
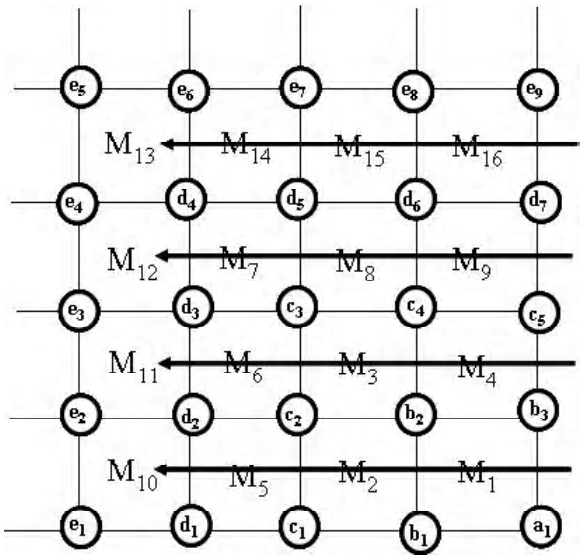
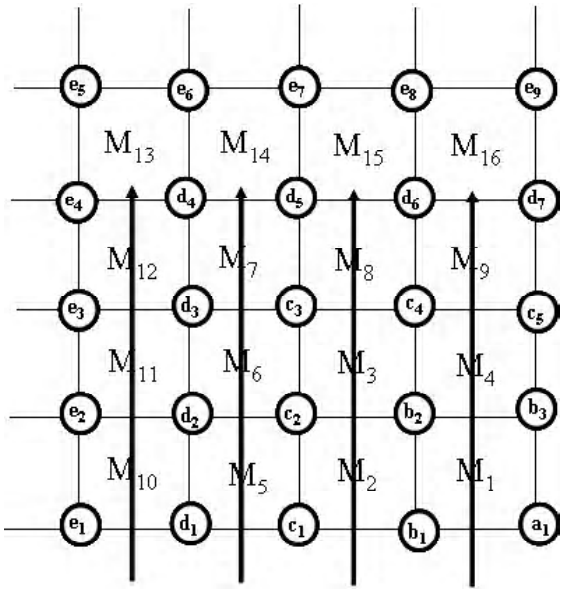


Рисунок 6 – Нумерация макродискретов



а



б

Рисунок 7 – Горизонтальные и вертикальные каналы

Правила формирования макродискретов для горизонтальных и вертикальных каналов представлены в нижеследующих прямоугольных матрицах:

Горизонтальные каналы

M_1									
M_2	M_3	M_4							
M_5	M_6	M_7	M_8	M_9					
M_{10}	M_{11}	M_{12}	M_{13}	M_{14}	M_{15}	M_{16}			
M_{17}	M_{18}	M_{19}	M_{20}	M_{21}	M_{22}	M_{23}	M_{24}	M_{25}	
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…

Заполняем строки матрицы номерами макродискретов соответствующих центральных каналов. В первую строку помещаем макродискреты первого центрального канала – M_1. Во вторую строку последовательно слева направо помещаем макродискреты второго центрального канала – M_2,M_3,M_4, и так далее. Исходя из определенного количества макродискретов в канале, начиная с правой верхней заполненной клетки, отсчитываем заданное количество макродискретов справа налево и сверху вниз, исключая макродискреты предыдущего уровня. Например, первый горизонтальный канал состоит из 5-ти макродискретов: M_1,M_2,M_5,M_{10},M_{17}. Второй горизонтальный канал состоит из 5-ти макродискретов: M_4,M_3,M_6, M_{11},M_{18}. Третий горизонтальный канал состоит из 5-ти макродискретов: M_9,M_8,M_7, M_{12},M_{19} и так далее.

Вертикальные каналы

M_1									
M_4	M_3	M_2							
M_9	M_8	M_7	M_6	M_5					
M_{16}	M_{15}	M_{14}	M_{13}	M_{12}	M_{11}	M_{10}			
M_{25}	M_{24}	M_{23}	M_{22}	M_{21}	M_{20}	M_{19}	M_{18}	M_{17}	
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…

Правило объединения макродискретов в вертикальные каналы отличается только первоначальным заполнением строк номерами макродискретов центральных каналов в обратном порядке. То есть, в первую строку помещаем макродискреты первого центрального канала – M_1. Во вторую строку последовательно слева направо помещаем макродискреты второго центрального канала в обратном порядке – M_4,M_3,M_2, и так далее.

3.2 Рисунок соединений между контактами корпуса BGA

Определение 2. *Общим рисунком* будем называть рисунок подключенных соединений ко всем задействованным контактам, с учетом всех конструктивно-технологических ограничений без учета их распределения по слоям.

Общий рисунок бывает двух видов. Первый вид – это рисунок с непересекающимися соединениями (см. рис. 8), а второй вид – это общий рисунок с пересекающимися соединениями (см. рис. 9,а, б, в, г).

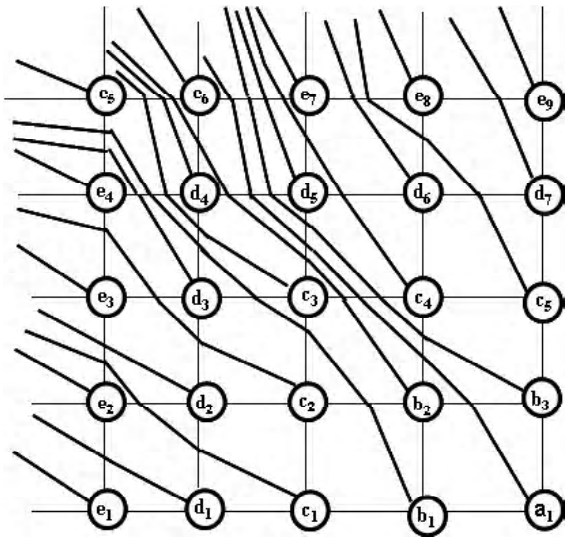


Рисунок 8 – Общий рисунок с непересекающимися соединениями

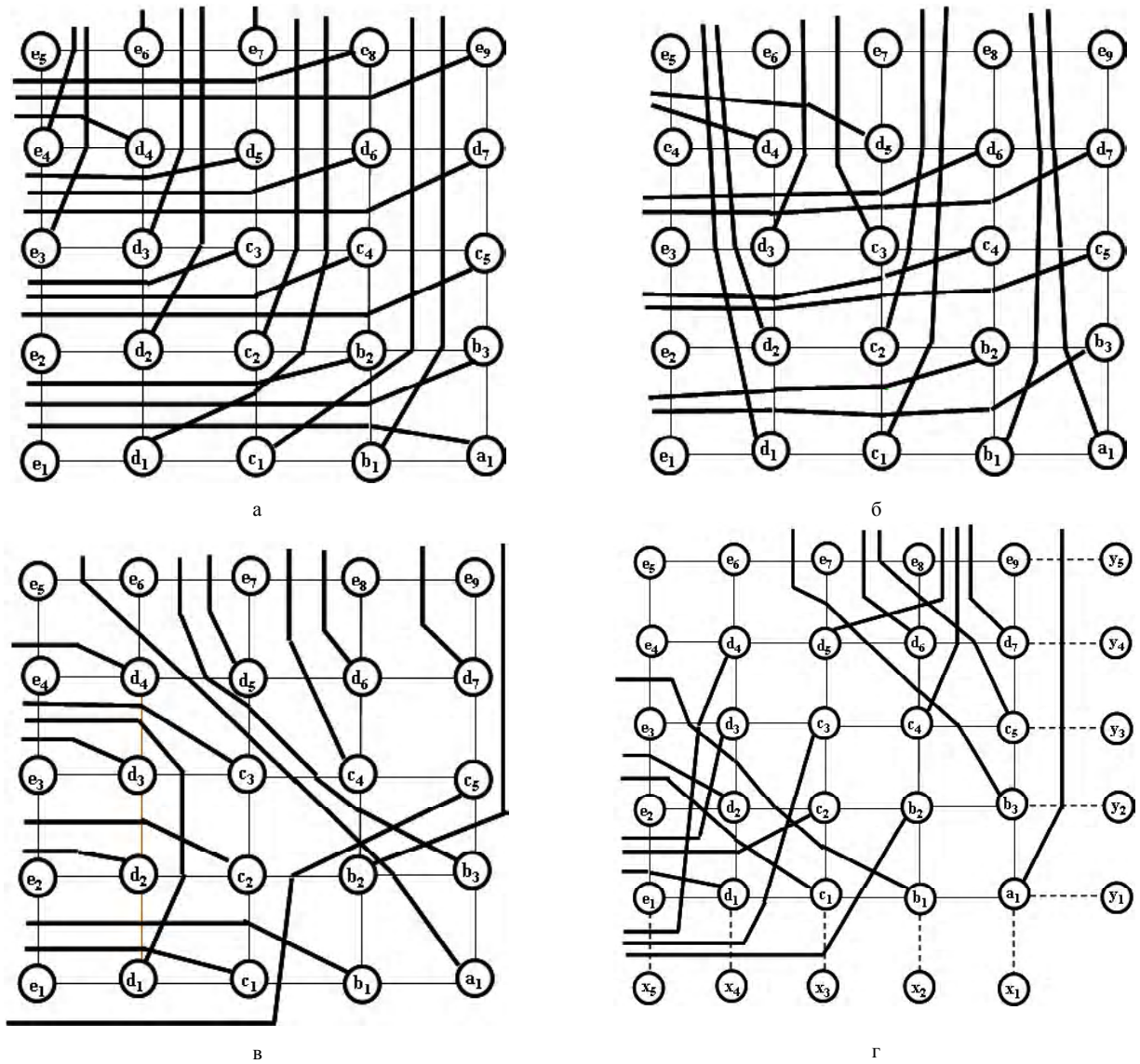


Рисунок 9 – Общий рисунок с пересекающимися соединениями

Определение 3. Линии, соединяющие контакты макродискрета, будем называть *топометрическими линиями*.

Определение 4. Пересечение топометрической линии и соединения будем называть *следом соединения*.

Общий рисунок с непересекающимися соединениями описывается кортежем [8–10], состоящим из последовательного перечисления контактов и следов соединений на самой периферийной линии. Например, для рисунка соединений, представленного на рис. 7:

$$L_e=<\boldsymbol{e_1},d_1,\boldsymbol{e_2},c_1,d_2,\boldsymbol{e_3},c_2,\boldsymbol{e_4},d_3,b_1,\boldsymbol{e_5},c_3,d_4,b_2,\boldsymbol{e_6},a_1,b_3,d_5,c_4,\boldsymbol{e_7},d_6,c_5,\boldsymbol{e_8},d_7,\boldsymbol{e_9}>.$$

Здесь контакты выделены жирным шрифтом, в отличие от следов соединений нижестоящих контактов.

Размещение контактов и следов соединений на линии следующего нижнего уровня описывается кортежем с удаленными контактами предыдущего верхнего уровня:

$$L_d = <\boldsymbol{d_1},c_1,\boldsymbol{d_2},c_2,\boldsymbol{d_3},b_1,c_3,\boldsymbol{d_4},b_2,a_1,b_3,\boldsymbol{d_5},c_4,\boldsymbol{d_6},c_5,\boldsymbol{d_7}>;$$

$$L_c = <\boldsymbol{c_1},\boldsymbol{c_2},b_1,\boldsymbol{c_3},b_2,a_1,b_3,\boldsymbol{c_4},\boldsymbol{c_5}>;$$

$$L_b = <\boldsymbol{b_1},\boldsymbol{b_2},a_1,\boldsymbol{b_3}>.$$

Описание общего рисунка с пересекающимися соединениями носит иной характер, здесь приходится описывать расположение контактов и следов соединений отдельно для каждой линии уровня. Для записи таких рисунков с пересекающимися соединениями приходится четко различать контакты и следы соединений, отмечать следы штрихом. Например, для рисунка соединений представленного на рис. 9а:

$$L_e=<\boldsymbol{e_1},a_1,b_3,b_2,\boldsymbol{e_2},c_5,c_4,c_3,\boldsymbol{e_3},d_7,d_6,d_5,\boldsymbol{e_4},d_4,e_9,e_8,\boldsymbol{e_5},e_4,e_3,\boldsymbol{e_6},d_3,d_2,\boldsymbol{e_7},c_2,d_1,\boldsymbol{e_8},c_1,b_1,\boldsymbol{e_9}>;$$

$$L_d=<\boldsymbol{d_1},a_1,b_3,b_2,\boldsymbol{d_2},c_5,c_4,c_3,\boldsymbol{d_3},d_7,d_6,d_5,\boldsymbol{d_4},d_3,d_2,\boldsymbol{d_5},c_2,d_1,\boldsymbol{d_6},c_1,b_1,\boldsymbol{d_7}>;$$

$$L_c = <\boldsymbol{c_1},a_1,b_3,b_2,\boldsymbol{c_2},c_5,c_4,\boldsymbol{c_3},c_2,d_1,\boldsymbol{c_4},c_1,b_1,\boldsymbol{c_5}>;$$

$$L_b = <\boldsymbol{b_1},a_1,b_3,\boldsymbol{b_2},c_1,b_1,\boldsymbol{b_3}>.$$

Для рисунка соединений, представленного на рис. 9г:

$$L_e=<b_2,c_3,d_4,\boldsymbol{e_1},d_1,c_2,d_3,\boldsymbol{e_2},c_1,d_2,\boldsymbol{e_3},b_1,\boldsymbol{e_4},\boldsymbol{e_5},\boldsymbol{e_6},b_3,\boldsymbol{e_7},d_6,c_5,\boldsymbol{e_8},d_5,c_4,d_7,\boldsymbol{e_9},a_1>;$$

$$L_d = <b_2,c_3,\boldsymbol{d_1},c_2,c_1,\boldsymbol{d_2},b_1,\boldsymbol{d_3},\boldsymbol{d_4},\boldsymbol{d_5},b_3,\boldsymbol{d_6},c_4,c_5,\boldsymbol{d_7},a_1>;$$

$$L_c = <b_2,\boldsymbol{c_1},b_1,\boldsymbol{c_2},\boldsymbol{c_3},\boldsymbol{c_4},b_3,\boldsymbol{c_5},a_1>;$$

$$L_b = <\boldsymbol{b_1},\boldsymbol{b_2},\boldsymbol{b_3},a_1>.$$

3.3 Рисунок с непересекающимися соединениями

Для рисунка с непересекающимися соединениями размещение контактов и следов соединений можно вычислить, имея последовательность расположения контактов и следов соединений на самой верхней периферийной линии.

В свою очередь, линии уровня формируют содержимое диагональных каналов (рис. 10).

Представленная математическая модель позволяет определить загрузку макродискрета. Подсчет количества соединений в макродискрете в случае рисунка с непересекающимися соединениями можно получить следующим образом. Выбираем в макродискрете все номера контактов, например, в макродискрете $M_7 = <d_3,d_4,d_5,c_3>$ для рис. 7. Затем в кортеже соединений выбираем номера контактов, начиная с d_3 до следующего d_4. Вертикальной стороне макродискрета $<d_3 – d_4>$ принадлежит след соединений $\{b_1,c_3\}$ – линии уровня $L_d = <\boldsymbol{d_1},c_1,\boldsymbol{d_2},c_2,\underline{\boldsymbol{d_3}},\underline{b_1},\underline{c_3},\underline{\boldsymbol{d_4}},b_2,a_1,b_3,\boldsymbol{d_5},c_4,\boldsymbol{d_6},c_5,\boldsymbol{d_7}>$. Горизонтальной стороне макродискрета $<d_4 – d_5>$ принадлежит след соединений $\{b_2,a_1,b_3\}$ – линии уровня $L_d = <\boldsymbol{d_1},c_1,\boldsymbol{d_2},c_2,\boldsymbol{d_3},b_1,c_3,\underline{\boldsymbol{d_4}},\underline{b_2},\underline{a_1},\underline{b_3},\underline{\boldsymbol{d_5}},c_4,\boldsymbol{d_6},c_5,\boldsymbol{d_7}>$. Вертикальной стороне макродискрета $<d_5 – c_3>$ принадлежит след соединений $\{b_3,a_1,b_2\}$ – линии уровня $L_d = <\boldsymbol{d_1},c_1,\boldsymbol{d_2},c_2,\boldsymbol{d_3},b_1,\underline{c_3},\boldsymbol{d_4},\underline{b_2},\underline{a_1},\underline{b_3},\underline{\boldsymbol{d_5}},c_4,\boldsymbol{d_6},c_5,\boldsymbol{d_7}>$, определяемые в обратном направлении. И наконец, горизонтальной стороне макродискрета $<d_5 – c_3>$ принадлежит след соединений $\{b_1\}$ – линии уровня $L_d = <\boldsymbol{d_1},c_1,\boldsymbol{d_2},c_2,\underline{\boldsymbol{d_3}},\underline{b_1},\underline{c_3},\boldsymbol{d_4},b_2,a_1,b_3,\boldsymbol{d_5},c_4,\boldsymbol{d_6},c_5,\boldsymbol{d_7}>$. Множество соединений макродискрета $M_7 = \{b_1,c_3,b_3,a_1,b_2\}$. Количество соединений в макродискрете определяется как мощность множества. В данном случае мощность множества равна пяти. Данный процесс определения загрузки макродискрета можно изобразить диаграммой (рис. 11).

Данное правило применимо для любого макродискрета.

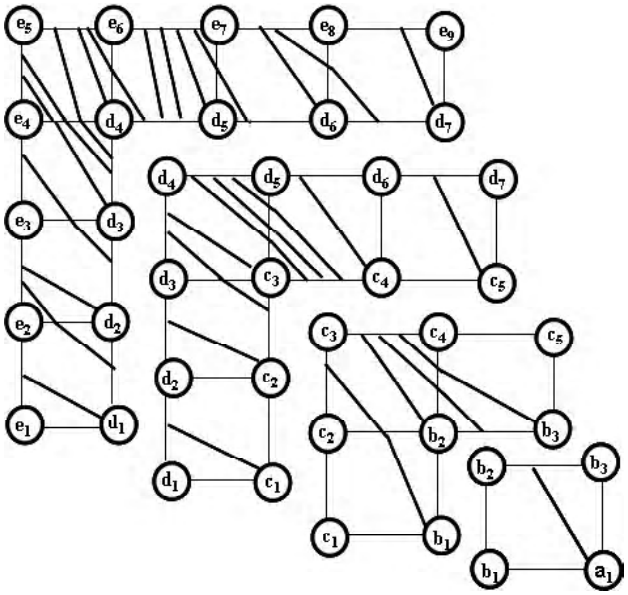


Рисунок 10 – Формирование диагональных каналов

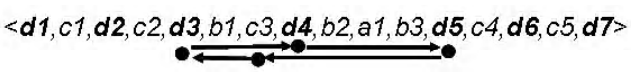


Рисунок 11 – Диаграмма определения проекций для сторон макродискрета $M_7 = <d_3,d_4,d_5,c_3>$

3.4 Рисунок с пересекающимися соединениями

В случае рисунков с пересекающимися соединениями определение следов соединений для сторон макродискретов расположенных на линиях уровня не представляет особого труда. Куда проблематичнее становится определение пересечений соединений и топометрических линий между двумя ближайшими линиями уровня (рис. 12, 13).

Будем рассматривать горизонтальные и вертикальные топометрические линии.

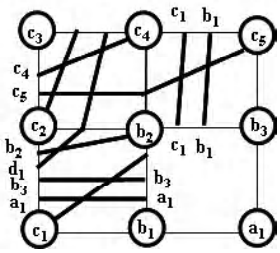


Рисунок 12 – Диагональный канал

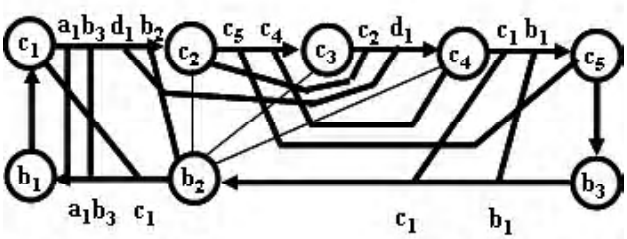


Рисунок 13 – Развернутый диагональный канал

В качестве примера рассмотрим диагональный канал, созданный линиями *c* и *b* на рис. 9а. Для определения пересечения соединений и топометрических линий приходится рассматривать диагональный канал как координатно-базисную систему и попарно определять пересечение соединений и топометрических линий, соответствующих сторонам макродискрета (рис. 14, контакты выделены более серым) [11].

Ребра координатно-базисной системы будем обозначать *q*, соединения будем обозначать *s*, топометрические линии – *w*. Определим проекции соединений и топометрических линий на координатно-базисную систему:

$$pr(w_1) = <q_6,q_7,q_8,q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18}>;$$

$$pr(w_2) = <q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18}>;$$

$$pr(w_3) = <q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18}>;$$

$$pr(w_4) = <q_{16},q_{17},q_{18}>;$$

$$pr(s_5)=<q_1,q_2,q_3,q_4,q_5,q_6,q_7,q_8,q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18},q_{19}>,$$

$$pr(s_6)=<q_2,q_3,q_4,q_5,q_6,q_7,q_8,q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18},q_{19},q_{20},q_{21}>,$$

$$pr(s_7)=$$

$$=<q_3,q_4,q_5,q_6,q_7,q_8,q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18},q_{19},q_{20}>;$$

$$pr(s_8) = <q_4,q_5,q_6,q_7,q_8,q_9,q_{10}>;$$

$$pr(s_9) = <q_5,q_6,q_7,q_8,q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18}>;$$

$$pr(s_{10}) = <q_6,q_7,q_8,q_9>;$$

$$pr(s_{11}) = <q_8,q_9,q_{10},q_{11}>;$$

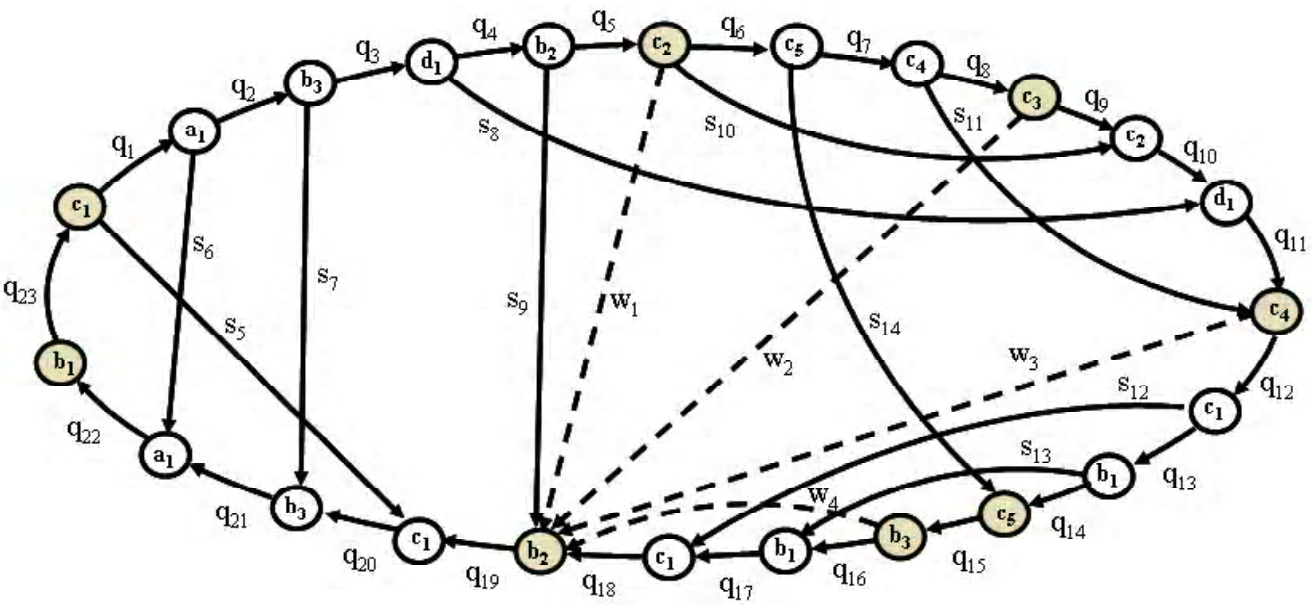


Рисунок 14 – Диагональный канал как координатно-базисная система

$pr(s_{12}) = <q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17}>$;

$pr(s_{13}) = <q_{14},q_{15},q_{16}>$;

$pr(s_{14}) = <q_7,q_8,q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14}>$.

Рассмотрим пересечение соединений как множественное пересечение проекций [8]:

$pr(w_1) \cap pr(s_5) =$

$=<q_6,q_7,q_8,q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18}> \cap$

$\cap <q_1,q_2,q_3,q_4,q_5,q_6,q_7,q_8,q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18},q_{19}> -$

$- pr(w_1) \in pr(s_5)$ – пересечения нет;

$pr(w_1) \cap pr(s_6) =$

$=<q_6,q_7,q_8,q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18}> \cap$

$\cap <q_2,q_3,q_4,q_5,q_6,q_7,q_8,q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18},q_{19},q_{20},q_{21}> -$

$- pr(w_1) \in pr(s_6)$ – пересечения нет;

$pr(w_1) \cap pr(s_7) =$

$=<q_6,q_7,q_8,q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18}> \cap$

$\cap <q_3,q_4,q_5,q_6,q_7,q_8,q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18},q_{19},q_{20}> -$

$- pr(w_1) \in pr(s_7)$ – пересечения нет;

$pr(w_1) \cap pr(s_8) =$

$=<q_6,q_7,q_8,q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18}> \cap$

$\cap <q_4,q_5,q_6,q_7,q_8,q_9,q_{10}> = pr(w_1) \cap pr(s_8) =$

$=<q_6,q_7,q_8,q_9,q_{10}>$ – пересечение есть;

$pr(w_1) \cap pr(s_9) =$

$<q_6,q_7,q_8,q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18}>$

$<q_5,q_6,q_7,q_8,q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18}> -$

$- pr(w_1) \in pr(s_9)$ – пересечения нет;

$pr(w_1) \cap pr(s_{10}) =$

$=<q_6,q_7,q_8,q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18}> \cap$

$\cap <q_6,q_7,q_8,q_9> - pr(s_{10}) \in pr(w_1)$ – пересечения нет;

$pr(w_1) \cap pr(s_{11}) =$

$=<q_6,q_7,q_8,q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18}> \cap$

$\cap <q_8,q_9,q_{10},q_{11}> - pr(s_{11}) \in pr(w_1)$ – пересечения нет;

$pr(w_1) \cap pr(s_{12}) =$

$=<q_6,q_7,q_8,q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18}> \cap$

$\cap <q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17}> - pr(s_{12}) \in pr(w_1)$ – пересечения нет;

$pr(w_1) \cap pr(s_{13}) =$

$=<q_6,q_7,q_8,q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18}> \cap$

$\cap <q_{14},q_{15},q_{16}> - pr(s_{13}) \in pr(w_1)$ – пересечения нет;

$pr(w_1) \cap pr(s_{14}) =$

$=<q_6,q_7,q_8,q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18}> \cap$

$\cap <q_7,q_8,q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14}> - pr(s_{14}) \in pr(w_1) -$

– пересечения нет;

$pr(w_2) \cap pr(s_5) =$

$=<q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18}>$

$<q_1,q_2,q_3,q_4,q_5,q_6,q_7,q_8,q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18},q_{19}> -$

$- pr(w_2) \in pr(s_5)$ – пересечения нет;

$pr(w_2) \cap pr(s_6) =$

$= <q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18}> \cap$

$\cap <q_2,q_3,q_4,q_5,q_6,q_7,q_8,q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18},q_{19},q_{20},q_{21}>$

$- pr(w_2) \in pr(s_6)$ – пересечения нет;

$pr(w_2) \cap pr(s_7) =$

$=<q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18}> \cap$

$\cap <q_3,q_4,q_5,q_6,q_7,q_8,q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18},q_{19},q_{20}> -$

$- pr(w_2) \in pr(s_7)$ – пересечения нет;

$pr(w_2) \cap pr(s_8) =$

$=<q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18}> \cap$

$\cap <q_4,q_5,q_6,q_7,q_8,q_9,q_{10}> = \mathrm{pr}(w_2) \cap \mathrm{pr}(s_8) =$
$=<q_9,q_{10}>$ – пересечение есть;

$\mathrm{pr}(w_2) \cap \mathrm{pr}(s_9) =$
$=<q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18}> \cap$
$\cap <q_5,q_6,q_7,q_8,q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18}>-$
$-\mathrm{pr}(w_2) \in \mathrm{pr}(s_9)$ – пересечения нет;

$\mathrm{pr}(w_2) \cap \mathrm{pr}(s_{10}) =$
$=<q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18}> \cap$
$\cap <q_6,q_7,q_8,q_9> = \mathrm{pr}(w_2) \cap \mathrm{pr}(s_{10}) = <q_9>$ – пересечение есть;

$\mathrm{pr}(w_2) \cap \mathrm{pr}(s_{11}) =$
$=<q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18}> \cap$
$\cap <q_8,q_9,q_{10},q_{11}> = \mathrm{pr}(w_2) \cap \mathrm{pr}(s_{11}) = <q_9,q_{10},q_{11}>$ – пересечение есть;

$\mathrm{pr}(w_2) \cap \mathrm{pr}(s_{12}) =$
$=<q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18}> \cap$
$\cap <q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17}> = \mathrm{pr}(s_{12}) \in \mathrm{pr}(w_2)$ – пересечения нет;

$\mathrm{pr}(w_2) \cap \mathrm{pr}(s_{13}) =$
$=<q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18}> \cap$
$\cap <q_{14},q_{15},q_{16}> = \mathrm{pr}(s_{13}) \in \mathrm{pr}(w_2)$ – пересечения нет;

$\mathrm{pr}(w_2) \cap \mathrm{pr}(s_{14}) =$
$=<q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18}> \cap$
$\cap <q_7,q_8,q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14}> = \mathrm{pr}(s_{14}) \cap \mathrm{pr}(w_2) =$
$=<q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14}>$ – пересечение есть;

. . . . . .

$\mathrm{pr}(s_5) \cap \mathrm{pr}(s_6) =$
$=<q_1,q_2,q_3,q_4,q_5,q_6,q_7,q_8,q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18},q_{19}> \cap$
$\cap <q_2,q_3,q_4,q_5,q_6,q_7,q_8,q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18},q_{19},q_{20},q_{21}> =$
$= \mathrm{pr}(s_5) \cap \mathrm{pr}(s_6) =$
$=<q_2,q_3,q_4,q_5,q_6,q_7,q_8,q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18},q_{19}>-$
– пересечение есть;

$\mathrm{pr}(s_5) \cap \mathrm{pr}(s_7) =$
$=<q_1,q_2,q_3,q_4,q_5,q_6,q_7,q_8,q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18},q_{19}> \cap$
$\cap <q_3,q_4,q_5,q_6,q_7,q_8,q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18},q_{19},q_{20}> =$
$= \mathrm{pr}(s_5) \cap \mathrm{pr}(s_7) =$
$=<q_3,q_4,q_5,q_6,q_7,q_8,q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18},q_{19}>-$
– пересечение есть;

. . . . . .

$\mathrm{pr}(s_8) \cap \mathrm{pr}(s_9) = <q_4,q_5,q_6,q_7,q_8,q_9,q_{10},q_{11}> \cap$
$\cap <q_5,q_6,q_7,q_8,q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17},q_{18}> =$
$= \mathrm{pr}(s_8) \cap \mathrm{pr}(s_9) =$
$= <q_5,q_6,q_7,q_8,q_9,q_{10},q_{11}>$ – пересечение есть;

$\mathrm{pr}(s_8) \cap \mathrm{pr}(s_{10}) = <q_4,q_5,q_6,q_7,q_8,q_9,q_{10},q_{11}> \cap$
$\cap <q_6,q_7,q_8,q_9> = \mathrm{pr}(s_{10}) \in \mathrm{pr}(s_8)$ – пересечения нет;

$\mathrm{pr}(s_8) \cap \mathrm{pr}(s_{11}) = <q_4,q_5,q_6,q_7,q_8,q_9,q_{10},q_{11}> \cap$
$\cap <q_6,q_7,q_8,q_9> = \mathrm{pr}(s_8) \cap \mathrm{pr}(s_{11}) =$
$= <q_6,q_7,q_8,q_9>$ – пересечение есть;

$\mathrm{pr}(s_8) \cap \mathrm{pr}(s_{12}) = <q_4,q_5,q_6,q_7,q_8,q_9,q_{10},q_{11}> \cap$
$\cap <q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17}> = \varnothing$ – пересечения нет;

. . . . . .

$\mathrm{pr}(s_{12}) \cap \mathrm{pr}(s_{13}) = <q_{13},q_{14},q_{15},q_{16},q_{17}> \cap$
$\cap <q_{14},q_{15},q_{16}> =$
$= \mathrm{pr}(s_{13}) \in \mathrm{pr}(s_{12})$ – пересечения нет;

. . . . . .

$\mathrm{pr}(s_{13}) \cap \mathrm{pr}(s_{14}) = <q_{14},q_{15},q_{16}> \cap$
$\cap <q_7,q_8,q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14}> =$
$= \mathrm{pr}(s_{13}) \cap \mathrm{pr}(s_{14}) = <q_{14}>$– пересечение есть.

Рассмотрим вопрос последовательности пересечения топометрических линий соединениями. С этой целью рассмотрим пересечение топометрической линии s_2:

$\mathrm{pr}(w_2) \cap \mathrm{pr}(s_8) = <q_9,q_{10}>$ – пересечение есть;

$\mathrm{pr}(w_2) \cap \mathrm{pr}(s_{10}) = <q_9>$ – пересечение есть;

$\mathrm{pr}(w_2) \cap \mathrm{pr}(s_{11}) = <q_9,q_{10},q_{11}>$ – пересечение есть;

$\mathrm{pr}(w_2) \cap \mathrm{pr}(s_{14}) = <q_9,q_{10},q_{11},q_{12},q_{13},q_{14}>$ – пересечение есть;

$\mathrm{pr}(s_8) \cap \mathrm{pr}(s_{10}) = \varnothing$ – пересечения нет;

$\mathrm{pr}(s_{11}) \cap \mathrm{pr}(s_{14}) = \varnothing$ – пересечения нет;

$\mathrm{pr}(s_8) \cap \mathrm{pr}(s_{11}) = <q_8,q_9,q_{10}>$ – пересечение есть;

$\mathrm{pr}(s_8) \cap \mathrm{pr}(s_{14}) = <q_7,q_8,q_9,q_{10}>$ – пересечение есть;

$\mathrm{pr}(s_{10}) \cap \mathrm{pr}(s_{11}) = <q_8,q_9>$ – пересечение есть;

$\mathrm{pr}(s_{10}) \cap \mathrm{pr}(s_{14}) = <q_7,q_8,q_9>$ – пересечение есть.

Таким образом, на топометрической линии $<c_3,b_2>$ вначале располагается след от соединения s_8 (с меньшей длиной проекций пересечения), затем след не пересекающегося с s_8 соединения s_{10} (с большей длиной проекций пересечения). Что касается не пересекающихся между собой соединений s_{11} и s_{14}, вначале располагается след соединения s_{11}, а затем след соединения s_{14}. Данные следы соединений могут быть расположены в любом месте на топометрической линии, но их порядок нарушать нельзя. Поэтому топометрическая линия может характеризоваться разными записями, например:

$<c_3,s_8(d_1),s_{10}(c_2),s_{11}(c_4),s_{14}(c_5),b_2>$;

или $<c_3,s_8(d_1),s_{11}(c_4),s_{10}(c_2),s_{14}(c_5),b_2>$;

или $<c_3,s_8(d_1),s_{11}(c_4),s_{14}(c_5),s_{10}(c_2),b_2>$ и т.д.

После определения расположения следов соединений на топометрических линиях определяется порядок проведения соединений в макродискретах, а также в горизонтальных и вертикальных каналах.

Опишем макродискреты как совокупность контактов и следов соединений:

$$M_1 = \{<b_1,a_1,b_3,c_1,b_2>,<b_2,c_1,b_1,b_3>,<b_3,a_1>,<a_1,b_1>\};$$

$$M_2 = \{<c_1,a_1,b_3,c_1,b_2,d_1,c_2>,<c_2,d_1,b_2>,<b_2,c_1,b_3,a_1,b_1>,<b_1,c_1>\};$$

$$M_3 = <c_2,c_5,c_4,c_3>,<c_3,c_2,d_1,c_4>,<c_4,c_5,b_2>,<b_2,d_1,c_2>\};$$

$$M_4 = \{<b_2,c_5,c_4>,<c_4,c_1,b_1,c_5>,<c_5,b_3>,<b_3,b_1,c_1,b_2>\};$$

$$M_5 = \{d_1,a_1,b_3,b_2,d_2>,<d_2,c_2>,<c_2,d_1,b_2,b_3,a_1,c_1>,<c_1,d_1>\};$$

$$M_6 = \{<d_2,c_5,c_4,c_3,d_3>,<d_3,d_2,c_3>,<c_3,c_4,c_5,c_2>,<c_2,d_2>\};$$

$$M_7 = \{<d_3,d_7,d_6,d_5,d_4>,<d_4,d_3,d_2,d_5>,<d_5,d_6,d_7,c_3>,<c_3,d_2,d_3>\};$$

$$M_8 = \{<c_3,d_7,d_6,d_5>,<d_5,c_2,d_1,d_6>,<d_6,d_7,c_4>,<c_4,d_1,c_2,c_3>\};$$

$$M_9 = \{<c_4,d_7,d_6>,<d_6,c_1,b_1,d_7>,<d_7,c_5>,<c_5,b_1,c_1,c_4>\};$$

$$M_{10} = \{<e_1,a_1,b_3,b_2,e_2>,<e_2,d_2>,<d_2,b_2,b_3,a_1,d_1>,<d_1,e_1>\};$$

$$M_{11} = \{<e_2,c_5,c_4,c_3,e_3>,<e_3,d_3>,<d_3,c_3,c_4,c_5,d_2>,<d_2,e_2>\};$$

$$M_{12} = \{<e_3,d_7,d_6,d_5,e_4>,<e_4,e_3,d_4>,<d_4,d_5,d_6,d_7,d_3>,<d_3,e_3>\};$$

$$M_{13} = \{<e_4,d_4,e_9,e_8,e_5>,<e_5,e_4,e_3,e_6>,<e_6,e_8,e_9,d_4>,<d_4,e_3,e_4>\};$$

$$M_{14} = \{<d_4,e_9,e_8,e_6>,<e_6,d_3,d_2,e_7>,<e_7,e_8,e_9,d_5>,<d_5,d_2,d_3,d_4>\};$$

$$M_{15} = \{<d_5,e_9,e_8,e_7>,<e_7,c_2,d_1,e_8>,<e_8,e_9,d_6>,<d_6,d_1,c_1,d_5>\};$$

$$M_{16} = \{<d_6,e_9,e_8>,<e_8,c_1,b_1,e_9>,<e_9,d_7>,<d_7,b_1,c_1,d_6>\}.$$

Запишем вертикальные каналы как множество макродискретов:

$$B_1 = \{M_1,M_4,M_9,M_{16}\} =$$
$$<b_1,a_1,b_3,c_1,b_2,c_5,c_4,d_7,d_6,e_9,e_8,c_1,b_1,e_9,d_7,c_5,b_3,a_1,b_1>;$$

$$B_2 = \{M_2,M_3,M_8,M_{15}\} =$$
$$<c_1,a_1,b_3,b_2,c_2,c_5,c_4,c_3,d_7,d_6,d_5,e_9,e_8,e_7,c_2,d_1,e_8,e_9,d_6,d_7,c_4,c_5,b_2,c_1,b_3,$$
$$a_1,b_1,c_1>;$$

$$B_3 = \{M_5,M_6,M_7,M_{14}\} =$$
$$=<d_1,a_1,b_3,b_2,d_2,c_5,c_4,c_3,d_3,d_7,d_6,d_5,d_4,e_9,e_8,e_6,d_3,d_2,e_7,e_8,$$
$$e_9,d_5,d_6,d_7,c_3,c_4,c_5,c_2,d_1,b_2,b_3,a_1,c_1,d_1>;$$

$$B_4 = \{M_{10},M_{11},M_{12},M_{13}\} =$$
$$=<e_1,a_1,b_3,b_2,e_2,c_5,c_4,c_3,e_3,d_7,d_6,d_5,e_4,d_4,e_9,e_8,e_5,e_4,e_3,$$
$$e_6,e_8,e_9,d_4,d_5,d_6,d_7,d_3,c_3,c_4,c_5,d_2,b_2,b_3,a_1,d_1,e_1>.$$

Запишем горизонтальные каналы как множество макродискретов:

$$\Gamma_1 = \{M_1,M_2,M_5,M_{10}\} =$$
$$<a_1,b_1,c_1,d_1,e_1,a_1,b_3,b_2,e_2,d_2,c_2,d_1,b_2,c_1,b_1,b_3,a_1>;$$

$$\Gamma_2 = \{M_3,M_4,M_6,M_{11}\} =$$
$$=<b_3,b_1,c_1,b_2,d_1,c_2,d_2,e_2,c_5,c_4,c_3,e_3,d_3,d_2,c_3,c_2,d_1,c_4,c_1,b_1,c_5,b_3>;$$

$$\Gamma_3 = \{M_7,M_8,M_9,M_{12}\} =$$
$$<c_5,b_1,c_1,c_4,d_1,c_2,c_3,d_2,d_3,d_7,d_6,d_5,e_4,e_3,d_4,d_3,d_2,d_5,c_2,d_1,$$
$$d_6,c_1,b_1,d_7,c_5>;$$

$$\Gamma_4 = \{M_{13},M_{14},M_{15},M_{16}\} =$$
$$<d_7,b_1,c_1,d_6,d_1,c_2,d_5,d_2,d_3,d_4,e_3,e_4,d_4,e_9,e_8,e_5,e_4,e_3,e_6,d_3,d_2,e_7,c_2,d_1,$$
$$e_8,c_1,b_1,e_9,d_7>.$$

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для проверки работы математической модели проведены расчеты для BGA компонент размером 18x18 контактов. Предложенная математическая модель была использована для разработки микроэлектромеханического многозондового подключающего устройства (МПУ), предназначенного для подключения электронных компонентов (ЭК) с матричными выводами шарикового типа (BGA/CSP) на операциях входного и функционального контроля к автоматизированным контролирующим комплексам или специализированным пультам контроля перед подачей ЭК на последующие операции сборки радиоэлектронных средств (блоков, модулей) [12].

В качестве объекта контроля была выбрана микросхема FG-320, характеризующаяся следующими параметрами:

– количество выводов 320 (18x18, без четырех выводов в центре);

– шаг размещения выводов – 1 мм;

– диаметр шарикового вывода – 600 мкм [12].

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате эксперимента предложенный метод, основанный на применении теоретико-множественного описания, снизил трудоемкость и время проектирования топологии гибкого шлейфа МПУ (рис. 15), а также может быть использован для разработки топологий микроэлектромеханических структур различного назначения [13].

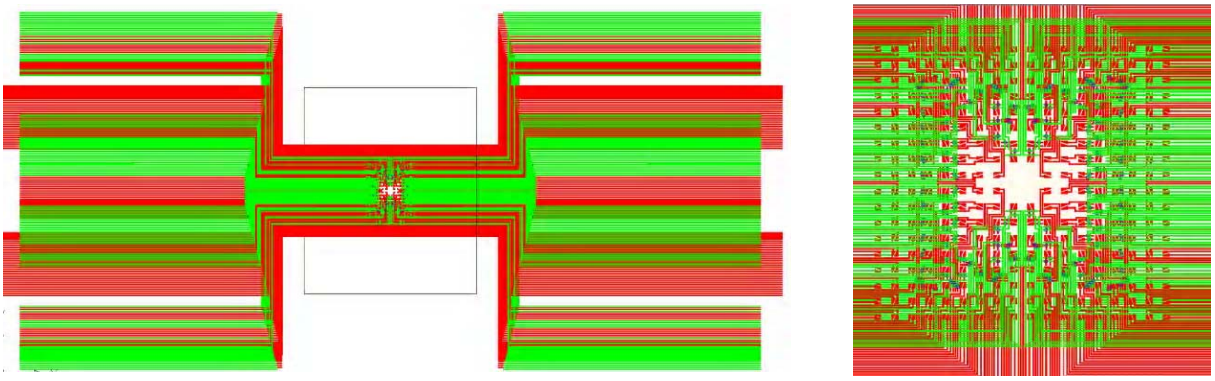


Рисунок 15 – Топология прижимающей пластины

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенный метод формирования рисунка схемы по сравнению с метрическими методами [5, 6, 14] обеспечивает более качественные результаты проведения соединений, сокращая при этом время проектирования.

Также, в отличие от существующих методов, предложенный метод автоматически определяет пересечение проводников, загрузку макродискретов и расслоение схемы, то есть еще до этапа трассировки можно проводить оптимизацию будущего решения.

ВЫВОДЫ

Предложенная математическая модель позволяет описать рисунок проведения соединений между контактами BGA компонент теоретико-множественными методами, без конкретной прорисовки на плоскости. Данная модель позволяет хранить, описывать и видоизменять информацию общего рисунка соединений, как в случае проведения непересекающихся соединений, так и при проведении соединений с пересечением, используя явления симметрии.

Предложенная математическая модель применялась при разработке микроэлектромеханического многозондового подключающеого устройства [12], предназначенного для подключения электронных компонентов (ЭК) с матричными выводами шарикового типа (BGA/CSP) на операциях входного и функционального контроля. Результаты работы математической модели описаны и представлены в работах [13, 15].

Так же математическая модель может быть применима к различным известным на сегодняшний день методам проведения соединений, с различными типами стратегий разводки, таких как разводка на косточках, разводка с различными типами переходных отверстий и т.д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стешенко В. Б. ACCEL EDA - PCAD2001: Проектирование печатных плат / В. Б. Стешенко. – М. : «Нолидж», 2005. – 512 с.
2. Курапов С. В. Два подхода к проведению соединений в плоских конструктивах / С. В. Курапов, М. В. Давидовский // Компоненты и технологии. – 2015. – № 7. – С. 142–147.
3. Курапов С. В. Методы построения топологического рисунка графа / С. В. Курапов, А. В. Толок // Автоматика и телемеханика. – 2013. – № 9. – С. 78–97.
4. Барановский И. Современный дизайн и технологии печатных плат: вопрос-ответ Особенности разработки печатных плат с применением микросхем в корпусах BGA [Электрон. ресурс] / И. Барановский. – режим доступа: http://ictech.com.ua/files/publications/tech_articles/ikt_05-09.pdf
5. Charles Pfeil BGA Breakouts and Routing / C. Pfeil, 2010. – 170 p.
6. Лузин С. САПР TopoR: трассировка печатных плат с BGA-компонентами / С. Лузин, О. Полубасов // Современная электроника. – 2008. – № 7. – С. 44–48.
7. Бухтеев А. Неизвестный САПР страны восходящего солнца – продукты компании Zuken / А. Бухтеев // Электроника : наука, технология, бизнес. – 2004. – № 2. – С. 34–35.
8. Кофман А. Введение в прикладную комбинаторику / А. Кофман. – М. : Наука, ГРФМЛ, 1975. – 480 с.
9. Свами М. Графы, сети и алгоритмы / М. Свами, К. Тхуласираман. – М. : Мир, 1984. – 455 с.
10. Рейнгольд Э. Комбинаторные алгоритмы, теория и практика / [Э. Рейнгольд, Ю. Нивергельт, Н. Дер]. – М. : Мир, 1980. – 480 с.
11. Раппопорт Л. И. Векторная алгебра пересечений / [Л. И. Раппопорт, Б. Н. Мороговский, С. А. Поливцев] // В кн. : Многопроцессорные вычислительные структуры. – Таганрог. – 1982. – Вып. 2 (11). – С. 53–56.
12. Пат. 95190 України: МПК H05K 3/40 Мікроелектромеханічний багатозондовий підмикальний пристрій / [Невлюдов І. Ш., Палагін В. А., Разумов-Фризюк Є. А., Жарікова І. В. та ін.,] опубл. 11.07.2011. – Бюл. № 13.
13. Трассировка подключающей пластины многозондового устройства контроля bga-компонентов / [И. В. Жарикова, С. В. Курапов, И. Ш. Невлюдов и др.] // Вісник Запорізького національного університету. Фізико-математичні науки. – 2013. – № 2. – С. 28–36.
14. Вейн Паллием Проектируем платы с BGA / Вейн Паллием, перевод Ю. Потапова. – К.: №5 2002 г.
15. Трассировка подключающей пластины многозондового устройства контроля bga-компонентов / [И. В. Жарикова, С. В. Курапов, И. Ш. Невлюдов, и др.] // Функциональная база наноэлектроники : VI Международная научная конференция, Харьков – Крым, 30 сентября – 4 октября 2013 г.: тезисы доклада : Харьков. – Крым : ХНУРЭ, 2013. – С. 129–132.

Статья поступила в редакцию 23.02.2016.
После доработки 28.09.2016.

Курапов С. В.[1], Чеченя В. С.[2]
[1]Канд. физ.-мат. наук, доцент Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна
[2]Аспірант Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОВЕДЕННЯ З'ЄДНАНЬ В ОБЛАСТІ BGA КОМПОНЕНТ

У статті розглянута проблема проектування радіоелектронної апаратури плоских конструктивів в області BGA. Показано, що трасування плоских конструктивів в області BGA не дає бажаних результатів через відсутність універсальної математичної моделі і часто здійснюється вручну. Тому в даній роботі представлена універсальна математична модель, заснована на теоретико-множинному описі розташування з'єднань між контактами BGA компонент для виведення їх на периферію, що дуже важливо при проектуванні плоских конструктивів. Також в роботі наведено детальний опис загального рисунка схеми для плоских конструктивів з матричним розташуванням контактів, таких як BGA, як для з'єднань, які не перетинаються, так і опис розташування з'єднань, які перетинаються. Запропоновано метод визначення перетину провідників для розташування з'єднань, які перетинаються. Показано, що кортеж елементів схеми може бути використаний для опису проведення з'єднань, перевірки завантаження макродискретів і визначення перетину провідників. Запропонована універсальна математична модель може знизити трудомісткість і час проектування топології плоских конструктивів, а також може бути використана для розробки топології мікроелектромеханічних структур різного призначення.

Ключові слова: BGA компонент, схема, рисунок, макродискрет, кортеж, множина, канал.

Kurapov S. V.[1], Chechenja V. S.[2]
[1]Candidate of physical and mathematical sciences, Associate Professor of Zaporizhzhya National University, Ukraine
[2]Postgraduate student of Zaporizhzhya National University, Zaporizhzhya, Ukraine

MATHEMATICAL MODEL OF CONNECTION TRACING IN THE AREA OF BGA COMPONENTS

The problem of design of the radio-electronic equipment of printed circuit boards in the field of a BGA component is considered in the paper. This problem is connected with the fact that the trace of plane constructs in the area of BGA component doesn't yield the required results because of the lack of universal mathematical model and usually is routed manually.

This paper presents the universal mathematical model based on multiple description of the location of connection between contacts of BGA components to output them to the outside, which is very important for designing planar constructs. Also, there is a detailed description of the circuit pattern for circuits with matrix arrangement of contacts such as BGA, both location description of crossing and uncrossing compounds. The article proposes the method for determining the location of the intersection of the conductor for intersecting connections. It shows that the set of circuit elements can be used for the description of compounds, fragments and check load conductors intersection determination. The proposed universal model can reduce the complexity and time of topology design of the plane constructs, and can be used to develop topologies of microelectromechanical structures for various purposes.

Keywords: BGA component, layout, drawing, discrete, sequence, channel.

REFERENCES

1. Steshenko V.B. ACCEL EDA – PCAD2001: Proektirovanie pechatnyh plat. Moscow, Nolidzh, 2005, 512 p.
2. Kurapov S. V., Davidovskij M. V. Dva podhoda k provedeniju soedinenij v ploskih konstruktivah, *Komponenty i tehnologii*, 2015, No. 7, pp. 142–147.
3. Kurapov S. V., Tolok A. V. Metody postroenija topologicheskogo risunka grafa, *Avtomatika i telemehanika*, 2013, No. 9, pp. 78–97.
4. Baranovskij I. Sovremennyj dizajn i tehnologii pechatnyh plat: vopros-otvet Osobennosti razrabotki pechatnyh plat s primeneniem mikroshem v korpusah BGA [Jelektron. resurs]. Rezhim dostupa: http://ictech.com.ua/files/publications/tech_articles/ikt_05-09.pdf
5. Charles Pfeil BGA Breakouts and Routing, 2010, 170 p.
6. Luzin C., Polubasov O. SAPR TopoR: trassirovka pechatnyh plat s BGA-komponentami. Moscow, STA-PRESS, Sovremennaja jelektronika, 2008, No.7, pp. 44–48.
7. Buxteev A. Neizvestnyj SAPR strany vosxodyashhego solnca – produkty kompanii Zuken, *E'lektronika : nauka, texnologiya, biznes,* 2004, No. 2, pp. 34–35.
8. Kofman A. Vvedenie v prikladnuju kombinatoriku. Moscow, Nauka, GRFML, 1975, 480 p.
9. Svami M. Thulasiraman K. Grafy, seti i algoritmy. Moscow, Mir, 1984, 455 p.
10. Rejngol'd Je., Nivergel't Ju., Der N. Kombinatornye algoritmy, teorija i praktika. Moscow, Mir, 1980, 480 p.
11. Rappoport L. I., Morogovskij B. N., Polivcev S. A. Vektornaja algebra peresechenij, V *kn.: Mnogoprocessornye vychislitel'nye struktury*, Taganrog, 1982, Vyp. 2(11), pp. 53–56.
12. Nevljudov I. Sh., Palagin V. A., Razumov-Frizjuk Je. A., Zharikova I. V. ta in., Pat. 95190 Ukraïni: MPK N05K 3/40 Mikroelektromehanichnij bagatozondovij pidmikal'nij pristrij, opubl. 11.07.2011. – Bjul. № 13.
13. Zharikova I. V., Kurapov S. V., Nevljudov I. Sh., Palagin V. A., Razumov-Frizjuk E. A., Chechenja V. S. Trassirovka podkljuchajushhej plastiny mnogozondovogo ustrojstva kontrolja bga-komponentov, *Visnik Zaporiz'kogo nacional'nogo universitetu. Fiziko-matematichni nauki,* 2013, No. 2, pp. 28–36.
14. Vejn Palliem Proektiruem platy s BGA / Vejn Palliem, perevod Ju. Potapova. Kiev, № 5 2002g.
15. Zharikova I. V., Kurapov S. V., Nevljudov I. Sh., Palagin V. A., Razumov-Frizjuk E. A., Chechenja V. S. Trassirovka podkljuchajushhej plastiny mnogozondovogo ustrojstva kontrolja bga-komponentov, *Funkcional'naja baza nanojelektroniki: VI Mezhdunarodnaja nauchnaja konferencija, Har'kov*. Krym, 30 sentjabrja – 4 oktjabrja 2013 g.: tezisy doklada. Har'kov – Krym: HNURJe, 2013, pp. 129–132.

УДК 621.396.96

Пиза Д. М.[1], Лаврентьев В. Н.[2], Семенов Д. С.[3]

[1]Д-р техн. наук, профессор, директор института информатики и радиоэлектроники Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина
[2]Канд. техн. наук, начальник отделения казенного предприятия «НПК «Искра», Запорожье, Украина
[3]Начальник отдела казенного предприятия «НПК «Искра», Запорожье, Украина

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ КЛАССИФИЦИРОВАННОЙ ОБУЧАЮЩЕЙ ВЫБОРКИ ДЛЯ АВТОКОМПЕНСАТОРА ПОМЕХ ПРИ ВРЕМЯ-ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛОВ

В условиях воздействия комбинированных помех эффективность работы радиолокационных средств существенно ухудшается. Это обусловлено декорреляцией точечного источника активной помехи пространственно-распределенным характером пассивной помехи. Рассмотрены ограничения, возникающие при формировании классифицированной обучающей выборки для адаптации весовых коэффициентов автокомпенсатора помех при время-пространственной обработке сигналов. Разработан новый метод формирования классифицированной обучающей выборки, использующий как спектральные, так и корреляционные отличия в структуре комбинированных помех. Предложенный метод позволяет уменьшить влияние пассивной составляющей комбинированной помехи на процесс компенсации активной составляющей.

Ключевые слова: обработка радиолокационных сигналов, адаптивная пространственная фильтрация, комбинированная помеха, классифицированная обучающая выборка, нормированный коэффициент межканальной корреляции.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее сложным и наиболее вероятным режимом работы в современных условиях является функционирование радиолокационных средств при одновременном воздействии активных маскирующих и пассивных (комбинированных) помех [1]. Возможным методом повышения их помехозащищенности является использование известных последовательных двухэтапных процедур время-пространственной или время-поляризационной фильтрации сигналов [2]. Временная (межпериодная) фильтрация сигналов на фоне пассивных помех в современных радиолокационных станциях (РЛС) выполняется путем использования дискретного преобразования Фурье [3, 4]. Пространственную фильтрацию сигналов преимущественно используют при воздействии активных маскирующих (АМП) помех по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны (ДНА) [5]. Поляризационную фильтрацию используют при защите радиолокационных средств от помех, действующих в направлении главного луча ДНА [6].

Пространственную или поляризационную фильтрацию сигналов на фоне АМП реализуют путем использования дополнительных компенсационных каналов приема и различных видов автокомпенсаторов помех или адаптивных антенных решеток. В условиях одновременного воздействия пассивной составляющей комбинированной помехи АМП, генерируемая точечным источником, декоррелируется [7], что приводит к существенному ухудшению ее компенсации. Поэтому проблема формирования классифицированной обучающей выборки для адаптации весовых коэффициентов автокомпенсатора, порожденной только АМП, в современных условиях достаточно актуальна.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При время-пространственной фильтрации пространственной обработке предшествует временная межпериодная пачечная обработка принимаемых радиолокационных сигналов. В этом случае пространственная обработка сигналов реализуется в каждом из каналов многоканального допплеровского фильтра. При этом формирование весовых коэффициентов адаптивного пространственного фильтра осуществляется в границах текущей частотной пачки по информации фазовых фильтров основного и компенсационного каналов с номерами $N/2$, где N – общее количество фазовых фильтров [2]. Последнее обусловлено относительно малой вероятностью нахождения пассивной помехи в фильтрах с номером $N/2$, где накапливаются сигналы с межпериодным фазовым сдвигом, равным 180°. Однако в реальных условиях работы РЛС при время-пространственной фильтрации фазовые сдвиги пассивной помехи могут достигать и даже превышать значения, равные 180°. Еще одним ограничивающим фактором при формировании классифицированной обучающей выборки в этом случае является межфильтровое «просачивание» пассивной помехи через боковые лепестки смежных фазовых фильтров. Поэтому целью данной работы является разработка метода формирования классифицированной обучающей выборки путем совместного использования спектральных и корреляционных отличий в структуре комбинированных помех.

2 АНАЛИЗ ИЗВЕСТНОГО МЕТОДА КОМПЕНСАЦИИ АКТИВНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ КОМБИНИРОВАННОЙ ПОМЕХИ

Временная межпериодная фильтрация в известном методе компенсации активной составляющей комбини-

© Пиза Д. М., Лаврентьев В. Н., Семенов Д. С., 2016
DOI 10.15588/1607-3274-2016-3-2

рованной помехи [2], выполняемая на первом этапе время-пространственной обработки, является пачечной и реализуется использованием дискретного преобразования Фурье, которое выполняется в каждом дискрете дальности частотной пачки:

$$\dot{X}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n \dot{X}_i(n) \exp\{j\frac{2n\pi}{N}\}, \qquad (1)$$

где $\dot{X}(k)$ – комплексное значение сигналов на выходе k-го фазового фильтра, N – количество точек преобразования Фурье; $\dot{X}_i(n)$ – комплексное значение амплитуды сигнала в i-тый момент времени в n-ном периоде повторения; a_n – коэффициенты весового окна; $k \in [0, N-1]$.

Комплексное значение сигнала $\dot{U}_\Sigma$ на выходе пространственного фильтра можно записать в следующем виде:

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

при этом текущее комплексное значение весового коэффициента $\dot{W}_{i+1}$ в схеме с использованием классического алгоритма Уидроу [8] определяется как

$$\dot{W}_{i+1} = \dot{W}_i - 2\mu \dot{U}_k^* \dot{U}_\Sigma. \qquad (3)$$

В выражениях (2), (3) $\dot{U}_0$ и $\dot{U}_k$ – комплексные значения сигналов на основном и на компенсационном входе автокомпенсатора, соответственно, $\dot{W}_i$ – комплексное значение весового коэффициента на предыдущей итерации; μ – скалярная величина, определяющая глубину обратной связи; * – знак комплексного сопряжения.

Для пояснения сущности анализируемого метода на рис. 1 приведена структурная схема время-пространственной обработки с использованием спектральных отличий пассивной составляющей комбинированной помехи [2]. Схема работает следующим образом. С приемников основного и компенсационного каналов РЛС на входы устройств временной фильтрации основного 1 и компенсационного 2 каналов поступают сигналы, отраженные от лоцируемых целей, мешающих объектов (пассивные помехи) и шумовые помехи, которые могут излучаться специальными устройствами. С помощью устройств временной фильтрации 1 и 2 происходит когерентное накопление полезных сигналов и распределение по фазовым фильтрам смеси принимаемых сигналов и помех.

Распределенные по фазовым фильтрам сигналы основного и компенсационного каналов, поступают к устройствам памяти основного 3 и компенсационного 4 каналов, где задерживаются на время расчета весового коэффициента в формирователе 6, чтобы рассчитанный весовой коэффициент был использован для компенсации помехи в той частотной пачке, на основании которой производился его расчет.

В качестве обучающей классифицированной выборки в формирователе весовых коэффициентов 6 автокомпенсатора 5 используются выходные сигналы фазовых каналов с номером $N/2$ компенсационного канала приема и выходного сигнала сумматора 9. Использование фильтровых каналов с номерами $N/2$ в качестве обучающей классифицированной выборки основано на предположении, что вероятность нахождения пассивной помехи в фазовом канале с номером $N/2$ с соответствующими доплеровскими сдвигами частоты наименьшая.

На время расчета весового коэффициента в формирователе 6, устройство синхронизации 11 переводит запоминающие устройства 3, 4 и 7 в режим линейной передачи информации. При этом сигналы с фазовых фильтров с номерами $N/2$ поступают на соответствующие входы автокомпенсатора 5. В формирователе весового коэффициента 6 использован алгоритм вычисления весовых коэффициентов с корреляционной обратной связью (3). После вычисления весового коэффициента устройство синхронизации 11 переводит запоминающее устройство 7 в режим запоминания весового коэффициента

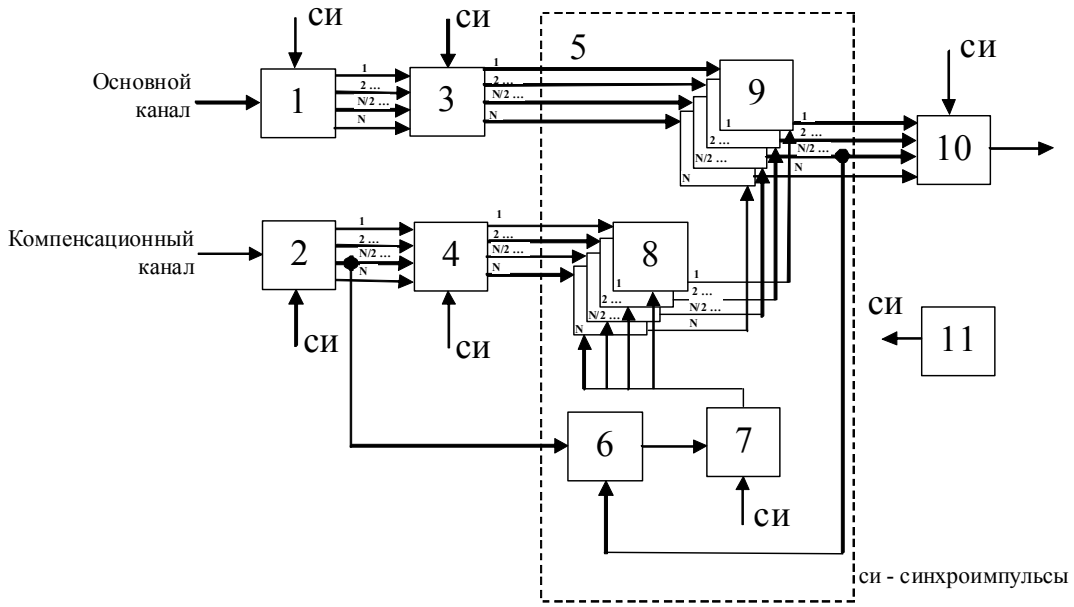


Рисунок 1 – Структурная схема время-пространственной обработки с использованием спектральных отличий

до последующей процедуры адаптации, а запоминающие устройства 3 и 4 – в режим передачи по всем N каналам. При этом сигналы с выходов запоминающего устройства 4 компенсационного канала в N умножителях 8 перемножаются на сохраненное в запоминающем устройстве 7 значение весового коэффициента. Результат умножения по каждому из фазовых фильтров поступает ко вторым входам соответствующего сумматора 9, где складывается с информацией с выходов соответствующих фильтров основного канала. Такие вычисления проводят для каждого дискрета дальности текущей частотной пачки. Таким образом проводится процедура пространственной фильтрации и получают распределенные по фазовым фильтрам сигналы, в которых скомпенсирована активная составляющая комбинированной помехи.

Информация с выходов сумматора 9 поступает на устройство некогерентной обработки 10, в котором происходит подавление пассивных помех и обнаружение сигналов, отраженных от целей.

Существенным недостатком используемого в [2] метода формирования классифицированной выборки является низкая эффективность подавления АМП вследствие ее межканальной декорреляции пассивной помехой [7]. Это обусловлено относительно высокой вероятностью наличия пассивной помехи в фильтрах основного и компенсационного канала с номерами $N/2$. Действительно, учитывая функциональную связь между частотой Доплера $F_Д$ и радиальной составляющей скорости пассивной помехи Vr

$$F_Д = \frac{2V_r}{\lambda}, \qquad (4)$$

где λ – длина волны, и, например, при λ=0,1 м и Vr=20 м/с, частота Доплера равняется 400 Гц, что может равняться или даже превышать половину частоты повторения импульсов РЛС. При этом пассивная помеха может концентрироваться в фазовом фильтре с номером $N/2$. Это подтверждается также результатами регистрации пассивных помех в полигонных условиях.

Кроме того, ограничивающим фактором подавления АМП есть межфильтровое «просачивание» пассивной помехи через боковые лепестки смежных фазовых фильтров. Так, например, при согласованной фильтрации уровень первого бокового лепестка фильтра составляет минус 13 дБ.

3 МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ КЛАССИФИЦИРОВАННОЙ ОБУЧАЮЩЕЙ ВЫБОРКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕКТРАЛЬНЫХ И ВРЕМЕННЫХ ОТЛИЧИЙ В СТРУКТУРЕ ПОМЕХ

Известно, что отражения от преднамеренных пассивных помех имеют локальный характер [9]. Например, размеры облака из одной пачки дипольных отражателей могут составлять 0,5…1 км через 5 минут после сброса и 1,6…2 км через 10 минут после сброса. Наиболее мощные облачные системы с большой удельной площадью рассеяния в разрешаемом объеме (облака вертикального развития типа Cumulus) также имеют локальный характер [10]. Анализ структуры других облачных систем, которые могут находиться на разных ярусах и имеют различную толщину, дает основание считать, что распределение облачных систем по дальности относительно РЛС имеет вероятностный характер.

Таким образом, можно считать, что отраженные от гидрометеоров сигналы (пассивные помехи) имеют нестационарный по дальности (времени) характер. Это может быть использовано для повышения качества формирования классифицированной обучающей выборки для адаптации весовых коэффициентов автокомпенсатора.

Учитывая упомянутое ранее явление декорреляции АМП пассивной помехой, предложен новый метод формирования классифицированной обучающей выборки, в котором для повышения ее качества используются не только спектральные отличия в структуре составляющих комбинированной помехи, но и межканальные корреляционные отличия.

Для пояснения сущности метода формирования классифицированной обучающей выборки на рис. 2 приведена структурная схема время-пространственной обработки с использованием спектральных и корреляционных отличий в структуре комбинированной помехи.

Повышение качества формирования классифицированной обучающей выборки в структурной схеме время-пространственной обработки достигается текущим анализом распределения уровня пассивной составляющей комбинированной помехи, которая является нестационарным по дальности процессом. Такой анализ реализуется путем текущего оценивания модуля межканального нормированного коэффициента корреляции $|\dot{\rho}|$ комбинированной помехи на выходах фильтров с номером $N/2$ основного и компенсационного каналов приема:

$$|\dot{\rho}| = \frac{\left|\overline{\dot{U}_0 \dot{U}_k^*}\right|}{\sqrt{\left|\overline{\dot{U}_0}\right|^2 \left|\overline{\dot{U}_k}\right|^2}}. \qquad (5)$$

В приведенной на рис. 2 структурной схеме устройства с номерами от 1 по 11 аналогичны устройствам рис. 1 с теми же номерами. Анализ распределения пассивной помехи по дальности и выбор интервала, на котором пассивная помеха отсутствует или имеет наименьший уровень осуществляется вычислителем модуля коэффициента межканальной корреляции 12, линией задержки 13 и устройством выбора максимума 14. Вычисление модуля коэффициента межканальной корреляции $|\dot{\rho}|$ реализуется методом «скользящего окна» на интервалах, равных m дискретам дальности. При этом величина m определяется необходимой длительностью классифицированной обучающей выборки для адаптации весовых коэффициентов автокомпенсатора, а количество интервалов оценивания распределения уровня пассивной помехи по дальности n равняется количеству отводов линий задержки 13 и зависит от количества дискретов разрешения по дальности РЛС.

Синхронно с вычислением модуля межканального коэффициента корреляции на тех же интервалах выполняется прямое вычисление весовых коэффициентов в формирователе 6 по формуле:

$$\dot{W}_i = \frac{\overline{\dot{U}_0 \quad \dot{U}_k^*}}{\left|\overline{\dot{U}_k}\right|^2}. \qquad (6)$$

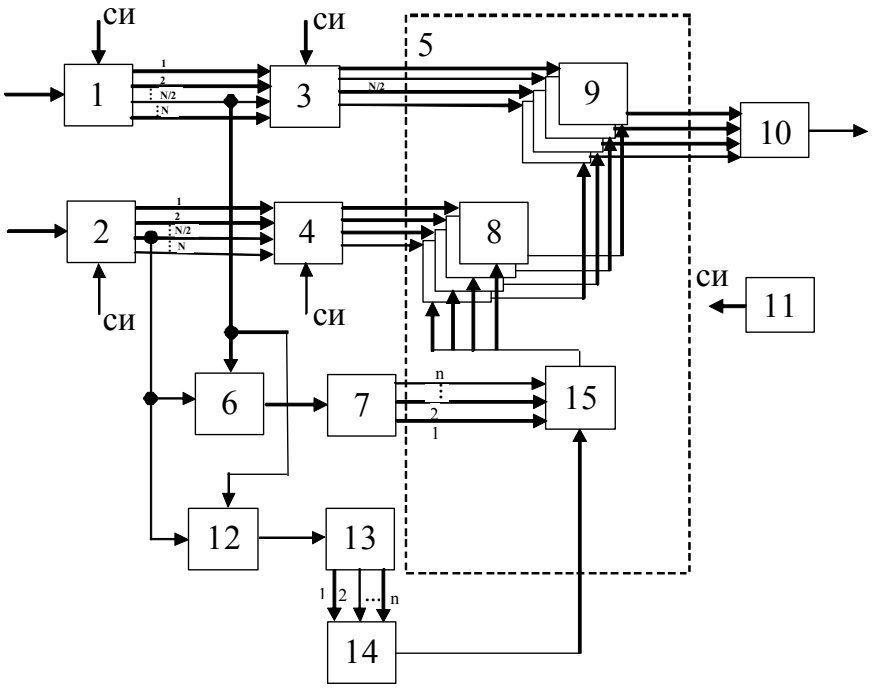


Рисунок 2 – Структурная схема время-пространственной обработки с использованием спектральных и корреляционных отличий

После соответствующих вычислений по формулам (5) и (6) и выбора интервала, на котором пассивная помеха отсутствует, что определяется устройством выбора максимума 14, коммутатор 15 подключает соответствующий отвод линии задержки весовых коэффициентов 7 ко вторым входам умножителей 8. Дальнейшая обработка сигналов в устройствах 9 и 10 схемы, представленной на рис. 2, аналогична схеме рис. 1.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Предложен новый метод формирования классифицированной обучающей выборки для адаптации весовых коэффициентов пространственного фильтра при время-пространственной обработке сигналов в когерентно-импульсных РЛС.

2. Впервые при время-пространственной обработке сигналов предложено формировать классифицированную обучающую выборку с учетом не только спектральных отличий между составляющими комбинированной помехи, но и межканальных корреляционных отличий.

3. Повышение качества классифицированной обучающей выборки позволяет уменьшить влияние пассивной помехи на процесс компенсации АМП, что обеспечивает повышение помехозащищенности когерентно-импульсных РЛС в условиях воздействия комбинированных помех.

5 ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных исследований установлено, что выбор интервала дальности с наименьшим уровнем пассивной составляющей комбинированной помехи в фазовых каналах с номером $N/2$ обеспечивает использование как спектральных, так и корреляционных отличий при формировании классифицированной обучающей выборки. Даже если пассивная помеха концентрируется в фазовых каналах с номером $N/2$, то с учетом ее нестационарности по дальности оказывается возможным сформировать классифицированную выборку, порожденную только АМП. Это позволяет при время-пространственной обработке сигналов существенно уменьшить декоррелирующее влияние пассивной помехи на процесс компенсации АМП.

ВЫВОДЫ

В статье предложен новый метод формирования классифицированной обучающей выборки, в котором за счет использования межканального корреляционного анализа составляющих комбинированной помехи повышается качество их классификации, что позволяет уменьшить влияние пассивной помехи на процесс адаптации пространственных фильтров при время-пространственной обработке сигналов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена по научно-исследовательской теме Запорожского национального технического университета «Разработка и усовершенствование алгоритмов комбинированной обработки сигналов в радиотехнических и телекоммуникационных системах» (№ гос. регистрации – 0115U002241). Авторы выражают благодарность МОН Украины и казенному предприятию «Научно-производственный комплекс «Искра» за финансовую поддержку проводимых исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оценка интервала фиксации пространственного весового вектора при последовательной пространственно-временной обработке сигналов на фоне комбинированных помех / [В. П. Рябуха, Д. С. Рачков, А. В. Семеняка, Е. А. Катюшин] // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2012. – № 10. – С. 13–25.
2. 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.; заявник і патентовласник Казенне підприємство «Науково-виробничий комплекс «Іскра». –

№ u200911296; Заявл. 2009.11.06; Опубл. 2010.03.25, Бюл. № 6, 2010 р. – 4 с.
3. Тейлор Дж. У. Новая диспетчерская РЛС ASR-9 / Дж. У. Тейлор, Г. Бруникс // ТИИЭР. – 1985. – № 2. – С. 284–289.
4. Радиолокационная станция 36Д6 : учебн. пособие / И. Д. Май [и др.]. – КП «НПК «Искра» – Кн.1, 2006. – 135 с.
5. 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.
6. Пат. 91114 Україна МПК2014 G01S 7/36. Спосіб захисту радіолокаторів від комбінованих завад, діючих на головному променю діаграми спрямованості антени / Піза Д. М. (UA), Сіренко А. С. (UA), Звягинцев Е. А. (UA); заявник і патентовласник: Запорізький національний технічний університет – заявл. 20.12.2013; опубл. 25.06.2014, бюл. № 12, 2014 р.
7. Журавльов А. К. Адаптивные радиотехнические системы с антенными решетками / А. К. Журавльов, В. А. Хлебников и др. – Л. : Изд. Ленинградского университета, 1991. – 544 с.
8. Уидроу Б. Адаптивная обработка сигналов / Б. Уидроу, С. Стирнз ; пер. с англ. – М. : Радио и связь, 1989. – 440 с.
9. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. Я. Д. Ширмана. – М. : Радиотехника, 2007. – 512 с.
10. Атлас облаков / Федер. служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), Гл. геофиз. обсерватория им. А. И. Воейкова; [Д. П. Беспалов и др.; ред. Л. К. Сурыгина]. – Санкт-Петербург : Д'АРТ, 2011. – 248 с.

Статья поступила в редакцию 29.06.2016.
После доработки 21.09.2016.

Піза Д. М.[1], Лаврентьєв В. М.[2], Семенов Д. С.[3]
[1]Д-р техн. наук, професор, директор інституту інформатики та радіоелетроніки Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна
[2]Канд. техн. наук, начальник відділення казенного підприємства «НВК «Іскра», Запоріжжя, Україна
[3]Начальник відділу казенного підприємства «НВК «Іскра», Запоріжжя, Україна

МЕТОД ФОРМУВАННЯ КЛАСИФІКАЦІЙНОЇ НАВЧАЛЬНОЇ ВИБІРКИ ДЛЯ АВТОКОМПЕНСАТОРА ЗАВАД ПРИ ЧАСОВО-ПРОСТОРОВІЙ ФІЛЬТРАЦІЇ СИГНАЛІВ

В умовах впливу комбінованих завад ефективність роботи радіолокаційних засобів суттєво погіршується. Це обумовлено декорреляцією точкового джерела активної завади просторово-розподіленим характером пасивної завади. Розглянуті обмеження, що виникають при формуванні класифікаційної навчальної вибірки для адаптації вагових коефіцієнтів автокомпенсатора завад при часово-просторовій обробці сигналів. Розроблено новий метод формування класифікаційної навчальної вибірки, що використовує як спектральні, так і кореляційні відмінності в структурі комбінованих завад. Запропонований метод дозволяє зменшити вплив пасивної складової комбінованої завади на процес компенсації активної складової.

Ключові слова: обробка радіолокаційних сигналів, адаптивна просторова фільтрація, комбінована завада, класифікована навчальна вибірка, нормований коефіцієнт міжканального кореляції.

Piza D.[1], Lavrentiev V.[2], Semenov D.[3]
[1]PhD, professor, Director of the Institute of Informatics and Radioelectronics, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine
[2]PhD, Department Director, State Enterprise «Scientific and Production complex «Iskra», Zaporizhzhya, Ukraine
[3]Chief of department, State Enterprise «Scientific and Production complex «Iskra», Zaporizhzhya, Ukraine

METHOD OF FORMING OF THE CLASSIFIED TRAINING SAMPLE FOR AUTOMATIC CANCELLER OF THE INTERFERENCES WHEN USING TIME-SPACE FILTERING OF SIGNALS

Radar effectivenes is dramatically decreasing in the case of combined interference. This is due to decorrelation of a point source jammer by spatially distributed structure of passive interference.There have been considered limitations arising from the formation of the classified training sample for adaptation of the weighting factors of the automatic jamming canceller in the time-spatial signal processing. A new method has been developed to form the classified training sample, using both the spectral and correlation differences in the structure of combined jamming. The proposed method allows to decrease the effect of the passive component in the combined jamming to the process the active component cancellation.

Keywords: Radar signals processing, adaptive space filtering, combined clutter and jamming, ranked training sample, inter-channel correlation coefficient.

REFERENCES

1. Rjabuha V. P., Rachkov D. S., Semenjaka A. V., Katjushin E. A. Ocenka intervala fiksacii prostranstvennogo vesovogo vektora pri posledovatel'noj prostranstvenno-vremennoj obrabotke signalov na fone kombinirovannyh pomeh, *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Radiojelektronika*, 2012, No. 10, pp. 13–25.
2. Kononovich V. Ja., Kukol'nic'kij A. P., Zalevs'kij O. P., Kaspirovich O. G.; Majster Ju. L., Deneka A. A.; zajavnik i patentovlasnik Kazenne pidpriємstvo «Naukovo-virobnichij kompleks «Iskra» Pat. 48705 Ukraïna, MPK G01 S 7/36 H04B 15/00. Sposib kompensacії aktivnoї skladovoї kombinovanoї zavadi. № u200911296; Zajavl. 2009.11.06; Opubl. 2010.03.25, Bjul. №6, 2010, 4 p.
3. Tejlor Dzh. U., Bruniks G. Novaja dispetcherskaja RLS ASR-9, 1985, TIIJeR, No. 2, pp. 284–289.
4. Maj I. D. [i dr.] Radiolokacionnaja stancija 36D6, uchebn. Posobie. KP «NPK «Iskra», 2006, Kn. 1, 135 p.
5. Shirman Ja. D., Golikov V. N., Busygin I. N. i dr. ; pod obshh. red. Ja. D. Shirmana Teoreticheskie osnovy radiolokacii, ucheb. posobie dlja vuzov. Moscow, Sov. Radio, 1970, 560 p.
6. Piza D. M. (UA), Sirenko A. S. (UA), Zvjahintsev E. A. (UA); zajavnik i patentovlasnik. Pat. 91114 Ukraïna MPK2014 G01S 7/36. Sposib zahistu radiolokatoriv vid kombinovanih zavad, dijuchih na golovnomu promenju diagrami sprjamovanosti anteni. [Tekst]. Zaporiz'kij nacional'nij tehnichnij universitet, zajavl. 20.12.2013; opubl. 25.06.2014, bjul. № 12, 2014.
7. Zhuravl'ov A. K., Hlebnikov V. A. i dr. Adaptivnye radiotehnicheskie sistemy s antennymi reshetkami. Leningrad, Izd. Leningradskogo universiteta, 1991, 544 p.
8. Uidrou B., Stirnz S. per. s angl. Adaptivnaja obrabotka signalov. Moscow, Radio i svjaz', 1989, 440 p.
9. Radiojelektronnye sistemy: Osnovy postroenija i teorija. Spravochnik. Izd. 2-e, pererab. i dop. [Tekst], Pod red. Ja. D. Shirmana. Moscow, Radiotehnika, 2007, 512 p.
10. Bespalov D. P. i dr.; red. Surygina L. K. Atlas oblakov. Feder. sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhajushhej sredy (Rosgidromet), Gl. geofiz. observatorija im. A. I. Voejkova. Sankt-Peterburg, D'ART, 2011, 248 p.

МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELLING

УДК 519.213.7, 519.237.7

Шергин В. Л.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры искусственного интеллекта, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина

СВЯЗЬ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ САМОПОДОБИЯ, УСТОЙЧИВОСТИ И ДОЛГОСРОЧНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПРИРАЩЕНИЙ ФРАКТАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ЛЕВИ

Рассмотрена задача поиска соотношений между параметрами самоподобия, устойчивости и долгосрочной зависимости приращений фрактального движения Леви. В качестве меры взаимосвязи приращений предложено использовать показатели, построенные с помощью модели симметричного перемешивания скрытых факторов, что позволило решить проблему неприменимости корреляционного метода оценки таких приращений, вызванную отсутствием моментов распределения. Получена зависимость показателя взаимосвязи соседних приращений от индексов устойчивости и самоподобия. Эта зависимость имеет вид алгебраического уравнения, которое хоть в общем случае и не имеет явного решения, но легко решается численно. Предложена математическая модель, позволяющая построить аналог дискретной автокорреляционной функции для фрактального движения Леви. Эта модель имеет вид системы алгебраических уравнений. В работе показано, что все аналогичные зависимости, известные для частных случаев процесса фрактального движения Леви, являются соответствующими частными случаями моделей, полученных в работе. Наличие предложенных моделей позволяет определить любой из трех показателей (самоподобия, устойчивости и долгосрочной зависимости приращений) по двум известным, что существенно упростит моделирование и исследование случайных процессов, имеющих вид фрактального движения Леви.

Ключевые слова: фрактальное движение Леви, самоподобие, долгосрочная зависимость, устойчивые распределения, показатели взаимосвязи.

НОМЕНКЛАТУРА

BM – броуновское движение (Brownian motion);

FBM – фрактальное броуновское движение (fractal Brownian motion);

FLM – фрактальное движение Леви (fractal Levý motion);

LP – процесс Леви (Levý process);

LRD – долгосрочная зависимость приращений (long-range dependency);

SaS – симметричное альфа-устойчивое (symmetric alpha-stable) распределение;

SLP – устойчивый процесс Леви (stable Levэ process);

АКФП – автокорреляционная функция приращений;

НОР – независимые одинаково распределенные;

СПСФ – симметричное перемешивание скрытых факторов;

$Corr\{x, y\}$ – коэффициент корреляции случайных величин x, y;

$g(x;\alpha,\gamma)$ – плотность распределения случайной величины, следующей $S\alpha S$-закону;

H – показатель Херста;

L_α – метрика пространства (по Минковскому);

$\mathbf{G}$ – диагональная матрица, задающая масштаб наблюдаемых случайных величин;

$\mathbf{P}$ – положительно определенная бисимметричная матрица параметров модели характеристической функции;

r_1 – коэффициент взаимосвязи двух соседних приращений $r_1(\alpha, H)$;

r_n – коэффициент взаимосвязи приращений, отстоящих на n шагов $r_n(\alpha, H)$;

r_{jk} – показатель взаимосвязи j-й и k-й случайных величин;

$\mathbf{u} \in R^n$ – скрытые факторы модели СПСФ (в двумерном случае $\mathbf{u} = (u, v)^T$);

$\mathbf{x} \in R^n$ – наблюдаемые случайные величины;

$X_{k\tau}$ – наблюдаемые значения (одномерного) случайного процесса;

α – показатель (индекс) устойчивости $(0 < \alpha \le 2)$;

© Шергин В. Л., 2016
DOI 10.15588/1607-3274-2016-3-3

γ – параметр масштаба устойчивого распределения ($\gamma > 0$);

$\Delta X_{k\tau}$ – приращения случайного процесса $X_{k\tau}$ на шаге k;

θ – углы поворота косоугольной системы координат скрытых факторов относительно прямоугольной декартовой системы;

$\varphi(t)$ – характеристическая функция случайной величины, следующей $S\alpha S$-закону;

$\varphi(\mathbf{t})$ – характеристическая функция совместного распределения многомерной $S\alpha S$-величины;

$\psi(\mathbf{t}_1)$ – характеристическая функция совместного распределения скрытых факторов.

ВВЕДЕНИЕ

Самоподобие является свойством, присущим широкому кругу процессов и явлений естественнонаучного, техногенного, информационного, экономического характера. Если при этом изучаемые процессы или явления подвержены фактору случайности, то говорят о статистическом самоподобии, то есть об инвариантности статистических характеристик случайных процессов относительно аффинных преобразований шкал измерения. Исследование свойств самоподобных случайных процессов представляет интерес как в теоретическом плане, так и с точки зрения практического применения.

Стохастический процесс X_t, $t \geq 0$ называется самоподобным [1], если для любого вещественного значения $a > 0$ конечномерные распределения для X_{at} идентичны конечномерным распределениям величины $a^H X_t$:

$$\mathrm{Law}\left\{X_{at}\right\} = \mathrm{Law}\left\{a^H X_t\right\}. \qquad (1)$$

Параметр H, называемый показателем Херста, представляет собой меру самоподобия стохастического процесса.

Другими важными свойствами, также присущими многим процессам и явлениям, являются «тяжелые хвосты» распределений и долгосрочная зависимость приращений (LRD) исследуемых процессов.

Объектом исследований настоящей работы является случайный процесс, обладающий всеми тремя перечисленными свойствами и носящий название фрактального движения Леви (FLM). Предметом исследования являются количественные соотношения между параметрами самоподобия, устойчивости и долгосрочной зависимости приращений FLM.

Свойства самоподобия, устойчивости и долгосрочной зависимости приращений взаимосвязаны между собой, в то же время вид этой зависимости в общем случае неизвестен. Что и обуславливает актуальность настоящей работы, целью которой как раз и является установление количественных соотношений между параметрами, характеризующими указанные свойства исследуемого процесса.

Для достижения поставленной цели необходимо в первую очередь описать исследуемые свойства количественно, т.е. параметризовать их. После этого следует составить математическую модель, связывающую эти параметры, и, в-третьих, построить и проанализировать зависимость между исследуемыми параметрами, проистекающую из найденной математической модели.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основная сложность в решении поставленной проблемы, на взгляд автора, состоит в том, что свойство долгосрочной зависимости приращений случайных процессов принято описывать с помощью автокорреляционной функции самого случайного процесса, или его приращений. В то же время, альфа-устойчивые случайные величины (при $\alpha \neq 2$) не обладают моментами второго порядка, а значит, такой подход в этом случае неприменим.

Таким образом, первой подзадачей, решаемой в настоящей работе, является выбор показателей, пригодных для описания явления взаимосвязи величин, следующих устойчивому распределению. Такие показатели, очевидно, должны быть инвариантны к наличию или отсутствию моментов распределения и в то же время, для частного (гауссовского) случая $\alpha = 2$ должны совпадать с соответствующими показателями взаимосвязи гауссовских случайных величин.

Второй подзадачей, решаемой в данной работе, является построение математических моделей, связывающих показатели устойчивости (α), самоподобия (H) и коэффициенты взаимосвязи двух соседних (r_1), или отстоящих на n шагов (r_n) приращений FLM. Очевидно, что зависимости $r_1(\alpha, H)$, $r_n(\alpha, H)$, следующие из предлагаемых общих моделей, должны совпадать с аналогичными зависимостями в тех частных случаях FLM, для которых они уже известны.

Получение этих зависимостей, их визуализация и анализ свойств являются третьей подзадачей настоящей работы.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Простейшим самоподобным случайным процессом (1) является броуновское движение (для которого $H = ½$), обладающее такими свойствами, как [2] нулевое начало, стационарность приращений, стохастическая непрерывность траекторий, независимость приращений, гауссовость приращений. Первые три из перечисленных свойств являются общими для всех моделей, рассматриваемых в настоящей работе.

Обобщениями броуновского движения служат устойчивый процесс Леви (SLP) и фрактальное броуновское движение (FBM). В первом случае гауссовский закон распределения приращений ($\alpha = 2$) обобщается до альфа-устойчивого ($0 < \alpha \leq 2$). Такое обобщение позволяет дополнить свойство самоподобия другим важным свойством – «тяжелыми хвостами» распределений [3]:

$$\begin{matrix} P\left\{X > x\right\} \sim x^{-\alpha}, & x \to \infty \\ P\left\{X < x\right\} \sim |x|^{-\alpha}, & x \to -\infty \end{matrix} \text{ при } \alpha \neq 2. \qquad (2)$$

Параметр α, $0 < \alpha \leq 2$, называется индексом устойчивости и определяет «тяжесть хвостов» распределения (2). Плотности распределений симметричных устойчивых ($S\alpha S$) законов $g(x;\alpha,\gamma)$ параметризуются в частотной области, т.е. с помощью характеристической функции:

$$\varphi(t) = M(e^{itx}) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{itx} g(x;\alpha,\gamma)dx = \exp(-|\gamma t|^{\alpha}). \qquad (3)$$

Параметр $\gamma > 0$ задает масштаб: если случайная величина X стандартизована, т.е. $\gamma_x = 1$, и $Y = cX$, то $\gamma_y = |c|$.

Важнейшим свойством устойчивых законов является то, что сумма независимых одинаково распределенных (НОР) случайных величин X_k ($k = 1,...,n$), следующих (3), также следует устойчивому закону (3):

$$Y_n = X_1 + X_2 + ... + X_n \to g(y;\alpha, n^{1/\alpha}\gamma). \quad (4)$$

Альфа-устойчивые законы (3) являются далеко не единственными, обладающими «тяжелыми хвостами». Например, используются гиперболические законы [2]. Особое место альфа-устойчивых распределений обусловлено тем, что эти и только эти законы могут быть пределом по распределению сумм независимых одинаково распределенных (НОР) случайных величин [4]. Это значит, что даже если X_k не являются устойчивыми, но при этом являются НОР (и симметричными), то предел по распределению их суммы Y_n при $n \to \infty$ либо не существует, либо имеет вид (4).

Случайный процесс с независимыми альфа-устойчивыми приращениями $\Delta X_k = X_{k\tau} - X_{(k-1)\tau}$, следующими $S\alpha S$-закону (3) называется устойчивым процессом Леви [3] и, как следует из (1) и (4), является самоподобным с показателем Херста

$$H = 1/\alpha. \quad (5)$$

Случайный процесс $X(t)$ называется процессом, обладающим свойством LRD, если автокорреляционная функция его приращений (АКФП) $\Delta X_k = X_{k\tau} - X_{(k-1)\tau}$ асимптотически убывает не быстрее, чем степенная функция с показателем $-b$, $0 < b < 2$:

$$r_n = Corr\{\Delta X_k \Delta X_{k+n}\} \sim n^{-b}, \ n \to \infty. \quad (6)$$

Доказано [2, 5, 6], что самоподобный случайный процесс (1) со стационарными приращениями и конечной дисперсией имеет АКФП вида

$$r_n = \tfrac{1}{2}\left((n+1)^{2H} + (n-1)^{2H} - 2n^{2H}\right) \underset{n\to\infty}{=} H(2H-1)n^{2H-2},$$

$$0 < H < 1. \quad (7)$$

Таким образом, при $H \neq ½$ самоподобный случайный процесс характеризуется наличием долгосрочной зависимости приращений с показателем

$$b = 2 - 2H. \quad (8)$$

Процесс (1) с АКФП (7) называется фрактальным броуновским движением (FBM) [1].

Рассмотренные модели BM, FBM и SLP являются частными случаями процесса FLM, обладающего всеми тремя описанными свойствами: самоподобием (1), «тяжелыми хвостами» (2) и долгосрочной зависимостью (6). Числовыми мерами этих свойств являются соответственно H, α, r_n. Модели BM соответствуют значения $\alpha = 2, H = ½, r_n = 0$, модели FBM – $\alpha = 2, 0 < H < 1, r_n = H(2H-1)n^{2H-2}$, модели SLP – $0 < \alpha \le 2, H = 1/\alpha, r_n = 0$. Очевидно, что параметры H, α, r_n для FLM-процесса взаимосвязаны между собой, в то же время вид этой зависимости неизвестен. Вывод соотношения, связывающего указанные параметры, и является основной целью настоящей работы.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Как было отмечено в постановке задачи, корреляционная модель взаимосвязи неприменима для величин, следующих устойчивым законам распределения (при $\alpha \neq 2$) в силу отсутствия вторых моментов. Как указывается в [6], для описания явления взаимосвязи величин, следующих распределению (3), необходимы иные показатели, инвариантные к наличию или отсутствию моментов. Естественно потребовать, чтобы при $\alpha = 2$ (т.е. для гауссовского закона распределения) эти показатели переходили в традиционные коэффициенты корреляции.

В [7] было показано, что взаимосвязь между двумя случайными величинами, можно описать с помощью модели симметричного перемешивания скрытых факторов (СПСФ):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ b & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}, \text{ или } \mathbf{x} = \mathbf{P} \cdot \mathbf{u}. \quad (9)$$

Согласно этой модели взаимосвязь наблюдаемых одинаково распределенных случайных величин (x, y) обусловлена перемешиванием независимых (и также одинаково между собой распределенных) ненаблюдаемых случайных величин (u, v).

Очевидно, что модель (9) инвариантна к виду законов распределения рассматриваемых величин, к наличию или отсутствию моментов.

Известно [4], что линейная комбинация конечного числа независимых случайных величин X_k, следующих $S\alpha S$-распределению (5) с одним и тем же индексом устойчивости (α), также следует этому же распределению. А именно, если $X_k \to g(x;\alpha;\gamma_k)$ ($k = 1,...n$), то

$$Y_n = \sum_{k=1}^{n} c_k X_k \to g(y;\alpha;\gamma_0). \quad (10)$$

При этом параметры масштаба связаны соотношением

$$\gamma_0^\alpha = \sum_{k=1}^{n} \left(\gamma_k \cdot |c_k|\right)^\alpha. \quad (11)$$

Без нарушения общности можно принять масштабы случайных величин, входящих в (9), за единицу. Тогда из (11) следует, что

$$|a|^\alpha + |b|^\alpha = 1. \quad (12)$$

Выражение (12) представляет собой уравнение единичной окружности в метрике L_α, а параметры a и b представляют собой абсциссу и ординату точки этой окружности, соответствующей полярному углу θ:

$$a = \frac{\cos\theta}{\left(|\cos\theta|^\alpha + |\sin\theta|^\alpha\right)^{1/\alpha}},$$

$$b = \frac{\sin\theta}{\left(|\cos\theta|^{\alpha} + |\sin\theta|^{\alpha}\right)^{1/\alpha}}, \ |\theta| \le \frac{\pi}{4}. \qquad (13)$$

В силу линейности преобразования Фурье характеристическая функция $\varphi(\mathbf{t})$ ($\mathbf{t} = (s,t)'$) вектора $\mathbf{x} = \mathbf{Pu}$ (9) связана с характеристической функцией $\psi(\mathbf{t}_1)$ вектора $\mathbf{u}$ простым соотношением:

$$\log\varphi(\mathbf{t}) = \log\psi(\mathbf{P't}) = \log\psi(sa+tb, sb+ta) =$$

$$= -|sa+tb|^{\alpha} - |sb+ta|^{\alpha}. \qquad (14)$$

Многомерные $S\alpha S$-распределения, в отличие от одномерных (3), в общем случае не могут быть описаны конечным набором параметров. Существует несколько форм параметризации таких законов, рассмотренных в работах [8, 9]. В настоящей работе используется параметризация [8], согласно которой требуемый набор параметров состоит из $1 \le m \le \infty$ положительно полуопределенных симметрических матриц $\Omega(j)$:

$$\log\varphi(\mathbf{t}) = -\sum_{j=1}^{m}\left(\mathbf{t}'\mathbf{\Omega}(j)\mathbf{t}\right)^{\alpha/2}, \qquad (15)$$

Для многомерного устойчивого распределения, параметризованного в форме (15), существует показатель взаимосвязи:

$$r_{jk} = \frac{\sum_{l=1}^{m}\Omega_{jk}(l)}{\sqrt{\sum_{l=1}^{m}\Omega_{jj}(l)\cdot\sum_{l=1}^{m}\Omega_{kk}(l)}}, \ j,k = 1,\ldots,n \qquad (16)$$

Так как форма (14) является частным случаем (15) (при $m = 2$, $\mathbf{\Omega}(1) = (a,b)'\cdot(a,b)$, $\mathbf{\Omega}(2) = (b,a)'\cdot(b,a)$), то показатель взаимосвязи (16) величин (x,y) имеет вид

$$r = \frac{2ab}{a^2+b^2} = \sin(2\theta). \qquad (17)$$

Нетрудно видеть, что в частном случае $\alpha = 2$, соответствующем гауссовскому распределению, показатели (16)–(17) совпадают с обычным коэффициентом корреляции.

Модель СПСФ имеет наглядную геометрическую интерпретацию: линейное преобразование (9), описывает переход от «естественной» косоугольной системы координат скрытых факторов к прямоугольной, соответствующей наблюдаемым случайным величинам. Из-за наличия взаимосвязи происходит искажение «эллипсов» рассеивания (т.е. кривых постоянной плотности): они вытягиваются (или сжимаются при $r < 0$) вдоль биссектрисы главного угла (рис. 1). При этом показатели взаимосвязи (17) равны косинусам соответствующих координатных углов системы координат скрытых факторов ($r = \cos(\eta) = \sin(2\theta)$).

Модель СПСФ (9) легко обобщается [7] на случай, когда рассматриваемые зависимые переменные имеют разный масштаб и/или их количество $n > 2$. Если обозначить $\mathbf{x} \in R^n$ – вектор наблюдаемых случайных величин, $\mathbf{G} = diag(\gamma_1,\ldots,\gamma_n)$ – диагональная матрица, задающая их масштаб, $\mathbf{u} \in R^n$ – вектор скрытых факторов, $\mathbf{P}$ – положительно определенная бисимметричная (симметричная относительно обеих диагоналей) матрица факторного преобразования, то преобразование (9) приобретает вид

$$\mathbf{x} = \mathbf{GPu}, \qquad (18)$$

а характеристическая функция (14) – форму

$$\log\varphi(\mathbf{t}) = -\sum_{j=1}^{n}\left(\left|\sum_{k=1}^{n} p_{jk}\gamma_k t_k\right|^{\alpha}\right). \qquad (19)$$

Масштабы скрытых факторов удобно без нарушения общности принять за единицу, тогда коэффициенты матрицы $\mathbf{P}$ должны удовлетворять помимо условий симметрии $p_{jk} = p_{kj}$ и антисимметрии $p_{jk} = p_{n+1-k,n+1-j}$, условиям нормировки в метрике L_{α}, аналогичным (12):

$$\|\mathbf{P}_j\|_{\alpha} = \sum_{k=1}^{n}|p_{jk}|^{\alpha} = 1, \ \forall j = 1,\ldots,n. \qquad (20)$$

Коэффициенты взаимосвязи r_{jk} находятся по формуле (16) при $m = 1$ и $\mathbf{\Omega} = \mathbf{P'P}$, т.е. $r_{jk} = \Omega_{jk}\Big/\sqrt{\Omega_{jj}\Omega_{kk}}$. Таким образом, матрица $\mathbf{\Omega} = \mathbf{P'P}$ играет роль ковариационной.

Для процесса FBM (являющегося частным случаем рассматриваемой модели FLM, соответствующего $\alpha = 2$), вид зависимости коэффициента взаимосвязи двух соседних приращений (r_1) от α и H известен. Эта зависимость является частным случаем АКФП r_n (7) (соответствующим $n = 1$) и имеет следующий вид:

$$r_1(\alpha = 2, H) = Corr\left\{\left(X_{k\tau} - X_{(k-1)\tau}\right)\left(X_{(k+1)\tau} - X_{k\tau}\right)\right\} = 2^{2H-1} - 1. \qquad (21)$$

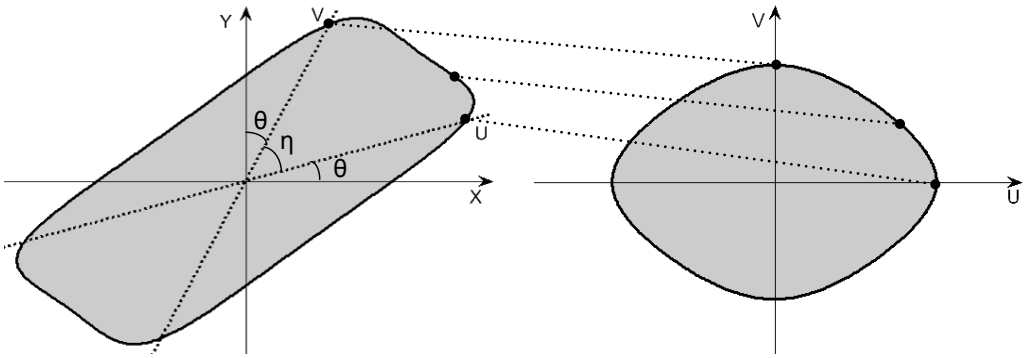


Рисунок 1 – Геометрическая интерпретация взаимосвязи (корреляции) двумерного альфа-устойчивого распределения

С помощью модели СПСФ можно найти зависимость $r_1(\alpha, H)$ для общего случая, соответствующего исследуемому процессу FLM.

Характеристическая функция $\varphi(\mathbf{t})$ двумерного устойчивого распределения соседних приращений $\Delta X_{k\tau}$, $\Delta X_{(k+1)\tau}$ имеет вид (14). В силу свойства самоподобия (1) приращение исследуемого случайного процесса за два такта имеет масштаб, равный 2^H. С другой стороны, из (11) и (14) следует, что $x+y$ имеет масштаб γ_{x+y}, удовлетворяющий равенству $\gamma_{x+y}^{\alpha} = 2\,|\,a+b\,|^{\alpha}$. Таким образом,

$$2^{1/\alpha}\,|\,a+b\,| = 2^H\,. \tag{22}$$

Коэффициент взаимосвязи между приращениями вычисляется по формуле (17), для чего необходимо найти параметры a, b из условия нормировки (12) и соотношения (22). Подставив (13) в (22), и обозначив $z = \tan(\theta)$, получим:

$$\frac{(1+z)^{\alpha}}{1+|\,z\,|^{\alpha}} = 2^{\alpha H-1}\,,\ -1 \le z \le 1. \tag{23}$$

При этом искомый коэффициент взаимосвязи приобретает вид:

$$r_1 = \sin(2\cdot\arctan(z)) = \frac{2z}{1+z^2}\,. \tag{24}$$

Зависимость коэффициента взаимосвязи соседних приращений FLM от индексов устойчивости и самоподобия $r_1(\alpha, H)$, в общем случае не выражается через элементарные функции. Для ее построения следует численно решить уравнение (23). Интересно отметить, что при $H=0$ и $\alpha \to 0$ решение (23) стремится к $z(0,0) = \tau - 1$, где $\tau = \frac{\sqrt{5}-1}{2} \approx 0,618...$ – золотое сечение! При этом $r_1(0,0) = -\frac{2}{3}$.

Для расчета показателя взаимосвязи r_n между двумя приращениями процесса FLM, отстоящими на n тактов, следует применить обобщенную модель СПСФ (18)–(19). Обозначим $x_1 = \Delta X_{k\tau} = X_{k\tau} - X_{(k-1)\tau}$, $x_2 = X_{(k+n-1)\tau} - X_{k\tau}$ $x_3 = \Delta X_{(k+n)\tau} = X_{(k+n)\tau} - X_{(k+n-1)\tau}$. Рассматриваемые случайные величины x_1, x_2, x_3 следуют устойчивым распределениям. Величины x_1 и x_3 в силу свойства стационарности приращений имеют одинаковый масштаб, который примем за единицу. Величина x_2 согласно свойствам стационарности и самоподобия имеет масштаб $\gamma = (n-1)^H$. Характеристическая функция $\varphi(\mathbf{t})$ совместного распределения x_1, x_2, x_3 имеет вид (19), при этом 3×3 матрица $\mathbf{P}$ в силу бисимметричности содержит четыре неизвестных коэффициента a, b, c, d:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} a & b & c \\ b & d & b \\ c & b & a \end{pmatrix},\ \mathbf{G} = \begin{pmatrix} 1 & & \\ & \gamma & \\ & & 1 \end{pmatrix}. \tag{25}$$

Таким образом,

$$\log\varphi(\mathbf{t}) = -\,|\,a\,t_1 + b\gamma t_2 + ct_3\,|^{\alpha} - \\ -\,|\,bt_1 + d\gamma t_2 + bt_3\,|^{\alpha} - |\,ct_1 + b\gamma t_2 + a\,t_3\,|^{\alpha}. \tag{26}$$

Неизвестные коэффициенты (a, b, c, d) находятся из следующей системы:

$$\begin{cases} |\,a\,|^{\alpha} + |\,b\,|^{\alpha} + |\,c\,|^{\alpha} = 1 \\ |\,b\,|^{\alpha} + |\,d\,|^{\alpha} + |\,b\,|^{\alpha} = 1 \\ |\,a+b\gamma\,|^{\alpha} + |\,b+d\gamma\,|^{\alpha} + |\,c+b\gamma\,|^{\alpha} = n^{\alpha H} \\ |\,a+b\gamma+c\,|^{\alpha} + |\,b+d\gamma+b\,|^{\alpha} + |\,c+b\gamma+a\,|^{\alpha} = (n+1)^{\alpha H}\,. \end{cases} \tag{27}$$

Первые два уравнения этой системы являются стандартными условиями нормировки (20), третье следует из того, что случайные величины $x_1 + x_2 = X_{(k+n-1)\tau} - X_{(k-1)\tau}$ и $x_2 + x_3$ имеют масштаб, равный n^H, а четвертое отражает равенство $(n+1)^H$ масштаба величины $x_1 + x_2 + x_3 = X_{(k+n)\tau} - X_{(k-1)\tau}$.

Искомый коэффициент взаимосвязи (между x_1 и x_3) определяется согласно (16) (как отмечалось выше, при $m=1$, $\Omega = \mathbf{P}'\mathbf{P}$):

$$r_n = \frac{\Omega_{13}}{\sqrt{\Omega_{11}\cdot\Omega_{33}}} = \frac{2ac+b^2}{a^2+b^2+c^2}\,. \tag{28}$$

К сожалению, система (27) имеет явное решение только при $\alpha = 2$ (в этом случае r_n имеет вид (7)), а также при $\alpha = 1$ ($\lim\limits_{n\to\infty} r_n = \frac{1}{4}n^{-2H}$). В остальных случаях систему (27) необходимо решать численно, и при этом даже асимптотическое (при $n \to \infty$) поведение показателей взаимосвязи (28) неизвестно.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для численного решения уравнения (23) и нахождения зависимости коэффициента взаимосвязи соседних приращений FLM от индексов устойчивости и самоподобия (24) использовался пакет SciLab-5.4.0. Значения H варьировались от 0 до 1 с шагом 0,05; значения α – 0,001 и затем от 0,05 до 2 с шагом 0,05. Решение уравнения (23) выполнялось с точностью $tol = 10^{-6}$. При решении (23) учитывалось, что функция от вспомогательной переменной z, стоящая в левой части, является немонотонной и невыпуклой при $\alpha < 1$. Поэтому при $\alpha < 1$ диапазон допустимых значений z ограничивался значениями –1 и 0, в то время как при $\alpha \ge 1$ ограничения имели вид $-1 \le z \le 1$.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Получена зависимость показателя взаимосвязи соседних приращений исследуемого процесса FLM (фрактального движения Леви) $r_1(\alpha, H)$ от индексов устойчивости (α) и самоподобия (H). Она имеет вид алгебраических уравнений (23)–(24). В процессе экспериментальных исследований был получен график указанной зависимости $r_1(\alpha, H)$, представленный на рис. 2.

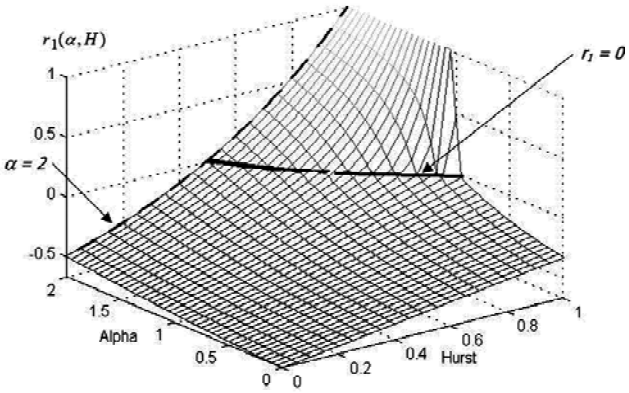


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента взаимосвязи двух соседних приращений фрактального процесса Леви от индексов устойчивости и самоподобия

На рисунке для сравнения также показаны зависимости $r_1(\alpha, H)$, соответствующие известным частным случаям FLM: процессу SLP (сплошная линия) и процессу FBM (пунктирная линия).

Как видно из графика, экспериментальное исследование полностью подтвердило результаты теоретических исследований, а именно, полученная в работе математическая модель $r_1(\alpha, H)$ (23)–(24), описывающая взаимосвязь между параметрами процесса FLM, не противоречит аналогичным зависимостям, соответствующим известным частным случаям (SLP, FBM, BM), но при этом обобщает их.

В работе также предложена математическая модель (27)–(28) в форме системы алгебраических уравнений, теоретически позволяющая построить аналог дискретной автокорреляционной функции приращений для FLM, то есть зависимость показателя взаимосвязи элементарных приращений, отстоящих на n тактов $r_n(\alpha, H)$ от индексов устойчивости и самоподобия.

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Свойства самоподобия, устойчивости и долгосрочной зависимости приращений фрактального движения Леви взаимосвязаны между собой, однако количественные соотношения между соответствующими параметрами были известны лишь для некоторых частных случаев (BM, FBM [5], SLP[6]).

Основным, по мнению автора, препятствием на пути построения общей модели была невозможность количественного описания свойства зависимости приращений в рамках традиционного дисперсионно-ковариационного подхода. Для решения этой проблемы было предложено использовать показатели взаимосвязи, построенные с помощью модели СПСФ.

В результате теоретических исследований была получена математическая модель в форме системы алгебраических уравнений, связывающих индексы самоподобия, устойчивости и показатель взаимосвязи соседних приращений. Показано теоретически и подтверждено экспериментально, что для частных случаев фрактального движения Леви (BM, FBM, SLP) решения полученной системы полностью соответствуют известным зависимостям, соответствующим этим частным моделям. Таким образом, предложенная модель может рассматриваться как обобщение ранее известных [5, 6] на процесс (FLM) более общего вида.

Была также получена еще более общая модель, связывающая индексы самоподобия и устойчивости с показателем взаимосвязи приращений, отстоящих на n тактов. Для нее также было показано, что она включает в себя все известные модели процессов, являющихся частными случаями FLM [2, 5, 6], и обобщает их.

ВЫВОДЫ

В работе решена задача поиска соотношений между параметрами, отвечающими за свойства самоподобия, устойчивости и долгосрочной зависимости приращений фрактального движения Леви.

Научная новизна полученных результатов состоит в том, что:

1. Впервые предложено для оценки взаимосвязи приращений фрактального движения Леви использовать показатели, построенные с помощью модели симметричного перемешивания скрытых факторов, что позволило решить проблему неприменимости корреляционного метода их оценки.

2. Впервые получена математическая модель, описывающая зависимость показателя взаимосвязи соседних приращений фрактального движения Леви от индексов устойчивости и самоподобия. Указанная зависимость построена экспериментально в графическом виде.

3. Впервые построена математическая модель, позволяющая построить аналог дискретной автокорреляционной функции для фрактального движения Леви, то есть зависимость показателя взаимосвязи элементарных приращений, отстоящих на n тактов от индексов устойчивости и самоподобия.

Практическая значимость полученных результатов состоит в том, что наличие предложенных моделей позволяет, определить один из трех показателей (самоподобия, устойчивости и долгосрочной зависимости приращений) по двум известным, что существенно упростит моделирование и исследование случайных процессов, имеющих вид фрактального движения Леви.

Несмотря на возможность построить аналог дискретной автокорреляционной функции для фрактального движения Леви с помощью полученной модели, асимптотический вид (при $n \to \infty$) этой зависимости остался неизвестным. Очевидно, что ее нахождение и экспериментальное подтверждение является актуальным направлением для дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mandelbrot B. Fractional Brownian motions, fractional noises and applications / B. Mandelbrot, J.W. van Ness // SIAM Review. – 1968. – Vol. 10 (4) – P. 422–437. DOI:10.1137/1010093.
2. Ширяев А. Н. Основы стохастической финансовой математики. Том. 1. Факты. Модели / А. Н. Ширяев. – М. : ФАЗИС, 1998. – 512 с.
3. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы / Б. Мандельброт. – М. : «Институт компьютерных исследований», 2002. – 656 с.
4. Золотарев В. М. Одномерные устойчивые распределения / В. М. Золотарев. – М. : Наука, 1983. –304 с.
5. Федер Е. Фракталы / Е.Федер. – М. : Мир, 1991. – 261 с.

6. Samorodnitsky G. Stable Non-Gaussian Random Processes, Chapter 7: «Self-similar processes» / G. Samorodnitsky, M. S. Taqqu. – Chapman & Hall, 1994.
7. Шергин В. Интерпретация показателя взаимосвязи многомерных устойчивых случайных величин с помощью факторной модели / В. Шергин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – 5 (4(77)) – С. 44–49. DOI:10.15587/1729-4061.2015.50442
8. Press S. J. Multivariate stable distributions / S. J. Press // Journal of Multivariate Analysis. – 1972. – Vol. 2, Issue 4. – P. 444–462. DOI: 10.1016/0047-259x(72)90038-3
9. Balakrishnan N.·Continuous bivariate distributions [Text] / N. Balakrishnan, C.-D. Lai. – Springer, 2009. – 684 p. DOI: 10.1007/b101765

Статья поступила в редакцию 16.02.2016.
После доработки 24.02.2016.

Шергін В. Л.
Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри штучного інтелекту, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

ЗВ'ЯЗОК МІЖ ПАРАМЕТРАМИ САМОПОДІБНОСТІ, СТІЙКОСТІ ТА ДОВГОСТРОКОВОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ ПРИРІСТІВ ФРАКТАЛЬНОГО РУХУ ЛЕВІ

Розглядається задача пошуку співвідношень між параметрами, самоподібності, стійкості та довгострокової залежності приростів фрактального руху Леві. В якості міри взаємозв'язку приростів, запропоновано застосувати показники, побудовані за допомогою моделі симетричного перемішування прихованих факторів, що дало змогу розв'язати проблему непридатності кореляційного методу оцінки таких приростів, пов'язану з відсутністю потрібних моментів розподілу. Отримано залежність показника взаємозв'язку сусідніх приростів від індексів стійкості та самоподібності. Ця залежність має вигляд алгебраїчного рівняння, яке хоч в загальному випадку й не має явного рішення, але легко розв'язується чисельно. Запропоновано математичну модель, яка дозволяє побудувати аналог дискретної автокореляційної функції для фрактального руху Леві. Ця модель має вигляд системи алгебраїчних рівнянь. В роботі показано, что всі аналогічні залежності, які є відомими для окремих випадків процесу фрактального руху Леві, який розглядається, є відповідними окремими випадками моделей, отриманих у роботі. Наявність запропонованих моделей дає змогу визначити будь-який з трьох показників (самоподібності, стійкості та довгострокової залежності приростів) по двом відомим, що суттєво спрощує моделювання та дослідження випадкових процесів, які мають вигляд фрактального руху Леві.

Ключові слова: фрактальний рух Леві, самоподібність, довгострокова залежність, стійки розподіли, показники взаємозв'язку.

Shergin V. L.
PhD., Associate Professor, Associate Professor of Artificial intelligence department, Kharkov National University of Radioelectronics, Kharkov, Ukraine

RELATIONSHIP BETWEEN THE PARAMETERS OF SELF-SIMILARITY, STABILITY AND LONG-RANGE DEPENDENCY OF FRACTAL LEVÝ MOTION

The problem of searching relationships between the parameters of self-similarity, stability and long-range dependency of fractal Levý motion is considered. It was proposed to use indexes, constructed by means a model of symmetric mixing of latent factors as a measure of the relationship between increments of fractal Levý motion process. This approach make it possible to solve the problem of inability to use the correlation method for estimating such increments caused by the absence of the required distribution moments. Dependence of the relationship index of neighboring increments on the indices of stability and self-similarity is obtained. This dependence has the form of an algebraic equation which has no an explicit solution generally, but can be easily solved numerically. A mathematical model that allows to construct a discrete analogue of the autocorrelation function for the fractal Levý motion is proposed. This model has the form of the system of algebraic equations. It is shown that all of the similar dependencies known for the particular cases of the fractal Levý motion, are special cases of the models obtained in the work. Proposed models allows us to determine any of the three parameters (self-similarity, stability and long-range dependency) on two other that will essentially simplify the modeling and studying stochastic processes having the form of fractal Levý motion.

Keywords: fractal Levý motion, self-similarity, long-range dependency, stable distributions, relationship indexes.

REFERENCES

1. Mandelbrot B. B., Van Ness J. W. Fractional Brownian Motions, Fractional Noises and Applications, *SIAM Review*, 1968, 10(4), pp. 422–437. DOI: 10.1137/1010093.
2. Shiryaev A. N. Essentials of Stochastic Financial Mathematics. Volume 1. Facts. Models. Moscow, Fazis, 1998, 512 p.
3. Mandelbrot B. B. The Fractal Geometry of Nature, *American Journal of Physics*, 1983, Vol. 51(3), P. 286. DOI: 10.1119/1.13295.
4. Zolotarev V. M. One-dimensional stable distributions. American Mathematical Society, 1986.
5. Feder, J. (1988). Fractals. Springer, 283 p. DOI: 10.1007/978-1-4899-2124-6.
6. Samorodnitsky G., Taqqu M. S. (1994), Stable Non-Gaussian Random Processes, Chapter 7: «Self-similar processes» (Chapman & Hall).
7. Shergin V. Interpretation of the measure of dependence for multivariate stable random variables using factor model, *Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies*, 2015, Vol. 5(4(77)), pp. 44–49. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.50442.
8. Press S. J. Multivariate stable distributions. *Journal of Multivariate Analysis*, 1972, Vol. 2 (4), pp. 444–462. DOI: 10.1016/0047-259x(72)90038-3.
9. Balakrishnan N., Lai C. D. Continuous bivariate distributions. Springer Science & Business Media, 2009, P. 684. DOI: 10.1007/b101765.

НЕЙРОІНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ

НЕЙРОИНФОРМАТИКА И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS

УДК 004.032.26

Бодянський Є. В.[1], Дейнеко А. О.[2], Куценко Я. В.[3]

[1]*Д-р. техн. наук, науковий керівник Проблемної НДЛ АСУ, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна*

[2]*Канд. техн. наук, науковий співробітник Проблемної НДЛ АСУ, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна*

[3]*Аспірантка кафедри штучного інтелекту Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна*

ПОСЛІДОВНЕ НЕЧІТКЕ КЛАСТЕРУВАННЯ НА ОСНОВІ НЕЙРО-ФАЗЗІ ПІДХОДУ

У статті запропоновано on-line нейро-фаззі систему для вирішення задач послідовного нечіткого кластерування даних, що дозволяє опрацьовувати вектори спостережень за умов обмеженого числа даних в оброблюваній вибірці, а також алгоритм її самоначання на основі самоорганізовної мапи Т. Когонена. Архітектура системи містить сім шарів обробки інформації і є за своєю суттю гібридом системи Ванга-Менделя та нечіткої кластерувальної самоорганізовної мережі. Запропонована система в процесі самонавчання налаштовує не лише свої параметри, але й архітектуру в on-line режимі. Для налаштування параметрів функцій належності гібридної нейро-фаззі системи введено алгоритм, що ґрунтується на використанні конкуренткого навчання. У процесі навчання гібридна нейро-фаззі система налаштовує синаптичні ваги, центри і параметри ширини функцій належності. Розроблено програмне забезпечення, що реалізує запропоновану архітектуру гібридної нейро-фаззі системи. Проведено низку експериментів з дослідження властивостей запропонованої системи. Результати експериментів підтвердили те, що запропоновану систему можна використовувати для розв'язання задачі кластерування, при цьому оброблення даних відбувається в on-line режимі. Система характеризується простотою чисельної реалізації. Характерною особливістю запропонованої системи є те, що вона об'єднує в собі як навчання з вчителем, так і самонавчання.

Ключові слова: гібридна система, обчислювальний інтелект, нейро-фаззі система, функція належності, нечітке кластерування.

НОМЕНКЛАТУРА

SOM – самоорганізовна мапа Когонена;
FCM – метод нечітких С-середніх;
VLDB – надвелика база даних;
RBFN – радіально-базисні нейронні мережі;
SVM – машини опорних векторів;
FSOM – нейро-фаззі мережа Когонена;
$x(k)$ – вектор вхідних сигналів;
$\hat{x}(k)$ – оцінка вектора вхідних сигналів;
$x_i(k)$ – i-та компонента вектора вхідних сигналів;
m – кількість кластерів;
h – кількість функцій належності на кожному вході;
R^n – простір вхідних ознак;
k – номер спостереження у навчальній вибірці або момент поточного часу;
c_{li} – параметр, що визначає центр l-ї функції належності i-ї компоненти;
σ_i – параметр ширини функції належності;
σ_{li} – параметр ширини l-ї функції належності i-ї компоненти;
μ_{li} – функція належності на i-му вході;
N – обсяг навчальної вибірки;
$\tilde{\varphi}_l$ – функція належності;
$\varphi_l(k)$ – сигнал на виході третього прихованого шару;
$e(k)$ – векторна похибка;
$\overline{e}$ – значення скалярного критерію точності;
$\|\bullet\|$ – будь-яка норма у метриці Мінковського;
w_{il} – значення синаптичної ваги;
W – матриця синаптичних ваг;
r – радіус сусідства;
$\eta(2)$ – параметр кроку навчання на другому такті;
R^h – простір сигналів підвищеної розмірності;
$\varphi(x)$ – сигнал на виході другого прихованого шару;
$(\ )^+$ – символ операції псевдообернення;
β – невід'ємний параметр фаззіфікації, що визначає нечітку границю між різними класами;

© Бодянський Є. В., Дейнеко А. О., Куценко Я. В., 2016
DOI 10.15588/1607-3274-2016-3-4

$u_j(k)$ – рівень належності k-го спостереження до j-го кластеру;

$\tilde{c}_j^K(k)$ – параметр центру в мапі Когонена;

$P(k-1)$ – коваріаційна матриця.

ВСТУП

У наш час підходи до опрацювання інформації, які засновані на математичному апараті обчислювального інтелекту [1–4], набули широкого розповсюдження для вирішення багатьох задач, що виникають в рамцях Data Mining [5, 6], при цьому кластерування займає особливе місце [7, 8], оскільки процес пошуку рішення на основі парадигми самонавчання [9] значно складніше навчання з вчителем. Незважаючи на те, що сьогодні існує безліч алгоритмів кластерування, лише незначна їх частина може бути використана для вирішення задач Data Stream Mining [10], коли інформація подається на опрацювання послідовно в on-line режимі. У цій ситуації доцільним є використання кластерувальних самоорганізовних нейронних мереж Т. Когонена (SOM) [11], призначених для опрацювання великих масивів даних в послідовному режимі. При цьому апріорно припускається, що внутрішня структура оброблюваних даних є такою, що відновлювані кластери взаємно не перетинаються і мають опуклу форму, що дозволяє в процесі налаштування нейронної мережі побудувати розділяючи гіперплощини, які чітко розмежовують різні класи.

Зрозуміло, що існуючі системи обчислювального інтелекту мають бути суттєво модифікованими для оброблення великих масивів інформації (Big Data), які послідовно надходять на опрацювання та формують кластери довільної форми, що можуть деяким чином перетинатися.

У зв'язку з цим метою цієї роботи є розробка гібридної еволюційної нейро-фаззі системи та адаптивного метода її самонавчання для послідовного нечіткого кластерування даних в умовах перетинання кластерів довільної форми.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

У найбільш загальній постановці задачі кластерування передбачається, що є масив (можливо зростаючий) з N багатовимірних спостережень, що описуються n-вимірними векторами ознак $x(k)=(x_1(k),x_2(k),...,x_n(k))^T \in R^n$, $k=1,2,...,N,...,$ які необхідно розбити на m кластерів, при цьому це число може бути заздалегідь невідомо, тобто $1<m<N$. Очевидно, що така велика кількість відомих методів вирішення задачі кластерування пов'язана з тим, що сьогодні не існує універсального алгоритму придатного для ефективного використання у всіх виникаючих випадках. Одна з таких можливих і досить складних ситуацій пов'язана з припущенням, що кожен вектор спостережень може одночасно відноситись з різними рівнями належності не до одного, а відразу до кількох чи до всіх формуємих кластерів. У цій ситуації на перший план виходять, так звані, м'які алгоритми (soft algorithms) [8], серед яких найбільшу увагу привернуто до нейро-фаззі систем [9–11].

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Задача кластерування великих масивів багатовимірних спостережень (векторів-образів) часто виникає у багатьох реальних практичних задачах, а для її вирішення розроблено множину алгоритмів [1–3], при цьому в останні роки в рамцях концепції Big Data особлива увага приділяється оброблянню інформації, що зберігається або у надвеликих базах даних (VLDB), або надходить на опрацювання в on-line режимі в формі потоку даних (data stream).

У випадку, коли класи перетинаються можуть бути використані методи нечіткого кластерного аналізу [12, 13], у тому числі нечіткі самоорганізовні мережі Т. Когонена [14, 15], що реалізують в тій чи іншій формі метод нечітких С-середніх (FCM) [16].

У випадку неопуклих кластерів завдання кластерування істотно ускладнюється, оскільки нейронні мережі Т. Когонена як в чіткому, так і нечіткому варіантах, реалізують фактично методи К-середніх і нечітких С-середніх, які формують опуклі множини з опрацьованих спостережень.

Для вирішення задач кластерування у випадках, коли класи даних мають довільну форму, можуть бути використані ядерні самоорганізовні мапи Т. Когонена [7, 17, 18], побудовані на основі ядер Дж. Мерсера [19–21] і засновані на мінімізації критерію емпіричного ризику, що полягає в основі спеціального класу нейронних мереж, відомих як машини опорних векторів (SVM) [9]. Треба відзначити, що SVM-нейронні мережі, як потужний засіб вирішення багатьох задач Data Mining, включаючи і кластерування, призначені для опрацюваня інформації тільки у пакетному режимі і не можуть аналізувати дані, що послідовно надходять в нейронну мережу.

У зв'язку з цим доцільно замість традиційного SVM-підходу використовувати ідеї, що покладені в основу радіально-базисних нейронних мереж (RBFN) [9] і пов'язані з теоремою Т. Кавера [23], яка стверджує, що лінійно-нероздільна задача розпізнавання образів в просторі вхідних ознак R^n може стати лінійно-розділимою в просторі підвищеної розмірності $R^h(n+1\le h)$. На основі спільного використання RBFN і SOM в [23] була введена on-line кластеризувальна нейро-система, призначена для чіткого відновлення класів довільної форми. Основним недоліком цієї системи, втім як і всіх радіально-базисних нейромереж, є, так званий, «прокльон розмірності», що породжує різке збільшення числа R-нейронів в прихованому шарі з ростом розмірності вхідного простору R^n.

У зв'язку з цим доцільною є розробка on-line нейро-фаззі системи для вирішення задач послідовного нечіткого кластерування даних, що дозволяє опрацьовувати вектори спостережень будь-якої розмірності в умовах обмеженого числа спостережень в оброблюваній вибірці.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

На рис. 1 наведено архітектуру запропонованої гібридної кластеризувальної on-line нейро-фаззі системи. Вхідною інформацією для цієї системи є центрована щодо середнього вибірка векторів спостережень, яка можливо зростає $x(1)$, $x(2),...,$ $x(k),...,$ $x(N),...;$ $x(k)=\left(x_1(k),...,x_i(k),...,x_n(k)\right)^T \in R^n$ таких, що

$-1 \le x_i(k) \le 1$, $\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} x_i(k) = 0$, яка повинна бути розділена на m кластерів довільної форми, при цьому k тут може бути як номером поточного спостереження, так і моментом поточного часу.

Вектори спостережень $x(k)$ послідовно надходять на нульовий (рецепторний) шар системи, звідки передаються на перший прихований шар, утворений nh (по h на кожний вхід) функціями $\mu_{li}(x_i), l = 1,2,...,h; i = 1,2,...,n$ і виконуючий фаззіфікування вхідного простору R^n. Другий прихований шар забезпечує аґреґування рівнів належності, розрахованих в першому шарі, і містить h блоків множення. Таким чином, перші два шари цієї системи повністю збігаються з шарами найбільш популярних нейро-фаззі систем ANFIS і TSK [24, 25], основною перевагою яких крім універсальних апроксимуючих властивостей є те, що їх вихідний сигнал лінійно залежить від параметрів-синаптичних ваг, які налаштовуються, що дозволяє використовувати для їх налаштування як множину відомих лінійних алгоритмів навчання [9, 26], так і відомі методи адаптивного кластерування [30, 28], які є оптимальними за швидкодією.

Отже, якщо на вхід системи подано векторний сигнал $x(k)$, елементи першого прихованого шару здійснюють його фаззіфікування, обчислюючи рівні належності $0 < \mu_{li}(x_i(k)) \le 1$, при цьому зазвичай в якості функцій належності використовуються традиційні ґавсіани

$$\mu_{li}(x_i(k)) = \exp\left(-\frac{(x_i(k) - c_{li})^2}{2\sigma_i^2}\right),$$

де c_{li}, σ_i – параметри центрів і ширини відповідно. Зауважимо також те, що попереднє кодування даних на деякий інтервал, наприклад, $-1 \le x_i(k) \le 1$ дозволяє спростити розрахунки, оскільки параметри ширини σ_i в цьому випадку можуть бути прийняті однаковими для всіх входів, тобто $\sigma_i = \sigma$.

У другому прихованому шарі обчислюються аґреґовані значення

$$\varphi_l(k) = \prod_{i=1}^{n} \mu_{li}(x_i(k)),$$

при цьому для ґавсіанів з однаковими параметрами ширини є коректним співвідношення

$$\varphi_l(k) = \prod_{i=1}^{n} \mu_{li}(x_i(k)) = \prod_{i=1}^{n} \exp\left(-\frac{(x_i(k) - c_{li})^2}{2\sigma^2}\right) = \exp\left(-\frac{\|x(k) - c_l\|^2}{2\sigma^2}\right),$$

де $c_l = (c_{l1}, c_{l2}, ..., c_{ln})^T$, тобто сигнали на виходах блоків множення другого прихованого шару є аналогічними сигналам на виходах нейронів R_l першого прихованого шару звичайних радіально-базисних нейронних мереж (RBFN).

Третій прихований шар системи – шар нормалізації (N) реалізує елементарне перетворення

$$\tilde{\varphi}(x) = \frac{\varphi(x)}{\|\varphi(x)\|},$$

де $\varphi(x) = (\varphi_1(x), ..., \varphi_l(x), ..., \varphi_h(x)^T)$, необхідне для ефективної роботи четвертого вихідного шару, що є фактично кластерувальною нейро-фаззі мережею Когонена (FSOM) [29], налаштування параметрів якої виконується за допомогою спеціалізованої процедури конкурентного самонавчання.

У цьому шарі вирішується задача розбиття послідовностей образів підвищеної розмірності $\tilde{\varphi}(x(1)), ..., \tilde{\varphi}(x(k)), ..., \tilde{\varphi}(x(N)), ...$ на m кластерів із знаходженням прототипів-центроїдів $\tilde{c}_1^k, ..., \tilde{c}_j^k, ..., \tilde{c}_m^k$ (нейрони N_j^K) і рівнів належності кожного $\tilde{\varphi}(k)$ до кожного j-го кластера $u_j(k)$ (нейрони N_j^M), $\tilde{c}_1^k \in R^h$, $j = 1,2,...,m$.

Важлива проблема, що виникає в процесі синтезу системи, полягає в тому, як ефективно організувати базис, утворений дзвонуватими функціями, в якому можна було б ефективно провести кластерування. Для цього необхідно організувати процес адаптації кількості $h > n$ і центрів c_{li} функцій належності першого шару.

Для вирішення цієї задачі призначені п'ятий, шостий і сьомий додаткові шари, утворені nh налаштовними синаптичними вагами, $n+1$ суматорами і n блоками ділення, що вирішують задачі дефаззіфікування.

Таким чином, перший, другий, п'ятий, шостий і сьомий шари системи утворюють по суті багатовихідну нейро-фаззі систему Ванґа-Менделя [30] (TSK-система нульового порядку), основною відмінністю якої є те, що в якості навчального тут використовується вхідний сигнал $x(k)$, тобто система працює в режимі автоасоціації [21]. Виходом сьомого шару є векторний сигнал $\hat{x}(k) \in R^n$, який є оцінкою вхідного сигналу $x(k)$.

Якість відновлення оцінюється на основі векторної похибки

$$e(k) = x(k) - \hat{x}(k)$$

за допомогою того чи іншого скалярного критерію, наприклад:

$$\bar{e} = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} \frac{\|x(k) - \hat{x}(k)\|}{\|x\|^{\bullet}},$$

де $\|\bullet\|$ – будь-яка норма у метриці Мінковського, або MAPE-оцінки

$$\bar{e} = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} \frac{\sum_{i=1}^{n} |x_i(k) - \hat{x}_i(k)|}{\sum_{i=1}^{n} |x_i(k)|} \times 100\%.$$

Якщо виявиться, що значення $\overline{e}$ перевищує деякий апріорно заданий поріг, приймається рішення про те, що процес налаштування цих шарів повинен тривати, тобто h, c_{li}, w_{il}, підлягають подальшому уточненню. Кінцевим результатом навчання цих шарів є значення h, c_{li}, і матриця синаптичних ваг $W = \{w_{il}\}$.

Необхідно також зауважити, що на виходах п'ятого прихованого шару формується nh сигналів

$$w_{il}\prod_{i=1}^{n}\mu_{li}(x_i(k)) = w_{il}\varphi_l(k),$$

а на виходах шостого $-n+1$ сигналів

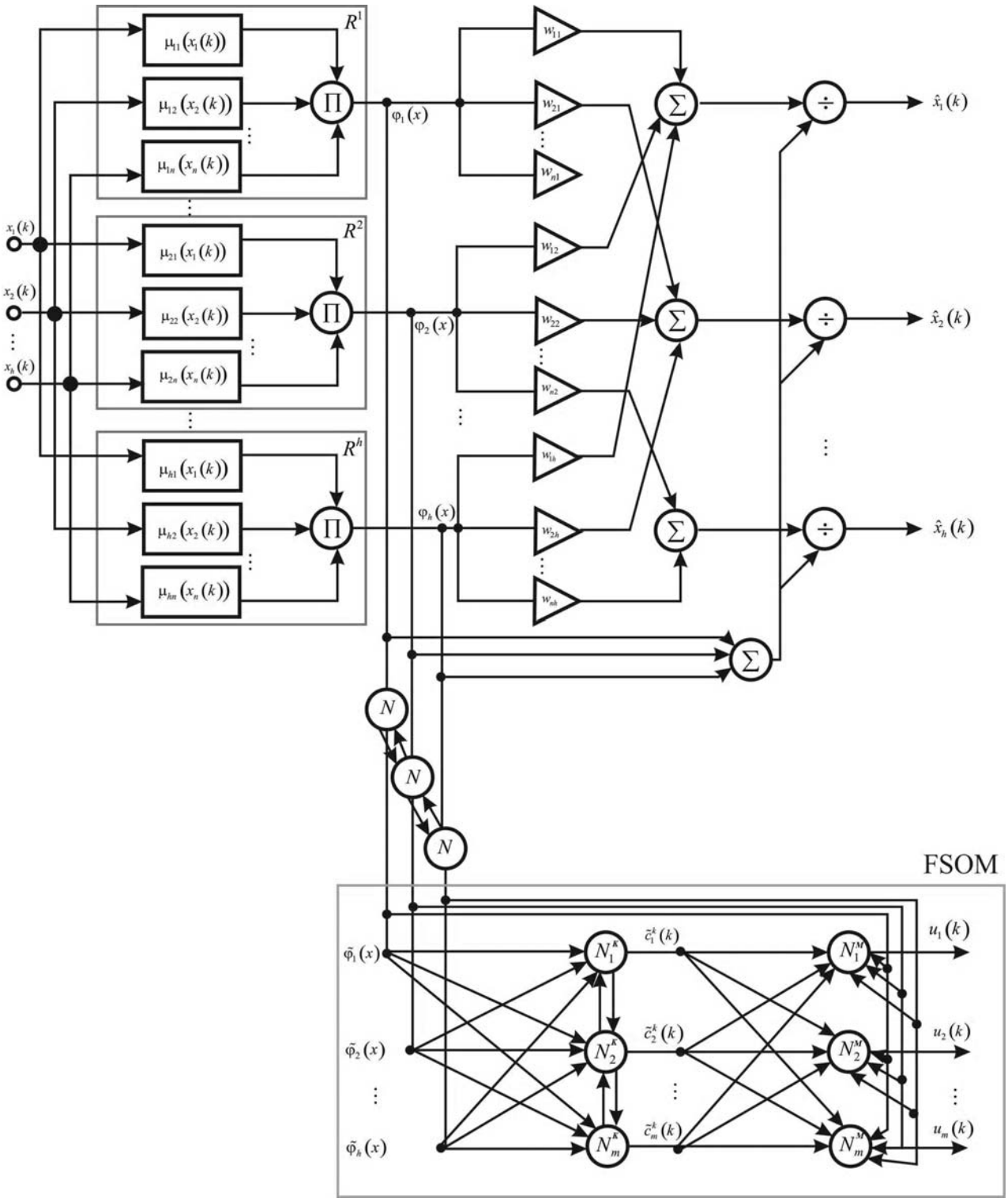


Рисунок 1 – Нечітка кластерувальна гібридна нейро-фаззі система

$$\sum_{l=1}^{h} w_{il} \prod_{i=1}^{n} \mu_{li}(x_i(k)) = \sum_{l=1}^{h} w_{il} \varphi_l(k),$$

$$\sum_{l=1}^{h} \prod_{i=1}^{n} \mu_{li}(x_i(k)) = \sum_{l=1}^{h} \varphi_l(k)$$

і, нарешті, на виходах сьомого шару – n сигналів

$$\hat{x}_i(k) = \frac{\sum_{l=1}^{h} w_{il} \prod_{i=1}^{n} \mu_{li}(x_i(k))}{\sum_{l=1}^{h} \prod_{i=1}^{n} \mu_{li}(x_i(k))} = \sum_{l=1}^{h} w_{il} \frac{\prod_{i=1}^{n} \mu_{li}(x_i(k))}{\sum_{l=1}^{h} \prod_{i=1}^{n} \mu_{li}(x_i(k))} =$$

$$= \sum_{l=1}^{h} w_{il} \hat{\varphi}_l(x(k)) = w_i^T \hat{\varphi}^h(x(k)),$$

де $\hat{\varphi}_l(x(k)) = \dfrac{\prod_{i=1}^{n} \mu_{li}(x_i(k))}{\sum_{l=1}^{h} \prod_{i=1}^{n} \mu_{li}(x_i(k))}$, $w_i = (w_{i1}, w_{i2}, ..., w_{ih})^T$,

$(\hat{\varphi}_1(x(k)), ..., \hat{\varphi}_l(x(k)), ..., \hat{\varphi}_h(x(k)))^T$.

Вводячи в подальший розгляд $(n \times 1)$-вектор $\hat{x}(k) = (\hat{x}_1(k), ..., \hat{x}_i(k), ..., \hat{x}_n(k))^T$ і $(n \times h)$-матрицю $W = (w_1, w_i, ..., w_n)^T$, остаточно можна записати

$$\hat{x}(k) = W \hat{\varphi}^h(x(k))$$

та

$$e(k) = x(k) - W \hat{\varphi}^h(x(k)).$$

Процес навчання нейро-фаззі системи, що розглядається, зводиться до самонавчання – еволюції першого прихованого шару, навчання з вчителем матриці синаптичних ваг w п'ятого прихованого шару і конкурентного самонавчання нейро-фаззі-мережі Когонена четвертого вихідного шару.

В основу налаштування першого прихованого шару покладені ідеї еволюційних фаззі-систем і, перш за все, адаптивний метод самонавчання гібридної нейро-фаззі системи [31].

Нехай на вхід системи, у якій в початковому стані в першому прихованому шарі відсутні функції належності, надходить перше спостереження навчальної вибірки $x(1) = (x_1(1), ..., x_i(1), ..., x_n(1))^T$. Це спостереження формує перший набір функцій належності $\mu_1 = (\mu_{11}, ..., \mu_{1i}, ..., \mu_{1n})^T$ таких, що $c_{1i} = x_i(1)$.

Далі для векторної функції належності μ_1 з центром $c_1(1)$ задається радіус сусідства r, що визначається максимально можливим числом h функцій належності у системі. Так, якщо функції належності по компонентам розподілені рівномірно, то

$$r = \frac{2}{h-1}.$$

Далі, при надходженні другого спостереження $x(2)$ проводиться перевірка умови

$$\max_i \left| c_{1i} - x_i(2) \right| \le r. \qquad (1)$$

Якщо ця умова виконується, проводиться корекція центрів функцій належності μ_1 відповідно до правила

$$c_{1i}(2) = c_{1i}(1) + \eta(2)(x_i(2) - c_{1i}(1)),$$

де $\eta(2)$ – параметр кроку навчання, наприклад, при $\eta(2) = 0,5$

$$c_{1i}(2) = \frac{c_{1i}(1) + x_i(2)}{2}.$$

У тому випадку, якщо умова (1) не виконується, формується друга функція належності з центрами

$$c_{2i}(2) = x_i(2).$$

Таким чином, формується вузол системи R_2, утворений елементами першого і другого шарів.

Нехай до моменту надходження на вхід системи спостереження $x(k)$ сформовано p вузлів R_l функцій належності $\mu_1, \mu_2, ..., \mu_p, p < h$ з центрами $c_{li}(k-1), l = 1, 2, ..., p;\ i = 1, 2, ..., n$. З надходженням $x(k)$ виконується перевірка умови

$$\max_i \left| c_{1i} - x_i(k) \right| \le r \ \forall\ l = 1, 2, ..., p. \qquad (2)$$

Якщо ця умова виконується, проводиться корекція центрів функцій належності, найближчих до відповідних компонентів $x_i(k)$ відповідно до правила

$$c_{li}(k) = c_{1i}(k-1) + \eta(k)(x_i(k) - c_{1i}(k-1)). \qquad (3)$$

Нескладно помітити, що (3) є не що інше, як відоме правило самонавчання Т. Когонена «Переможець отримує все» [11] з тією лише різницею, що самонавчання мапи Т. Когонена реалізується на гіперсфері

$$\left\| x(k) \right\|_2 = 1,$$

а правило (3) – на гіперкубі

$$\left\| x(k) \right\|_\infty = 1.$$

У тому випадку, якщо умова (2) не виконується, в системі формується $(p+1)$-й $(p+1 \le h)$ вузол R_{p+1} з центрами функцій належності

$$c_{p+1,i}(k) = x_i(k).$$

Як можна побачити, ця процедура є гібридом еволюційного алгоритму Н. Касабова [33] і самоорганізовної мапи Т. Когонена [11], при цьому процес еволюції архітектури-самонавчання функцій належності може протікати як безперервно, так і до досягнення кількості функцій належності граничного значення nh.

Для налаштування матриці синаптичних ваг може бути використаний або рекурентний метод найменших квадратів, який є за суттю оптимальною за швидкодією гавсівсько-ньютонівською процедурою оптимізації вигляду

$$\begin{cases} W(k) = W(k-1) + \dfrac{(x(k) - W(k-1)\hat{\varphi}^h(x(k))\hat{\varphi}^{hT}(x(k))P(k-1)}{1+\varphi^{hT}(x(k))P(k-1)\hat{\varphi}^h(x(k))}, \\ P(k) = P(k-1) - \dfrac{P(k-1)\hat{\varphi}^h(x(k))\hat{\varphi}^{hT}(x(k))P(k-1)}{1+\hat{\varphi}^{hT}(x(k))P(k-1)\hat{\varphi}^h(x(k))}, \end{cases}$$

або багатовимірна версія алгоритму Качмажа-Уідроу-Гоффа

$$W(k) = W(k-1) + \frac{(x(k) - W(k-1)\hat{\varphi}^h(x(k))}{\left\|\hat{\varphi}^h(x(k))\right\|^2}\hat{\varphi}^{hT}(x(k)) =$$

$$= W(k-1) + (x(k) - W(k-1)\hat{\varphi}^h(x(k))\hat{\varphi}^{h+}(x(k)),$$

де $(\bullet)^+$ – символ операції псевдообернення.

В основі конкурентного самонавчання четвертого прихованого шару полягає ймовірнісний алгоритм нечіткого кластерування, заснований на оптимізації цільової функції вигляду [16]

$$E(u_i, \tilde{c}_j^K) = \sum_{k=1}^{N}\sum_{j=1}^{m} u_j^B(k)\left\|\tilde{\varphi}(x(k)) - \tilde{c}_j^K\right\|^2$$

за обмежень

$$\sum_{j=1}^{m} u_j(k) = 1, k = 1,2,...,N,$$

$$0 \le \sum_{k=1}^{N} u_j(k) \le N, j = 1,2,...,m,$$

де $u_j(k) \in [0,1]$, β – невід'ємний параметр фаззіфікування, що визначає нечітку границю між різними класами і впливає на рівень нечіткості в остаточному розбитті даних по кластерам.

Застосування стандартного апарату нелінійного програмування, заснованого на невизначених множниках Лагранжа і вирішенні системи рівнянь Каруша-Куна-Таккера, веде до відомого результату

$$\begin{cases} \tilde{c}_j^K = \dfrac{\sum_{k=1}^{N} u_j^\beta(k)\tilde{\varphi}(x(k))}{\sum_{k=1}^{N} u_j^\beta(k)}, \\ u_j(k) = \dfrac{(\left\|\tilde{\varphi}(x(k)) - \tilde{c}_j^K\right\|^2)^{\frac{1}{1-\beta}}}{\sum_{l=1}^{m}(\left\|\tilde{\varphi}(x(k)) - \tilde{c}_l^K\right\|^2)^{\frac{1}{1-\beta}}}, \end{cases} \quad (4)$$

який при $\beta = 2$ збігається з алгоритмом нечітких С-середніх (FCM) Дж. Бездека:

$$\begin{cases} \tilde{c}_j^K = \dfrac{\sum_{k=1}^{N} u_j^2(k)\tilde{\varphi}(x(k))}{\sum_{k=1}^{N} u_j^2(k)}, \\ u_j(k) = \dfrac{(\left\|\tilde{\varphi}(x(k)) - \tilde{c}_j^K\right\|^2)^{-2}}{\sum_{l=1}^{m}(\left\|\tilde{\varphi}(x(k)) - \tilde{c}_l^K\right\|^2)^{-2}}. \end{cases} \quad (5)$$

Алгоритми (4), (5) набули широкого поширення при вирішенні задач нечіткого кластерування, проте їх використання можливе тільки в пакетному режимі при фіксованому об'ємі оброблюваної вибірки даних.

Якщо ж дані надходять на опрацювання послідовно в on-line режимі, є доцільним використання рекурентного варіанту (4), заснованого на процедурі нелінійного програмування Ерроу-Гурвіца-Удзави вигляду

$$\begin{cases} \tilde{c}_j^K(k) = \tilde{c}_j^K(k-1) + \eta(k)u_j^\beta(k-1)(\tilde{\varphi}(x(k)) - \tilde{c}_j^K(k-1)), j = 1,2,...,m, \\ u_j(k) = \dfrac{(\left\|\tilde{\varphi}(x(k)) - \tilde{c}_j^K\right\|^2)^{\frac{1}{1-\beta}}}{\sum_{l=1}^{m}(\left\|\tilde{\varphi}(x(k)) - \tilde{c}_l^K(k)\right\|^2)^{\frac{1}{1-\beta}}}. \end{cases} \quad (6)$$

Аналізуючи (6), можна помітити, що розглядаючи співмножник $u_j^\beta(k-1)$ в якості функції сусідства, отримуємо правило самонавчання Т. Когонена на основі принципу «Переможець отримує більше» (WTM), при $\beta \to 1$ отримуємо алгоритм типу К-середніх, а $\beta \to 0$ відповідає стандартному правилу Т. Когонена типу «Переможець отримує все» (WTA):

$$\tilde{c}_j^K(k) = \tilde{c}_j^K(k-1) + \eta(k)(\tilde{\varphi}(x(k)) - \tilde{c}_j^K(k-1)) \quad (7)$$

аналогічне (3). Нескладно помітити також, що рекурентна процедура (7) мінімізує цільову функцію вигляду

$$\mathrm{E}(\tilde{c}_j^K) = \sum_k \left\|\tilde{\varphi}(x(k)) - \tilde{c}_j^K\right\|^2,$$

оптимізація якої веде до звичайної оцінки середнього арифметичного

$$\tilde{c}_j^K(k) = \frac{1}{k}\sum_{\varphi(\tilde{x}(k)) \in Cl_j} \tilde{\varphi}(x(k))$$

або у рекурентній формі:

$$\tilde{c}_j^K(k) = \tilde{c}_j^K(k-1) + \frac{1}{k}(\tilde{\varphi}(x(k)) - \tilde{c}_j^K(k-1)).$$

Такий вибір параметра кроку $\eta(k)$ узгоджується з правилами стохастичної апроксимації і надає результатам ясний фізичний зміст.

Таким чином, алгоритм самонавчання (6) четвертого прихованого шару остаточно може бути записаний у вигляді

$$\begin{cases} \tilde{c}_j^K(k) = \tilde{c}_j^K(k-1) + \dfrac{u_j^{\beta}(k-1)}{k}(\tilde{\varphi}(x(k)) - \tilde{c}_j^K(k-1)),\ j = 1,2,...,m, \\ u_j(k) = \dfrac{(\left\|\tilde{\varphi}(x(k)) - \tilde{c}_j^K(k)\right\|^2)^{\frac{1}{1-\beta}}}{\sum\limits_{l=1}^{m}(\left\|\tilde{\varphi}(x(k)) - \tilde{c}_l^K(k)\right\|^2)^{\frac{1}{1-\beta}}}, \end{cases}$$

що поєднує в собі обчислювальну простоту і послідовну обробку когоненівського навчання з можливістю нечіткого кластерування.

Вектори-центроїди кластерів $\tilde{c}_j^K(k)$, обчислені в просторі підвищеної розмірності R^h, далі можуть бути спроектовані у вихідний простір R^n за допомогою матриці синаптичних ваг на основі перетворення

$$c_j^K(k) = W(k)^N c_j^K(k)\ \forall\ j = 1,2,...,m,$$

$$c_j^K(k) \in R^n,\ \ \tilde{c}_j^K(k) \in R^h.$$

Таким чином, розглянута кластерувальна нейро-фаззі система є за суттю гібридом двох нейро-фаззі систем: еволюційної TSK-системи і нечіткої кластерувальної мережі Когонена, що дозволяє в on-line режимі відновлювати класи довільної форми, що перекриваються (лінійно нероздільні), які формуються даними, що надходять на оброблення у формі потоку інформації.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Ефективність запропонованої гібридної нейро-фаззі системи та процедур її навчання продемонстрована при розв'язанні задачі нечіткого кластерування. В якості тестових данних було обрано три вибірки з UCI-репозіторія – Iris, Wine та Breast Cancer [34]. Всі данні було попередньо пронормовано на гіперкуб в інтервалі [–1, 1].

Для порівняння ефективності запропонованої системи з ефективністю інших існуючих систем було обрано самоорганізовну мапу Т. Когонена та метод нечітких С-середніх (FCM).

У якості критерію якості кластерування було обрано середньоквадратичну похибку MSE.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Результати проведених експериментів наведено в табл. 1.

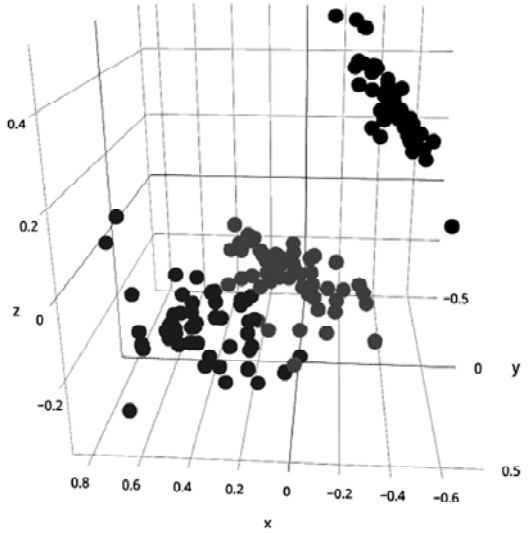
Таблиця 1 – Результати експериментів

Тип системи	Iris	Wine	Breast Cancer
Самоогранізовна мапа Т. Когонена	0,067	0,79	0,82
FCM	0,07	0,072	0,08
Гібридна нейро-фаззі система	0,054	0,069	0,0083

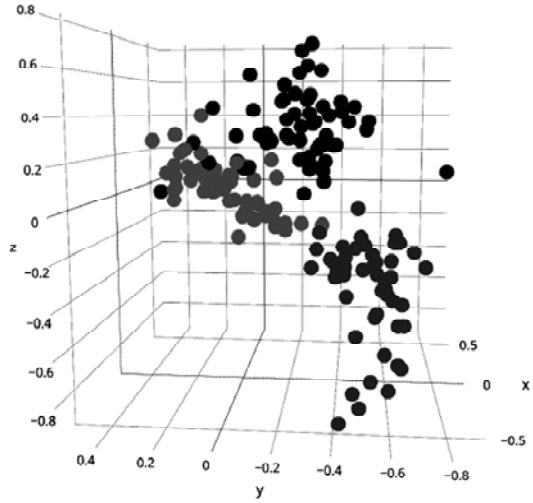
6 ОБГОВОРЕННЯ

Як можна побачити з табл. 1, запропонована гібридна нейро-фаззі система досить непогано показала себе при розв'язанні задач кластерування. Варто відзначити, що з ростом вибірки похибка кластерування запропонованої нейро-фаззі системи зменшувалась. Якщо порівнювати якість кластерування, гібридна нейро-фаззі система продемонструвала найкращий результат.

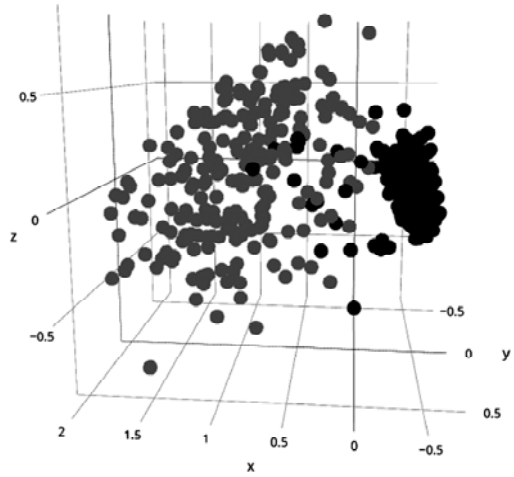
Результат кластерування за допомогою гібридної нейро-фаззі системи для вибірок Iris, Wine та Breast Cancer наведено на рис. 2. Для більшої наочності результати звізуалізовані у трьохвимірному просторі.



а



б



в

Рисунок 2 – Результати кластерування гібридною нейро-фаззі системою:
а – вибірка Iris, б – вибірка Wine, в – вибірка Breast Cancer

ВИСНОВКИ

Таким чином у розгляд введено еволюційний підхід до вирішення задач нечіткого on-line кластерування потоків даних, що послідовно надходять на опрацювання.

Наукова новизна роботи полягає у тому, що запропоновано гібридну нейро-фаззі систему обчислювального інтелекту, що призначена для нечіткого on-line кластерування потоку інформації в умовах невизначеності як про форму класів, так і про рівні їх перекриття. Введена нейро-фаззі система є досить простою в чисельній реалізації і дозволяє вирішувати задачі динамічного інтелектуального аналізу даних (DDM) та інтелектуального аналізу потоків даних (DSM) за умов суттєвої апріорної невизначенності.

До практичної цінності отриманих результатів можна віднести те, що запропоновану систему можна використовувати для розв'язання задач кластерування в умовах великої кількості спостережень (Big Data), що надходять на оброблення в послідовному режимі.

ПОДЯКИ

Роботу виконано в рамках держбюджетної науково-дослідної теми Харківського національного університету радіоелектроніки № 307 «Динамічний інтелектуальний аналіз послідовностей нечіткої інформації за умов суттєвої невизначеності на основі гібридних систем обчислювального інтелекту».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Rutkowski L. Computational Intelligence. Methods and Techniques / L. Rutkowski. – Berlin-Heidelberg : Springer-Verlag, 2008. – 514 p.
2. Mumford C. Computational Intelligence. Collaboration, Fuzzy and Emergence / C. Mumford, L. Jain. – Berlin: Springer-Vergal, 2009. – 726 p.
3. Computational Intelligence. A Methodological Introduction / [R. Kruse, C. Borgelt, F. Klawonn and other]. – Berlin : Springer, 2013. – 488 p.
4. Du K.-L. Neural Networks and Statistical Learning / K.-L. Du, M. N. S. Swamy. – London : Springer-Verlag, 2014. – 824 p.
5. Han J. Data Mining : Concepts and Techniques / J. Han, M. Kamber. – Amsterdam : Morgan Kaufmann Publ., 2006. – 754 p.
6. Aggarwal C. C. Data Mining / A. A. Aggarwal. – Cham : Springer, Int. Publ., Switzerland, 2015. – 734 p.
7. Aggarwal C. C. Data Clustering. Algorithms and Application / C. C. Aggarwal, C. K. Reddy. – Boca Raton : CRC Press, 2014. – 648 p.
8. Xu R. Clustering, IEEE Press Series on Computational Intelligence / R. Xu, D. C. Wunsch. – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2009. – 370 p.
9. Haykin S. Neural Networks. A Comprehensive Foundation / S. Haykin. – Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, Inc., 1999. – 842 p.
10. Bifet A. Adaptive Stream Mining: Pattern Learning and Mining from Evolving Data Streams / A. Bifet. – IOS Press, 2010. – 224 p.
11. Kohonen, T. Self-Organizing Maps / T. Kohonen. – Berlin : Springer-Verlag, 1995. – 362 p.
12. Höppner F. Fuzzy-Clusteranalyse: Verfahren für die Bilderkennung, Klassifikation und Datenanalyse. / F. Höppner, F. Klawonn, R. Kruse. – Braunschweig : Vieweg, 1996. – 280 p.
13. Fuzzy Cluster Analysis: Methods for Classiьication, Data Analysis and Image Recognition [F. Höppner, F. Klawonn, R. Kruse, T. Runkler]. – Chichester : John Wiley & Sons, 1999. – 289 p.
14. Tsao E. C.-K. Fuzzy Kohonen clustering networks / E. C.-K. Tsao, J. C. Bezdek, N. R. Pal // Pattern Recognition. – 1994. – Vol. 27, № 5. – P. 757–764.
15. Smoothly distributed fuzzy C-means: a new self-organizing map [R. D. Pascual-Marqui, A. D. Pascual-Montano, K. Kochi, J. M. Caroso] // Pattern Recognition, 2001. – Vol. 34, № 5. – P. 2395–2402.
16. Bezdek J.-C. Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms / J.-C. Bezdek. – N. Y. : Plenum Press, 1981. – 272 p.
17. Girolami M. Mercer kernel-based clustering in feature space / M. Girolami // IEEE Transactions on Neural Networks. – 2002. – Vol. 13, Issue 3. – P. 780–784.
18. Camastra F. A novel kernel method for clustering / F. Camastra, A. Verri // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2005. – Issue. 5. – P. 801–805.
19. Schölkopf B. Learning with Kernels / B. Schцlkopf, A. Smola. – Cambridge, M. A. : MIT Press, 2002. – 648 p.
20. Kung S. Y. Kernel Methods and Machine Learning / S. Y. Kung. – Cambridge : University Press, 2014. – 578 p.
21. Kacprzyk J. Springer Handbook of Computational Intelligence / J. Kacprzyk, W. Pedrycz. – Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2015. – 1634 p.
22. Cover T. M. Geometrical and statistical properties of systems of linear inequalities with applications in pattern recognition / T. M. Cover // IEEE Transactions on Electronic Computers. – 1965. – Vol. 14. – P. 326–334.
23. Бодянский Е. В. Ядерная самоорганизующаяся карта на основе радиально-базисной нейронной сети / Е. В. Бодянский, А. А. Дейнеко, Я. В. Куценко // Электротехнические и компьютерные системы. – 2015. – № 20. – С. 97–105.
24. Jang J.-S. Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence / J.-S. Jang, C.-T. Sun, E. Mizutani. – Upper Saddle River: Prentice Hall, 1997. – 640 p.
25. Takagi T. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control / T. Takagi, M. Sugeno // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 1985. – Vol. 15, № 1. – P. 116–132.
26. Friedman J. The Elements of Statistical Learning. Data Mining, Inference and Prediction / J. Friedman, T. Hasti, R.Tibshirani. – Berlin : Springer, 2003. – 552 p.
27. Ljung L. System Identification : Theory for User / L. Ljung. – Upper Saddle river : Prentice Hall, Inc., 1987. – 432 p.
28. Nelles O. Nonlinear System Identification / O. Nelles. – Berlin : Springer, 2001. – 785 p.
29. Bodyanskiy Ye. Adaptive neuro-fuzzy Kohonen network with variable fuzzifier / Ye. Bodyanskiy, B. Kolchygin, I. Pliss // Int. J. Information Technologies and Knowledge. – 2011. – Vol. 18, Issue 3. – P. 215–223.
30. Wang L. X. Fuzzy basis functions, universal approximation, and orthogonal least-squares learning / L. X. Wang, J. M. Mendel // IEEE Transactions on Neural Networks. – 1992. – Vol. 3, Issue 5. – P. 807–814.
31. Lughofer E. Evolving Fuzzy Systems – Methodologies and Applications / E. Lughofer. – Studies in Fuzziness and Soft Computing. – Springer-Berlin, 2011. – 410 p.
32. Bodyanskiy Ye. V. Adaptive method of hybrid learning for an evolving neuro-fuzzy system / Ye. V. Bodyanskiy, O. O. Boiko, I. P. Pliss // Cybernetics and Systems Analysis. – 2015. – Vol. 51, Issue 4. – P. 500–505.
33. Kasabov N. Evolving Connectionist Systems / N. Kasabov. – London : Springer-Verlag, 2003. – 307 p.
34. Frank A. UCI Machine Learning Repository [Electronic resource] / A. Frank, A. Asuncion. – Irvine, CA : University of California, School of Information and Computer Science, 2013. – Access mode: http://archive.ics.uci.edu/ml.

Стаття надійшла до редакції 01.08.2016.
Після доробки 16.08.2016.

Бодянский Е. В.[1], Дейнеко А. О.[2], Куценко Я. В.[3]
[1]Д-р техн. наук, научный руководитель Проблемной НИЛ АСУ, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина
[2]Канд. техн. наук, научный сотрудник Проблемной НИЛ АСУ, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина
[3]Аспирантка кафедры искусственного интеллекта Харьковского национального университета радиоэлектроники, Харьков, Украина

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ НЕЧЕТКАЯ КЛАСТЕРИЗАЦИЯ НА ОСНОВЕ НЕЙРО-ФАЗЗИ ПОДХОДА

В статье предложена on-line нейро-фаззи система для решения задачи последовательной нечеткой кластеризации данных, которая позволяет обрабатывать векторы наблюдений любой размерности в условиях ограниченного числа данных в обрабатываемой выборке, а также алгоритм ее самообучения на основе самоорганизующейся карты Т. Кохонена. Архитектура системы содержит сем слоев обработки информации и, по своей сути, является гибридом системы Ванга-Менделя и кластеризирующейся самоорганизующейся сети. Предложенная система в процессе самообучения настраивает не только свои параметры, но и архитектуру в on-line режиме. Для настройки параметров функций принадлежности гибридной нейро-фаззи системы введен алгоритм, основанный на использовании конкурентного обучения. В процессе обучения гибридная нейро-фаззи система настраивает синаптические веса, центры и параметры ширины функций принадлежности. Разработано программное обеспечение, реализующее предложенную архитектуру гибридной нейро-фаззи системы. Проведен ряд экспериментов по исследованию свойств предлагаемой системы. Результаты экспериментов подтвердили, что предложенную систему можно использовать для решения задачи кластеризации, при этом обработка данных происходит в on-line режиме. Система характеризуется простотой численной реализации. Отличительной особенностью предложенной системы является то, что она объединяет в себе как обучение с учителем, так и самообучение.

Ключевые слова: гибридная система, вычислительный интеллект, нейро-фаззи система, функция принадлежности, нечеткая кластеризация.

Bodyanskiy Ye. V.[1], Deineko A. O.[2], Kutsenko Ya. V.[3]
[1]Dr. Sc., Scientific Head of the Control Systems Research Laboratory, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine
[2]Ph.D, Researcher at the Control Systems Research Laboratory, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine
[3]Ph.D, student at the Artificial Intelligence Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

SEQUENTIAL FUZZY CLUSTERING BASED ON NEURO-FUZZY APPROACH

An on-line neuro-fuzzy system for solving data stream fuzzy clustering task and its self-learning procedures based on T. Kohonen's rule are proposed in the paper. The architecture of proposed system consists of seven information processing layers and represents the hybrid of the Wang-Mendel system and clustering self-organizing network. During a learning procedure in on-line mode, the proposed system tunes both its parameters and its architecture. For tuning of membership functions parameters of neuro-fuzzy system the method based on competitive learning is proposed. The hybrid neuro-fuzzy system tunes its synaptic weights, centers and width parameters of membership functions. Software that implements the proposed hybrid neuro-fuzzy system's architecture has been developed. A number of experiments has been held in order to research the proposed system's properties. Experimental results have proved the fact that the proposed system could be used to solve a sequential stream clustering task. The proposed system provides computational simplicity. A distinguishing feature of the proposed system is that this system combine supervised learning and self-learning procedures.

Keywords: hybrid system, Data Mining, Data Stream Mining, neuro-fuzzy system, membership function, fuzzy clustering.

REFERENCES

1. Rutkowski L. Computational Intelligence. Methods and Techniques. Berlin-Heidelberg, Springer-Verlag, 2008, 514 p.
2. Mumford C., Jain L. Computational Intelligence. Collaboration, Fuzzy and Emergence. Berlin, Springer-Vergal, 2009, 726 p.
3. Kruse R., Borgelt C., Klawonn F., Moewes C., Steinbrecher M., Held P. Computational Intelligence. A Methodological Intr oduction. Berlin, Springer, 2013, 488 p.
4. Du K.-L., Swamy M.N.S. Neural Networks and Statistical Learning. London, Springer-Verlag, 2014, 824 p.
5. Han J., Kamber M. Data Mining: Concepts and Techniques. Amsterdam: Morgan Kaufmann Publ., 2006, 754 p.
6. Aggarwal C. C. Data Mining, Cham, Springer, Int. Publ., Switzerland, 2015, 734 p.
7. Aggarwal C. C., Reddy C. K. Data Clustering. Algorithms and Application. Boca Raton, CRC Press, 2014, 648 p.
8. Xu R., Wunsch D. C. Clustering, IEEE Press Series on Computational Intelligence. Hoboken, NJ. John Wiley & Sons, Inc., 2009, 370 p.
9. Haykin S. Neural Networks. A Comprehensive Foundation, Upper Saddle River, N.J., Prentice Hall, Inc., 1999, 842 p.
10. Bifet A. Adaptive Stream Mining: Pattern Learning and Mining from Evolving Data Streams. IOS Press, 2010, 224 p.
11. Kohonen T. Self-Organizing Maps. Berlin, Springer-Verlag, 1995, 362 p.
12. Höppner F., Klawonn F., Kruse R. Fuzzy-Clusteranalyse: Verfahren für die Bilderkennung, Klassifikation und Datenanalyse. Braunschweig, Vieweg, 1996, 280 p.
13. Höppner F., Klawonn F., Kruse R., Runkler T. Fuzzy Cluster Analysis: Methods for Classification, Data Analysis and Image Recognition. Chichester, John Wiley & Sons, 1999, 289 p.
14. Tsao E. C.-K., Bezdek J. C., Pal N. R. Fuzzy Kohonen clustering networks, Pattern Recognition, 1994, Vol. 27, No. 5, pp. 757–764.
15. Pascual-Marqui R. D., Pascual-Montano A. D., Kochi K., Caroso J. M. Smoothly distributed fuzzy C-means: a new self-organizing map, Pattern Recognition, 2001, Vol. 34, No. 5, pp. 2395–2402.
16. Bezdek J.-C. Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms, N.Y., Plenum Press, 1981, 272 p.
17. Girolami M. Mercer kernel-based clustering in feature space, *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2002, Vol. 13, Issue 3, pp. 780–784.
18. Camastra F., Verri A. A novel kernel method for clustering, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, Issue. 5, pp. 801–805.
19. Schцlkopf B., Smola A. Learning with Kernels, Cambridge, M.A., MIT Press, 2002, 648 p.
20. Kung S. Y. Kernel Methods and Machine Learning, Cambridge, University Press, 2014, 578 p.
21. Kacprzyk J., Pedrycz W. Springer Handbook of Computational Intelligence. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2015, 1634 p.
22. Cover T. M. Geometrical and statistical properties of systems of linear inequalities with applications in pattern recognition, *IEEE Transactions on Electronic Computers*, 1965, Vol. 14, pp. 326–334.
23. Bodyanskiy Ye., Deineko A., Kutsenko Ya. Kernel Self-Organizing Map based on radial-basis neural network, *Electrotechnical and computer systems*, 2015, Vol. 20, pp. 97–105.
24. Jang J.-S., Sun C.-T., Mizutani E. Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence, Upper Saddle River, Prentice Hall, 1997, 640 p.
25. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics,* 1985, Vol.15, № 1, pp. 116–132.
26. Friedman J., Hasti T., Tibshirani R. The Elements of Statistical Learning. Data Mining, Inference and Prediction. Berlin, Springer, 2003, 552 p.
27. Ljung L. System Identification: Theory for User, Upper Saddle river, Prentice Hall, Inc., 1987, 432 p.
28. Nelles O. Nonlinear System Identification. Berlin, Springer, 2001, 785 p.
29. Bodyanskiy Ye., Kolchygin B., Pliss I. Adaptive neuro–fuzzy Kohonen network with variable fuzzifier, *Int. J. Information Technologies and Knowledge*, 2011, Vol. 18, Issue 3, pp. 215–223.
30. Wang L. X., Mendel J. M. Fuzzy basis functions, universal approximation, and orthogonal least-squares learning, *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1992, Vol. 3, Issue 5, pp. 807–814.
31. Lughofer E. Evolving Fuzzy Systems – Methodologies and Applications, Studies in Fuzziness and Soft Computing, Springer-Berlin, 2011, 410 p.
32. Bodyanskiy Ye.V., Boiko O.O., Pliss I. P. Adaptive method of hybrid learning for an evolving neuro-fuzzy system, *Cybernetics and Systems Analysis,* 2015, Vol. 51, Issue 4, pp. 500–505.
33. Kasabov N. Evolving Connectionist Systems. London, Springer-Verlag, 2003, 307 p.
34. Frank A., Asuncion A. UCI Machine Learning Repository [Electronic resource], Irvine, CA, University of California, School of Information and Computer Science, 2013, Access mode: http://archive.ics.uci.edu/ml.

УДК 004.932.2:004.93'1

Гороховатский В. А.[1], Гороховатский А. В.[2], Берестовский А. Е.[3]

[1]Д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры информационных технологий, Харьковский учебно-научный институт государственного высшего учебного заведения «Университет банковского дела», Харьков, Украина
[2]Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры информатики и компьютерной техники, Харьковский национальный экономический университет имени Семена Кузнеца, Харьков, Украина
[3]Аспирант кафедры информатики, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина

СТРУКТУРНОЕ РАСПОЗНАВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДЕЛЕЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ И САМООРГАНИЗАЦИИ ПРИЗНАКОВ

Статья посвящена исследованию проблемы распознавания изображений в компьютерном зрении на основе множества структурных SURF-признаков. В пространстве структурных признаков выполнена самоорганизация с целью увеличения быстродействия процесса распознавания. В качестве аппарата самоорганизации использована нейронная сеть Кохонена.

Объектом исследования есть метод вычисления подобия описаний и модели интеллектуальной обработки в новом пространстве признаков. Предметом исследования является систематизация и группирование множеств структурных признаков визуальных объектов.

Цель работы – построение метода структурного распознавания с применением входных данных в виде множества кластеров структурных признаков, полученных в результате самоорганизации. Задачами исследования есть изучение особенностей и анализ моделей для вычисления характеристик кластеров, построение модифицированных мер структурного подобия, экспериментальное оценивание качества распознавания для разных способов сопоставления описаний в прикладной базе визуальных образцов.

Предложено построение метода распознавания изображений на основе эталонных описаний в кластерном виде, а распознавание базируется на классификации структурных признаков объекта в пространстве кластеров с дальнейшим вычислением и оптимизацией подобия векторных описаний.

Проведено моделирование и экспериментальные исследования предложенного метода распознавания на тестовом множестве изображений с применением признаков SURF. Подтверждена работоспособность и эффективность метода в плане быстродействия, получены оценки качества распознавания для разнообразия вариантов обработки.

Ключевые слова: компьютерное зрение, структурное распознавание изображений, характерные признаки, дескрипторы, структурное описание, метод SURF, самоорганизация, кластеризация, сеть Кохонена, подобие векторных описаний, матрица характеристик кластеров.

НОМЕНКЛАТУРА

SURF – Speeded up robust features (ускоренное выделение устойчивых особенностей);

ХП – характерный признак;

$Z \subset R^n$ – описание объекта;

$\{Z^j\}_{j=1}^{J}$ – множество (база) эталонных описаний;

$s_j = card(Z^j)$ – число элементов эталона Z^j;

C_i – множество кластеров ХП;

q – число кластеров;

m_i – объем i-ого кластера;

$T = \{\{t_i^j\}_{j=1,...J}\}_{i=1,...,q}$ – матрица характеристик кластеров;

$L[T]$ – интеллектуальная обработка матрицы T;

$\{c_1, c_2, ..., c_q\}$ – множество центров кластеров;

$\rho(c_a, z)$ – расстояние до центра c_a кластера с номером $a = \overline{1,q}$;

J – множество номеров классов;

V_u – сформированное из u элементов подмножество номеров кластеров или классов; $M = \{1,2,...\}$ – ограниченное множество целых чисел;

Ind – процедура индексирования по множеству A (значения t_i^j или расстояния до центров кластеров);

μ – мера подобия;

$\mu_{\max 2}$ – второй элемент в списке ранжированных по убыванию значений μ для эталонов;

$t_i[.]$ – векторное кластерное представление объекта и эталона, соответствующее строке матрицы данных T;

γ – нормированный коэффициент корреляции.

ВВЕДЕНИЕ

В структурных методах распознавания изображений, получивших распространение в системах компьютерного зрения, описание визуального объекта представляют множеством характерных признаков (ХП) – векторов, закрепленных в координатах ключевых точек изображения и инвариантных к геометрическим преобразованиям объектов в поле зрения [1–4]. Это множество однотипных признаков отражает конструкцию образа объекта в виде списка точек пространства векторов. Углубленное исследование пространства структурных признаков показывает, что влияние ХП на результат распознавания напрямую зависит от их взаимосвязей в рамках описания, характеризуемых подобием внутри эталона и между разнообразием описаний списка эталонов.

Ценные для распознавания параметры признаков вычисляют путем обучения в соответствии с процедурой, базирующейся на степени их взаимного подобия в пределах топологической окрестности элемента многомерного пространства. Другим способом установления параметров связи может быть экспертное оценивание составляющих множества ХП, включающее взаимное пространственное расположение и значимость для распознавания.

© Гороховатский В. А., Гороховатский А. В., Берестовский А. Е., 2016
DOI 10.15588/1607-3274-2016-3-5

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Возникает целесообразность создания и применения таких интеллектуальных моделей обработки данных в структурном распознавании, где сопоставление признаков осуществляется с учетом полученных в результате самоорганизации параметров, отражающих их ключевые свойства: взаимосвязь, взаимное влияние, близость в признаковом пространстве, значимость и действие на результат. Параметры моделей определяются эталонным множеством и схемами обработки, они способны перестраиваться путем самообучения системы при необходимости обновления базы изображений.

Целью статьи есть изучение и оценивание эффективности применения самоорганизации и интеллектуальной обработки в методах структурного распознавания в плане построения правил принятия решений о классе объектов на основе данных прикладной базы изображений. За счет самоорганизации множество структурных элементов преобразуется к вектору, что сокращает объем вычислительных затрат и повышает быстродействие распознавания.

Задачи исследования – изучение особенностей и анализ вариантов вычисления характеристик, а также построение мер структурного подобия применительно к описаниям изображений в виде множеств дескрипторов структурных признаков, а также экспериментальное оценивание качества распознавания в прикладной базе визуальных образцов.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Применение самоорганизации для системы структурных признаков путем кластерного представления в рамках множества элементов базы эталонных образов на этапе обучения позволяет вскрыть внутреннюю структуру признакового пространства и свести распознавание к значительно более эффективному сопоставлению, где эталоны описываются векторами, а релевантность эталону характеризуется числовым коэффициентом, имеющим смысл функции принадлежности [1–4].

Самоорганизация может быть выполнена с использованием аппарата сетей Кохонена [3, 5, 7]. Осуществление кластеризации-классификации структурирует библиотеку эталонных признаков путем внедрения механизма их коллективного взаимодействия, который реализуется как адаптивный процесс соревновательного обучения. За счет кластеризации совершается преобразование описаний эталонов из пространства «множество дескрипторов» к пространству «числовые вектора», что ускоряет распознавание [8]. Задачи построения оптимального классификатора и оптимальной системы признаков здесь считают тождественными [6]. Интеллектуальная обработка данных в системах голосования признаков, как правило, реализуется в виде набора эвристик [10].

Проведенные нами исследования говорят о том, что выигрыш в быстродействии распознавания в результате структурирования пространства признаков возрастает с увеличением параметров размера описаний, числа эталонов и уменьшением числа кластеров, и для конкретных приложений составляет несколько десятков раз [1, 3].

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках структурных подходов описания объектов рассматривают в виде множества дескрипторов – числовых векторов из R^n. Описание $Z \subset R^n$ объекта представляют как мультимножество [1].

Пусть имеем базу $\{Z^j\}_{j=1}^J$ описаний из J эталонов, а эталон, в свою очередь, есть множество $Z^j = \{z_{jk}\}$, $z_{jk} \in R^n$, $Z^j \subset R^n$, j – номер эталона, k – номер ХП внутри описания эталона, параметр n фиксирован. Результатом самоорганизации есть кластерное представление базы $\{Z^j\}_{j=1}^J$ [3, 4]. Если воспользоваться аппаратом сети Кохонена [7], объединяющим нелинейное проецирование и кластеризацию, то множество $\{Z^j\}_{j=1}^J$ трансформируется к разбиению множеством кластеров $\{Z^j\}_{j=1}^J \to C$, $C = \cup_{i=1}^q C_i$, причем $C_i \cap C_a = \varnothing$.

Распознавание на основе кластерных характеристик предполагает реализацию следующих шагов предварительной обработки:

1) формирование эталонного множества $\{Z^j\}_{j=1}^J$;

2) кластеризация $\{Z^j\}_{j=1}^J$ с получением множества центров $\{c_1, c_2, ..., c_q\}$, $c_a \in R^n$ – центр кластера, q – число кластеров; m_i – объем i-го кластера;

3) вычисление множества $T = [t_1, t_2, ..t_a, ..., t_q]$ векторов-столбцов $t_a = [t_a^1, t_a^2, .t_a^J]$, которые образуют матрицу T данных, характеризующую кластеры в аспекте числа элементов, отнесенных к эталону;

4) обработка матрицы T в целях отбора значимых данных.

Постоим матрицу данных T для $\{Z^j\}_{j=1}^J$. Вычислим $k_i(j) = card[\{z \in C_i \mid z \in Z^j\}]$ – число элементов эталона Z^j, отнесенных к C_i. Заполним значениями $k_i(j)$ целочисленную матрицу данных $T = \{\{t_i^j\}_{j=1,...J}\}_{i=1,...,q}$.

Обязательными этапами обработки матрицы T, на наш взгляд, есть:

1) устранение из анализа незначимых (по числу элементов) кластеров, в результате число столбцов сократится; на практике можно исключить кластеры с числом элементов 1–2% от общего объема;

2) нормирование строк матрицы путем деления на число элементов эталона

$$t_i^j = t_i^j / s_j . \quad (1)$$

При этом для исходной матрицы будет выполнено соотношение

$$m_i = \sum_{j=1}^J t_i^j , \quad (2)$$

а для нормированной – $\sum_{i=1}^q t_i^j = 1$.

Соотношение (1) соответствует распространенной в интеллектуальном анализе данных модели оценивания плотности распределения элементов j-го объекта, принадлежащих i-му кластеру [5, 8]. Нормированием (1) устраняем влияние размера эталона. Кроме соотношений (2), очевидно, в исходной матрице данных выполнено $\sum_j s_j = \sum_i m_i$, т.к. элементы $\{Z^j\}_{j=1}^J$ принадлежат одному из кластеров, образующих нового разбиения.

Значения строк T отражают подобие множеств признаков в аспекте эталон-кластер, а после нормировки к 1 фактически характеризуют вероятности отнесения признака j-го эталона к одному из кластеров. Матрица T – это результат обучения с учителем, т.к. принадлежность признака эталону априорно задана в базе изображений.

Заметим, что важную роль играет степень равномерности распределения элементов эталона по построенной системе кластеров. Идеальной ситуацией есть принадлежность точек эталона одному из кластеров, что упрощает процесс статистического распознавания. Однако, наше моделирование показало, что в действительности такая ситуация встречается редко.

С другой стороны, столбец матрицы T характеризует весовое распределение точек кластера по системе эталонов. Здесь идеальным случаем также была бы принадлежность точек кластера одному из эталонов, что соответствует $t_i^j \to 1$. Нежелательным вариантом есть равномерное разделение точек кластера по множеству эталонов (равноценные элементы в столбце), что делает такой кластер бесполезным в распознавании. Напрашивается мысль о необходимости целенаправленной трансформации матрицы T для обеспечения качества распознавания. Немаловажным также представляется построение численного критерия, отражающего неравномерность значений элементов в строках/столбцах матрицы T.

Наряду с (1) представляет также интерес нормирование в столбце матрицы T вида: $t_i^j = t_i^j / m_i$, что исключило бы влияние размера кластера. При этом можно было бы говорить о распределении элементов кластера по эталонам. Однако это предполагает выравнивание объемов кластеров, что на практике обеспечить трудно, ибо результат кластеризации меняется в зависимости от параметров применяемого метода и состава базы изображений. Обеспечить же примерно равноценное число элементов в эталонах можно применением фильтрации, что делает более целесообразной нормировку (1).

Отметим, что при определении числа кластеров устанавливается компромисс между желаемой точностью аппроксимации данных в виде показателя качества (вероятность правильного распознавания) и быстродействием распознавания [7].

Результат самоорганизации – множество центров $\{c_1, c_2, ..., c_q\}$, $c_i \in R^n$ составляют векторы из пространства R^n. Для признаков SURF [2] (вектор размерности 64) кластеризация приводит к сжатому представлению в виде матрицы $C = \{\{c_{a,b}\}_{a=1}^q\}_{b=1}^{64}$. Строки C образуют набор опорных точек пространства при распознавании (рис. 1).

Рисунок 1 – Схема предварительной обработки эталонных данных

Эффективным представляется проведение на этапе формирования эталонных характеристик интеллектуальной обработки $L[T]$ матрицы $T = \{t_i^j\}$ в целях акцентирования внимания на значимой для распознавания информации. Часто такая обработка имеет вид множества эвристик [10]. Признак-столбец t^j с равными значениями компонентов сигнализирует, что кластер c_j «не различает» эталоны. Наиболее подходящая ситуация – когда один из компонентов t^j стремится к 1 или значительно превышает значение 0,5. Именно здесь допустима бинарная обработка. Можно также обработать вектор t^j, чтобы выделить 1–3 значимые компоненты. Вариантами обработки могут быть:

– нормирование матрицы T, исключая влияние размера эталонного описания (строка) и/или объема кластеров (столбец);

– изъятие из кластерного представления состава малочисленных кластеров, например, общая доля которых составляет менее 10% объема описания базы; при этом число столбцов матрицы T сократится, что способствует упрощению обработки;

– анализ содержания столбцов матрицы T: построение укороченного вариационного ряда из 1–3 элементов; обнуление малых по значению элементов (например, меньших 0,05), если только они не составляют весь столбец; бинарная обработка путем выделения максимума, превышающего значение 0,5, и т.п.;

– в случае равноценных элементов в столбце целесообразно исключить лишь незначимые элементы.

Важно, чтобы вследствие обработки $L[T]$ у эталонов осталось представительство ненулевых элементов в кластерах. В противном случае распознавание станет проблематичным. Традиционными подходами к нормированию положительных данных есть деление на их сумму или на максимум [5].

На этапах построения матрицы данных и в процессе распознавания применимы следующие модели обработки T:

1) «бинарная» – выбирается единственный весомый кластер или наиболее подходящий из эталонов;

2) «расширенное множество альтернатив» – формируется подмножество значимых кластеров и/или эталонов;

3) «полная матрица данных» – используются характеристики кластеров и эталонов в полном объеме;

4) комбинирование – применяются модели 1–3 в сочетаниях.

Бинарный путь отнесения признака к классу – простая модель, в то время как причисление к нескольким кластерам или классам с разными весами соответствует мягкой классификации (нечеткое представление). Учитывая, что при распознавании изображений из-за влияния фона, помех и других объектов наблюдается значительное число ложных ХП, в условиях высокого уровня искажений отдают предпочтение первому способу [1]. В то же время в задачах, где эталоны имеют существенное пересечение в пространстве признаков, лучшей восприимчивостью к различиям объектов обладает способ мягкой классификации.

Предлагаемая здесь аппроксимация пространства признаков путем кластерного представления вносит коррекцию в применение моделей распознавания. Может оказаться, что при незначительном числе кластеров отдельные классы при упрощенной бинарной обработке естественным образом станут неразличимы. Возможным выходом есть: использование полного объема данных, увеличение числа кластеров и др.

Известны две основные модели структурного распознавания [1]:

1) раздельный анализ ХП объекта и отнесение их к эталону; победителем считается класс, набравший наибольшее число голосов;

2) построение интегрального векторного описания объекта и выбор эталона с наивысшим подобием путем сопоставления со списком эталонов.

Первая модель устойчива к локальным помехам. Второй способ применяют в ситуациях преобладающего влияния флуктуационных помех, он эффективнее в вычислительном плане. Примером векторного представления для второй модели есть описание в виде q-вектора из количеств кластерных элементов.

Фактически здесь нами предложен новый способ структурного распознавания, где эталонные описания подаются в кластерном виде, а классификация базируется на предварительном отнесении к кластерам или на оптимизации подобия векторных описаний.

Распознавание объекта по описанию Z приобретает вид двухэтапного отображения

$$R = R_2(R_1[Z]), R : Z \to J. \quad (3)$$

На первом этапе $R_1 : Z \to C$ признаки Z относят к одному/нескольким кластерам, а затем отображение $R_2 : C \to J$ агрегировано по множеству Z оптимально определяет класс объекта из списка эталонов. На обоих этапах принятия решений (3) вычисляем и применяем характеристики отдельных ХП, а также значения параметров кластеров. Реализацию (3) осуществим оптимизацией меры подобия по результатам анализа всех признаков объекта.

Этот путь намного эффективнее в плане объема вычислений, чем сопоставление типа множество-множество. Навигация по кластерам является результативной альтернативой поиска по объемному множеству эталонных признаков.

Модель определения номера υ оптимального кластера для $z \in Z$:

$$\upsilon = \arg\min_{a=1,q} \{\rho(c_a, z)\}_{a=1}^{q}. \quad (4)$$

Выбор класса элемента после оптимизации (4) $\forall z \in Z$ можно осуществить как

$$b = \arg\max_{j} \{t_{\upsilon}^{j}\}_{j=1}^{J}. \quad (5)$$

В итоге бинарной обработки (5) $\forall z \in Z$ получим номер b класса, а для всего объекта – вектор классов $h = \{h_j\}_{j=1}^{J}$, где h_j – число элементов Z, назначенных в соответствии с моделью (5) в класс с номером j. При этом теоретически выполнено $\sum_{j=1}^{J} h_j = s$, где $s = card(Z)$. В приложениях это условие часто нарушается, т.к. признаки в ходе обработки частично могут быть потеряны, а также могут появиться ложные признаки.

Подмножество кластеров/классов будем формировать путем редукции

$$V_u = \{\upsilon \in M \mid Ind[\{A\}, u]\}, \quad (6)$$

В результате обработки (6) для $z \in Z$ получим u значений $a_1, a_2, ..., a_u$, агрегацией которых реализуется R_2. Примером (6) есть правило «три наибольших» – при построении (4) определяем три наиболее подходящих кластера по расстоянию, или в столбце T формируем тройку классов с наибольшими значениями. В результате редукции анализируется некоторая подматрица T, и как результат – для элемента $z \in Z$ формируется вектор $t^*[z] = \{t^1, ..., t^J\}$ значений функции принадлежности к эталонам. Накоплением векторов t^* на объекте из s элементов получим J-компонентный вектор классов h:

$$h = \sum_{i=1}^{s} t^*[z]. \quad (7)$$

В выражении (5) анализируем целое значение, а в (7) – вещественное. Класс объекта определим как

$$k = \arg\max_{j} \{h_j\}_{j=1}^{J}. \quad (8)$$

Метод распознавания на основе кластерного представления изобразим последовательностью этапов (схема приведена на рис. 2).

1. Построение описания Z для распознаваемого изображения.

2. $\forall z \in Z$ определяем в соответствии с (4) номер кластера или в виде (6) формируем подмножество V_u.

3. По номеру кластера приписываем Z номер класса в соответствии с (5) или вектор характеристик $t^*[z]$.

4. В зависимости от модели обработки: определяем класс элемента согласно (6), либо агрегируем вектор t^* в соответствии с (7).

5. Повторяем шаги 2–4 $\forall z \in Z$.

6. Согласно модели (8) устанавливаем класс объекта Z.

В обсуждаемом методе вместо традиционной оптимизации подобия ХП на множестве эталонов осуществляется значительно менее масштабная в вычислительном плане оптимизация на множестве кластеров, опре-

деляется значение параметров кластера и агрегировано формируется вектор характеристик классов объекта. Разработанные процедуры однозначно устанавливают процесс распознавания на основе анализа вектора h, содержащего степени принадлежности к классам.

Универсальным прикладным критерием η при оценивании эффективности метода распознавания есть отношение ближайшего локального максимума подобия к глобальному максимуму [9]

$$\eta = \mu_{\max 2} / \mu_{\max}, \mu_{\max} = \max_{j=1,\ldots,J} \mu(Z, Z^j). \quad (9)$$

Чем меньше η, тем увереннее распознается объект. При этом (9) априори предполагает правильное определение класса объекта.

Соотношение (7) есть пример меры μ в (9). Примером μ может быть также нормированный коэффициент корреляции γ

$$\gamma(Z, Z^j) = \sum_{i=1}^{q} (t_i[Z] t_i[Z^j]) / (\sqrt{\sum_{i=1}^{q} (t_i[Z])^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{q} (t_i[Z^j])^2}). \quad (10)$$

Отметим также, что процедурные меры взвешенного голосования вида (7) есть мерами подобия и являются несимметричными по своей природе, в то время как (10) обладает симметрией относительно своих аргументов.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Продемонстрируем работу и выявим особенности предложенного метода путем программного моделирования на примере. Вычисление множества ХП методом SURF осуществлено для базы из 25 изображений гербов городов Украины. На рис. 3, *а–г* приведены примеры изображений. Проведена кластеризация множества дескрипторов методом сети Кохонена [3]. Рис. 4 включает изображение одного из центров кластеров. Табл. 1 содержит матрицу данных в разрезе «эталон-кластер» после кластеризации 5-ти эталонов базы и распределения признаков по 8-ми кластерам.

Вначале исключим малочисленные кластеры 5, 7, содержащие менее 2% объема данных. В результате обязательной нормировки в строке получим табл. 2 (матрица данных). Моделирование показало, что в данной си-

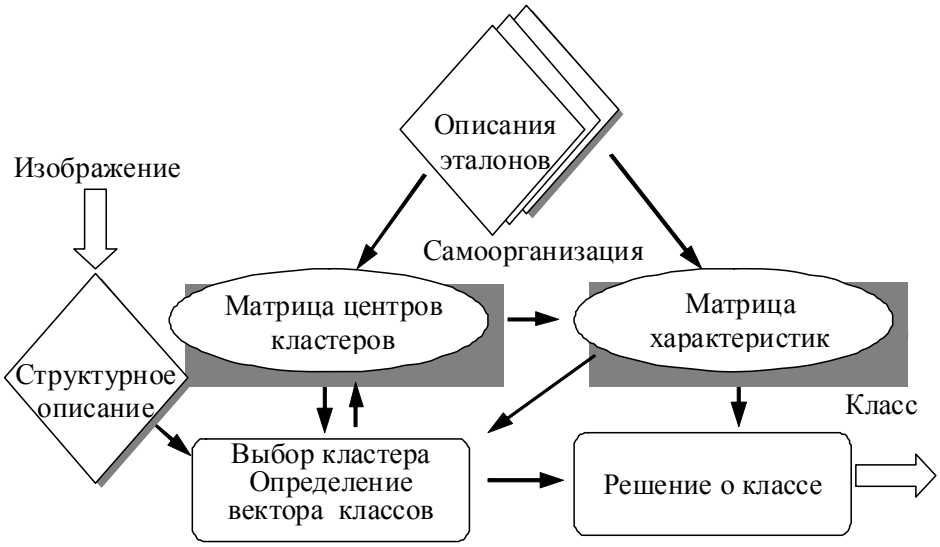
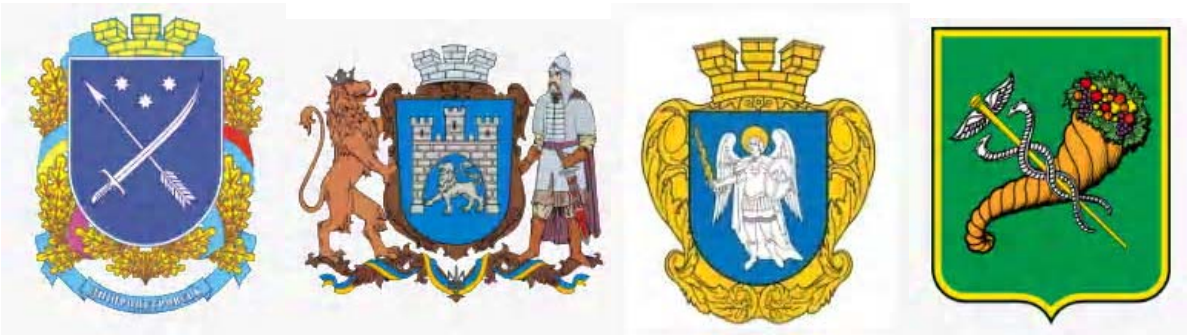


Рисунок 2 – Распознавание на основе кластеров-классов ХП



а б в г

Рисунок 3 – Изображения из базы гербов городов Украины:
а – Днепр, б – Львов, в – Киев, г –Харьков

туации простая бинарная обработка в строке и столбце не приводит к успеху, т.к., например, все 253 точки герба Днепра будут отнесены к другим классам в силу того, что ни по одному кластеру у герба Днепра максимума в столбце нет. Не совсем приемлемым оказался и вариант с тремя максимальными элементами в столбце.

Возможным выходом может быть увеличение числа кластеров или классов. Зато при вычислении подобия (10) достигается верное распознавание.

Использование полной матрицы данных также обеспечивает уверенное правильное распознавание для обои вариантов нормирования: на сумму и на максимум в столбце матрицы. Табл. 3 содержит значения подобия классов (7) при нормировании на максимум в столбце. На главной диагонали стоят максимальные элементы в строке, что соответствует факту правильного распознавания. Степень уверенности оценивается критерием (9).

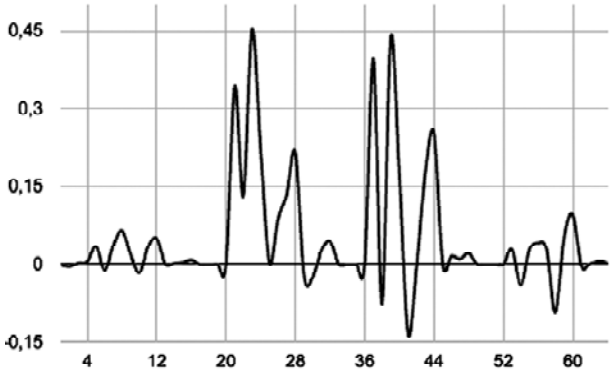


Рисунок 4 – Пример центра кластера

Таблица 1 – Количества ХП в кластерном представлении эталонов

Изображения гербов	Номер кластера							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Днепр	29	24	111	5	61	23	29	24
Львов	83	26	83	24	43	70	83	26
Киев	40	46	82	31	74	31	40	46
Харьков	58	19	188	29	7	41	58	19
Кременчуг	29	26	159	54	39	8	29	26
База	239	141	623	143	224	173	141	623

Таблица 2 – Нормированная матрица данных

Изображения гербов	Номер кластера					
	1	2	3	4	6	8
Днепр	0,115	0,095	0,439	0,020	0,241	0,091
Львов	0,252	0,079	0,252	0,073	0,131	0,213
Киев	0,132	0,151	0,270	0,102	0,243	0,102
Харьков	0,170	0,056	0,550	0,085	0,020	0,120
Кременчуг	0,092	0,083	0,505	0,171	0,124	0,025

Таблица 3 – Пример матрицы подобия классов

	1	2	3	4	5
1	187,637	150,356	168,589	159,868	164,37
2	195,522	237,971	200,842	203,269	173,911
3	202,574	185,58	214,396	164,801	187,322
4	216,106	211,301	185,401	271,999	241,612
5	204,65	167,468	194,101	222,538	245,556

Значения критерия (9) для трех видов обработки в варианте «полная матрица данных»: нормирование на сумму, нормирование на максимум в столбце, вычисление коэффициента корреляции (10) составили: 0,88, 0,90, 0,93. Как видим, обсуждаемые меры подобия здесь имеют преимущество перед коэффициентом (10), т.к. они меньше по величине.

Моделирование для 15-ти кластеров при тех же исходных данных обнаружило, что значения критерия (9) равны: 0,89, 0,91, 0,93, что практически равноценно значениям для 8 кластеров. Отметим, что при этом объем кластеров уменьшается, элементы матрицы данных становятся менее весомыми. Несмотря на то, что степень уверенности для решений (отношение числа голосов к объему описания) увеличилась, бинарная обработка и «три максимальных элемента в столбце» здесь также не обеспечивают распознавание. Учитывая, что с увеличением числа кластеров время обработки возрастает, можно рекомендовать на предварительном этапе одноразово определиться с минимальным числом кластеров, которые обеспечивают адекватное распознавание. Не стоит забывать также, что результат распознавания, основанный на интеллектуальном анализе, целиком зависит от данных базы изображений. Для других данных он может оказаться иным.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Основным результатом исследования есть построение метода структурного распознавания, где эталонные описания подаются в кластерном виде, а распознавание базируется на классификации структурных признаков объекта в пространстве кластеров с дальнейшим вычислением и оптимизацией подобия векторных описаний. Проведенные эксперименты для различных вариантов обработки подтверждают работоспособность метода. Навигация по кластерам является действенной альтернативой поиска по объемному множеству эталонных признаков базы. Ее применение ускоряет процесс распознавания в десятки раз.

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Отсутствие перспективы улучшения характеристик с увеличением числа кластеров для рассмотренного примера можно объяснить тем, что данные этой базы изображений достаточно хорошо сгруппированы, и кластеризация, проведенная в целях повышения быстродействия, увеличивает значение ошибки квантования [3]. Наше моделирование показало, что ошибка квантования в рамках единого кластера для этого примера ниже, чем для 8 или 15 кластеров. Другие исходные данные могут дать обратный эффект.

Инвариантность распознавания к геометрическим преобразованиям визуальных объектов обеспечивается на этапе построения дескрипторов характерных признаков.

В условиях локальных искажений предпочтение имеет модель принятия решения о классе раздельно для каждого ХП. В случае существенного пересечения классов в пространстве признаков, где нужна повышенная восприимчивость к различиям объектов, применим способ мягкой классификации отнесения ХП синхронно к подмножеству классов.

Некоторые упрощения обработки, связанные, например, с бинаризацией решений о классе характерных признаков объекта, могут оказаться неэффективными в силу высокой степени подобия для подмножеств структурных признаков эталонов.

ВЫВОДЫ

В результате кластеризации описание объектов приведено к принятой в интеллектуальной обработке данных системе координат объект-признаки, где значениями признаков выступают характеристики кластерного представления. За счет введенной интеллектуальной обработки описаний эталонов и распознаваемого объекта происходит усиление чувствительности метода распознавания к различиям в имеющихся данных.

Научная новизна исследования состоит в построении метода структурного распознавания на основе применении интеллектуального анализа данных путем построения кластерного сжатого представления признакового пространства, а также вычисления и использования его характеристик. Получено векторное описание пространства признаков, за счет чего существенно повышается быстродействие распознавания.

Практическая ценность работы – получение экспериментальных оценок и результатов анализа качества распознавания на основе кластеризации признаков для примеров прикладных баз изображений.

Перспективой исследования может быть проведение анализа значений параметров эталонных структурных признаков в целях построения новых значимых агрегированных характеристик. Целесообразно также исследовать вопрос о выборе оптимального параметра числа кластеров для обеспечения качественной аппроксимации данных в целях распознавания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гороховатский В. А. Структурный анализ и интеллектуальная обработка данных в компьютерном зрении : монография / В. А. Гороховатский. – Х. : Компания СМИТ, 2014. – 316 с.
2. 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.
3. Берестовский А. Е. Нейросетевые технологии самообучения в системах структурного распознавания визуальных объектов / А. Е. Берестовский, А. Н. Власенко, В. А. Гороховатский // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2015. – Т. 17, № 1. – С. 108–120.
4. Гороховатский В. А. Построение и применение функции принадлежности для результативного структурного анализа изображений / В. А. Гороховатский, Ю. А. Куликов, А. Е. Берестовский // Бионика интеллекта. – 2015. – №1 (84). – С. 13–18.
5. Паклин Н.Б. Бизнес-аналитика: от данных к знаниям : учеб. пособ. / Н. Б. Паклин, В. И. Орешков. – СПб. : Питер, 2013. – 704 с.
6. Duda R. O. Pattern classification / R. O. Duda, P. E. Hart, D. G. Stork. – 2ed., Wiley, 2000. – 738 p.
7. Кохонен Т. Самоорганизующиеся карты / Т. Кохонен ; пер. 3-го англ. изд. – М. : БИНОМ, Лаборатория знаний, 2013. – 655 с.
8. Маннинг К. Д. Введение в информационный поиск / К. Д. Маннинг, П. Рагхаван, Х. Шютце ; пер. с англ. – М. : ООО И. Д. Вильямс, 2011. – 528 с.
9. Quality Criteria for Multidimensional Object Recognition Based Upon Distance Matrices / A. V. Gorokhovatsky, V. A. Gorokhovatsky, A. N. Vlasenko, N. V. Vlasenko // Telecommunications and Radio Engineering. – 2014. – Vol. 73, No. 18. – P. 1661–1670.
10. Мулеса О. Ю. Методи врахування суб'єктивного характеру вхідних даних для задачі голосування / О. Ю. Мулеса // Східноєвропейський журнал передових технологій. Серія: процеси управління. – 2015. – Том 1, № 3 (73). – С. 20–25.

Статья поступила в редакцию 10.02.2016.
После доработки 05.03.2016.

Гороховатський В. О.[1], Гороховатський О. В.[2], Берестовський А. Е.[3]

[1]Д-р техн. наук, професор, професор кафедри інформаційних технологій, Харківський навчально-науковий інститут ДВНЗ «Університет банківської справи», Харків, Україна

[2]Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інформатики та комп'ютерної техніки, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, Харків, Україна

[3]Аспірант кафедри інформатики, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

СТРУКТУРНЕ РОЗПІЗНАВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ МОДЕЛЕЙ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ОБРОБКИ І САМООРГАНІЗАЦІЇ ОЗНАК

Статтю присвячено дослідженню проблеми розпізнавання зображень у комп'ютерному зорі на основі множини структурних SURF-ознак. У просторі структурних ознак виконано самоорганізацію з метою збільшення швидкодії процесу розпізнавання. В якості апарату для самоорганізації використано нейронну мережу Кохонена.

Об'єктом дослідження є метод обчислення подібності описів і моделі інтелектуальної обробки у новому просторі ознак. Предметом дослідження є систематизація і групування множин структурних ознак візуальних об'єктів.

Метою роботи є побудова методу структурного розпізнавання із застосуванням вхідних даних у вигляді множини кластерів структурних ознак, отриманих в результаті самоорганізації. Завданнями дослідження є вивчення особливостей і аналіз моделей для обчислення характеристик кластерів, побудова модифікованих заходів структурної подібності, експериментальне оцінювання якості розпізнавання для різних способів зіставлення описів у прикладній базі візуальних зразків.

Запропоновано побудову методу розпізнавання зображень на основі еталонних описів у кластерному виді, а розпізнавання базується на класифікації структурних ознак об'єкта в просторі кластерів з подальшим обчисленням і оптимізацією подібності векторних описів.

Проведено моделювання та експериментальні дослідження запропонованого методу розпізнавання на тестовій множині зображень із застосуванням характерних ознак SURF. Підтверджено працездатність і ефективність методу в плані швидкодії, отримані оцінки якості розпізнавання для різноманіття варіантів оброблення.

Ключові слова: комп'ютерний зір, структурне розпізнавання зображень, характерні ознаки, дескриптори, структурний опис, метод SURF, самоорганізація, кластеризація, мережа Кохонена, подібність векторних описів, матриця характеристик кластерів.

Gorokhovatsky V. A.[1], Gorokhovatskyi A.V.[2], Berestovskyi A. E.[3]

[1]Dr.Sc., Professor, Professor of the Information Technologies Department, Kharkiv Educational and Scientific Institute SHEI "The University of banking", Kharkiv, Ukraine

[2]Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of Informatics and Computer Technologies Department, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkiv, Ukraine

[3]Post-graduate student of the Informatics Department, Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, Ukraine

STRUCTURAL IDENTIFICATION OF IMAGE RECOGNITION BASED WITH MODELS OF INTELLECTUAL SELF-ORGANIZATION FEATURES

Paper describes an investigation about the problem of image recognition in computer vision based on a set of structural SURF-features. Self-organization process is proposed to be performed in space of structural features with a goal to increase recognition process performance. Kohonen neural network is used as self-organization method.

The object of research is the method of similarity calculations and models of intelligent data processing in the new feature space. The subject of research is the systematization and grouping of sets of structural features of visual objects.

Goal of a paper is to construct structural recognition method based on input data as a set of cluster structural features obtained as a result of self-organization. The objectives of the research are the investigation of the features and analysis of models to calculate clusters of features, the construction of the modified measures of structural similarity, the experimental evaluation of the recognition quality for different ways of descriptions comparison in the application-based visual image database.

Construction of an image recognition method based on etalon descriptions as a cluster was proposed, recognition is based on the classification of the structural features of an object in cluster space with further calculation and optimization of the similarity vector descriptions.

Experimental investigations and simulations of the proposed recognition method on the test image set with the use of SURF characteristic features were performed. Performance boost and efficiency of the method were confirmed, estimation of recognition quality for different processing options was performed.

Keywords: computer vision, structural image recognition, features, descriptors, structural description, SURF, self-organization, clustering, Kohonen network, descriptions similarity vector, matrix of cluster characteristics.

REFERENCES

1. Gorokhovatsky V. Strukturny'j analiz i intellektual'naya obrabotka danny'x v komp'yuternom zrenii: monografiya. Kharkiv, Kompaniya SMIT, 2014, 316 p.
2. Bay H., Tuytelaars T., Van Gool L. 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. DOI: 10.1007/11744023.
3. Berestovskyi A., Vlasenko A. N., Gorokhovatsky V. A. Nejrosetevy'e texnologii samoobucheniya v sistemax strukturnogo raspoznavaniya vizual'ny'x ob"ektov, *Reestraciya, zberigannya i obrobka danix*, 2015, Vol. 17, No. 1, pp. 108–120.
4. Gorokhovatsky V. A., Kulikov Yu. A., Berestovskyi A. E. Postroenie i primenenie funkcii prinadlezhnosti dlya rezul'tativnogo strukturnogo analiza izobrazhenij, *Bionika intellekta*, 2015, No. 1 (84), pp. 13–18.
5. Paklin N. B., Oreshkov V. I. Biznes-analitika: ot danny'x k znaniyam: uch posob. Sankt-Peterburg, Piter, 2013, 704 p.
6. Duda R. O., Hart P. E., Stork D. G. Pattern classification. Second edtition. New-York, Wiley-Interscience, 2000, 738 p.
7. Koxonen T. per. 3-go angl. izd. Samoorganizuyushhiesya karty'. Moscow, BINOM, Laboratoriya znanij, 2013, 655 p.
8. Manning K. D., Ragxavan P., Shyutce X. ; per. s angl. Vvedenie v informacionnyj poisk Moscow OOO I. D. Vil'yams, 2011, 528 p.
9. Gorokhovatskyi A. V., Gorokhovatsky V. A., Vlasenko A. N., Vlasenko N. V. Quality Criteria for Multidimensional Object Recognition Based Upon Distance Matrices, *Telecommunications and Radio Engineering*, 2014, Vol. 73, No. 18, pp. 1661–1670.
10. Mulesa O. Yu. Metodi vraxuvannya sub'єktivnogo xarakteru vxidnix danix dlya zadachi golosuvannya, *Sxidno-evropejs'kij zhurnal peredovix texnologij. Seriya: procesi upravlinnya*, 2015, Vol. 1, No. 3 (73), pp. 20–25.

УДК 004.93

Субботин С. А.

Д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры программных средств Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина

ПОСТРОЕНИЕ ПОЛНОСТЬЮ ОПРЕДЕЛЕННЫХ НЕЙРО-НЕЧЕТКИХ СЕТЕЙ С РЕГУЛЯРНЫМ РАЗБИЕНИЕМ ПРОСТРАНСТВА ПРИЗНАКОВ НА ОСНОВЕ ВЫБОРОК БОЛЬШОГО ОБЪЕМА

Решена проблема автоматизации синтеза моделей для классификации образов по признакам. Предложен метод синтеза нейро-нечетких моделей по прецедентам, способный получать полностью определенные нейромодели на основе регулярного разбиения признаков. Метод рассчитывает координаты центров кластеров как координаты центров прямоугольных блоков в пространстве интервалов признаков, а принадлежности кластеров к классам определяет по обучающей выборке: для кластеров, покрытых наблюдениями, принадлежность определяется по максимуму частоты экземпляров соответствующих классов в кластере, а для кластеров, не покрытых наблюдениями, принадлежность определятся по максимальному потенциалу, наводимому на данный кластер кластерами с известной принадлежностью к классам. Полученный набор кластеров-правил отображается в структуру нейро-нечеткой сети Мамдани, а ее параметры настраиваются на основе параметров разбиения признаков и центров кластеров. Предложенный метод не требует загрузки всей обучающей выборки в память ЭВМ и существенно ускоряет процесс синтеза моделей, обеспечивая при этом приемлемый уровень обобщения данных получаемой нейромоделью. Разработано программное обеспечение, реализующее предложенный метод, а также проведены эксперименты, подтвердившие работоспособность разработанного математического обеспечения и позволяющие рекомендовать его для построения нейро-нечетких моделей на основе выборок большого объема.

Ключевые слова: нейро-нечеткая сеть, обучение, синтез, классификация.

НОМЕНКЛАТУРА

ЭВМ – электронная вычислительная машина;

$a_{i,l}$, $b_{i,l}$, $c_{i,l}$, $d_{i,l}$ – параметры функции принадлежности к l-му терму i-го признака;

E – ошибка сети для задач с дискретным выходом;

f – критерий качества модели;

$F()$ – структура нейромодели;

i, j – номера признаков;

k – номер класса;

K – число классов;

l – номер интервала;

l_j – номер интервала j-го признака;

L – число интервалов, на которые разбивается признак;

N – число входных признаков;

N_w – общее число весов нейромодели;

opt – условное обозначение оптимума;

q – номер блока-кластера;

Q – число кластеров;

$R(Y_q, Y_p)$ – расстояние между q-м и p-м кластерами;

S – объем выборки;

s – номер экземпляра выборки;

S_q – число экземпляров, попавших в q-й кластер;

S^k – число экземпляров в выборке, принадлежащих к k-му классу;

S_q^k – число экземпляров k-го класса, попавших в q-й кластер;

w – параметры нейромодели;

x – набор входных векторов прецедентов;

X – набор прецедентов;

x_j – j-й входной признак;

x^s – набор входных признаков s-го прецедента;

x_j^s – значение j-го входного s-го прецедента;

$x_j^{\min}$, $x_j^{\max}$ – минимальное и максимальное значения признака x_j;

y – выходной признак;

Y_q – номер класса, сопоставленный q-му кластеру;

y^s – значение выходного признака для s-го прецедента;

δ_j – длина интервала, на которые разбивается диапазон значений j-го признака;

$\lambda_{q,j}$ – номер интервала j-го признака, соответствующий q-му блоку-кластеру;

ε – приемлемый уровень ошибки;

μ_k – принадлежность к k-му классу;

μ^q – принадлежность к q-му эталону;

$\mu_{i,l}(x^s)$ – функции принадлежности к l-му терму i-го признака.

ВВЕДЕНИЕ

Нейро-нечеткие сети [1–4] являются парадигмой вычислительного интеллекта, широко используемой при решении задач автоматизации принятия решений в техническом и биомедицинском диагностировании, неразрушающем контроле качества и управлении. Это объясняется способностью нейро-нечетких сетей к обучению по прецедентам, интерпретабельностью получаемых нейромоделей, возможностью интегрировать имеющиеся экспертные знания в нейромодель, массированным параллелизмом вычислений нейро-нечетких моделей, возможностью использования для синтеза и обучения нейро-нечетких сетей методов оптимизации и машинного обучения.

Объект исследования – процесс построения нейро-нечетких моделей.

Большинство известных методов синтеза нейро-нечетких сетей [1–4] требуют загрузки всей обучающей

© Субботин С. А., 2016
DOI 10.15588/1607-3274-2016-3-6

выборки в память ЭВМ, являются медленными, приводят к получению моделей, недостаточно хорошо проявляющих обобщающие и аппроксимационные свойства, что ограничивает применение нейро-нечетких моделей на практике. Для выборок данных большого объема применение известных методов построения нейро-нечетких моделей оказывается крайне затруднительным.

Предмет исследования – методы построения нейро-нечетких моделей на основе больших выборок данных.

Целью работы являлось создание метода синтеза нейро-нечетких моделей по прецедентам, способного получать полностью определенные нейромодели, не требующего загрузки всей обучающей выборки в память ЭВМ и существенно ускоряющего процесс синтеза моделей по сравнению с известными методами, обеспечивающего при этом приемлемый уровень обобщения данных получаемой нейромоделью.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть мы имеем исходную выборку $X = \langle x, y\rangle$ – набор S прецедентов о зависимости $y(x)$, $x = \{x^s\}$, $y=\{y^s\}$, $s = 1, 2, ..., S$, характеризующихся набором N входных признаков $\{x_j\}$, $j = 1, 2, ..., N$, и выходным признаком y. Каждый s-й прецедент представим как $\langle x^s, y^s\rangle$, $x^s=\{x^s_j\}$, $y^s \in \{1, 2, ..., K\}$, $K>1$.

Тогда задача синтеза нейро-нечеткой модели зависимости $y(x)$ будет заключаться в определении таких структуры $F()$ и значений параметров w модели, при которых будет удовлетворен критерий качества модели $f(F(), w, \langle x, y\rangle) \to opt$ [5].

Для задач с дискретным выходом критерий качества модели f определяют на основе ошибки обученной сети:

$$E = \frac{1}{S}\sum_{s=1}^{S}\left|y^s - F(w, x^s)\right| \to \min.$$

2 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Наиболее простым с точки зрения реализации способом синтеза нейро-нечетких моделей является разбиение пространства признаков и выделение правил человеком [3]. Однако это возможно лишь в очень хорошо изученных областях и сопряжено с субъективным подходом эксперта.

Другим, относительно простым, способом синтеза нейро-нечетких моделей является разбиение пространства признаков человеком и формирование правил по набору прецедентов путем преобразования каждого прецедента в отдельное правило [4]. Однако это сопряжено с субъективным подходом к формированию разбиения и может приводить к построению недостаточно точных или плохо обобщающих данные моделей.

Синтез структуры нейро-нечетких сетей, как правило, осуществляют путем разбиения пространства признаков на кластеры и формирования для каждого кластера правила отнесения экземпляров к кластеру, которые отображаются затем в структуру нейро-нечеткой сети [6]. При этом проблемами являются выбор способа разбиения значений признаков на интервалы и выбор метода кластер-анализа, а также необходимость вовлечения человека в процесс выбора данных методов и задания разбиения, а также определения экспертных правил.

Сети, построенные на основе разбиения и правил, полностью покрывающих признаковое пространство, ограниченное интервалами значений признаков, будем называть полностью определенными.

Сети, построенные на основе разбиения и правил, покрывающих лишь частично признаковое пространство, ограниченное интервалами значений признаков, будем называть частично определенными.

В случае синтеза нейро-нечетких моделей по прецедентам для выборок данных ограниченного объема это дополнительно приводит к ряду проблем:

– если выборка покрывает не все пространство признаков и / или это покрытие является существенно неравномерным, то выделенные кластеры и правила, а также синтезированная на их основе частично определенная сеть могут недостаточно хорошо аппроксимировать (интерполировать и экстраполировать) моделируемую зависимость и плохо обобщать данные;

– процесс синтеза структуры сети не учитывает такие свойства результирующей модели как точность обобщение, сложность, интерпретабельность, что приводит к получению неоптимальных по данным свойствам моделей.

В случае синтеза нейро-нечетких моделей по прецедентам для выборок данных большого объема и значительной размерности признакового пространства из-за невозможности загрузки всей выборки в память ЭВМ процесс построения нейро-нечеткой модели становится крайне затруднительным и является неприемлемым из-за значительных затрат времени на выполнение синтеза и обучения нейромодели.

Поэтому необходимо создать метод синтеза полностью определенных нейро-нечетких моделей, не требующий загрузки всей обучающей выборки в память ЭВМ, ускоряющий процесс синтез моделей и обеспечивающий приемлемый уровень обобщения данных.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для обеспечения быстроты разбиения признакового пространства и его независимости от человека предлагается использовать регулярное разбиение диапазонов значений признаков на интервалы. Число интервалов для разбиения диапазонов значений признаков целесообразно выбирать таким образом, чтобы обеспечить обобщение данных.

Для существенного сокращения затрат на процесс синтеза структуры нейро-нечеткой модели предлагается определять координаты центров кластеров как координаты центров прямоугольных блоков в пространстве признаков без учета выборки данных, но принадлежности кластеров к классам определять по выборке. Это позволит заранее рассчитать параметры интервалов признаков, а также координаты центров кластеров без фактического выполнения кластер-анализа, но для определения правил отнесения экземпляров к классам на основе центров кластеров потребует всего одного просмотра выборки, оперируя в памяти всего одним экземпляром.

Для построения полностью определенных сетей на основе выборки, не полностью покрывающей признаковое пространство, предлагается принадлежность кластеров к классам.

Для кластеров, покрытых наблюдениями, определять по максимуму частоты экземпляров соответствующих классов в кластере, а для кластеров, не покрытых наблюдениями, принадлежность определять по максимальному потенциалу [7, 8], наводимому на данный кластер кластерами с известной принадлежностью к классам.

Полученный набор правил может быть легко отображен в структуру сети Мамдани, а ее параметры настроены на основе параметров разбиения признаков и центров кластеров.

Формально предложенный метод можно изложить следующим образом.

Этап 1. Инициализация. Задать обучающую выборку <x,y>. Определить N, S, K, $\{S^k\}$, k = 1, 2, ...,K; $\{x_j^{\min}\}$, $\{x_j^{\max}\}$, j = 1,2,...,N. Задать число интервалов, на которые разбиваются диапазоны значений признаков L, $L \geq 2$. Задать приемлемый уровень ошибки ε.

Этап 2. Формирование разбиения пространства признаков. Определить число кластеров $Q=L^N$. Для q =1,2,..,Q, j= 1, 2,...,N, l=1,2,...,L установить $\lambda_{q,j}=l$. Установить S_q=0, S_q^k=0, q = 1, 2, ..., Q, k=1,2,...,K.

Определить длину интервала каждого j-го признака:

$$\delta_j = \frac{x_j^{\max} - x_j^{\min}}{L}, j = 1, 2, ..., N.$$

Этап 3. Определение числа экземпляров классов в кластерах.

Последовательно для экземпляров обучающей выборки (s= 1,2,...,S):

– считать из выборки очередной s-й экземпляр и загрузить в память ЭВМ;

– определить номера интервалов признаков, в которые попал экземпляр x^s:

$$l_j = \left\lfloor 1 + \frac{x_j^s - x_j^{\min}}{\delta_j} \right\rfloor, j = 1, 2, ..., N;$$

– определить номер блока-кластера q, в который попал экземпляр x^s: q=1,2,....,Q: $\lambda_{q,j} = l_j, j = 1,2,...,N$.

– принять $S_q^{y^s} = S_q^{y^s} + 1$, $S_q = S_q + 1$.

Этап 4. Определение принадлежности кластеров к классам.

Для q-го кластера, q=1,2,...,Q, принять:

$$Y_q = \arg \max_{k=1,2,...,K} \{S_q^k \mid S_q > 0\}.$$

Для q-го кластера, q=1,2,...,Q, установить:

$$Y_q = \arg \max_{k=1,2,..,K} \left\{ \sum_{p=1}^{Q} \left\{ \frac{1}{1 + R(Y_q, Y_p)} \middle| Y_p = k, S_p > 0 \right\} \middle| S_q = 0 \right\},$$

где

$$R(Y_q, Y_p) = \frac{1}{2} \sqrt{\sum_{j=1}^{N} \left(\lambda_{q,j} - \lambda_{p,j}\right)^2}.$$

Этап 5. Формирование термов признаков. На основе выделенных интервалов значений признаков возможно определить функции принадлежности к термам признаков на основе трапециевидной функции:

$$\mu_{i,l}(x^s) = \begin{cases} 0, x_i \leq a_{i,l}; \\ \dfrac{x_i - a_{i,l}}{b_{i,l} - a_{i,l}}, a_{i,l} \leq x_i \leq b_{i,l}; \\ 1, b_{i,l} \leq x_i \leq c_{i,l}; \\ \dfrac{d - x_i}{d - c_{i,l}}, c_{i,l} \leq x_i \leq d_{i,l} \\ 0, d_{i,l} \leq x_i. \end{cases}$$

где $a_{i,l} \leq b_{i,l} \leq c_{i,l} \leq d_{i,l}$: $a_{i,l} = (l-1)\delta + x_i^{\min}$, $b_{i,l} = (l-1)\delta + x_i^{\min}$, $c_{i,l} = l\delta + x_i^{\min}$, $d_{i,l} = l\delta + x_i^{\min}$.

Этап 6. Формирование системы нечеткого вывода. На данном этапе задаются принципы преобразования значений функций принадлежности к термам в принадлежности к кластерам и классам, а также способ дефаззификации результата.

Принадлежности к сформированным эталонам определим по формулам:

$$\mu^q = \min_{i=1,2,...,N} \{\mu_{i,l} \mid \lambda_{q,i} = l\},$$

где q=1, 2, ..., Q, l=1, 2, ..., L.

Принадлежности к классам определим по формулам:

$$\mu_k = \max_{q=1,2,...,Q} \left\{\mu^q \mid Y_q = k\right\}, k = 1,2,...,K.$$

Расчетный номер класса, соответственно, будет определяться по формуле:

$$y^s = \arg \max_{k=1,2,...,K} \{\mu_k\}.$$

Этап 7. Синтез нейро-нечеткой сети. На основе выделенных термов и определенных функций системы нечеткого вывода можно сформировать структуру нейро-нечеткой сети Мамдани [3, 4, 9, 10] в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1.

На входной (первый) слой сети поступают входные сигналы – значения признаков распознаваемого экземпляра, которые далее поступают на второй слой, выполняющий фаззификацию. Выходы нейронов второго слоя представляют собой значения функций принадлежности распознаваемого экземпляра к термам признаков. Нейроэлементы третьего слоя сети комбинируют принадлежности к термам в принадлежности к эталонам кластеров, на основе которых нейроны четвертого слоя определяют принадлежности к классам. Единственный нейрон пятого (выходного) слоя осуществляет дефаззификацию и выдает на выходе расчетное значение номера класса распознаваемого экземпляра.

Этап 8. Проверка окончания поиска. Оценить ошибку для построенной сети E. Если ошибка является приемлемой ($E < \varepsilon$), то завершить синтез сети и вернуть по-

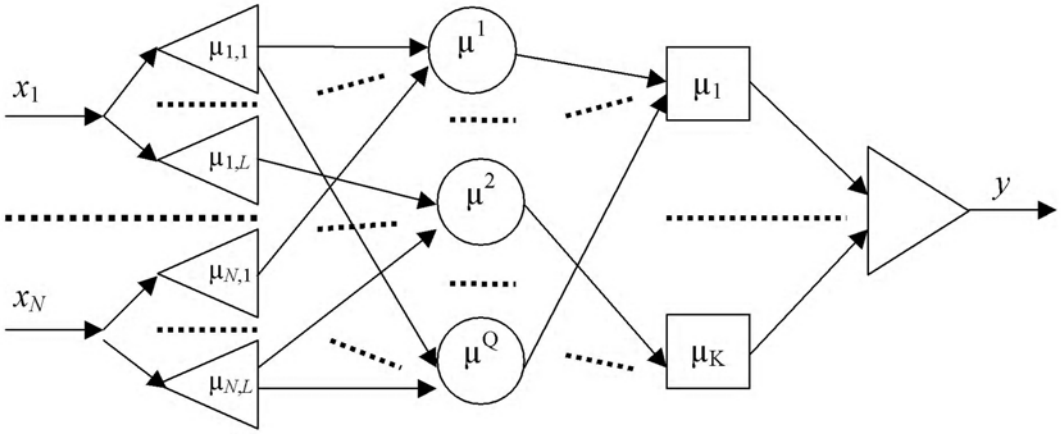


Рисунок 1 – Схема нейро-нечеткой сети

лученную нейромодель как результат; в противном случае: если заданное значение L меньше, чем максимально допустимое при заданных N и S, то увеличить $L=L+1$ и перейти к этапу 2, в противном случае – вернуть найденную нейромодель как решение.

Для обеспечения обобщающих свойств нейромодели необходимо, чтобы число ее настраиваемых параметров было меньше, чем размерность обучающей выборки NS.

Для нейро-нечеткой сети с трапециевидной функцией принадлежности к термам каждый нейрон второго слоя, соответствующий терму, будет иметь четыре настраиваемых параметра. Следовательно, общее число настраиваемых параметров нейронов второго слоя при равном числе интервалов L, на которое разбиваются диапазоны значений N входных признаков, составит $4NL$. Таким образом, можно сказать, что требуется, чтобы $4NL<NS \Rightarrow L<0{,}25S$.

С другой стороны, очевидно, что диапазон значений каждого признака должен быть разбит на не менее, чем два интервала, т.е. $L \geq 2$. Таким образом, получаем $2 \leq L<0{,}25S$. Данное соотношение является весьма грубым и допускает значительную неопределенность при выборе L.

Для более точной оценки интервала допустимых значений L рассмотрим полностью определенную (полносвязной прямонаправленную) нейро-нечеткую сеть, общее число весов которой N_w для обеспечения обобщающих свойств должно удовлетворять условию: $N_w<NS$.

Число весов в полностью определенной прямонаправленной сети оценим по формуле:

$$N_w = 4NL + NLQ + QK + K\ .$$

Общее число многомерных блоков определения принадлежности к кластерам может быть определено как $Q=L^N$. Тогда условие выбора L будет $2 \leq L, 4NL + NLL^N + L^N K + K < NS$.

Введя переменную $\alpha = N / L \Rightarrow N = \alpha L$, получим:

$$2 \leq L, 4L + LL^{\alpha L} + \frac{K(L^{\alpha L}+1)}{\alpha L} < S.$$

Поскольку, очевидно, что $L^{\alpha L} >> 1$, приняв для простоты расчетов $K=L$, пренебрегая меньшими слагаемыми, преобразовав и упростив полученное условие получим:

$$2 \leq L < \sqrt[N+1]{S}\ .$$

Из полученного соотношения легко видеть, что сокращение числа используемых признаков позволяет существенно увеличить число интервалов при поддержании обобщающих свойств модели.

Вычислительная сложность полученной нейромодели может быть оценена как $8NL + 2NLQ + 2QK + 3K) \approx$ $\approx O(2NL^{N+1} + 2KL^{N+1} + 8NL + 3K)$. Пренебрегая меньшими слагаемыми, получим оценку $O(2NL^{N+1})$. Полагая в худшем случае $L = \sqrt[N+1]{S}$, получим оценку $O(2NS)$, а, обозначив $n = NS$, относительно размерности обучающей выборки n получим оценку вычислительной сложности модели $O(2n)$.

Пространственная сложность полученной нейромодели может быть оценена как $O(N + 4NL + NLQ + QK + K) \approx O(NL^{N+1} + L^N K + 4NL)$. Пренебрегая меньшими слагаемыми, получим оценку пространственной сложности модели $O(NL^{N+1})$. Полагая в худшем случае $L = \sqrt[N+1]{S}$, получим оценку пространственной сложности $O(NS) = O(n)$.

Вычислительная сложность одного прохода предложенного метода составит $O(26NS+SK+2QN+2QK+2N+$ $+QNS+2S+0{,}5KQ^2+3{,}5Q+S(8NL + 2NLQ + 2QK + 3K))$.

Для случая двух классов (K=2), полагая в худшем случае $L = \sqrt[N+1]{S}$, получим $O(\sqrt[N+1]{S^2} + \sqrt[N+1]{S}\,(2N+7{,}5+9NS)+$ $+2NS^2+4S^2+26NS+10S+2N)$. Полагая $S>>N$ и пренебрегая меньшими слагаемыми, получим оценку вычислительной сложности метода $O(S^2)$.

Пространственная сложность метода может быть оценена как $O(5N+2K+QN+2QK+2Q+L+4NL+NLQ)$. Для случая двух классов (K=2), полагая в худшем случае $L = \sqrt[N+1]{S}$, полагая $S>>N$ и пренебрегая меньшими слагаемыми, получим $O(NS) = O(n)$.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Предложенный метод был программно реализован как дополнение [11]. Разработанное программное обеспечение использовалось для изучения практической применимости и исследования свойств предложенного метода при решении практических задач автоматической классификации различной природы [5, 12].

При проведении экспериментов исследовались зависимости между параметрами метода для определения возможных ограничений на их значения и тенденций изменения параметров.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность и практическую применимость предложенного метода. На рис. 1 представлены графики полученных зависимостей.

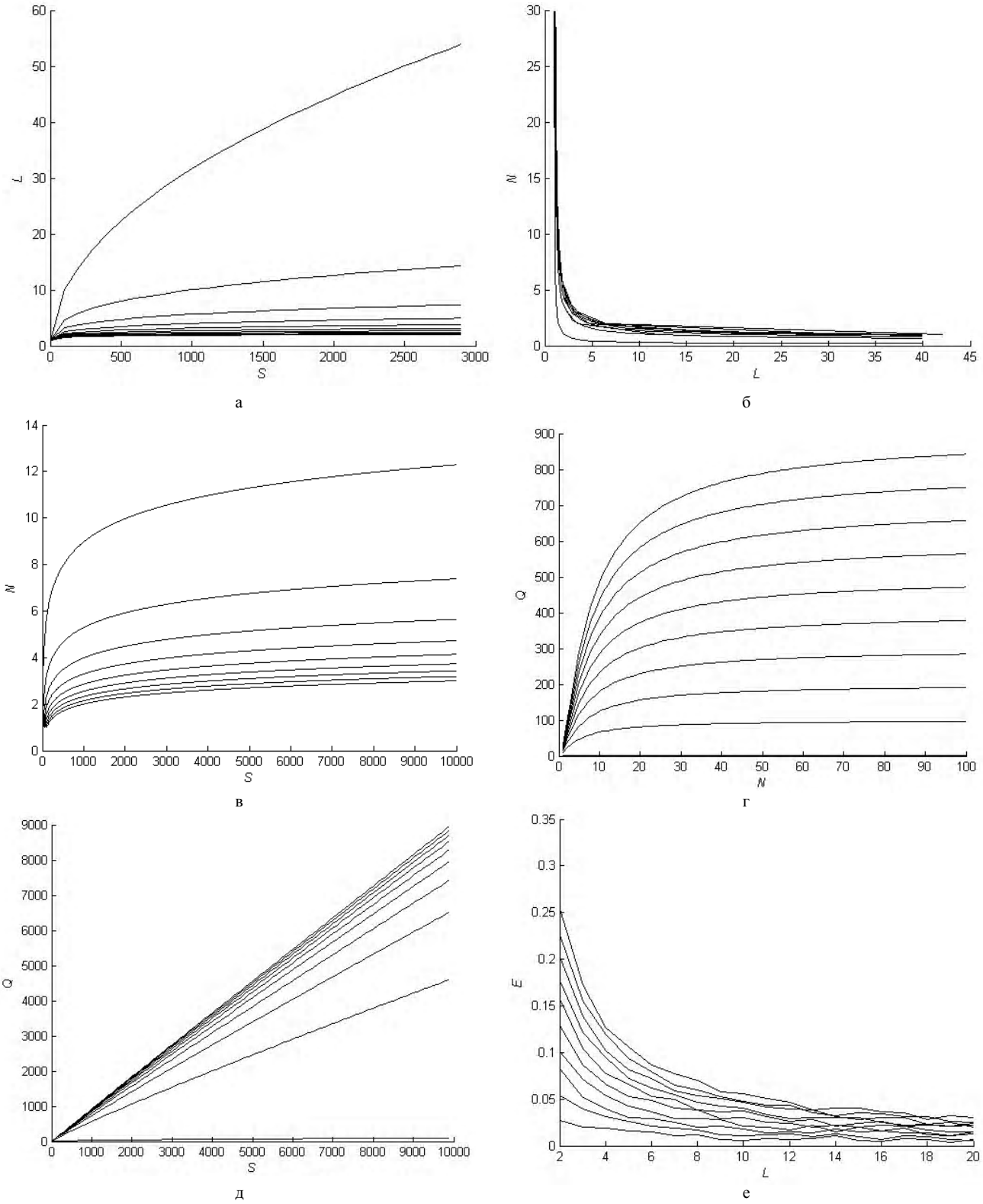


Рисунок 1 – Грфики зависимостей:
а – L от S при разных значениях N; б – N от L при разных значениях Q;
в – N от S при разных значениях L; г – Q от N при разных значениях S;
д – Q от S при разных значениях N; е – E от L при разных значениях N и S

ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенный метод при фиксированном числе разбиений не требует загрузки всей обучающей выборки в память ЭВМ, осуществляя ее поэкземплярную обработку, не требует многократных просмотров обучающей выборки, ограничиваясь всего одним проходом при известных минимальных и максимальных значениях признаков или двумя – при неизвестных минимальных и максимальных значениях признаков.

Как видно из рис. 1а, с увеличением объема выборки наблюдается возможность увеличения предельно допустимого для сохранения обобщающих свойств значения числа интервалов, на которые разбиваются диапазоны значений признаков, L.

Однако, как следует из рис 1а и рис. 1б, существенное ограничивающее влияние на L также имеет размерность признакового пространства N. Чем больше N, тем меньше будет возможное значение L.

С другой стороны, как видно из рис. 1в, существенное увеличение объема выборки S позволяет увеличивать допустимую границу размерности признакового пространства N. При этом, как следует из рис. 1г, с ростом N обеспечивается возможность увеличение предельно допустимого значения числа кластеров Q.

Также, как видно из рис. 1д, с ростом объема выборки S наблюдается увеличение предельно допустимого значения числа кластеров Q.

Как следует из рис. 1е, с ростом числа разбиений признаков L при фиксированных S и N для каждой из выборок наблюдается в среднем уменьшение ошибки E. Это уменьшение особенно существенно на начальном этапе и становится незначительным при достижении числа разбиений интервалов значений признаков, обеспечивающих создание такого числа кластеров Q, которое сопоставимо с числом экземпляров в выборке S.

Следовательно, для больших по объему выборок данных, если необходимо обеспечить высокий уровень обобщения данных моделью, следует предварительно выполнить отбор наиболее информативных признаков, минимизируя размерность признакового пространства N. Это позволит увеличить допустимую границу L и обеспечить большую точность (меньшую ошибку E).

ВЫВОДЫ

В работе решена актуальная проблема автоматизации синтеза моделей для классификации образов по признакам.

Научная новизна работы состоит в том, что впервые предложен метод синтеза нейро-нечетких моделей по прецедентам, способный получать полностью определенные нейромодели на основе регулярного разбиения признаков. Метод рассчитывает координаты центров кластеров как координаты центров прямоугольных блоков в пространстве интервалов признаков, а принадлежности кластеров к классам определяет по обучающей выборке: для кластеров, покрытых наблюдениями, принадлежность определяется по максимуму частоты экземпляров соответствующих классов в кластере, а для кластеров, не покрытых наблюдениями, принадлежность определятся по максимальному потенциалу, наводимому на данный кластер кластерами с известной принадлежностью к классам. Полученный набор кластеров-правил отображается в структуру нейро-нечеткой сети Мамдани, а ее параметры настраиваются на основе параметров разбиения признаков и центров кластеров. Предложенный метод не требует загрузки всей обучающей выборки в память ЭВМ и существенно ускоряет процесс синтеза моделей, обеспечивая при этом приемлемый уровень обобщения данных получаемой нейромоделью.

Практическая значимость результатов работы заключается в том, что разработано программное обеспечение, реализующее предложенный метод, а также проведены эксперименты, подтвердившие работоспособность разработанного математического обеспечения и позволяющие рекомендовать его для использования на практике при решении задач построения нейро-нечетких моделей для выборок большого объема.

Перспективы дальнейших исследований состоят в исследовании предложенного математического обеспечения на более широком наборе практических задач диагностики и распознавания образов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках в рамках госбюджетных научно-исследовательской темы Запорожского национального технического университета «Методи і засоби обчислювального інтелекту та паралельного комп'ютингу для оброблення великих даних в системах діагностування» при поддержке международного проекта «Centers of Excellence for young RESearchers» программы «Темпус» Европейской Комиссии (№ 544137-TEMPUS-1-2013-1-SK-TEMPUS-JPHES).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Analysis and design of intelligent systems using soft computing techniques / eds. : P. Melin, O.R. Castillo, E.G. Ramirez, J. Kacprzyk. – Heidelberg : Springer, 2007. – 855 p.
2. Buckleya J. J. Fuzzy neural networks: a survey / J. J. Buckleya, Y. Hayashi // Fuzzy sets and systems. – 1994. – Vol. 66, Issue 1. – P. 1–13.
3. Дли М. И. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / М. И. Дли. – М. : Физматлит, 2003. – 225 с.
4. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский ; пер. с польск. И. Д. Рудинского. – М. : Горячая линия – Телеком, 2004. – 452 с.
5. Интеллектуальные информационные технологии проектирования автоматизированных систем диагностирования и распознавания образов : монография / [С. А. Субботин, Ан. А. Олейник, Е. А. Гофман, С. А. Зайцев, Ал. А. Олейник] ; под ред. С. А. Субботина. – Харьков : Компания СМИТ, 2012. – 318 с.
6. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский. – М. : Финансы и статистика, 2004. – 344 с.
7. Фор А. Восприятие и распознавание образов / А. Фор ; под ред. Г. П. Катыса. – М. : Машиностроение, 1989. – 271 с.
8. Айзерман М. А. Метод потенциальных функций в теории обучения машин / М. А. Айзерман, Э. М. Браверман, Л. И. Розоноэр. – М. : Наука, 1970. – 384 с.
9. Ярушкина Н. Г. Основы теории нечетких и гибридных систем / Н. Г. Ярушкина. – М. : Финансы и статистика, 2004. – 320 с.
10. Яхъяева Г. Э. Нечеткие множества и нейронные сети : учеб. пособие / Г. Э. Яхъяева. – М. : Интуит, 2006. – 316 с.
11. Комп'ютерна програма «Автоматизована система синтезу нейроме-режних та нейро-нечітких моделей для неруйнівної

діагностики та класифікації образів за ознаками» : свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 35431 / С. О. Субботін. – Держ. департамент інтелектуальної власності. – № 34011 ; заявл. 21.04.10 ; зареєстр. 21.10.10.
12. Прогрессивные технологии моделирования, оптимизации и интеллектуальной автоматизации этапов жизненного цикла авиационных двигателей : монография / [А. В. Богуслаев, Ал. А. Олейник, Ан. А. Олейник, Д. В. Павленко, С. А. Субботин]; под ред. Д. В. Павленко, С. А. Субботина. – Запорожье : ОАО «Мотор Сич», 2009. – 468 с.

Статья поступила в редакцию 01.09.2016.
После доработки 25.09.2016.

Субботін С. О.
Д-р техн. наук, професор, професор кафедри програмних засобів Запорізького національного технічного університету, Запорожжя, Україна

ПОБУДОВА ПОВНІСТЮ ВИЗНАЧЕНИХ НЕЙРО-НЕЧІТКИХ МЕРЕЖ З РЕГУЛЯРНИМИ РОЗБИТТЯМ ПРОСТОРУ ОЗНАК НА ОСНОВІ ВИБІРОК ВЕЛИКОГО ОБСЯГУ

Вирішено проблему автоматизації синтезу моделей для класифікації образів за ознаками. Запропоновано метод синтезу нейро-нечітких моделей за прецедентами, здатний одержувати цілком визначені нейромоделі на основі регулярного розбиття ознак. Метод розраховує координати центрів кластерів як координати центрів прямокутних блоків у просторі інтервалів ознак, а належності кластерів до класів визначає за навчальною вибіркою: для кластерів, покритих спостереженнями, належність визначається за максимумом частоти екземплярів відповідних класів у кластері, а для кластерів, не покритих спостереженнями, належність визначаться за максимальним потенціалом, що наводиться на даний кластер кластерами з відомою належністю до класів. Отриманий набір кластерів-правил відображається у структуру нейро-нечіткої мережі Мамдани, а її параметри налаштовуються на основі параметрів розбиття ознак і центрів кластерів. Запропонований метод не вимагає завантаження всієї навчальної вибірки в пам'ять ЕОМ та істотно прискорює процес синтезу моделей, забезпечуючи при цьому прийнятний рівень узагальнення даних одержуваною нейромоделлю. Розроблено програмне забезпечення, що реалізує запропонований метод, а також проведені експерименти, що підтвердили працездатність розробленого математичного забезпечення і що дозволяють рекомендувати його для побудови нейро-нечітких моделей на основі вибірок великого обсягу.

Ключові слова: нейро-нечітка мережа, навчання, синтез, класифікація.

Subbotin S. A.,
Dr.Sc., Professor, Chief of the department of software tools, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

BUILDING A FULLY DEFINED NEURO-FUZZY NETWORK WITH A REGULAR PARTITION OF A FEATURE SPACE BASED ON LARGE SAMPLE

The problem of model synthesis automation for pattern classification on the features is solved. The method of neuro-fuzzy model synthesis on precedents is proposed. It is able to construct completely defined neural models based on the regular partition of a feature space. The method calculates the coordinates of the cluster centers as coordinates of the centers of rectangular blocks in the space of feature intervals and clusters membership to classes determine on the training set: for clusters containing observations the membership is determined by the maximum frequency of instances of the corresponding classes in the cluster, and for clusters that do not contain observations the membership is determined by the maximum potential induced on it by the clusters with known class membership. The resulting set of clusters-rules is mapped to the structure of Mamdani neuro-fuzzy network and its parameter values are calculated on the base of parameters of feature set partition and cluster centers. The proposed method does not require loading the entire training sample in the computer memory and speeds up the process of model synthesis providing an acceptable level of data generalization by obtained neural model. The software that implements the proposed method is developed. The experiments confirming the performance of developed mathematical support are conducted. They allow to recommend the method for the construction of neuro-fuzzy models based on a large samples.

Keywords: neuro-fuzzy network, training, synthesis, classification.

REFERENCES

1. Melin P., Castillo O.R., Ramirez E.G., Kacprzyk J. : eds. Analysis and design of intelligent systems using soft computing techniques. Heidelberg, Springer, 2007, 855 p.
2. Buckleya J. J., Hayashi Y. Fuzzy neural networks: a survey, *Fuzzy sets and systems,* 1994, Vol. 66, Issue 1, pp. 1–13.
3. Dli M. I. Nechotkaya logika i iskusstvennyye neyronnyye seti. Moscow, Fizmatlit, 2003, 225 p.
4. Rutkovskaya D., Pilin'skiy M., Rutkovskiy L.; per. s pol'sk. I. D. Rudinskogo Neyronnyye seti, geneticheskiye algoritmy i nechotkiye sistemy. Moscow, Goryachaya liniya, Telekom, 2004, 452 p.
5. Subbotin S. A., Oleynik An. A., Gofman Ye. A., Zaytsev S. A., Oleynik Al. A. ; pod red. S. A. Subbotina Intellektual'nyye informatsionnyye tekhnologii proyektirovaniya avtomatizirovannykh sistem diagnostirovaniya i raspoznavaniya obrazov : monografiya. Khar'kov, Kompaniya SMIT, 2012, 318 p.
6. Osovskiy S. Neyronnyye seti dlya obrabotki informatsii. Moscow, Finansy i statistika, 2004, 344 p.
7. For A. ; pod red. G. P. Katysa Vospriyatiye i raspoznavaniye obrazov. Moscow, Mashinostroyeniye, 1989, 271 p.
8. Ayzerman M. A., Braverman E. M., Rozonoer L. I. Metod potentsial'nykh funktsiy v teorii obucheniya mashin. Moscow, Nauka, 1970, 384 p.
9. Yarushkina N. G. Osnovy teorii nechotkikh i gibridnykh sistem. Moscow, Finansy i statistika, 2004, 320 p.
10. Yakh'yayeva G. E. Nechotkiye mnozhestva i neyronnyye seti : ucheb. posobiye. Moscow, Intuit, 2006, 316 p.
11. Subbotin S. O. Komp'yuterna prohrama "Avtomatyzovana systema syntezu neyromerezhevykh ta neyro-nechitkykh modeley dlya neruynivnoyi diahnostyky ta klasyfikatsiyi obraziv za oznakamy" : cvidotstvo pro reyestratsiyu avtorskoho prava na tvir № 35431. Derzh. departament intelektualnoyi vlasnosti. № 34011 ; zayavl. 21.04.10 ; zareyestr. 21.10.10.
12. Boguslayev A. V., Oleynik Al. A., Oleynik An. A., Pavlenko D. V., Subbotin S. A.; pod red. D. V. Pavlenko, S. A. Subbotina. Progressivnyye tekhnologii modelirovaniya, optimizatsii i intellektual'noy avtomatizatsii etapov zhiznennogo tsikla aviatsionnykh dvigateley : monografiya. Zaporozh'ye: OAO "Motor Sich", 2009, 468 p.

ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

ПРОГРЕССИВНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES

УДК 004.9

Бісікало О. В.[1], Висоцька В. А.[2]

[1]Д-р техн. наук, професор, декан факультету комп'ютерних систем і автоматики Вінницького національного технічного університету, Вінниця, Україна

[2]Канд. техн. наук, доцент кафедри «Інформаційні системи та мережі» Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ СИНТАКСИЧНОГО АНАЛІЗУ РЕЧЕНЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КЛЮЧОВИХ СЛІВ УКРАЇНОМОВНОГО ТЕКСТУ

У статті подано застосування породжувальних граматик у лінгвістичному моделюванні. Опис моделювання синтаксису речення застосовують для автоматизації процесів аналізу та синтезу природномовних текстів. У статті показано особливості процесу синтезу речень різних мов із застосуванням породжувальних граматик. В роботі розглянуто вплив норм та правил мови на хід побудови граматик. Застосування породжувальних граматик має широкі можливості у розробленні та створенні автоматизованих систем опрацювання текстового контенту, для лінгвістичного забезпечення комп'ютерних лінгвістичних систем тощо. В природних мовах є ситуації, коли явища, залежні від контексту, описані як незалежні від контексту, тобто в термінах контекстно-вільних граматик. При цьому опис ускладнений через утворення нових категорій і правил. В статті подано особливості процесу введення нових обмежень на класи даних граматик через введення нових правил. При кількості символів в правій частині правил не меншій за ліву отримали нескорочені граматики. Потім при заміні лише одного символу отримали контекстно-залежні граматики. При наявності в лівій частині правила лише одного символу отримали контекстно-вільні граматики. Жодних наступних природних обмежень на ліві частини правил накласти вже не можна. Виходячи із важливості забезпечення автоматичного опрацювання текстового контенту в сучасних інформаційних засобах (наприклад, інформаційно-пошукових системах, системах машинного перекладу, семантичного, статистичного, оптичного та акустичного аналізу і синтезу мови, автоматизованого редагування, екстракції знань з текстового контенту, реферування та анотування текстового контенту, індексування текстового контенту, навчально-дидактичних, менеджменту лінгвістичних корпусів, інструментальні засоби укладання словників різних типів тощо), фахівці інтенсивно шукають нові моделі, способи їх опису та методи автоматичного опрацювання текстового контенту. Одним із таких способів є розроблення загальних принципів побудови лексикографічних систем синтаксичного типу та побудови за цими принципами зазначених систем опрацювання текстового контенту для конкретних мов. Будь-які засоби синтаксичного аналізу складаються з двох частин: бази знань про конкретну природну мову і алгоритму синтаксичного аналізу, тобто набору стандартних операторів опрацювання текстового контенту на основі цих знань. Джерелом граматичних знань є дані з морфологічного аналізу та різні заповнені таблиці понять та лінгвістичних одиниць. Вони є результатом емпіричного опрацювання текстового контенту на природній мові експертами з метою виділення основних закономірностей для синтаксичного аналізу.

Ключові слова: текст, україномовний, алгоритм, контент-моніторінг, ключові слова, лінгвістичний аналіз, синтаксичний аналіз, породжувальні граматики, структурна схема речення, інформаційна лінгвістична система.

НОМЕНКЛАТУРА

АОПМК – автоматичного опрацювання природномовного контенту;

ІТ – інформаційні технології;

ІС – інформаційна система;

$\widetilde{N}$ – іменна група;

$\widetilde{R}$ – дієслівна група;

$C = \{c_1, c_2 \ldots, c_{n_C}\}$ – множина комерційного контенту $c_r \in C$ при $r = \overline{1, n_C}$;

$T = \{t_1, t_2 \ldots, t_{n_T}\}$ – час $t_p \in T$ транзакції формування комерційного контенту при $p = \overline{1, n_T}$;

$U_K = \{U_{K1}, U_{K2}, U_{K3}, U_{K4}\}$ – множина критеріїв визначення ключових слів в контенті;

C_1 – відфільтрований комерційний контент;

C_2 – відформатований комерційний контент;

C_3 – комерційний контент з визначеною множиною ключових слів;

© Бісікало О. В., Висоцька В. А., 2016

DOI 10.15588/1607-3274-2016-3-7

$\alpha_0 : (X, U_C, T) \to C_0$ – оператор створення комерційного контенту;

$\alpha_1 : (X, U_G, T) \to C_0$ – оператор збирання комерційного контенту;

$\alpha_2 : (C_0, T, U_B) \to C_1$ – оператор виявлення дублювання комерційного контенту;

$\alpha_3 : (C_1, U_{FR}, T) \to C_2$ – оператор форматування комерційного контенту;

$\alpha_4 : (C_2, U_K, T) \to C_3$ – оператор виявлення ключових слів комерційного контенту – відображення комерційного контенту в новий стан, який відрізняється від попереднього стану наявністю множини ключових слів, що загально описують його зміст;

$Noun \in U_{K1}$ – терми – іменників, словосполучень іменників або прикметника з іменником серед множини слів текстового контенту;

$Unicity$ – унікальності для термів;

$NumbSymb \in U_{K3}$ – кількість знаків без пробілів для $Noun \in U_{K1}$ при $Unicity \geq 80$;

$UseFrequency \in U_{K2}$ – частота появи ключових слів комерційного контенту. Для термів з $NumbSymb \leq 2000$ частота $UseFrequency$ є в межах $(6;8]$%, з $NumbSymb \geq 3000$ – $[2;4)$%, з $2000 > NumbSymb < 3000$ – $[4;6]$%;

$BUseFrequency$ – частота появи ключових слів на початку тексту;

$IUseFrequency$ – частота появи ключових слів в середині тексту;

$EUseFrequency$ – частота появи ключових слів в кінці тексту комерційного контенту;

$KeyWords \in U_{K4}$ – ключові слова.

ВСТУП

Побудова систем АОПМК та формалізація відповідних процесів лінгвістичного аналізу/синтезу вважається основною проблемою інтелектуалізації ІТ [1–2]. Стрімкий та бурхливий розвиток Інтернет та ІТ різко прискорив створення різноманітних інформаційних лінгвістичних ресурсів і активізував сучасні дослідження, спрямовані на розроблення та впровадження інформаційних лінгвістичних систем, математичних методів та програмного забезпечення АОПМК. Для автоматизації етапів аналізу/синтезу природно-мовних текстів створюють різні моделі процесів АОПМК, обґрунтовують ефективні алгоритми та структури подання природно-мовних масивів даних. Традиційно лінгвістичний аналіз масивів природно-мовних текстів подають як послідовність процесів морфологічного, синтаксичного та семантичного аналізу/синтезу. Для кожного процесу створені відповідні моделі, методи та алгоритми: орієнтовані на конкретні групи мов (морфолексичний аналіз); системні граматики Холідея, граматики Хомскі (N. Chomsky) [3–15], дерева підпорядкування та системи складових Гладкого [2], розширенні мережі переходів (синтаксис речення); класичні семантичні мережі та фреймові моделі Мінського (семантика тексту). Необхідність в автоматизації процесів АОПМК сприяла появі відповідних формальних та математичних лінгвістичних моделей і методів їх аналізу/синтезу. Активним є розвиток мовознавчих дисциплін для потреб галузі комп'ютерних наук та ІТ. Інтеграційні процеси в цій галузі наук сприяють активному залученню науковців в сфері досліджень АОПМК для розроблення та створення автоматизованих ІС опрацювання багатомовної текстової інформації.

Найбільш складні проблеми АОПМК зумовлені явищами полісемії, омонімії, ононімії тощо, які характеризують неоднозначність мови і ускладнюють процес виявлення коректного відображення семантично-синтаксичної структури тексту в формальне подання через логічну інтерпретацію. Це вирішують в межах семантичного аналізу. Але застосування ресурсооб'ємних продукційних правил логічно-семантичного аналізу ускладнює та уповільнює програми АОПМК. Під час розуміння тексту не часто застосовують логіку, в основному ж здійснюється асоціативний пошук семантичного концепту, що відповідає шуканому слову та є контексто-наближеним до власного оточення. Тому асоціативний пошук є перспективним методом інтерпретації природно-мовних масивів даних.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для реалізації синтаксичного аналізу текстового контенту з метою знаходження ключових слів та зменшення етапів опрацювання тексту необхідно:

I) Відокремити в аналізованому термінальному ланцюжку (реченні українською мовою) дієслівну групу від іменної групи (ключовим словами можуть бути лише слова з іменної групи) – це відбувається за результатами стемінгу – аналіз закінчень та робота лише з тими словами, флексії яких відповідають прикметникам та іменникам (в українській мові дієслівну групу не входять прикметник та іменник);

II) В іменній групі після знаходження першої множини ключових слів (слів, які вживані в текст із певною частотою, в межах, заданої модератором, але ці слова можуть бути лише прикметник в називному відмінку чоловічого роду, іменник в називному відмінку або абревіатура) знаходять та аналізують сусідні слова знайдених ключовиків. При цьому шукаємо ключові словосполучення, тобто визначаємо терми $Noun \in U_{K1}$ як словосполучення іменників або прикметника з іменником серед множини слів текстового контенту, зокрема:

1. Якщо ключовим словом є прикметник (флексія слова ий – називний відмінок чоловічого роду). Тоді по тексту знаходяться всі слова, що вживані справа від цього прикметника в будь якому відмінку (пошук іде за основою цього прикметника) та будується для них частотний словник. Ті словосполучення, що вживанні більше за певний ліміт (але можуть бути вживані менше за самий прикметник) і є новими ключовими словами. Ліміт визначає модератор.

2. Якщо ключовим словом є іменник (флексія слова не ий), тоді аналізуються всі слова справа та злів від нього.

а. Спочатку перевіряються всі слова зліва від нього на наявність флексій ий. Будується також частотний слов-

ник. Визначається множина слів, які зустрічаються найчастіше за певний визначений модератором ліміт – це і є нові ключові сова.

b. Потім аналізуються всі слова справа – вони всі мають бути без флексії ий. Аналогічно будується частотний словник, за яким визначається множина ключових слів.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Процес виведення термінального ланцюжка українською [1–2], в якій властивий вільний порядок слів у реченні, що, проте, не заперечує існування сталого порядку розміщення окремих мовних елементів [3–4]. Для простого повного речення з прямим порядком слів структурну схему вважатимемо фіксованою, основними синтаксичними категоріями такого речення будуть іменна та дієслівна групи [5–7]. Необмежена граматика, побудована на тих же засадах, що і у попередніх прикладах, не матиме застосування через свою складність [8–10]. Для утворення контекстно-залежної граматики введемо певні обмеження, перш за все, на структуру речення [11]. Спираючись на правила побудови речень української мови з прямим порядком слів (наприклад, прикметник стоїть у препозиції до іменника, елементи іменникової групи групуються навколо іменника тощо) [11–13], розглянемо іменну групу $\widetilde{N}$ такої структурної схеми $\widetilde{N} = \{AN\}$ або $\widetilde{N} = N^{p}$. Прикметник та іменник в іменній групі узгоджуються між собою за відмінком, числом та родом [14–15]. Ці граматичні категорії є також граматичними категоріями займенника. Розглядатимемо **дієслівну групу** $\widetilde{R}$ такої структурної схеми: $\widetilde{R} = R\widetilde{N}$ або $\widetilde{R} = \widetilde{N}R$. З огляду на граматичні характеристики дієслова в українській мові, узгодження між іменною та дієслівною групою відбувається за числом, родом та особою (табл. 1–2).

Розглядатимемо речення з іменною групою в третій особі і дієслівною групою в теперішньому часі. Скороченим позначеннями іменної групи є $\widetilde{N}_{РД,ЧЛ,ВД,ОС}$, а її складових – $A_{РД,ЧЛ,ВД}$, $N_{РД,ЧЛ,ВД,ОС}$, $N^{займ}_{РД,ЧЛ,ВД,ОС}$. За потреби наголосити на використанні різних значень граматичних категорій використаємо такі позначки: дві іменні групи з різними значеннями категорії, наприклад, роду, позначатимемо так: $\widetilde{N}_{РД',ЧЛ,ВД,ОС}$, $\widetilde{N}_{РД'',ЧЛ,ВД,ОС}$. Скороченим позначеннями дієслівної групи є $\widetilde{R}_{РД,ЧЛ,ЧС,ОС}$, дієслова – $R_{РД,ЧЛ,ЧС,ОС}$. Реалізація норм та правил української мови впливає на подання перетворень. Наприклад, відомо, що найбільш часто іменна група виражається іменником або займенником у називному відмінку, а форми дієслова у теперішньому часі для всіх родів однини співпадають (*він/вона/воно летить)*, і врахування таких закономірностей відповідно відображається у позначеннях іменної та дієслівної груп – $\widetilde{N}_{РД,Ч,н,ОС}$ і $\widetilde{R}_{ЧЛ,тп,ОС}$. Спосіб подання контекстно-залежної граматики, що виводить речення введеної структурної схеми (з урахуванням певних закономірностей української мови) приведемо на прикладі речення *У своїй найбільш важливій роботі він показує барвистий світ українського села в його неповторній привабливості*. Розглянемо граматику G_3=(V, T, S, P). Алфавіт (позначення синтаксичних категорій подамо без індексів – для зручності) V=(S, $\widetilde{N}$, $\widetilde{R}$, A, N, R, E, $N^{займ}$, #, *у*, *свій*, *найбільш*, *важливий*, *робота*, *він*, *показувати*, *барвистий*, *світ*, *український*, *село*, *в*, *неповторний*, *привабливість*), T=(#, *у*, *свій*, *найбільш*, *важливий*, *робота*, *він*, *показувати*, *барвистий*, *світ*, *український*, *село*, *в*, *неповторний*, *привабливість*), # – символ межі речення, S – початковий символ. Кожен крок виведення полягає в розгортанні одного з символів попереднього ланцюжка (так, при переході від ланцюжка 2 до ланцюжка 3 символ $\widetilde{R}_{од,тп,3}$ розгортається в три символи – $R_{од,тп,3\ ч,од,з,1\ с,од,о,3}$) або в заміні його іншим (наприклад, при переході від ланцюжка 10 до ланцюжка 11 символ $\widetilde{N}_{ч,од,з,1}$ замінюється на $N^{займ}_{ч,од,з,1}$), інші ж символи переписуються без зміни. Проміжний ланцюжок містить рівно один допоміжний символ на останньому місці, тобто речення породжується зліва направо. Регулярна граматика ніби передбачає, що може слідувати за вже виданою словоформою, причому глибина передбачення – один сусідній символ; кожен черговий вибір повністю обумовлюється лише одним попереднім вибором [12]. Із виведення речення в регулярній граматиці неможливо отримати природне подання структури безпосередніх складових цього речення порівняно в контекстно-залежній та контекстно-вільній граматиках. Регулярні граматики дають деяку структуру складових, як і взагалі всі граматики безпосередніх складових, однак, ці складові зазвичай носять формальний характер [14].

Таблиця 1 – Позначення граматичних категорій іменної групи в українській мові

Тип	Опис
Іменна група/ $\widetilde{N}$	прикметник/*А*, іменник/*N*, займенник/$N^{займ}$;
Число/*ЧЛ*	однина/*од*, множина/*мн*;
Рід/*РД*	чоловічий/*ч*, жіночий/*ж*, середній/*с*;
Відмінок/*ВД*	називний/*н*, родовий/*р*, давальний/*д*, знахідний/*з*, орудний/*о*, місцевий/*м*, кличний/*к*;
Особа/ОС	1-ша/*1*, 2-га/*2*, 3-тя/*3*

Таблиця 2 – Позначення граматичних категорій дієслівної групи в українській мові

Тип	Опис
Дієслівна група/ $\widetilde{R}$	дієслово/*R*, в межах іменної групи прикметник/*А*, іменник/*N*;
Число/*ЧЛ*	однина/*од*, множина/*мн*;
Рід/*РД*	чоловічий/*ч*, жіночий/*ж*, середній/*с*;
Особа/*ОС*	1-ша/*1*, 2-га/*2*, 3-тя/*3*;
Час/*ЧС*	теперішній/*тп*, минулий/*мн*, майбутній/*мб*

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Виявлення ключових слів тематики контенту з фрагменту тексту забезпечимо за допомогою процесів, поданих на рис. 2.

Текст реалізує структурно подану діяльність, що передбачає суб'єкт і об'єкт, процес, мету, засоби і результат, які відображаються в змістовно-структурних, функціональних, комунікативних показниках. Одиницями внут-

рішньої організації структури тексту є алфавіт, лексика (парадигматика), граматика (синтагматика), парадигми, парадигматичні відношення, синтагматичні відношення, правила ідентифікації, висловлювання, між фразова єдність та фрагменти-блоки. На композиційному рівні виділяють речення, абзаци, параграфи, розділи, глави, підглави, сторінки тощо (речення, побічно пов'язані з внутрішньою структурою, не розглядаються – рис. 3). За допомогою бази даних (бази термінів/морфем і службових частин мови) та визначених правил аналізу тексту виконують пошук терміну (рис. 4а) на інформаційному ресурсі (рис. 4б).

Розглянемо синтаксичні аналізатори, що працюють у два етапи: ідентифікують змістовні лексеми та створюють дерево розбору (алг. 1).

Алгоритм 1. Синтаксичний аналізатор текстового контенту.

Етап 1. Ідентифікація змістовних лексем $U_{K1} \in U_K$ для комерційного контенту C_2.

Крок 1. Визначення ланцюжка термів у вигляді речення.

Крок 2. Ідентифікація іменної групи за допомогою словника основ.

Крок 3. Ідентифікація дієслівної групи за допомогою словника основ.

Етап 2. Створення дерева розбору зліва направо. Виведення дерева полягає в розгортанні одного з символів попереднього ланцюжка послідовності лінгвістичних змінних, або в заміні його іншим, інші ж символи переписуються без зміни. При розгортанні, замінювані/переписувані символи (предки) з'єднують безпосередньо з символами, які виходять в результаті розгортання, заміни або переписування (нащадками), та отримують дерево складових, або синтаксичну структуру для змісту комерційного контенту.

Крок 1. Розгортання іменної групи. Розгортання дієслівної групи.

Крок 2. Реалізація синтаксичних категорій словоформами.

Етап 3. Визначення множини ключових слів $\alpha_4 : (C_2, U_K, T) \to C_3$ для контенту C_2.

Крок 1. Визначення термів $Noun \in U_{K1}$ – іменників, словосполучень іменників або прикметника з іменником серед множини слів текстового контенту.

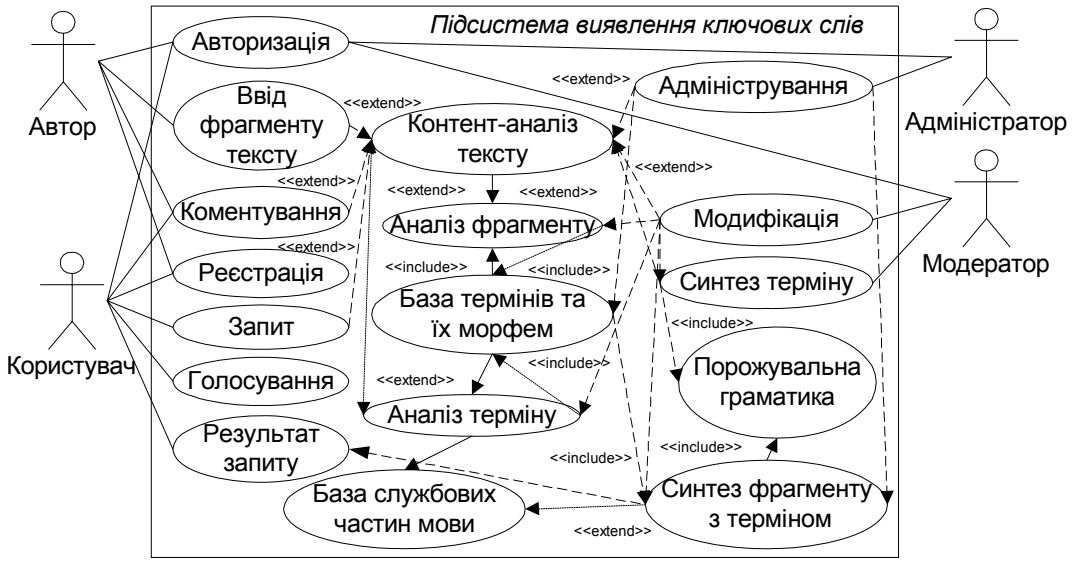


Рисунок 2 – Діаграма варіантів використання для виявлення ключових слів тематики контенту

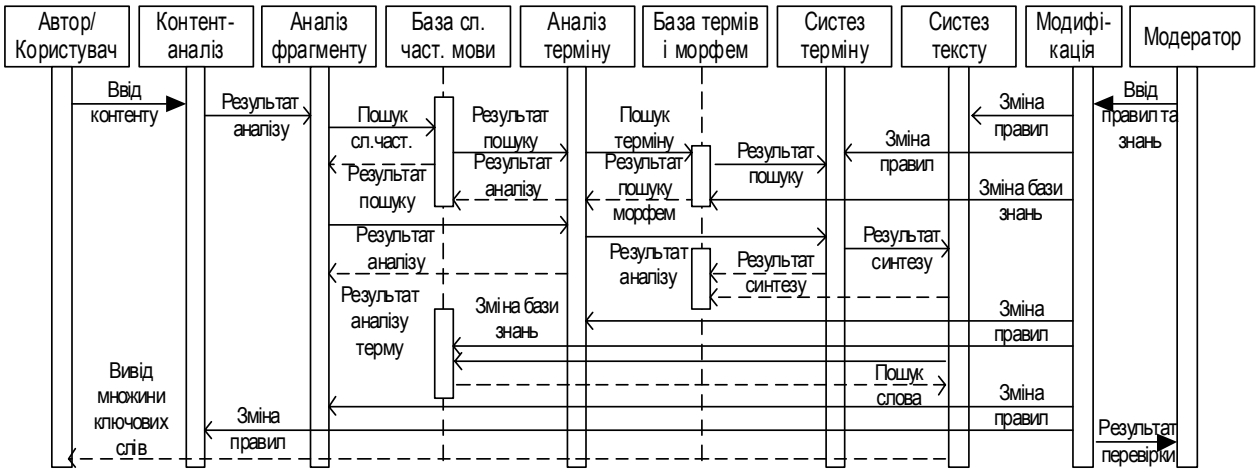


Рисунок 3 – Діаграма послідовності для процесу виявлення ключових слів тематики контенту

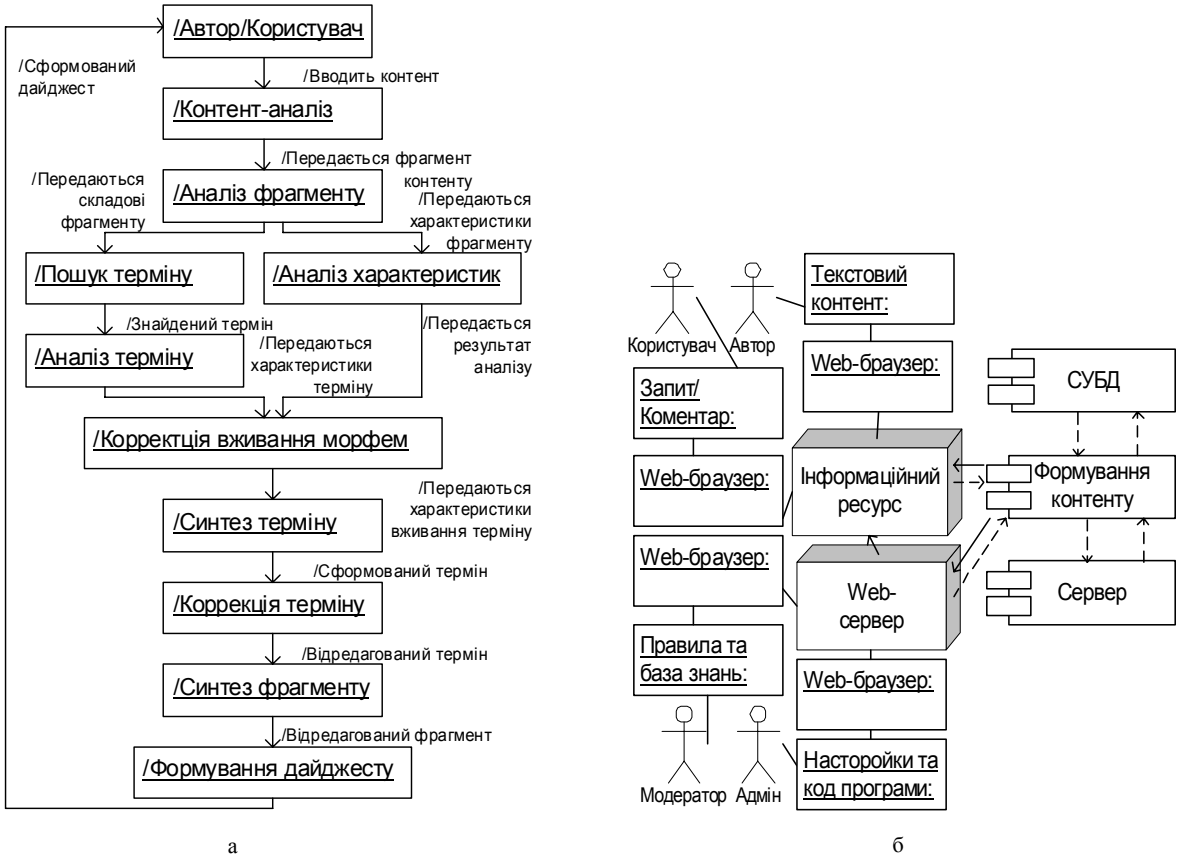


Рисунок 4 – Діаграми: а – кооперації, б – компонентів виявлення ключових слів тематики контенту

Крок 2. Розрахунок унікальності $Unicity$ для термів $Noun \in U_{K1}$.

Крок 3. Розрахунок $NumbSymb \in U_{K3}$ для $Noun \in U_{K1}$ при $Unicity \geq 80$.

Крок 4. Розрахунок $UseFrequency \in U_{K2}$ – частоти появи ключових слів контенту. Для термів з $NumbSymb \leq 2000$ частота $UseFrequency$ є в межах $(6;8]$%, з $NumbSymb \geq 3000$ – $[2;4)$%, з $2000 > NumbSymb < 3000$ – $[4;6]$%.

Крок 5. Розрахунок $BUseFrequency$ – частота появи ключових слів на початку тексту, $IUseFrequency$ – частота появи ключових слів в середині тексту, $EUseFrequency$ – частота появи ключових слів в кінці тексту контенту.

Крок 6. Порівняння значень $BUseFrequency$, $IUseFrequency$ та $EUseFrequency$ для розстановки пріоритетів. Ключові слова з більшими значеннями $BUseFrequency$ мають більший пріоритет, ніж ключові слова з більшим значенням $EUseFrequency$.

Крок 7. Сортування ключових слів згідної їх пріоритетів.

Етап 4. Заповнення бази пошукових образів контенту C_3, тобто атрибутів $KeyWords \in U_{K4}$ – ключові слова, $Unicity$ – унікальність ключових слів ≥ 80, $Noun$ – терм, $NumbSymb$ – кількість знаків без пробілів, $UseFrequency$ – частота вживання ключових слів, $BUseFrequency$ – частота вживання ключових слів на початку тексту, $IUseFrequency$ – частота вживання ключових слів в середині тексту, $EUseFrequency$ – частота вживання ключових слів в кінці тексту. Спираючись на правила породжувальної граматики виконується корекція терміну згідно правил його вживання у контексті (рис. 5).

Речення задають межі дії знаків пунктуації, анафоричних і катафоричних посилань. Семантика тексту зумовлена комунікативним завданням передавання інформації. Структура тексту визначається внутрішньою організацією одиниць тексту і закономірностями їх взаємозв'язку. Під час синтаксичного аналізу текст оформляють у структуру даних, наприклад, в дерево, яке відповідає синтаксичній структурі вхідної послідовності, і найкраще підходить для подальшого опрацювання. Після аналізу фрагменту тексту і терміну синтезують новий термін як ключове слово тематики контенту, використовуючи базу термінів та їх морфем (рис. 5).

Далі синтезуємо терміни для формування нового ключового слова, використовуючи базу службових частин мови. Принцип виявлення ключових слів за змістом (термами) базується на законі Зіпфа і зводиться до вибору слів із середньою частотою появи (найбільш вживанні слова ігнорують через «стоп-словники», а рідкісні слова тексту не враховують).

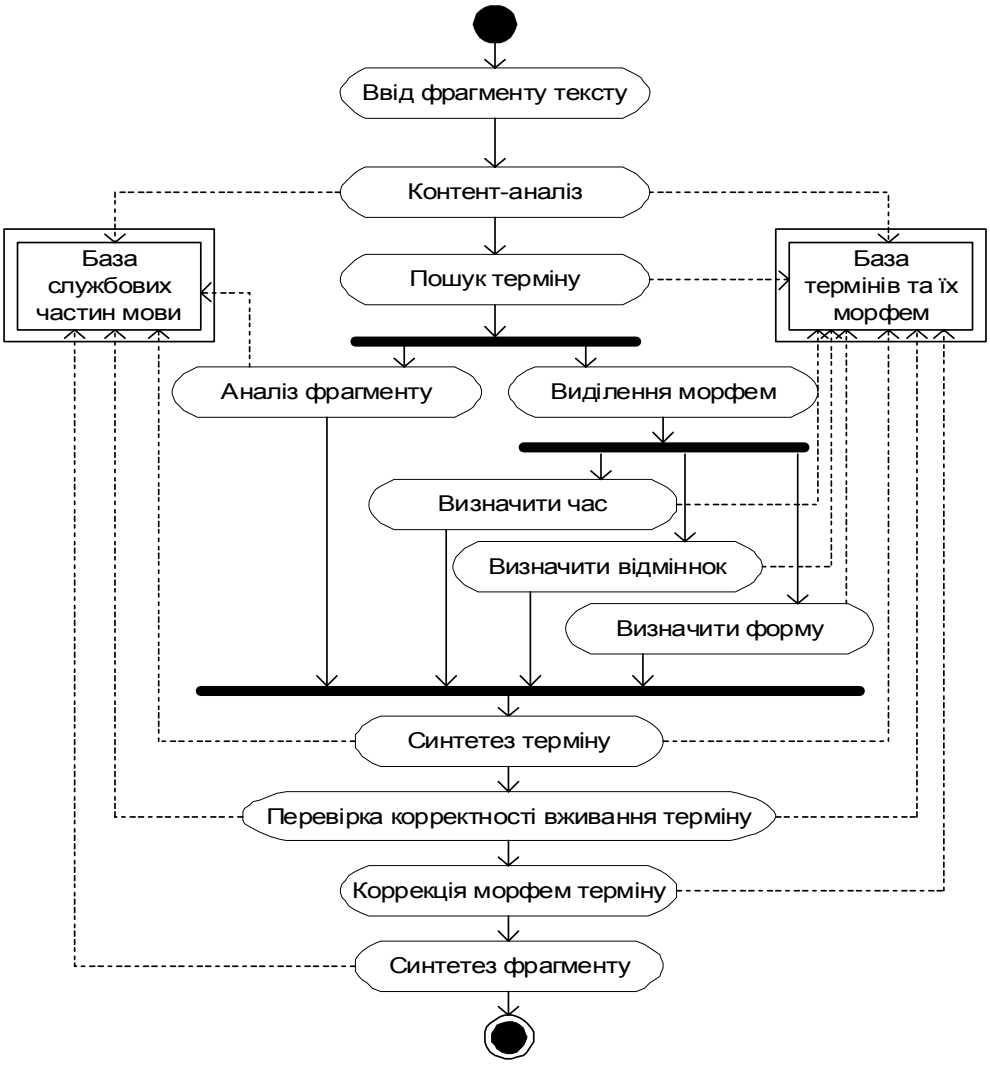


Рисунок 5 – Діаграма діяльності для процесу виявлення ключових слів тематики контенту

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Лінгвістичною базою для експериментального дослідження обрано 100 наукових публікацій Вісника Національного університету «Львівська політехніка» серії «Інформаційні системи та мережі» (http://science.lp.edu.ua/sisn), № 783 (http://science.lp.edu.ua/SISN/SISN-2014) та № 805 (http://science.lp.edu.ua/sisn/vol-cur-805-2014-2). Аналіз статистики функціонування системи виявлення множини ключових слів із 100 наукових статей було проведено у два етапи, зокрема:

1. Проаналізувати всі статті із перевіркою загальних заблокованих слів та тематичного словника.

2. Проаналізувати всі статті із перевіркою уточнених заблокованих слів та уточненого тематичного словника (з більшою кількістю запуску системи формується множина невідомих слів (відсутніх і в тематичному словнику і в множині заблокованих).

Окрім того на кожному етапі перевірка відбувалась в два кроки для кожної статті: аналіз всієї статті (http://victana.lviv.ua/index.php/kliuchovi-slova) та аналіз статті без початку (назва, автори, УДК, анотації двома мовами, авторські ключові слова двома мовами, місце роботи авторів) і без списку літератури для того, щоб визначити похибки точності формування множини ключових слів.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Аналіз статистики здійснювався за принципом порівняння множини авторських ключових слів (визначені та прописані в статті самими авторами цих робіт), множини ключових слів визначених за першим та другим етапами з різними вагами слів (але більше, за визначене в опції **Мін.вага слова, %* в межах [1,5]) з повними та скороченими текстами робіт (табл. 3) при середньому арифметичному значенні авторських ключових словосполучень / слів біля 5 (4,77), які в середньому утворені з 10 (9,82) слів. Вага слова розраховується як відносна частота появи основи цього слова у всьому тексті. В табл. 4 присутні такі позначення, як *A* (всього ключових слів, визначених системою при заданій вазі слова), *B* (змістовних слів зі списку утворених, тобто без невідомих абревіатур, дієслів, службових слів тощо), *C* (збіг слів з визначеними автором статті), *D* (точність збігу знайдених ключовиків з авторським ключовими словами), *E* (додаткові ключові слова, визначені системою, але не визначені автором статті).

Таблиця 3 – Статистичні дані досліджених обсягів текстів статей

Назва обсягу статті	Крок 1		Крок 2	
	Всього	Середнє арифметичне	Всього	Середнє арифметичне
Сторінок	956	9,56	828	8,28
Абзаців	16497	164,97	15263	152,63
Рядків	42553	425,53	36965	369,65
Слів	345580	3455,8	291247	2912,47
Знаків	2327209	23272,09	1974773	19747,73
Знаків та пробілів	2674889	26748,89	2265917	22659,17

Таблиця 4 – Статистичні дані досліджених змісту текстів статей

Назва	Вага слова	Етап 1					Етап 2				
		A	*B*	*C*	*D*	*E*	*A*	*B*	*C*	*D*	*E*
Крок 1	≥ 1	5,46	3,92	2,51	2,08	1,74	7,43	7,03	3,27	3	4,18
	≥ 2	1,08	0,88	0,63	0,59	0,26	2,67	2,64	1,65	1,54	1,12
	≥ 3	0,41	0,38	0,22	0,21	0,16	1,21	1,2	0,85	0,79	0,41
	≥ 4	0,15	0,13	0,09	0,09	0,04	0,46	0,45	0,33	0,31	0,15
	≥ 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Крок 2	≥ 1	6,51	5,02	2,68	2,23	2,37	8,35	7,78	3,25	2,91	4,99
	≥ 2	1,34	1,11	0,74	0,72	0,39	3,12	3,07	1,81	1,67	1,43
	≥ 3	0,51	0,45	0,29	0,27	0,17	1,42	1,4	0,93	0,85	0,54
	≥ 4	0,19	0,17	0,12	0,12	0,05	0,73	0,72	0,45	0,42	0,31
	≥ 5	0,11	0,1	0,06	0,06	0,04	0,33	0,32	0,25	0,23	0,1

6 ОБГОВОРЕННЯ

В Інтернет-просторі зазвичай присутні інформаційні SEO-ресурси, які визначають ключові слова в межах $[100 \div 1000]$ слів в тексті, наприклад:

– http://msurf.ru/tools/keygeneratortext/;
– http://syn1.ru/tools/keygeneratortext/;
– http://webmasta.org/tools/keygeneratorurl/;
– http://labs.translated.net/terminology-extraction/;
– http://www.keywordstext.therealist.ru/.

Недолік таких SEO-ресурсів – неточність та некоректність опрацювання україномовних текстів при відсутності грамотно побудованих морфологічних словників, словників основ та заблокованих слів. Також основним недоліком більшості таких SEO-ресурсів обмеженість опрацювання обсягів текстових масивів даних. Для прикладу синтаксично проаналізована рядом SEO-ресурсів ця україномовна стаття, яка має понад 800 слів в тесті Частина перерахованих вище SEO-ресурсів не опрацьовує або некоректно опрацьовує такий великий обсяг інформації (рис. 6–7).

Одним із найкращих SEO-ресурсів є http://advego.ru/text/seo/, який найкраще працює з україномовних текстами (рис. 8). Провадить семантичний аналіз тексту онлайн та SEO-аналіз тексту. Результат найбільш наближений до отриманого розробленою системою.

Але є недоліки. Не визначає множину ключових слів, а лише частоту вживання слів, словосполучень та частин слів (які необов'язково є частинами слова як основа). Взагалі не працює з основами слова. Для цього SEO-ресурсу слова ключових та ключові є різними.

Розроблений SEO-ресурс http://victana.lviv.ua/kliuchovi-slova працює з основами слова, орієнтований на україномовні, російськомовні, англомовні тексти, а також змішаного типу (рис. 9). На прикладі цієї статті SEO-ресурс визначив наступну множину ключових слів {слово, ключових, контент, аналіз, chomsky, система}.

Повторюваність слів, раз: слово – 120; ключових – 49; контент – 46; аналіз – 39; chomsky – 37; система – 37. Автори визначили такі ключові слова: текст, україномовний, алгоритм, контент-моніторінг, ключові слова, лінгвістичний аналіз, синтаксичний аналіз, породжувальні граматики, структурна схема речення, інформаційна лінгвістична система.. Автори зазвичай більше визначають ключових слів порівняно з реальною ситуацією згідно закономірностей розподілу частоти слів за законом Зіпфа (George KingsleyZipf). Автор наукової статті зазвичай обирає за своїм розсудом кількість ключових слів в діапазоні від 2 до 10 слів (найчастіше – 3–5 ключовиків). Система ж визначає різну кількість слів, в залежності від стиля написання конкретного автора (існують такі статті, в яких система не знаходить за законом Зіпфа жодного ключового слова). Збіг списків виявлених ключовиків з авторськими без врахування зайвих слів, визначених авторами (повторюваність > 30 для обсягу тексту понад 4800 слів), складає відповідно для таких SEO-ресурсів:

– http://syn1.ru/tools/keygeneratortext/ – приблизно 35%;
– http://labs.translated.net/terminology-extraction/ – приблизно 57%;
– http://advego.ru/text/seo/ – приблизно 83%;
– http://victana.lviv.ua/kliuchovi-slova – приблизно 90%.

На рис. 10 приведено діаграму аналізу статистики формування системою множин всіх потенційних ключових слів порівняно з множиною, визначеною авторами статей.

Перший стовпчик – середньоарифметична кількість ключових слів, визначених автором (4,77), а другий – середньоарифметична кількість слів, які складають ці авторські ключові слова (9,82). Третій стовпчик – середньоарифметична кількість потенційних ключових слів, визначена системно на етапі 1, крок 1(5,46); четвертий – на етапі 1, крок 2 (6,51); п'ятий – на етапі 1, крок 1 (7,43);

Информация о тексте:

Всего слов в тексте:	5072
Обработано слов (без повторов):	1073

Результат

КЛЮЧОВИХ, контенту, АНАЛ, Chomsky, ться, сть, речення, групи, комерц, етап, Ключов, його, або, менник, появи, без, досл, Systems

Слова списком подробнее [Скрыть]

Слово	Вхождений	Частота (TF)
КЛЮЧОВИХ	43	0.008
контенту	40	0.008
АНАЛ	40	0.008
Chomsky	37	0.007
ться	22	0.004
сть	18	0.004
речення	17	0.003
групи	15	0.003
комерц	15	0.003
етап	13	0.003
Ключов	12	0.002
його	12	0.002
або	11	0.002
менник	11	0.002
появи	10	0.002
без	9	0.002
досл	9	0.002
Systems	9	0.002

Рисунок 6 – Результат аналізу цієї статті на SEO-ресурсі http://syn1.ru/tools/keygeneratortext/

#	Extracted term	Score
1	текстового контенту	65%
2	ключових слів	65%
3	комерційного контенту	62%
4	обработки текстового контента	62%
5	опрацювання текстового контенту	62%
6	для	61%
7	частота появи ключових слів	60%
8	аналізу	56%
9	слова	56%
10	систем	55%
11	при	55%
12	іменної групи	55%
13	синтаксичного аналізу	55%
14	правил	54%
15	систем опрацювання текстового контенту	53%
16	автоматического обработки текстового контента	53%
17	прикметника з іменником серед	53%
18	іменником серед множини слів	53%
19	лише одного символу отримали	53%
20	або прикметника з іменником	53%

Рисунок 7 – Результат аналізу цієї статті на SEO-ресурсі http://labs.translated.net/terminology-extraction/

Статистика текста

Наименование показателя	Значение
Количество символов	35927
Количество символов без пробелов	31118
Количество слов	4354
Количество уникальных слов	1589
Количество значимых слов	2873
Количество стоп-слов	1013
Вода	34.0 %
Количество грамматических ошибок	460
Классическая тошнота документа	8.12
Академическая тошнота документа	4.9 %

Семантическое ядро

Фраза/слово	Количество	Частота, %
слів	66	1.52
контент	54	1.24
ключових	45	1.03
ключових слів	42	0.96 / 1.93
chomsky	37	0.85
текст	36	0.83
система	29	0.67
текстового контенту	24	0.55 / 1.10
текстовой	24	0.55
граматика	22	0.51
аналізу	21	0.48
крок	21	0.48
речення	18	0.41

Слова

Слово	Количество	Частота, %
слів	66	1.52
контент	54	1.24
ключових	45	1.03
chomsky	37	0.85
текст	36	0.83
система	29	0.67
текстовой	24	0.55
граматика	22	0.51
аналізу	21	0.48
крок	21	0.48
речення	18	0.41
chomsky	16	0.37
частота	16	0.37

Стоп-слова

Слово	Количество	Частота, %
в	85	1.95
тот	68	1.56
of	60	1.38
п	56	1.29
з	48	1.10
на	45	1.03
слово	40	0.92
the	35	0.80
для	31	0.71
р	29	0.67
і	29	0.67
and	27	0.62
у	26	0.60

Рисунок 8 – Результат аналізу цієї статті на SEO-ресурсі http://advego.ru/text/seo/

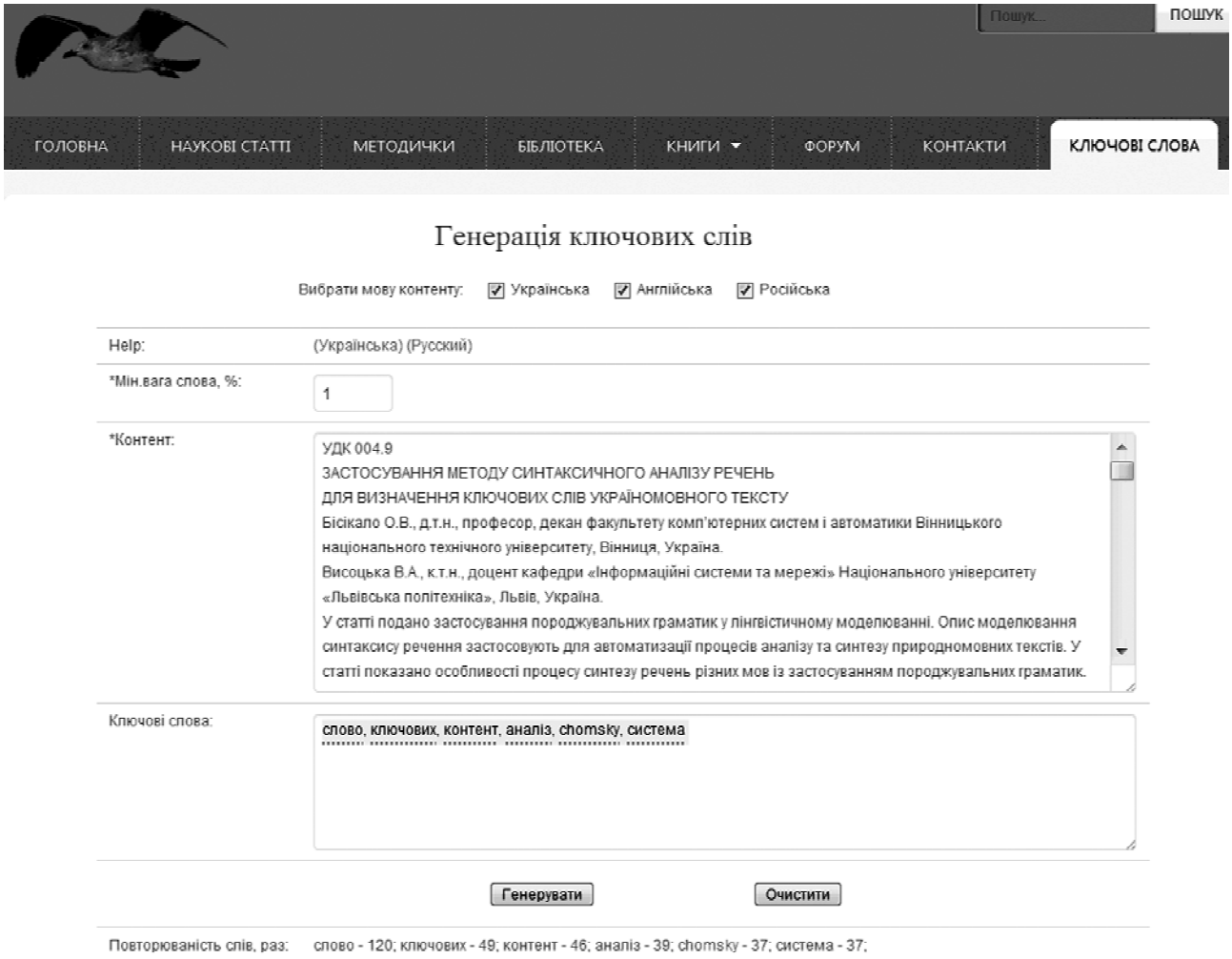


Рисунок 9 – Результат аналізу цієї статті на SEO-ресурсі http://victana.lviv.ua/kliuchovi-slova

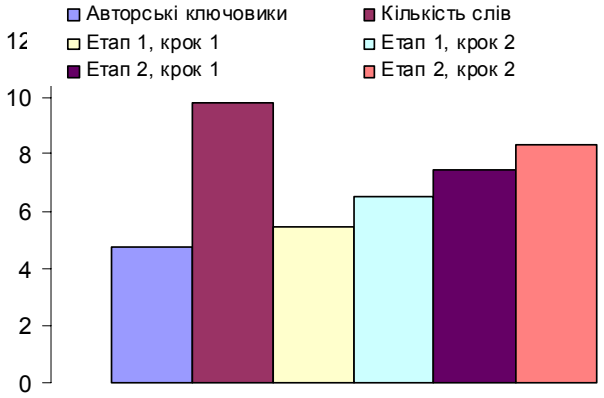


Рисунок 10 – Результати перевірки 100 статей

шостий – на етапі 2, крок 2 (8,35). Отже, автор статті в середньому зазвичай визначає більшу кількість слів (стовпчик 2) та меншу кількість ключових слів (стовпчик 1), ніж вона реально присутня в цій роботі.

ВИСНОВКИ

У статті розглянуто особливості методу синтаксичного аналізу україномовного текстового контенту, спрямованого на автоматичне виявлення значущих ключових слів вхідних текстів. Визначено роль і формальні ознаки синтаксичного аналізатора в процесі виявлення ключових слів тематики контенту, проведено декомпозицію процедур запропонованого методу на 4-х етапах. На відміну від відомих синтаксичних аналізаторів, запропонований метод забезпечує самовдосконалення та самонавчання автоматизованої системи визначення ключових слів за рахунок механізму ідентифікації значущих статистичних параметрів у визначених модератором межах. Експериментальне дослідження на матеріалах 100 наукових публікацій з двох номерів (783 та 805) Вісника Національного університету «Львівська політехніка» серії «Інформаційні системи та мережі» (http://science.lp.edu.ua/sisn) підтвердило достовірність методу – для різних методик опрацювання первинного тексту середній збіг списків виявлених ключовиків з авторськими змінюється у проміжку 52,6–68,5%. Точність збігу ключових слів із авторськими коливається в проміжку 43,6–62,9%. Середній збіг змістовних ключових слів порівняно зі всіма знайденими системою коливається в проміжку 38,9–75,8% в залежності від етапів аналізу текстів статей. Точність збігу ключових слів порівняно зі всіма знайденими системою коливається в проміжку 34,3–71,9% в залежності від етапів аналізу текстів статей. Потребує подальшого експериментального дослідження визначення ключових слів для інших категорій текстів – наукових гуманітарного профілю, художніх, публіцистичних тощо.

ПОДЯКИ

У статті розв'язана науково-практична задача автоматичного визначення ключових слів україномовного тексту в Інтернет-джерелах на основі синтаксичного аналізу речень відповідної текстової інформації. Роботу виконано в рамках спільних наукових досліджень кафедри інформаційних систем та мереж Національного університету «Львівська політехніка» на тему «Розроблення методів та засобів побудови інтелектуальних систем опрацювання інформаційних ресурсів з використанням онтологічного підходу», а також кафедри автоматики та інформаційно-вимірювальної техніки Вінницького національного технічного університету у межах діяльності науково-дослідного центру прикладної та комп'ютерної лінгвістики. Результати досліджень здійснювались у рамках держбюджетних науково-дослідних робіт за темами «Розробка методів, алгоритмів і програмних засобів моделювання, проектування та оптимізації інтелектуальних інформаційних систем на основі Web-технологій «ВЕБ» та «Інтелектуальна інформаційна технологія образного аналізу тексту та синтезу інтегрованої бази знань природно-мовного контенту».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Берко, А. Системи електронної контент-комерції / А. Берко, В. Висоцька, В. Пасічник. – Л. : НУЛП, 2009. – 612 с.
2. Математична лінгвістика / [В. Висоцька, В. Пасічник, Ю. Щербина, Т. Шестакевич]. – Л. : Новий Світ-2000, 2012. – 359 с.
3. Chomsky N. Three models for the description of language / N. Chomsky // I.R.E. Transactions on Information Theory. – 1956. – Vol. 2. – P. 113–124.
4. Chomsky N. On certain formal properties of grammars / N. Chomsky // Information and Control. – 1959. – Vol. 2. – P. 137–167.
5. Chomsky N. On the notion «Rule of Grammar» / N. Chomsky // Proceedings of the Twelfth Symposium in Applied Mathematics. – 1961. – P. 6–24.
6. Chomsky N. Context-free grammars and pushdown storage / N. Chomsky // Quarterly Progress Reports, Research Laboratory of Electronics, M.I.T. – 1962. – № 65. – P. 187–194.
7. Chomsky N. Formal properties of grammars / N. Chomsky // Handbook of Mathematical Psychology, New York : Wiley and Sons. – 1963. – Vol. 2. – P. 323–418.
8. Chomsky N. The logical basis for linguistic theory / N. Chomsky // Proc. IX-th Int. Cong. Linguists, 1962. – P. 91–111.
9. Chomsky N. Finite state languages / N. Chomsky, G. A. Miller // Information and Control. – 1958. – Vol. 1. – P. 91–112.
10. Chomsky N. Introduction to the formal analysis of natural languages / N. Chomsky, G. A. Miller // Handbook of Mathematical Psychology 2, Ch. 12, Wiley. – 1963. – Vol. 2. – P. 269–321.
11. Chomsky N. The algebraic theory of context-free languages / N. Chomsky, M. P. Schьtzenberger // Computer programming and formal systems, North-Holland. – 1963. – P. 118–162.
12. Chomsky N. Syntactic Structures / N. Chomsky. – Mouton, The Hague, 1957. – 117 p.
13. Chomsky N. Explanatory models in linguistics / N. Chomsky // Logic, Methodology and Philosophy of Science: Proceedings of the 1960 International Congress. Stanford University Press, Stanford, CA. – 1962. – P. 528–550.
14. Chomsky N. Aspects of the Theory of Syntax / N. Chomsky. – MIT Press, Cambridge, MA,1965. – 247 p.
15. Chomsky N. Conditions on transformations / N. Chomsky. – New York : Holt, Rinehart & Winston, 1973. – P. 232–286.

Стаття надійшла до редакції 17.02.2016.
Після доробки 29.02.2016.

Бисикало О. В.[1], Высоцкая В. А.[2]

[1]Д-р техн. наук, профессор, декан факультета компьютерных систем и автоматики Винницкого национального технического университета, Винница, Украина

[2]Канд. техн. наук, доцент кафедры «Информационные системы и сети» Национального университета «Львовская политехника», Львов, Украина

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СИНТАКСИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРЕДЛОЖЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕВЫХ СЛОВ УКРАИНОЯЗЫЧНОГО ТЕКСТА

В статье представлены применения порождающих грамматик в лингвистическом моделировании. Описание моделирования синтаксиса предложения применяют для автоматизации процессов анализа и синтеза естественноязыковых текстов. В статье показаны особенности процесса синтеза предложений различных языков с применением порождающих грамматик. В работе рассмотрено влияние норм и правил языка на ход построения грамматик. Применение порождающих грамматик имеет широкие возможности в разработке и создании автоматизированных систем обработки текстового контента, для лингвистического обеспечения компьютерных лингвистических систем и тому подобное. В естественных языках есть ситуации, когда явления, зависящие от контекста, описаны как независимые от контекста, то есть в терминах контекстно-свободных грамматик. При этом описание затруднено из-за образования новых категорий и правил. В статье представлены особенности процесса введения новых ограничений на классы данных грамматик из-за введения новых правил. При количестве символов в правой части правил не меньшей левой получили несокращенные грамматики. Затем при замене только одного символа получили контекстно-зависимые грамматики. При наличии в левой части правила лишь одного символа получили контекстно-свободные грамматики. Никаких следующих природных ограничений на левые части правил наложить уже нельзя. Исходя из важности обеспечения автоматического обработки текстового контента в современных информационных средствах (например, информационно-поисковых системах, системах машинного перевода, семантического, статистического, оптического и акустического анализа и синтеза речи, автоматизированного редактирования, экстракции знаний текстового контента, реферирования и аннотирования текстового контента, индексирования текстового контента, учебно-дидактических, менеджмента лингвистических корпусов, инструментальные средства составления словарей различных типов и т.д.), специалисты интенсивно ищут новые модели, способы их описания и методы автоматического обработки текстового контента. Одним из таких способов является разработка общих принципов построения лексикографических систем синтаксического типа и построения по этим принципам указанных систем обработки текстового контента для конкретных языков. Любые средства синтаксического анализа состоят из двух частей: базы знаний о конкретном естественный язык и алгоритма синтаксического анализа, то есть набора стандартных операторов обработки текстового контента на основе этих знаний. Источником грамматических знаний сведения по морфологического анализа и различные заполнены таблицы понятий и лингвистических единиц. Они являются результатом эмпирического обработки текстового контента на естественном языке экспертами с целью выделения основных закономерностей для синтаксического анализа.

Ключевые слова: текст, украиноязычный, алгоритм, контент-мониторинг, ключевые слова, лингвистический анализ, синтаксический анализ, порождающих грамматики, структурная схема предложения, информационная лингвистическая система.

Bisikalo O. V.[1], Vysotska V. A.[2]
[1]Dr. Sc., Professor, Dean of Faculty for Computer Systems and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine
[2]PhD, Associate Professor of Information Systems and Networks Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

SENTENCE SYNTACTIC ANALYSIS APPLICATION TO KEYWORDS IDENTIFICATION UKRAINIAN TEXTS

This paper presents the generative grammar application in linguistic modelling. Description of syntax sentence modelling is applied to automate the processes of analysis and synthesis of texts in natural language. The article shows the features of the sentences synthesis indifferent languages of using generative grammars. The paper considers norms and rules influence in the language on the grammars constructing course. The use of generative grammars has great potential in the development and creation of automated systems for textual content processing, for linguistic providing linguistic computer systems, etc. The methods and tools development for automatic processing of text of commercial content in modern information technology are important and topical (for example, systems of information retrieval, machine translation, semantic, statistical, optical and acoustic analysis and synthesis of speech, automated editing, knowledge extracting from the text content, text content abstracting and annotation, textual content indexing, training and didactic, linguistic buildings management, instrumental means of dictionaries conclusion of various types, etc.). Specialists actively seeking new models of description and methods for automatic processing of text content. One of these methods is the development of general principles of lexicographic systems of syntactic type. It is important by these principles these systems construction of text content processing for specific languages. Any tools of syntactic analysis consists of two parts: a knowledge base about a particular natural language and algorithm of syntactic analysis (a set of standard operators of text content processing on this knowledge). The source of grammatical knowledge is data from morphological analysis and various filled tables of concepts and linguistic units. They are the result of the empirical processing of textual content in natural language of experts in order to highlight the basic laws for syntactic analysis.

Keywords: text, a Ukrainian, algorithm, content monitoring, keywords, linguistic analysis, parsing, generative grammar, structured scheme sentences, information linguistic system.

REFERENCES

1. Berko A., Vysotska V., Pasichnyk V. Systemy elektronnoyi kontent-komertsiyi. Leningrad, NULP, 2009, 612 p.
2. Vysotska V., Pasichnyk V., Scherbyna J., Shestakevych T. Matematychna linhvistyka. Leningrad, Novyy Svit-2000, 2012, 359 p.
3. Chomsky N. Three models for the description of language, *I.R.E. Transactions on Information Theory*, 1956, Vol. 2, pp. 113–124.
4. Chomsky N. On certain formal properties of grammars, *Information and Control*, 1959, Vol. 2, pp. 137–167.
5. Chomsky N. On the notion «Rule of Grammar», *Proceedings of the Twelfth Symposium in Applied Mathematics*, 1961, pp. 6–24.
6. Chomsky N. Context-free grammars and pushdown storage, *Quarterly Progress Reports, Research Laboratory of Electronics, M.I.T.*, 1962, No. 65, pp. 187–194.
7. Chomsky N. Formal properties of grammars, *Handbook of Mathematical Psychology, New York: Wiley and Sons*, 1963, Vol. 2, pp. 323–418.
8. Chomsky N. The logical basis for linguistic theory, *Proc. IX-th Int. Cong. Linguists*, 1962, pp. 91–111.
9. Chomsky N., Miller G. A. Finite state languages, *Information and Control*, 1958, Vol. 1, pp. 91–112.
10. Chomsky N., Miller G. A. Introduction to the formal analysis of natural languages, *Handbook of Mathematical Psychology 2, Ch. 12, Wiley*, 1963, Vol. 2, pp. 269–321.
11. Chomsky N., Schьtzenberger M. P. The algebraic theory of context-free languages, *Computer programming and formal systems, North-Holland*, 1963, pp. 118–162.
12. Chomsky N. Syntactic Structures. Mouton, The Hague, 1957, 117 p.
13. Chomsky N. Explanatory models in linguistics, *Logic, Methodology and Philosophy of Science: Proceedings of the 1960 International Congress. Stanford University Press, Stanford, CA,* 1962, pp. 528–550.
14. Chomsky N. Aspects of the Theory of Syntax. MIT Press, Cambridge, MA, 1965, 247 p.
15. Chomsky N. Conditions on transformations. New York, Holt, Rinehart & Winston, 1973, pp. 232–286.

УДК 004.921, 004.932.2

Ковнир А. Э.[1], Степаненко К. Э.[2], Ильяшенко М. Б.[3]

[1]Студент кафедры компьютерных систем и сетей Запорожского национального технического университета, г. Запорожье, Украина

[2]Студент факультета компьютерный наук и технологий Донецкого национального технического университета, г. Красноармейск, Украина

[3]Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры компьютерных систем и сетей Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина

УВЕЛИЧЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАСФОКУСИРОВАННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗА СЧЕТ ИСПРАВЛЕНИЯ ОШИБКИ ОКРУГЛЕНИЯ

В работе представлен метод повышения качества восстановления расфокусированных изображений за счет уменьшения влияния ошибки округления при дискретизации на восстановленное изображение. С ошибкой округления можно эффективно бороться, зная природу восстанавливаемого изображения и его искажения. Алгоритм восстановления потерянной при округлении части необходимо строить исходя из природы изображения, необходимой точности и допустимой скорости работы этого алгоритма. В работе приводится пример использования линейной интерполяции на этапе предварительной обработки исходного изображения в качестве основы для построения уточненных значений пикселов восстановленного изображения по дискретным значениям пикселов исходного расфокусированного изображения. Предложенный метод не привязан к конкретному алгоритму деконволюции, а его использование в паре с любым из них дает улучшение результата. В работе рассмотрено использование метода совместно с инверсной фильтрацией.

В работе представлен пример практического восстановления изображения на основе линейной интерполяции пикселов исходного изображения. Показано, что предложенный метод дает уменьшение погрешности восстановления в среднем от 3% до 20%, в зависимости от размера и специфики изображения. Показано уменьшение ошибки восстановления с ростом размеров исходного расфокусированного изображения.

Ключевые слова: реконструкция изображений, расфокусировка, преобразование Фурье, свертка, оператор искажения, деконволюция.

НОМЕНКЛАТУРА

x, y – координаты пикселов изображения;

u,v – координаты пикселов Фурье-образа изображения;

$f(x, y)$ – исходное изображение;

$F(u,v)$ – Фурье-образ исходного изображения;

$\hat{F}(u,v)$ – приближение исходного изображения;

$g(x,y)$ – искаженное изображение;

$h(x,y)$ – искажающий оператор PSF (Point Spread Function);

$H(u,v)$ – Фурье-образ искажающего оператора;

$n(x, y)$ – аддитивный шум;

$N(x, y)$ – Фурье-образ шума;

$P(u,v)$ – Фурье-преобразование оператора Лапласа;

R – энергетическим соотношением шум/сигнал;

$S\eta(u,v)$ – спектр шума;

$Sf(u,v)$ – спектр сигнала;

γ – параметр регуляризации;

newValue – среднее значение соседних пикселов строки изображения;

i – оператор цикла, перебирающий пикселы строки изображения;

$arr[i]$ – значение цвета пиксела строки изображения.

ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие фото-видео технологий сделали актуальным разработку качественных алгоритмов обработки изображений, мат. аппарат для которых был уже достаточно хорошо развит еще в семидесятых. Однако, одна из важнейших задач обработки графических данных – восстановление смазанных изображений так и не нашла универсального качественного решения. Помимо бытовых областей применения (телевещание, полиграфия, видеотелефония), восстановление резкости активно применяется в астрономии, медицине и прочих прикладных науках.

Целью работы являлась разработка модификации метода повышения качества восстановления изображений за счет уменьшения влияния ошибки округления при дискретизации на восстановление изображения, подходящий для работы с любыми применяемыми алгоритмами деконволюции, путем введения дополнительного этапа предварительной обработки исходного изображения.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Искаженное изображение может быть представлено в пространственной области в виде [1]:

$$g(x,y) = f(x,y) * h(x,y) + n(x,y).$$

Свертка функций (конволюция) [2] – операция в функциональном анализе, показывающая «схожесть» одной функции с отраженной и сдвинутой копией другой. По определению, свертка – это математическая операция, примененная к двум функциям f и g, порождающая третью функцию, которая иногда может рассматриваться как модифицированная версия одной из первоначальных. В нашем случае это операция вычисления нового значения выбранного пиксела, учитывающая значения окружающих его пикселов. Ядро (функция искажения) – квадратная матрица нечетного размера (3x3, 5x5, 7x7 и т.д.). Путем наложения этой матрицы на исходное изображение, вычисляется значение пиксела нового изображения, по координатам, соответствующим пикселу, исходного изображения, на котором находится средний элемент матрицы. Для получения нового значения выполняется поточечное (поэлементное) умножения матрицы ядра искажения на пикселы, находящиеся под матрицей. То есть, чтобы сохранить яркость изображения, необходимо, чтобы сумма ядра была равна единице.

© Ковнир А. Э., Степаненко К. Э., Ильяшенко М. Б., 2016

DOI 10.15588/1607-3274-2016-3-8

Можно заметить, что если начинать свертку, «прикладывая» нулевой пиксел ядра к нулевому пикселу изображения, то результирующее изображение будет иметь меньший размер, чем исходное изображение, на значение, равное округленной в меньшую сторону половине размера ярда искажения. Чтобы добиться размера результирующего изображения, равному исходному нужно изначально расширить исходное изображения.

Известно, что свертка (она же конволюция) функций в пространственной области эквивалентна умножению Фурье-образов этих функций в частотной области. Преобразование Фурье – операция, сопоставляющая одной функции вещественной переменной другую функцию, также вещественной переменной. Эта новая функция описывает коэффициенты («амплитуды») при разложении исходной функции на элементарные составляющие – гармонические колебания с разными частотами.

Преобразование Фурье функции f вещественной переменной является интегральным и задается следующей формулой:

$$\hat{f}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-ix\omega} dx.$$

После несложных преобразований операцию интеграла можно свести к сумме. В частотной области модель искажения будет иметь вид:

$$G(u,v)=F(u,v)H(u,v)+N(u,y).$$

Исходя из рассмотренной модели, фундаментальная задача восстановления искаженных изображений состоит в выполнении обратной операции свертки – деконволюции.

Для решения данной задачи существуют множество подходов, базовыми для которых являются три варианта: инверсный фильтр, Винеровская фильтрация и фильтр Тихонова. По ряду причин, ни один способ не сможет восстановить изображение полностью.

Для определения качества восстановления изображения следует использовать несколько критериев [3]:

1) среднеквадратичное отклонение цвета;
2) среднеквадратичное отклонение резкости переходов;
3) визуальная оценка.

Первый критерий популярен, однако совсем не отображает качество восстановления изображений. Более того, чаще всего среднеквадратичное отклонение цвета исходного и восстановленного изображения выше, чем исходного и испорченного.

Второй метод более показателен. Для его реализации сначала создается для каждого изображения маска, в которой каждый элемент равен разнице значений текущего и следующего пикселов, далее рассчитывается их среднеквадратичное отклонение.

Несмотря на всю мощь численных методов, только наглядно можно достоверно оценить качество восстановленного изображения.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Восстановление размытых изображений может быть классифицировано двумя видами: слепая и не слепая деконволюция. Первый метод является более сложным, так как ядро размытия неизвестно. Всеобъемлющий обзор литературы можно найти в [4]. Как показано в [5], ядро полученное дрожанием фотокамеры является сложным, и выходящим за рамки простых форм (например, линии или гауссового пятна), предполагающихся в прежних подходах [6–9]. В работе [5], изображение реконструируется с использованием алгоритма стандартной неслепой деконволюции. Очень хорошие результаты получаются, когда ядро небольшое (например, 30×30 пикселов или меньше). Даже с известным ядром, восстановление с не слепой деконволюцией [10–12] не является полным. Артефакты реконструкции, например, эффект «звона» или цветные точки, неизбежны из-за высоких потерь частоты в размытом изображении. Шум изображения также усиливается в процессе деконволюции. Например, увеличение количества итераций в алгоритме Люси-Ричардсона (RL) [13] приведет к усилению артефакта «звон». Существенное снижение артефактов в не слепой деконволюции было сделано [14].

Пространственная оценка ядра была предложена в [15]. В [16], изображение сегментируется в несколько слоев с различными ядрами искажения. Ядро в каждом слое является однонаправленным, а скорость движения слоя постоянна.

Аппаратные решения, для уменьшения размытия изображения используют стабилизацию линзы и сенсора. Обе методики физически перемещают элементы объектива или датчика, чтобы создать противовес дрожанию камеры. Как правило, захваченное изображение будет резким, как если бы оно было сделано с меньшей выдержкой в 2–3 раза.

Шумоподавление изображения классическая, широко изученная проблема восстановления изображения. Подавление шума являет собой компромисс между удалением шума и сохранением краев и текстур объектов. Коммерческие программные продукты, например, «NeatImage» (www.neatimage.com) и «Imagenomic» (www.imagenomic.com), используют вейвлет преобразования [17, 18]. Также в компьютерной графике широко используется метод билатеральной фильтрации [19, 20]. Другие подходы включают анизотропную диффузию [21], PDE методы, основанные на [22], поля экспертов [23], и нелокальные методы [24].

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Значение каждого пиксела изображения обычно занимает 1 байт (число в диапазоне от 0 до 255) для каждого канала, так как такой точности более чем достаточно, чтобы человеческий глаз не заметил ошибки округления. Процесс дискретизации дает небольшую погрешность.

Операция восстановления изображения включает в себя прямое и обратное преобразования Фурье. Для вычисления каждого пиксела спектра Фурье задействуются значения каждого пиксела изображения, и в каждом есть погрешность. Восстановив потерянную при округлении часть, можно достичь существенного уменьшения погрешности при реконструкции изображения любым из способов фильтрации.

Алгоритм стандартной модели восстановления изображения в общем виде показан на рис. 1.

На вход подпрограммы алгоритма деконволюции поступает искаженное изображение, а на выходе получается приближенное к исходному. При увеличении точности значений входного изображения, повысится и точность выходного изображения. Предложенная доработка состоит в модифицированной модели восстановления изображения, которая представлена на рис. 2.

Выбор метода восстановления (уточнения) дробной части может быть любым. Алгоритм стоит подбирать исходя из конкретной задачи, балансируя между необходимым качеством восстановления и скоростью работы алгоритма. Так же стоит учитывать природу изображения и характера его искажения. Алгоритм восстановления также может быть совершенно любым.

Рисунок 1 – Блок-схема стандартной модели восстановления изображения

Рисунок 2 – Блок-схема модифицированной модели восстановления изображения

Было выдвинуто предположение, что несколько соседних пикселов реальной фотографии с большой вероятностью можно представить полиномиальной функцией. Это основывается на том, что в реальном мире не существует резких перепадов между материалами, цветами и пр. Плавность подобных переходов очень удобно описывать полиномиальной функцией.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для упрощения вычислений, функция зависимости соседних пикселов была задана полиномом первой степени (линейная функция), из-за ее простоты, наглядности и максимальной скорости работы. В бытовых фото расстояние между пикселами в реальном мире (расстояние между точками, которые стали пикселами при их фотографировании) мало, так что погрешность в представлении этих расстояний линейной функцией будет несущественна. Однако, увеличение степени полинома, которым интерполируется изображение, ведет к улучшению качества восстановления исходного сигнала.

В качестве алгоритма деконволюции взята инверсная фильтрация, как самый простой и очевидный.

ОБОБЩЕННЫЙ АЛГОРИТМ

Зная принцип работы округления, а также значения соседних пикселов к текущему, выполняется интерполяция их значений, в следствии чего получается новое значение текущего пиксела. Если число входит в диапазон округления (arr[i]+0,5; arr[i]–0,5], то пикселу присваивается его значение. Если же оно выходит за рамки округления – предполагается, что округление произошло из крайней точки диапазона округления и выполняется присваивание соответствующего значения новому пикселу. После чего процесс повторяется для следующего пиксела. Крайние пикселы изображения берутся без изменений.

Алгоритм выглядит следующим образом (рис. 3).

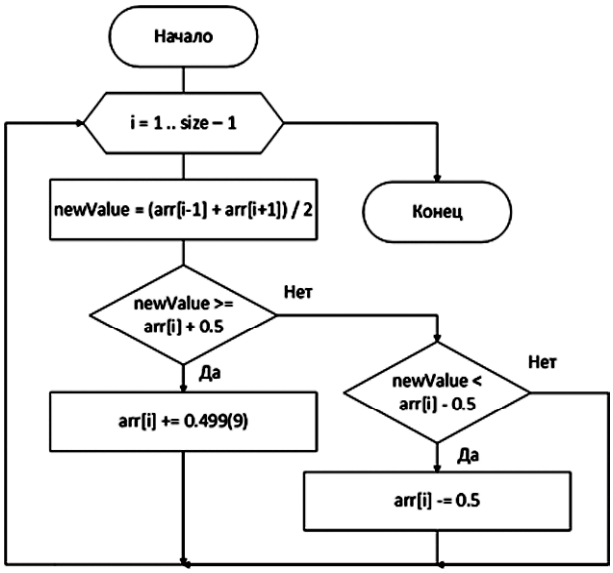


Рисунок 3 – Алгоритм восстановления дробной части сигнала

ПРИМЕР ДЛЯ ЛИНЕЙНОЙ ФУНКЦИИ

Пусть, имеется линейно распределенный массив чисел из десяти значений (табл. 1), каждое из которых равно его порядковому номеру, умноженному на константу, например, 1,481516.

Погрешность ряда с восстановленной дробной частью обычно почти в два раза ниже, погрешности округленного значения. В данном случае в 1,753318 раз. В самом худшем случае, когда коэффициент – целое число, погрешности будут одинаковыми. Для восстановления промежуточных значений по имеющемуся дискретному сигналу можно использовать полином любой степени или любой другой алгоритм. Для матрицы такие вычисления производятся отдельно для строк и для столбцов, а после формируется новая матрица, каждый элемент которой равен среднему арифметическому соответствующих элементов этих матриц.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Для восстановления изображения применялся метод инверсной фильтрации, но модификация подразумевает использование любого из методов. Перед использованием фильтрации находилась потерянная при дискретизации недостающая дробная часть по описанному выше методу, адаптированному для матрицы. На рис. 4 приведены результаты работы алгоритма.

Таблица 1 – Линейная интерполяция

Номер замера	Исходный ряд	Округленный ряд	Интерполированный ряд	Погрешность округленного ряда	Погрешность интерполированого ряда
1	0	0	0	0	0
2	1,481516	1	1,5	0,481516	0,018484
3	2,963032	3	2,75	0,036968	0,213032
4	4,444548	4	4,375	0,444548	0,069548
5	5,926064	6	5,6875	0,073936	0,238564
6	7,40758	7	7,34375	0,40758	0,06383
7	8,889096	9	8,671875	0,110904	0,217221
8	10,370612	10	10,3359375	0,370612	0,0346745
9	11,852128	12	11,66796875	0,147872	0,18415925
10	13,333644	13	13	0,333644	0,333644
			Сумма:	2,40758	1,37315675

а б в г

Рисунок 4 – Пример восстановления размытого изображения:
а – исходное изображение, б – размытое изображение, в – восстановленное без интерполяции, г –восстановленное с интерполяцией

В случае, когда изображение было восстановлено без интерполяции, среднеквадратическое отклонение цвета составило 0,03211, а среднеквадратическое отклонение переходов 0,03245. В случае, когда изображение было восстановлено с интерполяцией, среднеквадратическое отклонение цвета составило 0,02939 (на 8,48% меньше), а среднеквадратическое отклонение переходов 0,02742 (на 15,52% меньше).

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Изменение среднеквадратических отклонений в меньшую сторону, которое можно наблюдать в результате приведенных выше экпериментов, подтверждает, что качество восстановленных снимков улучшается. Среднеквадратическое отклонение цвета и отклонение резкости переходов изображения, восстановленного по модифицированному методу всегда ниже на 3–20%, чем у изображения восстановленного стандартной фильтрацией (в примере инверсной), что является хорошим результатом.

На графиках, изображенных на рис. 5 и рис. 6 заметна тенденция уменьшения среднеквадратичных отклонений цвета и резкости переходов в зависимости от размера изображения.

Как показано на рис. 7 с ростом размера изображения наблюдается увеличение улучшения восстановления. С размером 85x115 модифицированная модель в общем работает лучше на 5% процентов, а с 850x1150 на 12%.

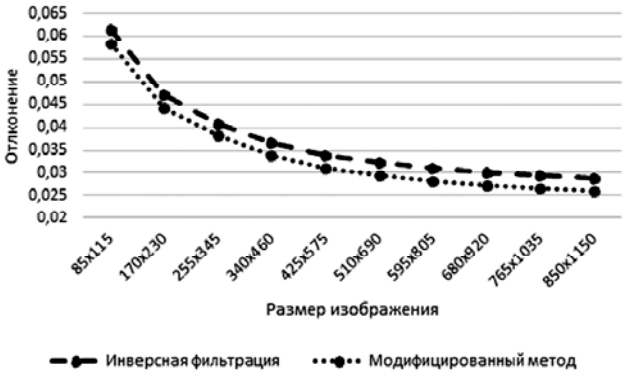


Рисунок 5 – Среднеквадратичное отклонение цвета

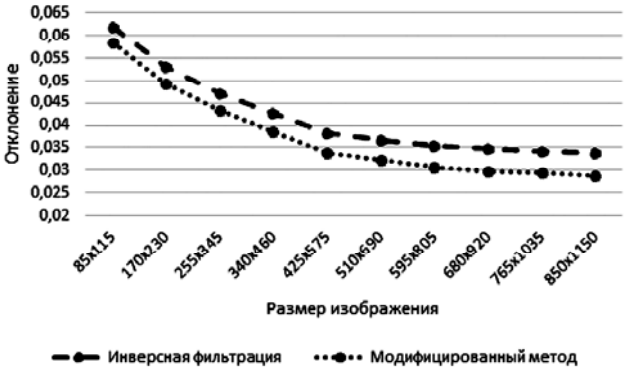


Рисунок 6 – Среднеквадратичное отклонение резкости переходов

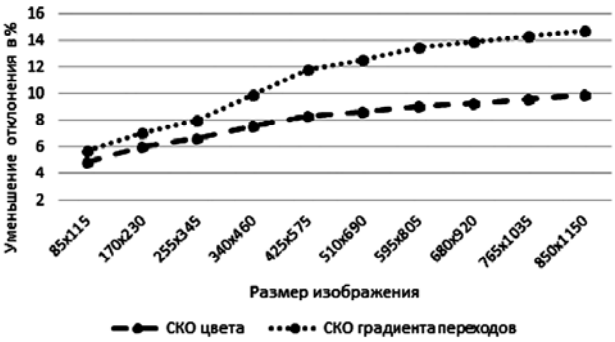


Рисунок 7 – Уменьшение ошибки восстановления в процентах

Таким образом, можно заключить, что чем больше размеры изображения, тем ниже погрешность восстановления и тем сильнее улучшение.

ВЫВОДЫ

В работе получило дальнейшее развитие направление восстановления размытых изображений путем применения операции деконволюции. Была разработана модификация, применимая к методам, как к слепой, так и не слепой деконволюции, для которой экспериментально показано, что она приводит к более точному восстановлению значений пикселов исходного изображения. Модификация заключается в предварительном восстановлении данных изображения, потерянных из-за округления с помощью получения уточненных значений пикселов применяя интерполяцию полиномиальной функцией. Модификацию можно использовать в сочетании с любым из алгоритмов восстановления изображения, независимо от других модификаций (например, убирания атрибутов типа «звон»). Предложенный метод дает увеличение качества восстановления, даже на примере восстановления потерянной части с использованием линейной модели интерполяции значений пикселов исходного изображения. Алгоритм восстановления потерянной при округлении части необходимо строить исходя из природы изображения, необходимой точности и допустимой скорости работы этого алгоритма, поэтому в отдельных случаях применимы полиномиальные модели интерполяции более высоких порядков. Среднеквадратическое отклонение цвета и отклонение резкости переходов изображения, восстановленного по модифицированному методу становится ниже на 3–20%, чем у изображения восстановленного стандартной фильтрацией. Скачать программу с исходные коды можно по адресу: https://github.com/Kovnir/DeblurModification.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М. : Техносфера, 2005. – 1072 с.
2. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений в MATLAB / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эд-динс. – М. : Техносфера, 2006. – 616 с.
3. Монич Ю. И. Оценки качества для анализа цифровых изображений / Ю. И. Монич, В. В. Старовойтов // Искусственній интеллект. – 2008. – № 4. – С. 376–386.
4. Kundur D. Blind image deconvolution / D. Kundur, D. Hatzinakos // IEEE Signal Processing Magazine. – 1996. – Vol. 13, № 3. – P. 43–64.

5. Removing camera shake from a single photograph / [R. Fergus, B. Singh, A. Hertzmann and other] // In ACM Trans. Graph. – 2006. – Vol. 25. – P. 787–794.
6. Reeves S. J. Blur identification by the method of generalized cross-validation / S. J. Reeves, R. M. Mersereau // IEEE Trans. on Image Processing. – 1992. – Vol. 1, № 3. – P. 301–311.
7. Direct method for restoration of motion blurred images / [Y. Yitzhaky, I. Mor, A. Lantzman, N. S. Kopeika] // Journal of the Optical Society of America. – 1998. – Vol. 15, Issue 6. – P. 1512–1519.
8. Caron J. N. Noniterative blind data restoration by use of an extracted filter function / J. N. Caron, N. M. Namazi, C. J. Rollins // Applied optics (Appl. opt.). – 2002. – Vol. 41 (32) – P. 68–84.
9. Jalobeanu A. Estimation of blur and noise parameters in remote sensing / A. Jalobeanu, L. Blanc-Feraud, J. Zerubia // In Proceedings of ICASSP. – 2002. – P. 249–256.
10. Geman, D. Constrained restoration and the recovery of discontinuities / D. Geman, G. Reynolds // IEEE Trans. on PAMI. – 1992. – Vol. 14, Issue 3. – P. 367–383.
11. Zarowin C. B. Robust, noniterative, and computationally efficient modification of vab cittert deconvolution optical figuring / C. B. Zarowin // Journal of the Optical Society of America. – 1994. – Vol. 11, Issue 10. – P. 2571–2583.
12. Neelamani R. ForWaRd: Fourier-wavelet regularized deconvolution for illconditioned systems. / R. Neelamani, H. Choi, R. Baraniuk // IEEE Trans. on Signal Processing. – 2004. – Vol. 52, Issue 2. – P. 418–433.
13. Richardson H. W. Bayesian-based iterative method of image restoration / H. W. Richardson // Journal of the Optical Society of America. – 1972. – Vol. 62, Issue 1. – P. 55–59.
14. Lu Yuan. Image deblurring with blurred/noisy image pairs / Lu Yuan, Jian Sun, Long Quan, Heung-Yeung Shum // ACM Transactions on Graphics (TOG) – Proceedings of ACM SIGGRAPH 2007. – 2007. – Vol. 26, Issue 3. – Article 1.
15. Blind iterative restoration of images with spatially-varying blur / [J. Bardsley, S. Jefferies, J. Nagy, R. Plemmons] // In Optics Express. – 2006. – P. 1767–1782.
16. Levin A. Blind motion deblurring using image statistics / A. Levin // In Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS). – 2007. – P. 841–848.
17. Simoncelli E. P. Noise removal via bayesian wavelet coring / E. P. Simoncelli, E. H. Adelson // In Proceedings of ICIP. – 1996. – Vol. 1. – P. 379–382.
18. Image denoising using scale mixtures of gaussians in the wavelet domain / [J. Portilla, V. Strela, M. Wainwright, E. P. Simoncelli] / / IEEE Trans. on Image Processing. – 2003. – Vol. 12, Issue 11. – P. 1338–1351.
19. Tomasi C. Bilateral filtering for gray and color images / C. Tomasi, R. Manduchi // In Proceedings of ICCV. – 1998. – P. 839–846.
20. Durand F. Fast bilateral filtering for the display of high-dynamic-range images / F. Durand, J. Dorsey // In Proceedings of SIGGRAPH. – 2002. – P. 257–266.
21. Perona P. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion. / P. Perona, J. Malik // IEEE Trans. on PAMI. – 1990. – Vol. 12, Issue 7. – P. 629–639.
22. Rudin L. Nonlinear total variation based noise removal algorithms / L. Rudin, S. Osher, E. Fatemi // Physica D: Nonlinear Phenomena. – 1992. – Vol. 60, Issues 1–4. – P. 259–268.
23. Roth S. Fields of experts: A framework for learning image priors / S. Roth, M. J. Black // In Proceedings of CVPR. – 2005. – Vol. II. – P. 860–867.
24. Buades A. A non-local algorithm for image denoising / A. Buades, B. Coll, J. M. Morel // In Proceedings of CVPR. – 2005. – Vol. II. – P. 60–65.

Статья поступила в редакцию 19.01.2016.
После доработки 21.03.2016.

Ковнір А. Е.[1], Степаненко К. Е.[2], Ільяшенко М. Б.[3]
[1]Студент кафедри комп'ютерних систем та мереж Запорізького національного технічного університету, м. Запоріжжя, Україна
[2]Студент кафедри комп'ютерної інженерії Донецького національного технічного університету, м. Кросноармейськ, Україна
[3]Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж Запорізького національного технічного університету, м. Запоріжжя, Україна

ЗБІЛЬШЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ВІДНОВЛЕННЯ РОЗФОКУСОВАНИХ ЗОБРАЖЕГЬ ЗА РАХУНОК ВІПРАВЛЕННЯ ПОМИЛОК ОКРУГЛЕННЯ

У роботі представлений метод підвищення якості відновлення розфокусованих зображень за рахунок зменшення впливу помилки округлення при дискретизації на відновлене зображення. З помилкою округлення можна ефективно боротися, знаючи природу відновлюваного зображення і його спотворення. Алгоритм відновлення втраченої при округленні частини необхідно будувати виходячи з природи зображення, необхідної точності і допустимої швидкості роботи цього алгоритму. У роботі наводиться приклад використання лінійної інтерполяції на етапі попередньої обробки похідного зображення в якості основи для побудови уточнених значень пікселів відновленого зображення по дискретним значенням пікселів вихідного розфокусованого зображення. Запропонований метод не прив'язаний до конкретного алгоритму деконволюції, а його використання в парі з будь-яким з них дає поліпшення результату. У роботі розглянуто його використання разом з інверсною фільтрацією.

У роботі представлений приклад практичного відновлення зображення на основі лінійної інтерполяції пікселів вихідного зображення. Показано, що запропонований метод дає зменшення похибки відновлення в середньому від 3% до 20%, залежно від розміру та специфіки зображення. Показано зменшення помилки відновлення зі зростанням розмірів вихідного расфокусированного зображення.

Ключові слова: реконструкція зображень, розфокусировка зображення, перетворення Фур'є, згортка, оператор спотворення, деконволюція.

Kovnir A. E.[1], Stepanenko K. E.[2], Ilyahsneko M. B.[3]
[1]Student of Computer systems and networks department, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine
[2]Student of Computer engineering department, Donetsk National Technical University, Krasnoarmiysk, Ukraine
[3]PhD, Associate Professor, Associate Professor of computer systems and networks department, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

DEFOCUSED IMAGE RESTORATION CONFIDENCE INCREASING BY IMPROVING ROUNDING ERRORS CORRECTIONS

This paper presents a method of improving the quality of the restoration of defocused images by reducing the effect of rounding errors when sampling on the reconstructed image. The rounding error can be effectively controlled by knowing the nature of the restored image and its distortions. Algorithm that restore lost during rounding values of pixels need to be built based on knowledge of the nature of the image, the required accuracy and the permissible speed of the algorithm. The work contains an example of linear interpolation usage at the source image preprocessing stage as the basis for the construction of refined pixel values of the reconstructed image from the discrete values of the pixels

of the original defocused image. The proposed method is not tied to a specific deconvolution algorithm and its use in a pair with any of them gives better results. The paper considers the joint use of presented method with the inverse filter.

This paper presents a practical example of image reconstruction based on a linear interpolation of the pixels of the original image. It is shown that the proposed method affects a reduction of error recovery from about 3% to 20%, depending on the size and specific images. It showed a decrease in the error recovery with increasing the size of the original image defocused.

Keywords: image reconstruction, defocusing, Fourier transform, distortion operator, deconvolution.

REFERENCES

1. Gonsales R., Vuds R. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy. Moscow, Tehnosfera, 2005, 1072 p.
2. Gonsales R., Vuds R., Eddins S. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy v MATLAB. Moscow, Tehnosfera, 2006, 616 p.
3. Monich Yu. I., Starovoytov V. V. Otsenki kachestva dlya analiza tsifrovyih izobrazheniy, *Iskusstvennly intellekt*, 2008, No. 4, pp. 376–386.
4. Kundur D., Hatzinakos D. Blind image deconvolution, *IEEE Signal Processing Magazine*, 1996, Vol. 13, No. 3, pp. 43–64.
5. Fergus R., Singh B., Hertzmann A., Roweis S. T., Freeman W. T. Removing camera shake from a single photograph, *In ACM Trans. Graph,* 2006, Vol. 25, pp. 787–794.
6. Reeves S. J., Mersereau R. M. Blur identification by the method of generalized cross-validation, *IEEE Trans. on Image Processing*, 1992, Vol. 1, No. 3, pp. 301–311.
7. Yitzhaky Y., Mor I., Lantzman A., Kopeika N. S. Direct method for restoration of motion blurred images, *Journal of the Optical Society of America*, 1998, Vol. 15, Issue 6, pp. 1512–1519.
8. Caron J. N., Namazi N. M., Rollins C. J. Noniterative blind data restoration by use of an extracted filter function, *Applied optics (Appl. opt.)*, 2002, Vol. 41(32), pp. 68–84.
9. Jalobeanu A., Blanc-Feraud L., Zerubia J. Estimation of blur and noise parameters in remote sensing, *In Proceedings of ICASSP*, 2002, pp. 249–256.
10. Geman D., Reynolds G. Constrained restoration and the recovery of discontinuities, *IEEE Trans. on PAMI*, 1992, Vol. 14, Issue 3, pp. 367–383.
11. Zarowin C. B. Robust, noniterative, and computationally efficient modification of vab cittert deconvolution optical figuring, *Journal of the Optical Society of America*, 1994, Vol. 11, Issue 10, pp. 2571–2583.
12. Neelamani R., Choi H., Baraniuk R. ForWaRd: Fourier-wavelet regularized deconvolution for illconditioned systems, *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2004, Vol. 52, Issue 2, pp. 418–433.
13. Richardson H. W. Bayesian-based iterative method of image restoration, *Journal of the Optical Society of America*, 1972, Vol. 62, Issue 1, pp. 55–59.
14. Lu Yuan, Jian Sun, Long Quan, Heung-Yeung Shum Image deblurring with blurred/noisy image pairs, *ACM Transactions on Graphics (TOG) – Proceedings of ACM SIGGRAPH 2007*, 2007, Vol. 26, Issue 3, Article 1.
15. Bardsley J., Jefferies S., Nagy J., Plemmons R. Blind iterative restoration of images with spatially-varying blur, *In Optics Express*, 2006, pp. 1767–1782.
16. Levin A. Blind motion deblurring using image statistics, *In Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS)*, 2007, pp. 841–848
17. Simoncelli E. P., Adelson E. H. Noise removal via bayesian wavelet coring, *In Proceedings of ICIP*, 1996, Vol. 1, pp. 379–382.
18. Portilla J., Strela V., Wainwright M., Simoncelli E. P. Image denoising using scale mixtures of gaussians in the wavelet domain, *IEEE Trans. on Image Processing*, 2003, Vol. 12, Issue 11, pp. 1338–1351.
19. Tomasi C., Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images, *In Proceedings of ICCV*, 1998, pp. 839–846.
20. Durand F., Dorsey J. Fast bilateral filtering for the display of high-dynamic-range images, *In Proceedings of SIGGRAPH*, 2002, pp. 257–266.
21. Perona P., Malik J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion, *IEEE Trans. on PAMI*, 1990. Vol. 12, Issue 7, pp. 629–639.
22. Rudin L., Osher S., Fatemi E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms, *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1992, Vol. 60, Issues 1–4, pp. 259–268.
23. Roth S., Black M. J. Fields of experts: A framework for learning image priors, *In Proceedings of CVPR*, 2005, Vol. II, pp. 860–867.
24. Buades A., Coll B., Morel J. M. A non-local algorithm for image denoising, *In Proceedings of CVPR*, 2005, Vol. II, pp. 60–65.

УДК 004.89

Литвин В. В.[1], Демчук А. Б.[2], Оборська О. В.[3]

[1]Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри «Інформаційні системи та мережі» Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна
[2]Канд. техн. наук, асистент кафедри «Інформаційні системи та мережі» Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна
[3]Аспірант кафедри «Інформаційні системи та мережі» Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна

МАТЕМАТИЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОДАННЯ ВІДЕОКОНТЕНТУ ДЛЯ ОСІБ З ВАДАМИ ЗОРУ

У статті досліджено проблему доступу до відеоконтенту людей з повною, або частковою втратою зору, розглянуто тифлокоментування, як метод адаптації відеоконтенту для незрячих. При дослідженні проблеми доступу людей з вадами зору до відеоконтенту, слід розуміти, що більшість інформації надається глядачеві за допомогою зображення, так, незрячі чують всі слова акторів, звуки навколишнього середовища, процесів на екрані, але їм важко ідентифікувати кому які слова належать, що саме у цей конкретний момент відбувається з героями, що зображено у даній сцені, яка реакція акторів, їхні емоції, які найчастіше виражаються за допомогою рухів чи міміки. Тифлокоментарі до фільмів для незрячих людей – ось один з реальних кроків вирішення обмеженості доступу до такого виду контенту. Розроблено математичне забезпечення подання відеоконтенту для осіб з вадами зору на основі використання теорії координації, спектрального аналізу. Також побудовано архітектуру програмно-алгоритмічного комплексу адаптації відеоконтенту для осіб з вадами зору. Реалізовано метод пошуку вільних від діалогів та інших важливих звуків місць у відеоконтенті, які слугують для вставки тифлокоментарів. На основі логіки 1-го порядку та асоціативних правил розроблено правила тифлокоментування для тифлокоментаторів, сценаристів та звукорежисерів. Розв'язано актуальну науково-прикладну задачу подання відеоконтенту у форматі, доступному для сприйняття особам з вадами зору. Експериментально доведено доцільність застосування методу тифлокоментування для опису сюжетів відеоконтенту, що дало змогу до 30% підвищити сприйняття відеоконтенту особам з вадами зору.

Ключові слова: програмно-алгоритмічний комплекс, тифлокоментування, тифлокоментар, аудіодескрипція, подання відеоконтенту для осіб з вадами зору, відеоконтент, вада зору, адаптований відеоконтент.

НОМЕНКЛАТУРА

ПАК – програмно-алгоритмічний комплекс;
НЧ – низькочастотні фільтри;
ВЧ – високочастотні фільтри;
S_i – i-й сюжет;
$Sem(S_i)$ – семантика i-го сюжету;
$t(S_i)$ – тривалість i-го сюжету;
Gm – середнє геометричне спектру відповідної ділянки;
Am – середнє арифметичне спектру відповідної ділянки;
n – кількість частотних смуг;
x_i – значення енергії відповідної частотної смуги;
x – значення кожної частотної смуги відповідно для спектрів ділянки та еталону;
y – значення кожної частотної смуги відповідно для спектрів ділянки та еталону.

ВСТУП

Одним із здобутків людства, який майже незрозумілий для осіб з вадами зору – це відеоконтент (фільми, мультиплікація, науково-популярні, навчальні та пізнавальні програми). У час, коли кіноіндустрія володіє технічними можливостями, яких достатньо для втілення будь-якого художнього задуму – перед людьми відкривається величезний світ можливостей сучасного кіномистецтва. Однак всі ці можливості недоступні для осіб з вадами зору. Тому виникає проблема адаптації відеоконтенту для такого контингенту людей. Одним із підходів до вирішення цієї проблеми є використання тифлокоментарів.

На даний момент масові кінотеатри та телебачення майже недоступні особам з обмеженим зором. Поруч такої особи завжди мусів би бути домашній «коментатор», який б «озвучував» те, що відбувається на екрані. Тобто особи з вадами зору не мають достатніх можливостей для забезпечення себе інформаційними ресурсами, зокрема, поданих у відеоформаті.

Відомо, що близько 80% інформації надається глядачеві за допомогою зображення. Тотально незряча особа може отримати лише близько 16% інформації, яка надходить через слуховий орган. Так, незрячі чують всі слова акторів, звуки навколишнього середовища, процесів на екрані, але їм важко ідентифікувати кому які слова належать, що відбувається на екрані, яка реакція акторів, яку часто виражають за допомогою рухів чи міміки.

Тифлокоментар до відеоконтенту для незрячих людей – ось один з реальних кроків вирішення обмеженості доступу до такого виду мистецтва. Він відкриває великий простір для адаптації до соціуму не лише дорослих незрячих людей, а в першу чергу дітей, які мають проблеми із зором, і які могли б переглядати мультфільми, вчитися лічити, вивчати абетку за допомогою відеоконтенту з тифлокоментарем. Тифлокоментар – це закадровий опис відеоряду, складений сценаристом і начитаний тифлокоментатором. Тифлокоментування – це коментар візуальних елементів (жестів, зовнішнього вигляду акторів, предметів, костюмів, декорацій). Таким чином, за допомогою тифлокоментування, особи з вадами зору можуть уявити собі весь спектр візуальних прийомів, які використовував режисер та сценарист відеоконтенту. Виникає задача в розробленні математичного та програмного забезпечення адаптації відеоконтенту до потреб осіб з вадами зору на основі тифлокоментування [2].

Об'єктом дослідження є процес подання відеоконтенту для осіб з вадами зору.

© Литвин В. В., Демчук А. Б., Оборська О. В., 2016
DOI 10.15588/1607-3274-2016-3-9

Предметом дослідження є методи та засоби побудови, редагування та адаптації відеоконтенту для осіб з вадами зору.

Метою роботи є розроблення математичного та програмного забезпечення адаптації відеоконтенту для осіб з вадами зору.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Задача дослідження полягає в розробленні ПАК адаптації відеоконтенту для осіб з вадами зору. Для її досягнення необхідно розв'язати такі задачі:

1) розробити математичне забезпечення подання відеоконтенту для осіб з вадами зору на основі процесу тифлокоментування;

2) розробити правила тифлокоментування;

3) побудувати архітектуру програмно-алгоритмічного комплексу адаптації відеоконтенту для осіб з вадами зору;

4) здійснити апробацію функціонування розробленого програмно-алгоритмічного комплексу адаптації відеоконтенту для осіб з вадами зору на практиці.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Дослідження відомих іноземних вчених на початку XXI ст. показали важливість процесу навчання та адаптації в суспільство дітей з вадами зору [1, 3]. У відомих дослідженнях, пошук місць для вставки тифлокоментарів завжди виконувався за допомогою людини. Тому необхідно розробити методи та програмні засоби адаптації відеоконтенту для осіб з вадами зору, які б здійснювали пошук вільних від діалогів та важливих шумів місць у звукоряді відеоконтенту. Також у роботах [2, 6–8] – досліджено проблему доступу осіб з вадами зору до відеоконтенту, визначено метод тифлокоментування як оптимальний для вирішення цієї задачі. У працях [4, 5] розглянуто внесок у розвиток освіти осіб з вадами зору Луї Брайля, тактильним шрифтом яким користуються й досі. В основу шрифту покладено комбінацію зі шести крапок. Брайль використав порядок букв латинського алфавіту. Для позначення перших букв алфавіту використовують верхні й середні крапки шести крапок. Для позначення наступних букв додається нижня крапка ліворуч, потім ліворуч і праворуч, потім праворуч. Такими самими знаками позначаються і букви українського алфавіту з додаванням спеціальних знаків. Різні комбінації шести крапок дають можливість позначати також цифри, розділові знаки, математичні, хімічні й нотні знаки.

Російський вчений Сергій Ваньшин [3] вперше на теренах колишнього Радянського Союзу описав проблему осіб з вадами зору у доступі до культурних надбань людства засобами відеоконтенту, який адаптований для такого контингенту осіб, систематизував вимоги до майбутніх тифлокоментаторів, критерії відбору людей до таких професій. Він також описав перші результати навчання мистецтву тифлокоментування осіб з вадами опорно-рухового апарату. Його ранні праці були тісно пов'язані з бібліотечним обслуговуванням осіб з вадами зору, пошуком можливостей для якіснішого і повнішого обслуговування цієї категорії читачів.

Крогіус А. А., Щербина А. М. та інші автори [9] розвивали ідеалістичну концепцію переважного розвитку психіки в разі сліпоти, стверджуючи, що нестача функції зору сприяє розвитку і багатству «внутрішнього» життя. Будучи відгородженим від зовнішнього світу, сліпий, на їхню думку, створює за допомогою мислення та уяви свій «внутрішній світ», а це сприяє розвитку «вищих» психічних процесів. Уяву осіб з вадами зору зазначені автори характеризують як більш живу, ніж у зрячих, їм приписують високий розвиток творчо-музичної та математичної уяви тощо.

Сьогодні питанням навчання осіб з вадами зору (дошкільнят, школярів, студентів, осіб, що бажають підвищити кваліфікацію) займаються багато вчених, дослідників, фахівців з медицини у провідних країнах світу, а держава забезпечує їх матеріальною підтримкою. В Україні ці питання залишаються проблематичними і наболілими. Частково ці питання розглянули кількаукраїнських дослідників. Вирішення проблеми доступності інформації та підготовки навчально-методичного контенту допоможе самореалізуватися людям з частковою та повною втратою зору.

На основі проведеного аналізу встановлено, що для створення відеоконтенту з тифлокоментарем в Україні не існує жодних програмних засобів, які б поєднували всі етапи побудови такого роду інформаційного контенту. Тому робота з дроблення ПАК для вирішення таких проблем є актуальною.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Очевидно, що тифлокоментар у відеоконтент можна вставити у місця вільні від діалогів або іншої шумної інформації. Для пошуку у відеоконтенті ділянок вільних від діалогів використано спектральний аналіз. Процес пошуку таких ділянок використовує 6 параметрів:

Поріг енергії сигналу, *K*, % – це поріг енергії сигналу, при перевищені сигналом якого розпочинає свою роботу алгоритм пошуку. Цей параметр необхідний для того, щоб не пропускати шуми, зайві звуки, які тихіше за поріг, а також для прискорення роботи алгоритму, так як для ділянок які нижче порогу не виконується спектральний аналіз. Цей параметр бажано виставляти на рівні 15–40%. Рівень щільності спектру, % – це поріг щільності спектру, перевищуючи який програма переходить до наступного аналізу. Як виявив практичний аналіз, цей показник залежить від типу звукового сигналу. Для широко смугових сигналів, з рівномірним спектром (як наприклад для шуму, чи насиченого музичного фрагменту) цей показник низький, для голосового сигналу де розподілення частотних смуг нерівномірне – цей параметр вищий. Тобто цей параметр показує наявність явно виражених певних частотних смуг у спектрі по відношенню до інших. На практиці цей параметр бажано виставляти на рівні 40–60%. При встановлені на 0% програма пропускає цей аналіз, тобто вважає що весь звуковий сигнал задовольняє вимоги.

Коефіцієнт кореляції спектру, % – це поріг кореляції спектру у кожній ділянці звукового сигналу до заданого еталонного спектру. При перевищені кореляції порогу програма вважає сигнал таким, що відповідає голосовому. На практиці бажано виставляти на рівні 40–70%.

Фінальний поріг пошуку, % – це поріг на результуючому графіку роботи алгоритму. Коли сигнал нижче цьо-

го порогу, програма вважає відповідну ділянку тишею та заносить її до списку. Значення за замовчуванням – 50%.

Мінімальна довжина тиші, мс – це такий час, з яким порівнюється довжина знайденої ділянки тиші. Якщо тривалість ділянки тиші менша за цей параметр, то вона видаляється зі списку ділянок тиші.

Мінімальна довжина корисного сигналу, мс – це такий час, з яким порівнюється інтервал між сусідніми ділянками тиші. Якщо цей інтервал менший за вказане значення, то ці дві ділянки тиші об'єднуються в одну, таким чином інтервал між ними також стає в складі ділянки тиші. Це необхідно для того, щоб виключити раптові короткі скачки сигналу. Цей параметр бажано встановлювати на рівні 50–200 мс. Якщо програма вважає тишею дуже короткі слова, то потрібно цей параметр зменшити. Якщо є багато дуже коротких ділянок «корисного» сигналу між ділянками тиші, які насправді не мають корисної інформації, а лише якісь клацання, чи хлопки, то потрібно цей параметр трохи збільшити.

Архітектура ПАК адаптації відеоконтенту до осіб з вадами зору складається з трьох рівнів – відображення, компонентів та керування даними (рис. 1). Рівень відображення відповідає за взаємодію тифлокоментатора з ПАК. Рівень компонентів складається із модулів, які призначені для розв'язання задач введення, виведення та опрацювання даних. ПАК у сукупності з базами даних відеоконтентів належать до рівня керування даними.

Розроблено алгоритм пошуку у аудіоряді ділянок, які можуть бути використані для накладання тифлокоментарів. Блок-схема алгоритму наведена на рис. 2.

Звукова доріжка попередньо розбивається на відрізки довжиною 10 мс. В оперативній пам'яті комп'ютера створюється масив відповідного розміру до кількості відрізків по 10 мс. Для кожної ділянки довжиною 10 мс розраховується спектр завдяки перетворюванню WaveLet. Для аналізу ПАК бере 1024 семпли звукових даних та рекурсивним методом WaveLet розподіляє на 10 частин довжинами 1,2,4,8,16,32,64,128,256 та 512 семплів. Кожна частина відповідає своїй смузі частот. Після чого для кожної частини розраховується енергія. Таким чином отримуємо 10 значень рівня відповідно до частотних смуг для кожної ділянки звуку.

Далі сканується кожна ділянка звукової доріжки за наступними чотирма етапами:

Етап 1. Фільтрація ділянки звуку за допомогою НЧ та ВЧ фільтрів, пропускаючи діапазон частот від 50 до 300 Гц. Розрахунок енергії отриманого сигналу та порівняння її рівня з прохідним порогом. Таким чином виконується відсіювання явно зайвої інформації, шумів, тощо. Якщо ділянка пройшла перевірку, і значення енергії вище за поріг, то відповідному елементу масиву присвоюється значення 255, якщо ні – то присвоюється значення 0.

Етап 2. Для кожної ділянки звукової доріжки, якщо відповідний їй елемент масиву дорівнює 255, виконується перевірка на щільність спектру. Щільність спектру розраховується за формулою $SMFdb = -\log 10(Gm / Am)$.

Середнє арифметичне розраховується за формулою $\overline{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$, а середнє геометричне за формулою:

$$G(x_1, x_2, \ldots x_n) = \sqrt[n]{x_1 x_2 \ldots x_n} = \left(\prod_{i-1}^{n} x_i\right)^{1/n}.$$

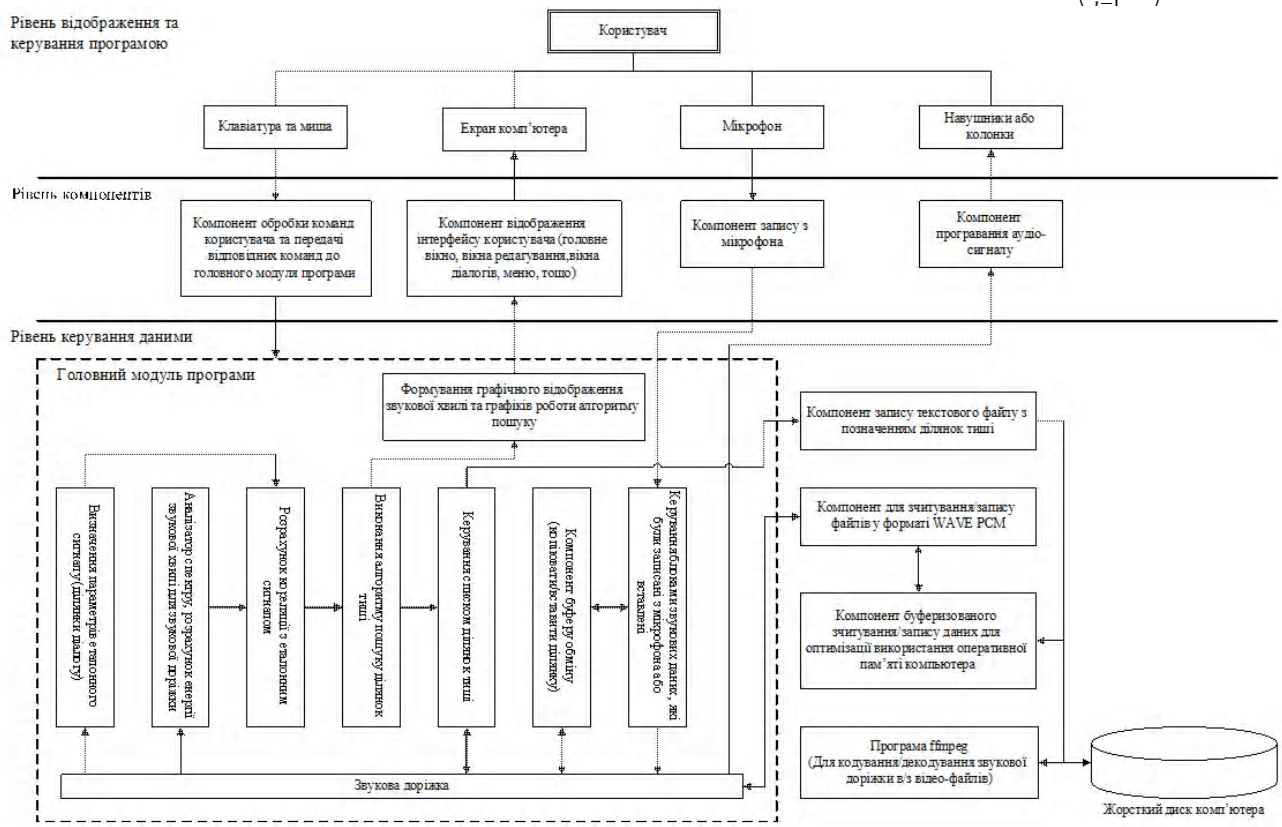


Рисунок 1 – Архітектура програмного комплексу адаптації відеоконтенту для осіб з вадами зору

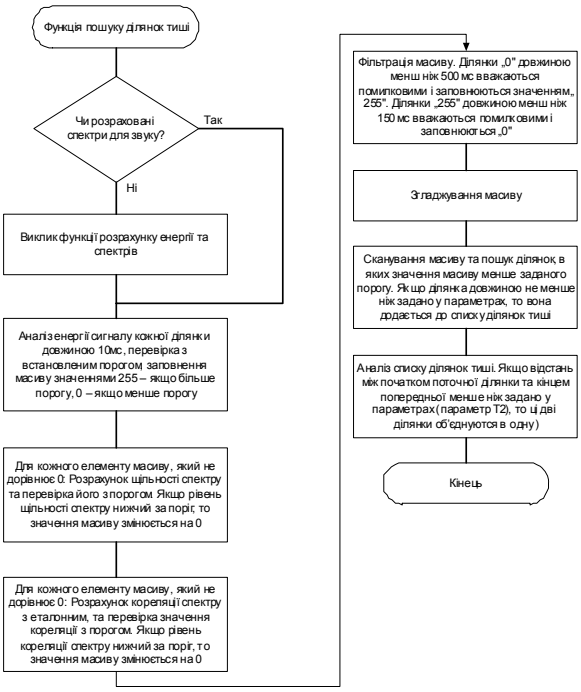


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритму пошуку ділянок доступних для накладання тифлокоментарів

Якщо для конкретної ділянки значення щільності спектру вище за встановлений поріг, то в масиві відповідний елемент залишається рівним 255, а якщо щільність спектру не задовільняє вимогу, то значення масиву для цієї ділянки прирівнюється до 0.

Етап 3. Для кожної ділянки звукової доріжки, якщо відповідний їй елемент масиву дорівнює 255, виконується перевірка на кореляцію її спектру з еталонним спектром (заданим по замовченню в ПАК, або знятим користувачем з обраної ділянки звукової доріжки). Розрахунок кореляції виконується за наступною формулою:

$$r_{XY} = \frac{\mathrm{cov}_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{\sum\left(X-\bar{X}\right)\left(Y-\bar{Y}\right)}{\sqrt{\sum\left(X-\bar{X}\right)^2 \sum\left(Y-\bar{Y}\right)^2}}.$$

Порівнюється розрахований коефіцієнт кореляції з встановленим порогом. Якщо перевірка відповідає встановленому значенню, то в масиві залишається значення 255, якщо ні – то відповідне значення масиву стає рівним 0.

Таким чином в результаті проходження трьох етапів маємо масив, в якому кожний елемент дорівнює 0 або 255. 0 – якщо не пройшла хоча б одна перевірка, 255 – якщо дана ділянка відповідає всім трьом вимогам. На цьому можна було б завершити перевірку та розпочати пошук ділянок в масиві (елементи масиву, які дорівнюють 0). Але в результаті проходження трьох етапів можуть пройти перевірку короткі сигнали, які мали спектр схожий до заданого, або навпаки, коротка пауза між словами актора може не пройти перевірку. Наприклад, за енергією сигналу і в масиві для цієї ділянки буде значення 0. Тому, щоб вирішити цю проблему був доданий четвертий етап перевірки.

Етап 4. Для видалення раптових значень 0 або 255 виконується згладжування масиву. Спочатку виконується пошук ділянок масиву з значеннями «0», довжина яких не перевищує 500 мс. Такі ділянки вважаються помилковими, значення масиву в них змінюється на 255. Потім виконується пошук ділянок масиву з значеннями «255», довжина яких не перевищує 150 мс. Такі ділянки вважаються помилковими, та значення масиву в них змінюється на 0. Виконується згладжування у прямому напрямку, потім виконується згладжування у зворотному напрямку. Таким чином при згладжуванні короткий сигнал (значення 255) дає значно менше значення для цього елементу масиву, але створює залишковий шум завдяки фільтру низької частоти. При зворотному напрямку значення елементу масиву для цій ділянки також значно нижче за 255, і також присутній залишковий шум, але він має протилежний напрямок. Таким чином при розрахунку кореляції між цими двома згладженими масивами, отримується наступний ефект: короткі сигнали практично видаляються завдяки тому, що їхні залишкові шуми після НЧ-фільтрів не перекривались, а для корисного сигналу навпаки – згладжені в прямому і протилежному напрямку значення перекриваються і тому залишаються в масиві (навіть якщо за рівнем енергії корисний сигнал був менший за короткий паразитивний сигнал). І на закінчення, кореляція між згладженими масивами порівнюється з порогом прийняття рішення, і якщо він не відповідає встановленому параметру, то цей елемент масиву дорівнює 0.

Нами розроблено правила тифлокоментування. З цією метою було проведено опитування 100 осіб усіх вікових груп з вадами зору. Після перегляду адаптованого фільму з тифлокоментарями, їм було задано 10 питань.

1. Чи запам'ятали Ви назву відеоконтенту?
2. Чи пригадаєте назву студії яка зняла даний відеоконтент?
3. Чи запам'ятали ви головних героїв відеоконтенту?
4. Чи зрозуміли ви сам сюжет, його розвиток протягом відеоконтенту, розв'язку?
5. Чи не було моментів у відеоконтенті коли Ви втратили зрозумілість того що відбувається на екрані(незрозумілі звуки які не були описані тифлокоментарем)?
6. Чи не було моментів коли слова тифлокоментатора накладались на слова акторів, важливі звуки, і тим самим заважали сприйняттю відеоконтенту?
7. Чи зрозуміли ви побут(місцевість, предмети) героїв, які були важливі для сприйняття відеоконтенту?
8. Чи не був тифлокоментар заплутаний, незрозумілий? Чи були терміни які ви не зрозуміли?
9. Чи не був тифлокоментар надмірним/недостатнім?
10. Чи задоволені ви переглядом даного відеоконтенту з тифлокоментарями?

Для опрацювання результатів проведеного опитування, використано теорію асоціативних правил. Наприклад, було обчислено достовірність правила {ЯКЩО Ви зрозуміли сюжет, ТО чи Ви задоволені переглядом відеоконтенту з тифлокоментарем?}. Достовірність такого правила складає 95%:

$$\mathrm{conf}=\frac{95\%}{100\%}\cdot 100\% = 95\%.$$

Метою пошуку асоціативних правил є встановлення таких залежностей: якщо зустрівся деякий набір елементів *P*, то на підставі цього можна зробити висновок про те, що інший набір елементів *Q* також повинен зустрітися з певною достовірні-

стю $\forall x P(x) \to Q(x)$). На основі отриманих даних розроблено правила тифлокоментування.

Розроблений програмно-алгоритмічний комплекс дав змогу реалізувати всі етапи побудови адаптованого відеоконтенту для осіб з вадами зору.

4 ЕКСПЕРЕМЕНТИ

На основі запропонованих методів, розроблено програмний-алгоритмчіний комплекс «Audio Editor», в якому використано побудовані методи та алгоритми, які описані вище. Цей ПАК розв'язує такі задачі: 1) визначення місць у звукоряді відеоконтенту для вставлення тифлокоментарів, 2) начитування тифлокоментарів, 3) вибір з множини начитаних тифлокоментарів релевантного, який відповідає певним параметрам (час, семантика), 4) нормалізація основної звукової доріжки, 5) побудова паралельної звукової доріжки з накладених тифлокоментарів, 6) поєднання звукоряду з відеоконтентом. Результатом роботи ПАК є змонтована звукова доріжка, яку можна експортувати, або в звуковий файл форматів WAV та MP3, або у формат відео-файлу AVI, MPEG, WMV. За допомогою цього ПАК адаптовано для осіб з вадами зору фільм «Доторкнись і побач» (в Інтернеті фільм з тифлокоментарем можна переглянути за адресою: https://www.youtube.com/watch?v=3h_73FHAq3M).

На рис. 3 наведено сюжети кінофільму «Доторкнись і побач», а у табл. 1 наведено часові рамки цих сюжетів, та їхній опис за допомогою тифлокоментарів.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Результати експерименту наведено на рис. 4. Зліва наведено відносну кількість схвальних відповідей на питання після перегляду фільму «Доторкнись і побач» без тифлокоментарів, а з правої сторони – після перегляду з тифлокоментарями. Були задані такі запитання:

1. Чи зрозуміли ви сам сюжет, його розвиток протягом відеоконтенту?

2. Чи не було моментів у відеоконтенті коли Ви втратили зрозумілість того, що відбувається на екрані (незрозумілі звуки, шуми)?

Таблиця 1 – Опис окремих сюжетів фільму «Доторкнись і побач» за допомогою тифлокоментарів

Оригінал фільму	Часовий проміжок	Тифлокоментарі
0:00-1:10 (Без будь яких пояснень грає саундтрек)	0:00–0:08 0:12–0:16 0:17–0:25 0:32–0:40 0:41–0:57 0:59–1:07	титр: Доторкнись і побач. Дощовий, вечірній Львів. У мерехтливих вогнях ліхтарів площі Ринок «пробігає» трамвай. Чоловік одягнутий у коричневу куртку з капюшоном йде вулицею. Під пазухою він несе коробку з подарунковою стрічкою. Необачно переходячи дорогу його збиває автомобіль. До нього вискакує водій:

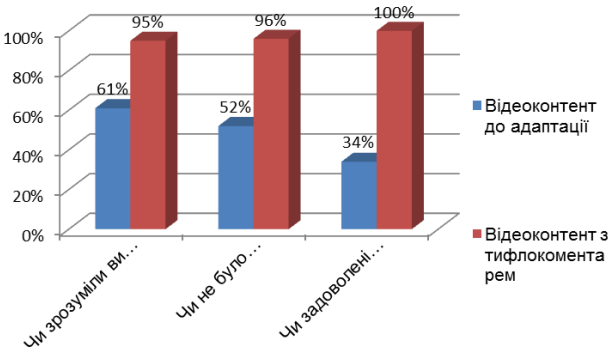


Рисунок 4 – Графік співставлення відповідей глядачів

3. Чи задоволені Ви переглядом даного відеоконтенту з тифлокоментарем?

Тим самим експериментально доведено доцільність застосування методу тифлокоментування для опису сюжетів відеоконтенту, що дало змогу до 30% підвищити сприйняття відеоконтенту особам з вадами зору.

Рисунок 3 – Сцени зміни сюжету протягом 0:00 – 1:10 хв.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Сьогодні в усьому світі ведеться активна робота над розробленням новітніх інформаційних технологій, які допомагають особам з фізичними вадами здоров'я максимально самостійно взаємодіяти з іншими людьми та комп'ютерами, забезпечувати себе необхідною інформацією [10–11]. Проблематика доступності до інформації для осіб з вадами зору спричинена неякісним способом представлення інформації на сайтах, малою адаптованістю сучасного телебачення до потреб таких людей.

У світі немає розроблених інформаційних систем, які би забезпечували повний комплекс технологічного процесу адаптації відеоконтенту для осіб з вадами зору, є одиничні системи, які виконують лише деякі функції, але по- перше, вони комерційні, а по-друге, і вони мають певні недоліки. Це спричинено складністю адаптації та об'єднання різних програмних та апаратних засобів у одну систему. У результаті немає повноцінних розроблених програмно-алгоритмічних засобів, які би забезпечували вирішення сформульованих задач.

ВИСНОВКИ

Проблема доступу до відеоконтенту осіб з вадами зору дуже гостро стоїть в даний час. У проблематиці навчання таких людей також виникають великі проблеми, людина яка отримує інформацію повинна мати добре розвинену уяву, мати достатній запас знань, що дозволяють сприймати інформацію на слух.

Тифлокоментування як спосіб донесення інформації до незрячого або слабкозрячого користувача є надзвичайно якісним методом донесення суті, важливих деталей того, що зрячі бачать в конкретний момент на екрані телевізора, дисплеї монітора або навіть на театральній сцені. Вперше розроблено математичне забезпечення подання відеоконтенту для осіб з вадами зору на основі процесу тифлокоментування, яке базується на спектральному аналізі побудови паралельної звукової доріжки, що дало змогу формалізувати процес адаптування відеоконтенту для осіб з вадами зору. На основі теорії асоціативних правил та логіки першого порядку розроблено правила побудови тифлокоментарів, які служать базою для сценаристів та звукорежисерів, які здійснюють процес адаптування відеоконтенту до потреб осіб з вадами зору. Для автоматизації процесу побудови відеоконтенту для осіб з вадами зору розроблено архітектуру та реалізовано програмно-алгоритмічний комплекс тифлокоментування, функціонування якого ґрунтується на пошуку місць у відеоконтенті для вставки тифлокоментарів, начитуванні у часові рамки відповідних тифлокоментарів, редагуванні і накладанні аудіоряду з тифлокоментарем на відеоряд. Отримав подальший розвиток метод пошуку ділянок тиші в звукових даних на основі використання перетворювання WaveLet, який складається із 4 етапів (фільтрація ділянки звуку, перевірка щільності спектру, перевірка кореляції спектру з еталонним спектром, згладжування ділянок масиву), що дало змогу визначити ділянки тиші для вставлення тифлокоментарів у відеоконтент. Експериментально доведено доцільність застосування тифлокоментарів для опису сюжету відеоконтенту для осіб з вадами зору, що дало змогу до 30% підвищити ефективність сприйняття відеоконтенту такими глядачами. За допомогою розроблених методів і програмних засобів, адаптовано та викладено у вільний доступ короткометражний фільм «Доторкнись і побач».

ПОДЯКИ

Дослідження, що становлять матеріал статті, безпосередньо пов'язані з науково-дослідним напрямом кафедри інформаційних систем та мереж Національного університету «Львівська політехніка». Результати, викладені у роботі, виконано відповідно до державної науково-дослідної роботи за темою Міністерства освіти і науки України ДБ «ЖЕСТ» у 2011–2012 рр. (номер державної реєстрації 0111U001222).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Петров Ю. І. Організація і методика навчання сліпих орієнтуванню в просторі / Ю. І. Петров. – М. : ВОС, 1998. – 276 с.
2. Демчук А. Б. Відеоконтент для незрячих: метод тифлокоментування / А. Б. Демчук // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2014. – №1 (30). – С. 146–149.
3. Ваньшин С. Н. Словесное описание для слепых / С. Н. Ваньшин, О. П. Ваньшинаю. – М. : Логосвос, 2011. – 62 с.
4. Земцова М. И. Пути компенсации слепоты в процессе познавательной и трудовой деятельности / М. И. Земцова. – М. : Изво АПН РСФСР, 1956. – 420 с.
5. Таланчук П. М. Супровід навчання студентів з особливими потребами в інтегрованому освітньому середовищі / П. М. Таланчук, К. О. Кольченко, Г. Ф. Нікуліна. – К. : Соцінформ, 2004. – 128 с.
6. Кунанець Н. Е. Організація освітніх та інформаційних процесів для людей з вадами зору із застосуванням спеціальних комп'ютерних технологій / Н. Е. Кунанець, О. А. Лозицький, В. В. Пасічник // Матер. III наук.-практ. конф. «Інноваційні комп'ютерні технології у вищій школі». – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2011. – С. 156–158.
7. Литвин В. В. Метод автоматизованої розбудови та оцінювання якості онтологій баз знань / В. В. Литвин, М. Я. Гопяк, А. Б. Демчук // Автоматизовані системи управління та прилади автоматики. Харків : ХНУРЕ, 2012. – № 161. – С. 62–69.
8. Демчук А. Б. Метод побудови інтелектуального агента на основі онтології предметної області. / А. Б. Демчук, В. В. Литвин, М. М. Войчишен // Інформаційні системи та мережі. Вісник НУ «Львівська політехніка». – Львів : НУ «Львівська політехніка», 2011. – № 715. – С. 215–225.
9. Палагин А. В. Архитектура онтологоуправляемых компютерных систем / А. В. Палагин // Кибернетика и системный анализ. – 2006. – № 2. – С. 111–125.
10. Нивиков П. С. Элементы математической логики 2-е изд. / П. С. Новиков. – М. : Наука, 1973. – 400 с.
11. Гильберт Д. Основы теоретической логики / Д. Гильберт, В. Аккеман. – М. : ГИИЛ, 1947. – 302 с.

Стаття надійшла до редакції 14.03.2016.
Після доробки 20.05.2016.

Лытвын В. В.[1], Демчук А. Б.[2], Оборская О. В.[3]
[1]Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные системы и сети» Национального университета «Львовская политехника», Львов, Украина
[2]Канд. техн. наук, ассистент кафедры «Информационные системы и сети» Национального университета «Львовская политехника», Украина
[3]Аспирант кафедры «Информационные системы и сети» Национального университета «Львовская политехника», Львов, Украина

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ВИДЕОКОНТЕНТА ДЛЯ ЛИЦ С НАРУШЕНИЕМ ЗРЕНИЯ

В статье исследована проблема доступа к видеоконтенту людей с полной или частичной потерей зрения, рассмотрены тифлокоментування, как метод адаптации видеоконтента для незрячих. При исследовании проблемы доступа слабовидящих к видеоконтенту, следует понимать, что большинство информации предоставляется зрителю посредством изображения, так, незрячие слышат все слова актеров, звуки окружающей среды, процессов на экране, но им трудно идентифицировать кому какие слова относятся, что именно в данный конкретный момент происходит с героями, что изображено в данной сцене, какова реакция актеров, их эмоции, которые чаще всего выражаются с помощью движений или мимики. Тифлокоментари к фильмам для незрячих людей – вот один из реальных шагов решения ограниченности доступа к такому виду контента. Разработаны математическое обеспечение представления видеоконтента для лиц с недостатками зрения на основе использования теории координации, спектрального анализа. Также построена архитектура программно-алгоритмического комплекса адаптации видеоконтента для людей с недостатками зрения. Реализован метод поиска свободных от диалогов и других важных звуков мест в видеоконтенте, которые служат для вставки тифлокомментариев. На основе логики 1-го порядка и ассоциативных правил разработаны правила тифлокомментирования для тифлокомментаторов, сценаристов и звукорежиссеров. Решена актуальная научно-прикладная задача представления видеоконтента в формате, доступном для восприятия людям с плохим зрением. Экспериментально доказана целесообразность применения метода тифлокомментирования для описания сюжетов видеоконтента, что позволило до 30% повысить восприятие видеоконтента лицам с недостатками зрения.

Ключевые слова: программно-алгоритмический комплекс, тифлокомментирование, тифлокомментатор, аудиодескрыпция, представление видеоконтента для лиц с недостатками зрения, видеоконтент, недостаток зрения, адаптированный видеоконтент.

Lytvyn V. V.[1], Demchyk A. B.[2], Oborska O. V.[3]
[1]Dr.Sc., Professor, Head of Information Systems and Networks Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
[2]Ph.D., Assistant of Information Systems and Networks Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
[3]Postgraduate student of Information Systems and Networks Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

MATHEMATICAL AND SOFTWARE SUBMISSION VIDEO CONTENT FOR VISUALLY IMPAIRED PEOPLE

The article studies the problem of access to video people with complete or partial loss of vision, are considered typhlocomments as video content adaptation method for the blind. In the study of the problem of access of visually impaired to the video, it is understood that most of the information provided the viewer through the image, so that the blind can hear all the words of the actors, environment sounds, the processes on the screen, but it is difficult to identify anyone what words are, that it is at this particular moment it happens to the characters, what is depicted in this scene, what is the reaction of the actors, their emotions, which are often expressed through movement and facial expressions. Tiflokomentari to films for blind people – that's one of the real steps solutions limited access to view this content. Developed software representation of video content for persons with visual impairments through the use of the coordination theory of spectral analysis. Also built the architecture of software and algorithmic complex adaptation of video content for people with visual impairments. Implemented method for finding free conversations and other important sounds in video sites, which are used to insert typhlocomments. On the basis of the logic of the 1-st order and association rules are designed for rules typhlocomments typhlocomentators, writers and sound engineers. Back-to-date scientific and applied problem presentation video in a format accessible to the perception of people with poor eyesight. Experimentally proved the feasibility of typhlocomments method to describe the scenes video, which allowed up to 30% increase in the perception of video content for people with visual impairments.

Keywords: complex algorithmic search include video-insertion typhlocomments, audiodescription, submitting video content for people with visual impairments, video content, defect of vision, is adapted video content.

REFERENCES

1. Petrov U. I. Organizatsiya technique navchannya slipih orientuvannyu prostori. Moscow, VOS, 1998, 276 p.
2. Demchuk A. B. Vydeokontent for the blind: the method tyflokomentuvannya, *Radio Electronics, Computer Science, Control,* 2014, No. 1 (30), pp. 146–149.
3. Vanshina S. N., Vanshinayu O. P. Slovesne opysannja dlya slipyh. Moscow, Logosvos, 2011, 62 p.
4. Zemtsova M. I. Puti compensation v process poznavatelnoj i trudovoy deyatelnosti. Moscow, APN RSFSR, 1956, 420 p.
5. Talanchuk P. M., Kolchenko K. O., Nikulina G. F. Suprovid navchannya studentiv s osoblivimi potrebami in integrovanomu osvitnomu seredovischi [Text]. Kiev, Socinform, 2004, 128 p.
6. Kunanets N. E., Lozitsky O. A., Pasichnik V. V. Organizatsiya osvitnih Ta informatsiynih protsesiv dlya lyudey s vadami zoru iz zastosuvannyam spetsialnih komp'yuternih tehnologiy, *Mater. III-nauk. prakt. konf. "Innovatsiyni komp'yuterni tehnologiї in vischiy shkoli*". Lviv, Vid-vo Lvivskoї politehniki, 2011, pp. 156–158.
7. Lytvyn V. V., Hopyak M. J., Demchuk A. B. Metod avtomatyzovanoyi rozbudovy ta otsinyuvannya yakosti ontolohiy baz znan, *Avtomatyzovani systemy upravlinnya ta prylady avtomatyky*. Harkiv, XNYRE, 2012, No. 161, pp. 62–69.
8. Demchuk A. B., Lytvyn V. V., Voychyshen M. N. Metod pobudovy intelektualnoho ahenta on osnovi ontolohiyi predmetnoyi oblasti. Informatsiyni systemy ta merezhi. Visnyk NU «Lvivska politehnika». Lviv, NU «Lvivska politehnika», 2011, No. 715, pp. 215–225.
9. Palagin A. V. Arhitektura ontologoupravlyaemyh kompyuternyh sistem, Kibernetika and sistemny analyz, 2006, No. 2, pp. 111–125.
10. Nivikov P. S. Elementy matematicheskoy logiki 2 yzd. Moskva, Nauka, 1973, 400 p.
11. Gilbert D., Akkeman V. Osnovy teoreticheskoy logiki. Moskva, GIIL 1947, 302 p.

УДК 004.056

Фауре Э. В.[1], Швыдкий В. В.[2], Щерба В. А.[3]

[1]Канд. техн. наук, доцент, докторант, доцент кафедры информационной безопасности и компьютерной инженерии Черкасского государственного технологического университета, Черкассы, Украина
[2]Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры информационной безопасности и компьютерной инженерии Черкасского государственного технологического университета, Черкассы, Украина
[3]Ст. преподаватель кафедры прикладной математики Черкасского государственного технологического университета, Черкассы, Украина

КОМБИНИРОВАННОЕ ФАКТОРИАЛЬНОЕ КОДИРОВАНИЕ И ЕГО СВОЙСТВА

В работе предложен метод комбинированного факториального кодирования данных, направленный на обеспечение контроля целостности информации, предусматривающий комплексную защиту от навязывания ложных данных (имитозащиту) и ошибок в канале связи. Основная идея предложенного метода кодирования состоит в совмещении процедур полного факториального кодирования, использующего перестановку в качестве проверочной части кодового слова, и циклического избыточного кодирования (CRC). При этом проверочная часть кодового слова комбинированного факториального кода формируется путем вычисления остатка от деления проверочной части кодового слова полного факториального кода, представленной в виде многочлена, на кодовый полином CRC-кода. Определены основные свойства комбинированного факториального кода, выполнена оценка достоверности передачи, крипто- и имитостойкости. Выполнен сравнительный анализ обнаруживающей способности (вероятности необнаруженной кодом ошибки) и энергетического выигрыша для полного и комбинированного факториального кодирования при условии независимости возникающих в канале связи ошибок и их биномиального распределения. Определены пути улучшения представленной оценки вероятности необнаруженной факториальным кодом ошибки. Даны рекомендации по применению полного и комбинированного факториального кодирования.

Ключевые слова: факториальный код, перестановка, контроль целостности информации, помехоустойчивое кодирование, достоверность передачи, стойкость.

НОМЕНКЛАТУРА

FFC – Full Factorial Code;

IIC – Information Integrity Control;

CFC – Combined Factorial Code;

CRC – Cyclic Redundancy Code (циклический избыточный код);

КФК – комбинированный факториальный код;

КЦИ – контроль целостности информации;

ПФК – полный факториальный код;

РОС – решающая обратная связь;

ФСС – факториальная система счисления;

ΔP – энергетический выигрыш;

$\varepsilon_{n_{CFC}}(x)$ – вектор ошибки, воздействующий на кодовое слово КФК;

$\varepsilon_k(x)$ – вектор ошибки, воздействующий на информационную часть кодового слова КФК;

$\varepsilon_{r_{CFC}}(x)$ – вектор ошибки, воздействующий на проверочную часть кодового слова КФК;

$\varepsilon^{\wedge}_{r_{CFC}}(x)$ – ошибка, возникающая при формировании в приемнике проверочной части кодового слова КФК;

ν_{CFC} – скорость КФК;

$\pi(0)$ – базовая перестановка множества целых чисел $\{0;1;2;\ldots;M-1\}$;

$\pi(t)$ – перестановка в дискретный момент времени t;

$\coprod$ – символ конкатенации (присоединения);

$A(x)$ – информационная часть кодового слова, представленная в виде многочлена;

$C(x)$ – кодовое слово, представленное в виде многочлена;

$D_{CFC}(x)$ – принятый из канала вектор кодового слова КФК;

$B(t)$ – факториальная запись числа, которое определяет порядковый номер перестановки;

$b_i(t)$ – i-й факториальный коэффициент синдрома перестановки в момент времени t;

$f_{CFC}(j)$ – число ошибок веса $j \in [0;n]$, не обнаруживаемых КФК;

$G(x)$ – многочлен, образующий CRC-код;

h^2 – соотношение сигнал/шум;

h_0^2 – соотношение сигнал/шум на входе некогерентного приемника, обеспечивающее вероятность битовой ошибки p_0 на его выходе;

h_{eq}^2 – соотношение сигнал/шум на входе некогерентного приемника, обеспечивающее эквивалентную вероятность битовой ошибки на его выходе p_{0eq};

i – номер факториального коэффициента синдрома перестановки;

k – число двоичных символов в информационной части блока данных;

M – порядок (количество элементов) перестановки;

$N_{r_{CFC}}$ – количество возможных многочленов $G(x)$ степени r_{CFC}, образующих CRC-код;

n – полная длина блока данных;

$P_{IIC}(CFC)$ – вероятность взлома системы КЦИ КФК при однократной попытке подбора ключа;

© Фауре Э. В., Швыдкий В. В., Щерба В. А., 2016
DOI 10.15588/1607-3274-2016-3-10

$P_{IIC}(FFC)$ – вероятность взлома системы КЦИ ПФК при однократной попытке подбора ключа;

$P_{MAC}(CFC)$ – вероятность подбора имитовставки КФК в одном блоке данных;

$P_{MAC}(FFC)$ – вероятность подбора имитовставки ПФК в одном блоке данных;

P_{ud} – вероятность необнаруженной ошибки;

$P_{ud}(CFC, p_0)$ – вероятность необнаруженной ошибки при использовании КФК;

p_0 – переходная вероятность двоичного симметричного канала связи;

p_{0eq} – эквивалентная вероятность битовой ошибки на выходе некогерентного приемника;

Q – вероятность безошибочного приема кодового слова;

$R(x)$ – проверочная часть кодового слова, представленная в виде многочлена;

$R_{CFC}(x)$ – проверочная часть кодового слова КФК, представленная в виде многочлена;

$R_{FFC}(x)$ – проверочная часть кодового слова ПФК, представленная в виде многочлена;

$\hat{R}_{CFC}(x)$ – проверочная часть кодового слова КФК, вычисленная в приемнике и представленная в виде многочлена;

$\hat{R}_{FFC}(x)$ – проверочная часть кодового слова ПФК, вычисленная в приемнике и представленная в виде многочлена;

r – число двоичных символов в проверочной части блока данных;

r_{CFC} – число двоичных символов в проверочной части блока данных КФК;

$S_{CFC}(x)$ – синдром ошибки КФК;

$S_F(t)$ – синдром перестановки в момент времени t;

T_{br} – среднее время взлома системы КЦИ (подбора имитовставки).

ВВЕДЕНИЕ

Дистанционное управление финансовыми операциями и электронным документооборотом приводит к необходимости обеспечения конфиденциальности и контроля целостности информации – КЦИ (IIC), который предусматривает защиту от навязывания ложных данных и обнаружение ошибок, вносимых каналом связи в процессе передачи сообщения. Эти обстоятельства стимулируют интенсивное развитие методов кодирования, которые обеспечивают комплексное решение задач криптозащиты, имитозащиты и защиты данных от ошибок, обусловленных действием помех в канале связи. Совмещение перечисленных функций позволяет сократить вводимую избыточность и уменьшить затраты производительности процессора, а его освобожденный ресурс – использовать для выполнения сервисных задач. В работах [1, 2] для разработки указанных методов кодирования предложено использовать систему счисления в остаточных классах, а в работе [3] – факториальную систему счисления (ФСС). Настоящая работа продолжает начатое в [4] исследование методов факториального кодирования информации – кодирования, использующего ФСС для формирования кодового слова.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе [4] представлен метод факториального кодирования, основанный на представлении проверочной части кодового слова в виде одной перестановки порядка M, который выбирается исходя из заданного набора свойств кода. При этом под перестановкой понимается упорядоченный набор символов $\{0;1;2;\ldots;M-1\}$, расположенных в порядке, который определяется информационной последовательностью и алгоритмом кодирования. Поскольку сумма чисел перестановки не зависит от порядка их следования, она постоянна и априорно известна. Поэтому в дополнение к ранее перечисленным свойствам данного метода кодирования отнесем также свойство самосинхронизации – возможности определения границ блока данных (синхронизации циклов) без использования специального, уникального (не используемого источником данных) символа, называемого маркером, флагом или разделителем.

Введем следующие определения.

Определение 1. Полным факториальным кодом (ПФК) называется систематический избыточный код, использующий в качестве проверочной части кодового слова перестановку чисел порядка M, которая определяется информационной последовательностью и алгоритмом кодирования.

Свойства ПФК подробно исследованы в [4]. Вместе с тем факториальное кодирование не ограничивается ПФК и может быть существенно расширено. В частности, представляет интерес кодирование, которое совмещает принципы факториального и циклического кодирования.

Определение 2. Комбинированным факториальным кодом (КФК) называется систематический избыточный код, использующий в качестве проверочной части кодового слова контрольную сумму циклического избыточного кода (CRC), вычисленную по проверочной части кодового слова ПФК.

Целью данной работы является исследование метода комбинированного факториального кодирования и оценка его характеристик при комплексном решении задач защиты информации и контроля ее целостности в системах передачи данных с решающей обратной связью (РОС).

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Рассмотрим простейшую систему с РОС, где прямой канал – двоичный симметричный с переходной вероятностью p_0 $(q_0 = 1 - p_0)$, обратный канал – идеальный, а символы, составляющие сообщение, являются элементами поля $F_2 = \{0;1\}$. Пусть k и r – число двоичных символов в информационной и проверочной частях блока данных соответственно, $n = k + r$ – полная длина блока.

Заметим, что перестановка для ПФК вычисляется по информационной последовательности таким образом, чтобы каждый из ее используемых символов существенно влиял на результат вычислений. Согласно [5], формирование проверочной части (перестановки) осуществляется за счет итерационной процедуры модификации

информационными символами синдрома перестановки $S_F(t)$. Синдром перестановки [6] $S_F(t)=\{b_{M-1}(t),b_{M-2}(t),...,b_0(t)\}$ представляет собой последовательность факториальных коэффициентов $b_i(t)$ $(0 \le b_{M-1-i}(t) \le M-1-i)$ в факториальной записи числа $B(t)$, которое определяет порядковый номер перестановки $\pi(t)$ в дискретный момент времени t и отображает ее точкой (контрольной точкой) отрезка $[0;M!-1]$ числовой оси

$$B(t)=\sum_{i=0}^{M-1} b_{M-1-i}(t)\cdot(M-1-i)!.$$

Методы модификации синдрома информационными символами могут быть различными [5, 7].

Базовая перестановка $\pi(0)$, относительно которой производится формирование проверочной части (перестановки $\pi(t)$) может быть открытой или скрытой.

В работе [4] подробно рассмотрены свойства и обнаруживающая способность ПФК. При этом показано, что ошибка декодирования (ошибка, которую код не обнаруживает) возникает тогда, когда помеха, воздействующая на проверочную часть блока, преобразует переданную перестановку $\pi(t)$ в другую перестановку $\pi'(t)$, не совпадающую с перестановкой $\pi''(t)$, вычисленной декодером по принятой с ошибками информационной части блока.

Определим свойства и обнаруживающую способность КФК. При этом оценим следующие количественные показатели:

– скорость кода;
– вероятность не обнаруженной кодом ошибки;
– вероятность взлома кода методом «грубой силы».

Как и в [4], используем широко принятый [8 С. 601; 9, С. 232; 10. С. 361] подход к рассмотрению наборов (векторов) над полем F_2 в виде элементов алгебры многочленов с коэффициентами из F_2.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Концепция КФК (CFC) сочетает факториальное кодирование с циклическим избыточным кодированием. При этом по информационной последовательности сначала вычисляется проверочная часть кодового слова ПФК, после чего по полученной перестановке, представленной в виде многочлена $R_{FFC}(x)$ степени $(r_{FFC}-1)$, вычисляется вычет

$$R_{CFC}(x)=\left|R_{FFC}(x)\right|_{G(x)}, \qquad (1)$$

где $G(x)$ – многочлен степени r_{CFC}, образующий CRC-код.

Блок данных, состоящий из информационной части $A(x)$ (размерности k бит) и проверочной части $R(x)=R_{CFC}(x)$ (размерности $r=r_{CFC}$ бит), выводится в канал связи в виде $C(x)=A(x)\amalg R(x)$, где $\amalg$ – символ конкатенации (присоединения) $\left(C(x)=x^r\cdot A(x)\oplus R(x)\right)$. Полная длина блока $n=n_{CFC}=k+r_{CFC}$ бит, скорость КФК

$$\nu_{CFC}=k/(k+r_{CFC}).$$

Оценка достоверности передачи может быть получена следующим образом. При передаче по каналу связи на блок данных воздействует вектор ошибки $\varepsilon_{n_{CFC}}(x)$ с мощностью множества векторов $\mu\left\{\varepsilon_{n_{CFC}}(x)\right\}=2^n$. Этот вектор может быть представлен в виде конкатенации двух векторов – вектора помехи, покрывающего информационную часть блока из k бит, и вектора помехи, покрывающего проверочную часть блока из r_{CFC} бит:

$$\varepsilon_{n_{CFC}}(x)=\varepsilon_k(x)\amalg\varepsilon_{r_{CFC}}(x).$$

Отсюда принятый из канала связи вектор имеет вид

$$D_{CFC}(x)=C_{CFC}(x)\oplus\varepsilon_{n_{CFC}}(x)=$$
$$=\left(A(x)\oplus\varepsilon_k(x)\right)\amalg\left(R_{CFC}(x)\oplus\varepsilon_{r_{CFC}}(x)\right).$$

В приемнике по принятой из канала последовательности $A(x)\oplus\varepsilon_k(x)$ формируется проверочная часть (перестановка) для ПФК. По ее двоичному представлению $\hat{R}_{FFC}(x)$ согласно (1) вычисляется остаток $\hat{R}_{CFC}(x)=\left|\hat{R}_{FFC}(x)\right|_{G(x)}$. Этот остаток может быть представлен в виде $\hat{R}_{CFC}(x)=R_{CFC}(x)\oplus\hat{\varepsilon}_{r_{CFC}}(x)$, где $\hat{\varepsilon}_{r_{CFC}}(x)$ – ошибка, возникающая при формировании в приемнике проверочной части и преобразующая переданную проверочную часть в любую из $2^{r_{CFC}}$ возможных значений.

Ситуация, когда вычисленная в приемнике и принятая из канала проверочные части совпадают $\left(\hat{R}_{CFC}(x)=R_{CFC}(x)\oplus\varepsilon_{r_{CFC}}(x)\right)$, является признаком отсутствия ошибок в принятом блоке и служит основанием для вывода его потребителю. Соответственно, ситуация $\hat{R}_{CFC}(x)\ne R_{CFC}(x)\oplus\varepsilon_{r_{CFC}}(x)$ является признаком приема блока данных с ошибкой и служит основанием для его переспроса.

Отсюда синдром ошибки принимает вид:

$$S_{CFC}(x)=\left(R_{CFC}(x)\oplus\hat{\varepsilon}_{r_{CFC}}(x)\right)\oplus$$
$$\oplus\left(R_{CFC}(x)\oplus\varepsilon_{r_{CFC}}(x)\right)=\hat{\varepsilon}_{r_{CFC}}(x)\oplus\varepsilon_{r_{CFC}}(x).$$

Если $\varepsilon_{n_{CFC}}(x)=0$, то $S_{CFC}(x)=0$. Поэтому равенство $S_{CFC}(x)=0$ является признаком отсутствия модификации блока данных.

Вместе с тем, если $\varepsilon_{n_{CFC}}(x)\ne 0$ и $\hat{\varepsilon}_{r_{CFC}}(x)\oplus\varepsilon_{r_{CFC}}(x)=0$, возникают необнаруженные

ошибки на выходе декодера. Заметим, что $\varepsilon^{\wedge}_{r_{CFC}}(x)$ и $\varepsilon_{r_{CFC}}(x)$ статистически независимы, а ошибки декодирования при $\varepsilon_k(x) \neq 0$ и $\varepsilon^{\wedge}_{r_{CFC}}(x) = \varepsilon_{r_{CFC}}(x) = 0$ являются результатом возникновения коллизий.

Примем, что данные на входе и выходе блока формирования перестановки являются статистически независимыми. При этом перестановки, формируемые в нем по принятым с ошибками информационным частям блока данных, распределены равномерно с вероятностью (см. формулы (1), (11) в [4]):

$$p^{\wedge}_r = \begin{cases} \left(1-q_0^k\right)/M! \text{ при } M! < 2^k, \\ \left(1-q_0^k\right)\Big/\left(2^k-1\right) \text{ при } M! \geq 2^k. \end{cases}$$

Примем также, что $r_{CFC} \leq k$ и $2^{r_{CFC}} \leq M!$. Тогда вероятность появления каждого из $2^{r_{CFC}}$ возможных векторов $R_{CFC}(x)$, и, соответственно, каждого из $2^{r_{CFC}}$ возможных векторов $\varepsilon^{\wedge}_{r_{CFC}}(x)$, равна $p^{\wedge}_{r_{CFC}} = \left(1-q_0^k\right)\Big/2^{r_{CFC}}$ и определяет вероятность необнаруженной ошибки КФК кодом:

$$P_{ud}(CFC, p_0) = P\left\{\varepsilon^{\wedge}_{r_{CFC}}(x) = \varepsilon_{r_{CFC}}(x)\right\} = \left(1-q_0^k\right)\Big/2^{r_{CFC}}. \quad (2)$$

Оценка крипто- и имитостойкости ПФК и КФК может быть получена следующим образом. Выполним количественную оценку стойкости факториальных кодов от несанкционированного чтения и/или навязывания ложных данных при атаке только на передаваемые данные и взломе методом «грубой силы» путем перебора множества значений ключевого пространства.

При использовании ПФК информационная часть блока данных передается в открытом (не преобразованном) виде, поэтому этот код не обеспечивает криптографическую защиту данных. Согласно [4, 5], контрольная сумма (перестановка) обеспечивает имитозащиту данных с вероятностью взлома системы КЦИ при однократной попытке подбора ключа $P_{IIC}(FFC) \leq (M!)^{-2}$ и вероятностью подбора имитовставки в одном блоке данных $P_{MAC}(FFC) = (M!)^{-1}$.

При использовании КФК информационная часть блока данных передается, как и при ПФК, в открытом виде, поэтому КФК также не обеспечивает криптографическую защиту данных. Вероятность подбора ключа КЦИ при однократной попытке

$$P_{IIC}(CFC) = P_{IIC}(FFC)\cdot\left(N_{r_{CFC}}\right)^{-1} \leq (M!)^{-2}\cdot\left(N_{r_{CFC}}\right)^{-1},$$

где $N_{r_{CFC}}$ – количество возможных многочленов $G(x)$ степени r_{CFC}, образующий CRC-код. Вероятность подбора имитовставки для одного блока данных при однократной попытке $P_{MAC}(CFC) = 2^{-r_{CFC}}$.

Среднее время взлома системы КЦИ (подбора имитовставки) определяется выражением $T_{br} = 0,5/(P_{br}\cdot N)$ сек, где P_{br} – вероятность взлома системы КЦИ (подбора имитовставки) для анализируемого кода, N – производительность компьютерной группировки, выполняющей процедуру взлома (ключей/сек).

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Энергетический выигрыш ΔP при применении факториального кодирования будем определять для оптимального некогерентного приемника двоичных сигналов с ЧМн. Такой приемник характеризуется вероятностью битовой ошибки $p = 0,5\cdot e^{-0,5h^2}$ [11, С. 45], где h^2 – соотношение сигнал/шум (отношение энергии сигнала, приходящейся на 1 бит принимаемого сообщения, к спектральной плотности мощности шума). Тогда энергетический выигрыш

$$\Delta P = 10\lg\frac{\left(h_{eq}\right)^2}{h_0^2} = 10\lg\frac{\ln\left(2p_{0eq}\right)}{\ln\left(2p_0\right)},$$

где $h_0^2 = 2\ln\left(2p_0\right)$ – соотношение сигнал/шум на входе некогерентного приемника, обеспечивающее вероятность битовой ошибки p_0 на его выходе; h_{eq}^2 – соотношение сигнал/шум на входе некогерентного приемника, обеспечивающее эквивалентную вероятность битовой ошибки на его выходе p_{0eq}, определенную в [12, С. 676] как вероятность ошибки в гипотетическом симметричном постоянном двоичном канале, при которой вероятность безошибочного приема достаточно длинного сообщения такая же, как и в рассматриваемой системе:

$$\left(1-p_{0eq}\right)^k = \left(1-P_{ud}\right)^{1/(Q+P_{ud})},$$

где $Q = \left(1-p_0\right)^n$.

Согласно [12, С. 677], при $p_{0eq}, P_{ud} \ll 1$ эквивалентная вероятность битовой ошибки

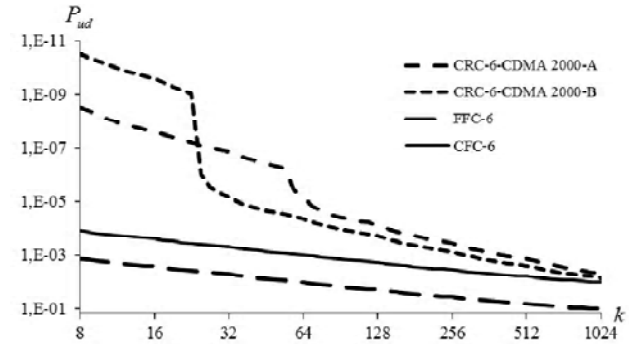
$$p_{0eq} \approx \frac{P_{ud}}{k\left(Q+P_{ud}\right)}.$$

Пример. Оценим энергетический выигрыш КФК для некогерентного приема при $p_0 = 10^{-3}$, $n = 1400$ и $r_{CFC} = 16$, $G(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$. Тогда $k = 1384$, $\nu_{CFC} = 1384/1400 = 0,988$, а $P_{ud}(CFC, p_0) = 1,14\cdot 10^{-5}$. Энергетический выигрыш $\Delta P = 4,25$ дБ.

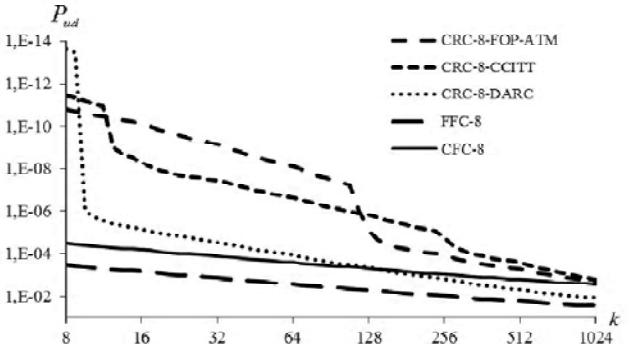
5 РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 представлены графики зависимостей оценок вероятностей необнаруженной ошибки P_{ud} от длины информационной части блока k в результате применения КФК, ПФК и CRC-кода при $p_0 = 10^{-3}$. Оценки для CRC-кода заимствованы из работы [4], использующей результаты из [13].

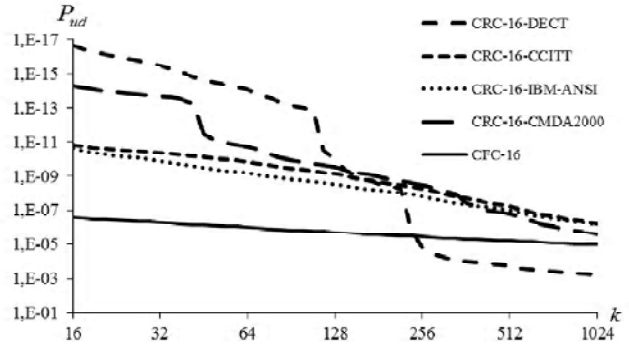
Графики зависимостей оценок энергетического выигрыша ΔP от длины информационной части блока k в результате применения КФК, ПФК и CRC-кода при $p_0 = 10^{-3}$ представлены на рис. 2.



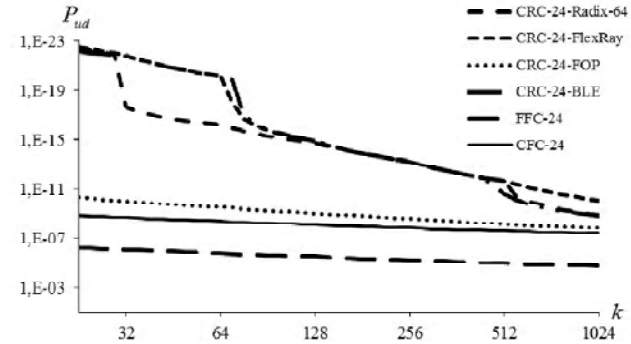
а



б

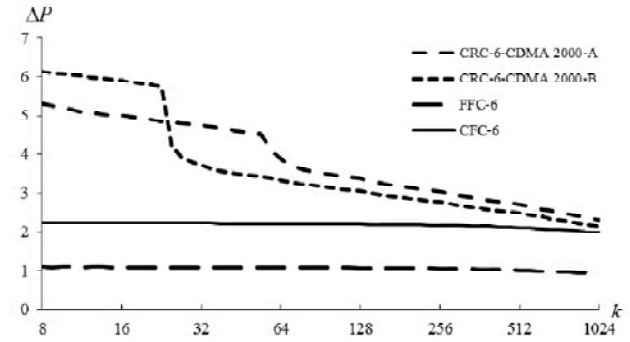


в

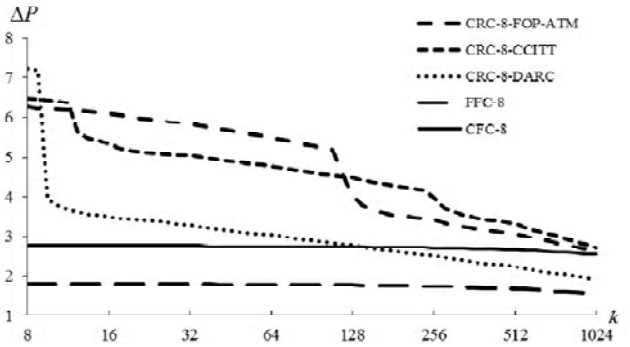


г

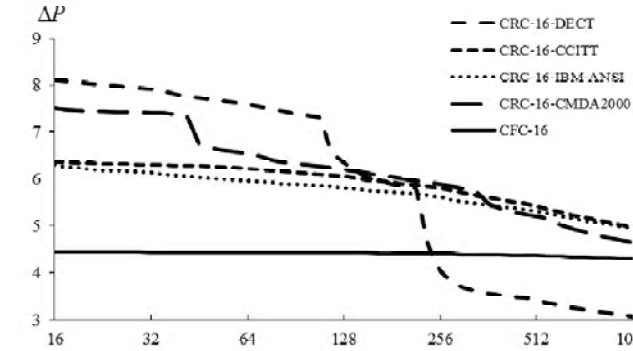
Рисунок 1 – Графики зависимостей оценок вероятностей необнаруженной ошибки от длины информационной части при $p_0 = 10^{-3}$ и а – $r = 6$; б – $r = 8$; в – $r = 16$; г – $r = 24$



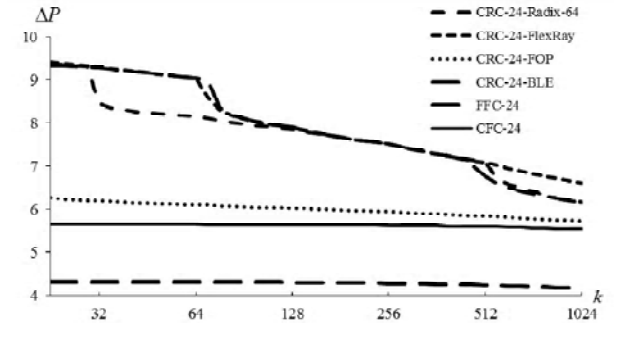
а



б



в



г

Рисунок 2 – Графики зависимостей оценок энергетического выигрыша от длины информационной части при $p_0 = 10^{-3}$ и а – $r = 6$; б – $r = 8$; в – $r = 16$; г – $r = 24$

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Рис. 1 и 2 свидетельствуют о том, что обнаруживающая способность КФК выше, чем ПФК при одинаковых скоростях кодов и кодировании символов перестановки ПФК равномерным двоичным кодом. Кроме того, длина проверочной части КФК определяется только кодовым полиномом и может принимать любое целое положительное значение (в то время как для ПФК $r_{FFC} = M \cdot \left(\text{entier}\left(\log_2 M\right)+1\right): r \in \{2;6;8;15;18;21;24;36\ldots\}$). Вместе с тем обнаруживающая способность КФК в целом уступает обнаруживающей способности циклического избыточного кода, однако для некоторых образующих полиномов CRC-кода и длины информационной части справедливо $\Delta P_{CFC} > \Delta P_{CRC}$. Так, например, $\Delta P_{CFC-8} > \Delta P_{CRC-8-DARC}$ при $k \geq 146$ ($\Delta P_{CRC-8-DARC} - \Delta P_{CFC-8} \approx -0,638$ дБ при $k = 1024$), а $\Delta P_{CFC-16} > \Delta P_{CRC-16-DECT}$ при $k \geq 243$ ($\Delta P_{CRC-16-DECT} - \Delta P_{CFC-16} \approx -1,219$ дБ при $k = 1024$). Следует отметить, что оценка вероятности необнаруженной ошибки CRC-кода определена практически точно, в то время как оценка КФК (4) может быть улучшеа. Для этого, как и для формирования используемой здесь оценки энергетического выигрыша CRC-кода, необходимо определить число ошибок веса , не обнаруживаемых КФК.

Выполним сравнительную оценку свойств помехоустойчивых кодов. Результаты анализа приведем в табл. 1.

Анализ свойств представленных кодов позволяет сформулировать следующие рекомендации по их применению: при необходимости обеспечения КЦИ при ее передаче или хранении можно использовать ПФК или КФК; причем, если не требуется самосинхронизации кода, более эффективно использовать КФК.

ВЫВОДЫ

Разработанные принципы комбинированного факториального кодирования позволяют расширить научно-техническую базу методов и средств контроля целостности информации при ее хранении и передаче.

Свойства комбинированного факториального кодирования:

– информационная часть кодового слова передается в канал связи в исходном виде, поэтому данный код не обеспечивает защиту информации от несанкционированного чтения;

– процедура формирования проверочной части кодового слова обеспечивает сцепление всех информационных символов, разрушая при этом их статистические связи, закон формирования проверочной части может быть скрыт, что в совокупности обеспечивает возможность ее использования в качестве имитовставки сообщения и совмещение функций имитозащиты и защиты от ошибок в канале связи;

– при одинаковых длине кодовой комбинации и скорости кода обнаруживающая способность КФК выше, чем ПФК, однако ниже CRC-кода;

– КФК не обладает свойством самосинхронизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 75935 Україна, МПК H03M13/31 (2006.01). Спосіб забезпечення цілісності інформації на базі коду умовних лишків / Василенко В. С., Чунарьова А. В., Василенко М. Ю, Чунарьов А. В. ; заявник та патентовласник Національний авіаційний університет. – №u2012103515; заявл. 26.03.2012; опубл. 25.12.2012, Бюл. № 24. – 4 с.
2. Пат. 75938 Україна, МПК H03M13/31 (2006.01). Спосіб забезпечення цілісності інформації на базі лишково-хеммінгового коду / Василенко В. С, Чунарьова А. В., Василенко М. Ю, Чунарьов А. В. ; заявник та патентовласник Національний авіаційний університет. – №u2012103518; заявл. 26.03.2012; опубл. 25.12.2012, Бюл. №24. – 4 с.
3. Горячев А. В. Обнаружение ошибок в перестановках / А. В. Горячев // Вісник СумДУ. Серія Технічні науки. – 2009. – № 4. – С. 126–134.
4. Фауре Э. В. Контроль целостности информации на основе факториальной системы счисления / Э. В. Фауре, В. В. Швыдкий, А. И. Щерба //Journal of Qafqaz University. Mathematics and computer science. – 2016. – № 2, Т. 4. – (В печати).
5. Фауре Э. В. Метод формирования имитовставки на основе перестановок / Э. В. Фауре, В. В. Швыдкий, В. А. Щерба // Захист інформації. – 2014. – № 4, Т. 16. – С. 334–340. – Режим доступу: http://jrnl.nau.edu.ua/index.php/ZI/article/view/334/8755.
6. Фауре Э. В. Метод формирования воспроизводимой непредсказуемой последовательности перестановок / Э. В. Фауре, В. В. Швыдкий, А. И. Щерба // Безпека інформації. – 2014. – № 3, Т. 20. – С. 253–258. – Режим доступу: http://jrnl.nau.edu.ua/index.php/Infosecurity/article/view/7552/8608.
7. Швидкий В. В. Дослідження статистичних властивостей колізій під час формування імітовставки на основі перестановок / В. В. Швидкий, В. С. Клопко // Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку: матеріали Всеукраїнської науково-практичної Internet-конференції, Черкаси, 14–20 березня 2016 р. – Черкаси, 2016 р. – С. 17.
8. Лидл Р. Конечные поля: В 2 т. Т. 2 / Р. Лидл, Г. Нидеррайтер ; [пер. с англ. под ред. Нечаева В. И.] – М. : Мир, 1988. – 822 с. – (Редакция литературы по математическим наукам).
9. Питерсон У. Коды, исправляющие ошибки / У. Питерсон, Э. Уэлдон ; [пер. с англ. под ред. Р. Л. Добрушина, С. И. Самойленко] – М. : Мир, 1976. – 590 с. – (Редакция литературы по новой технике).
10. Прокис Д. Цифровая связь / Джон Прокис ; [пер. с англ. под ред. Д.Д. Кловского]. – М. : Радио и связь, 2000. – 800 с.
11. Теплов Н. Л. Помехоустойчивость систем передачи дискретной информации / Н. Л. Теплов. – М. : Связь, 1964. – 360 с.
12. Финк Л. М. Теория передачи дискретных сообщений / Л. М. Финк. – [Изд. 2-е, перераб. и дополн.]. – М. : Советское радио, 1970. – 728 с.
13. Koopman P. Best CRC Polynomials [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://users.ece.cmu.edu/~koopman/crc/index.html.

Статья поступила в редакции 09.08.2016.
После доработки 18.08.2016.

Таблица 1 – Свойства помехоустойчивых кодов

Код	Систематический	Помехоустойчивый	Криптостойкий	Имитостойкий	Самосинхронизирующийся
ПФК	+	+	–	+	+
КФК	+	+	–	+	–
CRC	+	+	–	–	–

Фауре Е. В.[1], Швидкий В. В.[2], Щерба В. О.[3]

[1]Канд. техн. наук, доцент, докторант, доцент кафедри інформаційної безпеки та комп'ютерної інженерії Черкаського державного технологічного університету, Черкаси, Україна

[2]Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інформаційної безпеки та комп'ютерної інженерії Черкаського державного технологічного університету, Черкаси, Україна

[3]Ст. викладач кафедри прикладної математики Черкаського державного технологічного університету, Черкаси, Україна

КОМБІНОВАНЕ ФАКТОРІАЛЬНЕ КОДУВАННЯ ТА ЙОГО ВЛАСТИВОСТІ

У роботі запропоновано метод комбінованого факторіального кодування даних, спрямований на забезпечення контролю цілісності інформації, який передбачає комплексний захист від нав'язування хибних даних (імітозахист) і помилок у каналі зв'язку. Основна ідея запропонованого методу кодування полягає в поєднанні процедур повного факторіального кодування, що використовує перестановку в якості перевірної частини кодового слова, і циклічного надлишкового кодування (CRC). При цьому перевірна частина кодового слова комбінованого факторіального коду формується шляхом обчислення залишку від ділення перевірної частини кодового слова повного факторіального коду, представленої у вигляді многочлена, на кодовий поліном CRC-коду. Визначено основні властивості комбінованого факторіального коду, виконано оцінку достовірності передавання, крипто- й імітостійкості. Виконано порівняльний аналіз виявляючої здатності (ймовірності невиявленої кодом помилки) й енергетичного виграшу для повного та комбінованого факторіального кодування за умови незалежності помилок, що виникають у каналі зв'язку, та їх біноміального розподілу. Визначено шляхи поліпшення представленої оцінки ймовірності невиявленої факторіальним кодом помилки. Надано рекомендації щодо застосування повного і комбінованого факторіального кодування.

Ключові слова: факторіальний код, перестановка, контроль цілісності інформації, завадостійке кодування, достовірність передавання, стійкість.

Faure E. V.[1], Shvydkyi V. V.[2], Shcherba V. O.[3]

[1]PhD, Associate Professor, Post-Doctoral Associate, Associate Professor of Department of Information Security and Computer Engineering, Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

[2]PhD, Associate Professor, Associate Professor of Department of Information Security and Computer Engineering, Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

[3]Senior Lecturer of Department of Applied mathematics, Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

COMBINED FACTORIAL CODING AND ITS PROPERTIES

In this paper the authors propose a method of combined factorial data coding directed to the information integrity control that provides a comprehensive protection against intentional alteration of data and communication channel errors. The basic idea of the proposed method consists in combining of procedures of full factorial coding that uses a permutation as a codeword check value, and a cyclic redundancy coding (CRC). In this case a codeword check value of combined factorial code is generated from a codeword check value of full factorial code represented by a polynomial, by the CRC polynomial modulo. The basic properties of the combined factorial code are defined. The assessments of transmission reliability, cryptographic strength and strength against intentional alteration of data are evaluated. A comparative analysis of detecting ability (probability of an error undetected by the code) and energy gain for the full and combined factorial coding is done on the condition of independence of errors that appear in communication channel and their binomial distribution. The ways of improvement of the presented assessment of the probability of an undetected by factorial code error are defined. Recommendations for the use of full and combined factorial coding are given.

Keywords: factorial code, permutation, information integrity control, error control coding, transmission accuracy, strength.

REFERENCES

1. Vasylenko V. S, Chunar'ova A. V., Vasylenko M. Ju, Chunar'ov A. V. Pat. 75935 Ukrai'na, MPK N03M13/31 (2006.01). Sposib zabezpechennja cilisnosti informacii' na bazi kodu umovnyh lyshkiv ; zajavnyk ta patentovlasnyk Nacional'nyj aviacijnyj universytet. №u2012103515; zajavl. 26.03.2012; opubl. 25.12.2012, Bjul. №24, 4 p.
2. Vasylenko V. S, Chunar'ova A. V., Vasylenko M. Ju, Chunar'ov A. V. Pat. 75938 Ukrai'na, MPK N03M13/31 (2006.01). Sposib zabezpechennja cilisnosti informacii' na bazi lyshkovo-hemmingovogo kodu ; zajavnyk ta patentovlasnyk Nacional'nyj aviacijnyj universytet. – №u2012103518; zajavl. 26.03.2012; opubl. 25.12.2012, Bjul. №24, 4 p.
3. Goryachev A.V. Obnaruzhenie oshibok v perestanovkax, *Visnyk SumDU. Serija Tehnichni nauky*, 2009, No. 4, pp. 126–134.
4. Faure E'. V., Shvydkij V. V., Shherba A. I. Kontrol' celostnosti informacii na osnove faktorial'noj sistemy schisleniya, *Journal of Qafqaz University. Mathematics and computer science*, 2016, No. 2, Vol. 4. (V pechati).
5. Faure E'. V., Shvydkij V. V., Shherba V. A. Metod formirovaniya imitovstavki na osnove perestanovok, Zaxist informacii, 2014, No. 4, Vol. 16, pp. 334–340. Access mode: http://jrnl.nau.edu.ua/index.php/ZI/article/view/334/8755.
6. Faure E'. V., Shvydkij V. V., Shherba A. I. Metod formirovaniya vosproizvodimoj nepredskazuemoj posledovatel'nosti perestanovok, *Bezpeka informacii*, 2014, No. 3, Vol. 20, pp. 253–258. Access mode: http://jrnl.nau.edu.ua/index.php/Infosecurity/article/view/7552/8608.
7. Shvydkyj V. V., Klopko V. S. Doslidzhennja statystychnyh vlastyvostej kolizij pid chas formuvannja imitovstavky na osnovi perestanovok, *Avtomatyzacija ta komp'juterno-integrovani tehnologii' u vyrobnyctvi ta osviti: stan, dosjagnennja, perspektyvy rozvytku: materialy Vseukrai'ns'koi' naukovo-praktychnoi' Internet-konferencii', Cherkasy, 14–20 bereznja 2016 r.* Cherkasy, 2016 r, P. 17.
8. Lidl R., Niderrajter G. ; [per. s angl. pod red. Nechaeva V. I.] Konechnye polya: V 2 t. T. 2. Moscow, Mir, 1988, 822 p. (Redakciya literatury po matematicheskim naukam).
9. Piterson U., Ue'ldon E'.; [per. s angl. pod red. R. L. Dobrushina, S. I. Samojlenko] Kody, ispravlyayushhie oshibki. Moscow, Mir, 1976, 590 p. (Redakciya literatury po novoj texnike).
10. Prokis D. [per. s angl. pod red. D. D. Klovskogo]. Cifrovaya svyaz'. Moscow, Radio i svyaz', 2000, 800 p.
11. Teplov N. L. Pomexoustojchivost' sistem peredachi diskretnoj informacii. Moscow, Svyaz', 1964, 360 p.
12. Fink L. M. Teoriya peredachi diskretnyx soobshhenij. [Izd. 2-e, pererab. i dopoln.]. Moscow, Sovetskoe radio, 1970, 728 p.
13. Koopman P. Best CRC Polynomials [Electronic resource]. Access mode: http://users.ece.cmu.edu/~koopman/crc/index.html.

УДК 81'11+32+33: 004.773.2

Федушко С. С.

Асистент кафедри соціальних комунікацій та інформаційної діяльності Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна

РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ ВЕРИФІКАЦІЇ СОЦІАЛЬНО-ДЕМОГРАФІЧНИХ ДАНИХ УЧАСНИКА ВІРТУАЛЬНОЇ СПІЛЬНОТИ

Вирішено важливе завдання розроблення системи верифікації соціально-демографічних даних учасника віртуальної спільноти на основі проведення комп'ютерно-лінгвістичного аналізу інформаційного наповнення великої вибірки україномовних віртуальних спільнот. Предметом дослідження є методи та засоби перевірки достовірності соціально-демографічних характеристик учасників віртуальних спільнот на основі комп'ютерно-лінгвістичного аналізу результатів їх комунікативної взаємодії. Метою роботи є перевірка правдивості персональних даних, які учасники надають у своїх облікових даних на основі результатів комп'ютерно-лінгвістичного аналізу інформаційних слідів учасників веб-спільнот. Для практичної реалізації поставлених завдань розроблено структуру програмного забезпечення для верифікації соціально-демографічного портрета веб-учасника. Запропоновано метод верифікації персональних даних учасника віртуальної спільноти на основі аналізу інформаційних слідів учасників віртуальних спільнот. Уперше розроблено метод перевірки достовірності персональних даних веб-учасників, що дало змогу спроектувати засіб верифікації соціально-демографічних характеристик учасника веб-спільноти. У результаті проведених досліджень розроблено систему верифікації соціально-демографічних даних учасників віртуальних спільнот, яка формує верифіковані соціально-демографічні портрети цих учасників віртуальних спільнот. Також представлено користувацький інтерфейс розробленої системи верифікації соціально-демографічних даних учасників віртуальних спільнот. Отримані результати системи дозволяють підвищити ефективність загального процесу управління веб-спільнотами. Апробації розроблених методів і засобів для вирішення завдань у веб-адміністрування спільноти доводиться їх результативність та ефективність. Кількість фальшивих спрацювань системи верифікації не перевищує 18%.

Ключові слова: система верифікації, персональні дані, соціально-демографічні характеристики, аналіз, учасник, віртуальна спільнота.

НОМЕНКЛАТУРА

WWW – всесвітня мережа (англ. World Wide Web);
ВС – віртуальна спільнота;
ОЗ – обліковий запис;
СД – соціально-демографічний;
СДП – соціально-демографічний портрет;
СДХ – соціально-демографічні характеристика;
УВС – учасник віртуальної спільноти.

ВСТУП

Популярність віртуальних спільнот з кожним днем збільшується. Практично, таке інтерактивне спілкування у віртуальних спільнотах є невід'ємною частиною особистого та професійного життя сучасної людини.

Користувачі віртуальних спільнот надають про себе великі об'єми інформації, зокрема і конфіденційної.

Перевірка правдивості персональних даних, які учасники надають у своїх облікових даних є актуальним заданням у зв'язку з необхідністю виявлення протиправних дії веб-користувачів, які є образливими для опонентів з психологічного, фінансового, юридичного погляду. Зокрема, виявлення веб-користувачів, які займаються шантажем, надсилають листи з погрозами, поширюють брехливу і наклепницьку інформацію та займаються іншими видами електронного хуліганства, що полягає у проведенні комп'ютерно-лінгвістичного аналізу інформаційного наповнення доволі великої вибірки віртуальних спільнот Укрнету.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Вирішення актуальних завдань наукових досліджень у віртуальних спільнотах є необхідністю функціонування будь-якої віртуальної спільноти. Актуальні завдання сучасних наукових досліджень соціальних спільнот можна поділити на три типи: правові (вдосконалення системи правил комунікативної поведінки для УВС); організаційні (методи покращення функціонування системи віртуальних спільнот сприяє підвищенню ефективності та покращення функціонування веб-спільнот); економічні (розроблення нових механізмів та підходів до застосування інтернет-реклами, тарґетингу).

Підвищення ефективності функціонування ВС – результат виконання таких завдань:

– відсіювання небажаного інформаційного наповнення;
– підвищення якості інформаційного наповнення;
– фільтрація учасників за повнотою заповнення ОЗ персональними даними;
– зменшення витрат на модерування спільнотою;
– зменшення конфліктних ситуацій у спільноті;
– комп'ютерно-лінгвістичний аналіз достовірності персональних даних УВС;
– автоматизування комп'ютерно-лінгвістичного опрацювання контенту.

Метою роботи є розроблення методів і засобів перевірки достовірності СДХ учасників віртуальних спільнот за результатами комп'ютерно-лінгвістичного аналізу інформаційних слідів учасників ВС.

Мета роботи визначає необхідність виконання таких актуальних задач:

– дослідити специфіку та виділити основні ознаки онлайн-комунікації УВС шляхом комп'ютерно-лінгвістичного аналізу їхнього інформаційного наповнення;
– спроектувати структуру програмного комплексу комп'ютерно-лінгвістичної перевірки достовірності СДХ учасника віртуальної спільноти;
– створити засіб верифікації персональних даних учасників веб-спільноти;
– апробувати програмний комплекс комп'ютерно-лінгвістичної перевірки достовірності соціально-демографічних характеристик УВС.

© Федушко С. С., 2016
DOI 10.15588/1607-3274-2016-3-11

Отже, реалізація наведених вище завдань вагомо впливає на функціонування ВС, що дає можливість спростити та пришвидшити виконання обов'язків адміністратора ВС.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

У дослідженнях віртуальних спільнот у WWW науковці виокремлюють чимало напрямів, оскільки у зв'язку з появою нових тенденцій розвитку віртуальних спільнот сфера досліджень збільшується буквально щодня.

Проаналізувавши сучасні праці науковців [1–5], виявлено, що в останні роки з'явилося багато публікацій про особливості функціонування віртуальних спільнот.

Дослідження віртуальних спільнот почались з вивчення комп'ютерно-опосередкованої комунікації – комунікації, яка ґрунтується на використанні комп'ютера, що спрощує та розширює сферу комунікації [2] та дослідженням соціальної зміни пов'язана відчуження і втратою спільноти у кіберпросторі, створюючи спільноти за інтересами [3], спричиненої впровадженням комп'ютерних технологій. Поняття та функціонування віртуальних спільнот є дискусійним питання для багатьох науковців [3].

Тематичні конференції (веб-форуми та дискусійні групи) в мережі Інтернет [1], електронні дошки оголошень та інші види комп'ютерно-опосередкованої комунікації виникли з метою відтворити відчуття спільноти, що з'являється в учасників ВС, які беруть участь у комунікації з метою відновлення соціальних зв'язків у віртуальній спільноті.

Компонента спільноти як зв'язку певних груп, має найбільше значення в контексті комп'ютерно-опосередкованої комунікації і твердить, що ці три ознаки є в комп'ютерно-опосередкованій комунікації.

Віртуальна спільнота [4] – це група людей зі спільними інтересами, регулярною та тривалою комунікацією за допомогою Інтернету через спільне місцезнаходження або механізм. З іншого боку, віртуальну спільноту визначають як мережу взаємозв'язків осіб у кіберпросторі [5]. Часто веб-спільноти суттєво впливають на їхніх учасників, пропонуючи можливості навчального середовища, досягнення інтерактивності та способи обміну архівів контактів у системах знань.

Аналіз діяльності віртуальних спільнот є об'єктом наукових досліджень, серед яких чітко виділяються три основні напрями: аналіз дій учасників (web usage mining); аналіз веб-структур (web structure mining); аналіз контенту (web content mining).

Однією із важливих проблем аналізу контенту ВС сьогодні є аналіз персональних даних ВС. Попри суттєве значення для подальшого розвитку цієї сфери досліджень досі не розроблено дієвих методів аналізу саме персональної інформації в обліковому записі УВС.

Зважаючи на вищенаведений аналіз наукових праць, серед відомих літературних джерел відчутним є брак ґрунтовних досліджень з верифікації персональної інформації користувачів мережі Інтернет та дослідження достовірності СДХ учасників соціальних комунікацій, зокрема ВС з метою покращення їх функціонування. Це, своєю чергою, породжує актуальну проблему розроблення нових методів та засобів аналізу достовірності СДХ учасників віртуальних спільнот, які би мали належне наукове обґрунтування, формалізацію, прогнозовану результативність та універсальність.

3 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Ефективне функціонування спільноти залежить від ряду чинників, як об'єктивних, так і суб'єктивних. Проте, наявні на сьогодні методи та засоби, що використовуються у глобальних сервісах, в повній мірі не виконують усіх завдань, які б задовольнили потреби власників та модераторів в управління віртуальними проектами, зокрема віртуальними спільнотами. Розроблення методів та засобів перевірки достовірності персональних даних у обліковому записі користувача є одним з найбільш значимих факторів, які впливають на покращення функціонування віртуальної спільноти.

Дослідження, виконані під час роботи, ґрунтуються на методах структурного аналізу для дослідження інформаційного наповнення веб-учасників та методи аналізу веб-контенту, спрямовані на дослідження вербальних характеристик текстів. Для вирішення завдань моделювання структури системи валідації СД портрета веб-учасника використано теоретико-множинні підходи та апарат теорії реляційних баз даних. Засоби формування соціально-демографічних портретів веб-учасників розроблено на основі сучасних веб-технологій.

До програмного засобу для верифікації СДП веб-учасника ставляться високі вимоги, адже цей засіб в реальному часі повинен опрацьовувати великий масив динамічної інформації. Також треба звертати увагу на постійний ріст активності учасників популярної ВС, які невпинно генерують не завжди якісне та адекватне, до цілей позиціонування спільноти у вебі, інформаційне наповнення. Звичайно, такий сценарій розвитку ВС є перешкодою для ефективного функціонування спільноти в конкурентному середовищі.

Серед задач, які вимагають окремого підходу до валідації персональних даних УВС, методом комп'ютерно-лінгвістичного аналізу контенту, виокремлено наступні:

– брак якісного та достовірного інформаційного наповнення;

– мінімалізація анонімності користувачів [6–7];

– сприйняття спільноти, як платформи для довільної реалізації своїх бізнес ідей [8–9];

– невелика успішність ВС, що призводить до низької рентабельності веб-проекту;

– необхідність великих капіталовкладень власниками веб-спільноти;

– вагомі та необґрунтовані затрати часу у модеруванні спільнотою;

– уникнення загроз інформаційної безпеки учасників ВС, що можуть призвести до кримінальної відповідальності власника спільноти [10];

– низька конкурентоспроможність в порівнянні з іншими спільнотами;

– проблеми в управлінні віртуальною спільнотою (високий рівень конфліктів, низький авторитет модераторів та ін.);

– покращення методів інтернет-таргетингу [11–12].

Усі вищеперераховані задачі враховані при розроблення структури програмного забезпечення для верифікації *соціально-демографічного портрета веб-учасника* [13–16]. Розроблення саме програмного засобу верифікації – «Верифікатор СДХ веб-учасника» (див. рис. 1) вирішить багато актуальних задач в модеруванні та управлінні спільнотами у WWW.

Рисунок 1 – Схема функціонування системи «Верифікатор СДХ веб-учасника»

Для верифікації СДХ та побудови соціально-демографічного портрета УВС автором розроблено чітку структуру програмного забезпечення «Верифікатор соціально-демографічних характеристик веб-учасника». Ключовим елементом цієї структури є схема функціонування цієї системи. Тепер детально опишемо кожен етап схеми функціонування системи «Верифікатор соціально-демографічних характеристик веб-учасника».

З переліку віртуальних спільнот, які належать власнику чи доступні модератору, здійснюється вибір віртуальної спільноти і з бази учасників обраної віртуальної спільноти обираємо конкретного учасника або множини учасників.

Соціально-демографічний портрет будуємо лише з верифікованих СДХ учасника ВС, тобто з персональних даних учасника, достовірність яких перевірено методом комп'ютерно-лінгвістичного аналізу. Тож, побудова СД портрета ґрунтується на верифікації СДХ учасника ВС. Побудова СДП відбуваєте згідно алгоритму формування СДП учасника віртуальної спільноти. Блок-схема алгоритму формування СДП зображено на рис. 2.

Мета алгоритму – перевірити достовірність максимальної кількості персональної інформації, яку УВС вказав у своєму обліковому записі методом комп'ютерно-лінгвістичної верифікації СДХ учасника ВС.

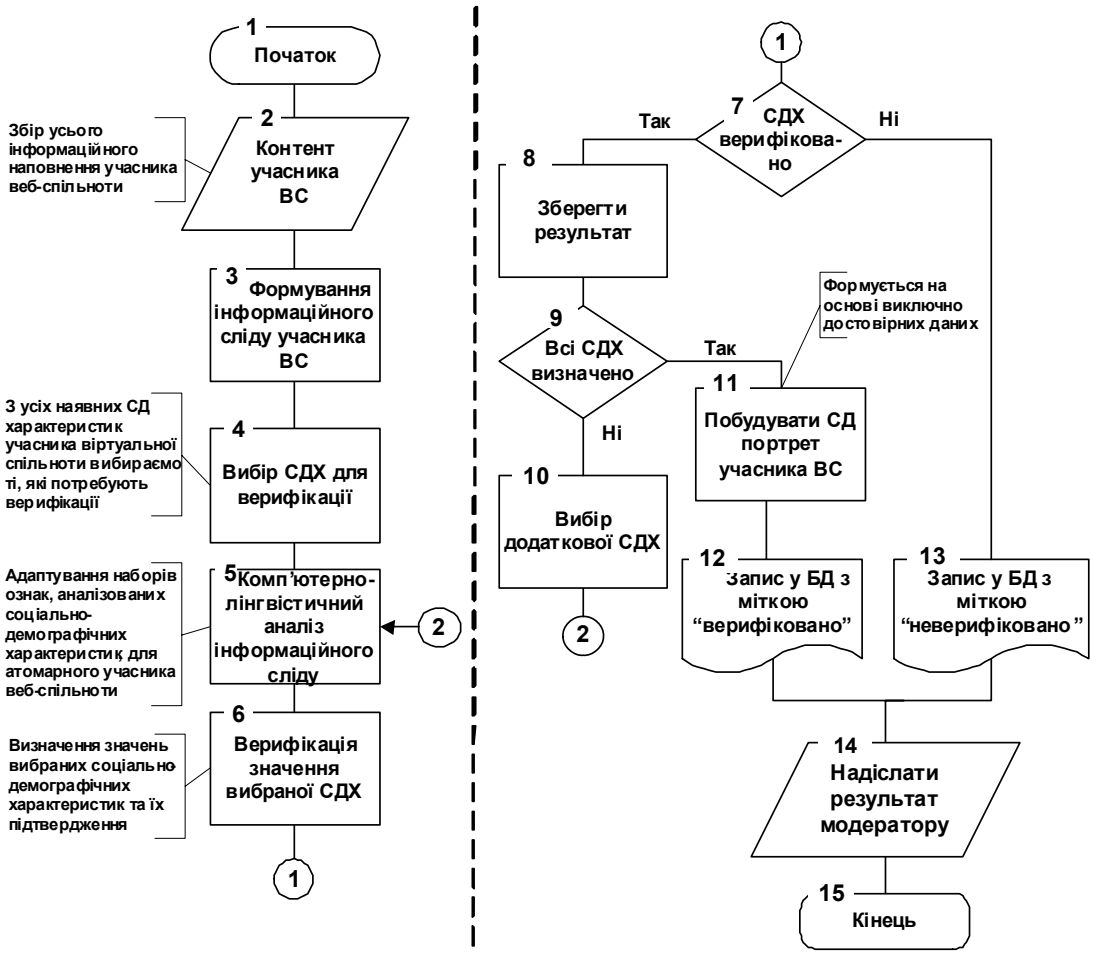


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритму формування СДП учасника віртуальної спільноти

Основою алгоритму є інформаційний слід УВС – інформаційного наповнення віртуальної спільноти конкретного УВС.

Відповідно до цього алгоритму, є можливість здати параметри вибору характеристик, тобто обрати саме потрібні СДХ для верифікації. Перевірку достовірності всіх СД характеристик налаштовано по замовчуванню.

Соціально-демографічний портрет УВС будується виключно з верифікованих СДХ. Тобто відповідність вказаним даним у обліковому записі реальним характеристикам УВС. На основі верифікації СДХ та побудованого СДП система «Верифікатор СДХ веб-учасника» класифікує учасників за фактом здійснення чи нездійснення перевірки достовірності.

Формування соціально-демографічного портрета. На цьому етапі відбувається саме вже формування СДП на основі результатів верифікації СДХ. Система формує результати у табличному вигляді.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Для вирішення вищенаведених завдань потрібно спроектувати програмний засіб для верифікації персональних даних УВС. Зважаючи на специфіку середовищ соціальних комунікацій, варто звернути увагу на деякі спеціальні вимоги до програмного засобу «Верифікатор СДХ веб-учасника»: задоволення потреб користувача при розв'язанні конкретної функціональної задачі; зрозумілість і логічність виводу результатів, що зменшить час прийняття рішення та покращить їх якість; можливість нарощення функціональності, тобто адаптування та збільшення функціонального блоку програмного засобу відповідно до потреб конкретного учасника [16]; простота аналізу, збереження та використання результатів, впровадження їх у діяльність віртуальної спільноти. Відповідно до цих вимог створено програмне забезпечення для верифікації СДП веб-учасника (рис. 3).

Результати програми «Верифікатор соціально-демографічних характеристик веб-учасника» з результатами верифікації даних учасника веб-форуму «Львів. Форум Рідного Міста» – Andreas представлено на рис. 4.

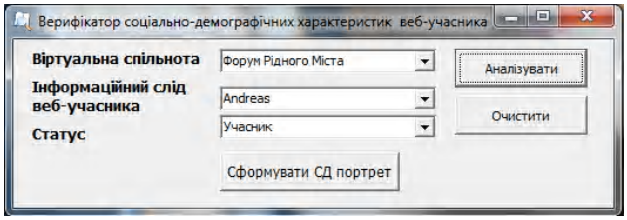


Рисунок 3 – Запит на верифікацію облікового запису веб-форуму «Львів. Форум Рідного Міста» користувача Andreas

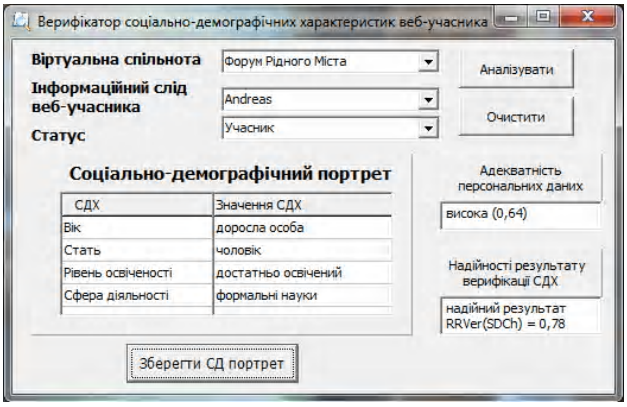


Рисунок 4 – Результати верифікації СДП учасника «Львів. Форум Рідного Міста» – Andreas

Модель словника СД маркерів є складовою цієї системи «Верифікатор соціально-демографічних характеристик веб-учасника».

Для ефективного використання програмного засобу «Верифікатор соціально-демографічних характеристик веб-учасника» результати його роботи автоматично імплементовані у функціонування ВС.

Апробація такого методу здійснено у таких віртуальних спільнотах [17–18]: «Львів. Форум Рідного Міста», «Малеча», «Дівочі посиденьки», «Rock.Lviv.Ua» та «Теревені».

5 РЕЗУЛЬТАТИ

За алгоритмом обчислення надійності результату процесу верифікації СДХ визначено кількість фальшивих спрацьовувань системи верифікації СДХ учасників п'ятьох досліджуваних віртуальних спільнот. Результати подано у табличному варіанті (див. табл. 1).

6 ОБГОВОРЕННЯ

На сьогоднішній день для задач верифікації інформації УВС існують лише дорогі комплексі рішення, які не задовольняють усіх потреб власників в задачі управління ВС. Розроблення якісного та відносно недорогого механізму валідації СДХ зумовлене потребою в ідентифікації користувачів на етапі бурхливого розвитку віртуальної спільноти.

Відносна кількість фальшивих спрацьовувань системи верифікації персональних даних УВС на тестовій множині учасників п'яти популярних веб-спільнот прийнятна для завдань управління ВС і фактично є ймовірністю помилки системи (табл. 1).

Ефективність системи верифікації персональних даних [19] показує, що у 2–4 рази (залежно від типу, мети та специфіки веб-спільноти) зменшується навантаження з перевірки персональних даних на модераторів, відповідно і суттєвим є зниження часових та фінансових затрат на адміністрування віртуальних спільнот.

Таблиця 1 – Результативність системи верифікації СД характеристик

Віртуальні спільноти	Малеча	Дівочі посиденьки	Rock.Lviv.Ua	Теревені	Львів. Форум Рідного Міста
Кількість перевірених учасників	1631	504	216	386	345
Відносна кількість фальшивих спрацьовувань, %	13	8	16	18	7
Ефективність, %	70	62	55	58	62

ВИСНОВКИ

У роботі вирішено актуальну задачу розроблення системи верифікації інформації учасників ВС, на основі комп'ютерно-лінгвістичних методів верифікації масиву користувацького контенту ВС.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у науковому обгрунтуванні та розробленні методів та засобів верифікації СДХ учасників веб-спільнот.

Уперше розроблено метод перевірки достовірності персональних даних ВС, який полягає у порівнянні заявлених СДХ у облікових записах ВС із їхнього СДП, які сформовані на основі результатів комп'ютерно-лінгвістичного аналізу інформаційних слідів ВС, що дало змогу спроектувати засіб верифікації СДХ учасника веб-спільноти. Удосконалено метод адміністрування ВС, що дало змогу істотно зменшити кількість недостовірного контенту ВС та виявляти неправдиві персональні дані веб-учасників.

Розроблено метод комп'ютерно-лінгвістичного аналізу інформаційного сліду ВС шляхом відбору та аналізу особистісних лексико-семантичних та лексико-синтаксичних, граматичних особливостей мовлення кожного окремого ВС та побудови його СДП, що дає змогу верифікувати персональні дані, які задекларував цей УВС.

Практичне значення одержаних результатів роботи зумовлено тим, що вони дають змогу перевірити достовірність персональних даних УВС на основі аналізу їхніх інформаційних слідів.

Розроблено алгоритми верифікації персональних даних облікових записів УВС, шляхом побудови їхніх інформаційних слідів на основі результатів аналізу контенту ВС, що дало змогу підвищити їхню керованість та ефективність адміністрування.

Розроблено структуру програмного комплексу засобів перевірки достовірності даних шляхом формування СДП для автоматизації процесу верифікації масиву користувацького інформаційного наповнення.

Кількість фальшивих спрацювань системи верифікації СДХ учасника веб-спільноти не перевищує 18%.

Таким чином, результати апробації комплексу комп'ютерно-лінгвістичної перевірки достовірності СДХ учасника веб-спільноти показали, що запропонований метод перевірки достовірності соціально-демографічних характеристик УВС на основі методів верифікації масиву користувацького інформаційного наповнення WWW ефективніший від відомих методів, і дало змогу реалізувати систему підтримки прийняття рішень для фахівця з управління веб-спільнотами у сфері опрацювання персональних даних.

Перспективи подальших досліджень полягають у застосуванні запропонованого підходу для вирішення практичних задач управління віртуальними спільнотами.

ПОДЯКИ

Роботу виконано в межах зареєстрованих наукових тематик кафедри соціальних комунікацій та інформаційної діяльності Національного університету «Львівська політехніка», зокрема «Розробка методів і засобів реалізації соціальних систем в мережі Інтернет в умовах розвитку інформаційного суспільства» (номер держреєстрації 0110U005019) та «Аналіз та моделювання процесів соціальних комунікацій у Інтернеті як основи інформа-ційного суспільства» (номер держреєстрації 0113U005285).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Jones S. Cybersociety: Computer-mediated communication and community / S. Jones. – Thousand Oaks, CA : Sage, 1995. – P. 1–34.
2. Oldenburg R. Great good place: Cafes, coffee shops, community centers, beauty parlors, general stores, bars, hangouts, and how they get you through the day / R. Oldenburg. – NY : Paragon House. – 2009. – P. 185–243.
3. Ludlow P. Crypto anarchy, cyberstates, and pirate utopias / P. Ludlow. – Cambridge, Massachusetts : MIT Press, 2001. – P. 65–129.
4. Arinze B. Some antecedents and effects of trust in virtual communities / B. Arinze, C. Ridings, D. Gefen // Journal of Strategic Information Systems. – 2002. – № 11. – P. 271–395.
5. Rheingold H. The virtual community: Homesteading on the electronic frontier / H. Rheingold. – Cambridge, Massachusetts : MIT Press, 2000. – P. 169–229.
6. Федушко С. Алгоритм валідації інтернет-імен користувачів віртуальних спільнот / С. Федушко, Ю. Сєров // Вісник НУ «ЛП» : Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – Львів, 2011. – № 719. – С. 215–219.
7. Fedushko S. Design of registration and validation algorithm of member's personal data / S. Fedushko, Yu. Syerov // International Journal of Informatics and Communication Technology. – 2013. – Vol. 2, No. 2. – P. 93–98. DOI: 10.11591/ij-ict.v2i2.3960.
8. Andrukhiv A. Integrating new library services into the University Information System / A. Andrukhiv, M. Sokil, S. Fedushko // Library management. – 2014. – No. 1 (6). – P. 79–87.
9. Fedushko S. Concept of Strategic Positioning for Travel Agency in Social Networks / S. Fedushko, J. Bekesh // Open J. of Communications and Software. – 2014. – Vol. 1(2). – P. 1–9.
10. Fedushko S. Algorithm of the cyber criminals identification / S. Fedushko, N. Bardyn // Global Journal of Engineering, Design & Technology. – 2013. – Vol. 2, No. 4. – P. 56–62.
11. Федушко С. Особливості визначення та опису соціально-демографічних характеристик в соціальних комунікаціях / С. Федушко // Вісник НУ «ЛП» : Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – № 694. – Львів, 2011. – С. 75–85.
12. Peleschyshyn A. Gender similarities and differences in online identity and Internet communication / A. Peleschyshyn, S. Fedushko // Computer Science and Information Technologies: Proc. of the Intern. Conf. «CSIT-2010». – Lviv, 2010. – P. 195–198.
13. Fedushko S. Development of a software for computer-linguistic verification of socio-demographic profile of web-community member [Electronic resource] / S. Fedushko // Webology. – 2014. – Vol. 11, No. 2, Article 126. – Available at: http://www.webology.org/2014/v11n2/a126.pdf DOI: 10.6084/m9.figshare.205664.
14. Syerov Yu. The computer-linguistic analysis of socio-demographic profile of virtual community member / Yu. Syerov, A. Peleschyshyn, S. Fedushko // Intern. Journal of Computer Science and Business Informatics. – 2013. – Vol. 4 (1). – P. 1–13.
15. The verification of virtual community member's socio-demographic profile / [Fedushko S., Peleschyshyn O., Peleschyshyn A., Syerov Yu.] // Advanced Computing: An International Journal. – AIRCC, 2013. – Vol. 4, No. 3. – P. 29–38. DOI: 10.5121/acij.2013.4303.
16. Verification of socio-demographic characteristics of virtual community members / [Fedushko S., Peleshchyshyn A., Korzh R., Syerov Yu.] // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science. – Lviv-Slavske, 2014. – P. 632.
17. The cataloging of virtual communities of educational thematic [Electronic resource] / [Korzh R., Peleschyshyn A., Syerov Yu., Fedushko S.] // Webology. – 2014. – Vol. 11, No. 1, Article 117. – 16 p. Available at: http://webology.org/2014/v11n1/a117.pdf. DOI: 10.6084/m9.figshare.2056650.
18. Determination of the account personal data adequacy of web-community member / Fedushko S., Syerov Yu., Peleschyshyn A., Korzh R. // Intern. Journal of Computer Science and Business Informatics. – Vol. 15 (1). – 2015. – P. 1–12.
19. Федушко С. С. Методи та засоби комп'ютерно-лінгвістичного аналізу достовірності соціально-демографічних характеристик учасників віртуальних спільнот: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 10.02.21 – «Структурна, прикладна та математична лінгвістика» / Федушко С. С.; Нац. ун-т «Львів. Політехніка». – Л., 2015. – 20 с. DOI: 10.13140/RG.2.1.2183.9121.

Стаття надійшла до редакції 01.03.2016.
Після доробки 14.05.2016.

Федушко С. С.
Ассистент кафедры социальных коммуникаций и информационной деятельности Национального университета «Львовская политехника», Львов, Украина

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ВЕРИФИКАЦИИ СОЦИАЛЬНО-ДЕМОГРАФИЧЕСКИХ ДАННЫХ УЧАСТНИКОВ ВИРТУАЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ

Решено важная задача разработки системы верификации социально-демографических данных участника виртуального сообщества на основе проведения компьютерно-лингвистического анализа информационного наполнения большой выборки украиноязычных виртуальных сообществ. Предметом исследования являются методы и средства проверки подлинности социально-демографических характеристик участников виртуальных сообществ на основе компьютерно-лингвистического анализа результатов их коммуникативного взаимодействия. Целью работы является проверка достоверности персональных данных, которые участники предоставляют в своих учетных данных на основе результатов компьютерно-лингвистического анализа информационных следов участников веб-сообществ. Для практической реализации поставленных задач разработана структура программного обеспечения для верификации социально-демографического портрета веб-участника. Предложен метод верификации персональных данных участника виртуального сообщества на основе анализа информационных следов участников виртуальных сообществ. Впервые разработан метод проверки достоверности персональных данных о участников, что позволило спроектировать средство верификации социально-демографических характеристик участника веб-сообщества. В результате проведенных исследований разработана система верификации социально-демографических данных участников виртуальных сообществ, которая формирует верифицированы социально-демографические портреты этих участников виртуальных сообществ. Также представлены интерфейс разработанной системы верификации социально-демографических данных участников виртуальных сообществ. Полученные результаты системы позволяют повысить эффективность общего процесса управления веб-сообществами. Апробации разработанных методов и средств для решения задач в веб-администрирования сообщества приходится их результативность и эффективность. Количество фальшивых срабатываний системы верификации не превышает 18%.

Ключевые слова: система верификации, персональные данные, социально-демографические характеристики, анализ, участник, виртуальная сообщество.

Fedushko S. S.
Assistant of Social Communications and Information Activities Department of Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

DEVELOPMENT OF VERIFICATION SYSTEM OF SOCIO-DEMOGRAPHIC DATA OF VIRTUAL COMMUNITY MEMBER

The important task of developing verification system of data of virtual community member on the basis of computer -linguistic analysis of the content of a large sample of Ukrainian virtual communities is solved. The subject of research is methods and tools for verification of web-members socio-demographic characteristics based on computer-linguistic analysis of their communicative interaction results. The aim of paper is to verifying web-user personal data on the basis of computer-linguistic analysis of web-members information tracks. The structure of verification software for web-user profile is designed for a practical implementation of assigned tasks. The method of personal data verification of web-members by analyzing information track of virtual community member is conducted. For the first time the method for checking the authenticity of web members personal data, which helped to design of verification tool for socio-demographic characteristics of web-member is developed. The verification system of data of web-members, which forms the verified socio-demographic profiles of web-members, is developed as a result of conducted experiments. Also the user interface of the developed verification system web-members data is presented. Effectiveness and efficiency of use of the developed methods and means for solving tasks in web-communities administration is proved by their approbation. The number of false results of verification system is 18%.

Keywords: system of verification, personal data, socio-demographic characteristics, analysis, member, virtual community.

REFERENCES

1. Jones S. Cybersociety: Computer-mediated communication and community. Thousand Oaks, CA, Sage, 1995, pp. 1–34.
2. Oldenburg R. Great good place: Cafes, coffee shops, community centers, beauty parlors, general stores, bars, hangouts, and how they get you through the day. NY, Paragon House, 2009, pp. 185–243.
3. Ludlow P. Crypto anarchy, cyberstates, and pirate utopias. Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 2001, pp. 65–129.
4. Arinze B., Ridings C., Gefen D. Some antecedents and effects of trust in virtual communities, *Journal of Strategic Information Systems,* 2002, No. 11, pp. 271–395.
5. Rheingold H. The virtual community: Homesteading on the electronic frontier. Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 2000, pp. 169–229.
6. Fedushko S., Syerov Yu. Alhorytm validatsiyi internet-imen korystuvachiv virtual'nykh spil'not, V*isnyk NU «LP»: Kompiyuterni nauky ta informatsiyni tekhnolohiyi*. L'viv, 2011, No. 719, pp. 215–219.
7. Fedushko S., Syerov Yu. Design of registration and validation algorithm of member's personal data, *International Journal of Informatics and Communication Technology*, 2013, Vol. 2, No. 2, pp. 93–98. DOI: 10.11591/ij-ict.v2i2.3960.
8. Andrukhiv A., Sokil M., Fedushko S. Integrating new library services into the University Information System, *Library management*, 2014, No. 1 (6), pp. 79–87.
9. Fedushko S., Bekesh J. Concept of Strategic Positioning for Travel Agency in Social Networks, *Open J. of Communications and Software*, 2014, Vol. 1(2), pp. 1–9.
10. Fedushko S., Bardyn N. Algorithm of the cyber criminals identification, *Global Journal of Engineering, Design & Technology,* 2013, Vol. 2, No. 4, pp. 56–62.
11. Fedushko S. Osoblyvosti vyznachennya ta opysu sotsial'no-demohrafichnykh kharakterystyk v sotsial'nykh komunikatsiyakh, *Visnyk NU «LP», Komiyuterni nauky ta informatsiyni tekhnolohiyi*, No. 694, L'viv, 2011, pp. 75–85.
12. Peleschyshyn A., Fedushko S. Gender similarities and differences in online identity and Internet communication, *Computer Science and Information Technologies: Proc. of the Intern. Conf. «CSIT-2010»*. Lviv, 2010, pp. 195–198.
13. Fedushko S. Development of a software for computer-linguistic verification of socio-demographic profile of web-community member [Electronic resource], *Webology*, 2014, Vol. 11, No. 2, Article 126. Available at: http://www.webology.org/2014/v11n2/a126.pdf. DOI: 10.6084/m9.figshare.205664.
14. Syerov Yu., Peleschyshyn A., Fedushko S. The computer-linguistic analysis of socio-demographic profile of virtual community member, *Intern. Journal of Computer Science and Business Informatics*, 2013, Vol. 4 (1), pp. 1–13.
15. Fedushko S., Peleschyshyn O., Peleschyshyn A., Syerov Yu. The verification of virtual community member's socio-demographic profile, *Advanced Computing: An International Journal.* – AIRCC, 2013, Vol. 4, No. 3, pp. 29–38. DOI: 10.5121/acij.2013.4303.
16. Fedushko S., Peleshchyshyn A., Korzh R., Syerov Yu. Verification of socio-demographic characteristics of virtual community members, / *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science*. Lviv-Slavske, 2014, pp. 632.
17. Korzh R., Peleschyshyn A., Syerov Yu., Fedushko S. The cataloging of virtual communities of educational thematic [Electronic resource], *Webology,* 2014, Vol. 11, No. 1, Article 117, 16 p. Available at: http://webology.org/2014/v11n1/a117.pdf. DOI: 10.6084/m9.figshare.2056650.
18. Fedushko S., Syerov Yu., Peleschyshyn A., Korzh R. Determination of the account personal data adequacy of web-community member, *Intern. Journal of Computer Science and Business Informatics,* 2015, Vol. 15 (1), pp. 1–12.
19. Fedushko S. S. Methods and means of computer-linguistic verification of web communities members socio-demographic characteristics. Thesis for a Ph. D degree in specialty 10.02.21 – structural, applied and mathematical linguistics. Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2015, 20 p. DOI: 10.13140/RG.2.1.2183.9121 [in Ukrainian].

УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

УДК 629.764

Авдєєв В. В.

Д-р техн. наук, професор, професор кафедри систем автоматизованого управління Дніпропетровського національного університету ім. О. Гончара, Дніпропетровськ, Україна

ТОЧНІСТЬ І ЗАПАС СТІЙКОСТІ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ РАКЕТИ

Розроблена методика отримання оцінок показників точності компенсації збурювального прискорення спираючись на лінійну стаціонарну в околі певної точки траєкторії модель плоского обертального руху ракети космічного призначення із врахуванням інерції виконавчого пристрою. Кількісно вони визначаються двома векторами похибок, координати яких – це нескладні аналітичні залежності від коефіцієнтів рівнянь руху і закону регулювання.

Метою дослідження є встановлення зв'язку між координатами векторів похибок і запасом стійкості системи на площині коренів характеристичного поліному, що дасть можливість обґрунтованого вибору коефіцієнтів закону регулювання на початковому етапі розробки системи управління.

Вперше з урахуванням специфіки ракети космічного призначення розроблена методика встановлення зв'язку між координатами векторів похибок при дії лінійного збурювального прискорення, коефіцієнтами закону регулювання, до якого входять чотири координати вектору стану, і запасом стійкості системи стабілізації обертального руху на площині коренів характеристичного поліному.

Визначені три незалежних координати векторів похибок, що дає можливість варіації коефіцієнта закону регулювання при кутовій швидкості ракети або рульового органу виходячи із критерію найбільшого запасу стійкості без зміни показників точності.

Результати роботи можуть бути використані для прийняття технічних рішень при проектуванні системи управління обертальним рухом ракети.

Ключові слова: похибки стабілізації, запас стійкості, закон регулювання.

НОМЕНКЛАТУРА

АС – автомат стабілізації;

ОУ – об'єкт управління;

РКП – ракета космічного призначення;

СС – система стабілізації;

ХП – характеристичний поліном;

$\boldsymbol{a}, \boldsymbol{a}^*$ – матриця об'єкту управління, системи стабілізації обертального руху ракети у площині рискання відповідно;

$a_{\psi\psi}, a'_{\psi\psi}, a_{\psi\delta}$ – коефіцієнти рівнянь обертального руху ракети у площині рискання;

b, c – вектори коефіцієнтів при сигналі управління та збурювальному прискоренні;

$\mathbf{C}$ – матриця керованості;

er_0, er_1 – вектори похибок;

$er_{01}, er_{11}, er_{13}$ – незалежні координати векторів похибок;

g_1, g_2 – позначення в рівняннях (12), (13), (14);

$k_\psi, k'_\psi, k_\delta, k'_\delta$ – коефіцієнти закону регулювання;

$m(t)$ – збурювальне прискорення залежно від часу t;

$m_0, \dot{m}_0$ – постійна складова $m(t)$, його похідна за часом;

$Q, q_1 - q_4$ – характеристичний поліном, його коефіцієнти;

s – змінна комплексного типу;

T_{AC} – постійна часу автомата стабілізації;

$\boldsymbol{u}$ – управління – сигнал на виході регулятора;

$\boldsymbol{x}$ – вектор стану системи стабілізації обертального руху ракети;

$\delta, \dot{\delta}$ – кут повороту рульового органу, його похідна за часом;

Δ – позначення у рівнянні (10);

η – запас стійкості на площині коренів характеристичного поліному;

© Авдєєв В. В., 2016
DOI 10.15588/1607-3274-2016-3-12

μ – $1/T_{AC}^2$;

υ – позначення в рівняннях (12), (14);

ξ – коефіцієнт демпфування автомата стабілізації;

ψ, $\dot{\psi}$ – кут рискання ракети, його похідна за часом.

ВСТУП

Особливість ракети комічного призначення (РКП) як об'єкта управління рухом в широкому протягом польоту діапазоні масово-інерційних характеристик, швидкостей і висоти, а також в наявності осциляторів, обумовлених кінцевою жорсткістю корпусу та коливаннями рідкого палива [1]. Це ускладнює задачу підтримання у заданих межах кінематичних параметрів при дії збурювальних факторів і нерідко в процесі проектування контурів управління вимагає прийняття компромісних рішень з метою досягнення заданих показників системи стабілізації (СС). Для проектування контурів управління найбільш поширено знайшли використання методи передатних функцій і частотних характеристик, кореневого годографа та аналітичного конструювання регуляторів [2]. Передатні функції зручні для оцінки точності стабілізації, частотні і кореневі – для оцінки запасу стійкості та швидкодії, тоді як метод аналітичного конструювання визначає параметри контуру управління виходячи з якості перехідного процесу компенсації збурень, яка кількісно характеризується критерієм переважно у вигляді інтегралу від квадратів координат вектору стану.

Об'єктом дослідження є контур управління СС плоского обертального руху РКП, предметом дослідження є залежність показників точності компенсації збурювальних факторів і запасу стійкості від параметрів контуру управління. Метою роботи є встановлення зв'язку між точністю стабілізації при дії лінійного збурення, запасом стійкості на площині коренів характеристичного поліному СС і коефіцієнтами закону регулювання.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Згідно прийнятому формалізму дослідження систем автоматичного регулювання їх прийнято розділяти на об'єкт управління (ОУ) і регулятор. Одна із особливостей РКП у тому, що рівняння збуреного руху в площині рискання і в площині тангажа однакові, тому під ОУ в даній роботі мається на увазі обертальний рух ракети як твердого тіла у площині рискання, з дослідження якого починається процес проектування СС [3]. З використанням методу заморожених коефіцієнтів [4] модель ОУ описується рівнянням:

$$\dot{x} = a \cdot x + b \cdot u + c \cdot m\,, \qquad (1)$$

де координатами вектору стану x є кут рискання ψ, кутова швидкість $\dot{\psi}$, кут повороту руля курсу δ і кутова швидкість $\dot{\delta}$, тобто $x^T = \left[\psi \;\; \dot{\psi} \;\; \delta \;\; \dot{\delta}\right]$.

На вхід ОУ діє управління u – сигнал регулятора, залежність якого від координат вектору стану може бути встановлена різними методами, зокрема, методом аналітичного конструювання [2], модального управління [5] чи виходячи із показників точності компенсації дії збурювального обертального прискорення m, як це прийнято у даній роботі. У випадку РКП його основними складовими є відхилення конструкції від геометричної і масової симетрії та боковий вітер на атмосферній ділянці польоту.

Функцію регулятора в СС виконує автомат стабілізації (АС), виходом якого є сигнал u, що входить в рівняння (1). Залежність u від координат вектору стану є закон регулювання.

Динамічні характеристики виконавчого пристрою АС прийнято включати в математичну модель ОУ [3], тому елементами матриці a (1) є не тільки традиційні коефіцієнти [3, 6] $a_{\psi\psi}$, $a'_{\psi\psi}$, $a_{\psi\delta}$, які залежать від параметрів РКП і траєкторії, а й постійна часу АС T_{AC} та коефіцієнт демпфування ξ:

$$a = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{\psi\psi} & a'_{\psi\psi} & a_{\psi\delta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\mu & -\xi \cdot \mu \cdot T_{AC} \end{bmatrix}, \qquad (2)$$

де $\mu = 1/T_{AC}^2$.

Збурення m (1) впливає тільки на кут рискання ψ та його похідні, а скалярне управління u – на кут повороту руля δ і його похідні, тому 4г1 – матриці b і c такі:

$$b^T = [0\;0\;0\;\mu], \quad c^T = [0\;1\;0\;0]. \qquad (3)$$

Ставиться задача розробити методику встановлення зв'язку між елементами вектору похибок СС при компенсації лінійного відносно часу збурення, запасом стійкості на площині коренів характеристичного поліному і коефіцієнтами закону регулювання.

Наявність такої методики дасть можливість на початковому етапі розробки СС визначати коефіцієнти закону регулювання виходячи із вимог точності і запасу стійкості.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Підтримання кінематичних параметрів РКП у заданих межах, тобто стабілізація руху, через широкий в процесі польоту діапазон параметрів та наявність осциляторів, обумовлених кінцевою жорсткістю корпусу та паливом у баках, є однією з найскладніших прикладних задач теорії управління [1, 3]. Для дослідження динамічних характеристик РКП як об'єкта управління розроблені методи використання апарату передатних функцій, частотних характеристик та кореневого годографу [3–5]. Побудовані області стійкості на площині коефіцієнтів закону регулювання [1, 6], враховані особливості роботи СС з використанням бортової цифрової машини при квантування рівня сигналів та дискретизації у часі [7].

Для зменшення енергетичних втрат РКП від дії аеродинамічних сил запропонований спосіб стабілізації, у якому замість традиційного закону регулювання у вигляді функції кутів і кутових швидкостей рискання і тангажа прийнято регулювання залежно від кутів ковзання та атаки [8], що знайшло використання у ракетах «Аріан», «Енергія» та «Зеніт».

Завдяки покращенню швидкодії і збільшенню ємності пам'яті бортових цифрових машин з'являється можливість з метою покращення показників СС ввести в традиційний закон регулювання доданки, пропорційні похідній за часом кутової швидкості [6, 9] та кута повороту руля. Показано, що це дає зменшення статичної похибки і тривалості перехідного процесу при збереженні заданого запасу стійкості на площині двох коефіцієнтів закону регулювання.

Аналіз доступних джерел показує, що питання встановлення зв'язку між точністю компенсації збурювального прискорення, запасом стійкості і коефіцієнтами закону регулювання для СС обертального руху РКП ще не знайшли достатнього висвітлення.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

3.1 Перевірка керованості

Забезпечення стійкості СС обертального руху вибором коефіцієнтів закону регулювання і використання методів аналітичного конструювання регуляторів можливе за умови повної керованості ОУ [10]. Для ОУ (1), (2), (3) ця умова виконується, коли ранг матриці

$$C = \left[b : ab : a^2 b : a^3 b \right] \tag{4}$$

не дорівнює нулю. Після нескладних перетворень відповідно до (4) з урахуванням (2), (3) отримуємо:

$$\det C = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & a_{\psi\delta} \cdot \mu \\ 0 & 0 & a_{\psi\delta} \cdot \mu & c_{24} \\ 0 & \mu & c_{33} & c_{34} \\ \mu & c_{42} & c_{43} & c_{44} \end{vmatrix} = -\mu^4 \cdot a_{\psi\delta}^2 \neq 0,$$

тобто умова повної керованості ОУ виконується.

3.2 Точність СС

Кількісно цей показник прийнято характеризувати векторами похибок. Для їх отримання рівняння ОУ (1) слід доповнити залежністю управління $\boldsymbol{u}$ від координат вектору стану, яку називають законом регулювання.

Методи модального управління [5] і аналітичного конструювання регуляторів [2] визначають закон регулювання у вигляді лінійної функції координат вектору стану (1), який прийнято [3, 6] записувати як лінійну комбінацію кутів повороту РКП і руля курсу та їх похідних за часом:

$$u = k_\psi \cdot \psi + k_\psi^{'} \cdot \dot{\psi} + k_\delta \cdot \delta + k_\delta^{'} \cdot \dot{\delta}. \tag{5}$$

Із врахуванням (5) рівняння СС обертального руху РКП у площині рискання матиме вигляд

$$\dot{x} = a^* \cdot x + c \cdot m,$$

$$a^* = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{\psi\psi} & a_{\psi\psi}^{'} & a_{\psi\delta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \mu \cdot k_\psi & \mu \cdot k_\psi^{'} & \mu \cdot (k_\delta - 1) & \mu \cdot (k_\delta^{'} - \xi \cdot T_{AC}) \end{bmatrix}. \tag{6}$$

Матриці a^* (6) і $\boldsymbol{c}$ (3) будуть використані для визначення коефіцієнтів характеристичного поліному (ХП) і відповідно його коренів, а також векторів похибок, які кількісно характеризують точність СС при дії збурювального прискорення $\boldsymbol{m(t)}$.

Функція $m(t)$ є випадковою і нестаціонарною [3], її характеристики уточняються в результаті накопичення досвіду. На початковому етапі проектування для отримання нескладних аналітичних оцінок показників точності залежно від коефіцієнтів закону регулювання (5) ця функція може бути прийнята лінійною відносно часу t, тобто

$$m(t) = m_0 + \dot{m}_0 \cdot t. \tag{7}$$

У випадку збурення (7), для оцінки показників точності СС достатньо визначити два вектори похибок [10]:

$$er_0 = -(a^*)^{-1} \cdot c, \quad er_1 = -(a^*)^{-2} \cdot c, \tag{8}$$

де a^*, c даються виразами (6) і (3) відповідно.

Вектори (8) визначають усталений рух після закінчення перехідного процесу:

$$x = er_0 \cdot (m_0 + \dot{m}_0 \cdot t) + er_1 \cdot \dot{m}_0. \tag{9}$$

Структура матриці a^* така, що при знаходженні елементів оберненої матриці $(a^*)^{-1}$, від якої залежать вектори похибок, утворюється чотири групи рівнянь, кожна з яких розв'язується незалежно. Це дає можливість отримати нескладні аналітичні вирази чотирьох координат векторів (8) через коефіцієнти (5) закону регулювання і рівнянь ОУ (1), (2):

$$er_0 = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} 1 - k_\delta \\ 0 \\ k_\psi \\ 0 \end{bmatrix}, \ \Delta = a_{\psi\psi}(k_\delta - 1) - k_\psi a_{\psi\delta}; \tag{10}$$

$$er_1 = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} \frac{1}{\Delta}\left[a_{\psi\psi}^{'} \cdot (k_\delta - 1) - a_{\psi\delta} \cdot (k_\psi^{'} \cdot (k_\delta - 1) - k_\psi \cdot (k_\delta^{'} - \xi \cdot T_{AC}))\right] \\ 1 - k_\delta \\ \frac{1}{\Delta}\left[(1 - k_\delta) \cdot (a_{\psi\psi}^{'} \cdot k_\psi - a_{\psi\psi} \cdot k_\psi^{'}) - a_{\psi\psi} \cdot k_\psi \cdot (k_\delta^{'} - \xi \cdot T_{AC})\right] \\ k_\psi \end{bmatrix}. \tag{11}$$

Координати вектору x, визначені спираючись на (9), (10), (11), після закінчення перехідного процесу збігаються з результатами чисельного інтегрування рівнянь (6) при дії збурення (7).

Вектори похибок встановлюють залежність статичної похибки СС при компенсації збурювального прискорення (7) від параметрів РКП і коефіцієнтів закону регулювання (5).

Аналіз показує, що із шести ненульових координат векторів (10), (11) незалежними між собою є тільки три. Звідси виходить, що один із коефіцієнтів закону регулювання (5) – $k_\psi^{'}$ або $k_\delta^{'}$ може бути призначений довільно при збереженні незмінними заданих значень координат векторів (10), (11).

Коли довільно призначається $k_\delta^{'}$, то рівняння для знаходження решти коефіцієнтів закону регулювання (5) такі:

$$\left.\begin{aligned} er_{11} \cdot g_2^2 \cdot k_\psi - a_{\psi\delta} \cdot g_1 \cdot k_\psi^{'} &= -a_{\psi\psi}^{'} \cdot g_1 + a_{\psi\delta} \cdot v \\ (er_{13} \cdot g_2^2 - g_1 \cdot a_{\psi\psi}^{'}) \cdot k_\psi + g_1 \cdot a_{\psi\psi} \cdot k_\psi^{'} &= -a_{\psi\psi} \cdot v \end{aligned}\right\}, \tag{12}$$

де $g_1 = \dfrac{er_{01} \cdot |a_{\psi\delta}|}{1 + er_{01} \cdot a_{\psi\psi}}, g_2 = |a_{\psi\delta}| - a_{\psi\psi} \cdot g_1, v = k'_\delta - \xi \cdot T_{AC}$.

Із системи рівнянь (12) визначаються коефіцієнти k_ψ, k'_ψ, а з урахуванням (10) коефіцієнт

$$k_\delta = 1 - g_1 \cdot k_\psi . \qquad (13)$$

Якщо довільно призначається коефіцієнт закону регулювання (5) k'_ψ, то система рівнянь для знаходження решти коефіцієнтів має вигляд:

$$\left.\begin{aligned} er_{11} \cdot g_2^2 \cdot k_\psi - a_{\psi\delta} \cdot v = g_1 \cdot (a_{\psi\delta} \cdot k'_\psi - a'_{\psi\psi}) \\ (er_{13} \cdot g_2^2 - g_1 \cdot a'_{\psi\psi}) \cdot k_\psi + a_{\psi\psi} \cdot v = -g_1 \cdot a_{\psi\psi} \cdot k'_\psi \end{aligned}\right\}. \qquad (14)$$

Розв'язок (14) дає значення k_ψ та $k'_\delta = v + \xi \cdot T_{AC}$, а співвідношення (13) – k_δ.

Співставлення систем (12), (14) показує, що залежність між коефіцієнтами при кутових швидкостях закону регулювання (5) однакова для обох варіантів вибору коефіцієнта, що призначається довільно; при цьому варіації k'_ψ чи k'_δ не змінюють коефіцієнтів k_ψ, k_δ.

Отже, коли пріоритетним показником СС є точність компенсації збурень, тобто задані значення незалежних координат векторів (10), (11) $er_{01}, er_{11}, er_{13}$, то коефіцієнти закону регулювання (5) k_ψ, k_δ однозначно знаходяться із системи рівнянь (12), (13) або (14) відповідно до того який із решти коефіцієнтів k'_ψ чи k'_δ є довільно вибраним. Вибір значення k'_δ (або k'_ψ) не змінює вибраних показників точності СС ($er_{01}, er_{11}, er_{13}$) і коефіцієнтів k_ψ, k_δ, але, як показують розрахунки, впливає на її запас стійкості.

3.3 Запас стійкості

Під цим поняттям мається на увазі відстань η від уявної осі площини коренів ХП СС до найближчого кореня [10].

Як відомо, розрахунок коренів виконується у послідовності: математична модель, коефіцієнти ХП, корені.

Канонічний запис ХП системи четвертого порядку такий:

$$Q(s) = \det(a^* - s \cdot E) = s^4 + \sum_{i=1}^{4} q_i \cdot s^{i-1}, \qquad (15)$$

де s – змінна комплексного типу, E – одинична матриця, q_i – коефіцієнти ХП, їх залежність від елементів матриці a^* (6) визначається виразами:

$$q_1 = \mu \cdot [a_{\psi\psi} \cdot (k_\delta - 1) - a_{\psi\delta} \cdot k_\psi],$$

$$q_2 = \mu \cdot [a_{\psi\psi} \cdot (k'_\delta - \xi \cdot T_{AC}) - a_{\psi\delta} \cdot k'_\psi + (k_\delta - 1) \cdot a'_{\psi\psi}],$$

$$q_3 = \mu \cdot [(k'_\delta - \xi \cdot T_{AC}) \cdot a'_{\psi\psi} + 1 - k_\delta] - a_{\psi\psi},$$

$$q_4 = -[a'_{\psi\psi} + \mu \cdot (k'_\delta - \xi \cdot T_{AC})].$$

Запас стійкості η при варіаціях коефіцієнта закону регулювання (5) k'_δ і постійних значеннях координат $er_{01}, er_{11}, er_{13}$ векторів похибок (10), (11), а також коефіцієнтів k_ψ, k_δ має максимум (рис. 1), який відповідає дійсному кореню кратності два ХП $Q(s)$ (15). Залежність на рисунку 1 отримана при значеннях координат векторів (10), (11) $er_{01} = 0{,}6378\ c^2; er_{11} = -0{,}7840\ c^3$; $er_{13} = 0{,}9387\ c^3$. Коефіцієнти k_ψ, k'_ψ закону регулювання (5) визначаються з рівнянь (12), при цьому для наведеного прикладу $k_\delta = -0{,}4496$, $k_\psi = 9{,}19$.

Відповідно до співвідношення (13) на площині $k_\delta\ k_\psi$ має місце пряма лінія постійного значення координати er_{01} вектору (10). Можна показати також, що від вибору точки на цій прямій не залежить і координата er_{11} вектору похибок (11). Коли на цій прямій зафіксована певна точка, то цим визначені коефіцієнти k_ψ і k_δ закону регулювання (5), а залежність між коефіцієнтами k'_ψ і k'_δ встановлюється з першої координати вектору (11):

$$k'_\psi = \frac{er_{11} \cdot \Delta^2 + a'_{\psi\psi} \cdot (1 - k_\delta) + a_{\psi\delta} \cdot k_\psi \cdot (\xi \cdot T_{AC} - k'_\delta)}{(1 - k_\delta) \cdot a_{\psi\delta}}. \qquad (16)$$

Критерієм для вибору точки на прямій (13) може бути запас стійкості СС і координата er_{13} вектору похибок (11). В ітераційному процесу визначення коефіцієнтів k'_ψ і k'_δ виходячи із вимоги забезпечення найбільшого запасу стійкості η використовується співвідношення (16) і ХП $Q(s)$ (15). Для даних ОУ (рисунок 1) залежність запасу стійкості від коефіцієнта k_δ є обернено пропорційною (рис. 2), тоді як координати er_{13} вектору похибок (11) – прямо пропорційною (в наведених межах k_δ вона зростає від 0,930 c^3 до 0,976 c^3). Значення коефіцієнта k'_δ закону регулювання (5), при яких запас стійкості СС найбільший, пропорційні k_δ, вони залежать також від постійної часу виконавчого пристрою T_{AC}.

4 РЕЗУЛЬТАТИ

1. Кількісна оцінка точності СС у вигляді векторів похибок (10), (11).

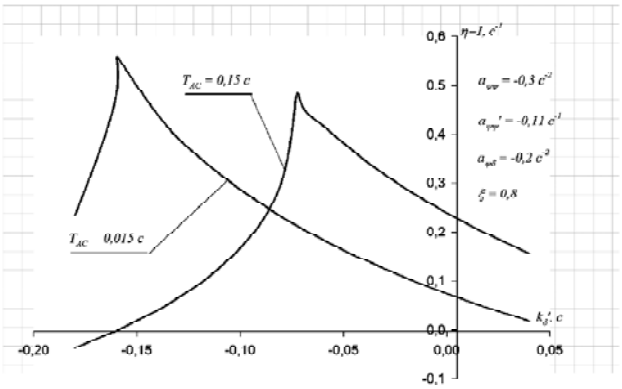


Рисунок 1.

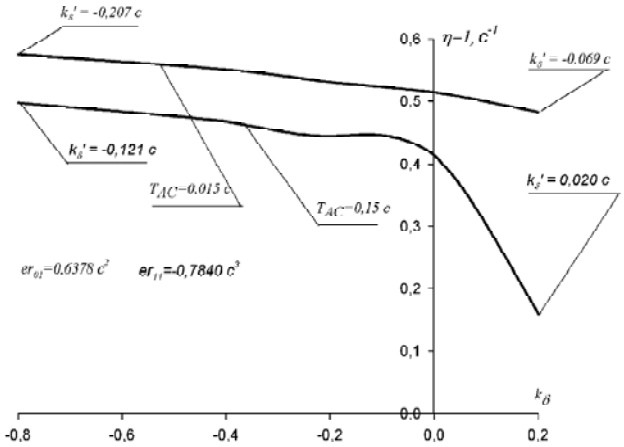


Рисунок 2.

2. Системи рівнянь (12), (14) та співвідношення (13) для визначення трьох коефіцієнтів закону регулювання при заданих значеннях трьох координат векторів похибок.

3. Необхідні для розрахунку запасу стійкості СС коефіцієнти ХП (15), виражені через параметри РКП та коефіцієнти закону регулювання.

4. Приклади залежності запасу стійкості від коефіцієнта закону регулювання при кутовій швидкості рульового органу (рис. 1) та від вибору точки на прямій (13) постійного значення координат векторів похибок er_{01}, er_{11} (рис. 2).

5. Рівняння (16) для визначення одного із коефіцієнтів закону регулювання при кутовій швидкості, коли задані значеннях координат векторів похибок er_{01}, er_{11} при фіксованій точці на прямій (13) їх постійного значення.

5 ОБГОВОРЕННЯ

Геометричні, масово-інерційні, траєкторні та інші параметри ракети кінцевими виразами перераховуються в коефіцієнти $a_{\psi\psi}$, $a'_{\psi\psi}$, $a_{\psi\delta}$ ОУ, під яким мається на увазі обертальний рух у площині рискання. До основних динамічних характеристик АС, що традиційно входять до ОУ, відносяться постійна часу T_{AC} та коефіцієнт демпфування ξ. В околі вибраної точки траєкторії відомі оцінки збурюальних прискорень, спираючись на які і задану точність стабілізації кутового положення ракети, по отриманим у роботі кінцевим аналітичним співвідношенням, до яких входять п'ять названих параметрів ОУ, можна на початковому етапі розробки системи управління визначити коефіцієнти закону регулювання при кутах повороту ракети та рульового органу і один із коефіцієнтів при кутовій швидкості (ракети чи рульового органу). Варіація одного із коефіцієнтів при кутовій швидкості у законі регулювання дає можливість збільшити запас стійкості на площині коренів характеристичного поліному СС.

Окремого дослідження вимагає питання встановлення зв'язку між коефіцієнтами закону регулювання і вимогами до обмеження зверху потужності автомату стабілізації.

ВИСНОВКИ

1. Отримані оцінки точності компенсації лінійного збурювального прискорення системою стабілізації плоского обертального руху ракети у вигляді нескладних аналітичних залежностей векторів похибок від її параметрів і коефіцієнтів закону регулювання.

2. Встановлено, що із шести ненульових координат векторів незалежними є тільки три. Це дає можливість вибирати один із коефіцієнтів закону регулювання при кутовій швидкості ракети або рульового органу без зміни показників точності виходячи із критерію найбільшого запасу стійкості на площині коренів характеристичного поліному.

3. Між коефіцієнтами закону регулювання при кутах повороту ракети і рульового органу при постійних значеннях двох координат векторів похибок має місце прямолінійна залежність, вибір точки на якій за критерієм запасу стійкості визначає коефіцієнти закону регулювання при кутових швидкостях ракети і рульового органу, а також значення третьої із незалежних координат векторів похибок.

Результати роботи можуть бути використані для прийняття технічних рішень при проектуванні системи управління обертальним рухом ракети.

ПОДЯКИ

Робота виконана в рамках держбюджетної науково-дослідної теми № ФТФ-30-13 Дніпропетровського національного університету ім. О. Гончара «Методичне забезпечення систем керування і зв'язку. Моделювання і оптимізація складних процесів і систем», № держ. регістрації 0114 U000189.

Автор висловлює подяку колективу філіалу кафедри систем автоматизованого управління у державному конструкторському бюро «Південне» за підтримку при виконанні роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Динамическое проектирование ракет. Задачи динамики ракет и космических ступеней : монография / [Игдалов И. М., Кучма Л. Д., Поляков Н. В., Шептун Ю. Д. ; под. ред. акад. С. Н. Конюхова. – Д. : Изд-во Днепропетр. нац. ун-та, 2010. – 264 с.
2. Красовский А. А. Аналитическое конструирование контуров управления летательными аппаратами / А. А. Красовский. – М. : Машиностроение, 1969. – 240 с.
3. Айзенберг Я. Е. Проектирование систем стабилизации носителей космических аппаратов / Я. Е. Айзенберг, В. Г. Сухоребрий. – М. : Машиностроение, 1986. – 224 с.
4. Колесников К. С. Динамика ракет / К. С. Колесников. – М. : Машиностроение, 1980. – 376 с.
5. Кузовков Н. Т. Системы стабилизации летательных аппаратов (баллистических и зенитных ракет) / Н. Т. Кузовков. – М. : Высш. шк., 1976. – 364 с.
6. Авдеев В. В. Коэффициенты ошибок стабилизации вращательного движения ракеты / В. В. Авдеев // Техническая механика. – 2014. – № 3. – С. 71–78.
7. Динамика систем управления ракет с бортовыми цифровыми вычислительными машинами / под ред. М. С. Хитрика и С. М. Федорова. – М. : Машиностроение, 1976. – 272 с.
8. Управление по углам атаки и скольжения первых ступеней РН / [Айзенберг Я. Е., Златкин Ю. М., Калногуз А. Н. и др.] // Космічна наука і технологія. – 2002. – Т. 8, № 1. – С. 61–80.
9. Авдеев В. В. Влияние закона управления и постоянной времени регулятора на запас устойчивости системы стабилизации вращательного движения ракет [Электронный ресурс]/ В. В. Авдеев / Сб. докл. научной конф. «Информационные технологии в управлении сложными системами» (июнь 2013 г.). – С. 1–3. ISBN 978-966-02-6863-0.4.01
10. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А. А. Красовского. – М. : Наука, 1987. – 712 с.

Стаття надійшла до редакції 22.01.2016.
Після доробки 10.02.2016.

Авдеев В. В.

Д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры систем автоматизированного управления Днепропетровского национального университета им. О. Гончара, Днепропетровск, Украина

ТОЧНОСТЬ И ЗАПАС УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ РАКЕТЫ

Разработана методика получения оценок показателей точности компенсации возмущающего ускорения с использованием линейной стационарной в окрестности определенной точки траектории модели плоского вращательного движения ракеты космического назначения с учетом инерции исполнительного устройства. Количественно они определяются двумя векторами ошибок, координаты которых выражаются несложными аналитическими зависимостями от коэффициентов уравнений движения и закона регулирования.

Цель исследования в установлении связи между координатами векторов ошибок и запасом устойчивости системы на плоскости корней характеристического полинома, что даст возможность обоснованного выбора коэффициентов закона регулирования на начальном этапе разработки системы управления.

Впервые с учетом специфики ракеты космического назначения разработана методика установления связи между координатами векторов ошибок при действии линейного возмущающего ускорения, коэффициентами закона регулирования, в который входят четыре координаты вектора состояния, и запасом устойчивости системы стабилизации вращательного движения на плоскости корней характеристического полинома.

Определены три независимых координаты векторов ошибок, что дает возможность вариации коэффициента закона регулирования при угловой скорости ракеты или рулевого органа исходя из критерия наибольшего запаса устойчивости без изменения показателей точности.

Результаты работы могут быть использованы для принятия технических решений при проектировании системы управления вращательным движением ракеты.

Ключевые слова: ошибки стабилизации, запас устойчивости, закон регулирования.

Avdejev V. V.

Dr. Sc., Professor, Professor of Department of Automated Control of O. Gontchar Dnipropetrovsk National University, Ukraine

ACCURACY AND STABILITY FACTOR OF A ROCKET ROTATION STABILIZATION SYSTEM

Methodology of receipt of the exactness indexes estimations by equalization of a disturbing acceleration is worked out with the use of the linear model of a cosmic rocket rotation stationary in region of the determined trajectory point with taking in account of an actuating device inertia. In terms of quantity they are determined by two vectors of errors the coordinates of that are expressed by simple analytical dependences on coefficients of the motion equations and the law of control.

The purpose of the research is to establish a connection between the coordinates of vectors of errors and the system's stability factor on the plane of roots of characteristic polynomial, that will give a possibility of grounded choice of coefficients of a control law while the initial stage of the control system project development.

For the first time, taking in account the cosmic rocket specificity, methodology for establishing of connection between coordinates of error vectors by linear disturbing acceleration, control law coefficients**,** which include four coordinates of the state vector**,** and stability factor of stabilizing system of the rotation motion on the plane of a characteristic polynomial roots was developed.

We determined three independent coordinates of error vectors**,** which allows variation coefficient of a control law at the angular velocity of a rocket or a steering body on the basis of the criterion of the largest stability factor without changing the parameters of accuracy.

The results of the work can be used by the technical decision-making while designing the rocket control system of rotational motion.

Keywords: stabilization errors, stability factor, control law.

REFERENCES

1. Igdalov I. M. Kutchma L. D., Poljakov N. V., Sheptun Ju. D.; pod red. akad. S. N. Konjuchova Dinamitcheskoje proektirovanie raket. Zadatchi dinamiki raket i kosmitcheskych stupenej: monographia. D. Izd-vo Dnjepropetr. naz. un-ta, 2010, 264 p.
2. Krasovsky A. A. Analititcheskoje konstruirovanie konturov upravlenija letatelnymi apparatami. Moscow, Mashinostrojenie, 1969, 240 p.
3. Ajzenberg J. E., Suchorebry V. G. Proektirovanie system stabilizazii nositelej kosmitcheskych apparatov. Moscow, Mashinostrojenie, 1986, 224 p.
4. Kolesnikov K. S. Dinamika raket. Moscow, Mashinostrojenie, 1980, 376 p.
5. Kuzovkov N. T. Systemy stabilizazii letatelnych apparatov (ballistitcheskych i zenitnych raket). Moscow, Vysshaja shk., 1976, 364 p.
6. Avdejev V. V. Koeffizienty oshibok stabilizazii vrashtchatelnogo dvizgenia raket, *Technitcheskaja mechanika*, 2014, No. 3, pp. 71–78.
7. Dynamika system upravlenija raket s bortovymi zifrovimi vytchislitelnymi mashinami, Pod red. M. S. Chitrika i S. M. Fedorova. Moscow, Mashinostrojenie, 1976, 272 p.
8. Ajzenberg J. E., Zlatkin Ju. M., Kalnoguz A. N., Batajev V. A., Kuzmin A. I. Upravlenije po uglam ataki i skolzgenija pervych stupenej RN, *Kosmitchna nauka i technologija*, 2002, Vol. 8, No. 1, pp. 61–80.
9. Avdejev V. V. Vlijanie zakona upravlenija i postojannoj vremeni regulatora na zapas ustojtchivosti systemy stabilizazii vrashtchatelnogo dvizgenia raket [Electron resource], *Sb. dokl. nautchnoj konf. 'Informatsionnyje technologii v upravleniji slozgnymi systemami' (June 2013)*. pp. 1–3. ISBN 978-966-02-6863-0. 4.01.
10. Spravotchnik po teorii avtomatitcheskogo upravlenija, Pod red. A. A. Krasovskogo. Moscow, Nauka, 1987, 712 p.

УДК 519.852.6

Мамедов К. Ш.[1], Мамедова А. Г.[2]

[1]Д-р физ.-мат. наук, профессор Бакинского Государственного Университета и зав. отделом Института Систем Управления НАН Азербайджана, Азербайджан, Баку
[2]Докторант, научный сотрудник Института Систем Управления НАН Азербайджана, Азербайджан, Баку

ПОНЯТИЯ СУБОПТИМИСТИЧЕСКОГО И СУБПЕССИМИСТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЙ И ПОСТРОЕНИЕ ИХ В ИНТЕРВАЛЬНОЙ ЗАДАЧЕ БУЛЕВОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

В работе рассмотрена интервальная задача булевого программирования. Даны некоторые экономические интерпретации этой задачи, в результате которых построена экономико-математическая модель. Введены понятия допустимого, оптимистического, пессимистического, субоптимистического и субпессимистического решений задачи булевого программирования с целочисленными интервальными данными. Разработаны два алгоритма построения субоптимистического и субпессимистического решений этой задачи. Естественно, что эти решения могут отличатся от оптимистического и пессимистического решений. Поэтому необходимо оценить относительные погрешности найденных субоптимистических и субпессимистических решений от оптимистического и пессимистического, соответственно. С этой целью построена мажорирующая функция типа Лагранжа. Доказано, что минимальное значение этой функции является верхней границей оптимистического и пессимистического значений целевой функции, соответственно. Минимизацией этой функции находится верхняя граница субоптимистического и субпессимистического значений целевой функции. Проведены вычислительные эксперименты по решению задач различной размерности.

Ключевые слова: задача булевого программирования с целочисленными интервальными данными, оптимистическое решение, пессимистическое решение, субоптимистическое решение, субпессимистическое решение, максимальное приращение функционала, нелинейный штраф, функция Лагранжа, вычислительные эксперименты.

НОМЕНКЛАТУРА

$\underline{c}_j, \overline{c}_j, \underline{a}_{ij}, \overline{a}_{ij}, \underline{b}_i, \overline{b}_i$ – заданные целые неотрицательные числа;

j_* – фиксированный номер;

x_j – j-й неизвестный;

X – n-мерный вектор;

X^o – оптимистическое решение;

f^o – оптимистическое значение;

X^p – пессимистическое решение;

f^p – пессимистическое значение;

X^{so} – субоптимистическое решение;

f^{so} – субоптимистическое значение;

X^{SP} – субпессимистическое решение;

f^{sp} – субпессимистическое значение;

$\overline{q}_i, \underline{q}_i$ – штраф (цена) за использование i-го ресурса для оптимистического и пессимистического решений, соответственно;

ω^o, ω^p – множества некоторых индексов при построении функции Лагранжа для оптимистической и пессимистической стратегий, соответственно;

ω^{so}, ω^{sp} – множества индексов переменных, принимающих единичные значения при построении оптимистического и пессимистического решений, соответственно;

$\overline{r}_i, \underline{r}_i$ – использованные i-е ресурсы для оптимистического и пессимистического решений, соответственно;

$\overline{Q}_j, \underline{Q}_j$ – общий штраф за использование оставшихся ресурсов для неизвестных x_j оптимистического и пессимистического решений, соответственно;

$\overline{f}_j, \underline{f}_j$ – приращение значения целевой функции для j-го объекта каждой единицы общего штрафа для оптимистической и пессимистической стратегий, соответственно;

$f_M^{so}, f_M^{sp}, f_C^{so}, f_C^{sp}$ – субоптимистическое и субпессимистическое значения функции (1), найденные методами максимального приращения и нелинейного штрафа, соответственно;

$\overline{f}^{so}, \overline{f}^{sp}$ – верхние границы субоптимистического и субпессимистического значений, соответственно;

$\delta_M^{so}, \delta_M^{sp}, \delta_C^{so}, \delta_C^{sp}$ – относительные погрешности субоптимистического и субпессимистического значения, найденные методом максимального приращения и нелинейного штрафа от своей верхней границы, соответственно;

$b_M^{so}, b_M^{sp}, b_C^{so}, b_C^{sp}$ – средние единицы уменьшения заданных правых частей системы ограничений, соответствующие субоптимистическому и субпессимистическому решениям, полученным методами максимального приращения и нелинейного штрафа;

$N_M^{so}, N_M^{sp}, N_C^{so}, N_C^{sp}$ – число наилучших найденных субоптимистических и субпессимистических решений среди задач одинаковой размерности;

N – число различных задач одинаковой размерности.

ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрим следующую задачу:

$$\sum_{j=1}^{n}\left[\underline{c}_j, \overline{c}_j\right] x_j \to \max, \tag{1}$$

$$\sum_{j=1}^{n}\left[\underline{a}_{ij}, \overline{a}_{ij}\right] x_j \le \left[\underline{b}_i, \overline{b}_i\right] \quad (i = \overline{1,m}), \tag{2}$$

© Мамедов К. Ш., Мамедова А. Г., 2016
DOI 10.15588/1607-3274-2016-3-13

$$x_j = 0 \vee 1 \quad (j = \overline{1,n}). \qquad (3)$$

Здесь предполагается, что $\underline{c}_j, \overline{c}_j, \underline{a}_{ij}, \overline{a}_{ij}, \underline{b}_i, \overline{b}_i$ $(i = \overline{1,m}, j = \overline{1,n})$ заданные целые неотрицательные числа. Задача (1)–(3) называется задачей булевого программирования с целочисленными интервальными данными или интервальная задача булевого программирования.

Целью данной работы является создание методов построения субоптимистического и субпессимистического решения задачи (1)–(3) (понятия оптимистического, пессимистического, субоптимистического и субпессимистического решения вводится ниже).

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть имеются n объектов, каждый из которых можно или нельзя использовать. Если объект с определенным номером $j_*(j_* \in \{1,2,...,n\})$ выбирается для использования, то возможное полученное значение прибыли принадлежит заданному целочисленному интервалу $\left[\underline{c}_{j_*}, \overline{c}_{j_*}\right]$ $(j_* \in \{1,2,...,n\})$. При этом, необходимо затратить ресурсы из заданных целочисленных интервалов $\left[\underline{a}_{ij_*}, \overline{a}_{ij_*}\right]$ $(i = \overline{1,m},\ j = \overline{1,n})$. Допустим, что для использования заданных объектов выделен m тип общих ресурсов из заданных целочисленных интервалов $\left\lfloor \underline{b}_i, \overline{b}_i \right\rfloor (i = \overline{1,m})$. Естественно, что необходимо выбирать для использования такие объекты, чтобы общие расходы не превышали бы заранее выделенные ресурсы $\left\lfloor \underline{b}_i, \overline{b}_i \right\rfloor$ $(i = \overline{1,m})$. При этом общая прибыль должна быть максимеальной. Очевидно, что введя переменные для каждого объекта j $(j = \overline{1,n})$,

$$x_j = \begin{cases} 1, \text{ если } j\text{-й объект выбирается;} \\ 0, \text{ в противном случае,} \end{cases}$$

получим математическую модель этой задачи в виде (1)–(3). Отметим, что поскольку задача (1)–(3) является обобщенной формой известной задачи булевого программирования, то она также входит в класс NP-полных, т.е. является «трудно решаемой». Поэтому для задачи (1)–(3) необходимо ввести различные понятия решений (допустимого, оптимистического, пессимистического, субоптимистического и субпессимистического решения) и разрабатывать соответствующие методы решений.

Естественно, что для каждого i $(i = \overline{1,m})$ должны выполняться условия

$$\sum_{j=1}^{n} \underline{a}_{ij} > \overline{b}_i \quad (i = \overline{1,m}).$$

В противном случае, если для всех i $(i = \overline{1,m})$ эти условия не выполняются, то вектор $X = (1,1,...,1)$ удовлетворяет системе неравенств (2) и будет оптимальным решением. С другой стороны, если для некоторого i_* выполняется соотношение $\sum_{j=1}^{n} \overline{a}_{i_* j} > \underline{b}_{i_*}$, то неравенство с этим номером i_* необходимо отбросить из системы (2), поскольку оно не является ограничением.

2 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Задача (1)–(3) интенсивно исследовалась авторами работ [1–12], начиная с 80-х годов XX века. В этих работах рассмотрены задачи с одним или со многими ограничениями булевого [1, 4, 5 ,8, 9–16] и целочисленного [3, 5–7] программирования с коэффициентами из различных классов.

Отметим, что в рассмотренных работах [1–12] коэффициенты задач выбираются либо как неточные числа, либо из определенного класса. В этих работах выбором различных стратегий разработаны алгоритмы решения соответствующих задач. Эти стратегии в основном следующие:

I) В задаче только коэффициенты функции (1) выбираются из определенного класса и фиксируются. Очевидно, что в этом случае имеются достаточно большое число вариантов задач.

II) Функция (1) заменяется многочисленными функциями рассмотренного класса. Естественно, что в этом случае необходимо решить достаточно большое количество задач.

III) Коэффициенты функции (1) и ограничений (2) выбираются из определенного класса и в процессе решения фиксируются конкретные числа из этого класса.

IV) В задаче принимаются оптимистические и пессимистические стратегии и на их основе разрабатываются методы решения.

Однако, если коэффициенты целевой функции и ограничений являются не постаянными числами а интервалами, то прикладные задачи будут более реально моделированными.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Сначала введем следующие понятия для задачи (1)–(3).

Определение 1. Двоичный n-мерный вектор $X = (x_1, x_2, ..., x_n)$ будем называть допустимым решением задачи (1)–(3), если для $\forall a_{ij} \in \left[\underline{a}_{ij}, \overline{a}_{ij}\right]$ и $\forall b_i \in \left\lfloor \underline{b}_i, \overline{b}_i \right\rfloor, (i = \overline{1,m},\ j = \overline{1,n})$ выполняются соотношения $\sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_j \le b_i, (i = \overline{1,m}, j = \overline{1,n})$.

Из этого определения видно, что в отличие от задачи булевого программирования, в задаче (1)–(3) понятия оптимального решения, оптимального значения целевой функции и т. д. должны иметь другой смысл. Ибо для удовлетворения системы (2) должно соблюдаться условие непревышения суммы некоторых целочисленных интервалов от заданного целочисленного интервала и при этом сумма некоторых других целочисленных интервалов должна быть максимальной или как можно большей. С этой целью введем следующие определения.

Определение 2. Допустимое решение $X^o = \left(x_1^o, x_2^o, ..., x_n^o\right)$ задачи (1)–(3) назовем оптимистическим решением, если значение $f^o = \sum_{j=1}^{n} \bar{c}_j x_j^o$ будет максимальным (наибольшим). Число f^o назовем оптимистическим значением целевой функции.

Определение 3. Допустимое решение $X^p = \left(x_1^p, x_2^p, ..., x_n^p\right)$ задачи (1)–(3) назовем пессимистическим решением, если значение $f^p = \sum_{j=1}^{n} \underline{c}_j x_j^p$ будет максимальным (наибольшим). Число f^p называем пессимистическим значением целевой функции.

Определение 4. Допустимое решение $X^{so} = \left(x_1^{so}, x_2^{so}, ..., x_n^{so}\right)$ задачи (1)–(3) называем субоптимистическим, если значение $f^{so} = \sum_{j=1}^{n} \bar{c}_j x_j^{so}$ будет максимальным по некоторому критерию. Число f^{so} назовем субоптимистическим значением целевой функции.

Определение 3. Допустимое решение $X^p = \left(x_1^p, x_2^p, ..., x_n^p\right)$ задачи (1)–(3) назовем пессимистическим решением, если значение $f^p = \sum_{j=1}^{n} \underline{c}_j x_j^p$ будет максимальным (наибольшим). Число f^p называем пессимистическим значением целевой функции.

Определение 4. Допустимое решение $X^{so} = \left(x_1^{so}, x_2^{so}, ..., x_n^{so}\right)$ задачи (1)–(3) называем субоптимистическим, если значение $f^{so} = \sum_{j=1}^{n} \bar{c}_j x_j^{so}$ будет максимальным по некоторому критерию. Число f^{so} назовем субоптимистическим значением целевой функции.

Определение 5. Допустимое решение $X^{sp} = \left(x_1^{sp}, x_2^{sp}, ..., x_n^{sp}\right)$ задачи (1)–(3) назовем субпессимистическим, если значение $f^{sp} = \sum_{j=1}^{n} \underline{c}_j x_j^{sp}$ будет максимальным по некоторому критерию. Число f^{sp} назовем субоптимистическим значением целевой функции.

Отметим, что критерии , упоминающиеся в определениях 4 и 5, приводятся ниже.

Учитывая вышеприведенную интерпретацию задачи (1)–(3), для построения субоптимистического и субоптимистического решение в работе [19] выведены следующие критерии:

$$j_* = \arg\max_j \frac{\bar{c}_j}{\max_i \underline{a}_{ij}}, \qquad (4)$$

$$j_* = \arg\max_j \frac{\underline{c}_j}{\max_i \bar{a}_{ij}}. \qquad (5)$$

При оптимистической и пессимистической стратегии номер неизвестного j_*, для которого можно принять $x_{j_*}^{so} = 1$, определяется по критериям (4) и (5), соотвественно. Решения $X^{so} = \left(x_1^{so}, x_2^{so}, ..., x_n^{so}\right)$ и $X^{sp} = \left(x_1^{sp}, x_2^{sp}, ..., x_n^{sp}\right)$ построенные по критериям (4) и (5) назовем, соответственно, субоптимистическим и субпессимистическим. Как видно из критериев (4) и (5), в процессе построения решения каждый раз выбирается такой номер неизвестного j_*, для которого приращение функционала будет максимальным. Поэтому в работе [19] этот метод называется методом **максимального приращения функционала.** Тогда субоптимистическое или субпессимистическое значения функции (1) будут соответственно равны

$$f^{so} = \sum_{j=1}^{n} \bar{c}_j x_j^{so} \text{ и } f^{sp} = \sum_{j=1}^{n} \underline{c}_j x_j^{sp}.$$

Однако, нам нужно найти субоптимистические решение $X^o = \left(x_1^o, x_2^o, ..., x_n^o\right)$ или субпессимистические решение $X^p = \left(x_1^p, x_2^p, ..., x_n^p\right)$, для которых соответствующее значение функции (1) было не меньше, чем f^{so} или f^{sp} соответственно и одновременно соотвествующие этим решениям правые части $b_i (i = \overline{1,m})$ были не больше, чем исходные значения $b_i (i = \overline{1,m})$. С этой целью используем принцип дихотомии. Вначале приняв $b_i := \left\lfloor \left(\underline{b}_i + \bar{b}_i\right)/2 \right\rfloor$, $(i = \overline{1,m})$, где $\lfloor z \rfloor$ означает целую часть числа z и решая полученную задачу (1)–(3) находим субоптимистическое $X^o = \left(x_1^o, x_2^o, ..., x_n^o\right)$ или субпессимистическое решения $X^p = \left(x_1^p, x_2^p, ..., x_n^p\right)$ и соответствующие значения

$$f^o = \sum_{j=1}^{n} \bar{c}_j x_j^o \text{ и } f^p = \sum_{j=1}^{n} \underline{c}_j x_j^p$$

функции (1). Если $f^o < f^{so}$ $(f^p < f^{sp})$, то принимаем $\underline{b}_i := b_i (i = \overline{1,m})$, иначе, т.е. если $f^p \geq f^{sp} \left(f^p \geq f^{sp}\right)$,то запоминаем $x_j^{so} := x_j^o (x_j^{sp} := x_j^p) (j = \overline{1,n})$, $f^{so} = f^o (f^{sp} = f^p)$ и принимая $\bar{b}_i := b_i (i = \overline{1,m})$ заново определяем $b_i := \left\lfloor \left(b_i + \bar{b}_i\right)/2 \right\rfloor$ $(i = \overline{1,m})$. Далее решается очередная задача (1)–(3). Этот процесс вычисления продолжается до тех пор, пока при очередном делении пополам не получится $\underline{b}_i := b_i (i = \overline{1,m})$. Тогда последний за-

помненный $X^{so}=\left(x_1^{so},x_2^{so},...,x_n^{so}\right)$ $\left(X^{sp}=\left(x_1^{sp},x_2^{sp},...,x_n^{sp}\right)\right)$ будет субоптимистическим (субпессимистическим) решением и f^{so} (f^{sp}) субоптимистическим (субпессимистическим) значением целевой функции рассмотренной задаче. Отметим, что вначале процесса деления пополам, запомнили заданные в правых частях системы (2) $\bar{b}_i(i=\overline{1,m})$ как $\bar{b}_i^o(i=\overline{1,m})$, а потом поменяли $\bar{b}_i(i=\overline{1,m})$. Поэтому для выяснения качества разработанного метода, необходимо проанализировать величину $\Delta_i=\bar{b}_i^o-b_i(i=\overline{1,m})$ при проведении экспериментов с задачами различной размерности.

Теперь изложим другой метод для построения субоптимистического и субпессимистического решения задачи (1)–(3). Сначала запишем эту задачу в следующем виде:

$$\sum_{j=1}^{n}\left[\underline{c}_j,\bar{c}_j\right]x_j\to\max, \tag{6}$$

$$\sum_{j=1}^{n}\left[\underline{a}_{ij},\bar{a}_{ij}\right]x_j\le b_i,\ (i=\overline{1,m}), \tag{7}$$

$$x_j=0\vee 1\ \ (j=\overline{1,n}). \tag{8}$$

Здесь, $\underline{\alpha}_{ij}=\underline{a}_{ij}/b_i$, $\bar{\alpha}_{ij}=\bar{a}_{ij}/b_i$ $(i=\overline{1,m}$ $j=\overline{1,n})$, $0\le\underline{\alpha}_{ij}\le 1$, $0\le\bar{\alpha}_{ij}\le 1$, $(i=\overline{1,m})$, $(j=\overline{1,n})$. Примем следующие обозначения:

$$\underline{P}_j=\left(\underline{\alpha}_{1j},\underline{\alpha}_{2j},\ldots\underline{\alpha}_{mj}\right)^T,\ \bar{P}_j=\left(\bar{\alpha}_{1j},\bar{\alpha}_{2j},\ldots,\bar{\alpha}_{mj}\right)^T,$$

$$(j=\overline{1,n}),\ P_o=\left(1,1,...,1\right)^T.$$

Процесс построения субоптимистического и субпессимистического решения начинается с начального решения $X=\left(0,0,...,0\right)$. Допустим необходимо построить субоптимистическое решение $X^{so}=\left(x_1^{so},x_2^{so},...,x_n^{so}\right)$ задачи (9)–(11). (Процесс построения субпессимистического решения аналогичен и указан ниже). Если для некоторого j_* принято $x_{j_*}^{so}=1$, то в правых частях системы (10) остаются ресурсы $P_o=\left(1-\underline{\alpha}_{1j_*},1-\underline{\alpha}_{2j_*},...,1-\underline{\alpha}_{mj_*}\right)$ для принятия очередного $x_j^{so}=1$ $(j=\overline{1,n})$. Введем штраф (цена) за использование единицы остаточных ресурсов P_o для принятия очередного $x_{j_*}^{so}=1$, $(j=\overline{1,n})$. Для этого необходимо учесть что, чем меньше оставшаяся часть ресурсов $\left(1-\underline{\alpha}_{ij_*}\right)$, тем больше должен быть штраф (цена) за его дальнейшее использование. При этом с уменьшением оставшейся части ресурса i штраф (цена) должен расти быстрее. Такой принцип построения решения, вообще говоря, создает возможность использования оставшихся ресурсов P_o равномерно и построить наиболее лучшее решение. В качестве такого штрафа мы принимаем

$$\underline{q}_i=\frac{1}{1-\underline{\underline{\alpha}}_{ij_*}},\ (i=\overline{1,m}). \tag{12}$$

Отметим, что при каждом очередном принятии $x_{j_*}=1$, знаменатель штрафа (12) уменьшается. Следовательно, штраф (цена) дефицитных ресурсов растет быстрее по нелинейному закону.

Для вывода более общей формулы, примем следующие обозначения:

$$\omega^{so}=\{j\mid x_j^{so}=1\},\ \Omega=\{1,2,...,n\} \tag{13}$$

$$\underline{r}_i=\sum_{j\in\omega^{so}}\underline{\alpha}_{ij},\ (i=\overline{1,m}) \tag{14}$$

Тогда в качестве штрафа (цена) за использование оставшихся ресурсов $P_o=\left(1-\underline{r}_1,1-\underline{r}_2,...,1-\underline{r}_m\right)$ (т. е. правых частей системы (10)) вместо формулы (12) примем

$$\underline{q}_i=\frac{1}{1-\underline{\underline{r}}_i},\ (i=\overline{1,m}). \tag{15}$$

Отсюда видно, что с уменьшением оставшихся ресурсов $1-\underline{r}_i$ $(i=\overline{1,m})$ штраф (цена) $\underline{q}_i$ $(i=\overline{1,m})$ за их использование возрастает быстрее нелинейным образом. Поэтому этот метод назван нами **методом нелинейного штрафа**. Очевидно, что в этих случаях использование дефицитных ресурсов ограничиваются. Тогда общий штраф за использование оставшихся ресурсов для неизвестных x_j составляет:

$$\underline{Q}_j=\sum_{i=1}^{m}\underline{\alpha}_{ij}\underline{q}_i\ \ (j\in\Omega). \tag{16}$$

При этом приращение значения функции (9) для каждой единицы общего штрафа для оптимистической стратегии будет

$$\bar{f}_j=\bar{c}_j\Big/\underline{Q}_j,\ \ (j\in\Omega). \tag{17}$$

Естественно, что для принятия $x_{j_*}^{so}=1$ нужно выбирать j_* по критерию

$$j_*=\arg\max_{j\in\Omega}\left\{\bar{f}_j\right\}\text{ или }\max_{j\in\Omega}\left\{\bar{f}_j\right\}=\bar{f}_{j_*}. \tag{18}$$

Таким образом, используя критерии (18), можно построить субоптимистическое решение задачи (6)–(8) (или (9)–(11)) следующим образом. Вначале принимаем $X^{so}=\left(0,0,...,0\right)$. Далее, каждый раз в соответствии с критерием (18), определяется очередной номер неизвестных j_* и проверяется возможность принятия $x_{j_*}=1$.

Этот процесс завершается после рассмотрения всех номеров j ($j=1,2,...,n$). Опишем этот процесс вычисления в более подробной форме.

Вначале, зафиксировав $b_i := \overline{b}_i$, $(i=\overline{1,m})$ строится задача (9)–(11).Далее принимаем начальное решение $X^{so}=(0,0,...,0)$. Тогда по формуле (13), (14) и (15) получается $\omega^{so}=\emptyset$, $\underline{r}_i=0$, $\underline{q}_i=1$ $(i=\overline{1,m})$. После этого, используя формулу (16), (17) и (18), последовательно находится номер j_* и принимается $\Omega := \Omega \setminus \{j_*\}$. Если $\underline{P}_{j_*} \le P_0$, то принимаем $P_o := P_o - \underline{P}_{j_*}$, $x^{so}_{j_*}=1$ и $\omega^{so} := \omega^{so} \cup \{j_*\}$. Очевидно, что величины r_i, q_i, $(i=\overline{1,m})$, $\underline{Q}_j, \overline{f}_j$ $(j=\overline{1,n})$ и номер j_* будут принимать новые значения. Иначе т.е. если соотношение $\underline{P}_{j_*} \le P_o$ не выполняется хотя бы для одной координаты, то принимая $x^{so}_{j_*} := 0$, $\Omega := \Omega \setminus \{j_*\}$ и по формуле (18) определяем очередной номер j_*.

Процесс построения решения завершается, когда $\Omega=\emptyset$. В результате получается субоптимистическое решение $X^{so}=(x_1^{so}, x_2^{so}, ..., x_n^{so})$ и соответствующее субоптимистическое значение $f^{so}=\sum_{j=1}^{n}\overline{c}_j x_j^{so}$ функции (6).

Отметим, что вышеуказанным образом аналогично можно построить субпессимистическое решение задачи (9)–(11). Только в этом случае формулы (12)–(18) будут иметь следующий вид:

$$\overline{q}_i = \frac{1}{1-\overline{\alpha}_{ij_*}}, \quad (i=\overline{1,m}), \quad \omega^{sp}=\{j \mid x_j^{sp}=1\},$$

$$\Omega=\{1,2,...,n\}$$

$$\overline{r}_i = \sum_{j\in\omega^{sp}} \overline{\alpha}_{ij}, \quad (i=\overline{1,m}), \quad \overline{q}_i = \frac{1}{1-\overline{r}_i}, \quad (i=\overline{1,m}),$$

$$\overline{Q}_j = \sum_{i=1}^{m} \overline{\alpha}_{ij}\overline{q}_i \quad (j\in\Omega).$$

$$\underline{f}_j = \underline{c}_j \Big/ \overline{Q}_j, \quad (j\in\Omega), \quad j_* = \arg\max_{j\in\Omega}\left\{\underline{f}_j\right\}.$$

Используя эти величины субпессимистическое решение $X^{sp}=(x_1^{sp}, x_2^{sp}, ..., x_n^{sp})$ задачи (6)–(8) (или (9)–(11)) строится аналогично построению субоптимистического решения $X^{so}=(x_1^{so}, x_2^{so}, ..., x_n^{so})$. В результате получаем субпессимистическое значение f^{sp} функции (6), т.е. $f^{sp}=\sum_{j=1}^{n}\underline{c}_j x_j^{sp}$.

Отметим, что использованное нами в данной работе понятие нелинейного штрафа (цена) впервые было введено в работе [17] для задач булевого программирования. Необходимо отметить, что при построении субоптимистического или субпессимистического решений задачи (6)–(8) в правых частях системы (7) использовали фиксированные целые числа b_i $(b_i \in \lfloor \underline{b}_i, \overline{b}_i \rfloor)$ $(i=\overline{1,m})$. С другой стороны, наилучшие субоптимистические и субпессимистические решения получаются после рассмотрения всех целых чисел в интервале $\lfloor \underline{b}_i, \overline{b}_i \rfloor$ $(i=\overline{1,m})$.Очевидно, что, если длина интервала $\lfloor \underline{b}_i, \overline{b}_i \rfloor$ $(i=\overline{1,m})$. достаточно большая, то придется решать огромное число задач. Поэтому с целью уменьшения числа решаемых задач, будем применять принцип дихотомии для интервалов $\lfloor \underline{b}_i, \overline{b}_i \rfloor$ $(i=\overline{1,m})$. Этот принцип изложен в пункте 3 настоящей работы.

Отметим, что для оценки погрешностей найденных субоптимистических и субпессимистических решений от оптимистического и пессимистического значения нами построена соответствующая мажорирующая функция типа Лагранжа в следующей форме

$$L^o(\lambda_1,\lambda_2,...,\lambda_m) = \sum_{j\in\omega^o}\overline{c}_j + \sum_{i=1}^{m}(b_i - \sum_{j\in\omega^o}\underline{a}_{ij})\lambda_i,$$

$$L^p(\lambda_1,\lambda_2,...,\lambda_m) = \sum_{j\in\omega^p}\underline{c}_j + \sum_{i=1}^{m}(b_i - \sum_{j\in\omega^p}\overline{a}_{ij})\lambda_i.$$

Здесь $\omega^o=\left\{j \mid \overline{c}_j - \sum_{i=1}^{m}\underline{a}_{ij}\lambda_i > 0\right\}$, $\omega^p=\left\{j \mid \underline{c}_j - \sum_{i=1}^{m}\overline{a}_{ij}\lambda_i > 0\right\}$,

$b_i\,(i=\overline{1,m})$ – фиксированные числа в интервале $\lfloor \underline{b}_i, \overline{b}_i \rfloor$ $(i=\overline{1,m})$.

Имеет место следующая теорема.

Теорема. Для оптимистического – f^o и пессимистического – f^p значений задачи (1)–(3) справедливы следующие соотношения.

$$f^o \le \min_{\lambda_i \ge o} L^o(\lambda_1,\lambda_2,...,\lambda_m), \quad f^p \le \min_{\lambda_i \ge o} L^p(\lambda_1,\lambda_2,...,\lambda_m).$$

Очевидно, что $f^{so} \le f^o$, $f^{sp} \le f^p$. Из теоремы видно, что минимизируя функции $L^o(\lambda_1,\lambda_2,...,\lambda_m)$ или $L^p(\lambda_1,\lambda_2,...,\lambda_m)$, можно найти верхние границы $\overline{f}^{so}$ и $\overline{f}^{sp}$ для f^o и f^p соответственно. Следовательно, относительные погрешности δ^{so} и δ^{sp} для субоптимистического и субпессимистического значений оцениваются соответственно следующим образом:

$$\delta^{so} \le \left(\overline{f}^{so} - f^{so}\right) \Big/ \overline{f}^{so}, \quad \delta^{sp} \le \left(\overline{f}^{sp} - f^{sp}\right) \Big/ \overline{f}^{sp}.$$

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для оценки качества разработанных методов, они были запрограммированы на языке Delphi 7. Разрабо-

танные программы использовались при проведении ряда вычислительных экспериментов по решению задач различной размерности. Коэффициенты решенных задач являются случайными целыми числами, удовлетворяющими следующим условиям:

$$0 \le \underline{a}_{ij} \le 999,\ \ 0 < \overline{a}_{ij} \le 999,\ \ 0 < \underline{c}_j \le 999,\ \ 0 < \overline{c}_j \le 999,$$

$$i = \overline{1,m},\ j = \overline{1,n}.$$

Если оказывалось, что $\overline{a}_{ij} < \underline{a}_{ij}$ или $\overline{c}_j < \underline{c}_j$, то принимаем $\overline{a}_{ij} := \underline{a}_{ij} + 10$ и $\overline{c}_j := \underline{c}_j + 10$ соответственно.

Кроме того, правые части ограничений $\underline{b}_i$ и $\overline{b}_i$ $(i = \overline{1,m})$ определяются как

$$\underline{b}_i := \left[\frac{1}{3}\sum_{j=1}^{n}\underline{a}_{ij}\right],\ \overline{b}_i := \left[\frac{1}{3}\sum_{j=1}^{n}\overline{a}_{ij}\right]\ (i = \overline{1,m}).$$

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты проведенных экспериментов представлены в таблицах 1–6, где

$$\delta_M^{so} = \left(\overline{f}^{so} - f_M^{so}\right)\Big/\overline{f}^{so},\ \ \delta_C^{so} = \left(\overline{f}^{so} - f_C^{so}\right)\Big/\overline{f}^{so},$$

$$\delta_M^{sp} = \left(\overline{f}^{sp} - f_M^{sp}\right)\Big/\overline{f}^{sp},\ \ \delta_C^{sp} = \left(\overline{f}^{sp} - f_C^{sp}\right)\Big/\overline{f}^{sp},$$

$$b_M^{so} = \frac{1}{m}\left(\sum_{i=1}^{m}\left(\overline{b}_i - b_i^{so}(M)\right)\right),\ b_C^{so} = \frac{1}{m}\left(\sum_{i=1}^{m}\left(\overline{b}_i - b_i^{so}(C)\right)\right),$$

$$b_M^{sp} = \frac{1}{m}\left(\sum_{i=1}^{m}\left(\overline{b}_i - b_i^{sp}(M)\right)\right),\ b_C^{sp} = \frac{1}{m}\left(\sum_{i=1}^{m}\left(\overline{b}_i - b_i^{sp}(C)\right)\right),$$

$$b_i^{so}(M) = \sum_{j=1}^{n}\underline{a}_{ij}x_j^{so}(M),\ b_i^{so}(C) = \sum_{j=1}^{n}\underline{a}_{ij}x_j^{so}(C),$$

$$b_i^{sp}(M) = \sum_{j=1}^{n}\overline{a}_{ij}x_j^{sp}(M),\ \ b_i^{sp}(C) = \sum_{j=1}^{n}\overline{a}_{ij}x_j^{sp}(C).$$

Здесь

$$X^{so}(M) = \left(x_1^{so}(M), x_2^{so}(M), \ldots, x_n^{so}(M)\right),$$

$$X^{so}(C) = \left(x_1^{so}(C), x_2^{so}(C), \ldots, x_n^{so}(C)\right),$$

$$X^{sp}(M) = \left(x_1^{sp}(M), x_2^{sp}(M), \ldots, x_n^{sp}(M)\right),$$

$$X^{sp}(C) = \left(x_1^{sp}(C), x_2^{sp}(C), \ldots, x_n^{sp}(C)\right).$$

являются субоптимистическим и субпессимистическим решениями, построенными методами максимального приращения и нелинейного штрафа, соответственно.

Таблица 1 – Значения функции (1) и их погрешности $(m \times n = 20 \times 500)$

N	1	2	3	4	5
f_M^{so}	4072,00	4046,00	4059,00	3952,00	4038,00
f_C^{so}	4099,00	4065,00	4082,00	3971,00	4048,00
$\overline{f}^{so}$	4113,00	4087,00	4111,00	3998,00	4067,00
f_M^{sp}	804,00	789,00	800,00	778,00	782,00
f_C^{sp}	811,00	798,00	813,00	793,00	793,00
$\overline{f}^{sp}$	826,00	815,00	827,00	807,00	811,00
δ_M^{so}	0,0100	0,0100	0,0126	0,0115	0,0071
δ_C^{so}	0,0053	0,0054	0,0083	0,0068	0,0059
δ_M^{sp}	0,0266	0,0319	0,0326	0,0359	0,0358
δ_C^{sp}	0,0182	0,0209	0,0169	0,0173	0,0222
b_M^{so}	11,45	16,90	16,35	20,95	11,60
b_C^{so}	10,10	18,85	20,35	23,40	16,75
b_M^{sp}	35,50	35,60	32,30	36,95	47,90
b_C^{sp}	34,95	36,70	36,30	33,80	47,20

Таблица 2 – Значения функции (1) и их погрешности $(m \times n = 20 \times 1000)$

N	1	2	3	4	5
f_M^{so}	8200,00	8182,00	8104,00	8081,00	8137,00
f_C^{so}	8251,00	8248,00	8171,00	8127,00	8192,00
$\overline{f}^{so}$	8276,00	8268,00	8195,00	8154,00	8218,00
f_M^{sp}	1632,00	1617,00	1616,00	1576,00	1606,00
f_C^{sp}	1655,00	1643,00	1635,00	1602,00	1623,00
$\overline{f}^{sp}$	1670,00	1660,00	1656,00	1617,00	1645,00
δ_M^{so}	0,0092	0,0104	0,0111	0,0090	0,0099
δ_C^{so}	0,0039	0,0036	0,0033	0,0038	0,0032
δ_M^{sp}	0,0228	0,0259	0,0242	0,0254	0,0237
δ_C^{sp}	0,0090	0,0033	0,0127	0,0093	0,0134
b_M^{so}	17,40	34,55	33,75	35,75	22,80
b_C^{so}	18,00	23,60	20,80	32,75	1685,00
b_M^{sp}	41,80	29,10	40,05	40,00	34,70
b_C^{sp}	36,75	38,10	47,20	39,20	32,05

Таблица 3 – Значения функции (1) и их погрешности $(m \times n = 50 \times 500)$

N	1	2	3	4	5
f_M^{so}	3943,00	3968,00	4031,00	4084,00	4007,00
f_C^{so}	3961,00	3986,00	4037,00	4103,00	4011,00
$\overline{f}^{so}$	3988,00	4025,00	4075,00	4137,00	4046,00
f_M^{sp}	776,00	775,00	765,00	796,00	782,00
f_C^{sp}	783,00	782,00	761,00	798,00	776,00
$\overline{f}^{sp}$	798,00	801,00	788,00	823,00	804,00
δ_M^{so}	0,0113	0,0142	0,0108	0,0128	0,0096
δ_C^{so}	0,0070	0,0107	0,0101	0,0104	0,0087
δ_M^{sp}	0,0276	0,0325	0,0292	0,0328	0,0274
δ_C^{sp}	0,0188	0,0237	0,0343	0,0304	0,0348
b_M^{so}	31,8400	38,3800	30,9400	34,9400	31,4800
b_C^{so}	31,66	41,12	35,52	33,24	35,54
b_M^{sp}	51,4200	61,7600	64,2400	49,9800	50,0600
b_C^{sp}	45,66	52,94	86,84	60,82	74,08

Таблица 4 – Значения функции (1) и их погрешности $(m \times n = 50 \times 1000)$

N	1	2	3	4	5
f_M^{so}	8148,00	7984,00	8244,00	7970,00	8099,00
f_C^{so}	8195,00	8015,00	8258,00	8010,00	8106,00
$\overline{f}^{so}$	8243,00	8063,00	8309,00	8056,00	8169,00
f_M^{sp}	1593,00	1575,00	1620,00	1560,00	1581,00
f_C^{sp}	1609,00	1583,00	1615,00	1566,00	1597,00
$\overline{f}^{sp}$	1633,00	1614,00	1654,00	1592,00	1623,00
δ_M^{so}	0,0115	0,0098	0,0078	0,0107	0,0086
δ_C^{so}	0,0070	0,0068	0,0064	0,0057	0,0081
δ_M^{sp}	0,0245	0,0242	0,0206	0,0201	0,0259
δ_C^{sp}	0,0147	0,0192	0,0236	0,0163	0,0160
b_M^{so}	42,6200	55,4800	34,8400	52,2400	44,1600
b_C^{so}	43,06	52,96	43,98	51,60	50,86
b_M^{sp}	71,3400	74,8600	69,9800	78,1600	72,9800
b_C^{sp}	65,86	85,08	101,02	82,86	74,92

Таблица 5 – Показатели эффективности методов

$m \times n$	20×100	20×200	20×500	20×1000
N_C^{so}	2	5	5	5
N_M^{so}	1	0	0	0
N_C^{sp}	3	1	5	5
N_M^{sp}	2	2	0	0

Таблица 6 – Показатели эффективности методов

$m \times n$	50×100	50×200	50×500	50×1000
N_C^{so}	5	4	5	5
N_M^{so}	0	0	0	0
N_C^{sp}	2	3	3	4
N_M^{sp}	3	2	2	1

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты проведенных экспериментов, представленые в таблицах 1–6, еще раз подтверждают высокую эффективность разработанных методов.

Из выше приведенных таблиц видно, что для 40 случайно выбранных задач значения функции (1), найденные методом нелинейного штрафа, в большинстве случаев лучше, чем значения, определенные методом максимального приращения (эти методы изложены в разделе 3). Однако, в нескольких случаях субпессимистические значения найденные методом максимального приращения, были лучшими. Для задач размерностей 20×100, 20×200, 50×200 оба метода дали одинаковые значения. Поэтому в таблицах 5 и 6 число соответствующих задач меньше пяти. С другой стороны, относительные погрешности субоптимистических значений в методе максимального приращения и нелинейного штрафа меняются в интервалах [0,0071, 0,0428] и [0,0032, 0,0398], соответственно. А для субпессимистических значений, соответственно, находятся в интервалах [0,0201, 0,1195] и [0,0033, 0,1081].

ВЫВОДЫ

Исходя из таблицы и обсуждений можно сделать следующие выводы. В работе решена задача булевого программирования с интервальными коэффициентами. Введены понятия субоптимистического и субпессимистического решений этой задачи. Для построения этих решений нами предложены два метода, названные «Метод максимального приращения функционала» и «Метод нелинейного штрафа». При вычислительных экспериментах метод нелинейного штрафа в большинстве случаев дает меньшие относительные погрешности. Поэтому можно считать метод нелинейного штрафа более эффективным. Кроме того, заданные в правых частях системы (2) числа $\overline{b}_i$ $(i = \overline{1, m})$ уменьшены в среднем на 11–55 единиц для субоптимистических решений и на 16–78 единиц для субпессимистических решений. Это дает возможность использовать меньше выделенных ресурсов для реальных экономических задач.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках госбюджетной научно-исследовательской темы Института систем управления НАН Азербайджана «Разработка методов решения, алгоритмов и программных средств для решения различных классов задач целочисленного программирования» (номер гос. регистрации № 0101 Аз 00736). Отметим, что часть этой работы рассмотрена авторами в работах [18, 19].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Libura M. Integer programming problems with inexact objective function / M. Libura // Contr. And Cybern. – 1980. – Vol. 9, № 4. – P. 189–202.
2. Ватолин А. А. О задачах линейного программирования с интервальными коэффициентами / А. А. Ватолин // ЖВМ и МФ. – 1984. – Т. 24, № 11. – С. 1629–1637.
3. Семенова Н. В. Решение одной задачи обобщенного целочисленного программирования / Н. В. Семенова // Кибернетика. – 1984. – № 5. – С. 25–31.
4. Леонтьев В. К. Устойчивость решений в задачах линейного булева программирования. / В. К. Леонтьев, К. Х. Мамутов // ЖВМ и МФ. – 1988. – Т. 28, № 10.– С. 1475–1481.
5. Рощин В. А. Вопросы решения и исследования одного класса задач неточного целочисленного программирования / В. А. Рощин, Н. В. Семенова, И. В. Сергиенко // Кибернетика. – 1989. – № 2. – С. 42–47.
6. Рощин В. А. Декомпозиционный подход к решению некоторых задач целочисленного программирования с неточными данными / В. А. Рощин, Н. В. Семенова, И. В. Сергиенко // ЖВМ и МФ. – 1990. – Т. 30, №5. – С. 786–791.
7. Сергиенко Т. И. Исследование устойчивости и параметрический анализ дискретных оптимизационных задач / Т. И.Сергиенко, Л. Н. Козерацкая, Т. Т. Лебедева. – К. : Наукова думка, 1995. – 170 с.
8. Emelichev V. A. On the radius of stability of a vector problem of linear Boolean programming / V. A. Emelichev, V. N. Krichko, D. P. Podkopaev // Discrete Math. Appl. – 2000. – Vol. 10. – P. 103–108.
9. Devyaterikova M. V. *L*-class enumeration algorithms for knapsack problem with interval data / M. V. Devyaterikova, A. A Kolokolov // International Conference on Operations Research: Book of Abstracts. – Duisburg, 2001.
10. Девятерикова М. В. Алгоритмы перебора *L*-классов для задачи о рюкзаке с интервальными данными / М. В. Девятерикова, А. А. Колоколов. – Омск : Ом ГУ, 2001. –20 с.
11. Devyaterikova M. V. *L*-class enumeration algorithms for one discrete production planning problem with interval input data / M. V. Devyaterikova, A. A. Kolokolov, A. P. Kolosov // Computers and Operations Research. – 2009. – Vol. 36, Issue 2. – P. 316–324.
12. Девятерикова М. В. Алгоритмы перебора *L*-классов для булевой задачи о рюкзаке с интервальными данными / М. В. Девятерикова, А. А. Колоколов, А. П. Колосов // Материалы III Всероссийской конференции «Проблемы оптимизации и экономическое приложение». – Омск : Изд-во Ом ГТУ, 2006. – С. 87.
13. Девятерикова М. В. Решение задачи о рюкзаке с интервальными данными на основе перебора *L*-классов / М. В. Девятерикова, А. А. Колоколов, А. П. Колосов // Материалы III международной конференции «Танаевские чтения». – Минск, 2007. – С.51–55.
14. Emelichev V. A. Stability criteria in vector combinatorial bottleneck problems in terms of binary realitions / V. A. Emelichev, K.G.Kuzmin // Cybernetics and Systems Analysis. – 2008. – Vol. 44, № 3. – P. 397–404.
15. Emelichev V.A. Quantitative stability analysis for vector problems of 0–1 programming / V. A. Emelichev, D. P. Podkopaev // Discrete Optimitation. – 2010. – №7. – P. 48–63.
16. Мамедов К. Ш. Один метод решения нечеткой задачи о ранце / К.Ш.Мамедов, С.Я. Гусейнов // Современные проблемы информатизации Кибернетики и Информационные проблемы : респ. конф.: материалы. – Баку, 2003. – Т. 3. – С. 10–13. (на азерб. языке)
17. Бабаев Дж. А. Методы построения субоптимальных решений многомерной задачи о ранце / Дж. А. Бабаев, К. Ш. Мамедов, М. Г. Мехтиев // ЖВМ и МФ. – 1978. – Т. 28, № 6. – С. 1443–1453.
18. Мамедов К. Ш. Понятия субоптимических и субпессимистических решений и методы построения их в задаче о ранце с интервальными данными / К. Ш. Мамедов, А. Г. Мамедова, С. Я. Гусейнов // Изв. НАН Азербайджана. – 2013. – № 6. – С. 164–173. (на азерб. языке)
19. Мамедов К. Ш. Методы построения субоптимических и субпессимистических решений в задаче Булевого программирование с интервальными данными / К. Ш. Мамедов, А. Г. Мамедова // Изв. НАН Азербайджана. 2014. – № 3. – С. 125–131.

Статья поступила в редакцию 10.02.2016.
После доработки 27.02.2016.

Мамедов К. Ш.[1], Мамедова А. Г.[2]

[1]Д-р фіз.-мат. наук, професор Бакинського Державного Університету і зав. відділом Інституту Систем Керування НАН Азербайджану, Азербайджан, Баку

[2]Докторант, науковий співробітник Інституту Систем Керування НАН Азербайджану, Азербайджан, Баку

ПОНЯТТЯ СУБОПТИМІСТИЧНОГО І СУБПЕСИМІСТИЧНОГО РІШЕНЬ ТА ПОБУДОВА ЇХ В ІНТЕРВАЛЬНІЙ ЗАДАЧІ БУЛЕВОГО ПРОГРАМУВАННЯ

У роботі розглянута інтервальна задача булевого програмування. Дано деякі економічні інтерпретації цієї задачі, у результаті яких побудована економіко-математична модель. Уведено поняття припустимого, оптимістичного, песимістичного, субоптимістичного і субпесимістичного рішень задачі булевого програмування з цілочисленими інтервальними даними. Розроблено два алгоритми побудови субоптимістичного і субпесимістичного рішень цієї задачі. Природно, що ці рішення можуть відрізняться від оптимістичного і песимістичного рішень. Тому необхідно оцінити відносні погрішності знайдених субоптимістичних і субпесимістичних рішень від оптимістичного і песимістичного, відповідно. З цією метою побудована мажорувальна функція типу Лагранжа. Доведено, що мінімальне значення цієї функції є верхньою межею оптимістичного і песимістичного значень цільової функції, відповідно. Мінімізацією цієї функції знаходиться верхня межа субоптимістичного і субпесимістичного значень цільової функції. Проведено обчислювальні експерименти з вирішення задача різної розмірності.

Ключові слова: задача булевого програмування з целочисленими інтервальними даними, оптимістичне рішення, песимістичне рішення, субоптимістичне рішення, субпесимістичне рішення, максимальне збільшення функціонала, нелінійний штраф, функція Лагранжа, обчислювальні експерименти.

Mamedov K. Sh.[1], Mamedova A. H.[2]
[1]Dr.Sc., Professor, Head of department of Institute of Control Systems, Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan
[2]Scientific Worker of Institute of Control Systems, Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan

DEFINITIONS OF SUBOPTIMISTIC AND SUBPESSIMISTIC SOLUTIONS AND THEIR CONSTRUCTION IN THE INTERVAL BOOLEAN PROGRAMMING PROBLEM

The work considers an interval examples of Bulian programming.Given some economic interpretation to this problem which result in the constructed economic-mathematical model.Introduced the definitions of optimistic, pessimistic, and suboptimistic, subpessimistic solutions for the Boolean programming problem with integer interval data are introduced. On the basis of the economic interpretation of the problem two algorithms are developed for the constructing of the suboptimistic and subpessimistic solutions of this task. Of course, when solutions may different from suboptimistic and subpessimistic solutions.It is therefore necessary to estimate the relative error of the found to estimate the error of the suboptimistic and subpessimistic solutions from optimistic and pessimistic solutions appropriately. For this purpose Lagrange type majoring function is constructed. It is proved, that the minimum value of this function is the upper bound of the optimistic and pessimistic values of the objective function appropriately. Minimization of this function is in the upper border of the suboptimistic and subpessimistic values of the performance function. Numerous computational experiments on the examples with different dimensions are provided.

Keywords: Boolean programming problem, integer interval data, optimistic solution, pessimistic solution, suboptimistic solution, subpessimistic solution, non-linear penalty function, Lagrange function, computational experiments.

REFERENCES

1. Libura M. Integer programming problems with inexact objective function, *Contr. And Cybern.*, 1980, Vol. 9, No. 4, pp. 189–202.
2. Vatolin A. A. O zadachah linejnogo programmirovanija s interval'nymi kojefficientami, *ZhVM i MF*, 1984, Vol. 24, No. 11, pp. 1629–1637.
3. Semenova N. V. Reshenie odnoj zadachi obobshhennogo celochislennogo programmirovanija, *Kibernetika*, 1984, No. 5, pp. 25–31.
4. Leont'ev V. K., Mamutov K. H. Ustojchivost' reshenij v zadachah linejnogo buleva programmirovanija, *ZhVM i MF*, 1988, Vol. 28, No. 10, pp. 1475–1481.
5. Roshhin V. A., Semenova N. V., Sergienko I. V. Voprosy reshenija i issledovanija odnogo klassa zadach netochnogo celochislennogo programmirovanija, *Kibernetika*, 1989, No. 2, pp. 42–47.
6. Roshhin V. A., Semenova N. V., Sergienko I. V. Dekompozicionnyj podhod k resheniju nekotoryh zadach celochislennogo programmirovanija s netochnymi dannymi, *ZhVM i MF*, 1990, Vol. 30, No. 5, pp. 786–791.
7. Sergienko T. I., Kozerackaja L. N., Lebedeva T. T. Issledovanie ustojchivosti i parametricheskij analiz diskretnyh optimizacionnyh zadach. Kiev, Naukova dumka, 1995, 170 p.
8. Emelichev V. A., Krichko V. N., Podkopaev D. P. On the radius of stability of a vector problem of linear Boolean programming, *Discrete Math. Appl*, 2000, Vol. 10, pp. 103–108.
9. Devyaterikova M. V., Kolokolov A. A. L-class enumeration algorithms for knapsack problem with interval data, *International Conference on Operations Research: Book of Abstracts*. Duisburg, 2001.
10. Devjaterikova M. V., Kolokolov A. A. Algoritmy perebora L-klassov dlja zadachi o rjukzake s interval'nymi dannymi. Omsk, Om GU, 2001, 20 p.
11. Devyaterikova M. V., Kolokolov A. A., Kolosov A. P. L-class enumeration algorithms for one discrete production planning problem with interval input data, *Computers and Operations Research*, 2009, Vol. 36, Issue 2, pp. 316–324.
12. Devjaterikova M. V., Kolokolov A. A., Kolosov A. P. Algoritmy perebora L-klassov dlja bulevoj zadachi o rjukzake s interval'nymi dannymi, *Materialy III Vserossijskoj konferencii «Problemy optimizacii i jekonomicheskoe prilozhenie»*. Omsk, Izd-vo Om GTU, 2006, P. 87.
13. Devjaterikova M. V., Kolokolov A. A, Kolosov A. P. Reshenie zadachi o rjukzake s interval'nymi dannymi na osnove perebora L-klassov, *Materialy III mezhdunarodnoj konferencii «Tanaevskie chtenija»*. Minsk, 2007, pp. 51–55.
14. Emelichev V. A., Kuzmin K. G. Stability criteria in vector combinatorial bottleneck problems in terms of binary realitions, *Cybernetics and Systems Analysis*, 2008, Vol. 44, No. 3, pp. 397–404.
15. Emelichev V. A., Podkopaev D. P. Quantitative stability analysis for vector problems of 0–1 programming, *Discrete Optimitation*, 2010, No. 7, pp. 48–63.
16. Mamedov K. Sh., Gusejnov S. Ja. Odin metod reshenija nechetkoj zadachi o rance / K.Sh.Mamedov, *Sovremennye problemy informatizacii Kibernetiki i Informacionnye problemy : resp. konf.: materialy*. Baku, 2003, Vol. 3, pp. 10–13. (na azerb. jazyke)
17. Babaev Dzh. A., Mamedov K. Sh., Mehtiev M. G. Metody postroenija suboptimal'nyh reshenij mnogomernoj zadachi o rance, *ZhVM i MF*, 1978, Vol. 28, No. 6, pp. 1443–1453.
18. Mamedov K. Sh., Mamedova A. G., Gusejnov S. Ja. Ponjatija suboptimicheskih i subpessimisticheskih reshenij i metody postroenija ih v zadache o rance s interval'nymi dannymi, *Izv. NAN Azerbajdzhana*, 2013, No. 6, pp. 164–173. (na azerb. jazyke)
19. Mamedov K. Sh., Mamedova A. G. Metody postroenija suboptimicheskih i subpessimisticheskih reshenij v zadache Bulevogo programmirovanie s interval'nymi dannymi, *Izv. NAN Azerbajdzhana*, 2014, No. 3, pp. 125–131.

Наукове видання

Радіоелектроніка,

інформатика,

управління

№ 3/2016

Науковий журнал

Головний редактор – д-р фіз.-мат. наук В. В. Погосов

Заст. головного редактора – д-р техн. наук С. О. Субботін

Комп'ютерне моделювання та верстання С. В. Зуб
Редактор англійських текстів С. О. Субботін

Оригінал-макет підготовлено у редакційно-видавничому відділі ЗНТУ

Свідоцтво про державну реєстрацію
КВ № 6904 від 29.01.2003.

Підписано до друку 04.10.2016. Формат 60×84/8.
Папір офс. Різогр. друк. Ум. друк. арк. 12,79.
Тираж 300 прим. Зам. № 921.

69063, м. Запоріжжя, ЗНТУ, друкарня, вул. Жуковського, 64

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 2394 від 27.12.2005.