ISSN 2522-9052

Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”

National Technical University
“Kharkiv Polytechnic Institute”

Сучасні інформаційні системи

Advanced Information Systems

Том 4, № 2

Volume 4, No. 2

Щоквартальний науково-технічний журнал

Заснований у березні 2017 року

У журналі публікуються результати досліджень з експлуатації та розробки сучасних інформаційних систем у різних проблемних галузях. Журнал призначений для наукових працівників, викладачів, докторантів, аспірантів, а також студентів старших курсів відповідних спеціальностей.

Засновник і видавець:
Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”

Кафедра “Обчислювальна техніка та програмування”, вул. Кирпичова, 2, 61002, м. Харків, Україна

Телефон:
+38 (057) 707-61-65

E-mail редколегії:
kuchuk56@ukr.net

Інформаційний сайт:
http://ais.khpi.edu.ua

Quarterly scientific and technical journal

Founded in March 2017

The journal publishes the research study from the usage and development of advanced information systems in various problem areas. The journal is intended for researchers, lecturers, doctoral students, postgraduate students, and for senior students of the corresponding specialties.

Founder and publisher:
National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

Department of Computer Science and Programming, 61002, Ukraine, Kharkiv, Kyrpychova str., 2

Phone:
+38 (057) 707-61-65

E-mail of the editorial board:
kuchuk56@ukr.net

Information site:
http://ais.khpi.edu.ua

Затверджений до друку Вченою Радою Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” (протокол від 26 травня 2020 року № 3).

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 22522-12422Р від 13.01.2017 р.

Включений до “Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук” до категорії Б – наказом Міністерства освіти і науки України від 07.05.2019 № 612 (додаток 7, п. 33)

Харків • 2020

© Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”

Редакційна колегія

Головний редактор:
СОКОЛ Євген Іванович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*).

Заступник головного редактора:
СЕМЕНОВ Сергій Геннадійович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*).

Члени редакційної колегії:
БАЙРАМОВ Азад Агахар огли
(*д-р фіз.-мат. наук, проф., Баку, Азербайджан*);
ГНАТЮК Сергій Олександрович
(*д-р техн. наук, доц., Київ, Україна*);
ЗАЙЦЕВА Єлена
(*д-р наук, проф., Жиліна, Словаччина*);
КАРПІНСЬКИЙ Микола Петрович
(*д-р техн. наук, проф., Бельсько-Бяла, Польща*);
КОВАЛЕНКО Андрій Анатолійович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
КОСТЕНКО Павло Юрійович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
КУЧУК Георгій Анатолійович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
ЛИТВИН Василь Володимирович
(*д-р техн. наук, проф., Львів, Україна*);
ЛУКІН Володимир Васильович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
МАМУЗІЧ Ілля
(*д-р техн. наук, проф., Загреб, Хорватія*);
МИГУЩЕНКО Руслан Павлович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
МОХАММЕД Амін Саліх
(*д-р наук, доц., Ербіль, Ірак*);
ОСТАПОВ Сергій Едуардович
(*д-р фіз.-мат. наук, проф., Чернівці, Україна)*;
ПОВОРОЗНЮК Анатолій Іванович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
РАСКІН Лев Григорович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
РАДЄВ Христо Кирилов
(*д-р техн. наук, проф., Софія, Болгарія*);
САРАВАНА Балайі Б.
(*PhD, доц., Ербіль, Ірак*);
СЕРКОВ Олександр Анатолійович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна)*;
СМІРНОВ Олексій Анатолійович
(*д-р техн. наук, проф., Кропивницький, Україна*);
СТАНКУНАС Йонас
(*д-р техн. наук, проф., Вільнюс, Литва*);
СТЕЦЬКО Юрій
(*канд. фіз.-мат. наук, Тампа, Флоріда, США*);
СУЧКОВ Григорій Михайлович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна)*;
УШЕНКО Юрій Олександрович
(*д-р фіз.-мат. наук, проф., Чернівці, Україна)*;
ФІЛАТОВА Ганна Євгенівна
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
ХАРЧЕНКО Вячеслав Сергійович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
ШВАЧИЧ Геннадій Григорович
(*д-р техн. наук, проф., Дніпро, Україна*);
ШИШАЦЬКИЙ Андрій Володимирович
(*канд. техн. наук, Київ, Україна*);

Відповідальний секретар:
ПОДОРОЖНЯК Андрій Олексійович
(*канд. техн. наук, доц., Харків, Україна*).

Технічний секретар:
ГРЕБЕНЮК Дарина Сергіївна
(*магістр комп. інж., Харків, Україна*).

Editorial board

Editor-in-Chief:
Yevgen SOKOL
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*).

Associate editor:
Serhii SEMENOV
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*).

Editorial board members:
Azad Agalar oğlu BAYRAMOV
(*Dr. Sc. (Ph-Math.), Prof., Baku, Azerbaijan*);
Sergiy GNATYUK
(*Dr. Sc. (Tech.), Ass. Prof., Kyiv, Ukraine*);
Elena ZAITSEVA
(*Dr. (Comp. Eng.), Prof., Zilina, Slovakia*);
Mikolay KARPINSKI
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Bielsko-Biała, Poland*);
Andrii KOVALENKO
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Pavlo KOSTENKO
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Heorhii KUCHUK
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Vasyl LYTVYN
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Lviv, Ukrain*e);
Volodymyr LUKIN
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Ilya MAMUZIĆ
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Zagreb, Croatia*);
Ruslan MYGUSHCHENKO
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Amin Salih MOHAMMED
(*Dr. (Comp. Eng.), Ass. Prof., Erbil, Iraq*);
Serhii OSTAPOV
(*Dr. Sc. (Ph-Math.), Prof., Chernivtsi, Ukraine*);
Anatoliy POVOROZNYUK
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Lev RASKIN
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Hristo RADEV
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Sofia, Bulgaria*);
Balasubramanian SARAVANA BALAJI
(*PhD (Comp. Eng.), Ass. Prof., Erbil, Iraq*);
Aleksandr SERKOV
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Alexey SMIRNOV
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kropyvnytskyi, Ukraine*);
Jonas STONKUNAS
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Vilnius, Lithuania*);
Yuri STETSKO
(*PhD (Ph-Math.), Tampa, Florida, USA*);
Hryhorii SUCHKOV
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Yuri USHENKO
(*Dr. Sc. (Ph-Math.), Prof., Chernivtsi, Ukraine*);
Hanna FILATOVA
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Viacheslav KHARCHENKO
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Hennadii SHVACHICH
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Dnipro, Ukraine*);
Andrii SHYSHATSKYI
(*PhD (Tech.), Kyiv, Ukraine*).

Responsible secretary:
Andrii PODOROZHNIAK
(*PhD (Tech.), Ass. Prof., Kharkiv, Ukraine*).

Technical secretary:
Daryna HREBENIUK
(*MSD of Comp. Eng., Kharkiv, Ukraine*).

ЗМІСТ

ПРОБЛЕМИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

Байрамов А. А., Мамедов В. М.
Алгоритм виведення висновку на основі результатів обробки розвідувальних даних (eng.) 5

Гавриленко С. Ю., Челак В. В., Горносталь О. А., Вассилев В. А.
Розробка методу ідентифікації стану комп'ютерної системи з використанням нечіткого кластерного аналізу (eng.) 8

Главчева Д. М., Яловега В. А., Подорожняк А. О., Лукова-Чуйко Н. В.
Порівняння класифікаторів, у застосуванні до проблеми аналізу знімків біопсії (eng.) 12

Гороховатський В. О., Пономаренко Р. П.
Класифікація зображень на підставі формування незалежної системи кластерів у складі структурних описів бази еталонів 17

Мелешко Є. В., Дрєєв О. М., Дрєєва Г. М.
Метод ідентифікації профілів ботів на основі нейронних мереж у рекомендаційних системах (eng.) ... 24

МОДЕЛЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Байрамов А. А., Сабзієв Е. Н., Насібов Я. А.
Моделювання огляду в гірській місцевості в залежності від кількості систем спостереження (eng.) ... 29

Гаєвський С. В., Хмелевський С. І., Бойко А. В., Мищенко Т. Ю., Тімочко О. О.
Математичні моделі потоку відмов комплектуючих виробів радіоелектронної системи літака (eng.) 34

Литвиненко Я. В., Лупенко С. А., Ониськів П. А., Триснюк В. М., Зозуля А. М.
Математична модель ритмокардіосигналу у вигляді вектора стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових послідовностей (eng.) 42

Руккас К. М., Жолткевич Г. Г.
Стохастична модель для оцінки CAP-гарантій для розподілених баз даних (eng.) 47

МЕТОДИ СИНТЕЗУ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Александров Є. Є. , Александрова Т. Є. , Костяник І. В. , Моргун Я. Ю.
Параметричний синтез нестаціонарної системи автоматичного керування курсовою стійкістю автомобіля (eng.) 51

Андрєєв С. М., Жилін В. А.
Геоінформаційна система підтримки прийняття рішень на базі сховища просторових даних геопорталу 60

Гадецька С. В., Дубницький В. Ю., Ходирєв О. І.
Спеціалізований програмний калькулятор для оцінки клінічної інформативності лабораторних тестів 80

Дергачов К. Ю., Краснов Л. О., Челядін О. О., Казатинський Р. Е.
Розробка нових методів і засобів підвищення якості відеоданих в мобільних системах технічного зору (eng.) 85

Касілов О. В., Крамська К. І.
Моделі і метод синтезу агентної інформаційно-пошукової системи 94

Хома Ю. В., Хома В. В.
Розроблення цифрового еквалайзера для біосенсора портативного аналізатора біоімпедансу 100

TABLE OF CONTENTS

PROBLEMS OF IDENTIFICATION IN INFORMATION SYSTEMS

Bayramov A. A., Mammadov V. M.
Conclusion algorithm based on the reconnaissance data processing results 5

Gavrylenko S., Chelak V., Hornostal O., Vassilev V.
Development of a method for identifying the state of a computer system using fuzzy cluster analysis 8

Hlavcheva D., Yaloveha V., Podorozhniak A., Lukova-Chuiko N.
A comparison of classifiers applied to the problem of biopsy images analysis 12

Gorokhovatskyi V., Ponomarenko R.
Classification of images based on the formation of independent cluster system within the descriptions of etalon dataset (ukr.)..... 17

Meleshko Ye., Drieiev O., Drieieva H.
Method of identification bot profiles based on neural networks in recommendation systems 24

INFORMATION SYSTEMS MODELING

Bayramov A. A., Sabziev E. N., Nasibov Y. A.
Modeling of observation in the mountain terrain depending on number of supervisory systems 29

Haievskyi S., Hmelevskyi S., Boyko A., Myschenko T., Timochko O.
Mathematical models of the failure flow of the aircraft electronic system components 34

Litvinenko Ia., Lupenko S., Oniskiv P., Trysnyuk V., Zozulia A.
Mathematical model of rhythmocardiosignal in vector view of stationary and stationary-related case sequences 42

Rukkas K., Zholtkevych G.
Probabilistic model for estimation of CAP-guarantees for distributed data store 47

METHODS OF INFORMATION SYSTEMS SYNTHESIS

Aleksandrov Ye., Aleksandrova T., Kostianyk I., Morgun Ya.
Parametric synthesis of a non-stationary automatic control system of the course stability of the car 51

Andrieiev S., Zhilin V.
Geoinformation system of decision support based on the geoportal spatial data storage (ukr.) 60

Gadetska S., Dubnitskiy V., Khodyrev A.
Specialized programmable calculator for laboratory test clinical informativeness estimate (ukr.) 80

Dergachov K., Krasnov L., Cheliadin O., Kazatinskij R.
Video data quality improvement methods and tools development for mobile vision systems 85

Kasilov O., Kramska K.
Models and method of agent information retrieval system synthesis (ukr.) 94

Khoma Yu., Khoma V.
Digital equalizer design of biosensor for portable bioimpedance analyzer (ukr.) 100

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Василишин В. І., Заремський М. Й., Коцюба В. П., Чеховський О. В.
Оцінювання кутових координат джерел випромінювання методом Root-MUSIC при попередньому формуванні ортогональних променів в умовах впливу позасекторного джерела ... 110

Копашинський С. А., Серпухов О. В., Макогон О. А., Каракуркчі Г. В., Клімов О. П., Бабкін Ю. В.
Дослідження впливу оперативно-тактичних та воєнно-географічних чинників району бойових дій на функціонування елементів системи відновлення бронетанкового озброєння та військової техніки (eng.) 117

Кузнєцов О. Л., Карлов В. Д., Коломійцев О. В., Садовий К. В., Бєсова О. В.
Вплив статистичних характеристик флуктуацій початкових фаз радіолокаційного сигналу на точність вимірювання радіальної швидкості аеродинамічного об'єкту (eng.) 123

Малєєва О. В., Косенко В. В., Давидовський Ю. К., Боєв Д. О.
Аналіз синергії факторів та моделі стратегії злиття в дослідженні ефективності діяльності операторів зв'язку (eng.) 130

МЕТОДИ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Пєвнєв В. Я., Войков Ю. В.
Дослідження та прототипирування методів стеганографії з використанням мозаїки (eng.) 137

Пєвнєв В. Я., Трегуб Ю. В.
Аналіз та дослідження відомих систем оркестрації для побудування мікросервісної інфраструктури (eng.) 142

ПРИКЛАДНІ ПРОБЛЕМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Краснобаєв В. А., Янко А. С., Тур С. Г.
Метод контрольної перевірки цифрової інформації, представленої в системі залишкових класів (eng.) 148

Худов Г. В., Тах'ян К. А., Чепурний В. П., Хижняк І. А., Романенко К. О., Неводничий А. О., Яковенко О. В.
Оптимізація спільного пошуку та виявлення об'єктів в технічних системах спостереження (eng.) 156

Горбачов П. Ф., Ву Д. М., Штанько І. І.
Закономірності розподілу швидкості руху транспортних засобів на міських вулицях 163

Чалий С. Ф., Лещинський В. О., Лещинська І. О.
Багаторівнева персоналізація пояснень в рекомендаційних системах (eng.) 170

Алфавітний покажчик 176

INFORMATION SYSTEMS RESEARCH

Vasylyshyn V., Zaremskyi M., Kotsiuba V., Chehovsky O.
Estimation of the radiation source angular coordinates by Root-MUSIC method with the preliminary forming of orthogonal beams under the influence of out-of-band source (ukr.) 110

Kopashynskii S., Serpukhov O., Makogon H., Karakurkchi H., Klimov O., Babkin Yu.
Investigation of the influence of operational-tactical and military-geographical factors of the combat area on the functioning of elements of the armored weapons and military equipment recovery system 117

Kuznietsov O., Karlov V., Kolomiitsev O., Sadovyi K., Biesova O.
The influence of statistical characteristics of the fluctuations of the radiation signal initial phases on the accuracy of the measurement aerodynamic object radial velocity 123

Malyeyeva O., Kosenko V., Davydovskyi Yu., Boiev D.
Factor synergy analysis and merger strategy models in investigation of telecommunication operators' performance 130

METHODS OF INFORMATION SYSTEMS PROTECTION

Pevnev V., Voikov Yu.
Research and prototyping methods of steganography using mosaic 137

Pevnev V., Trehub Yu.
Analysis and research of well-known orchestration systems ”for the construction of microservice infrastructure 142

APPLIED PROBLEMS OF INFORMATION SYSTEMS OPERATION

Krasnobayev V., Yanko A., Tur S.
Method for the control verification of digital information, represented in a residue number system 148

Khudov H., Tahyan K., Chepurnyi V., Khizhnyak I., Romanenko K., Nevodnichii A., Yakovenko O.
Optimization of joint search and detection of objects in technical surveillance systems 156

Horbachov P., Minh V. D., Shtanko I.
Distribution regularities of motor vehicle speed on city streets (ukr.) 163

Chalyi S., Leshchynskyi V., Leshchynska I.
Multilevel personalization of explanations in recommender systems 170

Alphabetical index 176

За достовірність викладених фактів, цитат та інших відомостей відповідальність несе автор.

Географія статей цього номера

Азербайджан
Azerbaijan

Болгарія
Bulgaria

Германія
Germany

Україна
Ukraine

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Александров Є. Є. (Eugene Aleksandrov) 51
Александрова Т. Є. (Tetiana Aleksandrova) . 51
Андрєєв С. М. (Sergey Andrieiev) 60
Бабкін Ю. В. (Yuri Babkin) 117
Байрамов А. А. (Azad Agalar oğlu Bayramov) 5
..... 29
Бєсова О. В. (Oksana Biesova) 123
Боєв Д. О. (Dmitriy Boiev) 130
Бойко А. В. (Artur Boiko) 34
Василишин В. І. (Volodymyr Vasylyshyn) 110
Вассилев В. А. (Velizar Vassilev) 8
Войков Ю. В. (Yurii Voikov) 137
By Д.М. (Vu Dic Minh) 163
Гавриленко С. Ю. (Svitlana Gavrylenko) 8
Гадецька С. В. (Svitlana Gadetska) 80
Гаєвський С. В. (Serhii Haievskyi) 34
Главчева Д. М. (Daria Hlavcheva) 12
Горбачов П. Ф. (Peter Horbachov) 163
Горносталь О. А. (Oleksii Hornostal) 8
Гороховатський В. О. (Volodymyr Gorokhovatskyi) 17
Давидовський Ю. К. (Yurii Davydovskyi) 130
Дергачов К. Ю. (Kostiantyn Dergachov) 85
Дрєєв О. М. (Oleksandr Drieiev) 24
Дрєєва Г. М. (Hanna Drieieva) 24
Дубницький В. Ю. (Valeriy Dubnitskiy) 80
Жилін В. А. (Volodymyr Zhilin) 60
Жолткевич Г. Г. (Galyna Zholtkevych) 47
Заремський М. Й. (Mykola Zaremskyi) 110
Зозуля А. М. (Andriy Zozulia) 42
Казатинський Р. Е. (Roman Kazatinskij) 85
Каракуркчі Г. В. (Hanna Karakurkchi) 117
Карлов В. Д. (Vladimir Karlov) 123
Касілов О. В. (Oleg Kasilov) 94
Клімов О. П. (Alexej Klimov) 117
Коломійцев О. В. (Oleksii Kolomiitsev) 123
Копашинський С. А. (Serhiy Kopashynskii) .. 117
Косенко В. В. (Viktor Kosenko) 130
Костяник І. В. (Iryna Kostianyk) 51
Коцюба В. П. (Vasyl Kotsiuba) 110
Крамська К. І. (Kateryna Kramska) 94
Краснобаєв В. А. (Victor Krasnobayev) 148
Краснов Л. О. (Leonid Krasnov) 85
Кузнєцов О. Л. (Oleksandr Kuznietsov) 123
Лещинська І. О. (Irina Leshchynska) 170
Лещинський В. О. (Volodymyr Leshchynskyi) 170
Литвиненко Я. В. (Iaroslav Lytvynenko) 42
Лукова-Чуйко Н. В. (Nataliia Lukova-Chuiko) . 12
Лупенко С. А. (Serhii Lupenko) 42
Макогон О. А. (Helen Makogon) 117
Малєєва О. В. (Olga Malyeyeva) 130
Мамедов В. М. (Vugar M. Mammadov) 5
Мелешко Є. В. (Yelyzaveta Meleshko) 24
Мищенко Т. Ю. (Tatiana Mishchenko) 34
Моргун Я. Ю. (Yaroslav Morgun) 51
Насібов Я. А. (Yashar Ali ogly Nasibov) 29
Неводничий А. О. (Artem Nevodnichii) 156
Ониськів П. А. (Petro Onyskiv) 42
Пєвнєв В. Я. (Volodymyr Pevnev) 137
..... 142
Подорожняк А. О. (Andrii Podorozhniak) 12
Пономаренко Р. П. (Roman Ponomarenko) .. 17
Романенко К. О. (Konstantin Romanenko) .. 156
Руккас К. М. (Kyrylo Rukkas) 47
Сабзієв Е. Н. (Elhan Nariman oğlu Sabziev) .. 29
Садовий К. В. (Kostiantyn Sadovyi) 123
Серпухов О. В. (Oleksandr Serpukhov) 117
Тах'ян К. А. (Kristina Tahyan) 156
Тімочко О. О. (Oleksandr Timochko) 34
Трегуб Ю. В. (Yuliia Trehub) 142
Триснюк В. М. (Vasyl Trysnyuk) 42
Тур С. Г. (Serhii Tur) 148
Хижняк І. А. (Irina Khizhnyak) 156
Хмелевський С. І. (Serhii Khmelevskiy) 34
Ходирєв О. І. (Alexander Khodyrev) 80
Хома В. В. (Volodymyr Khoma) 100
Хома Ю. В. (Yuriy Khoma) 100
Худов Г. В. (Hennadii Khudov) 156
Чалий С. Ф. (Serhii Chalyi) 170
Челак В. В. (Viktor Chelak) 8
Челядін О. О. (Oleksandr Cheliadin) 85
Чепурний В. П. (Viacheslav Chepurnyi) 156
Чеховський О. В. (Oleg Chehovsky) 110
Штанько І. І. (Ihor Shtanko) 163
Яковенко О. В. (Olexandr Yakovenko) 156
Яловега В. А. (Vladyslav Yaloveha) 12
Янко А. С. (Alina Yanko) 148

Наукове видання

Сучасні інформаційні системи

Advanced Information Systems

Науковий журнал
Том 4, № 2

Відповідальний за випуск *С. Г. Семенов*
Технічний редактор *Д. С. Гребенюк*
Комп`ютерна верстка *Н. Г. Кучук*

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 22522-12422Р від 13.01.2017 р.

Підписано до друку 27.05.2020 Формат 60×84/8. Ум.-друк. арк. 21,25. Тираж 120 прим. Зам. 527-20

Адреса редакції: Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"
Кафедра ОТП, вул. Кирпичова, 2, 61002, м. Харків, Україна, тел. 707-61-65

Віддруковано з готових оригінал-макетів у друкарні ФОП Петров В.В.
Єдиний державний реєстр юридичних осіб та фізичних осіб-підприємців.
Запис № 24800000000106167 від 08.01.2009.

61144, м. Харків, вул. Гв. Широнінців, 79в, к. 137, тел. **(057) 778-60-34**
e-mail: **bookfabrik@mail.ua**

Problems of identification in information systems

UDC 51-7; 519.2 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.2.01**

A. A. Bayramov[1,2], V. M. Mammadov[1]

[1] War College of Armed Forces of the Azerbaijan Republic, Baku, Azerbaijan
[2] Control Systems Institute of the Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan

CONCLUSION ALGORITHM BASED ON THE RECONNAISSANCE DATA PROCESSING RESULTS

Abstract. As it is known, the investigation of enemy forces, time of the outbreak of hostilities, direction and the kind of activities are the tasks of military reconnaissance. For the purpose of investigation of the directions and fields of gathering of the reconnaissance information, revealing an importance of enemy activities the reconnaissance indications are determined. The reconnaissance indications are determined in accordance with tactical activities (assault, counter-offensive, defence, etc.). The formation of a base of the reconnaissance indications is offered for application these indications in the future. In the paper, the method of conclusion in accodance with reconnaissance indicators has been considered. The method of construction of the algorithms conclusion based on the results recipience of reconnaissance data processing has been offered for solution of the reconnaissance tasks.

Keywords: reconnaissance data; reconnaissance indications; database; conclusion algorithm; block diagram.

Introduction

As usual, there are next investigation tasks for military reconnaissance in the battle zone:

- information about enemy forces;
- time of the outbreak of hostilities;
- information about place and direction of the activities;
- the kind of activities.

The reconnaissance data are collected and developed, and then the decision-making is made for answer on these questions.

There are not scientific articles in the public data devoted on the especial calculations and assessments during development of the reconnaissance information and decision-making based on the obtained data and conclusions. For the purpose of investigations of the directions and fields of reconnaissance information gathering, revealing the significance of some enemy activities the reconnaissance indications are determined [1, 2]. Determining the kind of purposes (movements) the manifestations of enemy activities are the reconnaissance indications. In the main, the reconnaissance indications are determined in according with tactical actions (assault, counteroffensive, defence, etc.). For further using these indications there have been offered to create the base of reconnaissance indications (BRI). New revealed reconnaissance indications will fill up this base. After definition of reconnaissance indications, the process of gathering, development and investigation of the obtained reconnaissance information is begun in accordance with these indications. This information is compared with these indications. If there are not data connected with available indications, then there have been searched data in accordance with these reconnaissance indications [3]. After development of recconnaissance information the single result (conclusion) is formed.

The paper is devoted to development of the method of determination of the reconnaissance indications during processing reconnaissance data and obtaining the result (conclusion).

Conclusion algorithms

For the purpose of determination of the reconnaissance information processing result there has been occurred a necessity of formation of the algorithms of this process. These algorithms are created by reconnaissance information engineer subject to the various reconnissance indications, the experts' opinions, and are applied in the reconnissance expert system [4-7]. Developed algorithms realize the obtaining process of a result (conclusion) based on the object, time, place and activity, event (state) of reconnaissance information (Fig. 1). In this way the results (algorithms) output base can be created.

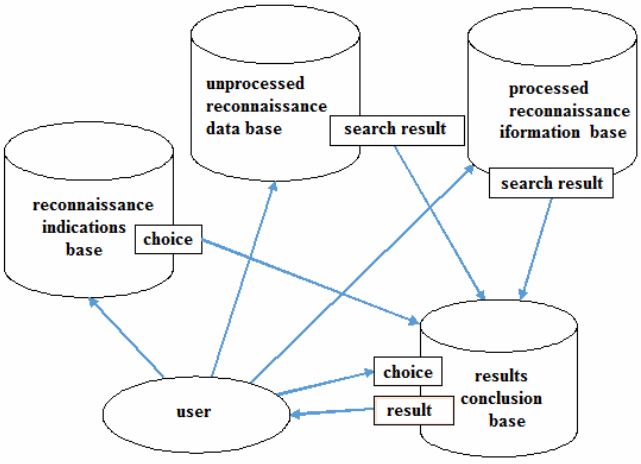


Fig. 1. Result output block diagram

In the public press there are not information about such method of reconnaissance information processing. Every time the new algorithm creation the result output base will broaden, and the result output mechanism will become easier.

© Bayramov A. A., Mammadov V. M., 2020

In accordance with the reconnaissance date content, there has been offered a creation of below kinds of the determination algorithms:

- about enemy forces;
- about time;
- about place (direction);
- about activity.

As appropriate, another kind of algorithms can be created.

For the purpose of creation of the solution algorithm of some reconnaissance task, it is need to determine initial criteria and possible results (answers). The initial criteria can be a total number of factors defined the reconnaissance indications. The research result can be the appropriate to given task reconnaissance indications from the reconnaissance information base or from reconnaissance data base, and them total number.

Let consider below an example of the developed and offered method of construction of the logical calculation algorithm of result output.

Example: Let determine the logical calculation algorithm of the solution task of "Does enemy assault?".

Solution:

Let determine the possible results of answers:

- The enemy will attack;
- The enemy does not attack;
- The attack of enemy is possible;
- It is possible not an attack of enemy;
- The purpose of enemy cannot be determined.

Then, let determine the reconnaissance indications of enemy purpose about attack:

a) intensive movement of enemy troops, especially tank units, to direction of the front line;

b) forward movement of the new artillery and mortar batteries;

c) mopping-up minefield by enemy;

d) intensive reconnaissance and activities of reconnaissance groups;

e) forward movement of the command posts at a short distance to the front line, etc.

Next step, there has been conducted a search of the intelligence in the data and information bases which confirmed given indications. Let, four a), b), c) and e) indications of them are determined. There are not data about d) indication.

The next case is possible: there are not intelligence about these a), b), c) and e) indications in the data and information bases. Then, it is impossible to determine a probability of enemy attack.

Let construct the algorithm of this task.

The initial factors:

- the total number of reconnaissance indications is (A) = 5.

The search result:

- the number of discovered reconnaissance indications is (B) = 4.

The possible results (answers):

D- the enemy will attack;

E- the enemy does not attack;

J- the attack of enemy is possible;

F-it is possible not an attack of enemy;

R- the purpose of enemy cannot be determine, it is need to search the extra intelligence.

As stated above, if there are not any intelligence appropriate reconnaissance indications in the data and information bases, then it is impossible to determine an enemy attack (result :⇔ R). Therefore, it should be take the next term: $B > 0$.

Then, it should be determined a number of missing reconnaissance indications: $C = A - B$.

The obtained result is compared with a number of determined reconnaissance indications: $B \geq C$.

This term is based on the demand that a number of determined reconnaissance indications should be majority that to find single-valued answer. Then, let find

$$B - C = G. \quad (1)$$

If $$G \geq 0, \quad (2)$$

then $$0.5*A = M \quad (3)$$

and compare $$G \geq M. \quad (4)$$

If the (4) term is realized, that is, a number of determined reconnaissance indications is equal or more than a number of missing one, then the enemy attack is uniquely determined (result :⇔ D).

If the (4) term is not realized, that is, $G < M$, then it can be adopt that the enemy attack is possible (result :⇔ J).

If in accordance with the above terms, a number of revealed reconnaissance indications is less than a number of missing one then (1) ÷ (4) procedures are repeated, and there is a result below:

$$C - B = Z; \quad (5)$$

$$A*0.5 = M; \quad (6)$$

$$Z \geq M. \quad (7)$$

In this case, if the term of (7) is realized then the "enemy will attack" result is true (result :⇔ E). If the term of (7) is not realize d, that is $Z < M$, then the "enemy will not attack" result is true (result :⇔ F). Thus, in accordance with (1) ÷ (7) algorithm, the solution of given task is "enemy will attack" (result :⇔ D). The software block diagram of above example algorithm is shown in Fig. 2.

Conclusion

Thus, in the paper, the problems and method of conclusion algorithm based on the recipience of reconnaissance data processing results have been considered in accordance with reconnaissance indications. The method of algorithm formation has been offered for conclusion making based on the results of data processing and solution of the reconnaissance tasks. The software block diagram for calculation in accordance with offered algorithm has been developed.

Applying of the offered algorithm of conclusion making in reconnaissance data processing it will provide a precision of obtained results. The offered method can make easier of the assessment and results conclusion task from reconnaissance data (information). It will increase the effectiveness of reconnaissance data processing.

REFERENCES

1. Ardashev, A.N. (2015), *Military scouts survival. Combat experience*, Yauza Press, Moscow, 672 p.
2. Buryak, A.P. (2007), *Analytical reconnaissance*, Eksmo, Moscow, 187 p.
3. Mammadov, V.M., Sabziev, E.N. and Bayramov, A.A. (2019), "Data gathering and processing system in themilitary reconnaissance", *National security and military sciences journal*, Baku, 5(2), pp. 42-52.
4. Bayramov, A.A. and Mammadov, V.M. (2019), "Application of expert assessment for reconnaissance data processing", *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*, Kiev, 2(35), pp. 71-76.
5. Samochvalov, Yu.Ya. and Naumenco, E.M. (2007), *Expert avalution. Methodological aspect*, State University of ICT, Kiev, 264 p.
6. Mammadov, V.M. and Bayramov, A.A. (2019), "Determination of realibity of the reconnaissance information source", *Modern Information, Measurement and Control Systems: Problems and Perspectives- MİMCS*, July 1-2, Baku, pp. 43-44.
7. Mammadov, V.M. (2019), "The expert evaluation and informational entropy in reconnaissance data processing", *Advanced İnformation Systems*, Kharkiv, Vol. 3(4), pp. 137-139, DOI: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.4.21

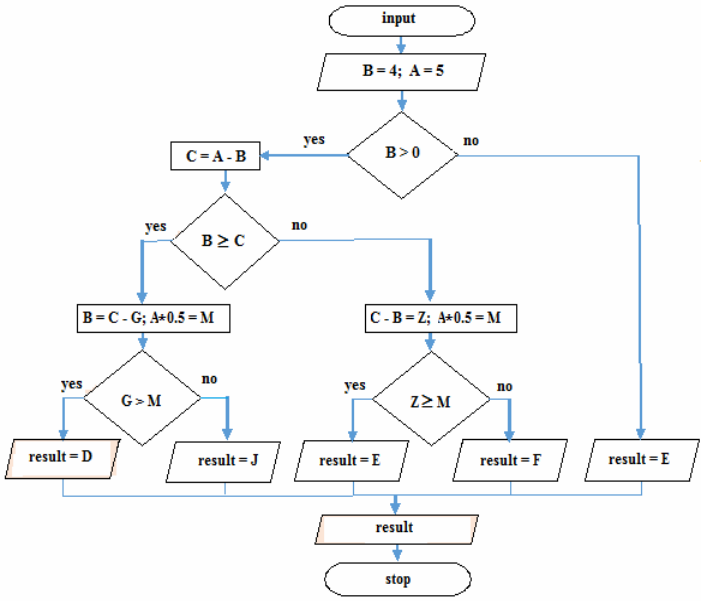


Fig. 2. The software block diagram of algorithm

Received (Надійшла) 23.01.2020
Accepted for publication (Прийнята до друку) 26.03.2020

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Байрамов Азад Агалар огли– доктор фізико-математичних наук, професор, професор-консультант, Військова Академія Збройних Сил Азербайджанської Республіки; Інститут систем управління Азербайджанської НАН, Баку, Азербайджан;
Azad Agalar oğlu Bayramov – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, National War College of Armed Forces of the Azerbaijan Republic; Control Systems Institute of the Azerbaijan National Academy of Sciences Baku, Azerbaijan;
e-mail: azad.bayramov@yahoo.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-6672-2338

Мамедов Вугар Мамедгусейн – полковник, завідувач кафедри, Військова Академія Збройних Сил Азербайджанської Республіки, Баку, Азербайджан;
Vugar Mammadhuseyn Mammadov – colonel, Head of Department, War College of Armed Forces of the Azerbaijan Republic, Baku, Azerbaijan;
e-mail: vugar70mm@mail.ru; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-0420-7864

Алгоритм виведення висновку на основі результатів обробки розвідувальних даних

А. А. Байрамов, В. М. Мамедов

Анотація. Як відомо, військова розвідка розглядає в основному такі завдання: з'ясування сил противника, час початку його дій і направлення дії, а також характер дій. З метою з'ясування напрямків і областей отримання розвідувальної інформації, визначаються розвідувальні ознаки, що виявляють значущість тієї чи іншої діяльності противника. Розвідувальні ознаки визначаються відповідно до тактичних діями (наступ, контрнаступ, оборона тощо). Для подальшого використання цих ознак пропонується створення бази розвідувальних ознак. У статті розглянуті питання і методика виведення висновку за результатами обробки розвідувальних даних відповідно до розвідувальними ознаками. Пропонується спосіб складання алгоритмів для виведення висновку за результатами обробки даних і вирішенні розвідувальних завдань.

Ключові слова: розвідувальні дані; розвідувальні ознаки; база даних; алгоритм висновку; блок-схема.

Алгоритм вывода заключения на основе результатов обработки разведывательных данных

А. А. Байрамов, В. М. Мамедов

Аннотация. Как известно, военная разведка рассматривает в основном следующие задачи: выяснение сил противника, время начала его действий и направление действия, а также характер действий. С целью выяснения направлений и областей получения разведывательной информации, определяются разведывательные признаки, выявляющие значимость той или иной деятельности противника. Разведывательные признаки определяются в соответствии с тактическими действиями (наступление, контрнаступление, оборона и т.п.). Для дальнейшего использования этих признаков предлагается создание базы разведывательных признаков. В статье рассмотрены вопросы и методика вывода заключения по результатам обработки разведывательных данных в соответствии с разведывательными признаками. Предлагается способ составления алгоритмов для вывода заключения по результатам обработки данных и решении разведывательных задач.

Ключевые слова: разведывательные данные; разведывательные признаки; база данных; алгоритм заключения; блок-схема.

UDC 651.34 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.2.02**

S. Gavrylenko[1], V. Chelak[1], O. Hornostal[1], V. Vassilev[2]

[1] National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine
[2] Technical University of Sofia, Sofia, Bulgaria

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR IDENTIFYING THE STATE OF A COMPUTER SYSTEM USING FUZZY CLUSTER ANALYSIS

Abstract. The subject of this article is the study of methods for identifying the state of computer systems. **The purpose** of the article is to develop a method for identifying the abnormal state of a computer system based on fuzzy cluster analysis. **Objective**: to analyze methods for identifying the state of computer systems; to conduct research on the selection of source data; to develop a method for identifying the state of a computer system with a small sample or fuzzy source data; to investigate and justify the procedure for comparing fuzzy distances between grouping centers and clustering objects; to develop a software and test. **The methods** used in the paper: cluster analysis, fuzzy logic tools. The following **results** were obtained: a method was theoretically substantiated and investigated for identifying the state of a computer system with a small sample or fuzziness of the initial data, which is distinguished by the use of the method based on fuzzy cluster analysis by the refined grouping procedure. To solve the clustering problem, we used a special procedure for comparing fuzzy distances between grouping centers and clustering objects. Software was developed and testing of the developed method was performed. The quality of classification based on the ROC analysis is assessed. **Conclusions**. The scientific novelty of the results is as follows: a study was conducted on the selection of source data for analysis; a method for identifying the state of a computer system based on fuzzy cluster analysis using a special procedure for comparing fuzzy distances between grouping centers and clustering objects has been developed. This allowed to improve the classification quality to 22%.

Keywords: state identification; computer system; cluster analysis; fuzzy output.

The problem formulation

Identification of the state of a computer system (CS) is one of the ways to rate the quality of its functioning. The state identification system is based on two classes of methods: for identifying abnormality and for identifying abuses [1]. The basis of the methods for identifying abnormality is the construction of patterns for normal CS behavior [2-4]. Abnormality is characterized by data that do not satisfy certain concepts of normal behavior. Methods for identifying abuses are based on the description of known violations, attacks or distortion of relevant information [6]. If the behavior of an object which is similar in description to a known attack is observed, then it is considered that the object was invaded. The most effective methods for identifying anomalies and abuses are machine learning methods. These include classical methods [7, 8], reinforced learning methods [9], ensemble methods [10-12], neural networks and deep learning [13-15]. The basis of these methods is technology and procedures that solve the problem of classifying the state. The analysis showed that the main disadvantages of many of these methods are the neglect of fuzzy data factors and low adaptation to dynamic changes in the structures of the source data and external influences. This, in turn, leads to a decrease in the reliability and efficiency of identifying CS state.

Studies of existing computerized systems for identifying states [16] also revealed a number of limitations on their use. The operation of such systems is based on the detection of network intrusions by comparing the functioning of the system with the profile of their normal operation. However, with the appearance of new abuses and anomalies caused by intrusions with unknown or unclear properties, these systems are not always effective and require long time-consuming for their appropriate adaptation, which also leads to a decrease in the reliability and efficiency of identification [2]. In addition, existing computerized systems, as a rule, are rather expensive, have a closed code and require periodic support of highly qualified specialists to improve them and appropriate settings with the requirements of specific organizations. In this regard, the development of methods and means of identifying the state of the CS is of particular relevance. Moreover, a feature of such methods is to increase the efficiency and reliability of identification in a small sample or fuzzy source data.

Development of a method for classifying the state of a CS based on the development of a fuzzy cluster classifier

One of the effective methods of data classification is the use of the classical method based on cluster analysis. This method is widely used to identify the state of CS [17–19]. But in a real situation, when the selection of the source data is small, when the CS is operating in a critical or non-stationary mode, there is no certainty that random output data are distributed normally. For the same reason, the errors of statistical estimates of mathematical expectations and variance of controlled indicators can be unpredictably large. In this case, the most effective is the use of a fuzzy mathematics apparatus, which is adapted to identify the state of CS under these conditions [20]. At the same time, the use of fuzzy clustering methods (FCM, Fuzzy C-Means), provides that for each element it is necessary to calculate the degree of its belonging to each of the clusters. In this case, there are difficulties in comparing fuzzy numbers. In practice, various heuristic approaches are used to solve the problem of comparing fuzzy numbers. Such approaches are difficult to implement [21]; a specific comparison result can be obtained only in the case of an obvious advantage of one number over another (for example, if there are no intersections of membership functions of the comparing numbers).

© Gavrylenko S., Chelak V., Hornostal O., Vassilev V., 2020

We proposed [22] the following simpler and more reliable procedure for comparing fuzzy numbers, based on comparing a fuzzy function of the distances' difference with zero. Let the fuzzy output data be x and y for two states H1 and H2 given by the following membership functions (1):

$$\mu(x)=\begin{cases}0, & x\le b_x;\\ (x-b_x)/(m_x-b_x), & b_x<x<m_x;\\ (c_x-x)/(c_x-m_x), & m_x<x\le c_x;\\ 0, & x>c_x;\end{cases}$$

$$\mu(y)=\begin{cases}0, & y\le b_y;\\ (y-b_y)/(m_y-b_y), & b_x<y<m_y;\\ (c_y-y)/(c_y-m_y), & m_y<y\le c_y;\\ 0, & y>c_y;\end{cases} \quad (1)$$

$$b_x=\min\{x_{1,}^{(1)}x_{2,}^{(1)}...,x_{1_1}^{(1)}\};\ c_x=\max\{x_{1,}^{(1)}x_{2,}^{(1)}...,x_{1_2}^{(1)}\},$$

$$b_y=\min\{x_{1,}^{(2)}x_{2,}^{(2)}...,x_{1_1}^{(2)}\};\ c_y=\max\{x_{1,}^{(2)}x_{2,}^{(2)}...,x_{1_2}^{(2)}\},$$

$$m_x=\frac{1}{l_1}\sum_{s=1}^{l_1}X_s^{(1)};\quad m_y=\frac{1}{l_2}\sum_{s=1}^{l_2}X_s^{(2)}.$$

Let's find the membership function (2) of their difference $z=x-y$:

$$\mu(z)=\begin{cases}0, & y\le b_z;\\ (x-b_z)/(m_z-b_z), & b_z<z<m_z;\\ (c_y-z)/(c_z-m_z), & m_z<z\le c_z;\\ 0, & z>c_z;\end{cases} \quad (2)$$

$$b_z=b_x-b_y,\quad m_z=m_x-m_y,\quad c_z=c_x-c_y.$$

Now the original problem of comparing x and y is reduced to a simpler problem, namely, comparing a fuzzy number z with zero.

Let's introduce the rules for interpreting the result of comparing a fuzzy z number with zero:

a) if $\min\{b_z,c_z\}>0$ then $x>y$;

b) if $\max\{b_z,c_z\}<0$ then $x<y$;

c) if $\min\{b_z,c_z\}<0$ & $\max\{b_z,c_z\}<0$ & $|\min\{b_z,c_z\}|>\max\{b_z,c_z\}$ then $x<y$;

d) if $\min\{b_z,c_z\}<0$ & $\max\{b_z,c_z\}>0$ & $|\min\{b_z,c_z\}|<\max\{b_z,c_z\}$, then $x>y$.

An example of a possible result of the subtraction operation is shown in Fig. 1, 2, where on the left is a graphical description of the operands, and on the right is the result of the subtraction operation.

Experimental studies and performance evaluation of fuzzy cluster classifier using refined grouping procedure

Experimental studies and performance evaluation of fuzzy cluster classifier using refined grouping procedure were based on the analysis of CS status in two modes: normal and abnormal. Malicious software was used to simulate the abnormal state of CS.

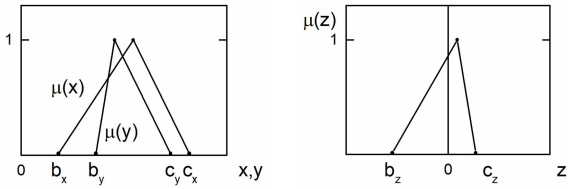


Fig. 1. The result of the calculation $x-y, |b_z|>c_z, x<y$ (rule c)

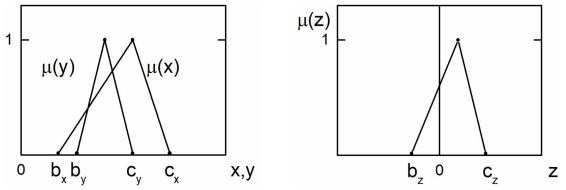


Fig. 2. The result of the calculation $x-y, |b_z|<c_z, x>y$ (rule d)

The developed software made it possible to obtain the main indicators of the functioning of the CS and to classify its state. The following performance indicators of the CS were used as source data: (CPU load, amount of memory used, network traffic volume, number of read/write operations to disk, invasion signatures, statistics on system events analysis, for example, the number of operations with the system registry or file system, the number of processes, etc.).

In order to evaluate the quality of classification, ROC analysis was used in this work. ROC analysis allows to evaluate the quality of diagnostic and prognostic methods and is widely used in binary classification problems [23, 24].

Fig. 3 shows a graph of the ROC curve for the process of classifying the state of a CS based on a fuzzy cluster classifier.

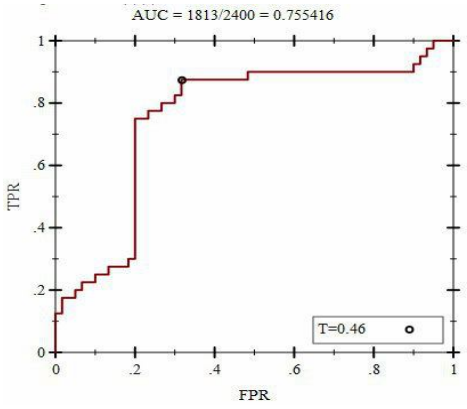


Fig. 3. The graph of the ROC curve for the process of classifying the state of a CS based on a fuzzy cluster classifier

TPR (the proportion of correctly classified events) is calculated as follows:

$$TPR=TP/(TP+FN), \quad (3)$$

where TPR – the proportion of correctly classified events; FN – number of incorrectly classified negative

events, TP – number of correctly classified positive events; FPR – the proportion of incorrectly classified events, is calculated as follows:

$$FPR = FP/(FP + TN)\$ \quad (4)$$

TN – number of correctly classified negative events, FP – number of incorrectly classified positive events.

As can be seen from Fig. 3, the classification of the state of a CS based on a fuzzy cluster classifier is qualitative (the closer to 1 the area under the ROC curve is, the better quality of the classifier is).

In addition, the quality of the classification can be characterized by other indicators, namely: accuracy ACC (the proportion of correctly classified objects) and J statistics of Yuden (assessment of the probability of validity of the classification decision).

A comparative assessment of the identification quality of the CS state based on a standard and improved fuzzy cluster classifier is given in table 1.

Table 1 – **The assessment of the identification quality of the CS state based on a standard and improved fuzzy cluster classifier**

Method based on cluster analysis		
	Standard cluster classifier	Improved fuzzy cluster classifier
AUC	0,53	0,75
ACC	0,52	0,72
J-statistics	0,71	0,83

Conclusions

In this paper, a method for identifying the state of a CS with fuzzy initial data was theoretically grounded. This method involves the use of a fuzzy cluster classifier, which made it possible to perform identification of a computer system with a small sample of source data. The basis of the fuzzy cluster classifier is the developed simpler and more reliable procedure for comparing fuzzy numbers, based on comparing the fuzzy function of the difference in distance to the clustering center with zero. Software was developed that allowed to obtain the main indicators of the functioning of the CS and perform classification of the CS state. Indicators of the CS functioning were used as initial data: (CPU load, amount of memory used, network traffic volume, number of read/write operations to disk, invasion signatures, system events statistics, for example, the number of operations with the system registry or file system, the number of processes, etc.).

The classification quality assessment based on ROC analysis was carried out. It was found that the fuzzy cluster classifier is qualitative (AUC = 0.75) and allows to assess the state of the CS with a small sample of the initial data or if they are fuzzy. Studies of fluctuations in the proportion of correctly and incorrectly classified events depending on the value of the selected decision criterion (decision point, or cut-off point) were performed. This will allow to adjust the level of false positive and false negative classification of the CS state.

References

1. Shelukhin, O.I., Sakalema, D.Zh. and Filinova, A.S. (2013), *Intrusion detection in computer networks*, GlT, Moscow, 220 p.
2. Shkodyrev, P.V., Yagafarov, K.I., Bashtovenko, V.A. and Ilyin E.E. (2017), "A review of methods for detecting anomalies in data streams", *Proc. of the 2 Conf. on Software Engineering and Information Management*, St. Petersburg, Russia, Vol. 18, pp. 64–70.
3. Agrawal, S. (2015), "Survey on Anomaly Detection using Data Mining Techniques", *Proc. Computer. Science*, Vol. 60, pp. 708-713.
4. Chandola, V., Banerjee, A. and Kumar, V. (2012), "Anomaly detection for discrete sequences: A survey", *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, Vol. 24, No. 5, pp. 823–839.
5. Barseghyan, A.A., Kupriyanov, M.S., Stepanenko, V.V. and Cold, I.I. (2007), *Data Analysis Technologies: Data Mining, Visual Mining, Text Mining, OLAP*, 2nd ed., Revised. And add, BHV-Petersburg, S-Pb., 384 p.
6. Semenov, S.G. and Gavrilenko, S.Yu. (2015), "Formation and study of heuristics in antivirus analyzers using the Mamdani algorithm", *Journal of Qafqaz university*, Azerbadhan, Mathematics and computer scienceVol. 3, No. 3, pp. 116-120.
7. Fisher, R. A. (1958), *Statistical methods for researchers*, Gosstatizdat, Moscow, 267 p.
8. Semenov, S., Gavrilenko, S. and Chelak, V. (2016), "Developing parametrical criterion for registering abnormal behavior in computer and telecommunication systems on basis of economic test", *Actual problems of economics*, Kyiv, Vol. 4(178), pp. 451-459.
9. Sutton, R.S. and Barto, A.G. (2020), *Reinforcement Learning*, 2-nd edition, DMK press, Moscow, 552 p.
10. Rokach, L. (2010), "Ensemble-based classifiers", *Artificial Intelligence Review*, Vol. 33, release 1–2.
11. (2020), *Methods of constructing decision trees in classification problems in Data Mining*, available at: https://ami.nstu.ru/~vms/lecture/data_mining/trees.htm
12. Iwan, Syarif, Ed, Zaluska1, Adam, Prugel-Bennett1 and Gary, Wills (2012), *Application of Bagging, Boosting and Stacking to Intrusion Detection*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Perner (Ed.): MLDM, LNAI 7376, pp. 593–602.
13. Tarkhov, D.A. (2014), *Neural network models and algorithms*, Radio Engineering, Moscow, 352 p.
14. Barsky, A.B. (2004), *Neural networks: recognition, control, decision making*, Finance and statistics, Moscow, 176 p.
15. Rutkovskaya, D.S., Pilinsky, M.V. and Rutkovsky, L.P. (2004), *Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems*, Garyachaya liniya-Telecom, Moscow, 452 p.
16. Korchenko A.O. (2019), *Methods of identification of anomalous stations for systems of detection of intrusion*, Dis. doc those. 05.13.21 - Systems for information security, Kyiv, 405 p.
17. Lin, W-C., Ke, W-S. and Tsai, C-F (2015), "An intrusion detection system based on combining cluster centers and nearest neighbors", *Knowledge-Based Systems*, vol. 78, pp. 13-21.
18. Mandel, I.D. (1988), Methods of cluster analysis, Finance and Statistics, Moscow, 176 p.
19. Egorenko, M.V. and Bokhovko, A.G. (2016), "Cluster analysis as a means of grouping the studied variables", *Collection of St. Petersburg State University of Economics*, 2016, Issue 7, p. 57-69.
20. Kofman, A. (1982), *Introduction to the theory of fuzzy sets*, Radio and communications, Moscow, 486 p.
21. Semenov, S., Sira, O., Gavrylenko, S. and Kuchuk N. (2019), "Identification of the state of an object under conditions of fuzzy input data", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 1, no 4 (97), pp. 22-29, DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.1570.

22. Raskin, L.G. and O.V. Sira (2008), *Fuzzy math. Fundamentals of the theory. Applications*, Parus, Kharkiv, 352 p.
23. (2019), *Detector Performance Analysis Using ROC Curves,* available at: https://www.mathworks. com/help/phased/examples /detector-performance-analysis-using-roc-curves.html
24. Fawcett, T. (2006), "An Introduction to ROC Analysis", *Pattern Recognition Letters*, 27 (8), pp. 861–874.

Received (Надійшла) 04.02.2020
Accepted for publication (Прийнята до друку) 20.05.2020

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Гавриленко Світлана Юріївна – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри обчислювальної техніки та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;
Svitlana Gavrylenko – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of " Computer Engineering and Programming ", National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
e-mail: gavrilenko08@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-6919-0055

Челак Віктор Володимирович - асистент кафедри "Обчислювальна техніка та програмування", Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;
Viktor Chelak - Lecturer, Department of Computer Engineering and Programming, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: victor.chelak@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8810-3394

Горносталь Олексій Андрійович – асистент кафедри "Обчислювальна техніка та програмування", Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;
Oleksii Hornostal - Lecturer, Department of Computer Engineering and Programming, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: gornostalaa@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5820-9999

Велізар Ангелов Вассилев – кандидат технічних наук, доцент, кафедра Прецензійної техніки та приладобудування, Технічний університет Софія, Софія, Болгарія
Velizar Vassilev – PhD, Assistant Professor, Department of Precise Engineering and Measurement Instruments, Technical University of Sofia, Sofia, Bulgaria
e-mail: vassilev_v@tu-sofia.bg; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1563-2353

Розробка методу ідентифікації стану комп'ютерної системи з використанням нечіткого кластерного аналізу

С. Ю. Гавриленко, В. В. Челак, О. А. Горносталь, В. А. Вассилев

Анотація. Предметом статті є дослідження методів ідентифікації стану комп'ютерних системах. **Метою** статті є розробка методу ідентифікації аномального стану комп'ютерної системи на основі нечіткого кластерного аналізу. **Завдання**: проаналізувати методи ідентифікації стану комп'ютерних систем; провести дослідження з вибору вихідних даних; розробити метод ідентифікації стану комп'ютерної системи за умови малої вибірки або нечіткості вихідних даних; дослідити та обґрунтувати процедуру порівняння нечітких відстаней між центрами групування і об'єктами кластеризації; розробити програмне забезпечення та провести тестування. Використовуваними **методами** є: кластерний аналіз, апарат нечіткої логіки. Отримано такі **результати**: теоретично обґрунтовано та досліджено метод ідентифікації стану комп'ютерної системи за умови малої вибірки або нечіткості вихідних даних, який відрізняється використанням методу на основі нечіткого кластерного аналізу з уточненою процедурою групування. Для вирішення завдання кластеризації використана спеціальна процедура порівняння нечітких відстаней між центрами групування і об'єктами кластеризації. Розроблено програмне забезпечення та виконано тестування розробленого методу. Проведено оцінку якості класифікації на основі ROC-аналізу **Висновки**. Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: проведено дослідження з вибору вихідних даних для аналізу; розроблено метод ідентифікації стану комп'ютерної системи на основі нечіткого кластерного аналізу з використанням спеціальної процедура порівняння нечітких відстаней між центрами групування і об'єктами кластеризації, що дозволило покращити якість класифікації до 22%.

Ключові слова: ідентифікація стану; комп'ютерна система; кластерний аналіз; нечіткі вихідні дані.

Разработка методу идентификации состояния компьютерной системы с использованием нечеткого кластерного анализа

С. Ю. Гавриленко, В. В. Челак, А. А. Горносталь, В. А. Вассилев

Аннотация. Предметом статьи является исследование методов идентификации состояния компьютерных системах. **Целью** статьи является разработка метода идентификации аномального состояния компьютерной системы на основе нечеткого кластерного анализа. **Задача**: проанализировать методы идентификации состояния компьютерных систем; провести исследования по выбору исходных данных; разработать метод идентификации состояния компьютерной системы при малой выборки или нечеткости исходных данных; исследовать и обосновать процедуру сравнения нечетких расстояний между центрами группировки и объектами кластеризации; разработать программное обеспечение и протестировать. Используемыми **методами** являются: кластерный анализ, аппарат нечеткой логики. Получены следующие **результаты**: теоретически обосновано и исследован метод идентификации состояния компьютерной системы при малой выборки или нечеткости исходных данных, который отличается использованием метода на основе нечеткого кластерного анализа уточненной процедурой группировки. Для решения задачи кластеризации использована специальная процедура сравнения нечетких расстояний между центрами группировки и объектами кластеризации. Разработано программное обеспечение и выполнено тестирование разработанного метода. Проведена оценка качества классификации на основе ROC-анализа. **Выводы**. Научная новизна полученных результатов заключается в следующем: проведено исследование по выбору исходных данных для анализа; разработан метод идентификации состояния компьютерной системы на основе нечеткого кластерного анализа с использованием специальной процедура сравнения нечетких расстояний между центрами группировки и объектами кластеризации, что позволило улучшить качество классификации до 22%.

Ключевые слова: идентификация состояния; компьютерная система; кластерный анализ; нечеткие выходные данные.

UDC 004.94 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.2.03**

D. Hlavcheva[1], V. Yaloveha[1], A. Podorozhniak[1], N. Lukova-Chuiko[2]

[1] National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine
[2] Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

A COMPARISON OF CLASSIFIERS APPLIED TO THE PROBLEM OF BIOPSY IMAGES ANALYSIS

Abstract. The purpose of the research is to compare classification algorithms for the histopathological images analyzing issue and to optimize the parameters for obtaining better classification accuracy. The following **tasks** are solved in the article: preprocessing of BreCaHAD dataset images, implementation and training of CNN, applying K-nearest neighbours, SVM, Random Forest, XGBoost, and perceptron algorithms for classifying features that were extracted by CNN, and results comparison. **The object** of the research is the process of classifying tumor cells in the microscopic biopsy images. **The subject** of the research is the process of using ML algorithms for classification of the features extracted by CNN from input biopsy image. **The scientific novelty** of the research is a comparative analysis of classifiers on the task of "tumor" and "healthy" cells images classification from processed BreCaHAD dataset. As a **result** it was obtained that from chosen classifiers SVM reached the highest accuracy on test data – 0.972. This is the only algorithm that shows better accuracy than perceptron. Perceptron gets 0.966 classification accuracy. K-nearest neighbours, Random Forest, and XGBoost algorithms reached lower results. The algorithms' hyperparameters optimization was carried out. The results have been compared with related works. The following **research methods** are used: the theory of deep learning, mathematical statistics, parameters optimization.

Keywords: machine learning; deep learning; convolutional neural network; grid search; biopsy.

Introduction

Machine learning (ML) is defined as a set of methods that automatically detect patterns in data, and then utilize the uncovered patterns to predict future data or enable decision making under uncertain conditions. The most representative characteristic of ML is that it is driven by data, and the decision process is accomplished with minimum interventions by a human [1].

Machine learning technology powers many aspects of modern society including different medicine tasks such as medical images classification, segmentation, and object detection. Also, different ML approaches are used for analyzing patients' data to define risk groups for diseases, choose better treatment strategies, etc.

Many diagnostic tasks require an initial search process to detect abnormalities, and to quantify measurements and changes over time. Computerized tools, specifically image analysis and machine learning, are the key enablers to improve diagnosis, by facilitating identification of the findings that require treatment and to support the expert's workflow. Among these tools, deep learning is rapidly proving to be the state-of-the-art foundation, leading to improved accuracy [2].

Image or exam classification was one of the first areas in which deep learning made a major contribution to medical image analysis [3].

Other classifiers were subsequently developed, including decision trees, boosting and support vector machines. Each of these has been applied to medical image analysis [2].

According to "Cancer Tomorrow" [4] number of cancer cases in the world will increase from 18.1 million in 2018 to 29.5 million in 2040. In Ukraine the number of new cases in 2018 is almost 170 thousand for both sexes and all ages. The number of death is almost 100 thousand [5].

So, one of the important medical areas in which ML approaches is being used is cancer research. A variety of ML techniques, including Artificial Neural Networks (ANNs), K-nearest neighbours, Support Vector Machines (SVMs) and Decision Trees (DTs) have been widely applied in cancer research for the development of predictive models, resulting in effective and accurate decision making [6].

The clinical management of cancer is informed by histopathological evaluation of biopsy tissues, wherein thin sections of a biopsy are processed to visualize tissue and cell morphologies for signs of disease.

A number of image analysis tasks in digital pathology involve the quantification and highlight of morphological features (e.g., cell or mitotic count, nuclei grading, epithelial glands morphology). These tasks invariably require the identification of histologic primitives (e.g., cell, nuclei, mitosis, epithelium, cellular membranes, etc.) [7]. After problem review the main purpose of the research was defined. It is the comparison of different ML algorithms and perceptron for classifying tumor and healthy cells in microscopic biopsy images.

According to the purpose the research tasks are:

- preparation of microscopic biopsy images dataset;
- implementation and training of CNN;
- applying of chosen algorithms for classifying features extracted by CNN;
- comparison of obtained results.

In the paper, the Convolutional Neural Network has been used to extract features for classifiers. The classifier has been compared. Such an approach can improve the accuracy of tumor and healthy cells classification for cancer stage diagnosis.

1. Classification algorithms

1.1 K-nearest Neighbours

K-nearest Neighbour (*k*-NN) algorithm classifies examples based on the class of their nearest neighbours.

There are several ways in which the *k* nearest neighbours can be used to determine the class. The

© Hlavcheva D., Yaloveha V., Podorozhniak A., Lukova-Chuiko N., 2020

simple approach is to define a class among the nearest neighbours and assign more weight to the nearer neighbours in deciding the class. This can be achieved by distance weighted voting where the neighbours get to vote on the class [8]. The *k* nearest neighbours are selected based on this distance metric. Usually Minkowski Distance metric is used as basic. The formula for the Minkowski distance is:

$$\rho(\boldsymbol{y}, x_i) = \left(\sum_j \left| y_j - x_{ij} \right|^p \right)^{1/p}. \quad (1)$$

1.2 Support Vector Machine

Last years the algorithm became popular and it is used for solving regression and classification problems [9, 10]. The main idea is divorced to find a decision surface where the margin of separation between classes is maximized or to minimize a quadratic function with certain constraints:

$$\begin{aligned} &\min_{\omega,b,\varepsilon} \left(\|\omega\|^2 / 2 + C \sum_j \varepsilon_j \right); \\ &y_j \left(\omega^T \varphi(x_j) + b \right) \geq 1 - \varepsilon_j, \ \ \varepsilon_j \geq 0, \end{aligned} \quad (2)$$

where ω - parameters of function, *C* - parameter that regularize penalty ε for point that are laying in wrong side of the margin boundary [11-13].

In the study several kernel functions are used such as linear, polynomial, sigmoid and radial-bias functions. This constrained optimization problem is solved by using Lagrange multipliers [13].

1.3 Random Forest

Decision Trees are a popular supervised learning algorithm used for classification issues. The main idea is to construct a model that can predict a target class by learning decision rules formed from the data features [14]. In simple case a decision tree is a binary structure used to classify a given input. A node in the tree represents a comparison against some field. Advantages of using decision trees include non-linearity, support for categorical variables, interpretability and robustness [15]. Random forests are a combination of tree predictors such that each tree depends on the values of a random vector sampled independently and with the same distribution for all trees in the forest [16]. In simple case Random Forest uses averaging to improve the predictive accuracy and control over-fitting [17].

1.4 XGBoost

Boosting is based on weighting the examples according to how hard they are to get right, and reward classifiers based on the weight of the examples they get right, not just the count. To set the weights of the classier, it is needed to adjust the weights of the training examples.

Easy training examples will be properly classified by most classifiers because they get bigger reward for getting the hard cases right [15].

XGBoost is an ensemble tree method (like Gradient Boosting) and the method apply the principle of boosting for weak learners. However, XGBoost was introduced for better speed and performance. In-built cross-validation ability, efficient handling of missing data, regularization for avoiding overfitting, catch awareness are common advantages of XGBoost algorithm [16].

2. Convolutional Neural Network

Deep learning is a specific subfield of machine learning: from data that puts an emphasis on learning successive layers of increasingly meaningful representations [18].

CNNs became one of the most popular neural networks last years. They are widely used for image analyzing [3] and classification issues [19, 20].

A typical CNN is composed of an input layer and an output layer as well as many hidden layers that are alternately stacked convolution, normalization, spatial pooling and fully connected (i.e., dense) layers [21].

Convolutional layers consist of feature maps that encode different high- or low-level features using weights. Although the role of the convolutional layer is to detect local conjunctions of features from the previous layer, the role of the pooling layer is to merge semantically similar features into one. Polling layer computes the maximum of one or few feature maps. Backpropagating gradients through a ConvNet is as simple as through a regular deep network, allowing all the weights in all the filter banks to be trained [22].

Deep CNNs automatically learn abstractions obtained from input data (in our case images). Recent results indicate that the generic descriptors extracted from CNNs are extremely effective in object recognition. Medical image analysis groups across the world are quickly entering the field and applying CNNs and other deep learning methodologies to a wide variety of applications [2].

So, in the research the CNN has been trained to get necessary features from the dataset automatically.

3. Results and Discussions

For the experiment implementation Python has been used as programming language. Because it supports a lot of additional modules that provides an opportunity to prepare dataset, implement neural network, use ML algorithms, optimize parameters, and measure results. Modules used in this research are listed below:

- PIL image – for slicing and preprocessing images from primary dataset;
- Numpy – for working with multi-dimensional arrays;
- Scikit learn – for implementation of different ML algorithms (including fitting and results evaluating);
- Tensorflow and Keras – for CNN creation, training and results evaluating.

CNN training and ML algorithms optimization experiments were launched in the Google Colabotaroty [23].

In the Research the BreCaHAD dataset has been used. It is publicly available to the biomedical imaging community. The BreCaHAD dataset contains microscopic biopsy images which are saved in uncompressed (.TIFF) image format, three-channel RGB with 8-bit depth in each channel, and the dimension is 1360×1024 pixels and each image is annotated. The

annotations for the BreCaHAD dataset are provided in JSON (JavaScript Object Notation) format. In the given Table 1, Data file 4, the JSON file (ground truth) contains two mitosis and only one tumor nuclei annotations. Here, x and y are the coordinates of the centroid of the annotated object, and the values are between [0, 1] (divided by width and height of an image) [24].

In the study, the task of binary classification was posed. The classification was to determine whether the image contains a tumor nuclei or not. For the experiments primary dataset images have been sliced to images with size 48×48 pixels. And after that, dataset consisted of 40000 images (50% - with tumor nuclei and 50% - without). It was divided into train, validation and test as shown at Fig. 1.

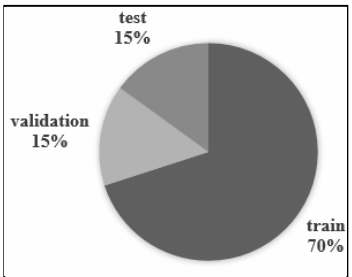


Fig. 1. Datasets distribution

For classifying images from dataset, classification system has been used. Its architecture is shown at Fig. 2. Designed system has 2 stages. The first stages purpose is feature extracting from input image. It consists of 3 pairs of Convolutional and MaxPooling layers. These layers have 149,729 trainable parameters In the end of this stage 128 features are highlighted from primary image. The second stage is a classifier that produces output result. Training of such classification system requires training of CNN with perceptron as classifier. Then Convolutional and Max Pooling layers separated (the perceptron has been erased) and their outputs are used as input features for the ML algorithms. In the research these ML algorithms have been chosen: *K*-nearest Neighbours; Support Vector Machine; Random Forest; XGBoost. In the first stage of training it was obtained that perceptron as classifier showed 0.966 accuracy on test data.

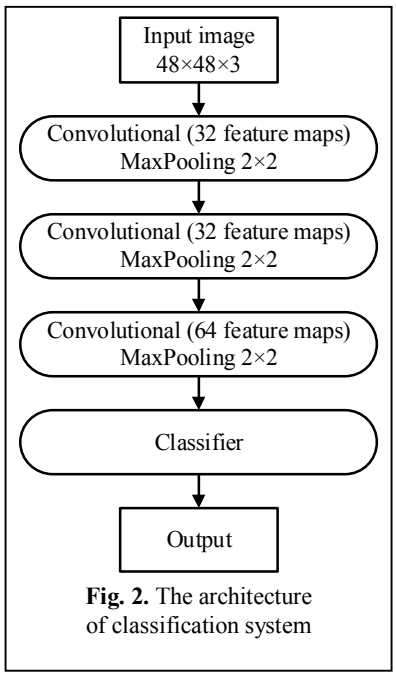


Fig. 2. The architecture of classification system

Multi-dimensional grid search method has been used for the optimization of ML algorithms hyperparameters. In the *m*-dimensional parameter case, when we are given the initial region

$$I = [a_1; a_2] \times [b_1; b_2] \times \ldots \in R^m,$$

we can consider the equi-distance grid [25]:

$$L = \left\{ (x_1, \ldots, x_m)^T \mid \right.$$
$$x_1 = a_1 + \frac{k_a}{n+1}(a_2 - a_1),\ k_a = 1, \ldots, n, \qquad (3)$$
$$\left. x_2 = b_1 + \frac{k_b}{n+1}(b_2 - b_1),\ k_b = 1, \ldots, n, \ldots \right\},$$

where n – number of experiments.

For each of the researched algorithms, the set of tuned parameters is different because of their organization principles. Final results of ML classification algorithms' accuracy score on test data are shown at the Table 1.

Table 1 – **Accuracy on test data and best parameters for the ML algorithms**

Algorithm	Parameter	Value	Accuracy
K-nearest neighbours	N neighbours	3	**0.963**
	Weight	uniform	
	Algorithm	auto	
	P	1	
SVM	Kernel	linear	**0.972**
	C	1.39e-5	
	Gamma	0.1	
Random Forest	Bootstrap	True	**0.953**
	Max depth	10	
	Min samples leaf	1	
	Min samples split	2	
	N estimators	70	
XGBoost	Min child weight	5	**0.954**
	Max depth	10	
	Gamma	0.3	
	Subsample	0.8	
	Colsample by tree	0.75	
	Reg alpha	0	
	N estimators	10	

Also, in this table all parameters and their values are presented and named in accordance with the documentation of Scikit learn python module [26].

In assume, SVM showed higher results than perceptron. Approach of using SVM as classifier of features extracted by CNN had been used in [27] and also showed higher results than percetrone. SVM is an improvement of k-nearest neighbors approach and as shown in the Table 1 k-nearest neighbors algorithm reached less accuracy value than SVM.

Trees based algorithms (Random Forest and XGBoost) showed lower results than the perceptron. Also, these methods are more time-consuming than the others used in this research.

According to the previous authors' work [28] resulted classification accuracy on test data has been increased from 0.935 to 0.972. It can be explained by these reasons:

1. Increasing dimension of input images;
2. More complicated structure of CNN;
3. Using SVM as classifier;
4. Tuning of classifier parameters using grid search algorithm.

In the [29] comprehensive evaluation of 7 commonly used algorithms over 65 publicly available

gene expression datasets was held. As the result SVM and Random Forest presented better performances than the others algorithms researched in the paper.

Also, SVM and Artificial Neural Network reached the best accuracy in the research [30]. In the paper the ability of a multitude of linear and non-linear classification algorithms to discriminate between the electroencephalograms (EEGs) of patients with varying degree of Alzheimer's disease and their age-matched control subjects was explored. SVM showed 0.89 resulted accuracy in this task.

Conclusions

Machine Learning, and especially Deep Learning approaches, are widely used in medical tasks. Automatization of medical images processing can possibly decrease time needed for image analyzing.

Cancer is a second leading cause of death worldwide [31]. Histopathological evaluation of biopsy images using ML approach can improve cancer tage diagnosis.

Based on the results of previous studies, the article proposes the comparative analysis of the K-nearest neighbours, SVM, Random Forest XGBoost and perceptron algorithms for classifying features extracted from the input image by Convolutional and MaxPooling layers.

It was obtained that SVM classifier performs the best accuracy – 0.972. SVM reached higher results than perceptron. Gained results have been compared with related works.

In further research multi classification will be performed on BreCaHAD datasets to classify all histological primitives on biopsy images.

References

1. Lee, J.-G., Jun, S., Cho, Y.-W., Lee, H., Kim, G. B., Seo, J. B. and Kim, N. (2017), "Deep learning in medical imaging: general overview", *Korean journal of radiology*, 18(4), pp. 570-584.
2. Greenspan, H., Van Ginneken, B. and Summers, R. M. (2016), "Guest editorial deep learning in medical imaging: Overview and future promise of an exciting new technique", *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 35(5), pp. 1153-1159.
3. Laak, J. A. (2017), "A survey on deep learning in medical image analysis", *Medical image analysis*, 42, pp. 60-88.
4. *Cancer tomorrow* (2020), available at: https://gco.iarc.fr/tomorrow/home
5. *International Agency for Research of Cancer, World Health Organization Europe: Ukraine – Global Cancer Observatory* (2018), available at: https://gco.iarc.fr/today/data/factsheets/populations/804-ukraine-fact-sheets.pdf
6. Kourou, K., Exarchos, T. P., Exarchos, K. P., Karamouzis, M. V. and Fotiadis, D. I. (2015), "Machine learning applications in cancer prognosis and prediction", *Computational and structural biotechnology journal*, 13, pp. 8-17.
7. Janowczyk, A. and Madabhushi, A. (2016), "Deep learning for digital pathology image analysis: A comprehensive tutorial with selected use cases", *Journal of pathology informatics*, 7.
8. Cunningham, P. and Delany, S. J. (2020), *k-Nearest Neighbour Classifiers*, arXiv:2004.04523.
9. Leithardt, V. R. Q. (2020), "PRIPRO: A Comparison of Classification Algorithms for Managing Receiving Notifications in Smart Environments", *Applied Sciences*, 10(2), p. 502.
10. Andrić, I., Pina, A., Ferrão, P., Fournier, J., Lacarrière, B. and Le Corre, O. (2017), "Assessing the feasibility of using the heat demand-outdoor temperature function for a long-term district heat demand forecast", *Energy Procedia*, 116, pp. 460-469.
11. Pontil, M. and Verri, A. (1998), "Support vector machines for 3D object recognition", *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 20(6), pp. 637-646.
12. Muralidharan, R. and Chandrasekar, C. (2011), "Object recognition using support vector machine augmented by RST invariants", *International Journal of Computer Science Issues* (IJCSI), 8(5), p. 280.
13. Bishop, C. M. (2006), *Pattern recognition and machine learning*, Springer.
14. Nabipour, M., Nayyeri, P., Jabani, H. and Mosavi, A. (2020), *Deep learning for Stock Market Prediction*, arXiv:2004.01497.
15. Skiena, S. S. (2017), *The data science design manual*, Springer.
16. Breiman, L. (2001), "Random forests", *Machine learning*, 45(1), pp. 5-32.
17. *RFC* (2020), available at: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.ensemble.RandomForestClassifier.html
18. Chollet, F. (2018), *Deep Learning mit Python und Keras*, MITP-Verlags GmbH & Co. KG.
19. Yaloveha, V., Hlavcheva, D., Podorozhniak, A. and Kuchuk, H. (2019), "Fire hazard research of forest areas based on the use of convolutional and capsule neural networks", *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, IEEE, pp. 828-832, DOI: https://doi.org/10.1109/UKRCON.2019.8879867
20. Kuchuk, H., Podorozhniak, A., Hlavcheva, D. and Yaloveha, V. (2020), "Application of Deep Learning in the Processing of the Aerospace System's Multispectral Images", *Handbook of Research on Artificial Intelligence Applications in the Aviation and Aerospace Industries*, IGI Global, pp. 134-147, DOI: https://doi.org/10.4018/978-1-7998-1415-3.ch005
21. Deng, F., Pu, S., Chen, X., Shi, Y., Yuan, T. and Pu, S. (2018), "Hyperspectral image classification with capsule network using limited training samples", *Sensors*, 18(9), pp. 3153.
22. LeCun, Y., Bengio, Y. and Hinton, G. (2015), "Deep learning", *Nature*, 521(7553), pp. 436-444.
23. *Google Colab* (2020), available at: colab.research.google.com
24. Aksac, A., Demetrick, D. J., Ozyer, T. and Alhajj, R. (2019), "BreCaHAD: a dataset for breast cancer histopathological annotation and diagnosis", *BMC research notes*, 12(1), pp. 1-3.
25. Kim, J. (1997), *Iterated grid search algorithm on unimodal criteria*, Virginia Tech.
26. *Scikit learn* (2020), available at: https://scikit-learn.org/stable/index.html
27. Agarap, A. F. (2017), "An architecture combining convolutional neural network (CNN) and support vector machine (SVM) for image classification", arXiv preprint arXiv:1712.03541.
28. Hlavcheva, D., Yaloveha, V. and Podorozhniak, A. (2019), "Application of convolutional neural network for histopathological analysis", *Advanced Information Systems*, Vol. 3, No. 4, pp. 69-73, DOI: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.4.10
29. de Souza, B. F., de Carvalho, A. C. and Soares, C. (2010), "A comprehensive comparison of ml algorithms for gene expression data classification", *The 2010 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN): IEEE*, pp. 1-8.

30. Dierks, T. (2007), “Application and comparison of classification algorithms for recognition of Alzheimer's disease in electrical brain activity (EEG)”, *Journal of neuroscience methods*, 161(2), pp. 342-350.
31. *World Health Organization: Cancer* (2020), available at: https://www.who.int/health-topics/cancer#tab=tab_1

Received (надійшла) 12.03.2020
Accepted for publication (прийнята до друку) 20.05.2020

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Главчева Дар`я Максимівна – студентка кафедри обчислювальної техніки та програмування, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна;
Daria Hlavcheva – student of Computer Science and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: agafina99@gmail.com; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0001-6990-6845

Яловега Владислав Анатолійович – асистент кафедри обчислювальної техніки та програмування, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна;
Vladyslav Yaloveha – Assistant Lecturer of Computer Science and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: vladyslavyaloveha@gmail.com; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0001-7109-9405

Подорожняк Андрій Олексійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри обчислювальної техніки та програмування, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна;
Andrii Podorozhniak – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Computer Science and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: andriipodorozhniak@gmail.com; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-6688-8407

Лукова-Чуйко Наталія Вікторівна – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри кібербезпеки та захисту інформації, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна;
Nataliia Lukova-Chuiko – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Cyber Security and Information Protection Department, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine;
e-mail: lukova@ukr.net; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0003-3224-4061

Порівняння класифікаторів, у застосуванні до проблеми аналізу знімків біопсії

Д. М. Главчева, В. А. Яловега, А. О. Подорожняк, Н. В. Лукова-Чуйко

Анотація. Мета дослідження - порівняння алгоритмів класифікації для аналізу гістопатологічних зображень і оптимізація гіперпараметрів алгоритмів класифікації для збільшення результуючої точності. У статті вирішуються наступні **завдання:** попередньо обробленого набору даних BreCaHAD, реалізація та навчання CNN, застосування алгоритмів K-найближчих сусідів, SVM, Random Forest, XGBoost і персептрона для класифікації ознак, отриманих CNN, і порівняння результатів. **Об'єктом дослідження** є процес класифікації пухлинних клітин на знімках мікроскопічної біопсії. **Предметом дослідження** є процес використання алгоритмів машинного навчання для класифікації ознак, отриманих CNN з вхідного зображення біопсії. **Наукова новизна** дослідження - порівняльний аналіз класифікаторів на завданні класифікації зображень «пухлинних» і «здорових» клітин з предобработанного набору даних BreCaHAD. В результаті було отримано, що з обраних класифікаторів SVM має найбільшу точність на тестовій вибірці - 0,972. Це єдиний алгоритм, який отримав більшу точність, ніж персептрон. Точність класифікації персептрона на тестовій вибірці склала 0,966. K-найближчі сусіди, алгоритми Random Forest і XGBoost в результаті експериментів показали меншу точність. Проведена оптимізація гіперпараметрів алгоритмів. Результати були зіставлені з подібними роботами. Були використані такі методи дослідження: теорія глибокого навчання, математична статистика, оптимізація параметрів.

Ключові слова: машинне навчання; глибоке навчання; згорткова нейронна мережа; пошук по сітці; біопсія.

Сравнение классификаторов, в применении к проблеме анализа снимков биопсии

Д. М. Главчева, В. А. Яловега, А. А. Подорожняк, Н. В. Лукова-Чуйко

Аннотация. Цель исследования – сравнение алгоритмов классификации для анализа гистопатологических изображений и оптимизация гиперпараметров алгоритмов классификации для увеличения результирующей точности. В статье решаются следующие **задачи**: предварительная обработка изображений набора данных BreCaHAD, реализация и обучение CNN, применение алгоритмов K-ближайших соседей, SVM, Random Forest, XGBoost и персептрона для классификации признаков, извлеченных CNN, и сравнение результатов. **Объектом исследования** является процесс классификации опухолевых клеток на снимках микроскопической биопсии. **Предметом исследования** является процесс использования алгоритмов машинного обучения для классификации признаков, извлеченных CNN из входного изображения биопсии. **Научная новизна** исследования - сравнительный анализ классификаторов на задаче классификации изображений «опухолевых» и «здоровых» клеток из предобработанного набора данных BreCaHAD. В **результате** было получено, что из выбранных классификаторов SVM имеет наибольшую точность на тестовой выборке - 0,972. Это единственный алгоритм, который получил большую точность, чем персептрон. Точность классификации персептрона на тестовой выборке составила 0,966. K-ближайшие соседи, алгоритмы Random Forest и XGBoost в результате экспериментов показали меньшую точность. Проведена оптимизация гиперпараметров алгоритмов. Результаты были сопоставлены с подобными работами. Были использованы такие **методы исследования**: теория глубокого обучения, математическая статистика, оптимизация параметров.

Ключевые слова: машинное обучение; глубокое обучение; сверточная нейронная сеть; поиск по сетке; биопсия.

УДК 004.275 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.2.04**

В. О. Гороховатський, Р. П. Пономаренко

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

КЛАСИФІКАЦІЯ ЗОБРАЖЕНЬ НА ПІДСТАВІ ФОРМУВАННЯ НЕЗАЛЕЖНОЇ СИСТЕМИ КЛАСТЕРІВ У СКЛАДІ СТРУКТУРНИХ ОПИСІВ БАЗИ ЕТАЛОНІВ

Анотація. Предметом досліджень статті є структурні методи класифікації зображень у просторі образів як множини дескрипторів ключових точок задля розпізнавання візуальних об'єктів у системах комп'ютерного зору. **Метою** є створення ефективного методу класифікації на підставі впровадження системи незалежних кластерів для бази еталонів. **Завдання:** розроблення моделей класифікації у новоствореному просторі образів, аналіз їх обчислювальної ефективності, оцінювання результативності класифікації засобами програмного моделювання. **Методи:** детектор BRISK для формування дескрипторів ключових точок, інтелектуальний аналіз даних, метод k-середніх для кластеризації даних, програмне моделювання. **Отримані результати:** запропоновано моделі класифікації описів на основі системи самостійних кластерів та їх центрів, які спрощують оброблення даних та підвищують швидкодію реалізації, проведено порівняльний аналіз розроблених методів із відомими. Здійснена програмна реалізація впроваджених моделей класифікації, експериментально проведено дослідження їх ефективності та оцінювання часу оброблення. **Висновки.** Наукова новизна – розвинення методу класифікації зображень на основі впровадження системи незалежних кластерів для еталонних описів, що сприяє поглибленому аналізу даних. Метод реалізовано в модифікаціях зіставлення кластерного подання і на основі конкурентного аналізу дескрипторів опису. Практична значимість роботи полягає у побудові моделей класифікації у створеному просторі даних, підтвердженні працездатності запропонованих модифікацій оброблення даних, розробленні програмних моделей для впровадження методів у системах комп'ютерного зору.

Ключові слова: комп'ютерний зір; структурне розпізнавання зображень; дескриптор ключових точок; детектор BRISK; кластеризація; метод k-середніх; центр кластеру; релевантність описів; програмне моделювання; база зображень.

Вступ

Застосування апарату інтелектуального аналізу даних для подання та зіставлення образів візуальних об'єктів у системах комп'ютерного зору націлене на покращення показників їх функціонування за рахунок поглибленого вивчення властивостей, змісту та структури досліджуваних даних [1-3]. Зокрема, кластерний аналіз та подання структурних описів зображень, заданих множиною значень дескрипторів ключових точок (КТ), сприяє виявленню у складі даних опису найбільш суттєвих властивостей/особливостей та значно прискорює прийняття рішення про клас візуального об'єкту [4-6]. Замість традиційного обчислення релевантності описів як відстані між множинами дескрипторів обсягом у 100…1500 елементів-векторів, після застосування кластеризації визначення релевантності зводиться до зіставлення тільки декількох (1..10) числових векторів даних [6]. Такі технології отримали назву «мішок слів» [15].

У ряді публікацій вивчається застосування системи кластерів на повній множині еталонних описів бази зображень [3-6], загалом ідея такої трансформації описів знаходиться у руслі розкладання даних у деякому базисі, що завжди перспективно у плані зниження обсягу обчислень. Склад базису при цьому з точки зору науки про дані визначається безпосередньо на підставі сукупності оброблюваних даних [16-18], у даному випадку – описів еталонів.

Більш ґрунтовний аналіз наявної інформації про описи еталонних даних можна реалізувати процесом оброблення, якщо для кожного еталонного опису формувати окрему від інших локальну систему кластерів. У результаті такого незалежного оброблення можна синтезувати індивідуальні центри кластерів для кожного еталону, що загалом сприятиме більш глибокому виявленню відмінностей на множині еталонних описів та, як результат, підвищенню ефективності їх класифікації загалом. У роботі [7] вивчаються міри подібності між прецедентом та ситуацією, що задані множиною найбільш значимих факторів, а у монографії [8] розглядаються моделі та процес встановлення релевантності для просторових структур ознак, синтезованих на множині КТ.

Посилення впливу індивідуальних факторів у вигляді сформованої системи незалежних кластерів дає можливість створити систему розпізнавання, у якій класифікаційне рішення незалежно (і можливо паралельно) для кожного еталону приймається комітетом, кожний з елементів якого адаптований виключно до свого еталонного образу [13]. Системи розпізнавання з архітектурою, що включає вибір оптимального представника комітету, за рахунок незалежного і узгодженого оцінювання мають більшу ефективність.

Метою статті є створення на підґрунті системи індивідуальних кластерів для бази еталонів ефективного методу класифікації з використанням нового простору даних, що забезпечує результативне розпізнавання як за кластерним описом візуального об'єкта, так і за множиною його дескрипторів КТ.

Завдання роботи – побудова моделей класифікації у новоствореному просторі образів, аналіз їх обчислювальної ефективності, оцінювання якості класифікації засобами програмного моделювання.

Незалежне кластерне подання описів

Нехай задано деяку базу E описів зображень еталонів розміром N: $E = \{E_1, E_2, ..., E_N\}$. Кожен

© В. О. Гороховатський, Р. П. Пономаренко, 2020

еталонний опис E_i представляє у задачі розпізнавання окремий клас та має вид скінченної множини дескрипторів КТ зображення: $E_i = \{e_v(i)\}_{v=1}^{s}$, де s – фіксована кількість дескрипторів КТ у описі еталону E_i [4-6].

Зважимо, що окремий дескриптор $e_v(i)$ характеризує деякий окіл КТ зображення та є елементом векторного простору R^n скінченної розмірності n: $e_v(i) \in R^n$ з дійсними, цілими або бінарними компонентами. При цьому для спрощення аналізу вважаємо значення параметру s для кожного опису із множини E однаковим, тобто

$$card(E_1) = card(E_2) = ... = card(E_N) = s .$$

Виконання цієї умови завжди можна практично досягти відбором елементів із множини більшого розміру.

Застосуємо відображення $E \to T$ із простору образів (множини дескрипторів) у множину T непересічних кластерів, сформованих за деяким принципом [2-4]. Кластер – це підмножина опису. У результаті кожний образ E_i еталону трансформується до виду фіксованого числа M його непересічних підмножин $T_k(E_i)$:

$$E_i = T(E_i) = \cup_{k=1}^{M} T_k(E_i),\ T_k(E_i) \cap T_j(E_i) = \varnothing . \quad (1)$$

Еквівалентність множин у виразі (1) розуміємо як їх по-елементний збіг.

Позначимо $\beta_{k,i} = card\ T_k(E_i)$ – потужність отриманих кластерів для окремих еталонів, де k – номер кластеру всередині опису. За множиною $T_k(E_i)$ елементів кожного кластеру визначимо його центр $b_{k,i}$, $k=\overline{1,M}$, який наряду із потужністю $\beta_{k,i}$ є ключовою характеристикою побудованої кластерної системи для аналізованих даних [6]. Зауважимо, що центр $b_{k,i}$, а також сама кластеризація незалежно від центру можуть бути визначені на підставі достатньо широкого різноманіття процедур [2, 3, 6, 9-11].

Зважаючи на рівне число s елементів кожного із описів, будемо мати на увазі також нормовану вагову характеристику

$$\alpha_{k,i} = \beta_{k,i} / s ,\ \sum_k \alpha_{k,i} = 1 , \quad (2)$$

яка відображає кількісну вагомість кожного із кластерів у системі $T(E_i)$.

Таким чином, у результаті кластерного подання образ E_i еталону сформовано у вигляді M непересічних підмножин $T_k(E_i)$ (кластерів) його елементів з центрами $b_{k,i}$, M*N – загальне число створених кластерів/центрів для наявної бази еталонів.

Розпізнаваний візуальний об'єкт аналогічно схемі подання еталонів універсально опишемо скінченною множиною $Z = \{z_v\}_{v=1}^{s}$, де $z_v \in Z$ – елементи (дескриптори КТ), $s = card\ Z$ – її потужність.

Подібно процедурі оброблення еталонів застосуємо кластерне розбиття множини Z через відображення $Z \to T$, у результаті опис вхідного зображення буде представлено M кластерами:

$$Z = T(Z) = \{T_k(Z)\}_{k=1}^{M},\ T_k(Z) \cap T_j(Z) = \varnothing .$$

Для кожного кластеру $T_k(Z)$ опису вхідного зображення визначимо параметри центрів $b_k(Z)$, потужностей $c_k(Z)$, $k=\overline{1,M}$, та нормованих характеристик $\alpha_k(Z)$ за (2), які будуть використовуватися у процесі класифікації. При цьому для спрощення схеми класифікації вважаємо число M кластерів тотожним для вхідного зображення та еталонів.

Класифікація «об'єкт – еталон»

Розглянемо побудову класифікації виду «об'єкт – еталон» на підставі обчислення значення релевантності їх структурних описів. Замість комплектної множини елементів описів застосуємо прискорену схему класифікації на підставі використання центрів b_k системи кластерів об'єкту і еталону. Обчислювальна перевага класифікації за множиною центрів кластерів опису у порівнянні з класифікацією безпосередньо за описом обгрунтовується тим, що замість обрахунку релевантності множин ми визначаємо релевантність на основі їх незначного числа характеристик. Якщо потужність інформативного опису із дескрипторів КТ сягає 200-300 (а іноді і до 1000) елементів, то кількість центрів може бути звужена до 2-10 елементів такої ж розмірності. Зважаючи на те, що релевантність обчислюється шляхом аналізу всієї множини еталонів, що у прикладних задачах досягає значень 100-1500, така трансформація суттєво (у тисячі разів) понижує обсяг необхідних обчислень [4, 6]. Відплатою за таке прискорення є необхідність здійснювати кластеризацію даних розпізнаваного об'єкта та деяке зниження ступеня розрізненості за рахунок формування та застосування узагальнених характеристик – центрів опису. Кластеризація ж еталонних даних бази при цьому виконується на підготовчому етапі і на швидкодію класифікації безпосередньо не впливає.

Спосіб обчислення релевантності еталон-об'єкт тепер реалізуємо зіставленням множин центрів об'єкта та еталонів та визначенням найбільш релевантного представника серед еталонів бази.

Введемо у векторному просторі R^n деяку відстань ρ. Прикладом може бути евклідова або манхеттенська відстані, а у випадку бінарних векторів – більш ефективна за обсягом обчислень метрика Хемінга [9, 10].

Підрахуємо $M \times M$ усіх відстаней $\rho(T_{k1}(Z), T_{k2}(E_i))$, $k1, k2 \in [1,2,...,M]$ між представниками кластерних систем еталонів та розпізнаваного об'єкта шляхом обчислення відстаней $q = \rho(b_{k1}(Z), b_{k2}(E_i))$ між усіма елементами множин центрів об'єкта та i-го еталону і означимо їх як $\{q_a\}$, $a = 1,2,...,M^2$. На основі значень множини

$\{q_a\}$ можна із застосуванням традиційних підходів обчислити відстані між множинами: середнього зв'язку, ближнього сусіда, далекого сусіда, Хаусдорфа та ін., або їх численних модифікацій, пов'язаних із логічним аналізом чи обробленням значень q_a [5, 9, 10]. Так відстань середнього зв'язку тут має вид:

$$\rho_{av}(T_k(\mathrm{Z}), T_k(\mathrm{E}_i)) = \frac{1}{M^2}\sum_{a=1}^{M^2} q_a \ . \qquad (3)$$

Звернемо увагу на одну із важливих модифікацій для визначення результуючої відстані, що обчислюється шляхом додавання трьох найменших елементів попередньо ранжируваної вибірки $q^* = q_1 \le q_2 \le ... \le q_{M^2}$ для набору відстаней [7]:

$$\rho_{3m}(T_k(\mathrm{Z}), T_k(\mathrm{E}_i)) = \sum_{a=1}^{3} q_a^* \ . \qquad (4)$$

Відстань (4) одночасно має властивості як диференційних, так і інтегральних метрик, так як отримана у результаті додавання трьох незалежних мінімумів [10].

Як альтернативу (4) розглянемо додавання трьох відстаней найближчого сусіда окремо для кожного з центрів об'єкту

$$\rho_{3NN}(T_k(\mathrm{Z}), T_k(\mathrm{E}_i)) = \\ = \sum_{a=1}^{3} f_a[\min_{j=1,...,\mathrm{M}} \rho(\mathrm{b}_k(\mathrm{Z}), \mathrm{b}_j(\mathrm{E}_i))], \qquad (5)$$

де f_a – функція визначення трьох найменших значень. Моделі відстаней (4), (5) загалом не гарантують, що кожному центру об'єкту буде відповідати єдиний центр еталону. Варіантом визначення центру з такими властивостями є застосування угорського методу для оптимального призначення кожному центру об'єкту найбільш придатного центру еталона [8]. Зважаючи на те, що загальна кількість центрів невелика (3…5), оптимальні методи можна вдало застосувати з незначними вимогами щодо швидкодії.

Зауважимо, що зазначені загальноприйняті відстані та вирази (4), (5) для множин векторів можна було б застосувати і безпосередньо до описів E_i та Z, однак, із суттєво значнішим обсягом обчислень.

Класифікацію об'єкту за описом Z на підставі обчислених відстаней (3)-(5) між центрами аналізованих даних здійснюємо традиційно шляхом визначення найменшого серед значень для різноманіття еталонів

$$Z \to E_a : \ a = arg \min_{i=1...N} \rho(T_k(\mathrm{Z}), T_k(\mathrm{E}_i)) \ . \qquad (6)$$

Класифікація «дескриптор об'єкту – еталон»

Незалежне кластерне подання для описів у базі еталонів сприяє також і спрощенню реалізації процедур класифікації виду «дескриптор об'єкту – еталон» стосовно окремих елементів опису розпізнаваного об'єкту. Цей підхід є більш універсальним в аспекті забезпечення врахування можливої дії завад на зображенні та фільтрації у процесі класифікації появи хибних КТ, викликаних впливом завад. При цьому кластеризацію аналізованого опису об'єкта не застосовуємо (це також скорочує обчислювальні витрати), а кожний дескриптор опису знаходить «свій клас» шляхом конкурентного зіставлення зі сформованою множиною еталонних центрів $\{\mathrm{b}_j(\mathrm{E}_i)\}$ кластерів.

Для кожного дескриптора $\mathrm{z}_v \in Z$ об'єкту визначаємо найближчий серед усіх еталонних центрів $\{\mathrm{b}_j(\mathrm{E}_i)\}$ за процедурою ближнього сусіда:

$$\mathrm{d} = \arg\min_{i} \min_{\mathrm{j},\, i} \rho(\mathrm{z}_v, \mathrm{b}_j(\mathrm{E}_i)) \ , \ d \in \{1,2,...,\mathrm{N}\} \qquad (7)$$

де ρ – відстань між дескриптором об'єкту та центром $\mathrm{b}_j(\mathrm{E}_i)$ із системи кластерів для еталонів, $i \in \{1,2,...N\}$, $j \in \{1,2,...\mathrm{M}\times N\}$.

Фактично (7) можна розглядати як багатозначну характеристичну функцію $\mathrm{d}: \mathrm{R}^n \to \{1,2,...,\mathrm{N}\}$ для визначення еталонного класу щодо окремого дескриптора із опису об'єкта.

За результатом оброблення (7) $\forall \mathrm{z}_v \in Z$ підраховуються кількості $r_1, \mathrm{r}_2, ..., \mathrm{r}_N$ голосів елементів $\mathrm{z}_v \in Z$, віднесених до одного із еталонних центрів $\{\mathrm{b}_j(\mathrm{E}_i)\}$ опису E_i:

$$\mathrm{r}_i = \sum_{k=1}^{M} f_k[\mathrm{z}_v \to \{\mathrm{b}_j(\mathrm{E}_i)\}] \qquad (8)$$

де f_k – логічна функція, що визначає віднесення елемента z_v до відповідного центру з номером j кластера еталону E_i. Зрозуміло, що процедура реалізації функції f_k задля забезпечення фільтрації завад повинна спиратися на значення порогу δ_f для величини мінімуму серед відстаней, обчислених до кожного з наявних центрів $\{\mathrm{b}_j(\mathrm{E}_i)\}$ кластерів для усіх еталонів [1].

За отриманими значеннями $r_1, \mathrm{r}_2, ..., \mathrm{r}_N$ голосів для усіх z_v склад об'єкту класифікується як

$$Z \to E_j : \ j = arg \max_{i} r_i \ . \qquad (9)$$

Вхідне зображення за класифікацією (7) – (9) буде віднесено до того еталону, який набере найбільше число голосів дескрипторів його КТ. Із врахуванням вагових коефіцієнтів $\alpha_{k,i}$, що характеризують важливість кожного із кластерів всередині окремого опису, за результатом (9) можна визначити також накопичені ваги $\alpha_i = \sum_k \alpha_{k,i}$ щодо значимості кожного із кластерів. Класифікація за накопиченими значеннями α_i реалізується правилом:

$$Z \to E_j : \ j = arg \max_{i} \alpha_i \ . \qquad (10)$$

За правилом (10) об'єкт класифікується відповідно до величини найбільшої суми ваг коефіцієнтів для визначених кластерів.

Важливим моментом дослідження є порівняння результативності запропонованих способів класифікації (час оброблення та ступінь розрізненості) із

підходом, коли кластеризація виконується на множині усіх дескрипторів для бази еталонів [4, 6]. У цьому випадку попередньо здійснюємо кластерний аналіз на множині $E=\{E_1,E_2,.....,E_N\}$. У результаті отримаємо $E=T(E)=\cup_{v=1}^{V}T_v(E)$, де V – число побудованих кластерів для E. За результатом кластеризації отримаємо проекції $C(E_i)$ для кожного еталону E_i : $C(E_i)=(c_{i1},c_{i2},...,c_{iV})$, де цілі числа

$$c_{iv}=card\ \{e_v(i)\,|\,e_v(i)\in E_i \,\&\, e_v(i)\in T_v(E)\} \quad (11)$$

означають число дескрипторів еталону E_i, що належать кластеру T_v. Належність до кластеру визначається процедурою конкурентного віднесення дескриптора $e_v(i)$ за мінімумом відстані [6]. Кожний із кластерів T_v характеризуємо його центром b_v, $v=\overline{1,V}$, який будемо застосовувати для класифікації описів об'єктів.

Опис $Z=\{z_v\}$ аналізованого об'єкту проектуємо аналогічно (11) на систему кластерів $T_v(E)$ бази, у результаті отримуємо проекцію $C(Z)=(c_1^*,c_2^*,...,c_V^*)$ об'єкта, яку шляхом конкурентного віднесення за величиною відстані ρ класифікуємо до одного із класів

$$Z\to E_a:\ a=arg\ \min_{i=1...N}\ \rho(C(Z),C(E_i)). \quad (12)$$

У (12) може бути застосована манхеттенська відстань. Зрозуміло, що ефективність обговорюваних підходів повністю залежить від застосовуваного методу кластеризації. У експериментальному дослідженні ми застосували метод к-середніх [2, 3] з модифікацією для визначення центрів, де кожний біт для центру кластеру на черговій ітерації обчислюється шляхом підрахунку переважаючого числа бітів дескрипторів, що формують кластер [5, 12]. Зупинення процесу кластеризації на черговій ітерації здійснювалось, якщо загальна відстань між кластерними центрами не перевищувала 3% від максимально можливого значення (для дескриптора BRISK це число склало 15 як 3% від 512).

Результати моделювання

Зображеннями бази еталонів взято портрети поетів та вчених (рис. 1) із сформованим числом дескрипторів опису $s=750$. Для визначення дескрипторів КТ використано детектор ключових точок BRISK [14].

Рис. 1. Зображення бази даних

У відповідності до моделей (4), (5) обчислені матриці значень релевантностей для пар описів при M =3. Величина релевантності для аналізованих даних знаходиться у межах відрізка [0,…,1536], так як є сумою трьох відстаней для векторів розміром 512 з компонентами у межах від 0 до 1.

Вид відстані ρ між центрами визначається процедурою кластеризації: для традиційного методу к-середніх треба застосовувати, наприклад, манхеттенську відстань, а для моделі статистичного центру [5, 12] – менш вимогливу до обсягу обчислень відстань Хемінга. Кластеризація у нашому експерименті виконувалася із використанням модифікації статистичного центру, де на відмінність від традиційного усереднення елементів кластеру на черговій ітерації кожний біт центру визначався як найбільш поширене значення серед бітів для усіх елементів кластеру. Це дещо спрощує обчислення за рахунок використання виключно бінарних даних.

Табл. 1 містить експериментальні величини релевантності (5) для кластерних центрів, значення для моделі (4) незначно відрізняються. За результатом моделювання бачимо, що застосування моделей (4), (5) забезпечує впевнену класифікацію у аналізованій базі, так як діагональні елементи є найменшими у рядку та стовпці, це підтверджує працездатність моделей релевантності. При цьому модель (5) показала трохи кращі результати.

Таблиця 1 – **Значення релевантності для моделі (5)**

Еталони	1	2	3
1	201	396	422
2	368	327	424
3	366	403	321

Більш детальний аналіз табл. 1 показує, що значення подібностей на діагоналі незначно відхиляються від найближчого до них, це відхилення у 2 та 3 рядках не перевищує 15%. З одного боку, це вказує на близькість зображень 2 та 3 у розглянутому просторі ознак, а з іншого – про необхідність більш детального вивчення ефективності методів для конкретних баз зображень в реальних умовах дії завад.

За результатами моделювання процес класифікації об'єкту з використанням моделі (5) потребує часу оброблення 15 мсек, а для моделі (4) – 10 мсек. Можна вважати, що різниця в часі програмної реалізації цих моделей незначна, так як кожна із них реалізує практично однаковий обсяг обчислень та пошук мінімуму на одній і тій же множині векторів.

Одним із моментів, що ускладнює класифікацію (4), (5) у цьому експерименті – це неоднаковий результат кластеризації вхідного і еталонного зображень. Маємо, що одне і те ж зображення у відповідності до різного кластерного подання має досить великі значення на діагоналі у табл. 1.

Щоб уникнути цього факту, проведемо моделювання для класифікації «дескриптор об'єкту – еталон», де еталонні зображення кластеризуються, а кожний дескриптор аналізованого об'єкту класифікується віднесенням до відповідного кластеру.

Проведемо експериментально порівняльний аналіз запропонованого методу та розробленого раніше, заснованого на створенні мережі кластерів

на комплектній базі дескрипторів усіх еталонів [4, 6]. Візьмемо в якості вхідного об'єкту зображення, отримане поворотом еталону 3 (рис. 2). Кожний еталон E_i представимо у вигляді 3-х кластерних центрів $b_j(E_i)$, $j=1,...3$. У відповідності до моделі (8) отримано кількості голосів r_i: r_1=212, r_2=183, r_3=355, що підтверджує працездатність запропонованих методів, зображення рис. 2 впевнено віднесено до 3-го еталону.

Рис. 2. Аналізований об'єкт

Для повної бази зображень здійснимо кластеризацію на $M=3$ центри, і для спільного числа дескрипторів $s=750$ отримаємо проекції (11) для еталонів і вхідного зображення (табл. 2).

Таблиця 2 – **Проекції експериментальних описів**

Об'єкт	Проекція
Еталон 1	365; 278; 107
Еталон 2	470; 237; 43
Еталон 3	296; 354; 100
Вхідний об'єкт	287; 369; 94

Відстані між проекціями описів вхідного зображення і еталонів складають 182, 366, 30, що за правилом (12) впевнено класифікує об'єкт як еталон під номером 3.

Експерименти, проведені для більшого числа кластерних центрів бази, $M=9$ показали деяке зниження рівня розрізненості аналізованих даних. Так для $M=6$ відстані дорівнюють 82, 118, 38, а для $M=9$ – 98, 162, 48. Як бачимо, відстань зі «своїм» еталоном збільшується, а з рештою – зменшується.

Збіжність модифікованого методу к-середніх, застосованого нами для кластеризації описів бази, залежала від числа кластерів і склала 5-12 ітерацій.

Оцінка часу оброблення для запропонованої моделі класифікації з використанням мережі кластерів ($M=3$) на основі комплексної бази дескрипторів усіх еталонів з використанням проекцій (11) потребує близько 150 мсек. Цей час включає процеси проектування зображення у вектор (11) на основі обчислених еталонних центрів, а також пошук мінімуму (12) серед набору еталонних проекцій.

Процес класифікації для програмної моделі методу (7)-(9) «дескриптор об'єкту – еталон» займає 425 мсек. Час обчислення включає віднесення дескрипторів зображення до кластерного центру одного з еталонів (7)-(8) та визначення еталону з найбільшою кількістю голосів (9). Дещо більше значення часу можна пояснити зростанням числа порівнюваних ознак пропорційно збільшенню числа центрів кластерів. Зрозуміло, що обсяг обчислень для аналізованих способів класифікації зростає пропорційно числу M кластерів.

Як бачимо, результати моделювання показали однаково високий рівень правильної класифікації для розроблених моделей незалежної кластеризації у порівнянні з методом побудови кластерних центрів для комплектної бази еталонів. Але незалежна кластеризація, як показали експерименти, потребує дещо більшого часу оброблення. Цей метод буде більш ефективний за якістю класифікації у складних задачах, де розпізнавані зображення можуть бути досить схожими між собою.

Висновки

Із загальних міркувань зрозуміло, що для запропонованої моделі оброблення даних виграш у обсязі обчислювальних витрат на класифікацію зростає зі збільшенням числа КТ у описах, збільшенням числа еталонів та зменшується із зниженням числа побудованих кластерів. Взагалі результат кластеризації відображає ступінь узагальнення даних, внаслідок чого об'єм структурного опису для візуальних об'єктів може змінюватися у діапазоні від кількісної множини векторів до єдиного вектору, що відтворює сутність даних усього опису.

Застосування системи самостійних кластерів і їх центрів у порівнянні зі спільним кластерним поданням для усієї бази еталонів дає змогу детальніше апроксимувати дані, але при здійсненні класифікації викликає потребу додаткового встановлення відповідності центрів кластерів на порівнюваних зображеннях, що призводить до збільшення часу оброблення.

Більш практичним і ефективним із врахуванням дії завад виглядає застосування класифікатора типу «дескриптор об'єкту – еталон», так як він не потребує кластеризації даних вхідного зображення. Запровадження порогу при віднесенні до кластеру сприятиме відсіюванню хибних елементів опису.

Наукову новизну дослідження складає розроблення ефективного методу класифікації зображень на основі впровадження системи незалежних кластерів для бази еталонів, що сприяє більш поглибленому аналізу даних описів. Метод реалізовано у варіантах зіставлення кластерного подання описів і на підставі аналізу голосування дескрипторів КТ.

Практична значущість роботи полягає у побудові моделей класифікації у новоствореному просторі даних, підтвердженні працездатності запропонованих модифікацій оброблення даних на прикладах зображень, розробленні програмних моделей для впровадження описаних методів класифікації у системах комп'ютерного зору.

Перспективи дослідження пов'язані із впровадженням оптимальних методів встановлення відповідності кластерних центрів об'єкта та еталонів, вивченням моделей дольового аналізу подання класів всередині кластерів, а також використанням логічного оброблення задля боротьби із завадами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гороховатский В. А. Распознавание изображений в условиях неполной информации. Харків: ХНУРЕ, 2003, 112 с.
2. Xu R., Wunsch D.C. Clustering. IEEE Press Series on Computational Intelligence. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2009, 358 p.
3. Aggarwal C. C., Reddy C. K. Data Clustering. Algorithms and Application, Boca Raton: CRC Press, 2014. 652 p.
4. Гороховатский В.А, Путятин Е.П., Столяров В.С. Исследование результативности структурных методов классификации изображений с применением кластерной модели данных. *Радиоэлектроника, информатика, управление*. 2017. №3 (42). С. 78–85.
5. Гороховатський В.О., Гадецька С.В., Пономаренко Р.П. Статистичні розподіли та ланцюжкове подання даних при визначенні релевантності структурних описів візуальних об'єктів. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава: ПНТУ, 2018. № 6 (52). С. 87–92.
6. Gorokhovatskyi O., Gorokhovatskyi V., Peredrii O. Analysis of Application of Cluster Descriptions in Space of Characteristic Image Features. *Data*. 2018. 3(4). P. 52. DOI: http://dx.doi.org/10.3390/data3040052
7. Литвин В., Крайовський В. Моделювання діяльності раціонального агента на основі адаптивних технологій. Комп'ютерні науки та інформаційні технології (CSIT 2009). *Матеріали 4 міжн. нак.-техн. конф*., Львів, 15-17 жовтня, 2009. С. 308-310.
8. Гороховатский В.А., Полякова Т.В. () рименение пространственных структур признаков для классификации изображений в компьютерном зрении. Харьков: ФОП Панов А.Н., 2018. 120 с.
9. Елисеева И.И., Рукавишников В.О. Группировка, корреляция, распознавание образов (Статистические методы классификации и измерения связей). Москва: Статистика, 1977. 144 с.
10. Гороховатский В.А. Метрики на множествах ключевых точек изображений. *Бионика интеллекта*. 2008. № 2 (69). С. 45–50.
11. Kohonen T. Self-Organizing Maps. Berlin: Springer-Verlag, 1995. 655 p.
12. Гороховатський В.О., Солодченко К.Г. Застосування апарату аналізу та оброблення бітових даних у методах класифікації зображень за множиною ключових точок. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава: ПНТУ, 2018. № 2 (48). С. 63–67.
13. Медиковський М. О., Цмоць І. Г., Ткаченко Р. О., Цимбал Ю. В., Дорошенко А. В. Інтелектуальні компоненти інтегрованих автоматизованих систем управління. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015. 280 с.
14. Leutenegger, S., Chli, M., Siegwart, R.Y. BRISK: Binary Robust Invariant Scalable Keypoints. *Computer Vision (ICCV)*. 2011. P. 2548-2555.
15. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications. London: Springer, 2010. 979 p.
16. Гороховатський, В.О., Пупченко, Д.В., Стяглик, Н.І. Дослідження трансформацій простору даних при навчанні мережі Кохонена у методах структурної класифікації зображень. *Сучасні інформаційні системи*. 2020. Т. 4, № 1. С. 113–118, DOI: http://dx.doi.org/10.20998/2522-9052.2020.1.17
17. Svyrydov, A., Kuchuk, H., Tsiapa, O. Improving efficienty of image recognition process: Approach and case study. *Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies*, *DESSERT 2018*. 2018. P. 593-597. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409201
18. Xu Zhang, Felix X. Yu, Svebor Karaman, Shih-Fu Chang. Learning Discriminative and Transformation Covariant Local Feature Detectors. The *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2017. P. 6818-6826.

REFERENCES

1. Gorokhovatskyi, V.A. (2003), *Recognition of images in conditions of incomplete "information*, KNURE, Kharkov, 112 p.
2. Xu, R. and Wunsch, D. (2009), *Clustering*, Wiley-IEEE Press, Hoboken, 358 p.
3. Aggarwa, C. and Reddy, C. (2014), *Data Clustering. Algorithms and Application*, CRC Press, Boca Raton, 652 p.
4. Gorokhovatskyi, V., Putyatin, E. and Stolyarov, V. (2017), "The study of the effectiveness of structural methods for classifying images using a cluster data model", *Radio Electronics, Computer Science, Control*, No. 3 (42), pp. 78–85.
5. Gorokhovatskyi, V., Gadetska, S. and Ponomarenko, R. (2018), "Statistical distributions and chain representation of data when determining the relevance of structural descriptions of visual objects", *Control, navigation and communication systems*, No. 6 (52), pp. 87–92.
6. Gorokhovatskyi O., Gorokhovatskyi V., and Peredrii, O. (2018), "Analysis of Application of Cluster Descriptions in Space of Characteristic Image Features", *Data*, No. 3 (4), p. 52, DOI: http://doi.org/10.3390/data3040052
7. Litvin, V. and Krayovsky, V. (2009), "Modeling of rational agent activity based on adaptive technologies", *4th International Scientific and Technical Conference on Computer Science and Information Technologies* (CSIT), pp. 308-310.
8. Gorokhovatskyi, V. and Polyakova, T. (2018), *The use of spatial structures of signs for the classification of images in computer vision*, FLP Panov A.N., Kharkov, 120 p.
9. Eliseeva, I. and Rukavishnikov, V. (1977), *Grouping, correlation, pattern recognition (Statistical methods for classifying and measuring relationships)*, Statistics, Moscow, 144 p.
10. Gorokhovatskyi, V.A. (2008), "Metrics on sets of key image points", *Bionics of intelligence*, № 2 (69), pp. 45-50.
11. Kohonen, T. (2013), *Self-organizing maps*, BINOM. Laboratory of Knowledge, Moscow, 655 p.
12. Gorokhovatskyi, V. and Solodchenko, K. (2018), "The application system analysis and processing of the data bit in the methods of image classification for multiple key points", *Control, navigation and communication systems*, No. 2 (48), pp. 63–67.
13. Medikovskiy, M., Tsmots, I., Tkachenko, R., Tsimbal, Yu. and Doroshenko, A. (2015), *Intellectual components of integrated automation control systems*, Vydavnytstvo L′vivs′koyi Politekhniky, Lviv, 280 p.
14. Leutenegger, S., Chli, M. and Siegwart, R. (2011), "BRISK: Binary Robust Invariant Scalable Keypoints", *2011 International Conference on Computer Vision* (ICCV), pp. 2548-2555.
15. Szeliski, R. (2010), *Computer Vision: Algorithms and Applications*, Springer, London, 979 p.
16. Gorokhovatskyi, V., Pupchenko, D. and Stiahlyk, N. (2020), "Research of data space transformation in Kohonen network training for methods of structural classification of images", Advanced Information Systems, Vol. 4, No. 1, pp. 113-118, DOI: http://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.1.17

17. Svyrydov, A., Kuchuk, H. and Tsiapa, O. (2018), "Improving efficienty of image recognition process: Approach and case study", *Proceedings in 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*, pp. 593-597, DOI: http://dx.doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409201
18. Zhang, X., Felix, X. Yu, Chang, S.-F. and Karaman, S. (2017), "Learning Discriminative and Transformation Covariant Local Feature Detectors", *The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (CVPR), pp. 6818-6826.

Надійшла (received) 14.02.2020
Прийнята до друку (accepted for publication) 15.04.2020

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Гороховатський Володимир Олексійович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформатики, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;
Volodymyr Gorokhovatsky – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Computer Science Department, Kharkiv National University of RadioElectronics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: gorohovatsky.vl@gmail.com; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-7839-6223.

Пономаренко Роман Петрович – аспірант кафедри інформатики, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;
Roman Ponomarenko – Doctoral Student of Computer Science Department, Kharkiv National University of RadioElectronics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: roman.ponomarenko@nure.ua; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0003-0709−601X.

Классификация изображений на основании формирования независимой системы кластеров в составе структурных описаний базы эталонов

В. А. Гороховатский, Р. П. Пономаренко

Аннотация. Предмет исследований статьи – структурные методы классификации изображений в пространстве образов как множества дескрипторов ключевых точек для распознавания визуальных объектов в системах компьютерного зрения. **Цель –** создание эффективного метода классификации на основании внедрения системы независимых кластеров для базы эталонов. **Задания**: разработка моделей классификации в пространстве образов, анализ их вычислительной эффективности, оценка результативности классификации средствами программного моделирования. **Методы**: детектор BRISK для формирования дескрипторов ключевых точек, интеллектуальный анализ данных, метод k-средних для кластеризации данных, программное моделирование. Получены такие **результаты**: предложены модели классификации описаний объектов на основе системы самостоятельных кластеров и их центров, которые упрощают обработку данных и повышают быстродействие реализации, проведен сравнительный анализ разработанных методов с известными. Осуществлена программная реализация внедренных моделей классификации, экспериментально проведено исследование их эффективности и оценки времени обработки. **Выводы**. Научная новизна исследования состоит в развитии метода классификации изображений на основе внедрения системы независимых кластеров для эталонных описаний, что способствует углубленному анализу данных. Метод реализован в модификациях сопоставления кластерного представления и на основе конкурентного анализа дескрипторов описания. **Практическая значимость** работы заключается в построении моделей классификации в созданном пространстве данных, подтверждении работоспособности предложенных модификаций обработки данных, разработке программных моделей для внедрения методов в системах компьютерного зрения.

Ключевые слова: компьютерное зрение; структурное распознавания изображений; дескриптор ключевых точек; детектор BRISK; кластеризация; метод k-средних; центр кластера; релевантность описаний; программное моделирование; база изображений.

Classification of images based on the formation of independent cluster system within the structural descriptions of etalon dataset

V. Gorokhovatskyi, R. Ponomarenko

Abstract. The subject of this article is the structural methods for image classification in the space of images as a set of descriptors of key points for recognizing visual objects in computer vision systems. **The goal** is the creation of an effective classification method based on the embedding of a system of independent clusters for the etalon dataset. **Task:** the development of classification models in the newly created space of images, analysis of their computational efficiency, the evaluation of classification efficiency with software modeling. **The methods** are: BRISK detector for generating key point descriptors, data mining, k-means method for data clustering, software modeling. The following **results** were obtained: models for classifying object descriptions based on a system of independent clusters and their centers are proposed that simplify data processing and increase implementation speed, a comparative analysis of the developed methods with known methods was performed. The software implementation of the embedded classification models has been performed, an experiment to explore their effectiveness and evaluate the processing time has been conducted. **Conclusions.** The contribution of the research is the development of an image classification method based on the implementation of a system of independent clusters for reference descriptions, which contributes to an in-depth data analysis. The method has been implemented in modifications of cluster representation matching and based on competitive analysis of descriptors. **The practical importance** of the work is the constructing of the classification models in the created data space, confirming the efficiency of the proposed modifications to data processing, developing software models for implementing methods in computer vision systems.

Keywords: computer vision; structural image recognition; key point descriptor; BRISK detector; clustering; k-means method; cluster center; description relevance; software modeling; image database.

UDC 004.9 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.2.05**

Ye. Meleshko, O. Drieiev, H. Drieieva

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

METHOD OF IDENTIFICATION BOT PROFILES BASED ON NEURAL NETWORKS IN RECOMMENDATION SYSTEMS

Abstract. The subject matter of the article is the process of increased the information security of recommendation systems. The goal of this work is to develop a method of identification bot profiles in recommendation systems. In this work, the basic models of information attacks by the profile-injection method on recommendation systems were researched, the method of identification bot profiles in recommendation systems using the multilayer feedforward neural network was developed and the experiments to test the quality of its work were conducted. The developed method is to identify bot profiles that attempt to change item ratings in a recommendation system in order to increase the occurrence frequency of target items in recommendation lists to all authentic users, or to certain segments of authentic users. When removing bot profiles' data from the database of the recommendation system before generating recommendation lists, the accuracy of the system and the correctness of recommendations are significantly increased, and authentic users get protection from information attacks. Random, Average and Popular attacks were used to model the attacks on a recommendation system. To identify bots, their ratings for system items were analyzed. The experiments have shown that the neural network that analyzes only the numbers of different ratings in a profile, detects bot profiles with high accuracy, that use Random attack regardless of the number of target items for each bot. At the same time, the developed neural network can detect bots that use Average or Popular attacks only when they have several target items. Also, the results of the experiments show that type I errors, when the system identifies authentic users as bots, is very rarely appear in the developed method. To improve the accuracy of the neural network, there can add to analysis also other data of user profiles, such as the timestamp of each rating and as segments of items, which was rated.

Keywords: recommendation systems; information attacks; information security; Internet bots; neural networks; data clustering.

Introduction

Recommendation systems that use feedback from users, such as ratings, views, comments, etc., to create recommendations are vulnerable to information attacks aimed at changing ratings of certain items [1, 2].

The main type of information attacks on recommendation systems is profile-injection attacks [1-9], which are to create a network of bots to perform concerted actions to change the ratings of target items.

In this work, a bot should be understood as a program that automatically performs actions that mimic user activity of a recommendation system and performs target actions in parallel, in order to change ratings of target objects and/or to collect statistics about authentic users.

Bots should very accurately simulate actions of authentic users of a recommendation system, otherwise, they will be detected by the system, and their actions will be neutralized. However, they will never have all statistic data of authentic users without access to a website at the administrator level, so they will not be able to perfectly simulate the actions of authentic users. Therefore, creators of such bots should seek the compromise between the obscurity of bots and the information amount that must be collected for an attack. Attackers can collect information to attack in two ways:

1. Parsing HTML-text of open data on a website to get user activity statistics (such as global average rating, the occurrence frequency of different ratings, average ratings of target items, lists of popular items in target user segments, etc.).

2. Performing Probe attack [1], which consists of creating bot profiles with characteristics of users from target segments and collecting statistics about preferences of such users based on recommendation lists generated by a system for these bot profiles. These methods can be used individually or together.

At the same time, a robust recommendation system should work so that attackers' actions are so ineffective that their results will not give incentives to continue attacks and authentic users will continue to receive relevant undistorted recommendations.

To protect recommendation systems from profile injection attacks, can use the following steps:

1. Models of possible information attacks on a specific recommendation system are created.

2. Methods of identification bot profiles on the basis of created information attack models are being developed. Typically, these methods are based on data classification and clustering methods and allow divide all profiles into two groups: authentic users and bots.

3. The detected bot profiles are not taken into account in the formation of recommendation lists, their data (ratings, actions, etc.) are removed from the database of a recommendation system.

The purpose of this work is to develop a method of identifying bot profiles in recommendation systems to prevent information attacks of item ratings' change. The developed method is to identify the bot profiles that try to change the ratings of items in the system so that to change the appearing probability of target items in recommendation lists.

Removing detected bot profiles from a recommendation system database before calculating recommendations will greatly increase its robustness to information attacks.

© Meleshko Ye., Drieiev O., Drieieva H., 2020

1. Models of information attacks on recommendation systems

An information attack on a recommendation system based on the profile injection method - is a concerted effort by a bot network to put certain ratings to some items in order to change their frequency of appearance in recommendation lists for all or a specific segment of users.

Attack on recommendation systems usually consists of two steps:

1. Creating profiles of bots. Attacks that require fewer bot profiles will be more simpler to attackers.

2. Filling in the bot profiles with ratings. To do this, attackers need to collect some statistics from a system. The more knowledge attackers have about the distribution of ratings in a system, the more realistic bot profiles they will create.

The bot profile model is shown in Fig. 1.

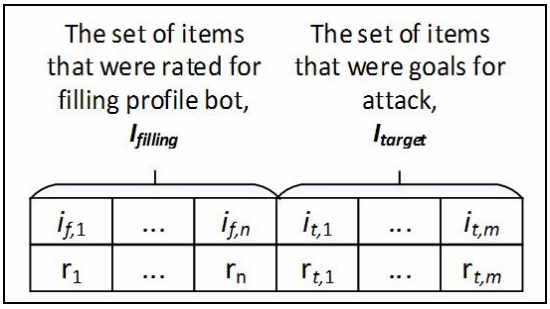


Fig. 1. Model of bot profile

As can be seen from the figure, a bot profile contains the following types of ratings:

– ratings of the set $I_{filling}$ to simulate the actions of real users, attackers try to choose values of these ratings as closely as possible to true ratings for the target user group, which they want to influence;

– ratings of the set I_{target} for target items, this is usually maximum ratings (or close to maximum) if an attacker aims to raise the rating of target items, or minimum ratings (or close to minimum) if the goal is to lower the rating of target items.

In this work, we have modeled attacks on object rating increase.

The most common models of attacks on recommendation systems are the following – Random attack,

Average attack and Popular attack [1-9]. Let's look at these models of attacks in more detail.

Random attack. In bot profiles, the set $I_{filling}$ will be filled with random ratings for items selected at random. Ratings are generated close to the global average in a system. The target item will be rated a maximum rating r_{max}. To perform such an attack, one only needs to know the global average rating in a recommendation system.

Average attack. The set $I_{filling}$ filled with random items that get ratings close to their individual average values of ratings in a system. For this attack, an attacker needs to collect data about the average values of all or some ratings in a system. This attack is more inconspicuous than Random attack, bot profiles will be very similar to a large number of user authentic profiles.

Popular attack. The set $I_{filling}$ filled with popular items that get ratings that are equal to their average ratings in a system. Such strategy will lead to positive correlations between bot profiles and authentic profiles. Therefore, bot profiles will be extremely difficult to detect.

These attack models were used to model the data for bot profiles in this work.

2. The method of identification bot profiles in recommendation systems

To identify bot profiles, the multilayer feedforward neural network was developed (Fig. 2).

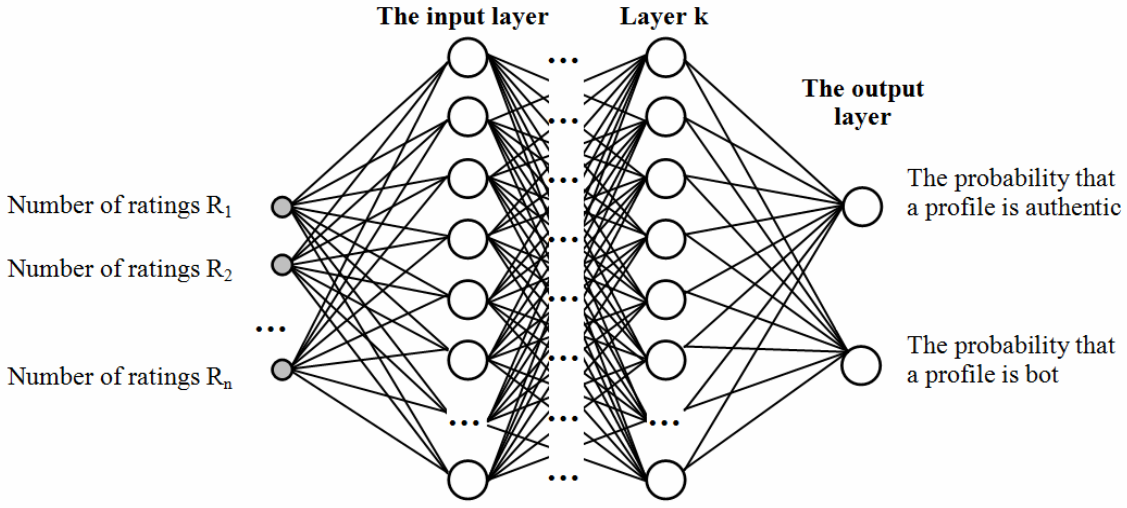


Fig. 2. General architecture of the artificial neural network for identifying bots

As the input data for the artificial neural network were selected the number of each different ratings in a user profile. At the output, the neural network gives probabilities that the profile belongs to an authentic

user or bot. For the experiments, the data of authentic users was taken from MovieLens Datasets [10], and the data of bots was generated based on discussed above models of information attacks on recommendation systems.

The TensorFlow library [11] and the Python programming language were used to implement the neural network.

It was experimentally found that the balance between accuracy and complexity of the neural network can be achieved with the following parameters, which are shown in table 1.

Table 1 – **Parameters of the developed neural network**

La-yer	Type	Number of neurons	Number of inputs on each neuron	Activa-tion function
1	Input	100	10	Sigmoid
2	Hidden	100	100	Sigmoid
3	Hidden	100	100	Sigmoid
4	Output	2	100	Softmax

Because in MovieLens Datasets there are ten variants of different ratings from 0.5 to 5, then there should be 10 inputs in the neural network for this case. It was decided to create 2 hidden layers in the neural network.

The sigmoid activation function was used in the input layer and hidden layers. The output layer consists of 2 neurons with softmax activation function and showing the probabilities that the profile is authentic or bot.

The Adam algorithm [12] was used to train the neural network, it is a modification of the stochastic gradient descent algorithm, which has been widely used in systems with deep learning.

Adam algorithm differs from the classic gradient descent in that it calculates individual adaptive speeds of descent for different neural network weights.

3. The experiment to test the efficiency of the developed method

The series of experiments were conducted, the results of which are given in Table 2. The designations used in Table 2:

RA – Random attack,

AA – Average attack,

PA – Popular attack.

For each considered attack model, one training data set and eight testing data set were created. Each data sets contained 3000 users. In training data sets, half of profiles were bots. In testing data set, bots were between 5% and 30% of profiles.

Also, data sets for testing with different numbers of targets for bots – with 1 and 10 target items were created.

The identical neural networks, one for each considered attack model, were created, each of which was trained on the corresponding training data set and tested on the corresponding testing data set.

In the table 2 shows the results of the experiments.

Table 2 – **Test results of the developed method**

Experiment number	Number of bots, %	The number of goals for each bot, grand	Type I errors, %			Type II errors, %			Precision, %			Recall, %			F-score, %		
			RA	AA	PA	RA	AA	PA	RA	AA	PA	RA	AA	PA	RA	AA	PA
1	5	1	0.001	0.002	0.002	0.023	0.049	0.047	0.95	0.12	0.25	0.52	0.006	0.006	0.67	0.013	0.013
2	10	1	0.0006	0.001	0.0006	0.036	0.099	0.099	0.98	0.25	0.33	0.63	0.003	0.003	0.77	0.006	0.006
3	20	1	0.002	0.001	0.002	0.080	0.199	0.197	0.98	0.28	0.14	0.59	0.003	0.001	0.74	0.006	0.003
4	30	1	0.0006	0.002	0.002	0.116	0.297	0.296	0.99	0.25	0.30	0.61	0.002	0.003	0.75	0.004	0.006
Mean values:			**0.001**	**0.001**	**0.001**	**0.063**	**0.161**	**0.159**	**0.97**	**0.22**	**0.25**	**0.58**	**0.003**	**0.003**	**0.73**	**0.007**	**0.007**
5	5	10	0.002	0.001	0.001	0.001	0.024	0.009	0.96	0.93	0.97	0.98	0.50	0.81	0.97	0.65	0.88
6	10	10	0.001	0.001	0.002	0.002	0.045	0.014	0.98	0.98	0.96	0.97	0.55	0.85	0.98	0.70	0.90
7	20	10	0.001	0.001	0.001	0.005	0.047	0.013	0.99	0.99	0.99	0.97	0.76	0.93	0.98	0.86	0.96
8	30	10	0.001	0.001	0.002	0.005	0.024	0.006	0.99	0.99	0.99	0.98	0.92	0.97	0.98	0.95	0.98
Mean values:			**0.001**	**0.001**	**0.001**	**0.003**	**0.035**	**0.010**	**0.98**	**0.97**	**0.97**	**0.97**	**0.68**	**0.89**	**0.97**	**0.79**	**0.93**

The following metrics to evaluate the quality of the neural network work were selected:

1. **Type I errors** – "false alarm" when an authentic user is identified as a bot.

2. **Type II errors** – "missed goal", when a bot is identified as an authentic user.

3. **Precision** – the measure that characterizes how many positive predictions of the neural network are correct. It was calculated by the formula:

$$Precision = \frac{tp}{tp + fp}, \quad (1)$$

where *tp* – positive predictions from the neural network, which turned out to be correct;

fp – positive predictions of the neural network, which turned out to be wrong.

4. **Recall** (also known as Sensitivity) – the measure that characterizes the ability of the neural network to generate correct positive predictions. It was calculated by the formula:

$$recall = \frac{tp}{tp + fn}, \quad (2)$$

where *tp* – positive predictions from the neural network, which turned out to be correct;

fn – negative predictions from the neural network, which turned out to be incorrect.

5. **F-score** – is the harmonic mean of the precision and recall. It was calculated by the formula:

$$F = 2 \cdot \frac{tprecision \cdot recall}{tprecision + recall}. \quad (3)$$

As the experiments showed, the developed neural network can quite accurately identify bots, which use Random attack, regardless of the number of their targets, with an average precision of 0.97.

But it does have significant problems identify bots that use Average and Popular attacks.

The neural network can only identify such bots if they have several goals.

Also, the results of the experiments show that type I errors (when the system identifies authentic users as bots) is very rarely appear in the developed method.

Conclusions

The method of identification bot profiles in recommendation systems based on the multilayer feedforward neural network was developed. The experiments have been testing the efficiency of the developed method.

The results of the experiment showed that the easiest task is to identify bots which implement Random attack, they can be detected even if bots have one target item. It is much more difficult task to detect Average and Popular attacks.

With such types of attacks, the developed method can only detect bots that have several target items.

To improve the accuracy of the neural network, there can add to analysis also other data of user profiles, such as the timestamp of each rating and as segments (clusters) of items, which was rated.

References

1. (2010), *Recommender Systems Handbook*, Editors Francesco Ricci, Lior Rokach, Bracha Shapira, Paul B. Kantor, 1st edition, Springer-Verlag New York Inc., New York, USA, 842 p.
2. Lam, S.K.,and Riedl, J. (2004), “Shilling recommender systems for fun and profit”, *Proceedings of the 13th International World Wide Web Conference*, pp. 393–402.
3. O’Mahony, M.P., Hurley, N.J. and Silvestre, G.C.M. (2002), “Promoting recommendations: An attack on collaborative filtering”, *Database and Expert Systems Applications: 13th International Conference, DEXA Aix-en-Provence*, France, pp. 494-503.
4. Williams, C., Mobasher, B. and Burke, R. (2007), “Defending recommender systems: detection of profile injection attacks”, *Service Oriented Computing and Applications*, pp. 157–170.
5. Chirita, P.A., Nejdl, W. and Zamfir C. (2005), “Preventing shilling attacks in online recommender systems”, *Proceedings of the ACM Workshop on Web Information and Data Management*, pp. 67–74.
6. Zhou W., Wen J., Qu Q., Zeng J. and Cheng T. (2018), “Shilling attack detection for recommender systems based on credibility of group users and rating time series”, PLoS ONE 13(5): e0196533, DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196533
7. Kumari, T. and Punam, B.A (2017), “Comprehensive Study of Shilling Attacks in Recommender Systems”, *IJCSI International Journal of Computer Science Issues*, Volume 14, Issue 4, URL: https://www.ijcsi.org/papers/IJCSI-14-4-44-50.pdf
8. Mobasher, B., Burke, R., Bhaumik, R. and Williams C. (2007), “Toward trustworthy recommender systems: An analysis of attack models and algorithm robustness”, *ACM Transactions on Internet Technology*, Vol. 7(4), pp. 1–41.
9. Mobasher, B., Burke, R., Bhaumik R. and Williams C. (2005). “Effective attack models for shilling item-based collaborative filtering system”, *Proceedings of the WebKDD Workshop*, pp. 1–8.
10. Harper, F.M. and Konstan J.A. (2016), “The MovieLens Datasets: History and Context”, *ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems (TiiS)*, available at: https://doi.org/10.1145/2827872
11. (2020), *TensorFlow tutorials*, URL: https://www.tensorflow.org/tutorials/
12. (2017), “The gentle introduction to Adam optimization algorithm for deep learning”, *Blog about Machine Learning, Neural Networks*, Artificial Intelligence, URL: https://www.machinelearningmastery.ru/adam-optimization-algorithm-for-deep-learning (in Russian).

Надійшла (received) 21.02.2020
Прийнята до друку (accepted for publication) 29.04.2020

Відомості про авторів / About the Authors

Мелешко Єлизавета Владиславівна – кандидат технічних наук, доцент, докторант кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна;

Yelyzaveta Meleshko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Doctoral Student of Cybersecurity and Software Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine;
e-mail: elismeleshko@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-8791-0063.

Дрєєв Олександр Миколайович - кандидат технічних наук, доцент кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна;
Oleksandr Drieiev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Cybersecurity and Software Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine;
e-mail: drey.sanya@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-6951-2002.

Дрєєва Ганна Миколаївна - аспірант кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна;
Hanna Drieieva – Graduate student of Cybersecurity and Software Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine;
e-mail: gannadreeva@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-8557-3443.

Метод ідентифікації профілів ботів на основі нейронних мереж у рекомендаційних системах

Є. В. Мелешко, О. М. Дрєєв, Г. М. Дрєєва

Анотація. Об'єктом дослідження цієї роботи є процес підвищення інформаційної безпеки рекомендаційних систем. Метою роботи є розробка методу ідентифікації акаунтів ботів у рекомендаційній системі. У цій роботі було розглянуто основні моделі інформаційних атак ін'єкцією профілів на рекомендаційні системи, розроблено метод ідентифікації профілів ботів у рекомендаційних системах за допомогою багатошарової нейронної мережі прямого поширення та проведені експерименти для перевірки якості його роботи. Розроблений метод полягає у виявлені профілів ботів, які намагаються змінити рейтинги об'єктів у рекомендаційній системі з метою підвищення потрапляння цільових об'єктів до списків рекомендацій усім автентичним користувачам, або певним сегментам автентичних користувачів. Вилучення виявлених профілів ботів з бази даних рекомендаційної системи перед обчисленням рекомендацій значно підвищує точність її роботи та достовірність рекомендацій, а також захищає користувачів системи від інформаційних атак. Для моделювання атаки на рекомендаційну систему було використано випадкову, середню та популярну атаки. Для розпізнавання ботів аналізувалися оцінки, які вони виставляли об'єктам системи. Як показали проведені експерименти, нейронна мережа, що аналізує лише кількість різних оцінок у профілі, з високою точністю виявляє профілі ботів, які використовують випадкову атаку незалежно від кількості цільових об'єктів у кожного боту. В той же час розроблена нейронна мережа може виявляти ботів, що використовують середню та популярну атаку, тільки тоді, коли вони мають декілька цілей. Також з результатів експериментів видно, що у розробленому методі досить рідко виникають помилки першого роду – коли система ідентифікує звичайних користувачів як ботів. Для підвищення точності роботи нейронної мережі, можна враховувати й інші параметри профілів користувачів, зокрема, час виставлення кожної оцінки, а також те, до яких сегментів відносяться оцінені у профілі об'єкти.

Ключові слова: рекомендаційні системи; інформаційні атаки; інформаційна безпека; Інтернет-боти; нейронні мережі; кластеризація даних.

Метод идентификации профилей ботов на основе нейронных сетей в рекомендательных системах

Е. В. Мелешко, А. Н. Дреев, А. Н. Дреева

Аннотация. Объектом исследования данной работы является процесс повышения информационной безопасности рекомендательных систем. Целью работы является разработка метода идентификации аккаунтов ботов в рекомендательной системе. В данной работе были рассмотрены основные модели информационных атак инъекцией профилей на рекомендательные системы, разработан метод идентификации профилей ботов в рекомендательных системах с помощью многослойной нейронной сети прямого распространения и проведены эксперименты для проверки качества его работы. Разработанный метод заключается в выявлении профилей ботов, которые пытаются изменить рейтинги объектов в рекомендательной системе с целью повышения попадания целевых объектов в списки рекомендаций всем аутентичным пользователям или определенным сегментам аутентичных пользователей. Изъятие выявленных профилей ботов из базы данных рекомендательной системы перед вычислением рекомендаций значительно повышает точность ее работы и достоверность рекомендаций, а также защищает пользователей системы от информационных атак. Для моделирования атаки на рекомендательную систему было использовано случайную, среднюю и популярную атаки. Для распознавания ботов анализировались оценки, которые они выставляли объектам системы. Как показали проведенные эксперименты, нейронная сеть, которая анализирует только количество различных оценок в профиле пользователя, с высокой точностью выявляет профили ботов, которые используют случайную атаку независимо от количества целевых объектов у каждого бота. В то же время разработана нейронная сеть может обнаруживать ботов, использующих среднюю и популярную атаку, только тогда, когда они имеют несколько целей. Также по результатам экспериментов видно, что в разработанном методе очень редко возникают ошибки первого рода – когда система идентифицирует обычных пользователей как ботов. Для повышения точности работы нейронной сети, можно учитывать и другие параметры профилей пользователей, в частности, время выставлении каждой оценки, а также то, к каким сегментам относятся оцененные в профиле объекты.

Ключевые слова: рекомендательные системы; информационные атаки; информационная безопасность; Интернет-боты; нейронные сети; кластеризация данных.

Information systems modeling

UDC 519.633.2 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.2.06**

A. A. Bayramov[1,2], E. N. Sabziev[2], Y. A. Nasibov[3]

[1] Armed Forces War College of the Azerbaijan Republic, Baku, Azerbaijan
[2] Institute of Control Systems of the Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan
[3] Institute of Geography of the Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan

MODELING OF OBSERVATION IN THE MOUNTAIN TERRAIN DEPENDING ON NUMBER OF SUPERVISORY SYSTEMS

Abstract. The various types of electron-optical supervisory systems (SCS) have been used in the border stations of border zones in the Armed Forces of many countries. The mission of these SCS is to supervise the possible activities of smugglers, the illegal movement of enemy troops, the technics and weapon systems, the frontier intruders. In the paper, there has been offered a method which, on the basis of the developed mathematical model and Geography Information System technology, allows modeling of observation in mountain terrain depending on the number and location of SCS. The developed software module allows: 1) to generate the investigated terrain based on Digital Terrain Elevation Data file, 2) to input the possible observation points and the controlled zone via an interface, 3) to simulate and visualize the observed areas for both single and group observation devices located in the possible observation points. The developed method had been applied to one of the selected terrains of the Azerbaijan Republic and demonstrated efficiency of the offered method. Based on the developed model and GIS technology the visual modeling in mountain terrain depending on a number and a location of the SCS has been carried out.

Keywords: modelling; observation; mathematical model; supervisory system; software module.

Introduction

The various types of electron-optical supervisory control systems (SCS) have been used in the border stations of border zones or/and in the Armed Forces of many advanced countries. The mission of these SCS is to supervise day and night the possible activities of smugglers, the illegal movement of enemy troops, technics and weapon systems, frontier intruders with high precision a great and middle distance [1,2,3].

With the goal of optimal SCS deployment in mountain terrain by using the digital altitude model of terrain the views held analysis is possible to carry out [4]. This views held analysis helps to select optimal points (posts) on the terrain. The SCS optimal deployment in mountain terrain makes the possibility to use rationally SCS number because SCS has very much costs. Using the rationally SCS number we can reduce the necessity of the specialist number. Also, it accelerates the commander's correct decision making. The correct SCS deployment makes possibilities to take into account during monitoring such dead zones as runways or ravines. The correct SCS's posts selection increases the visible areas and, at the same time, decreases invisible areas. The correct post's points and rational number deployment help to observe and to detect many targets and movements on the terrain. Also, it helps us to reveal and to prevent enemy subversive actions.

Taking into account above, in [5–7] papers the mathematical model of the rational deployment of technical observing systems in mountainous terrain has been developed and offered. The determination method of visibility level between selected terrain points has been developed. The assessment criterion of rationally deployment and the algorithm of the fast solution have been offered. For task solution the below method has been offered:

1) it is offered a net of terrain, the net point junctions are heights of the terrain;

2) it is adopted that around of each height all point junctions are a SCS deployment set;

3) we determine the visible and invisible point's sets for each selected SCS deployment point;

From the set of the deployment point junctions, the deployment points were selected for minimal SCS number determined maximum visible zones.

In the presented paper, the task of development of the software module has been formulated and solved on the basis of the developed mathematical model and Geography Information System technology. The developed software module allows:

- to generate investigated terrain based on Digital Terrain Elevation Data (DTED) file;
- to input the possible observation points and the controlled zone via the interface;
- to simulate and visualize observed areas for both single and group observation devices located in possible observation points.

Methods. Mathematical model of deployment of the electroptıcal supervısory systems

Early, the mathematical model of the rational deployment of electron-optical SCS in mountain terrain has been developed and offered [5,6,7]. The determination method of visibility level between selected terrain points has been developed. The assessment criterion of rationally deployment and the algorithm of the fast solution have been offered.

The optimal deployment of SCS on terrain is one of the important tasks of military reconnaissance. Such a task has its own specific character and can be solved

© Bayramov A. A., Sabziev E. N., Nasibov Y. A., 2020

by the application of appropriate mathematical methods. The specific character of such tasks is that the necessity for continuing surveillance and control objects can be located in specific zones of terrain (for example, in canyons, along with rivers, etc.). Accessible places of SCS set are situated on some distance from these zones. The number of SCS is limited, therefore, it is impossible to distribute theirs on all set points. Therefore, it is necessary to select such SCS set points that the zone observation range would be the largest.

In the paper, the task of optimal SCS deployment in mountain terrain has been considered by using the digital altitude model and knots of the regular net of terrain. Neighbor's points are connected by straight lines, and as a result, the 3D digital vector model of relief of the terrain is generated. These segments are called relief lines and their projections on the side plane are called edges.

Let the searching terrain's zones are known and connected to knots. Let us consider that the possible knots of SCS installation are marked. It is obvious, in the range of each observation place the most suitable observation point can be selected. For example, if the observation of the nearest lowland is a priority then the observation point can be placed nearer to observed points. However, if the observation of far lowland is priority then the observation point can be placed at the highest point, etc. Therefore, we can adopt that the observation set of points is grouped around of N separate high-altitude knots. Let them are called initial knots. In real conditions usually $N \leq 10$.

It is required to deploy n ($n < N$) SCS on the terrain that they would provide the maximum observation zone. Not intersection the line segment connecting A and B points on the relief plane is condition of visibility B point from A point. That is if AB segment is placed above all incidental edges then B point is seen from A point.

The next method to solution this task is offered:

- Development of $\wp$ procedure for each other visibility checkup of two given knots;
- By application of $\wp$ procedure for each A knot from the set of possible SCS deployment places to determine the set of visible and invisible points in the range of technics possibilities of SCS;
- Assessment of visibility level of zone and determination of the most suitable SCS deployment in the set of initial knots;
- Improvement of the computed solution by variation of knots in the range of group.

Let denote the set of points of under obligatory observation terrain zones by V_0. As stated above, the observation set of points will be grouped around separate altitude knots of A_m (m=1,2,…,N), which are taken as initial knots. Let V_m are set of knots, which can be observed from A_m knot in the case of ideal flat relief, the ranges of which only are depended on technical characteristics of observation devices. By use $\wp$ procedure for each initial knot of A_m we will get $U_m \subseteq V_m$ sets. As the assessment criterion of zone observation range for the task of SCS deployment such a way that to embrace the widest zone observation, we can take a following:

$$\Im(m_1, m_2, ..., m_n) = mes\left(V_0 \setminus \bigcup_{k=1}^{n} U_{m_k}\right) \to \min .$$

Thus, first of all, by application of $\wp$ procedure all sets included in functional are described. Then, by the method of $m_1, m_2, ..., m_n$ exhaustion, $\Im$ is calculated and the most suitable is determined. Further, by varying knots in the range of $m_1, m_2, ..., m_n$ groups we can improve the obtained solution.

It is obvious, that from the point of view of mathematics it is possible to prove that in common case such an algorithm not leads to an optimal solution. However, in practice such a solution is satisfactory. Therefore, this solution is called rationally.

Experiments

One area in the mountain terrain of the Azerbaijan Republic was taken as an investigated zone. The mountain terrain is higher than the surrounding zones. The absolute height of such areas is more than 500 m. The mountain terrain has a complex and diverse colored relief, a characteristic nature. The mountains, steep slopes of the mountain chain and narrow canyons are the main relief forms of this area. The characteristic features of mountain terrain are input-output and difficult relief, the poor road network and few settlements, varying level and rapid flow rivers, diversity of climate, stone land. The mountainous terrain is closed and split area.

The combat operations in mountain terrain demand especial combat training, a detailed and maximum precise evaluation of the condition. The level of cross-country ability of mountain roads is depended on the season. In winter the roads are covered by snow and ice. The difficult relief of mountain area leads to form the unobservable zones. It makes a worse condition for observation and fire, but it provides conditions for security deployment and movement of troops, fortification construction, masking and easing antitank defense. Depending on the absolute height the mountain terrains are low (500÷1000 m), medium (1000÷2000 m) and high (> 2000 m).

For investigations, the topographic maps with 1:50000 scale had been used. First of all, by using of ESRI company ArcGIS program package and Global Mapper software [8,9] the DTED [10] format of terrain has been obtained. Then, for the purpose of investigation of observation conditions of terrain, the program module has been developed in Delphi package. Purposely construction of the model and algorithms testing, there had been had below:

- the investigated zone had 5.5 km x 5.5 km area;
- WGS84 coordinate system was taken [11, 12];
- in the investigated zone (x, y, h) coordinates of 21 483 points were measured;
- the distance between knots of regular graticule of the (x, y) coordinate was 115 m;
- the maximum height was 1730 m, the minimum height was 920 m.

Results and discusions

The models of terrain have been made at three steps: data obtaining, developing and models making. At the step of data obtaining, for the purpose of the showing possibility of the topography surface with any precision, the local topographic contours on the topographic maps of the investigated area have been digitized in ArcGIS 10.4 program software of ESRI company (Fig. 1).

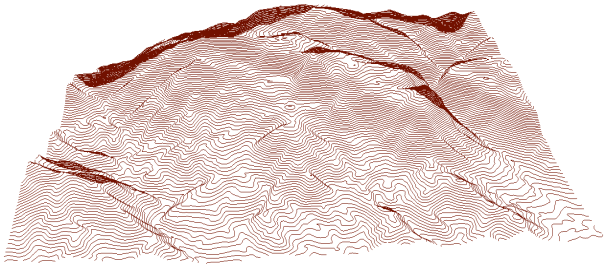


Fig. 1. Digitized topographic contours

The height difference between the topographic contours is 10 m. Then, by using ArcGIS 10.4 program software on the topographic contours at every 50 m one point had been indicated. As a result of this, 21 483 points had been obtained. The values of rectangular (x,y) coordinates of obtained points had been calculated.

One of the tasks of observation system organization on the terrain is an optimal number of observation devices and the correct choice of their deployment. As it was indicated above, in [7] the mathematical model for determination the visible zone of terrain from the given point based on the relief map in DTED format was offered [10,13]. DTED file is the value of heights of terrain relief and is set in the knots of the regular rectangular graticule. Such a format is suitable for visualization on the computer screen by using various software. For instance, the generated shape of the above-indicated area of terrain (see fig. 1) by Excel program is presented in Fig. 2.

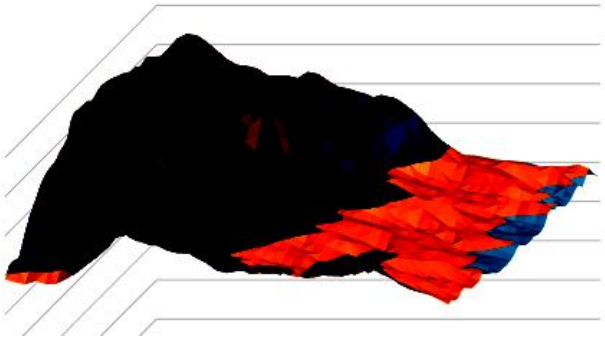


Fig. 2. Investigated area heights classification. Visualization terrain by Excel program

However, it should be noted that in such kind realization of the offered model demands many computational resources in the case of numerous data value. On the other side, the percentage evaluation of the area of observation zone by supervisory devices towards all controlled zone formulated in [7], it is not an adequate extent of task solution. Due to security, it is conditional on demand of the view of some "continuous line" along the whole length of the observation zone. So, the sufficient reasons are raised for the development of the software module, which allows the commander to calculate a view zone both for single observation's device allocated in the suitable observation point and for the group of devices. At this time, the commander chooses more suitable versions.

So, the task of development of such a software module have been postulated for:

- generation investigated zones on the basis of DTED data file;
- input the possible observation points and controlled zone via the interface;
- visualization view zone both for the single and for group (one, two, etc.) observation devices allocated in the suitable observation points.

By using this software module, the commander can choose more suitable versions for the allocation task solution. Such a software module had been developed with the above-indicated characteristics. The functional block-chart is presented in fig. 3.

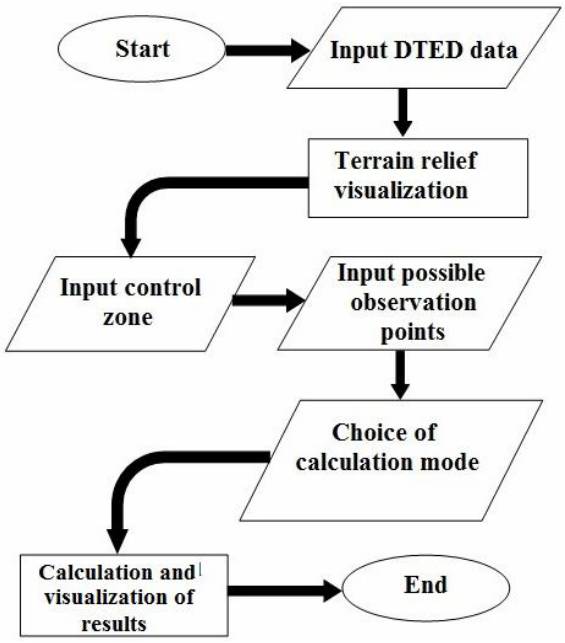


Fig. 3. A software module block-chart

Using this software module, the relief map of the terrain, shown in Fig. 1 and 2, is presented in Fig. 4. In accordance with the indicated size of terrain, the relief is presented by 45x45 squares painted by colors of the middle height. There are six colors in these figures, each of them include the alternate fields with height difference of 135 m. It is obvious, in depending on necessary precision, other parameters of detailing relief can be chosen.

The simulation program had been written on the Turbo-Pascal programming language in the Delphi package. Let us demonstrate the operation of a software module of the developed program. The electron-optical supervisory systems (devices) were put in points 1 and 2 (Fig. 5). There have been carried out the investigation and analyzing of the calculated visible zones (blue

color) from the view of selected point 1, from point 2 and from jointly 1 and 2 (Fig. 5). There is the more dark color the higher mountain terrain in Fig. 5.

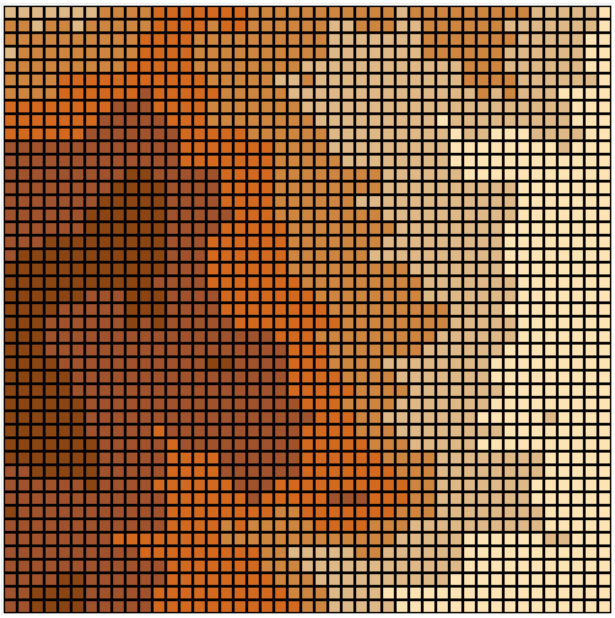


Fig. 4. A relief map of terrain

From an analysis of simulated images on Fig. 5 (a, b, c), it can be concluded that:

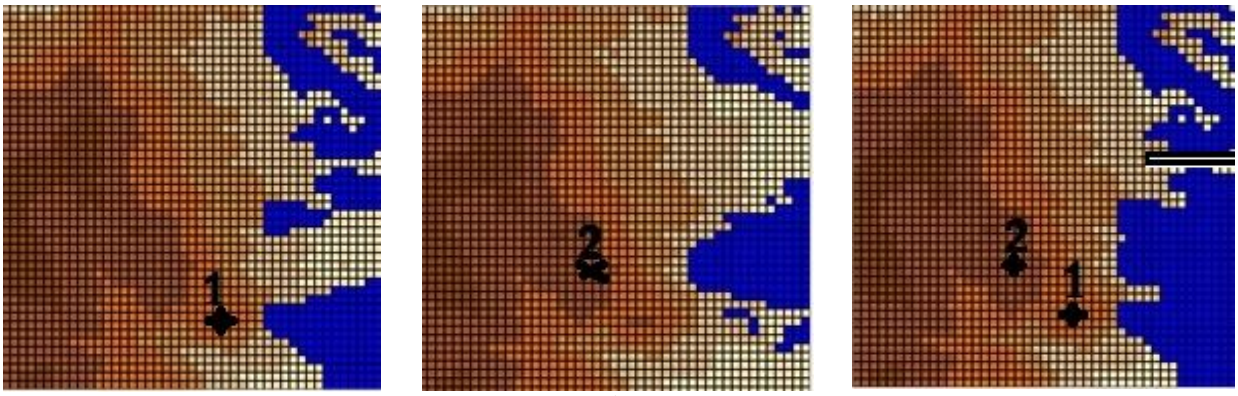
- the areas of visible zones are differed depending on the selection of viewpoint;
- the higher mountain terrain does not create a possibility of more area of the visible zone;
- even simulate observation from two selected viewpoints, then there is an invisible strip area on the terrain.
- if there are several viewpoints (electron-optical supervisory systems), there is some area of the invisible zone.

So, it can be concluded that when even the several electron-optical supervisory systems are used, then in all of the same cases there is an invisible zone, where the enemy can cross the border (frontier). In this case, there appear to be sufficient reasons for the use of Unmanned Aerial Vehicle for controlling (monitoring) invisible zones.

Conclusions

Thus, by analysis of obtained results, the next conclusions can be made:

- based on the developed model and GIS technology there has been carried out visual modeling in mountain terrain depending on a number and a location of the electron-optical supervisory systems;
- the developed software module allows visually analyze of developed mountain terrain and find the hidden zones from viewpoints;



a b c

Fig. 5. Visible zones (blue color) from the view of point 1 (a), from point 2 (b) and from jointly points 1 and 2 (c) – crosses; Tthe black strip in fig. 5, c is invisible zone

- the developed method allows efficiently to investigate the dependence of hidden zones area on a number and a location points of the electron-optical supervisory systems;
- by using the given method it can be to determine exactly a minimum number of electron-optical devices that to carry out observation for maximum area zones for given mountain terrain.

REFERENCES

1. Merlin, A.S. and Savitha, S.R., (2014), **"**Smart Distribution Automation using Supervisory Control and Data Acquisition with Advanced Metering Infrastructure and GPRS Technology", *International Journal of Engineering Research and General Science*, Vol. *2*(5), pp. 191-197.
2. (2014), *Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) Systems*, Technical Information Bulletin 04-1, Office of the manager national communications system, 76 p.
3. Radevich, V.A. (2014), *Military geoinformation systems*, Republic Conference, Proceeding materials, 24 April 2014, BSU, Minsk, 65 p.
4. Nasibov, Y.A. (2014), "Geoinformation system, application areas and benefits", *Herbi Bilik Journal*, Baku, Vol. 4, pp. 18-26.
5. Sabziev, E.N., Bayramov, A.A. and Nasibov, Y.A., (2018), "Modeling of the optimal deployment of technical observing systems in mountainous terrain", *Materials of International Scientific Conference "Modern Problems of Mathematical Modeling, Computational Methods and Information Technologies"*, Rivne, Ukraine, 02 - 04 March 2018, pp. 20-21.

6. Bayramov, A.A., Sabziev, E.N. and Nasibov, Y.A (2018), "The model of the rationally deployment of observing systems", *Proc. of Annual Conference "Modern security and defense problems"*, War College after "Georgi Rakovski", II part. Sofia, Bulgaria, 17–18 May 2018, pp. 156-159.
7. Nasibov, Y.A., Bayramov, A.A., Sabziev, E.N. and Hashimov, E.G. (2019), "Modeling of the rationally deployment of observing systems", *Advanced İnformation Systems*, Vol. 3, No. 2, pp. 10-13, DOI: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.2.02
8. (2018), *Spatial analysis*, available from http://www.esri.com/software/arcgis/extensions/spatialanalyst
9. (2018), *Global-mapper software*, available from http://www.bluemarblegeo.com/products/global-mapper.php
10. Jarvis, A., Reuter, H.I., Nelson, A. and Guevara, E. (2008), *Hole-filled SRTM for the globe Version 4*, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database.
11. Kaftan, V.I. (2008), "Coordinate systems and reference system in geodesy, geoinfornatic and bavigation", *GEOPROFI*, Vol. 3, pp. 60-63.
12. Boucher, C. and Altamimi, Z. (2001), "PZ–90 and WGS–84: current realizations and the related transformation parameters", *Journal of Geodesy*, Vol. 75, pp. 613-619.
13. Reuter, H.I, Nelson, A. and Jarvis, A. (2007), "Evaluation methods of void filling interpolation for SRTM data", *International Journal of Geographic Information Science*, Vol. 21(9), pp. 983-1008.

Received (Надійшла) 23.01.2020
Accepted for publication (Прийнята до друку) 08.04.2020

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Байрамов Азад Агалар огли – доктор фізико-математичних наук, професор, професор-консультант, Військова Академія Збройних Сил Азербайджанської Республіки; Інститут систем управління Азербайджанської національної академії наук, Баку, Азербайджан;
Azad Agalar oğlu Bayramov – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, National War College of Armed Forces of the Azerbaijan Republic; Control Systems Institute of the Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan;
e-mail: azad.bayramov@yahoo.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-6672-2338

Сабзієв Ельхан Наріман оглу – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Інститут систем управління Національної академії наук Азербайджану, Баку, Азербайджан,
Elhan Nariman oglu Sabziev – Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Institute of Control Systems of Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan;
e-mail: elkhan.sabziev@gmail.com, ORCID ID: http://orcid.org/0000-0001-8150-9439

Насібов Яшар Алі огли – науковий співробітник, Інститут географії Національної академії наук, Баку, Азербайджан;
Yashar Ali ogly Nasibov – research fellow, Geography Institute of Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan;
e-mail: yasharnasibli@yahoo.com, ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-8749-6154

Моделювання огляду в гірській місцевості в залежності від кількості систем спостереження

А. А. Байрамов, Е. Н. Сабзієв, Я. А. Насібов

Анотація. Різні види електронно-оптичних систем (ЕОС) використовуються Збройними Силами в прикордонних зонах різних країн. Призначення цих ЕОС полягає в спостереженні за можливою активністю контрабандистів, нелегальними пересуваннями військ, техніки і систем озброєння противника, порушників кордону. У статті пропонується метод, який на основі математичного моделювання і технології Географічної Інформаційної Системи дозволяє моделювати огляд спостереження в гірській місцевості в залежності від кількості та місця розташування ЕОС. Розроблений програмний модуль дозволяє: 1) генерувати досліджувану ділянку на основі Digital Terrain Elevation Data file, 2) вводити через інтерфейс можливі точки огляду і контрольовану зону, 3) симулювати і імітувати області спостереження для одиночних і групових пристроїв спостереження, розміщених в можливих точках спостереження. Розроблений метод застосований на обраній місцевості Азербайджанської Республіки і показав ефективність даного методу. На основі розробленої моделі і технології ГІС проведено візуальне моделювання в гірській місцевості в залежності від кількості та розташування ЕОС.

Ключові слова: моделювання; спостереження; математична модель; система спостереження; програмний модуль.

Моделирование обзора в горной местности в зависимости от числа систем наблюдения

А. А. Байрамов, Э. Н. Сабзиев, Я. А. Насибов

Аннотация. Различные виды электронно-оптических систем (ЭОС) используются Вооруженными Силами в пограничных зонах различных стран. Предназначение этих ЭОС заключается в наблюдении за возможной активностью контрабандистов, нелегальными передвижениями войск, техники и систем вооружения противника, нарушителей границы. В статье предлагается метод, который на основе математического моделирования и технологии Географической Информационной Системы позволяет моделировать обзор наблюдения в горной местности в зависимости от числа и места расположения ЭОС. Разработанный программный модуль позволяет: 1) генерировать исследуемый участок на основе Digital Terrain Elevation Data file, 2) вводить через интерфейс возможные точки обзора и контролируемую зону, 3) симулировать и имитировать области наблюдения для одиночных и групповых устройств наблюдения, размещенных в возможных точках наблюдения. Разработанный метод применен на выбранной местности Азербайджанской Республики и показал эффективность данного метода. На основе разработанной модели и технологии ГИС проведено визуальное моделирование в горной местности в зависимости от числа и расположения ЭОС.

Ключевые слова: моделирование; наблюдение; математическая модель; система наблюдения; программный модуль.

UDC 629.735:621.396.69:519.876.5 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.2.07**

S. Haievskyi[1], S. Hmelevskyi[2], A. Boyko[3], T. Myschenko[4], O. Timochko[5]

[1] Flight Academy of the National Aviation University, Kropyvnytskyi, Ukraine
[2] I. Kozhedub Kharkiv National University of the Air Force, Kharkiv, Ukraine
[3] Military unit A3544, Kropyvnytskyi, Ukraine
[4] Military unit A2171, Odesa, Ukraine
[5] Company "Kreditech", Hamburg, Germany

MATHEMATICAL MODELS OF THE FAILURE FLOW OF THE AIRCRAFT ELECTRONIC SYSTEM COMPONENTS

Abstract. The subject of the article is the process of functioning of the modern aircraft electronic system, its components and functional units as an object of mathematical model. **The purpose** is to analyze an existing mathematical apparatus, which is used to calculate the failure flow of the plane radio-electronic system and opportunities for its improvement. **Tasks:** to build mathematical models of the failure flow of components, functional units and the plane radio-electronic system as a whole with an unlimited number of recoveries with different depth of resource recovery. The analyzed **methods** are: parametric methods and probabilistic methods for assessment failureless. The **results** obtained: mathematical models of the failure flow of the circuit positions of the aircraft electronic system were developed. **Conclusions.** A generalization of the well-known mathematical models of the failure flow with an unlimited number of minimum restorations of finite duration is obtained as a result of consideration of mathematical models of the failure flow of the circuit positions of the plane radio-electronic system.

Keywords: residual resource, airplane; mathematical model; failure flow; aircraft electronic system; technical condition; circuit position.

Introduction

Formulation of the problem in general. Scientific and technological progress has led to the improvement of the element base, a significant change in the nature of the operation and maintenance of the modern aircraft electronic systems (AES).

Microelectronic components are the basis of modern avionics. Digital technologies with a high degree of integration make it difficult to use the existing scientific and methodological apparatus for assessing AES failures. The reason for this is the production of rough and overvalued forecasts of the failureless of the aircraft electronic system. These facts necessitate a critical analysis of well-known models for assessing failures and calculating the indicators of the residual resource of aircraft electronic system and its components.

The purpose of the analysis is to assess the residual resource and to extend the assigned time life while maintaining appropriate performance indicators [1].

Analysis of the References. Currently, the introduction of modern element base into radio-electronic equipment is not fully taken into account [2–6].

The widespread use of microelectronic components leads to dramatic changes in the failure flow in electronic systems.

Known mathematical models for assessing the reliability and failureless do not allow to obtain adequate results [5-12].

Accordingly, it is necessary to improve the existing scientific and methodological apparatus used to simulate the failure flow (failureless) of circuit positions (components, functional units and systems) of the aircraft radio-electronic system.

The aim of the article is to develop mathematical models of the failure flow of the circuit positions of the plane radio-electronic system.

Main part

Mathematical models of the failure flow of the aircraft's AES components with an unlimited number of recoveries of different depths. In the general case, in the restored object, the replacement of the failed element is made by serviceable elements that have lost a certain technical resource. The literature [13] shows the relationship between the failure flow parameter and the distribution density of the time between failures for the case of an unlimited number of full recoveries. The failure flow parameter with an unlimited number of full recoveries is most fully investigated in the monograph [14]. In [15], the dependence of the failure flow parameter on the density of the distribution of the time between failures with an unlimited number of minimum recoveries was obtained. For this case, it has been shown analytically and experimentally confirmed that the failure flow parameter coincides with the failure intensity [16]. In the case of complete recoveries, the integral equation obtained in [8] follows from the integral equation obtained in [14]. Naturally, both assumptions about the state of replacement elements before they are used are extreme. They can serve to find the lower and upper bounds on the reliability estimates of elements and systems. For long-term operation, these boundaries are quite wide and, therefore, the accuracy of calculating reliability indicators is low.

Following [16], we obtain an expression for the failure flow parameter when replacement elements have spent a certain technical resource.

Let the elements of certain circuit positions (main) are in the mode ε; replacement elements (spare) are in the mode ε_p. Then the conditional probability of failure-free operation of the replaced (restored) element during the time $t-\tau$ in the mode ε, provided that the

© Haievskyi S., Hmelevskyi S., Boyko A., Myschenko T., Timochko O., 2020

element is in the mode ε_p for replacement and has not failed for the time τ, can be written as:

$$P_в = \left(t-\tau, \varepsilon/\tau, \varepsilon_p\right) = \\ = P\left(t-\tau+x(\tau), \varepsilon\right)/P\left(x(\tau), \varepsilon\right), \quad (1)$$

where $x(\tau)$ is the operating time of the element in the mode ε, equivalent to its operating time τ in the mode ε_p, provided that the resources they spent in these modes are the same (or $x(\tau)$ is the value of the spent resource of the element in the mode ε).

Relation (1) is correct if the failureless of the replacement elements after setting them in the mode ε does not depend on how the resource was spent, but depends only on the amount of the spent resource in the past. Physically, this means that in the materials of the elements there were no qualitative changes in the properties when working in the modes ε and ε_p.

Note that the value $x(\tau)$ can be found from the condition of equal resources in accordance with the Sedyakin principle (or other principles known in the scientific and technical literature)

$$\int_0^{x(\tau)} \lambda(z, \varepsilon)\, dz = \int_0^{\tau} \lambda\left(z, \varepsilon_p\right) dz .$$

We find the conditional distribution density of the operating time of the element to failure, taking the derivative according to t the expression (1):

$$f_в\left(t-\tau, \varepsilon/\tau, \varepsilon_p\right) = f\left(t-\tau, +x(\tau), \varepsilon\right)/P\left(x(\tau), \varepsilon\right). \quad (2)$$

Then, substituting the found distribution density in the Volterra equation, we obtain:

$$\omega(t) = f(t, \varepsilon) + \int_0^t \frac{f\left(t-\tau+x(\tau), \varepsilon\right)}{P\left(x(\tau), \varepsilon\right)} \omega(\tau)\, d\tau . \quad (3)$$

We now consider individual cases that follow from (3).

1. A case of complete recovery, that is, the replacement of failed elements is carried out by new ones. Then $x(\tau) = 0$; $P\left(x(\tau), \varepsilon\right) = 1$, and from (3) follows the well-known formula:

$$\omega_1(t) = f(t, \varepsilon) + \int_0^t f(t-\tau, \varepsilon)\, \omega_1(\tau)\, d\tau . \quad (4)$$

2. The case of minimal updates, that is, the replacement of failed elements is carried out by workable elements that have developed the same resource as the main elements. Then $x(\tau) = \tau$, $P\left(x(\tau), \varepsilon\right) = P(\tau)$ and from (3) the integral equation follows

$$\omega_2(t) = f(t)\left[1 + \int_0^t \frac{\omega_2(\tau)}{P(\tau)} d\tau\right]. \quad (5)$$

We now prove that (5) implies the equality

$$\omega_2(t) = \lambda(t), \quad (6)$$

that is, the failure flow parameter with minimal recovery is equal to the failure rate.

Equality (6) is obtained by differentiating expression (5) by t:

$$\omega_2'(t) = f'(t) + f'(t) \int_0^t \frac{\omega_2(\tau)}{P(\tau)} d\tau + f(t) \frac{\omega_2(\tau)}{P(\tau)} . \quad (7)$$

It follows from (5) that

$$\int_0^t \frac{\omega_2(\tau)}{P(t)} = \frac{\omega_2(t)}{f(t)} - 1 . \quad (8)$$

Substituting (8) into (7), we obtain

$$\omega_2'(t) - \left(\lambda'(t)/\lambda(t)\right) \cdot \omega_2(t) = 0 .$$

The solution of this homogeneous differential equation has the form:

$$\omega_2(t) = c\lambda(t) .$$

The integration constant is as follows. From equation (8) and the obvious

$$\lambda(0) = f(0)/P(0) = f(0)$$

it follows

$$\omega_2(0) = f(0) = \lambda(0) = c\lambda(0),$$

that is $c = 1$. So, $\omega_2(t) = \lambda(t)$.

We examined the case of instantaneous recovery. With non-instantaneous incomplete recovery, it can be shown that the following relation holds for the failure flow parameter:

$$\omega_2(t) = f(t) + \\ + \int_0^t \omega(\tau) \int_0^{t-\tau} \frac{g(\eta) f\left(t-\tau-\eta+x(t+\eta)\right)}{P\left(x(\tau+\eta)\right)} d\eta\, d\tau , \quad (9)$$

where $g(t)$ is the density of the distribution of the recovery time of the failed element.

We consider individual cases for non-instantaneous incomplete recovery arising from (9).

1. The case of complete recovery. Then $x(\tau+\eta) = 0$; $P\left(x(\tau+\eta)\right) = P(\tau+\eta)$ and from (9) follows:

$$\omega_1(t) = f(t) + \int_0^t \omega_1(\tau) \int_0^{t-\tau} g(\eta) f(t-\tau-\eta)\, d\eta\, d\tau . \quad (10)$$

2. The case of minimal recoveries. The case of minimal updates. Then

$$x(\tau+\eta) = (\tau+\eta); \; P\left(x(\tau+\eta)\right) = 1$$

and from (9) follows:

$$\omega_2(t) = f(t) \cdot \left[1 + \int_0^t \omega_2(\tau) \int_0^{t-\tau} \frac{g(\eta)}{P(\tau+\eta)} d\eta\, d\tau\right]. \quad (11)$$

In [14], for the exponential law of the distribution of the recovery time $g(\eta) = \mu e^{-\mu\eta}$, the following expression was obtained for the failure flow parameter:

$$\omega_2(t)=\lambda(t)\exp\left\{-\int_0^t\left[\lambda(z)+\mu\right]dz\right\}\times \times\left[1+\mu\int_0^t\exp\left\{\int_0^z\left[\lambda(x)+\mu\right]dx\right\}dz\right]. \quad (12)$$

Note that with the exponential law of the distribution of the time between failures, equation (4) coincides with equation (5), and equation (10) coincides with equation (11). In this case, with instantaneous recovery $\omega_1(t)=\omega_2(t)=\lambda$ and

$$\omega_1(t)=\omega_2(t)=\lambda\left(\frac{\mu}{\lambda+\mu}+\frac{\lambda}{\lambda+\mu}e^{-(\lambda+\mu)t}\right) \quad (13)$$

with non-instantaneous recovery.

At an exponential distribution density of the recovery time, the expression in parentheses is an unsteady availability factor $K_г(t)$. It is obtained under the condition that at the time $t=0$ the element is operational, that is at $K_г(0)=1$. From formula (13) it can be seen that the parameter of the failure flow at the moment is

$$\omega_1(t)=\lambda K_г(t) \quad (14)$$

failure rate multiplied by the probability that the element is in a working condition at a given time t.

From (14) find the stationary value $\omega_1(t)$

$$\lim_{n\to\infty}\omega_1(t)=\lambda K_г,$$

that is, with the exponential laws of the distribution of uptime and recovery time, the failure flow parameter decreases from the value $\omega_1(0)=\lambda$ and tends to a constant value equal to $\lambda K_г$. Moreover, the longer the average recovery time, the smaller the value of the failure flow parameter. This is due to the fact that when restoring the device, the element to be replaced does not function and does not consume its resource. The effect of reducing the total operating time of an element for a fixed time is created.

Now we obtain a generalization of the result (12) for the case when the law of distribution of the recovery time differs from the exponential one and is characterized by the recovery intensity $\mu(t)$. In this case, the elements at a time $t=0$ are in working condition with probability γ. If the element is in an operational state at the moment t, then its failure-free operation is characterized by the failure rate $\lambda(t)$ and does not depend on the number of failures that occurred before the time t, and the length of time since the last recovery. The behavior of such an element in the device can be described by the following system of differential equations

$$\left.\begin{aligned}P_0'(t)&=-\lambda(t)P_0(t)+\mu(t)P_1(t),\\ P_1'(t)&=\lambda(t)P_0(t)-\mu(t)P_1(t),\end{aligned}\right\}, \quad (15)$$

where $P_0(t)$, $P_1(t)$ are the probabilities of finding an element, respectively, in a working and non-working states. The solution to this system, taking into account the normalization condition $P_0(t)+P_1(t)=1$ and the initial condition $P_0(t)=\gamma$, is

$$K_г(t)=P_0(t)=e^{-F(t)}\left\{\gamma+\int_0^t\mu(z)e^{F(z)}dz\right\}, \quad (16)$$

where

$$F(t)=\int_0^t\left\{\lambda(z)+\mu(z)\right\}dz. \quad (17)$$

Then the element failure flow parameter will be found as the multiplication of the element failure rate at the moment t and the unsteady availability factor, namely

$$\omega_2(t)=\lambda(t)K_г(t). \quad (18)$$

Relations (16)–(18) are a generalization of previously considered models with non-instantaneous recovery. So, in particular, result (12) is a special case from (16)–(18) when substituting the recovery intensities $\mu(t)=\mu$ in them for the exponential distribution density and the initial condition $K_г(0)=\gamma=1$, and result (13) – when substituting $\lambda(t)=\lambda$, $\mu(t)=\mu$, and $\gamma=1$.

Thus, various mathematical models of the failure flow of renewable elements with an unlimited number of instantaneous and finite recovery times with different resource recovery depths are considered. A generalized failure flow model with incomplete recoveries is obtained. Failure flow models with full and minimum recoveries arising from a model with incomplete recoveries, as special cases under the appropriate conditions in which replacement elements are located.

A more general expression is obtained for the failure flow parameter with minimal non-instantaneous updates than previously known.

Failure flow models with full and minimal recoveries can be used to calculate the upper and lower estimates of the real reliability of the systems depending on the nature of the restoration. So, if in the process of system recovery most of the elements are replaced with new ones, then models with full restorations are used. If during the restoration only a single defective element or any functional unit (PV) or part of a functional system (FS) is replaced by a working one that has the same operating time as the replaced element, then it is acceptable to use models with minimal recovery. However, for solving problems investigating the long-term operation of systems, such boundaries are wide enough, and the accuracy of estimating the parameter of the failure flow may be low. In this case, models with incomplete restorations must be used.

The considered mathematical models of the flow of failures should be used in assessing the reliability indicators of devices according to the failure statistics of recovered systems. From the failure statistics, you can get direct values of the failure flow parameter ω(t). After that, knowing the nature of system recoveries during operation and using appropriate models with

minimal, incomplete, or full recoveries, one can obtain estimates of the failure rate $\lambda(t)$, or distribution density of duration of failure-free operation.

Mathematical models of the failure flow of AES components with a limited number of restorations of different depths. The vast majority of the circuit positions of the AES during the designated service life does not fail. A significant part of the elements fails one to two times, an even smaller part - three to four times, etc. [17]. Replacing a failed (defective) component of a specific circuit position of the AES can be carried out by a new component, recovered component or component, which has spent part of its resource. Therefore, it is necessary to develop models of failure flows with a limited number of recoveries (replacements) and different depths of the recovered resource. As in the case of an unlimited number of recoveries, we first consider mathematical models of the failure flow with a limited number of instantaneous recoveries, and then models with a limited number of non-instantaneous recoveries.

Mathematical model of the failure flow of a component circuit position with a finite number of complete instantaneous restorations.

The recovery theory shows that the failure flow parameter of an element with complete recoveries is characterized by a series

$$\omega_1(t) = \sum_{k=1}^{\infty} f_k(t), \qquad (19)$$

where $f_k(t)$ is the density of the distribution of the value of the component operating time to k-th failure $x_k = \sum_{i=1}^{k} \xi_i$, $k \geq 1$; ξ_i is random of component operation after $(i-1)$-th recovery.

In the case of complete recoveries, the distribution density of the value $x_k(t)$ is as k-multiple convolution of the density of random variables ξ_i:

$$f_k(t) = f_{k-1}(t) * f_1(t).$$

The number of recoveries $n(t)$ during the assigned service life (or assigned resource) is expected to be known. It is due either to the component ultimate failure, or technical and other restrictions on the number of recoveries. With a known number of complete recoveries $n(t)$ the considered operating time, the failure flow parameter is determined by the expression

$$\omega_1(t) = \sum_{k=1}^{n(t)} f_k(t). \qquad (20)$$

So, for normal distribution

$$f_k(t) = \left(-\sqrt{2\pi k}\sigma\right)^{-1} \exp\left[-\frac{(t-kT_0)^2}{2k\sigma^2}\right]$$

and $$\omega_1(t) = \sum_{k=1}^{n(t)} \left(\sqrt{2\pi k}\sigma\right)^{-1} \exp\left[-\frac{(t-kT_0)^2}{2k\sigma^2}\right].$$

For exponential distribution

$$f_k(t) = \lambda \frac{(\lambda t)^{k-1}}{(k-1)!} e^{(-\lambda t)}$$

and $$\omega_1(t) = \sum_{k=1}^{n(t)} \lambda \frac{(\lambda t)^{k-1}}{(k-1)!} e^{(-\lambda t)}.$$

For the Erlang distribution of the m-th order

$$\omega_1(t) = \sum_{k=1}^{n(t)} \lambda \frac{(\lambda t)^{mk-1}}{(mk-1)!} e^{(-\lambda t)}.$$

Convolution calculation $f_k(t)$ is an easily feasible operation for a limited number of distributions, such as a normal, exponential, gamma distribution.

Let us now consider a mathematical model of the failure flow with a finite number of instantaneous minimum recoveries.

It is known that the process of recovery of FS AES at intervals between full resource recoveries is characterized, as a rule, minimal recoveries. At the minimum recoveries the densities of distribution of size of operating time to k-th minimum recoveries are various. Based on the fact that the density distribution of the value X_k is random, the operating time of the circuit position to the k-th minimum instantaneous recovery is determined by the expression

$$f_k^{(2)}(t) = \lambda(t) \frac{(\Lambda(t))^{k-1}}{(k-1)!} \exp\left[-\Lambda(t)\right], \qquad (21)$$

where $$\Lambda(t) = \int_0^t \lambda(x)\,dx.$$

Since the density distribution of the value of random operating time before the first failure

$$f(t) = \lambda(t) \exp\left[-\Lambda(t)\right],$$

we have $$f_k^{(2)}(t) = \frac{(\Lambda(t))^{k-1}}{(k-1)!} - f(t).$$

Then the failure flow parameter for the finite number $n(t)$ of minimum instantaneous recoveries can be found by relation (20):

$$\omega_2(t) = \sum_{k=1}^{n(t)} f_k^{(2)}(t) = f(t) \sum_{k=1}^{n(t)} \frac{\left[\Lambda(t)\right]^{k-1}}{(k-1)!}. \qquad (22)$$

Relation (22) for $n(t) \to \infty$ can be written as:

$$\omega_2(t) = \lambda(t) \exp\left[-\Lambda(t)\right] \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\left[\Lambda(t)\right]^{k-1}}{(k-1)!}. \qquad (23)$$

Note that in the case of an unlimited number of minimum recoveries for $n \to \infty$, the failure flow parameter is equal to the failure rate

$$\omega_2(t) = \lambda(t) \exp\left[-\Lambda(t)\right] \sum_{k=1}^{\infty} \left[-\Lambda(t)\right]^k / k! = \lambda(t).$$

This corresponds to the result (6) discussed above. Therefore, the correctness of the obtained result for the mathematical model of the failure flow with a finite number of instantaneous minimum recoveries is confirmed. Here are the main calculated relations for different densities of time distribution:

$$\text{a)}\ f(t)=c\left(\sqrt{2\pi}\sigma\right)^{-1}\exp\left[-(t-T_0)^2\Big/\left(2\sigma^2\right)\right];$$

$$c=\left[\Phi\left(T_0/\sigma\right)\right]^{-1}.$$

$$\lambda(t)=\left(\sqrt{2\pi}\sigma\right)^{-1}\left[\Phi\left(\frac{T_0-t}{\sigma}\right)\right]\exp\left[-\frac{(t-T_0)^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (24)$$

The calculation of the characteristic is connected with the integration of expression (24), which should be carried out by the numerical method;

$$\text{б)}\ f(t)=\lambda(\lambda t)e^{(-\lambda t)};\ \lambda(t)=\lambda\cdot\left(\lambda t/(1+\lambda t)\right).$$

Then $\Lambda(t)=\int_0^t\lambda\frac{\lambda t}{1+\lambda t}dt-\int_0^{\lambda t}\frac{\upsilon d\upsilon}{1+\upsilon}=\lambda t-\ln(1+\lambda t)$.

Using expression (20), we obtain

$$\omega_2(t)=\lambda(t)\times$$
$$\times\exp\left[-\lambda(t)\right]\sum_{k=1}^{n(t)}\left[\lambda(t)-\ln\left(1+\lambda(t)\right)\right]^{k-1}\Big/(k-1)!. \quad (25)$$

Consider a mathematical model of the failure flow with a finite number of instantaneous incomplete recoveries.

Above was introduced the concept of a complex recovery process. It is characterized by different densities of the distribution of the values of the operation before the first and between subsequent failures $f_{k-1,k}(t)$, $k=1,2,\ldots,n(t)$. The density of the distribution of operation to k-th incomplete recovery is characterized by k-th convolution

$$f_k^{(3)}(t)=f_{0,1}(t)*f_{1,2}(t)*\ldots*f_{k-1,k}(t).$$

In turn, the failure flow parameter for instantaneous incomplete recoveries is found by the ratio

$$\omega_3(t)=\sum_{k=1}^{n}f_k^{(3)}(t). \quad (26)$$

Note that when predicting the component failure flow parameter of a certain circuit position, different variants of the description of the distribution density $f_{k-1,k}(t)$ are possible. They are determined by the nature of the recoveries of the defective component, the replacement strategy and other factors.

Thus, the operating time of a certain schematic position before the first failure $f_{0,1}(t)$ can be distributed according to the normal law, and between failures – according to the Weibull distribution. Or the operating time before the first failure and between subsequent failures obey to a normal distribution with different values of mathematical expectation and standard deviation. If the operating time of the circuit position before the first failure and between subsequent failures obey the normal distribution with the parameters T_i and σ_i, then the density of time distributions to the k-th failure will look like

$$f_k^{(3)}(t)=\left(2\pi\sum_{i=1}^{k}\sigma^2\right)^{-1/2}\times$$
$$\times\exp\left\{-\left(t-\sum_{i=1}^{k}T\right)^2\Big/\left(2\sum_{i=1}^{k}\sigma^2\right)\right\}. \quad (27)$$

The derivation of expression (27) is based on the fact that the sum of normally distributed random variables obey to the normal distribution. Then the failure flow parameter with a finite number of instantaneous incomplete recoveries has the form described by the model of a complex recovery process:

$$\omega_3(t)=\sum_{k=1}^{n(t)}\left(2\pi\sum_{i=1}^{k}\sigma^2\right)^{-1/2}\times$$
$$\times\exp\left\{-\left(t-\sum_{i=1}^{k}T\right)^2\Big/\left(2\sum_{i=1}^{k}\sigma^2\right)\right\}. \quad (28)$$

From expression (28) we can obtain ratios for simple and general recovery processes as individual cases of complex.

If the operating time of a certain circuit position before the first failure and between subsequent failures are described by an exponential law with parameters λ_i, then the density distribution of the operating time k-th failure is a generalized Erlang's law of the k-th order

$$f_k^{(3)}(t)=(-l)^{k-1}\times$$
$$\times\prod_{i=1}^{k}\lambda_i\sum_{j=1}^{k}\exp(-\lambda_j t)\Big/\prod_{l=1(l\neq j)}^{k}(\lambda_j-\lambda_l). \quad (29)$$

Then the failure flow parameter with a finite number of instantaneous incomplete recoveries has the form

$$\omega_k^{(3)}(t)=\sum_{k=1}^{n(t)}(-l)^{k-1}\times$$
$$\times\prod_{i=1}^{k}\lambda_i\sum_{j=1}^{k}\exp(-\lambda_j t)\Big/\prod_{l=1(l\neq j)}^{k}(\lambda_j-\lambda_l). \quad (30)$$

Now we present models of failure flow of the circuit position with a limited number of finite duration recoveries. First, consider a mathematical model of the failure flow with a limited number of complete recoveries of finite duration.

There are the following dependencies for the failures flow of the circuit position, the duration recovery of which can not be neglected (Fig. 1):

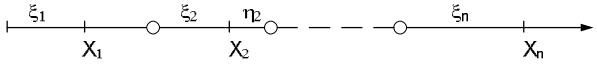


Fig. 1. Alternating process of failures (recoveries) with a limited number of recoveries

$\sum_{i=1}^{k}\sigma^2$ $X_1=\xi_1$, $X_2=\xi_1+\xi_2+\eta_1,\ldots,$ $i=1,2,\ldots,n$,

$$X_i=\sum_{l=1}^{i}\xi_l+\sum_{l=1}^{i-l}\eta_l \text{ , that is } X_i=\sum_{l=1}^{i}(\xi_l+\eta_{l-1}),$$

where $\eta_0=0$, η_l is duration of l -th full recovery.

The values ξ_i and η_i are assumed by independent random variables with distribution functions $F(t)=P(\xi_i<t)$ and $G(t)=P(\eta_i<t)$ with mathematical expectation T_o, $T_в$ and standard deviation σ_l, $\sigma_в$ with continuous densities of distribution of quantities $f(t)=F'(t)$ and $g(t)=G'(t)$.

The process defined in this way is called the recovery process with a final recovery time. You can write the following distribution functions for this process:

$$F_k(t)=P\left\{\sum_{i=1}^{k}\xi_i<t\right\};\ G_k(t)=P\left\{\sum_{i=1}^{k}\eta_i<t\right\};$$

$$\Phi_k(t)=P\{X_k<t\}$$

and their distribution density

$$f_k(t)=F_k'(t);\ g_k(t)=G_k'(t);\ \varphi_k(t)=\Phi_k'(t).$$

These distribution functions are determined by the original laws $F(t)$ and $G(t)$ as follows

$$F_k(t)=\int_0^t F_{k-l}(t-x)dF(x),\ F_l(t)=F(t),$$

$$G_k(t)=\int_0^t G_{k-l}(t-x)dG(x),\ F_l(t)=F(t),$$

$$\Phi_k(t)=\int_0^t F_k(t-x)dG_k(x).$$

Then the failure flow parameter of the circuit position with a finite number of complete non-instantaneous recoveries can be written as

$$\omega_1(t)=\sum_{k=1}^{n(t)}\varphi_k(t). \qquad (31)$$

We extend this result to the process of failure of the circuit position with a limited number of minimum recoveries of finite duration.

The failure flow of this process is characterized by the density distribution of a random variable $\sum_{i=1}^{k}\xi_i$:

$$f_k^{(2)}(t)=\frac{\left[\Lambda(t)\right]^{k-1}}{(k-1)!}f(t),$$

and the flow of recoveries by the density distribution of a random variable $\sum_{i=1}^{k}\eta_i$, $g_k(t)=G_k'(t)$.

The probability density distribution of a random variable X_k, $k=1,2,\ldots,n(t)$ is a convolution

$$\varphi_k^{(2)}(t)=f_k^{(t)}*g_k(t).$$

Then the required ratio for the failure flow parameter has the form

$$\omega_2(t)=\sum_{k=1}^{n(t)}\varphi_k^{(2)}(t). \qquad (32)$$

Similarly, it is possible to expand the mathematical model of the failure flow with the limited number of complete recoveries for the process of the circuit position failure with the limited number of incomplete recoveries of finite duration.

The failures flow of the circuit position with incomplete recoveries of finite duration is characterized by the density of distribution of random variables $\sum_{i=1}^{k}\xi_i\sim f_k^{(3)}(t)$ and $\sum_{i=1}^{k}\eta_i\sim g_k(t)$. Then the distribution density of the random variable $X_k=\sum_{l=1}^{k}(\xi_l-\eta_{l-1}),\eta_0\equiv 0$ is a k -multiply convolution:

$$\varphi_k^{(3)}(t)=f_k^{(3)}(t)*g_k(t).$$

The failures flow (recoveries) parameter of this process is calculated by the ratio

$$\omega^{(3)}(t)=\sum_{k=1}^{n(t)}\varphi_k^{(3)}(t). \qquad (33)$$

The presented rations (20), (26), (31)–(33) for calculation of failures flow parameter with limited number of recoveries of various depth are reduced to performance of operations of convolution. Convolution calculations are easy to perform for a limited number of typical random variable distributions. In the general case, the use of numerical methods is required.

The number of recoveries (or failures) $n(t)$ of components at a certain circuit position for the considered operation may be due to technical reasons, economic feasibility, safety and environmental performance requirements, the final failure. Below, we consider the estimation of the boundary number $n(t)$ of component's recoveries of a certain circuit position of AES for the assigned operating time (service life). Depending on the depth of recovery, the following options for estimating the value $n(t)$ are possible.

A. The case of complete recovery. It is known from the recovery theory that the number of failures $n(t)$ has an asymptotically normal distribution with mean $Mn(t)\approx t/T_0$ and dispersion $Dn(t)\approx\sigma^2 t/T_0$ during $t>>T_0$. The boundary number of failures (recoveries) can be selected so that

$$P\{n(t)\le n_0\}=\gamma. \qquad (34)$$

At large $t(t>>T_0)$ random variables $n(t)$ have an approximately normal distribution. Then for n_0 you can take the value $n_0=t/T_0+u_{l-\gamma}\sqrt{\sigma^2 t/T^3}$, where $u_{l-\gamma}$ is the quantile of normal distribution.

For small $t\left(t \ge T_0\right)$, or $t < T_0$ the boundary number of failures can be found from condition (34) by the method of convolutions. To do this, it is necessary to consistently find the function of the distribution of operating time to the first, second and largest number of failures to fulfill the condition (34)

B) The case of incomplete and minimal recoveries. We can assume that the function of distribution of operating time before failure belongs to the class of IIF-distributions. Recall that the distribution function $F(t)$ is called IIF-distribution, if the probability $\bar{F}(t+x)/\bar{F}(t)$ at an arbitrary constant $x \ge 0$ decreases monotonically by $t, 0 < t < \infty$. The affiliation of the distribution function to the class of IIF-distributions is equivalent to the fact that the failure flow increases monotonically. Hence the name of the distribution class with an increasing failure intensity function.

It is known from the theory of recovery [7] that if the operating distribution function belongs to the class of IIF-distributions and has a mathematical expectation T_0, then

$$P\{n(t) < n_0\} \le \sum_{i=0}^{n_0-1} \frac{(t/T_0)!}{i!} e^{-t/T_0}, t < T_0. \quad (35)$$

The estimate (35) is convenient for performing calculations, because to use it it is enough to know the mathematical expectation T_0. Another estimate for $t > 0$ IIF-distributions is the following [7]:

$$P\{n(t) < n_0\} \le \sum_{i=0}^{n_0-1} \frac{(\Lambda(t))^i}{i!} e^{-\Lambda(t)}, t > 0. \quad (36)$$

Since for each distribution function from the IIF class there is an inequality $\Lambda(t) \le t/T_0$ for $t < T_0$, inequality (36) is a more precise boundary than (35). However, this requires an estimate of the mathematical expectation of the number of failures $\Lambda(t)$.

Thus, to estimate the boundary number of failures (recoveries) due to the final failure of the corresponding component with a given probability γ, it is necessary to solve inequality (34) or (36) with respect to n_0.

Conclusions

1. Mathematical models of the failures flow of circuit positions with an unlimited number of recoveries (non-instantaneous and finite duration) at different depths of resource recovery are considered. It is shown that the failure flow models with complete or minimal recoveries follow from the model with incomplete recoveries as separate cases. A generalization of the known mathematical models of the failure flow of components with an unlimited number of minimal recoveries of finite duration is obtained.

2. Mathematical models of the failures flow of components of circuit positions with a finite number of recoveries (non-instantaneous and finite duration) of different depth during the assigned service life are considered. The expediency of their use in calculating the residual life of components and functional units of AES is shown.

3. The reliability of the developed mathematical models of failure flows of the AES components is confirmed by the correctness of the performed transformations, the coincidence of partial solutions with the known results.

REFERENCES

1. (1995), *Reliability of equipment. Methods for assessing reliability indicators according to experimental data: DSTU 3004-95*, Effective from 1995-01-25, Derzhsprozhyvstandart Ukrainy, Kyiv, 51 p.
2. Bobalo, Yu.Ya., Nedostup, L.A. and Lazko, O.V. (2007), "Analysis of methods for assessing the reliability of systems of compatible components of electronic devices", *Radio electronic and computer systems*, No 7(26), pp. 212-214.
3. Yurkov, N.K., Kochegarov, I.I. and Petryanin, D.L. (2015), "To the problem of modeling the risk of failure of electronic equipment with long-term functioning", *Caspian Journal: Management and High Technologies*, No 4(32), pp. 220-231.
4. Chernyavsky V.M. (2012), "Application of nonparametric methods for assessing the level of reliability of aircraft with low operating intensity", *Collection of scientific works of Kharkiv National University of the Air Force*, No 3 (32), pp. 59-63.
5. Kuchuk, G., Kovalenko, A., Komari, I.E., Svyrydov, A. and Kharchenko, V. (2019), "Improving big data centers energy efficiency: Traffic based model and method", *Studies in Systems, Decision and Control*", vol 171, Kharchenko, V., Kondratenko, Y., Kacprzyk, J. (Eds.), Springer Nature Switzerland AG, pp. 161-183, DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4_8
6. Kuchuk, G., Nechausov, S. and Kharchenko, V. (2015), "Two-stage optimization of resource allocation for hybrid cloud data store", *International Conference on Information and Digital Technologies*, *Zilina*, pp. 266-271, DOI: http://dx.doi.org/10.1109/DT.2015.7222982
7. Hudkov M.V. (2010), "Methods of forecasting the reliability of electronic equipment in the operation of aircraft by condition with control parameters", *Weapons systems and military equipment*, No 4(24), pp. 32-35.
8. Dobrydenko, O.M., Bologin, A.S., Khilchenko, M.F. and Belinska, R.B. (2011), "Modern methods of forecasting the technical condition of aviation equipment", *Collection of scientific works of the State Research Institute of Aviation*, No 7(14), pp. 163-167.
9. Sviridov, A., Kovalenko, A. and Kuchuk, H. (2018), "The pass-through capacity redevelopment method of net critical section based on improvement ON/OFF models of traffic", *Advanced Information Systems*, Vol. 2, No. 2, pp. 139–144, DOI: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.24
10. Kovalenko, A. and Kuchuk H. (2018), "Methods for synthesis of informational and technical structures of critical application object's control system", *Advanced Information Systems*, Vol. 2, No. 1, pp. 22–27, DOI: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04
11. Ruban, I., Kuchuk, H. and Kovalenko A. (2017), "Redistribution of base stations load in mobile communication networks", *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, No 1 (1), P. 75–81, doi : https://doi.org/10.30837/2522-9818.2017.1.075

12. Donets V., Kuchuk N., Shmatkov S. Development of software of e-learning information system synthesis modeling process. *Advanced Information Systems*, Vol. 2, No. 2, P. 117–121. DOI: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.20
13. Kashtanov, V.A. and Medvedev, A.I. (2010), "*Reliability Theory of Complex Systems*", FIZMATLIT, Moscow, 608 p.
14. Bobalo, L.A., Nedostup, Yu.Ya. and Kiselychnyk, M.D. (2013), *Quality, reliability of electronic equipment*, Lviv Polytechnic Publishing House, Lviv, 196 p.
15. Kozlov, V.A. and Ushakov, I.A. (1985), *Handbook for calculating the reliability of radio electronics and automation equipment*, Soviet Radio, Moscow, 462 p.
16. Barlow R. and Proshan F. (1985), "*Statistical theory of reliability and failure test*", Nauka, Moscow, 388 p.
17. Gaevsky, S.V., Balakireva, S.M., Komarov, D.V. and Yavtushenko, V.O. (2020), "Analysis of the electronic system of the aircraft as an object of extension of service life", *Control, navigation and communication systems*, No 1 (59), pp. 15–20.

Received (Надійшла) 23.03.2020
Accepted for publication (Прийнята до друку) 20.05.2020

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Гаєвський Сергій В`ячеславович – аспірант кафедри льотної експлуатації, аеродинаміки та динаміки польоту, Льотна академія Національного авіаційного університету, Кропивницький, Україна;
Serhii Haievskyi – graduate student of the Department of Flight Operations, Aerodynamics and Flight Dynamics, Aircraft Academy of the National Aviation University, Kropyvnytskyi, Ukraine;
e-mail: snegovik2207@ukr.net; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0003-3434-7494

Хмелевський Сергій Іванович – кандидат технічних наук, доцент, заступник начальника кафедри математичного та програмного забезпечення АСУ, Харківський національний університет Повітряних Сил, Харків, Україна;
Serhii Khmelevskiy – Candidate of technical sciences, Associate Professor, Chair Deputy of mathematical and software ACS department, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: sserg1978@ukr.net; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0001-6216-3006

Бойко Артур Васильович – заступник командира частини, військова частина А3544, Кропивницький, Україна;
Artur Boiko – deputy commander of the Military unit, Military unit A3544, Kropyvnytskyi, Ukraine;
e-mail: arthurbrook1@gmail.com; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0001-1168-9419

Мищенко Тетяна Юріївна – заступник начальника центру, військова частина А2171, Одеса, Україна;
Tatiana Mishchenko – deputy head of the center, Military unit A2171, Odesa, Ukraine;
e-mail: taniamischenko1992@gmail.com; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0001-5131-485X

Тімочко Олександр Олександрович – кандидат технічних наук, інженер з тестування програмних продуктів фірми «Kreditech», Гамбург, Німеччина;
Oleksander Timochko – Expert Quality Assurance Engeneer of Kreditech Holding, Hamburg, Germany;
e-mail: alexander.timochko@gmail.com; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0003-0424-0426.

Математичні моделі потоку відмов комплектуючих виробів радіоелектронної системи літака

С. В. Гаєвський, С.І. Хмелевський, А. В. Бойко, Т. Ю. Мищенко, О. О. Тімочко

Анотація. Предметом вивчення в статті є процеси функціонування радіоелектронної системи сучасного літака, її комплектуючих елементів та функціональних вузлів як об'єкта математичного моделювання. **Метою** є проведення аналізу існуючого математичного апарату, що застосовується для розрахунку потоку відмов та ймовірності безвідмовної роботи радіоелектронної системи літака та можливості його вдосконалення. **Завдання:** побудувати математичні моделі потоку відмов комплектуючих виробів, функціональних вузлів та радіоелектронної системи літака в цілому з необмеженим числом відновлень при різній глибині відновлення ресурсу. Аналізованими **методами** є: параметричні методи та імовірнісні методи оцінки безвідмовності роботи. Отримані такі **результати.** Розроблені математичні моделі потоку відмов схемних позицій радіоелектронної системи літака. **Висновки.** В результаті розгляду математичних моделей потоку відмов схемних позицій радіоелектронної системи літака отримано узагальнення відомих математичних моделей потоку відмов при необмеженій кількості мінімальних відновлень кінцевої тривалості.

Ключові слова: залишковий ресурс; літак; математична модель; потік відмов; радіоелектронна система; технічний стан; схемна позиція.

Математические модели потока отказов комплектующих изделий радиоэлектронной системы самолета

С. В. Гаевский, С. І. Хмелевский, А. В. Бойко, Т. Ю. Мищенко, А. А. Тимочко

Аннотация. Предметом изучения в статье являются процессы функционирования радиоэлектронной системы современного самолета, ее комплектующих элементов и функциональных узлов как объекта математического моделирования. **Целью** является анализ существующего математического аппарата, применяемого для расчета потока отказов и вероятности безотказной работы радиоэлектронной системы самолета и возможности его совершенствования. **Задачи:** построить математические модели потока отказов комплектующих изделий, функциональных узлов и радиоэлектронной системы самолета в целом с неограниченным числом обновлений при разной глубине восстановления ресурса. Анализируемыми **методами** являются**:** параметрические методы и вероятностные методы оценки безотказности работы. Получены следующие **результаты.** Разработанные математические модели потока отказов схемных позиций радиоэлектронной системы самолета. **Выводы.** Получено обобщение известных математических моделей потока отказов комплектующих изделий при неограниченном количестве минимальных обновлений конечной длительности.

Ключевые слова: остаточный ресурс; самолет; математическая модель; поток отказов; радиоэлектронная система; техническое состояние; схемная позиция.

UDC 528.1:528.4 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.2.08**

Ia. Litvinenko[1], S. Lupenko[1], P. Oniskiv[1], V. Trysnyuk[2], A. Zozulia[2]

[1] Ternopil Ivan Pulyuy National Technical University, Ternopil, Ukraine
[2] Institute of Telecommunications and Global Information Space of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

MATHEMATICAL MODEL OF RHYTHMOCARDIOSIGNAL IN VECTOR VIEW OF STATIONARY AND STATIONARY-RELATED CASE SEQUENCES

Abstract. The paper deals with the substantiation of the mathematical model of rhythmocardiogram with high resolution in the form of a vector of stationary and stationary related random processes. The structure of probabilistic characteristics of this model for analysis of cardiac rhythm in modern cardiodiagnostic systems is investigated. Analysis of the heart rhythm makes it possible to evaluate not only the state of the cardiovascular system, but also the state of the adaptive capacity of the whole human body. Most modern systems of automated heart rate analysis are based on statistical analysis by a rhythmocardiogram, which is an ordered set of durations of R-R intervals in a registered electrocardiogram. be able to explore its temporal dynamics. To take into account the temporal dynamics of the rhythmocardiogram with high resolution, it is necessary to use a mathematical apparatus of the theory of random sequences, namely, to consider it as a vector of discrete random sequences. The purpose of this work is to solve the scientific and practical task of creating a mathematical model of rhythmocardiogram with high resolution in the form of a vector of stationary and stationary related random processes. The object of the study is information technology for the diagnosis and assessment of the status of the rhythmocardiogram to analyze the heart rhythm in modern cardiac diagnostics systems. The mathematical model of rhythmocardiogram with high resolution in the form of a vector of stationary and stationary related random sequences is substantiated. The structure of probabilistic characteristics of this model for analysis of cardiac rhythm in modern cardiodiagnostic systems is investigated.

Keywords: vector of steady-state and stationary-related random sequences; electrocardiogram; rhythm; cardiac rhythm.

Introduction

Analysis of the heart rhythm makes it possible to evaluate not only the state of the cardiovascular system, but also the state of the adaptive capacity of the whole human body. Most modern systems for automated cardiac rhythm analysis are based on statistical analysis by rhythmocardiogram, which is an ordered set of durations of R-R intervals in a registered electrocardiogram [1-8]. However, this approach is uninformative, since the R-R intervals reflect only the change in the duration of the cardiac cycles and not the totality of the time intervals between single-phase values of the electrocardio signal for all its phases.

Among the many varieties of environmental impacts, dust pollution from atmospheric air, which is formed as a result of receipt from sources of emissions at industrial enterprises (primary) and by physical and chemical processes in places of storage of pulverized wastes of production (secondary), among which special finely dispersed (<100 μm) saw dust is the place of disposal

Actuality of theme

In [9, 10], a new approach to its analysis of cardiac rhythm was developed on the basis of high resolution rhythmocardiogram. As noted in these papers, the classical rhythmocardiogram is embedded in a high-resolution rhythmocardiogram, which is the basis for increasing the level of informativeness of the heart rhythm analysis in modern computer systems of functional diagnostics of the human heart state with the increased rhythmocardiogram

In [9, 10] it is justified to use a vector of random variables as a mathematical model of rhythmocardiogram with high resolution. However, this model is a relatively poor mathematical model of rhythmocardiogram with high resolution, since it does not allow to study its temporal dynamics. To take into account the temporal dynamics of the rhythmocardiogram with high resolution, it is necessary to use a mathematical apparatus of the theory of random sequences, namely, to consider it as a vector of discrete random sequences.

Purpose and tasks of the work. The purpose of this work is to solve the scientific and practical task of creating a mathematical model of rhythmocardiogram with high resolution in the form of a vector of stationary and stationary related random processes. The object of the study is information technology for the diagnosis and assessment of the status of the rhythmocardiogram to analyze the heart rhythm in modern cardiac diagnostics systems.presenting main material.

Main part

One of the simplest stochastic models that takes into account the dynamics of high resolution rhymocardial is the vector xed and stationary random sequences. In this vector, the index indicates the cycle number of the electrocardio signal, and the index indicates the reference number of the electrocardio signal within its cycle. The number of counts per cycle of the electrocardio signal determines the resolution of the rhythm cardio signal and sets the number of phases in the cycle of the electrocardio signal that can be separated by methods of segmentation and detection in solving the problem of automatic formation of the rhythm cardio signal from the electrocardio signal.

Let us now proceed to justify the probabilistic characteristics of a random sequence vector $\Xi_L(\omega', m)$. One of the simplest stochastic models that takes into account the dynamics of high resolution rhymocardial is the vector $\Xi_L(\omega', m) = \left\{ T_l(\omega', m), \omega' \in \Omega', l = \overline{1, L}, m \in \mathbf{Z} \right\}$ fixed and stationary random sequences. First of all, we note that the vector $\Xi_L(\omega', m)$ of stationary and stationary coupled random sequences, in the particular

© Litvinenko Ia., Lupenko S., Oniskiv P., Trysnyuk V., Zozulia A., 2020

case if its constituents are stationary sequences with independent values, that is, white noises given on the set of integers, is a known rhythmocardiogram signal model. in the form of a random variable vector developed in [9, 10]. However, in practice, the hypothesis of the independence or non-correlation of the rhythm cardiogram counts is not true, requiring a stochastic dependence between the rhytocardiogram counts with higher resolution, and hence the use of a more complex and general mathematical model $\Xi_L(\omega', m)$ in the form of a stationary vector.

The defining property of a vector $\Xi_L(\omega', m)$ of stationary and stationary related random sequences is the invariance of its family of distribution functions to time shifts by an arbitrary integer $k \in \mathbf{Z}$. Namely, for any order distribution function

$$F_{p_{T_{l_1}...T_{l_p}}}\left(x_1,...,x_p, m_1,...,m_p\right)$$

of the family p ($p \in \mathbf{N}$) of stationary distribution functions of stationary and stationary related random sequences, the following equality holds:

$$\begin{gathered} F_{p_{T_{l_1}...T_{l_p}}}\left(x_1,...,x_p, m_1,...,m_p\right) = \\ = F_{p_{T_{l_1}...T_{l_p}}}\left(x_1,...,x_p, m_1+k,...,m_p+k\right), \\ x_1,...,x_p \in \mathbf{R}, m_1,...,m_p \in \mathbf{Z}, \\ l_1,...,l_p \in \left\{\overline{1,L}\right\}, k \in \mathbf{Z}. \end{gathered} \quad (1)$$

Distribution function

$$F_{p_{T_{l_1}...T_{l_p}}}\left(x_1,...,x_p, m_1,...,m_p\right)$$

when $l_1 = l_2 = ... = l_p = l$ is distribution function $F_{p_{T_l}}\left(x_1,...,x_p, m_1,...,m_p\right)$, l is a distribution function $T_l(\omega', m)$, vector $\Xi_L(\omega', m)$ - auto-order distribution p of $T_l(\omega', m)$, describing the time distances between single-phase electrocardiogram readings for it l phases. In particular, if $p = 1$, then we will have one-dimensional $F_{1_{T_l}}(x, m)$ autofunction of stationary random sequence distribution $T_l(\omega', m)$.

In the case where equality $l_1 = l_2 = ... = l_p = l$ is not executed then the distribution function $F_{p_{T_{l_1}...T_{l_p}}}\left(x_1,...,x_p, m_1,...,m_p\right)$ is a compatible distribution function for several (at least two) stationary components of a vector $\Xi_L(\omega', m)$, describing the time distances between single-phase counts of an electrocardio signal generally for its various phases. The vector distribution family of functions $\Xi_L(\omega', m)$ of stationary and stationary sequences most fully describes its probabilistic structure, but the methods of statistically estimating the distribution function $F_{p_{T_{l_1}...T_{l_p}}}\left(x_1,...,x_p, m_1,...,m_p\right)$ are too cumbersome for their practical use in the computer diagnostic systems of the functional state of the cardiovascular system of the human body. Therefore, apart from the vector distribution functions. $\Xi_L(\omega', m)$ the use of momentary functions of order is effective $s = \sum_{j=1}^{p} s_j$, which, if any, are also invariant to time offsets (offsets by argument m).

Yes, if there is a mixed initial moment function $c_{s_{T_{l_1}...T_{l_p}}}\left(m_1,...,m_p\right)$ order $s = \sum_{j=1}^{p} s_j$ vector $\Xi_L(\omega', m)$ stationary and stationary random sequences, then it has equality:

$$\begin{gathered} c_{s_{T_{l_1}...T_{l_p}}}\left(m_1,...,m_p\right) = \\ = \mathbf{M}\left\{T_{l_1}^{s_1}(\omega', m_1)\cdot....\cdot T_{l_p}^{s_p}(\omega', m_p)\right\} = \\ = c_{s_{T_{l_1}...T_{l_p}}}\left(m_1+k,...,m_p+k\right), \\ m_1,...,m_p \in \mathbf{Z}, l_1,...,l_p \in \left\{\overline{1,L}\right\}, k \in \mathbf{Z}. \end{gathered} \quad (2)$$

If there is a mixed central moment function b $r_{s_{T_{l_1}...T_{l_p}}}\left(m_1,...,m_p\right)$ order $s = \sum_{j=1}^{p} s_j$ of $\Xi_L(\omega', m)$ stationary and stationary random sequences, then it has equality:

$$\begin{gathered} r_{s_{T_{l_1}...T_{l_p}}}\left(m_1,...,m_p\right) = \mathbf{M}\left\{\left(T_{l_1}(\omega', m_1) - c_{1_{T_{l_1}}}\right)^{s_1} \times \right. \\ \left. \times ... \times \left(T_{l_p}(\omega', m_p) - c_{1_{T_{l_p}}}\right)^{s_p}\right\} = \\ = r_{s_{T_{l_1}...T_{l_p}}}\left(m_1+k,...,m_p+k\right), \\ m_1,...,m_p \in \mathbf{Z}, l_1,...,l_p \in \left\{\overline{1,L}\right\}, k \in \mathbf{Z}, \end{gathered} \quad (3)$$

where $\left\{c_{1_{T_{l_1}}},...,c_{1_{T_{l_p}}}\right\}$ is the set of first-order initial moments (mathematical expectations) of stationary random sequences from the set $\left\{T_{l_1}(\omega', m),..., T_{l_p}(\omega', m)\right\}$.

In practice, for analysis of high-resolution rhythm, it is reasonable to use mixed high-order moment functions, namely, mixed second-order initial moment functions - covariance functions and mixed second-order central moment functions - correlation functions. In this case, the initial second-order moment functions for the vector $\Xi_L(\omega', m)$ of stationary and stationary related random sequences are represented as a matrix of covariance functions:

$$\mathbf{C}_T = \begin{bmatrix} c_{2_{T_1T_1}}(m_1, m_2) & \cdots & c_{2_{T_1T_p}}(m_1, m_2) \\ c_{2_{T_2T_1}}(m_1, m_2) & \cdots & c_{2_{T_2T_p}}(m_1, m_2) \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ c_{2_{T_pT_1}}(m_1, m_2) & \cdots & c_{2_{T_pT_p}}(m_1, m_2) \end{bmatrix} \quad (4)$$

which can be more compactly submitted as follows:

$$\mathbf{C}_T = \left[c_{2_{T_{l_1} T_{l_2}}} (m_1, m_2), l_1, l_2 = \overline{1, L} \right], \quad (5)$$

where each of its elements is a covariance function $c_{s_{T_{l_1} T_{l_2}}} (m_1, m_2)$, which is given so:

$$c_{2_{T_{l_1} T_{l_2}}} (m_1, m_2) = \mathbf{M}\left\{ T_{l_1} (\omega', m_1) \cdot T_{l_2} (\omega', m_2) \right\}, \quad m_1, m_2 \in \mathbf{Z}, l_1, l_2 \in \left\{ \overline{1, L} \right\}. \quad (6)$$

Since the components of a random sequence vector $\Xi_L(\omega', m)$ are stationary and stationary related sequences, their covariance functions are functions of only one integer argument u, which is equal. Therefore, the covariance matrix of this random vector can be represented as follows:

$$\mathbf{C}_T = \left[c_{2_{T_{l_1} T_{l_2}}} (u), l_1, l_2 = \overline{1, L} \right], \quad (7)$$

where each of its elements is a covariance function $c_{2_{T_{l_1} T_{l_2}}} (u)$, which is equal to:

$$c_{2_{T_{l_1} T_{l_2}}} (u) = c_{2_{T_{l_1} T_{l_2}}} (m_1 - m_2), \quad u, m_1, m_2 \in \mathbf{Z}, l_1, l_2 \in \left\{ \overline{1, L} \right\}. \quad (8)$$

Provided that $l_1 = l_2 = l$, the covariance function $c_{s_{T_l T_l}} (u)$ is an autocovariance function l stationary components $T_l(\omega', m)$ vector $\Xi_L(\omega', m)$, which describes the time distances between single-phase electrocardiogram readings for it l. If $l_1 \neq l_2$, then the covariance function $c_{2_{T_{l_1} T_{l_2}}} (u)$ function for two stationary components of a vector $\Xi_L(\omega', m)$, describing the time distances between single-phase electrocardiogram readings for l_1 and l_2 its phases. Mixed central second-order moment functions for a vector $\Xi_L(\omega', m)$ stationary and stationary related random sequences are presented as a matrix of correlation functions:

$$\mathbf{R}_T = \begin{bmatrix} r_{2_{T_1 T_1}} (m_1, m_2) & \cdots & r_{2_{T_1 T_p}} (m_1, m_2) \\ r_{2_{T_2 T_1}} (m_1, m_2) & \cdots & r_{2_{T_2 T_p}} (m_1, m_2) \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ r_{2_{T_p T_1}} (m_1, m_2) & \cdots & r_{2_{T_p T_p}} (m_1, m_2) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

which can be presented more compactly so:

$$\mathbf{R}_T = \left[r_{2_{T_{l_1} T_{l_2}}} (m_1, m_2), l_1, l_2 = \overline{1, L} \right], \quad (10)$$

where each of its elements is a correlation function $r_{s_{T_{l_1} T_{l_2}}} (m_1, m_2)$, which is given so:

$$c_{2_{T_{l_1} T_{l_2}}} (m_1, m_2) = \mathbf{M}\left\{ \left(T_{l_1} (\omega', m_1) - c_{1_{T_{l_1}}} \right) \cdot \left(T_{l_2} (\omega', m_2) - c_{1_{T_{l_2}}} \right) \right\}, \quad m_1, m_2 \in \mathbf{Z}, l_1, l_2 \in \left\{ \overline{1, L} \right\}. \quad (11)$$

Because the components of the vector $\Xi_L(\omega', m)$ random sequences are stationary and stationary sequences, their correlation functions are functions of only one integer argument u, which is equal to $u = m_1 - m_2$. Therefore, the correlation matrix of this random vector can be represented as follows:

$$\mathbf{R}_T = \left[r_{2_{T_{l_1} T_{l_2}}} (u), l_1, l_2 = \overline{1, L} \right], \quad (12)$$

where each of its elements is a correlation function $r_{2_{T_{l_1} T_{l_2}}} (u)$, which is equal to:

$$r_{2_{T_{l_1} T_{l_2}}} (u) = r_{2_{T_{l_1} T_{l_2}}} (m_1 - m_2), \quad u, m_1, m_2 \in \mathbf{Z}, l_1, l_2 \in \left\{ \overline{1, L} \right\}. \quad (13)$$

Provided that $l_1 = l_2 = l$, correlation function $r_{2_{T_l T_l}} (u)$ is an autocorrelation function l stationary components $T_l(\omega', m)$ vector $\Xi_L(\omega', m)$, which describes the time distances between single-phase electrocardiogram readings for him l - phases. If $l_1 \neq l_2$, then the correlation function $r_{2_{T_{l_1} T_{l_2}}} (u)$ is a reciprocal correlation function for two stationary components of a vector $\Xi_L(\omega', m)$, describing the time distances between single-phase electrocardiogram readings for l_1 and l_2 phases.

Fig. 1-4 shows the results of statistical processing of the rhythm cardio signal with high informativeness, by statistical evaluation of its corresponding statistical characteristics.

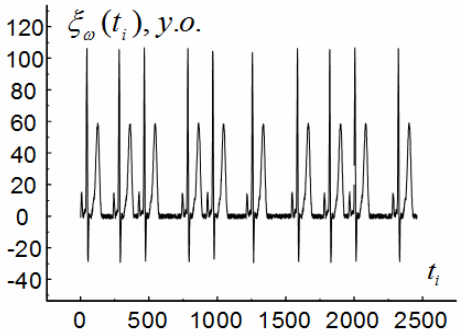
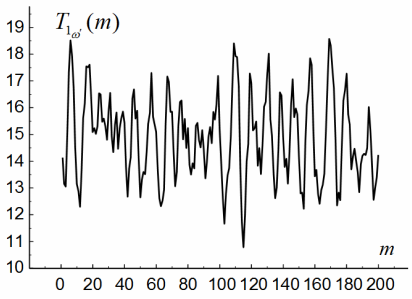


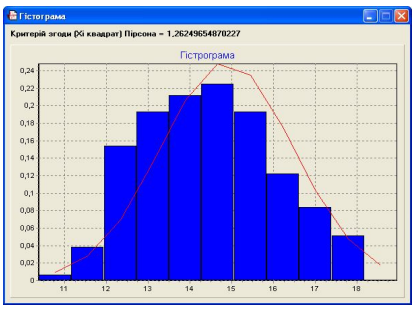
Fig. 1. Several cycles of the investigated electrocardio signal

Conclusions

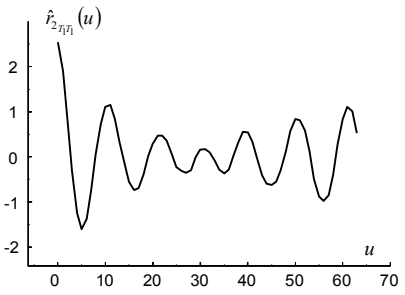
The mathematical model of rhythmocardiogram with high resolution in the form of a vector of stationary and stationary related random sequences is substantiated. The structure of probabilistic characteristics of this model for analysis of cardiac rhythm in modern cardiodiagnostic systems is investigated.



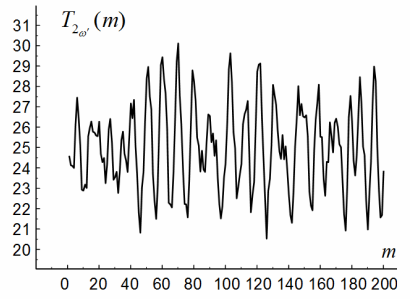
a



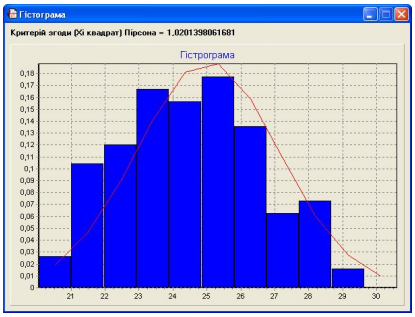
a



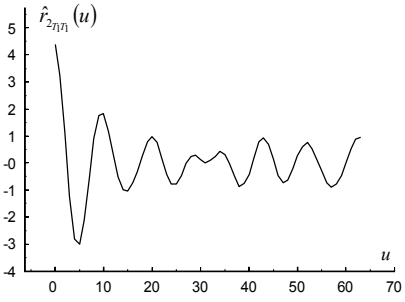
a



b



b



b

Fig. 2. Schedule of sales $T_{1_{\omega'}}(m)$, $T_{2_{\omega'}}(m)$ component of the vector rhythmocardiogram of the first component $T_1(\omega', m)$ and the second component $T_2(\omega', m)$, describing duration respectively: a – P, electrocardio signal intervals; b – R, electrocardio signal intervals

Fig. 3. Implementation histograms $T_{1_{\omega'}}(m)$, $T_{2_{\omega'}}(m)$ component of the vector rhythmocardiogram of the first component $T_1(\omega', m)$ and the second component $T_2(\omega', m)$, describing duration respectively: a – P, electrocardio signal intervals; b – R, electrocardio signal intervals

Fig. 4. Schedule of sales $\hat{r}_{2_{T_1T_1}}(u)$ statistical estimates of autocorrelation functions $r_{2_{T_1T_1}}(u)$ ($l_1 = l_2 = 1$) the first components $T_1(\omega', m)$ and the second component $T_2(\omega', m)$, describing duration respectively: a – P, describing duration respectively; b – R, electrocardio signal intervals

REFERENCES

1. Baevsky R.M., Kirillov O.I. and Kletskin S.Z. (1984), *Mathematical analysis of changes in heart rate during stress*, Science, Moscow, 222 p.
2. (1999), "Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. Working Group of the European Cardiology Society and the North American Society of Stimulation and Electrophysiology", *Bulletin of Arrhythmology*, Issue 11, pp. 52-77.
3. Resurrection A.D. and Wentzel M.D. (1974), "Statistical analysis of cardiac rhythm and indicators of hemodynamics in physiological studies", *Problems of space biology*, Moscow, p. 42.
4. Zarubin, F.E. (1998), "Heart rate variability: measurement standards, indicators, features of the method", *Bulletin of arrhythmology*, Issue 10, pp. 25-30.
5. Kalakutsky, L.I. and Manelis E.S. (2001), *Monitoring of heart rate variability parameters in critical state medicine*, Engineering-Medical Center "New Devices", Samara Medicine, Pharmacy # 14.
6. Ragozin A.N. (2020), "Spectral analysis of heart rate variability on the plane of complex frequencies", *Ural Cardiology Journal*, Vol. 1, pp. 18-25.
7. Ragozin A.N. and Kononov D.Yu. (1999), "Analysis of the spectral structure of multichannel physiological signals", *Digital radioelectronic systems*, electronic journal, Issue 3, available to: http://www.prima.tu-chel.ac.ru/drs/
8. Ryabykina G.V. and Sobolev A.V. (1998), *Heart rate variability*, Starco, Moscow.
9. Lupenko, S., Lutsyk, N., Yasniy, O. and Sobaszek, Ł. (2018), "Statistical analysis of the human heart with increased informativeness" , *Acta mechanica et automatica*, vol. 12, pp. 311–315.
10. Lupenko, S., Lutsyk, N., Yasniy, O. and Zozulia A. (2019), "Modeling and Diagnostic Features in Computer Systems of Heart Rhythm Analysis with Increased Informativeness", *2019 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, IEEE, pp. 121-124.

Received (Надійшла) 26.02.2020
Accepted for publication (Прийнята до друку) 22.04.2020

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Литвиненко Ярослав Володимирович – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, Україна;

Iaroslav Lytvynenko – Doctor of technical sciences, Associate Professor, Associate Professor of Computer Science Department, Ternopil Ivan Pulyuy National Technical University, Ternopil, Ukraine;
e-mail: lytvynenko@tntu.edu.ua; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0001-7311-4103

Лупенко Сергій Анатолійович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерних систем та мереж, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, Україна;
Serhii Lupenko – Doctor of technical sciences, Professor, Professor of Computer Systems and Networks Department, Ternopil Ivan Pulyuy National Technical University, Ternopil, Ukraine;
e-mail: lupenko.san@gmail.com; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-6559-0721

Ониськів Петро Анатолійович (Petro Onyskiv) – аспірант кафедри комп'ютерних наук, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, Україна;
Petro Onyskiv – postgraduate of Computer Science Department, Ternopil Ivan Pulyuy National Technical University, Ternopil, Ukraine;
e-mail: petro.onyskiv95@gmail.com; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-9717-4538

Триснюк Василь Миколайович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу досліджень навколишнього середовища, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору, Київ, Україна;
Vasyl Trysnyuk – Doctor of technical sciences, Senior Research, Head of the environmental research department, Institute of Telecommunications and Global Information Space of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine;
e-mail: trysnyuk@ukr.net; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0001-9920-4879

Зозуля Андрій Миколайович – науковий співробітник, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору, Київ, Україна;
Andriy Zozulia – Research Associate, Institute of Telecommunications and Global Information Space of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine;
e-mail: bestguru@gmail.com; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0003-1582-3088

Математична модель ритмокардіосигналу у вигляді вектора стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових послідовностей

Я. В. Литвиненко, С. А. Лупенко, П. А. Ониськів, В. М. Триснюк, А. М. Зозуля

Анотація. Робота присвячена обґрунтуванню математичної моделі ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю у вигляді вектора стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових процесів. Досліджено структуру ймовірнісних характеристик цієї моделі для аналізу серцевого ритму у сучасних системах кардіодіагностики. Аналіз ритму серця дає змогу оцінювати не лише стан серцево-судинної системи, але і стан адаптивних можливостей цілого організму людини. Більшість сучасних систем автоматизованого аналізу серцевого ритму ґрунтуються на статистичному аналізу за ритмокардіограмою, яка є упорядкованою сукупністю тривалостей R-R-інтервалів в зареєстрованому електрокардіосигналі, що дає змогу досліджувати її часову динаміку. Для врахування часової динаміки ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю необхідно використовувати математичний апарат теорії випадкових послідовностей, а саме, розглядати його як вектор дискретних випадкових послідовностей. **Метою роботи** є розв'язання науково-практичного завдання створення математичної моделі ритмокардіосигналу **з** підвищеною роздільною здатністю у вигляді вектора стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових процесів. **Об'єкт дослідження** є інформаційні технологій для діагностики і оцінки стану ритмокардіосигналу для аналізу серцевого ритму у сучасних системах кардіодіагностики. У роботі обґрунтовано математичну модель ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю у вигляді вектора стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових послідовностей. Досліджено структуру ймовірнісних характеристик цієї моделі для аналізу серцевого ритму у сучасних системах кардіодіагностики.

Ключові слова: вектор стаціонарних та стаціонарно-пов'язаних випадкових послідовностей; електрокардіосигнал; ритмокардіосигнал; серцевий ритм.

Математическая модель ритмокардиосигнала в виде вектора стационарных и стационарно связанных случайных последовательностей

Я. В. Литвиненко, С. А. Лупенко, П. А. Онискив, В. М. Триснюк, А. Н. Зозуля

Аннотация. Работа посвящена обоснованию математической модели ритмокардиосигнала с повышенной разрешающей способностью в виде вектора стационарных и стационарно связанных случайных процессов. Исследована структура вероятностных характеристик этой модели для анализа сердечного ритма в современных системах кардиодиагностики. Анализ ритма сердца позволяет оценивать не только состояние сердечно-сосудистой системы, но и состояние адаптивных возможностей целого организма. Большинство современных систем автоматизированного анализа сердечного ритма основываются на статистическом анализа по ритмокардиограмме, которая является упорядоченной совокупности длительностей R-R-интервалов в зарегистрированном электрокардиосигналов, что дает возможность исследовать ее временную динамику. Для учета временной динамики ритмокардиосигнала с повышенной разрешающей способностью необходимо использовать математический аппарат теории случайных последовательностей, а именно, рассматривать его как вектор дискретных случайных последовательностей. **Целью работы** является решение научно-практической задачи создания математической модели ритмокардиосигнала с повышенным разрешением в виде вектора стационарных и стационарно связанных случайных процессов. **Объектом исследования** являются информационные технологии для диагностики и оценки состояния ритмокардиосигнала для анализа сердечного ритма в современных системах кардиодиагностики. В работе обоснована математическая модель ритмокардиосигнала с повышенной разрешающей способностью в виде вектора стационарных и стационарно связанных случайных последовательностей. Исследована структура вероятностных характеристик этой модели для анализа сердечного ритма в современных системах кардиодиагностики.

Ключевые слова: вектор стационарных и стационарно-связанных случайных последовательностей; электрокардиосигнал; ритмокардиосигнал; сердечный ритм.

UDC 004.942 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.2.09**

K. Rukkas, G. Zholtkevych

V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

PROBABILISTIC MODEL FOR ESTIMATION OF CAP-GUARANTEES FOR DISTRIBUTED DATASTORE

Abstract. The **subject** of the article's research is the CAP-guarantees of distributed datastore. The **goal** is to evolve decision-making algorithm for the distributed datastore architecture design which will balance CAP-guarantees depending on business requirements. To achieve that the following problems were solved in the paper: the stochastic model to evaluate different components of CAP-characteristics and some metrics that will impact on these values were developed. To solve these problems the following **methods** were used: basics from graph theory and probability theory, general formulas of expected value and automaton models and software application for calculation of developed formulas. The capability to measure such metrics **resulted in** to forming some constitutes of decision-making algorithm. **Conclusions**: the developed components of decision-making algorithm were the purpose of this paper and it could be one of basic components on the design distributed datastores stage, so that architects who build new software design may also use the algorithm to achieve balanced guarantees of distributed system reliability at the earlier stage of business needs implementation.

Keywords: CAP-guarantees; distributed data warehouses; decision making algorithm; stochastic metrics; average replica propagation time; design of distributed data warehouses.

Introduction

Nowadays all the scalable software needs a reliable storage that responds in a reasonable amount of time and is evolving with every business requirement coming. This comes up with horizontal scaling need, including storage. In the most of cases distributed datastore are applicable for such software. Though scaling distributed datastores often meets the CAP-theorem as a difficulty to overcome. CAP-theorem says that it is impossible to satisfy all three guarantees of a distributed datastore (consistency, availability, partition tolerance). This paper is devoted to finding as generic as possible solutions that will balance these guarantees for specific business needs and will become the base of decision-making algorithm on the stage of build and design of a distributed network and. In the article the mathematical model that presents stochastic formula to measure the probability of delivery in a datastore with imperfect partition tolerance and various kinds of data loss. This will help to evaluate different versions of topology for distributed datastore network and continue the development of the decision-making algorithm for design a datastore with balanced guarantees that corresponds specific business requirements.

Related research

There are many research works devoted to scaling distributed systems, building reliable network and distributed datastores monitoring. So, the estimates of distributed datastores scale is presented in [1]. General research for distributed systems architecture, recommendations of how to build such systems is presented in [2]. Before final proof of CAP-theorem Brewer had investigated the capability of distributed systems to be robust, strong consistency in such system and basically available system with partition tolerance satisfied [3]. But in a few years he presented CAP-theorem as a hypothesis at first and the formal proof of theorem was presented in [4] and some clarifications were made in 2012 [5]. These research works has resulted in the overview and consequences of CAP-theorem [6]. The theorem has been reviewed again in [7].

Since there the CAP-theorem problem got under deep research during the latest 7 years. Building any architecture there is a need to make a choice: ACID or BASE model, strong consistency which results in weaker availability or basically available eventually consistent system where strong consistency is neglected in some point of view. In general a lot of solutions come in BASE model while nowadays in the conditions of network speed growth we cannot sacrifice availability and this model and comparing it with ACID is presented in [8]. The problem of that it is impossible to fulfill all three guarantees of reliable datastore at once is also researched from different points: in the paper of CAP-theorem analysis the circumstances to achieve compromise between these guarantees are considered (see [9]). The work is mostly devoted to the CAP-theorem analysis. But it does not declare precise model to overcome current problems. There are works that present deeper investigation and has developed algorithms for strong consistency balancing (see [10]). Also, the paper [11] showed the general advisory for data replication in distributed systems.

Research aims and objectives. So we can see that the CAP-theorem problem has been investigated from different parts and domains. However, there are no articles devoted to evaluating the CAP-guarantees in stochastic way and there is no general algorithm of design distributed system network, so that CAP-guarantees are satisfied as more as needed for specific business needs. This research is devoted to evolving probabilistic model to measure CAP-guarantees somehow. This will help plenty of systems in monitoring reliability of datastores and invent new algorithm that will contain recommendations on how to design such datastores, so that CAP-guarantees will be fulfilled optimally for any business needs.

Research bases

In the previous section it can be understood that the CAP-theorem problem has been investigated and overcome from different parts. Mostly research is based on performance increase while requirements can grow

© Rukkas K., Zholtkevych G., 2020

much faster. Here we present mathematical model that will allow to evaluate the probability of delivery in the whole datastore. Thus, the model is defined as:

$$(N, L, \partial, D, r, N_d, l(N_d), n_c), \quad (1)$$

where N – finite set of nodes in a datastore; L – finite set of links in a datastore; $\partial : L \to 2^N$ – mapping where each link is associated with two adjacent nodes; D – finite set of stored data units; $r : D \to 2^N$ – mapping that associates each of data unit to a set of nodes that store the replica of this data unit; N_d – finite set of nodes that store the given data unit d; $l(N_d)$ – the number of nodes that store data unit d; n_c – the number of nodes in a subset N_d, where all the nodes have the same version of replica.

Now let us for the next components of such a system. Let we have a graph that represents the topology of distributed network and a subset of paths in a graph P: P_1..., ..., P_n. For now it is necessary to compute the probability of delivery via any path in a graph. Let us assume that one message has to be delivered through path P. Let us calculate the delivery probability in the conditions of data loss on nodes (in the case of partitions etc.) and links. We denote as p_k the probability of delivery through path P. The events of delivery to path nodes are dependent each on other because if a message will not be delivered to j node, it will not be delivered to $j+1$ (де j $\in$ P). Thus, the delivery probability through path P_k:

$$p_k = p_{k1} \cdot \ldots \cdot p_{kn} = \prod_{j=1}^{n} p_{kj}, \quad (2)$$

where $k \in P$, $j \in P_k$. Below we will concerned with two examples. First one is the case when there is no network partitions and the second when partitions do occur. In the first case p_{kj} is the delivery probability through link j. In the second case p_{kj} is the product of delivery probability through link j and the probability of that adjacent node is alive and is able to accept a message. Hence, we can derive the delivery probability through one path P_k, $k \in P$ – the set of all paths from i to j.

$$P_k(dataloss) = 1 - p_k = 1 - \prod_{j=1}^{n} p_{kj}. \quad (3)$$

In a distributed network with a topology graph degree more than 1 there is not the only path a message can be delivered through (see definition of graph degree in [12]). Therefore let us consider the delivery probability through different paths. Basing on epidemic protocols of replicas broadcast applied for many live systems in a distributed network (see gossip, … in [13], [14]) we assume that the message broadcast occurs in parallel through different paths, thus, probabilistic events of delivery are independent. Let us evaluate the probability of data loss for every path $P_k \in P$:

$$P(loss) = \prod_{k=1}^{n} p_k(loss) = \prod_{k=1}^{n} (1 - \prod_{j=1}^{m} p_{kj}), \quad (4)$$

where n is a number of elements in the set P and m is the distance of every path. Taking into account the independence of delivery events via different paths, the delivery probability through at least one path is equal to:

$$P(delivery) = 1 - \prod_{k=1}^{n} p_k(loss) = 1 - (\prod_{i=1}^{n} (1 - \prod_{j=1}^{m} p_{ij})). \quad (5)$$

Hence, now we have the probability of data loss across all paths from i to j nodes and delivery probability through at least one path. Let we have the probabilistic space Ω, that contains two events: A – a message is delivered through P_k, B – a message is delivered at least through one path. The event A might occur only if B occurs. Let us compute So that we calculate the conditional probability with a formula ([15]):

$$P(A \mid B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} = \frac{P(A)}{P(B)} = \frac{p_k}{p(delivery)}, \quad (6)$$

where $k \in P$. Having the delivery probability at least through one path from i to j from the set P, the data loss probability in these conditions is equal to:

$$1 - \frac{p_k}{p(delivery)}. \quad (7)$$

Now we introduce such variable t_k as the time of delivery from i to j that is measured in time slots (of the same measure unit that link cost is measured by in the network. Let every path have own delivery time t_k in the conditions of data loss in a network. Then having formulae of probability, we can derive the meantime of delivery taking into account network data loss. (see formulae of the expected value [16]):

$$\mu_{ij} = \sum_{k=1}^{n} t_k \cdot \left(1 - \frac{p_k}{p(delivery)}\right). \quad (8)$$

So, we have evolved our mathematical model with derived formulas of delivery probability and the mean time delivery of messages in data loss conditions in a distributed datastore. Now we would like to present the practical examples of the theory built above.

To be more intuitive and to get handy experience, we take the graph with 5 nodes and 7 links. Let us firstly introduce the delivery time and delivery probability for every link. We assume that as input data, which can be obtained by network routing metric measurements ([17]), where administrators with a help of monitoring systems can obtain the results of delivery time from node to a neighbor or they can evaluate the probability of delivery from node to neighbors. So we assume these initial metrics are real. So, the initial adjacent matrix of delivery probabilities is the following:

$$P = \begin{pmatrix} 0 & 0.72 & 0.92 & 0 & 0 & 0.74 \\ 0.72 & 0 & 0.94 & 0.73 & 0 & 0 \\ 0.92 & 0.94 & 0 & 0 & 0.91 & 0.86 \\ 0 & 0.73 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.91 & 0 & 0 & 0 \\ 0.74 & 0 & 0.86 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (9)$$

where p_{ij} is the current delivery probability. The elements of matrix where $p_{ij} = 0$ are probabilities of nodes that are adjacent to themselves and those that are not neighbors of current node. This is the auxiliary matrix for obtaining search matrix of mean time delivery. Initial adjacent matrix of time delivery is the following:

$$T = \begin{pmatrix} 0 & 2.5 & 1.2 & 0 & 0 & 1.8 \\ 2.5 & 0 & 1.7 & 1.6 & 0 & 0 \\ 1.2 & 1.7 & 0 & 0 & 2.4 & 2.9 \\ 0 & 1.6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2.4 & 0 & 0 & 0 \\ 1.8 & 0 & 2.9 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

where t_{ij} us the current time delivery for i, j node in a graph. $t_{ij} = 0$ is the time for nodes that are not neighbors and will be calculated with formulas presented above. Thus, the delivery probabilities and delivery time for each of link in a network is obtained with a help of programming model (see DDS Datastore Simulation), that computes the given formula which is the man time of delivery for every path from i to j, we obtained the matrix of mean time delivery. The matrix is symmetric, because the delivery time from i to j should equal to the delivery time from j to i, and, obviously, the delivery time from i to i is equal to 0:

$$\mu = \begin{pmatrix} 0 & 2.5 & 1.2 & 7.18 & 5.81 & 1.8 \\ 2.5 & 0 & 1.7 & 1.6 & 8.23 & 7.24 \\ 1.2 & 1.7 & 0 & 8.69 & 2.4 & 2.9 \\ 7.18 & 1.6 & 8.69 & 0 & 12.47 & 13.25 \\ 5.81 & 8.23 & 2.4 & 12.47 & 0 & 7.24 \\ 1.8 & 7.24 & 1.9 & 13.25 & 7.24 & 0 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

But this matrix is calculated with a condition of the perfect partition tolerance in a network, i.e. there are no network partitions. Let us introduce the probability of node aliveness, i.e. the probability of that a node will be able to transfer replica and replace own replica if needed. So taking into account these conditions, we obtain the new matrix of delivery mean time:

$$\mu = \begin{pmatrix} 0 & 2.5 & 1.2 & 9.72 & 8.7 & 1.8 \\ 2.5 & 0 & 1.7 & 1.6 & 11.6 & 12.26 \\ 1.2 & 1.7 & 0 & 10.96 & 2.4 & 2.9 \\ 9.72 & 1.6 & 10.96 & 0 & 15.36 & 17.61 \\ 8.7 & 11.63 & 2.4 & 15.36 & 0 & 10.54 \\ 1.8 & 12.26 & 2.9 & 17.61 & 10.54 & 0 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Evolving decision-making algorithm for distributed network topology design

Based on calculated matrix in the previous section, we are able to construct the following elements of decision-making text algorithm for design stage of network for a distributed datastore.

Algorithm. Input. Initial graph G representing the topology of distributed datastore network. Program T, that calculates the matrix of delivery mean time for each of datastore nodes. Set of delivery optimization algorithms A. Output. Optimal allocation of nodes in the graph in the form of mapping that associates each nodes to its neighbors.

0. Calculate mean time on graph G using program T.

1. Sort nodes in the next order: the first node is the one where read requests come most rarely, and the last one is the node where read requests come most often. Denote this set as N_i.

2. Go to instruction 0, giving program T the input data as initial measurements of delivery probabilities and delivery time from every node to neighbors.

3. Assign roles to nodes from N_i in the next manner: node that have maximal delivery associates with the very first node from N_i and node, that have minimal delivery time, associates with the very last node.

4. Save obtained graph and execute instruction 0.

5. If there are nodes that require fast delivery and there those that do not, swap more important nodes with less ones. Save obtained graph.

6. Execute instruction 0. After that if there are still nodes where mean time do not satisfy required one, use algorithm set to decrease delivery time without decreasing measured value of consistency (consistency in a datastore can be measured using same model from [18]). Otherwise go to 7.

7. If there are nodes that do not require fast delivery, remove not needed links that will increase system cost.

8. Execute instruction 0 for current graph and if mean time delivery decreased for node threshold, go to instruction 7 and repeat it for other nodes until optimal solution will not be found.

Conclusions

This research is devoted to mathematical model for distributed datastore that is evolved with the stochastic formula which allow to measure the mean time delivery in the conditions of data loss in a datastore. The input data for such measurements are based on network metric algorithms that allows to measure initial needed values: the delivery and time probability from node to node. This research results in a formed component of decision-making algorithm on the design stage of a network topology for a datastore^ the technique of nodes allocation depending on implemented mathematical model has been developed. The algorithm will help to find the optimal topology that will allow to achieve as maximum as possible delivery time in the conditions of data loss probability without losing consistency measured value. Then base CAP-guarantees should be balanced due to this work. In the next research current mathematical model will advance in the direction of increasing all the three CAP-guarantees and expansion of algorithm for building the architecture of a distributed datastore general solution.

REFERENCES

1. Kuhlenkamp, J., Klems, M. and Röss, O. (2014), “Benchmarking scalability and elasticity of distributed database systems”, *Proceedings of the VLDB Endowment*, Vol. 7(12), pp. 1219-1230, DOI: https://doi.org/10.14778/2732977.2732995
2. Gupta, S., Saroha K. (2011), “Fundamental Research of Distributed Database”, *IJSMS*, 11.
3. Brewer, E. (2000), “Towards robust distributed systems (abstract)”, *Proceedings of the nineteenth annual ACM symposium on Principles of distributed computing - PODC '00*, DOI: https://doi.org/10.1145/343477.343502
4. Gilbert, S. and Lynch, N. (2002), “Brewer's conjecture and the feasibility of consistent, available, partition-tolerant web services”, *ACM SIGACT News*, Vol. 33(2), p. 51, DOI: https://doi.org/10.1145/564585.564601
5. Brewer, E. (2012), “CAP twelve years later: How the "rules" have changed”, *Computer*, Vol. 45(2), pp. 23-29, DOI: https://doi.org/10.1109/MC.2012.37

6. Gilbert, S. and Lynch, N. (2012), "Perspectives on the CAP Theorem", *Computer*, Vol. 45(2), pp. 30-36, DOI: https://doi.org/10.1109/MC.2011.389
7. Kleppmann, M. (2015), "A Critique of the CAP Theorem", *ArXiv*, 1509.05393v2, DOI: https://doi.org/10.17863/CAM.13083
8. Banothu, N., Bhukya, S. and Sharma, K. (2016), "Big-data: Acid versus base for database transactions", *2016 International Conference ICEEOT*, DOI: https://doi.org/10.1109/ICEEOT.2016.7755401
9. Bailis, P. and Ghodsi, A. (2013), "Eventual consistency today: limitations, extensions, and beyond", *Communications of the ACM*, Vol. 56(5), p. 55, DOI: https://doi.org/10.1145/2460276.2462076
10. Calder, B. (2011), "Windows Azure Storage: a highly available cloud storage service with strong consistency", *Proc.of the Twenty-Third ACM SOSP '11*, DOI: https://doi.org/10.1145/2043556.2043571
11. Kumalakov, B. and Bakibayev, T. (2017), "Distributed Data Store Architecture Towards Colonial Data Replication", *2017 IEEE 11th Int. Conf. on Application of Inf. and Comm. Techn. (AICT)*, DOI: https://doi.org/10.1109/ICAICT.2017.8686925
12. Diestel, R. (2016), *Graph theory*, Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 5-6, DOI: https://doi.org/10.1109/ICAICT.2017.8686925
13. Burmester, M., Le, T. and Yasinsac, A. (2007), *Adaptive gossip protocols: Managing security and redundancy in dense ad hoc networks*, *Ad Hoc Networks*, Vol. 5(3), pp. 313-323, DOI: https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2005.11.007
14. Haas, Z., Halpern, J. and Li Li (2002), "Gossip-based ad hoc routing", *Proceedings. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societiesm*, 3, pp.1707-1716.
15. Gut, A. (2012), *Probability*, Springer, New York, NY: p.17.
16. Ross, S. (2007), *Introduction to probability models*, 9th ed. Amsterdam: Elsevier/Academic Press.
17. Olifer, N. and Olifer, V. (2010), *Computer networks,* Willy India, New Delhi.
18. Rukkas, K. and Zholtkevych, G. (2015), "Distributed Datastores: Towards Probabilistic Approach for Estimation of Dependability", *11th Int. Conference on ICT in Education, Research, and Industrial Applications*, 1356, pp.523-534.

Received (Надійшла) 26.02.2020
Accepted for publication (Прийнята до друку) 22.04.2020

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Руккас Кирило Маркович – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри теоретичної та прикладної інформатики, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, Україна;
Kyrylo Rukkas – Doctor of technical sciences, assistant professor, Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: krukkas@gmail.com; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-7614-0793

Жолткевич Галина Григоріївна – дослідник, інженер – розробник програмного забезпечення, Харків, Україна;
Galyna Zholtkevych – Researcher, Software Engineer, a private entrepreneur, Kharkiv, Ukraine.
e-mail: galynazholtkevych1991@gmail.com; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-9772-4691

Стохастична модель для оцінки CAP-гарантій для розподілених баз даних

К. М. Руккас, Г. Г. Жолткевич

Анотація. Предметом дослідження статті є CAP-гарантії розподілених баз даних. **Метою** є розвиток алгоритму прийняття рішень для проектування розподілених сховищ даних, який збалансує CAP-гарантії залежно від бізнес потреб. Для досягнення мети були поставлені та вирішені наступні **задачі**: розвинена стохастична модель для оцінки різних компонентів CAP-характеристик та метрик, які впливають на ці значення. Для вирішення задач застосовувались наступні **методи**: базові поняття та визначення з теорії графів та теорії ймовірності, загальні формули математичного сподівання та імітаційні моделі для розподіленого сховища даних, програмне забезпечення, яке використовувалось для підрахунку виведених формул. Технічна можливість вимірювання таких метрик, які сприяють на CAP-характеристики, дало змогу отримати як **результат** формування складових алгоритму прийняття рішень. **Висновки**: розроблені компоненти алгоритму прийняття рішень є метою цієї статті та можуть застосовуватися як базові компоненти на етапі проектування розподілених сховищ даних, отже архітектор програмного забезпечення зможе застосувати такий алгоритм для досягнення збалансованих гарантій надійної розподіленої системи на ранньому етапі формування бізнес потреб та реалізації програмного рішення.

Ключові слова: CAP-гарантії; розподілені сховища даних; алгоритм прийняття рішень; стохастичні метрики; середній час розповсюдження реплік; проектування розподілених сховищ.

Стохастическая модель для оценки CAP-гарантий для распределенных баз данных

К. М. Руккас, Г. Г. Жолткевич

Аннотация. Предметом исследования статьи являются CAP-гарантии распределенных баз данных. **Цель** исследования – развитие алгоритма принятия решений для проектирования распределенных хранилищ данных, который сбалансирует CAP-гарантии в зависимости от бизнес-требований. Для выполнения цели были поставлены и решены следующие **задачи**: развита стохастическая модель для оценки различных компонентов CAP-характеристик и их метрик, которые повлияют на их значения. Для решения задач использовались следующие **методы**: базовые понятия и определения из теории графов и теории вероятности, общие формулы математического ожидания и имитационные модели для распределенного хранилища данных, программное обеспечение, которое использовалось для подсчета выведенных формул. Техническая возможность измерения таких метрик, от которых зависят CAP-характеристики, привело к получению формирования составляющих алгоритма принятия решений как **результата**. **Выводы**: разработанные компоненты алгоритма принятия решений, которые являются целью статьи, могут применяться в качестве базовых компонентов на этапе проектирования распределенных хранилищ данных, следовательно, архитектор программного обеспечения получит возможность достижения сбалансированных гарантий надежной распределенной системы на раннем этапе формирования бизнес требований и реализации программного решения.

Ключевые слова: CAP-гарантии; распределенные хранилища данных; алгоритм принятия решений; стохастические метрики; среднее время распространения реплик; проектирование распределенных хранилищ данных.

Methods of information systems synthesis

UDC 629.76 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.1.10**

Ye. Aleksandrov[1], T. Aleksandrova[2], I. Kostianyk[2], Ya. Morgun[2]

[1] Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine
[2] National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

PARAMETRIC SYNTHESIS OF A NON-STATIONARY AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF THE COURSE STABILITY OF THE CAR

Abstract. Widely used in the practice of analysis and synthesis of automatic control systems of non-stationary dynamic systems, the method of "frozen coefficients" does not have a rigorous theoretical justification and does not always lead to the desired results. In this regard, to solve the problem of parametric synthesis of a non-stationary automatic control system of the course stability of the car, an algorithmic method is considered for choosing the variable parameters of the regulators of non-stationary objects, based on the direct calculation of the additive integral quadratic quality functional that reflects the set of requirements for the automatic regulator of a non-stationary object, followed by finding the values of the variable parameters a regulator delivering a minimum of quality functional, and the required values of the weight coefficients of the additive functional.

Keywords: non-stationary dynamic system; additive quality functional; variable controller parameters; weight coefficients of additive functional; dynamic accuracy of the course stability system of the car.

Introduction

Problem statement. In [1], the problem of choosing the values of the variable parameters of the electronic unit of the automatic control system (ACS) of the course stability of the car was considered, the structural diagram of which is shown in Fig. 1, where the following notation: CIC – command instrument complex; OC – onboard computer; EHA – electro-hydraulic amplifier; BP – brake pedal; A – automobile. In the process of braking the car, external disturbances acting from the side of the motion surface, as well as skid and slip of the wheels of the car, lead to the deviation of the car body from a given direction of travel and possibly to an emergency situation. The objective of the automatic control system of the course stability of the car (international designation VSC) is to minimize the possible deviation of the skid of the car body when braking in difficult road conditions.

The CIC contains three gyroscopic sensors of angular velocity AVS and three linear acceleration sensors LAS, the sensitivity axes of which coincide in the direction with the three main central axes of inertia of the car body: OX – longitudinal, OY – transverse and OZ – vertical. The output signals of the AVS $\omega_x(t)$, $\omega_y(t)$, $\omega_z(t)$ and LAS $w_x(t)$, $w_y(t)$, $w_z(t)$ are fed to the inputs of the analog-code converter (ACC) of the OC, where they are converted into lattice functions $\omega_x[nT]$, $\omega_y[nT]$, $\omega_z[nT]$, $w_x[nT]$, $w_y[nT]$ and $w_z[nT]$. High-frequency interference of lattice functions at the output of the ACC is filtered by Butterworth recursive digital filters [2]. From the output of the filters FB1 – FB6, the filtered lattice functions $\tilde{\omega}_x[nT]$, $\tilde{\omega}_y[nT]$, $\tilde{\omega}_z[nT]$, $\tilde{w}_x[nT]$, $\tilde{w}_y[nT]$ and $\tilde{w}_z[nT]$ go to the algorithm block A1, which implements the algorithms of strapdown inertial systems SINS [3], which calculates the angular deviation of the car body $\psi[nT]$ and the linear displacement of the center of mass of the body $y[nT]$ from a given vehicle trajectory in braking process. The output signal of block A1 $\psi[nT]$ is fed to the input of the Lanczos digital filter [4], at the output of which there is a lattice function $\omega[nT]$ corresponding to the angular velocity of rotation of the car body in its perturbed movement during braking.

Block A2 implements the stabilization algorithm of the car body in the channel of angular stabilization

$$u_\psi[nT] = k_\psi \psi[nT] + k_{\dot\psi}\omega[nT], \qquad (1)$$

and block A3 implements the stabilization algorithm in the channel of lateral displacement

$$u_y[nT] = k_y y[nT], \qquad (2)$$

as well as the stabilization algorithm of the two-channel system

$$u[nT] = k_\psi \psi[nT] + k_{\dot\psi}\omega[nT] + k_y y[nT]. \qquad (3)$$

The control signal in the form of a lattice function (3) is fed to the input of a code-analog converter (CAC), from the output of which a continuous signal $u(t)$ is fed to the input of the control winding of the EHA, which forms the brake fluid pressure $p_r(t)$ and $p_l(t)$ which is supplied to the brake cylinders of the wheels of the right and left sides of the car.

In relations (1)–(3), through k_ψ, $k_{\dot\psi}$ and k_y are designated the variable constants of the control algorithm. The task of the parametric synthesis of the ACS of the course stability of the car is to find the values of the variable constants k_ψ, $k_{\dot\psi}$ and k_y of the algorithms (1)–(3) that deliver the required properties to a closed ACS. So, in [1], these constants are selected from the condition of maximum margin of stability and maximum speed of closed ACS.

© Aleksandrov Ye., Aleksandrova T., Kostianyk I., Morgun Ya., 2020

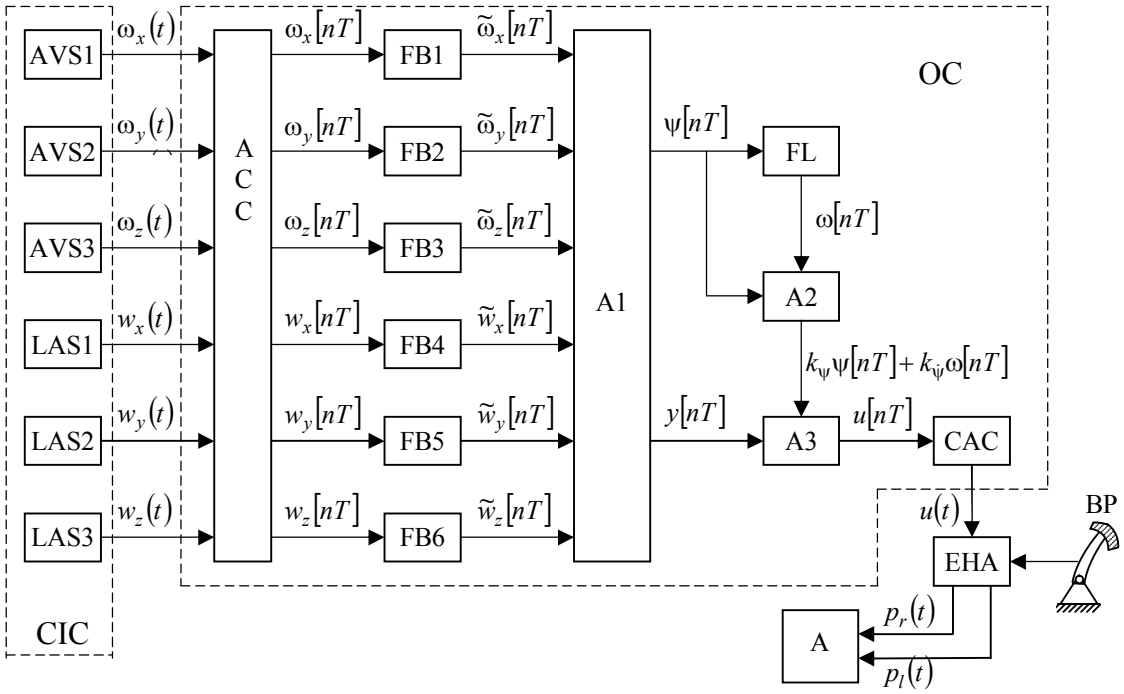


Fig. 1. Block diagram of the automatic control system of the course stability of the car

The control object under consideration – a car with an electro-hydraulic brake amplifier is non-stationary. Indeed, the mathematical model of the perturbed motion of the control object developed in [1] has the following form:

$$I_a \frac{d^2\psi(t)}{dt^2} = k_a \Delta p(t) + M_f(t); \quad (4)$$

$$\frac{dy(t)}{dt} = -v(t)\psi(t); \quad (5)$$

$$L_0 \frac{di(t)}{dt} + r_0 i(t) = u(t); \quad (6)$$

$$I_k \frac{d^2\gamma(t)}{dt^2} + f_k \frac{d\gamma(t)}{dt} + c_k \gamma(t) = k_e i(t); \quad (7)$$

$$\Delta p(t) = k_p \gamma(t), \quad (8)$$

where $\psi(t)$ is the current angle of deviation of the longitudinal axis of the car body from a given direction of movement during braking; $y(t)$ is the lateral displacement of the center of mass of the body relative to a given trajectory of the car during braking; $i(t)$ is the current value of electric current in the control winding of the EHA; $\gamma(t)$ is the angular deviation of the rocker arm of the EHA electromagnet; $\Delta p(t)$ is the differential pressure of the working fluid in the brake lines of the right and left sides of the car; $u(t)$ is the control signal at the output of the CAC converter of the OC; $M_f(t)$ is the disturbing moment acting on the car body relative to its own vertical axis of inertia; $v(t)$ is the current speed of the center of mass of the car during braking; I_a is the moment of inertia of the car body relative to its own vertical axis; L_0 is the inductance of the control winding of the EHA; r_0 is the resistance of the control winding; I_k is the moment of inertia of the rocker arm of the EHA; f_k is the coefficient of viscous friction in the axis of rotation of the rocker arm; c_k is the stiffness coefficient of the fixing spring of the EHA rocker arm; k_a, k_e, k_p are the proportionality coefficients.

Equations (4)–(8) describe the perturbed motion of the continuous part of closed digital ACS of the course stability of the car. Equation (4) describes the change in the mismatch angle $\psi(t)$ of the own longitudinal axis of the car body from a given direction of movement; equation (5) is the deviation of the center of mass of the body $y(t)$ from a given trajectory; equation (6) is the change in the electric current in the control winding of the EHA $i(t)$, to which a control signal $u(t)$ is supplied from the output of the CAC; equation (7) is the change in the angle of rotation of the rocker arm of the EHA electromagnet $\gamma(t)$ under the action of electric current $i(t)$, and equation (8) is the mismatch of the working fluid pressures in the brake lines of the right and left sides of the car when the rocker arm is rotated through an angle $\gamma(t)$.

The system of differential equations (4)–(8) is non-stationary, since in equation (5) the coefficient at $\psi(t)$ is the current velocity of the center of mass of the car $\nu(t)$, which changes in time during braking. In [1], to solve the problem of parametric synthesis of ACS of the course stability of the car, the "frozen coefficients" method is used, according to which the trajectory of a non-stationary object is divided into a number of intervals, on each of which the time-variable coefficients of the mathematical model of the non-stationary object are "frozen", that is, are assumed to be constant over time. At each of the intervals, the problem of choosing the variable parameters of the ACS for a stationary object is solved,

and then the change in each of the variable parameters in time is extrapolated by the corresponding function of time, which is realized by an analog or digital ACS. Despite the simplicity of the method of "frozen coefficients", this method is not theoretically justified and often leads to unsatisfactory results.

In [5, 6], an algorithmic method for the parametric synthesis of dynamical systems is described, based on the direct calculation of the additive integral quadratic functional, which reflects the set of requirements for ACS, on the solutions of the mathematical model of a closed ACS and on the simulation model of external perturbations acting on the control object with subsequent finding the minimum mathematical expectation of the functional in the space of variable parameters using the Optimization Toolbox software package MATLAB or Minimize software MATHCAD. Moreover, the solution to the problems of analysis and synthesis of ACS of non-stationary technical objects can be obtained without the use of the "frozen coefficients" method and, as a rule, leads to higher quality of controlled processes in a closed ACS.

The purpose of this article is to solve the problem of parametric synthesis of the ACS of the course stability of the car using the algorithmic method of parametric synthesis of dynamic systems, followed by a comparative analysis of the obtained results with the results of use of the "frozen coefficients" method for solving the same problem.

Main material

The first step of the algorithmic method of parametric synthesis of dynamical systems, described in [5,6], is the formulation of requirements to system and their formalization. With regard to a closed ACS of the course stability of the car these requirements are reduced to the fact that, firstly, the closed ACS should be stable and, secondly, have high dynamic accuracy. In the theory of analytical construction of optimal regulators (ACOR), developed back in the mid-60s of the previous century, it was concluded that the formalization of the requirements of stability and high dynamic accuracy of the system reduces to the requirement of a minimum of the additive integral quadratic functional calculated on the solutions of dynamic system. In the work [7] of the authors of this article, it was shown that this functional can contain only the so-called "main" coordinates of the dynamic system, which mainly characterize the dynamic process under consideration.

From the consideration of the mathematical model of the perturbed movement of the control object (4)–(8) it follows that the "main" coordinates, which mainly characterize the movement of a car with an electro-hydraulic brake amplifier, are the angle $\psi(t)$ of deviation of the longitudinal axis of the body from a given direction of movement, the angular velocity $\psi(t)$ of rotation of the body and the current deviation of the center of mass of the body $y(t)$ from a given trajectory of the car. Then the additive integral quadratic functional, the value of which characterizes the accuracy of the closed ACS of the course stability of the car, is written as

$$I = \underset{(j)}{M}\left\{\int_0^{\tau}\left[\beta_1^2\psi_j^2(t)+\beta_2^2\dot{\psi}_j^2(t)+\beta_3^2 y_j^2(t)\right]dt\right\}, \quad (9)$$

where $j=\overline{1,N}$ is the implementation of random process $M_f^j(t)$; $\underset{(j)}{M}$ – symbol of mathematical expectation of random process implementations $M_f^j(t)$; τ – random process analysis time $\psi_j(t)$, $\dot{\psi}_j(t)$ and $y_j(t)$; β_1, β_2 and β_3 – weighting coefficients of functional (9) to be selected.

The problem of the parametric synthesis of the ACS of the course stability of the car is to find the values of the variable parameters of the ACS k_{ψ}, $k_{\dot{\psi}}$ and k_y, which deliver on solutions of the closed ACS (3)–(8) a minimum of the integral quadratic functional (9). It is assumed that the digital ACS uses a zero-order CAC, which converts the lattice function $u[nT]$ into a piecewise constant function $u(t)$ [8]:

$$u(t)=\begin{cases}u[nT], & nT\le t<(n+1)T;\\ u[(n+1)T], & (n+1)T\le t<(n+2)T.\end{cases} \quad (10)$$

We represent functional (9) in the following form

$$\begin{aligned}I(k_{\psi},k_{\dot{\psi}},k_y)=\beta_1^2\underset{(j)}{M}\left\{\int_0^{\tau}\psi_j^2(t)dt\right\}+\\ +\beta_2^2\underset{(j)}{M}\left\{\int_0^{\tau}\dot{\psi}_j^2(t)dt\right\}+\beta_3^2\underset{(j)}{M}\left\{\int_0^{\tau}y_j^2(t)dt\right\}\end{aligned} \quad (11)$$

and introduce the following notation:

$$\begin{aligned}I_1(k_{\psi},k_{\dot{\psi}},k_y)&=\underset{(j)}{M}\left\{\int_0^{\tau}\psi_j^2(t)dt\right\};\\ I_2(k_{\psi},k_{\dot{\psi}},k_y)&=\underset{(j)}{M}\left\{\int_0^{\tau}\dot{\psi}_j^2(t)dt\right\};\\ I_3(k_{\psi},k_{\dot{\psi}},k_y)&=\underset{(j)}{M}\left\{\int_0^{\tau}y_j^2(t)dt\right\}.\end{aligned} \quad (12)$$

In contrast to the additive functional (11), relations (12) are called partial functionals. In view of relations (12), the additive functional (11) is written

$$\begin{aligned}I(k_{\psi},k_{\dot{\psi}},k_y)=\beta_1^2 I_1(k_{\psi},k_{\dot{\psi}},k_y)+\\ +\beta_2^2 I_2(k_{\psi},k_{\dot{\psi}},k_y)+\beta_3^2 I_3(k_{\psi},k_{\dot{\psi}},k_y).\end{aligned} \quad (13)$$

In [9], a methodology was presented for choosing the values of the weight coefficients of the additive functional, in accordance with which, for the problem under consideration, these values are

$$\begin{aligned}\beta_1&=\frac{\psi_{\max}}{I_1^*\left(\psi_{\max}^2/I_1^*+\dot{\psi}_{\max}^2/I_2^*+y_{\max}^2/I_3^*\right)};\\ \beta_2&=\frac{\dot{\psi}_{\max}}{I_2^*\left(\psi_{\max}^2/I_1^*+\dot{\psi}_{\max}^2/I_2^*+y_{\max}^2/I_3^*\right)};\\ \beta_3&=\frac{y_{\max}}{I_3^*\left(\psi_{\max}^2/I_1^*+\dot{\psi}_{\max}^2/I_2^*+y_{\max}^2/I_3^*\right)},\end{aligned} \quad (14)$$

where $\psi_{\max}$, $\dot{\psi}_{\max}$, $y_{\max}$ are the maximum possible

values of the "main" coordinates $\psi_j(t)$, $\dot{\psi}_j(t)$ and $y_j(t)$, achieved by realizing a random process $M_f^j(t)$, $j=\overline{1,N}$:

$$\psi_{\max}=\max_{j=\overline{1,N};t\in[0,\tau]}\psi_j(t);\ \dot{\psi}_{\max}=\max_{j=\overline{1,N};t\in[0,\tau]}\dot{\psi}_j(t);\quad y_{\max}=\max_{j=\overline{1,N};t\in[0,\tau]}y_j(t); \tag{15}$$

I_1^*, I_2^*, I_3^* – minimum values of partial functionals (12) obtained by minimizing each of them individually

$$I_1^*=\min_{K\in G_k}I_1(K);\ I_2^*=\min_{K\in G_k}I_2(K);\quad I_3^*=\min_{K\in G_k}I_3(K), \tag{16}$$

где K – vector of variable parameters of the ACS

$$K=\left[k_\psi\ \ k_{\dot{\psi}}\ \ k_y\right]^T; \tag{17}$$

G_k – the set of permissible values of variable parameters.

Finding the minimum of each of the partial functionals (12) under constraint

$$K\in G_k \tag{18}$$

is a solution to the nonlinear programming problem.

The Nelder-Mead method [10], implemented in the Optimization Toolbox software package MATLAB and Minimize software MATHCAD, allows you to find the local minimum of each functional (12) closest to the starting point $K^0\in G_k$. In [11], it was shown that the integral quadratic functional calculated on the solutions of a linear system of differential equations has a single minimum on the set of possible values of the variable parameters G_k, for which it is recommended to choose the stability region of the closed ACS in the space of variable parameters.

After evaluating the maximum values of the "main" coordinates (15) and calculating the minimum values of the partial functionals (16), the values of the weighting coefficients of the additive functional (9) are calculated, the functional (9) is formed, its mathematical expectation is calculated for N realizations of the random process $M_f^j(t)$, $j=\overline{1,N}$, and then using Optimization Toolbox software package MATLAB or Minimize software MATHCAD it is searches for a vector of variable parameters $K\in G_k$ that delivers a minimum of functional (9).

Consider the method of constructing the set G_k, for which we present the system of differential equations (4)–(8) in normal form, introducing the six-dimensional state vector of the control object

$$X(t)=\begin{bmatrix}x_1(t)\\x_2(t)\\x_3(t)\\x_4(t)\\x_5(t)\\x_6(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\psi(t)\\\dot{\psi}(t)\\y(t)\\i(t)\\\gamma(t)\\\dot{\gamma}(t)\end{bmatrix} \tag{19}$$

and resolving system (4)–(8) relatively to highest derivatives

$$\begin{gathered}\frac{d^2\psi(t)}{dt^2}=\frac{k_ak_p}{I_a}\gamma(t)+\frac{1}{I_a}M_f(t);\\ \frac{dy(t)}{dt}=-v(t)\psi(t);\\ \frac{di(t)}{dt}=-\frac{r_0}{L_0}i(t)+\frac{1}{L_0}u(t);\\ \frac{d^2\gamma(t)}{dt^2}=-\frac{c_k}{I_k}\gamma(t)-\frac{f_k}{I_k}\frac{d\gamma(t)}{dt}+\frac{k_e}{I_k}i(t).\end{gathered} \tag{20}$$

Given the notation (19), we represent the system of four differential equations (20) of the first and second orders in the form of a system of six differential equations of the first order:

$$\begin{gathered}\dot{x}_1(t)=x_2(t);\\ \dot{x}_2(t)=\frac{k_ak_p}{I_a}x_5(t)+\frac{1}{I_a}M_f(t);\\ \dot{x}_3(t)=-v(t)x_1(t);\\ \dot{x}_4(t)=-\frac{r_0}{L_0}x_4(t)+\frac{1}{L_0}u(t);\\ \dot{x}_5(t)=x_6(t);\\ \dot{x}_6(t)=-\frac{c_k}{I_k}x_5(t)-\frac{f_k}{I_k}x_6(t)+\frac{k_e}{I_k}x_4(t).\end{gathered} \tag{21}$$

We write system (21) in the vector-matrix form

$$\dot{X}(t)=A(t)\cdot X(t)+B\cdot u(t)+C\cdot M_f(t), \tag{22}$$

where the matrices $A(t)$, B and C are equal:

$$A(t)=\begin{bmatrix}0&1&0&0&0&0\\0&0&0&0&k_ak_p/I_a&0\\-v(t)&0&0&0&0&0\\0&0&0&-\frac{r_0}{L_0}&0&0\\0&0&0&0&0&1\\0&0&0&k_e/I_k&-c_k/I_k&-f_k/I_k\end{bmatrix};\ B=\begin{bmatrix}0\\0\\0\\1/L_0\\0\end{bmatrix};\ C=\begin{bmatrix}0\\1/I_a\\0\\0\\0\\0\end{bmatrix}.$$

The stability of the dynamic system does not depend on external influences on the system, therefore, in equation (22) we put $M_f(t)=0$, and we take the value of the speed of the center of mass of the car to be maximum and equal v_0, assuming the change in speed during braking in accordance with the formula

$$v(t)=v_0-a\cdot t, \tag{23}$$

where a is the deceleration of the center of mass during braking. At the time $t=0$, the movement of the car is most stable. The stability of the car begins to decrease with the beginning of braking, with a decrease in the current speed of the center of mass $v(t)$, when $v(t)=v_0$, the stability region of a closed system in the space of variable parameters is most voluminous and begins to decrease with the beginning of the braking process. When $t=0$ the equation of the perturbed motion of the control object takes the form

$$\dot{X}(t)=A\cdot X(t)+B\cdot u(t)$$

where the matrix A is equal

$$A=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_a k_p/I_a & 0 \\ -v_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -r_0/L_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & k_e/I_k & -c_k/I_k & -f_k/I_k \end{bmatrix}. \tag{24}$$

The difference vector-matrix equation connecting the initial state of the continuous part of system (21) $X[kT]$ with its final state $X[(k+1)T]$ at each discreteness period is written in the form [12]

$$X[(k+1)T]=\Phi\cdot X[kT]+H\cdot u[kT], \tag{25}$$

where the matrices Φ and H are respectively determined by the formulas

$$\Phi=\sum_{i=0}^{\infty}\frac{1}{i!}A^iT^i;\ H=\sum_{i=0}^{\infty}\left[\frac{1}{(i+1)!}A^iT^{i+1}\right]B. \tag{26}$$

The number of considered members of the matrix series (25) and (26) depends on the value of the quantization period T.

Usually, when using modern onboard computers with a short quantization period, with a sufficient degree of accuracy it is assumed

$$\Phi=E+A\cdot T;\ H=B\cdot T. \tag{27}$$

We write the control algorithm (3) in the vector-matrix form

$$U[nT]=K\cdot X[nT], \tag{28}$$

where K is the matrix of variable parameters of the ACS, and

$$K=\begin{bmatrix} k_\psi & k_{\dot\psi} & k_y & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \tag{29}$$

In the right side of difference equation (24), we substitute relations (27) and (28). As a result, we obtain a difference equation that describes in finite differences the own motion of the closed ACS of the course stability of the car

$$X[(k+1)T]=(E+A\cdot T+B\cdot K\cdot T)X[kT]. \tag{30}$$

Then the characteristic equation of the closed ACS is written in the form

$$\det[A\cdot T+B\cdot K\cdot T+E(1-z)]=0, \tag{31}$$

where z is the complex variable of the Z–transformation of lattice functions.

Substituting the matrices A, B, K in equation (31) and revealing the determinant obtained, we write the characteristic equation of the closed discrete ACS of the course stability of the car

$$\begin{aligned}&(1-z)^6-(1-z)^5T\times\\ &\times\left(\frac{r_0}{L_0}+\frac{f_k}{I_k}\right)+\left(\frac{r_0}{L_0}\cdot\frac{f_k}{I_k}+\frac{c_k}{I_k}\right)(1-z)^4T^2-\\ &-\frac{r_0}{L_0}\cdot\frac{c_k}{I_k}(1-z)^3T^3-\frac{k_ek_ak_p}{I_aI_kL_0}(1-z)^2T^4k_{\dot\psi}+\\ &+\frac{k_ek_ak_p}{I_aI_kL_0}(1-z)T^5k_\psi+\frac{k_ek_ak_p}{I_aI_kL_0}v_0T^6k_y=0.\end{aligned} \tag{32}$$

According to the notation

$$a_1=\frac{r_0}{L_0}+\frac{f_k}{I_k};\ a_2=\frac{r_0}{L_0}\cdot\frac{f_k}{I_k}+\frac{c_k}{I_k};$$
$$a_3=\frac{r_0}{L_0}\cdot\frac{c_k}{I_k};\ a_4=\frac{k_ek_ak_p}{I_aI_kL_0}$$

characteristic equation (32) takes the form

$$\begin{aligned}&(1-z)^6-a_1(1-z)^5T+a_2(1-z)^4T^2-\\ &-a_3(1-z)^3T^3-a_4(1-z)^2T^4k_{\dot\psi}+\\ &+a_4(1-z)T^5k_\psi+a_4v_0T^6k_y=0.\end{aligned} \tag{33}$$

Using the W–transformation method [13], in equation (33) we set $z=\frac{1+w}{1-w}$.

As a result, we obtain a new characteristic equation for a complex variable w:

$$\begin{aligned}&(64-32a_1T+16a_2T^2-8a_3T^3-4a_4T^4k_{\dot\psi}+2a_4T^5k_\psi+a_4v_0T^6k_y)w^6+(32a_1T-32a_2T^2+24a_3T^3+\\ &+16a_4T^4k_{\dot\psi}-10a_4T^5k_\psi-6a_4v_0T^6k_y)w^5+(16a_2T^2-24a_3T^3-24a_4T^4k_{\dot\psi}+20a_4T^5k_\psi+\\ &+15a_4v_0T^6k_y)w^4+(8a_3T^3+16a_4T^4k_{\dot\psi}-20a_4T^5k_\psi-20a_4v_0T^6k_y)w^3+\\ &+(-4a_4T^4k_{\dot\psi}+10a_4T^5k_\psi+15a_4v_0T^6k_y)w^2+(-2a_4T^5k_\psi-6a_4v_0T^6k_y)w+a_4v_0T^6k_y=0.\end{aligned} \tag{34}$$

In characteristic (34), we make a replacement $w = j\omega$, select the real and imaginary part, and equate them to zero. As a result, we obtain the relations:

$$\begin{aligned} &2a_4T^5\omega^2\left(-\omega^4+10\omega^2-5\right)k_\psi + \\ &+4a_4T^4\omega^2\left(\omega^4-6\omega^2+1\right)k_{\dot\psi} + a_4v_0T^6\cdot k_y\times \\ &\times\left(-\omega^6+15\omega^4-15\omega^2+1\right)=\omega^4\left(A_6\omega^2-A_4\right); \\ &2a_4T^5\omega\left(-5\omega^4+10\omega^2-1\right)k_\psi + \\ &+16a_4T^4\omega^3\left(\omega^2-1\right)k_{\dot\psi} + 2a_4v_0T^6\omega\times \\ &\times\left(-3\omega^4+10\omega^2-3\right)k_y=\omega^3\left(A_3-A_5\omega^2\right), \end{aligned} \tag{35}$$

where A_3, A_4, A_5 and A_6 are equal

$$A_3 = 8a_3T^3;\quad A_4 = 16a_2T^2 - 24a_3T^3;$$
$$A_5 = 32a_1T - 32a_2T^2 + 24a_3T^3;$$
$$A_6 = 64 - 32a_1T + 16a_2T^2 - 8a_3T^3.$$

In relations (35) we set $k_y = 0$. Then relations (35) are written as

$$\begin{aligned} &2a_4T^5\left(-\omega^4+10\omega^2-5\right)k_\psi + \\ &+4a_4T^4\left(\omega^4-6\omega^2+1\right)k_{\dot\psi}=\omega^2\left(A_6\omega^2-A_4\right); \\ &2a_4T^5\left(-5\omega^4+10\omega^2-1\right)k_\psi + \\ &+16a_4T^4\omega^2\left(\omega^2-1\right)k_{\dot\psi}=\omega^2\left(A_3-A_5\omega^2\right). \end{aligned} \tag{36}$$

Using relations (36), in the plane of the variable parameters $\left(k_\psi, k_{\dot\psi}\right)$ of algorithm (3) we construct the boundary of the stability region of the closed ACS. In accordance with the hatching rule [8], we consider the determinant of the system (36)

$$\begin{aligned} \Delta &= \begin{vmatrix} 2a_4T^5\times & 4a_4T^4\times \\ \times\left(-\omega^4+10\omega^2-5\right) & \times\left(\omega^4-6\omega^2+1\right) \\ 2a_4T^5\times & 16a_4T^4\omega^2\times \\ \times\left(-5\omega^4+10\omega^2-1\right) & \times\left(\omega^2-1\right) \end{vmatrix} = \\ &= 8a_4^2T^9\begin{vmatrix} -\omega^4+10\omega^2-5 & \omega^4-6\omega^2+1 \\ -5\omega^4+10\omega^2-1 & \omega^2\left(\omega^2-1\right) \end{vmatrix}. \end{aligned} \tag{37}$$

For small values ω, the determinant (37) is positive; therefore, moving along the boundary of the stability region in the direction of increase ω, the boundary should be hatched on the left. In this case, the hatching is directed inside the stability region (Fig. 2).

Inside the stability region G_ψ, we choose a point $\left(k_\psi^*, k_{\dot\psi}^*\right)$, substitute the values k_ψ^* and $k_{\dot\psi}^*$ in the characteristic equation (34), and solve the equation (34) with respect to the variable parameter k_y:

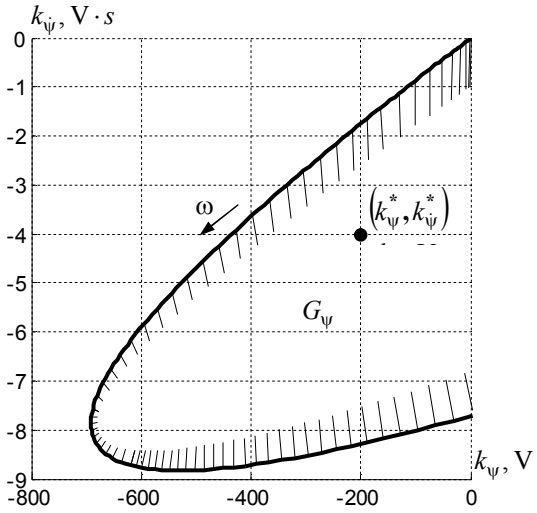


Fig. 2. Construction of stability region G_ψ in plane $\left(k_\psi, k_{\dot\psi}\right)$

$$k_y = \frac{\left(\begin{matrix} B_6w^6 + B_5w^5 + B_4w^4 + \\ +B_3w^3 + B_2w^2 + B_1w \end{matrix}\right)}{a_4v_0T^6\cdot\left(\begin{matrix} -w^6 + 6w^5 - 15w^4 + \\ +20w^3 - 15w^2 + 6w - 1 \end{matrix}\right)}. \tag{38}$$

In relation (38) we substitute $w = j\omega$ and select the real and imaginary parts. As a result, we have:

$$\operatorname{Re} k_y = \frac{C_y(w)E_y(w) + D_y(w)F_y(w)}{a_4v_0T^6\left[E_y^2(w) + F_y^2(w)\right]}; \tag{39}$$

$$\operatorname{Im} k_y = \frac{D_y(w)E_y(w) - C_y(w)F_y(w)}{a_4v_0T^6\left[E_y^2(w) + F_y^2(w)\right]}, \tag{40}$$

where

$$B_6 = 64 - 32a_1T + 16a_2T^2 - $$
$$-8a_3T^3 - 4a_4T^4k_{\dot\psi}^* + 2a_4T^5k_\psi^*;$$

$$B_5 = 32a_1T - 32a_2T^2 + 24a_3T^3 + $$
$$+16a_4T^4k_{\dot\psi}^* - 10a_4T^5k_\psi^*;$$

$$B_4 = 16a_2T^2 - 24a_3T^3 - 24a_4T^4k_{\dot\psi}^* + 20a_4T^5k_\psi^*;$$

$$B_3 = 8a_3T^3 + 16a_4T^4k_{\dot\psi}^* - 20a_4T^5k_\psi^*;$$

$$B_2 = -4a_4T^4k_{\dot\psi}^* + 10a_4T^5k_\psi^*;\quad B_1 = -2a_4T^5k_\psi^*;$$

$$C_y(w) = -B_6w^6 + B_4w^4 - B_2w^2;$$

$$D_y(w) = B_5w^5 - B_3w^3 + B_1w;$$

$$E_y(w) = w^6 - 15w^4 + 15w^2 - 1;$$

$$F_y(w) = 6w^5 - 20w^3 + 6w.$$

Using relations (39) and (40), we construct the boundary of the stability region G_y of the closed ACS of the course stability of the car in the plane of the complex parameter k_y (Fig. 3). This region represents a segment of the real axis, concluded between the origin and the point of intersection of the boundary of the stability region with the real axis of the complex plane $\left(\mathrm{Re}\, k_y, \mathrm{Im}\, k_y\right)$.

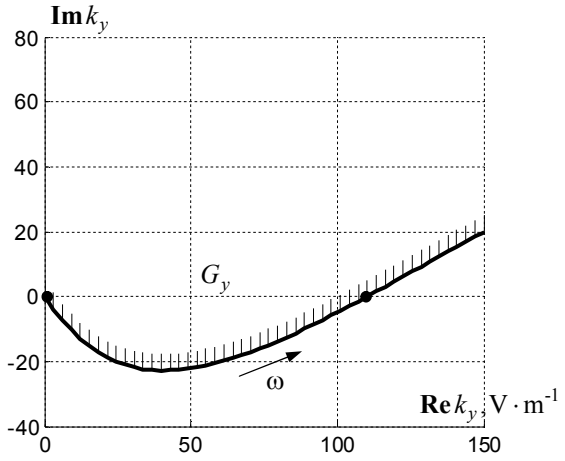


Fig. 3. Construction of stability region G_y in plane $\left(\mathbf{Re}\, k_y, \mathbf{Im}\, k_y\right)$

In the future, to clarify the areas of stability G_ψ and G_y, we use the iterative process developed by the authors described in [1]. As a result, we obtain the set of possible values of the varied parameters of the ACS G_k, which is the intersection of the sets G_ψ and G_y:

$$G_k = G_\psi \cap G_y .$$

In this example, the values of the parameters of the mathematical model (4)–(8) were taken equal:

$$L_0 = 10^{-3}\ H\ ;\ r_0 = 30\ \Omega\ ;$$

$$I_k = 0{,}98 \cdot 10^{-2}\ N \cdot m \cdot s^2\ ;\ f_k = 0{,}55\ N \cdot m \cdot s\ ;$$

$$c_k = 1{,}01 \cdot 10^2\ N \cdot m\ ;\ k_e = 10^3\ N \cdot m \cdot A^{-1}\ ;$$

$$k_a = -0{,}5 \cdot 10^{-4}\ N \cdot m \cdot Pa^{-1}\ ;\ k_p = 3{,}5 \cdot 10^8\ Pa\ ;$$

$$I_a = 1750\ N \cdot m \cdot s^2\ ;\ T = 0{,}003\ s\ .$$

Using the algorithmic method of parametric synthesis described above leads to the following optimal values of the variable constants of the stabilization algorithm (3):

$$k_\psi^0 = -13{,}65\ \ V\ ;\ k_{\dot\psi}^0 = -4{,}07\ \ V \cdot s;\ \ k_y^0 = 41{,}02\ \ V \cdot m^{-1}\ .$$

It was shown in [14] that a random process $M_f(t)$ is determined by the relation

$$M_f(t) = M_{fl}(t) - M_{fr}(t)\ ; \qquad (41)$$

where $M_{fl}(t)$, $M_{fr}(t)$ are the moments of resistance to the rolling of the wheels of the left and right side of the car, which are random functions that depend on the properties of the soil and the microprofile of the surface of movement under the corresponding side. Method for generating implementations of a random function $M_f^j(t)$, $j = \overline{1, N}$, where j is the number of the implementation of a random function $M_f^j(t)$, N – the number of implementations described in [15] for various types of the motion surfaces and various speeds of the center of mass of the car.

The accuracy of solving the problem of parametric synthesis of ACS depends on the accuracy of estimating the additive functional (9), which is determined by the number of implementations N of the random process $M_f^j(t)$, $j = \overline{1, N}$. Functional (9) is calculated by adding one more differential equation

$$\dot x_7^j(t) = \beta_1^2 \psi_j^2(t) + \beta_2^2 \dot\psi_j^2(t) + \beta_3^2 y_j^2(t);\ j = \overline{1, N}\ . \qquad (42)$$

to the mathematical model of the closed (21), (3).

For N implementations of a random process $M_f^j(t)$ on solutions of the closed ACS, we find N implementations of a random function (42). From relations (9) and (42) it follows

$$I_j(K) = x_7^j(\tau, K)\ , \qquad (43)$$

therefore,

$$I(K) = \underset{(j)}{M}\left\{x_7^j(\tau, K)\right\} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} x_7^j(\tau, K)\ . \qquad (44)$$

We estimate the variance of a random variable (43) [16]:

$$D(K) = \frac{1}{N-1}\sum_{j=1}^{N}\left[I_j(K) - I(K)\right]^2\ . \qquad (45)$$

We set the necessary accuracy of the estimation of functional (44) or the quantities ε and β, for which

$$P\left\{\left|I_j(K) - I(K)\right| \le \varepsilon\right\} = \beta\ .$$

In accordance with [16], for a given value β, we find the coefficient t_β and the required number of implementations of the random function $M_f^j(t)$, $j = \overline{1, N}$

$$\bar N = \frac{D(K) t_\beta^2}{\varepsilon^2};\ \ N = \left\lceil \bar N \right\rceil,$$

where $\lceil(\cdot)\rceil$ is the Iverson symbol, meaning rounding the number $(\cdot)$ to the nearest larger integer.

Conclusions

The "frozen coefficients" method, which is widely used in the practice of developing systems for the

automatic control of non-stationary objects, is not theoretically substantiated and often leads to high dynamic errors of closed ACS.

The main requirements for the automatic control system of the course stability of the car are stability and high accuracy of the stabilized process.

Quantitatively, these requirements can be estimated by the value of the mathematical expectation of the additive functional, the integrand of which is a quadratic form of the "main coordinates" of the mathematical model. The model describes the random stabilized process of the course deviation of the body of the car from a given direction of movement and lateral displacement of the center of mass of the body from a given trajectory during braking.

An alternative to the "frozen coefficients" method is the algorithmic method for the parametric synthesis of automatic control systems for non-stationary objects, based on the direct calculation of the mathematical expectation of the additive integral quadratic functional, calculated on the basis of the mathematical model of the closed ACS with the subsequent selection of the weight coefficients of the additive functional and its optimization using the Optimization Toolbox software package MATLAB and Minimize software MATHCAD. The optimal solution to the parametric synthesis problem is found on the set of permissible vectors of variable constants of the control algorithm, which is the intersection of the stability regions of a closed system in each of the control channels.

References

1. Alexsandrov, Ye., Aleksandrova, T. and Morhun, Ya. (2019), Parametric synthesis of the electronic control unit of the course stability system of the car, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, No. 6(102), pp. 39–45.
2. Aleksandrova, I.Ye., Aleksandrova, T.Ye. and Lazarenko, A.A. (2014), "Tsifrovyie filtryi v sistemah avtomobilnoy avtomatiki" [Digital filters in automotive automation systems], *Vestnik Moskovskogo avtomobilno–dorozhnogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta*, No. 1(37), pp. 25–28 (in Russian)
3. Aleksandrova, I.Ye., Aleksandrova, T.Ye. and Klets, D.M. (2013), "Ispolzovanie parametrov Rodriga-Gamiltona v sistemah avtomaticheskogo upravleniya tormozheniem avtomobilya" [Using Rodrigue-Hamilton parameters in systems of automatic control of car braking], *Vestnik Moskovskogo avtomobilno–dorozhnogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta*, No. 2(34), pp. 22–27 (in Russian).
4. Aleksandrova, T.Ye., Kononenko, V.A. and Lazarenko, A.A. (2011), "Sravnitelnyiy analiz PD-stabilizatorov podvizhnyih ob'ektov s nizkochastotnyimi filtrami Batterworta i Lantsosha" [Comparative analysis of PD-stabilizers for moving objects with low-frequency Butterworth and Lanczos filters], *Radioelektronika. Informatyka. Upravlinnia*, No. 2, pp. 148–152 (in Russian).
5. Aleksandrov, Ye.Ye., Aleksandrova, T.Ye. and Ovcharenko, Yu.Ye. (2019), *Pidvyshchennia tekhnichnykh ta erhonomichnykh kharakterystyk obiektiv viiskovoho pryznachennia* [Improvement of technical and ergonomic characteristics of military objects], KhNADU, Kharkiv, 175 p. (in Ukrainian).
6. Aleksandrov, Ye.Ye. and Aleksandrova, T.Ye. (2015), "Parametric Synthesis of Digital Stabilization System of Tank Gun", *Journal of Automation and Information Sciences*, No. 41 (11), pp. 1–17.
7. Aleksandrov, Ye.Ye. and Aleksandrova, T.Ye. (2017), "The Method of Main Coordinate in the Theory of Parametric Synthesis of the Linear Stabilized Systems", *Journal of Automation and Information Sciences*, No. 49 (3), pp. 34–45.
8. Aleksandrov, Ye.Ye., Kozlov, Ye.P. and Kuznyeczov, B.I (2002), *Avtomatychne keruvannya ruhomymy obyektamy i tehnologichnymy procesamy. Tom 1. Teoriia avtomatychnoho keruvannia* [Automatic control of moving objects and technological processes. Volume 1. Automatic control theory], NTU «KhPI», Kharkiv, 490 p. (in Ukrainian).
9. Aleksandrov, Ye.Ye., Aleksandrova, T.Ye. and Severin, V.P. (2019), *Osnovyi sovremennoy teorii upravleniya* [Fundamentals of modern control theory], KhNADU, Kharkiv, 324 p. (in Russian).
10. Himmelblau, D. (1975), *Prikladnoe nelineynoe programmirovanie* [Applied Nonlinear Programming], Mir, Moscow, 534 p. (in Russian).
11. Aleksandrov, Ye.Ye. and Aleksandrova, T.Ye. (2014), *Matematicheskoe modelirovanie, sistemnyiy analiz i sintez dinamicheskih system* [Mathematical modeling, systems analysis and synthesis of dynamic systems], NTU «KhPI», Kharkiv, 200 p. (in Russian).
12. Vasilev, S.K., Zaharov, V.N. and Prohorov, Yu.F. (1979), *Kibernetika v sistemah voennogo naznacheniya* [Cybernetics in military systems], Voenizdat, Moscow, 263 p. (in Russian).
13. Tu, Yu. (1964), *Tsifrovyie i impulsnyie sistemyi avtomaticheskogo upravleniya* [Digital and pulse automatic control systems], Mashinostroenie, Moscow, 703 p. (in Russian).
14. Alesandrov, Ye. Ye. (2010). *Osnovyi avtomobilnoy avtomatiki* [Automotive Fundamentals], KhNADU, Kharkiv, 172 p. (in Russian).
15. Turenko, A.N., Lebedev, A.T. and Volontsevych, D.O. (2001), *Dinamika transportno-tyagovyih kolesnyih i gusenichnyih mashin* [The dynamics of transport and traction wheeled and tracked vehicles], KhNADU, Kharkiv, 642 p. (in Russian).
16. Venttsel, E.S. (1964), *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory], Nauka, Moscow, 576 p. (in Russian).

Надійшла (received) 10.03.2020
Прийнята до друку (accepted for publication) 22.04.2020

Відомості про авторів / About the authors

Александров Євген Євгенович – доктор технічних наук, професор кафедри автомобілів, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна;
Eugene Aleksandrov – Doctor of Technical Sciences, Professor Department of automobiles, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: aleksandrov.ye.ye@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-7525-6383

Александрова Тетяна Євгеніївна – доктор технічних наук, професор кафедри «Системний аналіз та інформаційно-аналітичні технології», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;
Tetiana Aleksandrova – Doctor of Technical Sciences, Professor Department of Systems Analysis and Information-Analytical Technologies, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
e-mail: aleksandrova.t.ye@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-9596-0669

Костяник Ірина Віталіївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних технологій і систем колісних та гусеничних машин імені О. О. Морозова, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;
Iryna Kostianyk – PhD, Associate Professor Department of Information Technologies and Systems of Wheel and Track Machines named after Morozov, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
e-mail: kostyanik-irina@ukr.net; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0003-0289-2869

Моргун Ярослав Юрійович – аспірант кафедри «Системний аналіз та інформаційно-аналітичні технології», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;
Morgun Yaroslav – graduate student Department of Systems Analysis and Information-Analytical Technologies, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
e-mail: yarki95@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-7399-4937

Параметричний синтез нестаціонарної системи автоматичного керування курсовою стійкістю автомобіля

Є. Є. Александров, Т. Є. Александрова, І. В. Костяник, Я. Ю. Моргун

Анотація. Метод «заморожених коефіцієнтів», що широко використовується в практиці аналізу і синтезу систем автоматичного керування нестаціонарних динамічних систем, не має строгого теоретичного обґрунтування і не завжди приводить до бажаних результатів. Основними вимогами, що пред'являються до системи автоматичного керування курсовою стійкістю автомобіля, є стійкість і висока точність процесу стабілізації. Кількісно ці вимоги оцінюються значенням математичного очікування адитивного функціоналу якості, підінтегральна функція якого – квадратична форма «головних координат» математичної моделі, яка описує випадковий процес стабілізації курсового відхилення корпусу автомобіля від заданого напрямку руху та бічного зсуву центру мас корпусу від заданої траєкторії в процесі гальмування. У зв'язку з цим для вирішення задачі параметричного синтезу нестаціонарної системи автоматичного керування курсовою стійкістю автомобіля розглядається алгоритмічний метод вибору варійованих параметрів регуляторів нестаціонарних об'єктів, заснований на прямому обчисленні математичного очікування адитивного інтегрального квадратичного функціоналу, що обчислюється на рішеннях математичної моделі замкненої системи автоматичного керування з подальшим вибором вагових коефіцієнтів адитивного функціоналу та його оптимізацією з використанням програмних продуктів Optimization Toolbox і Minimize програмних пакетів MATLAB та MATHCAD відповідно. Оптимальне рішення задачі параметричного синтезу відшукується на множині допустимих векторів варійованих констант алгоритму керування, що представляє собою перетин областей стійкості замкнутої системи в кожному з каналів керування. Алгоритмічний метод параметричного синтезу, що використовується в статті, підвищує точність рішення задачі, так як вільний від недоліків, які притаманні методу «заморожених коефіцієнтів».

Ключові слова: нестаціонарна динамічна система; адитивний функціонал якості; варійовані параметри регулятора; вагові коефіцієнти адитивного функціоналу; динамічна точність системи курсової стійкості автомобіля.

Параметрический синтез нестационарной системы автоматического управления курсовой устойчивостью автомобиля

Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова, И. В. Костяник, Я. Ю. Моргун

Аннотация. Широко используемый в практике анализа и синтеза систем автоматического управления нестационарных динамических систем метод «замороженных коэффициентов» не имеет строгого теоретического обоснования и не всегда приводит к желаемым результатам. Основными требованиями, предъявляемыми к системе автоматического управления курсовой устойчивостью автомобиля, являются устойчивость и высокая точность стабилизируемого процесса. Количественно эти требования оцениваются значением математического ожидания аддитивного функционала качества, подынтегральная функция которого представляет собой квадратичную форму «главных координат» математической модели, описывающей случайный стабилизируемый процесс курсового отклонения корпуса автомобиля от заданного направления движения и бокового смещения центра масс корпуса от заданной траектории в процессе торможения. В этой связи для решения задачи параметрического синтеза нестационарной системы автоматического управления курсовой устойчивостью автомобиля рассматривается алгоритмический метод выбора варьируемых параметров регуляторов нестационарных объектов, основанный на прямом вычислении математического ожидания аддитивного интегрального квадратичного функционала, вычисляемого на решениях математической модели замкнутой системы автоматического управления с последующим выбором весовых коэффициентов аддитивного функционала и его оптимизацией с использованием программных продуктов Optimization Toolbox и Minimize программных пакетов MATLAB и MATHCAD соответственно. Оптимальное решение задачи параметрического синтеза отыскивается на множестве допустимых векторов варьируемых констант алгоритма управления, представляющего собой пересечение областей устойчивости замкнутой системы в каждом из каналов управления. Используемый в статье алгоритмический метод параметрического синтеза повышает точность решения задачи, так как свободен от недостатков, присущих широко используемому методу «замороженных коэффициентов».

Ключевые слова: нестационарная динамическая система; аддитивный функционал качества; варьируемые параметры регулятора; весовые коэффициенты аддитивного функционала; динамическая точность системы курсовой устойчивости автомобиля.

УДК 528.855 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.2.11**

С. М. Андрєєв, В. А. Жилін

Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна

ГЕОІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ НА БАЗІ СХОВИЩА ПРОСТОРОВИХ ДАНИХ ГЕОПОРТАЛУ

Анотація. Предметом дослідження є розроблення геоінформаційної системи підтримки прийняття рішень (СППР) на базі сховища просторових даних (СПД) геопорталу. **Об'єктом дослідження** є процес об'єднання та інтеграції у сховище геопорталу інформації, що містить різні типи просторових даних. **Метою роботи** є підвищення оперативності статистичного і прогнозного аналізу геоданих для ведення звітності та підтримки прийняття рішень геоінформаційних задач в режимі реального часу. **Висновки.** На підставі проведеного аналізу архітектур сучасних систем підтримки прийняття рішень запропоновано структуру, яку найдоцільніше використовувати для побудови геоінформаційної СППР на базі сховища просторових даних геопорталу. Проаналізовано основні функції, що мають виконувати підсистеми такої СППР, а саме — функції підсистеми витягання, перетворення і завантаження даних, функції підсистеми зберігання даних та підсистеми аналізу даних. Розгляд зазначених підсистем СППР проведено із детальним вивченням їх структурних та функціональних схем, аналізом існуючих технологій обробки та зберігання просторової інформації, а також сучасних методів аналізу геоданих. Разом з тим, здійснено ґрунтовний вибір системи управління базами даних (СУБД) для практичної реалізації багатовимірної бази геоданих, що виконує функції сховища просторових даних як основи СППР геопорталу. Проведено ретельний аналіз засобів Microsoft SQL Server Analysis Services (SSAS) як базової платформи для розгортання аналітичних систем Business Intelligence (BI), уніфікованої багатовимірної моделі даних Unified Dimensional Model (UDM) як ядра технології комплексного багатовимірного аналізу даних Online Analytical Processing (OLAP). Проаналізовано аспекти планування і програмування архітектури SSAS, особливості розроблення багатовимірних баз даних із застосуванням середовищ SQL BI Development Studio (BIDS) та SQL Server Management Studio (SSMS), а також специфіку застосування служби SQL Server Integration Services (SSIS) для роботи з багатовимірними базами даних. Таким чином, підготовлено підґрунтя для розроблення геоінформаційної СППР із застосуванням засобів Microsoft SQL Server багатовимірного аналізу даних для створення багатовимірного сховища просторових даних геопорталу. Врешті, запропоновано методику програмної реалізації багатовимірного сховища просторових даних геопорталу. Запропоновані підходи щодо розроблення геоінформаційної СППР на базі сховища просторових даних геопорталу забезпечують об'єднання та інтеграцію у сховище геопорталу інформації, що містить різні типи просторових даних. Програмна реалізація багатовимірного СПД геопорталу забезпечує підвищення оперативності статистичного і прогнозного аналізу геоданих для ведення звітності та підтримки прийняття рішень геоінформаційних задач в режимі реального часу.

Ключові слова: геодані; геоінформаційна система підтримки прийняття рішень; багатовимірні сховища просторових даних.

Аналіз архітектури сучасних систем підтримки прийняття рішень

До теперішнього часу у багатьох організаціях, працюючих у сфері геоінформаційних технологій, накопичені значні об'єми даних, на основі яких вирішуються різноманітні аналітичні та управлінські задачі. Проблеми зберігання великих об'ємів даних, а особливо просторово-прив'язаної інформації, стають усе більш актуальними і привертають увагу фахівців, працюючих в цій області, що привело до формування сучасного ринку технологій аналізу тематично-просторових даних щодо їх зберігання.

Робота аналітиків та керівників усіх рівнів бажано має бути організована так, щоб вони могли мати доступ до будь-якої інформації, що цікавить, користуватися зручними та простими засобами представлення і роботи з цією інформацією. Саме на досягнення цих цілей й спрямовані інформаційні системи підтримки прийняття рішень (рис. 1).

Збір та зберігання інформації, а також рішення завдань інформаційно-пошукового запиту ефективно реалізуються засобами систем управління базами даних.

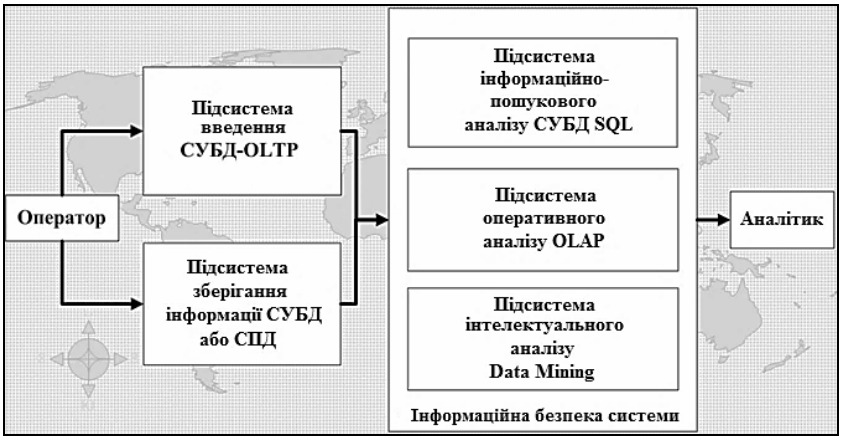


Рис. 1. Архітектура системи підтримки прийняття рішень (СППР)

Транзакційні OLTP-системи (*англ.* Online Transaction Processing, обробка транзакцій в реальному часі) – системи, призначені для введення, структурованого зберігання та обробки інформації в режимі реального часу. Вони проектуються, настроюються та оптимізуються для виконання максимальної кількості транзакцій за короткі проміжки часу. При цьому використовується фіксований набір надійних та безпечних мето-

© Андрєєв С. М., Жилін В. А., 2020

дів введення, модифікації, видалення даних і випуску оперативної звітності.

Однак, аналітичні можливості OLTP-систем значно обмежені (або взагалі відсутні), а отже OLTP-системи не підходять для повноцінного аналізу інформації в силу суперечності вимог, що пред'являються до OLTP-підсистем у складі СППР.

Для надання необхідної для прийняття рішень інформації зазвичай доводиться збирати дані з декількох транзакційних баз даних різної структури та змісту. Основна проблема при цьому полягає в неузгодженості і суперечності баз-джерел та відсутності єдиного логічного погляду на дані.

З метою об'єднання в одній системі OLTP та СППР для реалізації підсистеми надійного зберігання використовується концепція сховищ даних (СД). В основі концепції СД лежить ідея розділення даних, використовуваних для оперативної обробки та вирішення завдань аналізу, що дозволяє оптимізувати структури зберігання. Концепція СД дозволяє інтегрувати раніше роз'єднані деталізовані дані, що містяться різних зовнішніх джерелах, в єдину базу даних за рахунок їх попереднього узгодження та агрегації. Підсистема аналізу може бути побудована на основі:

– підсистеми інформаційно-пошукового аналізу на базі реляційних СУБД і статичних запитів з використанням мови SQL;

– підсистеми оперативного аналізу, що використовує технології оперативної аналітичної обробки даних OLAP в рамках концепції багатовимірного представлення даних;

– підсистеми інтелектуального аналізу, що реалізує методи і алгоритми Data Mining.

Сховище даних (Data Warehouse) — предметно-орієнтована інформаційна база даних, призначена для збору і зберігання інформації, підготовки звітів, аналізу інформації з метою підтримки прийняття рішень. Будується на базі клієнт-серверної архітектури, реляційної СУБД та утиліт підтримки прийняття рішень.

Зберігання просторових даних в ГІС-системах файловим способом перестало бути ефективним: об'єми даних постійно ростуть, з'являється необхідність змішаних запитів, спільної обробки різнорідних даних (як просторових, так і атрибутивних), а також одночасного доступу до них багатьох користувачів. У зв'язку з цим окреме зберігання просторових даних у файлах ускладнює і гальмує процес роботи з усією інформацією в цілому. Сховища просторових даних (СПД) дозволяють розв'язати цю проблему, адже забезпечують:

– цілісне зберігання інформації про об'єкт, як просторової, так і описової, в єдиній базі даних;

– можливість роботи, як з векторною, так і з растровою інформацією;

– можливість швидкого пошуку і аналізу даних одночасно за всіма характеристиками;

– підтримку просторового індексування, що дозволяє істотно підвищити продуктивність роботи з просторовими об'єктами;

– використання можливостей стандартної мови запитів, що надає можливість обробляти просторові дані на стороні сервера, збільшуючи продуктивність, зменшуючи вимоги до функціональності ГІС та надаючи єдині правила обробки даних;

– мінімізацію витрат на модернізацію існуючих систем;

– підтримку стандартів OpenGIS.

Окрім можливості працювати з єдиним джерелом інформації, аналітики повинні мати зручні засоби візуалізації даних, агрегації, пошуку тенденцій, прогнозування. Незважаючи на різноманіття аналітичної діяльності, можна виділити типові технології аналізу даних, кожній з яких відповідає певний набір інструментальних засобів. Разом зі сховищем даних ці засоби забезпечують повне рішення автоматизації аналітичної діяльності та створення СППР.

При завантаженні даних з OLTP-системи в СД відбувається дублювання даних. Проте в ході цього завантаження дані фільтруються, оскільки не усі з них мають значення для проведення процедур аналізу. У СД зберігається узагальнена інформація, яка в OLTP-системі відсутня (рис. 2).

Надмірність інформації можна звести до нуля, використовуючи віртуальне СД. У такій системі дані з OLTP-системи не копіюються в єдине сховище. Вони витягаються, перетворюються та інтегруються безпосередньо при виконанні аналітичних запитів в режимі реального часу. Перевагою віртуального СД є мінімізація об'єму даних, що зберігаються, і робота з поточними, тобто актуальними даними.

Недоліками віртуального СД можна вважати більш високий, у порівнянні з фізичним СД, час обробки запитів, необхідність постійної доступності усіх OLTP-джерел, зниження швидкодії OLTP-систем. OLTP-системи не орієнтовані на зберігання даних за тривалий період часу, в міру необхідності дані вивантажуються в архівні, тому не завжди є фізична можливість отримання повного набору даних з СД.

Скорочення витрат на проектування і розробку СД може бути досягнуте шляхом створення вітрин

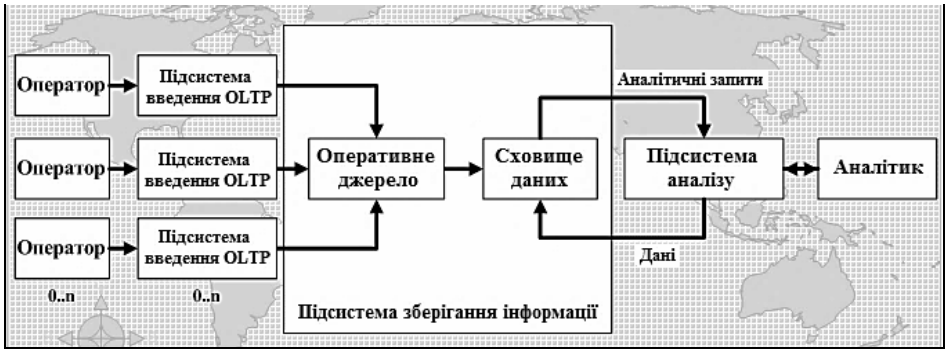


Рис. 2. Структура СППР з фізичним сховищем даних

даних (ВД). ВД — це спрощений варіант СД, що містить тільки тематично об'єднані дані (рис. 3).

ВД містять дані, орієнтовані на конкретного користувача, отже вони істотно менше фізичного СД за об'ємом і для їх реалізації потрібно менше витрат. ВД розробляються та впроваджуються набагато швидше СД, при цьому ефект від їх використання стає помітним відразу після впровадження.

Недоліками ВД є багатократне зберігання одних і тих же даних в різних ВД, а також відсутність консолідованості на рівні предметної області.

Звичайно, можливе й комплексне використання сховищ даних та вітрин даних в системах підтримки прийняття рішень. СД в цьому випадку є єдиним джерелом даних для усієї предметної області, а ВД – підмножинами даних зі сховища, організованими для представлення інформації по тематичних розділах цієї області. У тому випадку, якщо користувачеві недостатньо даних у ВД, яка для нього створювалась, він може звернутися до СД (рис. 4). Перевагами такого рішення є простота створення й наповнення ВД, оскільки наповнення походить з єдиного стандартизованого джерела очищених даних, тобто з СД, простота розширення за рахунок додавання нових ВД, а також зниження навантаження на основне СД. Недоліки полягають у надмірності, оскільки дані зберігаються і в СД, і у ВД, а також додаткових витратах на розробку СППР із СД та ВД.

Основна проблематика при проектуванні та створенні СПД в СППР полягає в такому.

1. *Інтеграція різнорідних даних*. Дані в СПД поступають з різнорідних OLTP-систем, які фізично можуть бути розташовані на різних вузлах мережі. При проектуванні і розробці СПД необхідно вирішувати задачу інтеграції різних програмних платформ зберігання.

2. *Ефективне зберігання і обробка великих об'ємів даних.* Побудова СПД припускає накопичення даних за значні періоди часу, що веде до постійного зростання об'ємів дискової пам'яті, а також зростання об'ємів оперативної пам'яті, які потрібні для обробки цих даних.

3. *Організація багаторівневих довідників метаданих*. Кінцевим користувачам СППР потрібні метадані, що описують структуру та характеристики даних, які зберігаються в СПД, а також інструменти їх візуалізації.

4. Забезпечення інформаційної безпеки СПД. Інформація про діяльність компанії, як правило, відноситься до комерційної таємниці та підлягає захисту; крім того, в СПД можуть міститися персональні дані клієнтів та співробітників, які також необхідно захищати. Для виконання цієї функції має бути розроблена політика безпеки СПД та пов'язаної з ним інфраструктури, а також реалізовані передбачені в політиці організаційні та програмно-технічні заходи щодо захисту інформації.

Просторова інформація є основною для повсякденної діяльності організацій, що надають послуги у сфері геоінформаційних технологій. Усі отримані просторові дані піддаються аналізу та оцінці, тобто досліджуються їх властивості та якість, можливість служити джерелами для вирішення завдань геоінформатики тощо.

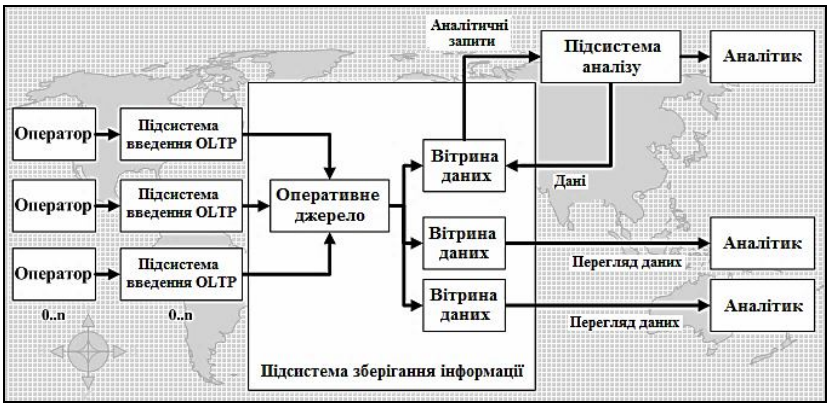


Рис. 3. Структура СППР із самостійними вітринами даних

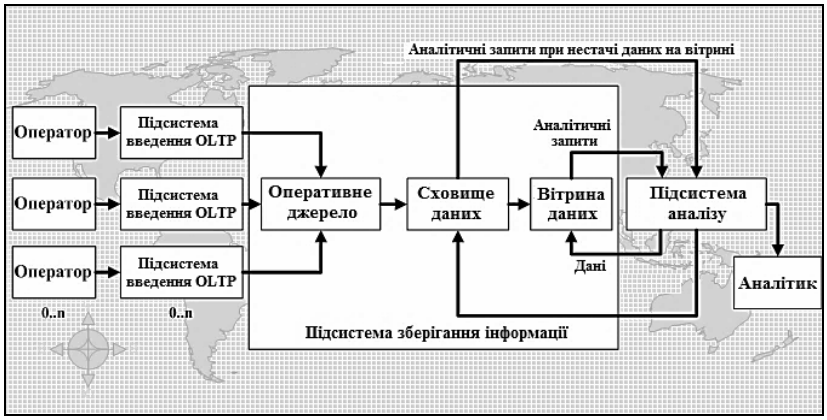


Рис. 4. Структура СППР зі сховищем даних та вітринами даних

Постановка задачі

Отже, із зазначеного вище виникає актуальна задача створення СПД, аспекти якої полягають в такому.

1. *Оцінка математичної основи* полягає в тому, щоб з'ясувати доцільність прийнятого масштабу, придатність використовуваної проекції з точки зору величини й характеру розподілу спотворень, а також можливість використання просторових даних для кількісних визначень із заданою точністю.

2. *Оцінка наукової достовірності* має встановлювати відповідність прийнятим науковим концепціям, правильність передачі реально існуючих просторових закономірностей і зв'язків, типових рис явищ.

3. *Оцінка повноти й сучасності,* передусім, торкається об'єму інформації, що знаходиться в джерелі просторової інформації. Головну роль грають два чинники: вивченість явища й призначення джерела. Від цього залежать відбір

об'єктів, що представляються, подробиці генералізації, способи графічного оформлення. Навантаження джерела може бути оцінене кількісно, наприклад, шляхом підрахунку числа об'єктів на одиницю площі. Інформативність джерела просторових даних у більшості випадків не піддається чисельній оцінці і безпосередньо залежить від цілей та методів рішення завдань. Сучасність джерела характеризується його відповідністю певній даті, періоду. Велику роль грає визначення старіння просторової інформації.

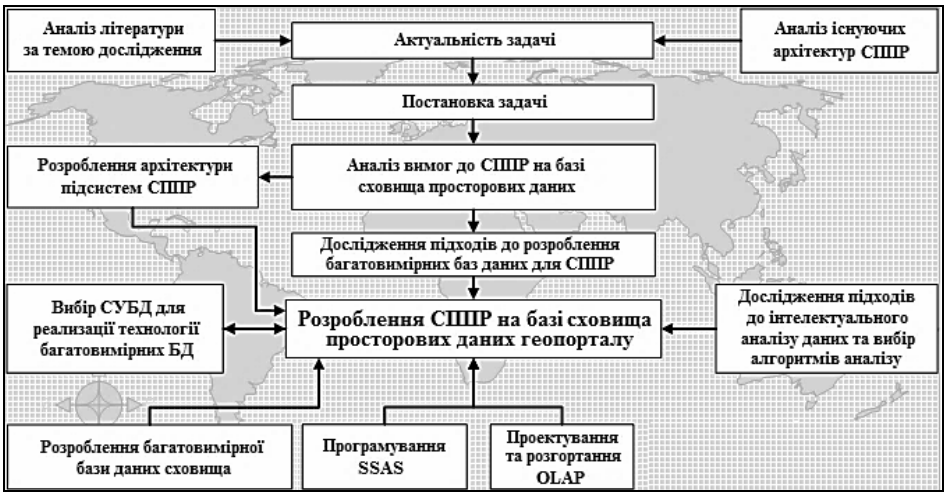


Рис. 5. Структурна схема досліджень

4. *Оцінка географічної точності* характеризує величини погрішностей, що виникають при змінюванні просторових даних (довжин, площ, кутів та інших картометричних характеристик) при переміщуванні зони спостереження по картам, планам тощо.

5. *Оцінка якості оформлення* та видання розпочинається із з'ясування розрізнюваності знаків, наочності та зрозумілості позначень тощо. З джерел даних інформація переміщується на основі певного регламенту в централізоване сховище, де здійснюється її первинна обробка. Часто виникає ситуація, коли локальні бази даних (джерела) містять однотипну за сенсом інформацію. Перед завантаженням у сховище уся ця інформація має бути погоджена, щоб забезпечити цілісність та несуперечність аналітичних даних.

6. *Тип географічної проекції.* При створенні СПД головною вимогою до даних дистанційного зондування Землі (ДДЗ) являється наявність єдиної проекції. Тому на етапі первинної обробки здійснюється переведення матеріалів ДЗЗ у цифрову форму та прив'язка їх до конкретної системи координат. У результаті формуються бази відповідних векторних матеріалів, а також бази атрибутивних даних.

Таким чином, предметом дослідження є розроблення геоінформаційної системи підтримки прийняття рішень на базі сховища просторових даних геопорталу. Об'єктом дослідження є процес об'єднання та інтеграції у сховище геопорталу інформації, що містить різні типи просторових даних. **Мета роботи** – підвищення оперативності статистичного і прогнозного аналізу геоданих для ведення звітності та підтримки прийняття рішень геоінформаційних задач в режимі реального часу. Структурну схему виконаних досліджень наведено на рис. 5.

Багатовимірний аналіз і зберігання даних в системах підтримки прийняття рішень

Науково-методичні основи багатовимірного аналізу даних. Метою інтелектуального аналізу даних (*англ.* Data Mining) є виявлення неявних закономірностей в наборах даних. Як науковий напрям він став активно розвиватися в 90-х роках XX століття, що було викликано широким поширенням технологій автоматизованої обробки інформації та накопиченням в комп'ютерних системах великих об'ємів даних. Існуючі технології дозволяли швидко знайти у базі даних потрібну інформацію, але цього у багатьох випадках було вже недостатньо. Виникла потреба пошуку взаємозв'язків між окремими подіями серед великих об'ємів даних, для чого знадобилися методи математичної статистики, теорії баз даних, теорії штучного інтелекту і знання з ряду інших областей.

Класичним вважається визначення, дане одним із засновників напряму, Григорієм П'ятецьким-Шапіро: *Data Mining* — дослідження й виявлення «машиною» (алгоритмами, засобами штучного інтелекту) в сирих даних нетривіальних, практично корисних та доступних для інтерпретації прихованих знань, які раніше не були відомі.

Аналіз літератури з цієї тематики та урахування різноманітності форм представлення даних, використовуваних алгоритмів і сфер їх застосування дають підставу для висновку, що інтелектуальний аналіз даних може проводитися, зокрема, за допомогою таких програмних продуктів:

– спеціалізованих програмних продуктів для інтелектуального аналізу;
– математичних пакетів;
– електронних таблиць (і різного роду надбудов над ними);
– засобів, інтегрованих в системи управління базами даних.

У рамках цієї роботи в першу чергу розглядатимуться засоби, інтегровані в СУБД.

В ході проведення інтелектуального аналізу даних проводиться дослідження безлічі об'єктів (чи варіантів). У більшості випадків його можна представити у вигляді таблиці, кожен рядок якої відповідає одному з варіантів, а в стовпцях містяться значення параметрів, що його характеризують.

Залежна змінна — параметр, значення якого розглядаємо як залежне від інших параметрів (незалежних змінних). Власне, цю залежність й необхідно визначити, використовуючи методи інтелектуального аналізу даних. Основні завдання інтелектуального аналізу даних полягають в такому.

1. *Завдання класифікації* полягає в тому, що для кожного варіанту визначається категорія або клас, до якого він належить. Для вирішення цього завдання необхідно, щоб безліч класів була відома заздалегідь та була б кінцевою та рахунковою.

2. *Завдання регресії* багато в чому схоже на завдання класифікації, але в ході рішення задачі регресії здійснюється пошук шаблонів для визначення числових значень параметрів, що цікавлять, при цьому ці параметри, як правило, числа з безперервних діапазонів.

3. *Завдання прогнозування* нових значень на підставі наявних значень числової послідовності (чи декількох послідовностей, між значеннями яких спостерігається кореляція). При цьому можуть враховуватися наявні тенденції (тренди), сезонність та інші чинники.

4. *Завдання кластеризації* полягає в діленні безлічі об'єктів на групи (кластери), схожі за параметрами. При цьому, на відміну від класифікації, число кластерів та їх характеристик може бути заздалегідь невідоме і визначатися в процесі побудови кластерів, виходячи зі ступеня близькості об'єднуваних об'єктів за сукупністю параметрів. Інша назва цього завдання — *сегментація*.

5. *Завдання визначення взаємозв'язків*, яке також називається *завданням пошуку асоціативних правил*, полягає у визначенні наборів об'єктів, що часто зустрічаються серед безлічі подібних наборів.

6. *Аналіз послідовностей* або *секвенційний аналіз* одними авторами розглядається як варіант попереднього завдання, іншими — виділяється окремо. Метою, в даному випадку, являється виявлення закономірностей в послідовностях подій. Подібна інформація дозволяє, наприклад, попередити збій в роботі інформаційної системи за рахунок отримання сигналу про настання події, часто передуючої збою.

7. *Аналіз відхилень* дозволяє відшукати серед безлічі подій ті, які істотно відрізняються від норми. Відхилення може сигналізувати про якусь незвичайну подію або, наприклад, про помилку введення даних оператором.

OLAP (*англ.* Online Analytical Processing) — технологія комплексного багатовимірного аналізу даних. OLAP — це ключовий компонент організації сховищ даних та СППР. Концепція OLAP була описана в 1993 році Едгаром Коддом, відомим дослідником баз даних і автором реляційної моделі бази даних. У 1995 році на основі принципів, викладених Коддом, були сформульовані такі вимоги до застосунків для багатовимірного аналізу:

– надання користувачеві результатів аналізу за прийнятний час (зазвичай, не більше 5 с), нехай навіть ціною менш детального аналізу;

– можливість здійснення будь-якого логічного і статистичного аналізу, характерного для цього застосування, та його збереження в доступному для кінцевого користувача вигляді;

– розрахований на велику кількість користувачів доступ до даних з підтримкою відповідних механізмів блокувань і засобів авторизованого доступу;

– багатовимірне концептуальне представлення даних, включаючи повну підтримку для ієрархій і множинних ієрархій (це — ключова вимога OLAP);

– можливість звертатися до будь-якої потрібної інформації незалежно від її об'єму й місця зберігання.

Основне призначення OLAP-систем — підтримка аналітичної діяльності та довільних запитів користувачів-аналітиків. Мета OLAP-аналізу — перевірка виникаючих гіпотез.

Категорії даних та інформаційні потоки у сховищі просторових даних. Усі дані в СПД поділяються на категорії (рис. 6).

Детальні дані — це дані, що переносяться безпосередньо з OLTP-підсистем. Вони відповідають елементарним подіям, які фіксуються в OLTP-системах та підрозділяються на:

– *вимірювання* – набори даних, необхідні для опису подій;

– *факти* – дані, що відбивають суть події;

– *агреговані (узагальнені) дані* — дані, що отримуються на підставі детальних шляхом підсумовування по певних вимірюваннях;

– *метадані* – дані про дані, що містяться у СПД і можуть описувати об'єкти предметної області, інформація щодо яких міститься у СПД, категорії користувачів, що використовують дані з СПД, місця та способи зберігання даних, дії, виконувані над даними, час та причини виконання різних дій над даними;

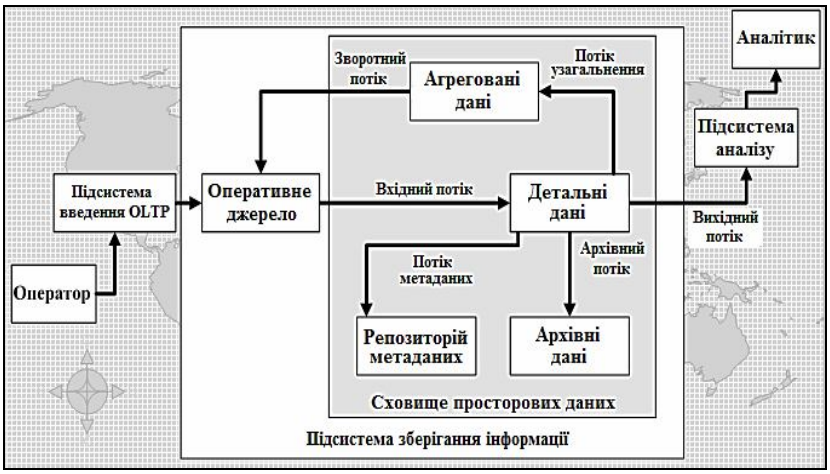


Рис. 6. Категорії даних та інформаційні потоки у СПД

Дані у СПД утворюють такі інформаційні потоки (рис. 6):

– *вхідний потік* – утворюється даними, що копіюються з OLTP-систем в СПД, при цьому дані очищуються і збагачуються шляхом додавання нових атрибутів;

– *потік узагальнення* – утворюється агрегацією детальних даних та їх збереженням у СПД;

– *архівний потік* — утворюється переміщенням детальних даних, кількість звернень до яких знизилася;

– *потік метаданих* – утворюється потоком інформації про дані, спрямовані до репозиторію даних;

– *вихідний потік* — утворюється даними, які витягуються користувачами;

– *зворотний потік* — утворюється очищеними даними, записуваними назад в OLTP-системи.

Структура та принципи функціонування системи багатовимірного аналізу даних в реальному часі. В процесі аналізу даних часто виникає необхідність побудови залежностей між різними їх параметрами, число яких може бути значним. СППР мають засоби надання користувачеві агрегованих даних для різних вибірок з початкового набору в зручному для сприйняття та аналізу вигляді. В результаті, функції агрегованих просторових даних утворюють багатовимірний нереляційний набір, який називають OLAP-кубом. Осі цього кубу містять параметри, а комірки — залежні від них агреговані дані (рис. 7). Уздовж кожної осі дані можуть бути організовані у вигляді ієрархії, яка представляє різні рівні їх деталізації.

Завдяки такій моделі даних користувачі можуть формулювати складні запити, генерувати звіти, отримувати підмножини даних. OLAP-куб може бути реалізований на основі універсальних реляційних СУБД або спеціалізованим програмним забезпеченням.

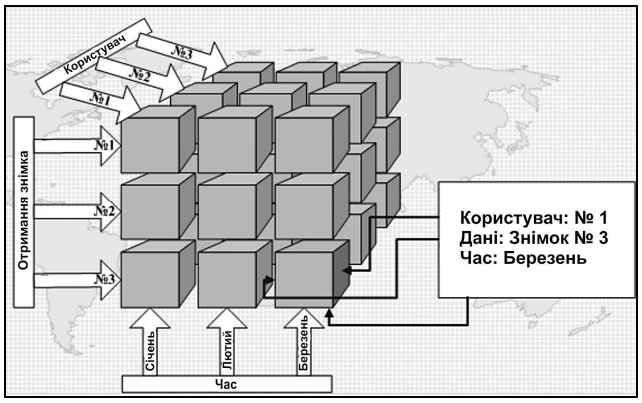


Рис. 7. Простий (тривимірний) OLAP-куб

Осі куба є вимірами, по яких відкладають параметри, що відносяться до аналізованої предметної області. На перетині осей вимірів розташовуються дані, що кількісно характеризують аналізовані факти-заходи. Над OLAP-кубом можуть виконуватися такі операції.

1. *Зріз* — формується підмножина багатовимірного масиву даних, що відповідає єдиному значенню одного або декількох елементів вимірів, які входять в цю підмножину.

2. *Обертання* — зміна розташування вимірів, представлених в звіті або на сторінці, що відображається. Наприклад, операція обертання може полягати в перестановці місцями рядків і стовпців таблиці. Крім того, обертанням куба даних є переміщення позатабличних вимірів на місце вимірів, представлених на сторінці, що відображається, й навпаки.

3. *Консолідація й деталізація* — операції, які визначають перехід за напрямом від детального представлення даних до агрегованого й навпаки, відповідно. Напрям деталізації може бути заданий як за ієрархією окремих вимірів, так і згідно з іншими стосунками, встановленими у рамках вимірів або між вимірами.

Таблиці фактів у сховищі просторових даних. Таблиця фактів є основною таблицею сховища даних. Вона містить відомості про об'єкти або події, сукупність яких надалі аналізуватиметься. Виділяють чотири типи фактів:

– факти, пов'язані з транзакціями (Transaction facts) і засновані на окремих подіях;

– факти, пов'язані з "моментальними знімками" (Snapshot facts) і засновані на стані об'єкту в певні моменти часу, наприклад, на кінець дня або місяця;

– факти, пов'язані з елементами документу (Line-item facts) і засновані на тому або іншому документі (містять детальну інформацію про елементи цього документу);

– факти, пов'язані з подіями або станом об'єкту (Event or state facts) — представляють виникнення події без подробиць про об'єкт.

Таблиця фактів містить унікальний складений ключ, що об'єднує первинні ключі таблиць вимірів. Найчастіше в цих цілях використовуються цілочисельні значення, або значення типу «дата/час», оскільки таблиця фактів може містити сотні тисяч або навіть мільйони записів, а отже зберігати в ній текстові описи, що повторюються, невигідно. При цьому як ключові, так і деякі неключові поля мають відповідати майбутнім вимірам OLAP-куба. Окрім цього, таблиця фактів містить одне або декілька числових полів, на підставі яких надалі будуть отримані агреговані дані.

Для багатовимірного аналізу придатні таблиці фактів, що містять якомога детальніші дані (тобто ті, що відповідають членам нижніх рівнів ієрархії відповідних вимірів).

У таблиці фактів немає ніяких відомостей про те, як групувати записи при обчисленні агрегованих даних — ці відомості містяться в таблицях вимірів і використовуються для побудови ієрархій у вимірах куба.

Таблиці вимірів у сховищі просторових даних. Таблиці вимірів містять незмінні або рідко змінювані дані. У переважній більшості випадків ці дані містять по одному запису для кожного члена нижнього рівня ієрархії у вимірі. Таблиці вимірів також містять як мінімум одне описове поле (зазвичай з ім'ям члена виміру) та цілочисельне ключове поле (зазвичай, це сурогатний ключ) для однозначної ідентифікації члена виміру. Якщо майбутній вимір, заснований на цій таблиці вимірів, містить ієрархію, то таблиця вимірів також може містити поля, що вказують на «батька» цього члена в цій ієрархії. Таблиця вимірів може мати додаткові атрибути членів вимірів, що містилися в початковій оперативній базі даних (наприклад, адреси й телефони клієнтів). Кожна таблиця вимірів повинна знаходитися у відношенні «один до багатьох» з таблицею фактів. Швидкість зростання таблиць вимірів має бути незначною у порівнянні зі швидкістю зростання таблиці фактів.

Архітектура СППР на базі сховища просторових даних геопорталу

Повномасштабна СППР має виконувати складні й різноманітні функції, що включають збір даних з різних джерел, їх узгодження, перетворення й завантаження у сховища, зберігання аналітичної інформації, регламентну звітність, підтримку довільних запитів, багатовимірний аналіз.

Нині існують фактичні стандарти побудови СППР, заснованих на концепції СД. Ці стандарти спираються на сучасні дослідження і загальносвітову практику створення СПД і аналітичних систем.

На підставі проведеного аналізу архітектури сучасних СППР для створення системи підтримки прийняття рішень на базі сховища просторових даних геопорталу пропонується використовувати структуру, що у загальному вигляді описується схемою з трьома виділеними шарами (рис. 8).

Дані поступають з різних OLTP-систем, із зовнішніх джерел та операційних систем відповідно до встановленого регламенту і форм звітності. Уся ця інформація перевіряється, узгоджується, перетворюється та поміщається у сховище та вітрини даних. Після цього користувачі за допомогою спеціалізованих інструментальних засобів отримують необхідну їм інформацію для побудови різних табличних і графічних представлень, прогнозування, моделювання та виконання інших аналітичних завдань.

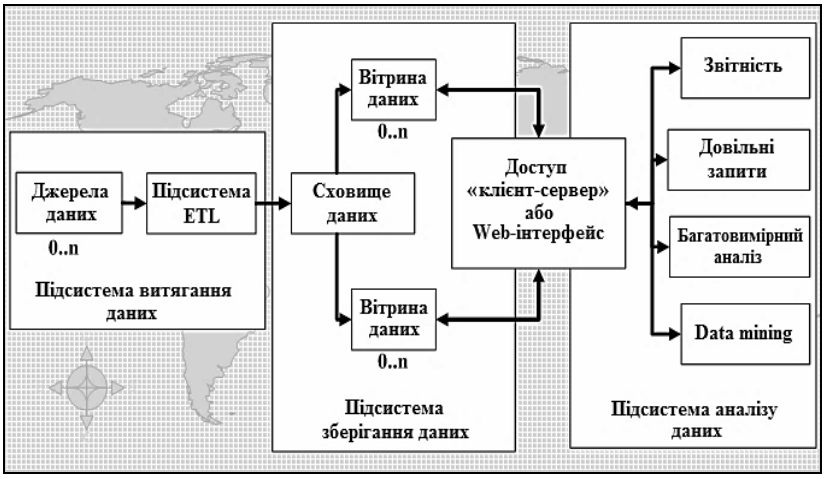


Рис. 8. Архітектура СППР на основі технології сховищ просторових даних

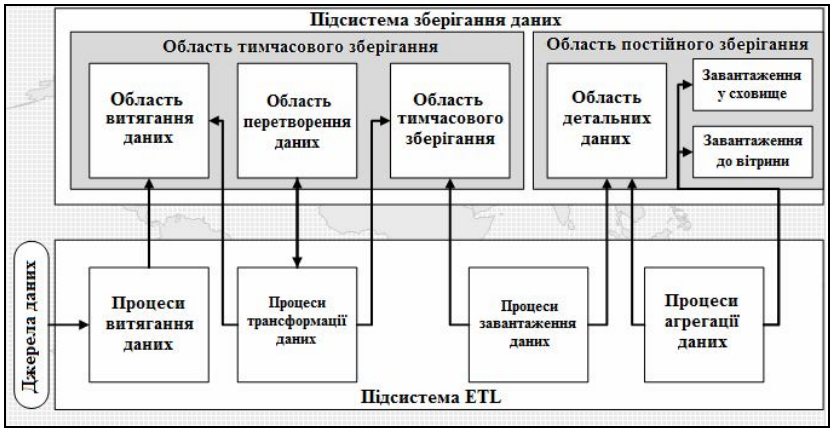


Рис. 9. Функціональна схема підсистеми ETL

Підсистема витягання, перетворення і завантаження даних. З джерел даних інформація переміщується у сховище даних. Необхідні для сховища дані не зберігаються в остаточному виді в жодній з OLTP-систем, ці дані зазвичай можна отримати з цих систем шляхом спеціальних перетворень, обчислень і агрегації. Завантаження даних з джерел у сховища має надавати такі можливості:

– витягати дані з різних баз даних і текстових файлів;

– виконувати різні типи узгодження та очищення даних;

– перетворювати дані при переміщенні їх від джерел до сховища;

– завантажувати погоджені та "очищені" дані в структури сховища.

Підсистема ETL (Extract, Transform, Load) в СПД повинна забезпечувати виконання цих функцій. Виходячи з цього, можна сформувати основні вимоги до підсистеми ETL :

– мати спроможність збирати дані від різних систем (джерел), навіть якщо одна або декілька систем в результаті збою не змогли в строк завершити свою роботу і надати необхідні дані;

– отримана інформація має бути розпізнана та перетворена відповідно до алгоритмів перетворення, а також за допомогою систем ведення звітності та метаданих;

– перетворена інформація має бути завантажена в зони тимчасового зберігання у сховищі даних та у вітрини даних, як того вимагає виробничий процес;

– засоби ETL мають забезпечувати високу пропускну спроможність для того, щоб збирати та вивантажувати постійно зростаючі об'єми даних;

– засоби ETL повинні мати потужні обчислювальні можливості та масштабованість для скорочення часу обробки даних з метою зменшення затримок в наданні даних для аналітичних робіт;

– засоби ETL мають надавати різноманітні інструменти витягання даних в різних режимах роботи — від пакетного збору для систем, некритичних до тимчасових затримок, до інкрементної обробки в режимі, близькому до реального часу.

Функціональну схему підсистеми ETL представлено на рис. 9.

Процеси витягання даних забезпечують отримання даних із джерел та зберігають ці дані в інтерфейсні таблиці області витягання даних.

Процеси перетворення (трансформації) даних витягають

дані з інтерфейсних таблиць, проводять захоплення змін, перетворення даних за певними правилами зі збереженням проміжних результатів в області перетворення даних та зберігають результат в області оперативного зберігання. Процеси перетворення даних виконують завдання наповнення таблиць області перетворення даних і області завантаження даних.

Після проведення перетворення даних вони завантажуються в область оперативного зберігання. Процеси завантаження даних проводять читання даних з області оперативного (тимчасового) зберігання, перевіряють посилальну цілісність даних та проводять їх завантаження в область детальних даних. Процеси агрегації даних проводять читання детальних даних і запис їх у СПД та вітрини даних.

Підсистема зберігання даних. Підсистема зберігання даних призначена для безпосереднього зберігання значимої, перевіреної, погодженої, несуперечливої та хронологічно цілісної інформації, яку з досить високою мірою упевненості можна вважати достовірною. СД не орієнтоване на рішення якої-небудь певної функціональної аналітичної задачі. Метою СД є забезпечення цілісності та підтримка хронології даних. У зв'язку з цим у більшості випадків для виконання певного комплексу функціонально замкнутих аналітичних завдань раціонально створювати вітрини даних. По суті вітрина є відносно невеликою, але що найважливіше, являє собою функціонально-орієнтоване СД, в якому інформація зберігається спеціальним чином, оптимізованим з точки зору вирішення конкретних аналітичних завдань певного підрозділу або групи аналітиків.

У просторових сховищах (рис. 10) первинні дані перетворюються в інформацію, придатну для використання на етапі підготовки даних. Просторова модель сховища даних містить ту ж атомарну інформацію, що й нормалізована модель, але інформація структурована по-іншому, щоб полегшити її використання й виконання запитів. Запити в процесі виконання звертаються до усе більш низького рівня деталізації без додаткового перепрограмування з боку користувачів або розробників застосунків.

Підсистема аналізу даних. Для організації доступу аналітиків до даних СПД та ВД використовуються спеціалізовані робочі місця, що підтримують необхідні технології як оперативного, так і довготривалого аналізу. Результати роботи аналітиків оформляються у вигляді звітів, графіків, рекомендацій та зберігаються як на локальному комп'ютері, так і в загальнодоступному вузлі локальної мережі.

Аналітична діяльність може бути досить різноманітною і визначатись характером вирішуваних завдань, особливостями компанії, рівнем і ступенем підготовленості аналітиків. У зв'язку з цим сучасний підхід до інструментальних засобів аналізу не обмежується використанням якоїсь однієї технології. В межах даної роботи у якості аналітичної підсистеми пропонується до використання СУБД Microsoft SQL Server, у тому числі й на підставі того, що SQL Server підтримує типи даних *geometry* та *geography*. У цих типах підтримуються методи і властивості, що дозволяють створювати, порівнювати та аналізувати просторові дані. Тип даних *geometry* використовується для планарних Евклідових даних. Він відповідає специфікації консорціуму OGC «Simple Features for QL». Тип даних *geography* використовується для зберігання еліптичних даних, відповідних координатам широти і довготи, у тому числі й даним GPS та GNSS.

В межах даної роботи не ставиться за мету виконати прив'язку до певної версії Microsoft SQL Server, адже даний продукт постійно удосконалюється, розширюючи можливості користувачів. Доцільно відзначити, наприклад, що актуальний і доступний (а у версії Express взагалі безкоштовний) на сьогодні пакет Microsoft SQL Server 2019 забезпечує інтелектуальний аналіз структурованих та неструктурованих даних, їх запити за допомогою платформи даних з найкращими в галузі показниками продуктивності та безпеки. При цьому забезпечуються переваги масштабованості та доступності для критично важливих інтелектуальних застосунків та сховищ даних. Безпека досягається наявними засобами шифрування даних під час зберігання та передачі. Взагалі, СУБД SQL Server вже більш семи років визнається найменш вразливою за результатами тестування Національного інституту стандартів і технологій США (NIST).

Засоби бізнес-аналітики SQL Server надають можливість обробляти будь-які дані та спостерігати за розвитком ситуації в режимі реального часу, отримуючи до мільонну прогнозів за секунду (як з підключенням до Internet, так і без нього).

Разом з тим, слід зауважити, що запропоновані в даній роботі програмні розробки можуть бути застосовані й з використанням більш ранніх версій SQL Server (принаймні, щонайменш навіть із релізом Microsoft SQL Server 2008).

Інтелектуальний аналіз даних за допомогою СУБД Microsoft SQL Server. Розглянемо детальніше реалізацію засобів інтелектуального аналізу даних в СУБД Microsoft SQL Server. На рис. 11 схематично

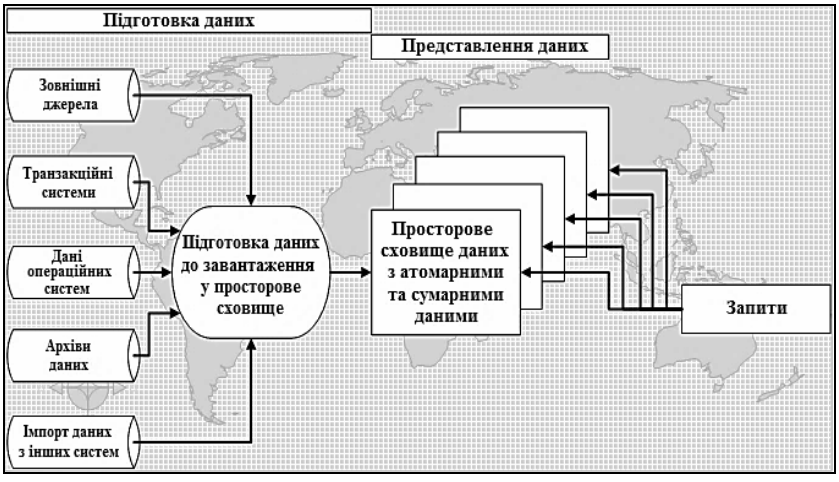


Рис. 10. Архітектура просторового сховища даних

представлено компоненти СУБД SQL Server та виділено підсистему інтелектуального аналізу даних та управління багатовимірними даними.

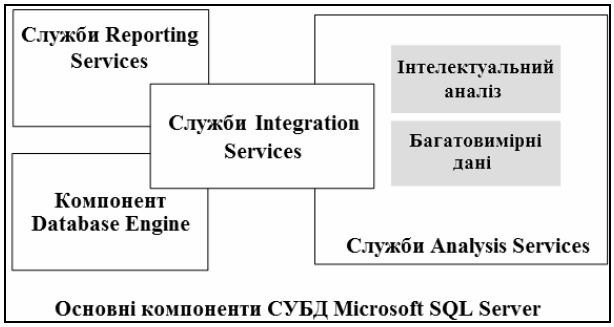


Рис. 11. Служби і компоненти СУБД Microsoft SQL Server

Служби Analysis Services надають такі функції та засоби для створення рішень по інтелектуальному аналізу даних:

– набір стандартних алгоритмів інтелектуального аналізу даних;

– конструктор інтелектуального аналізу даних, призначений для створення та перегляду моделей інтелектуального аналізу даних, управління ними та побудови прогнозів;

– мова управління інтелектуальним аналізом даних.

Структура інтелектуального аналізу даних може бути представлена як сукупність початкових даних і опису способів їх обробки. Структура містить моделі, які використовуються для аналізу даних. Одна структура може підтримувати декілька моделей. У структурі інтелектуального аналізу даних можна виділити повчальний та перевірочний набір даних, задавши процентне відношення або об'єм даних.

Модель інтелектуального аналізу даних є поєднанням самих даних, алгоритму інтелектуального аналізу даних і колекції значень параметрів та фільтрів, що управляють використанням і обробкою даних. Модель інтелектуального аналізу даних визначається на мові розширень інтелектуального аналізу даних або за допомогою майстра інтелектуального аналізу даних в середовищі Business Intelligence Development Studio (BIDS).

Алгоритм інтелектуального аналізу даних є механізмом, що створює модель інтелектуального аналізу даних. Щоб створити модель, алгоритм спочатку аналізує набір даних, здійснюючи пошук певних закономірностей і трендів. Алгоритм використовує результати цього аналізу для визначення параметрів моделі інтелектуального аналізу даних. Потім ці параметри застосовуються до усього набору даних, щоб виявити придатні до використання закономірності та отримати детальну статистику.

Нижче перераховано алгоритми інтелектуального аналізу даних, які можуть використовуватися із використанням Microsoft SQL Server:

– спрощений алгоритм Байеса – Naive Bayes;

– алгоритм дерева прийняття рішень – Decision Trees;

– алгоритм тимчасових рядів – Time Series;

– алгоритм кластеризації – Clustering;

– алгоритм кластеризації послідовностей – Microsoft Sequence Clustering;

– алгоритм взаємозв'язків – Association Rules;

– алгоритм нейронної мережі – Neural Network;

– алгоритм лінійної регресії – Linear Regression;

– алгоритм логістичної регресії – Logistic Regression.

Обробляти запити інтелектуального аналізу можна за допомогою стандартних алгоритмів, перелічених вище, а також й алгоритмів сторонніх розробників. На рис. 12 схематично представлено етапи інтелектуального аналізу даних і засоби Microsoft SQL Server, за допомогою яких вони виконуються. Вказані етапи не обов'язково будуть пройдені один за іншим. На одному з проміжних етапів може з'ясуватися, що в поточній постановці для вирішення завдання бракує даних і знадобиться знову повернутися до першого етапу.

На етапі *постановки задачі* необхідно визначити, що є метою аналізу. Вимагається вирішити низку завдань:

– з'ясувати, що саме необхідно визначити в результаті аналізу;

– зробити прогнози на підставі моделі інтелектуального аналізу даних або просто знайти змістовні закономірності та взаємозв'язки між використовуваними даними;

– з'ясувати у разі потреби у прогнозі, який атрибут набору даних необхідно спрогнозувати;

– знайти взаємозв'язки між таблицями, якщо існує декілька таблиць;

– з'ясувати, яким чином розподіляються дані і чи дають вони точне уявлення про предметну область.

Зазвичай, в процесі постановки задачі аналітик працює спільно з фахівцями в предметній області.

Рис. 12. Етапи інтелектуального аналізу даних

Етап *підготовки даних* включає визначення джерел даних для аналізу, об'єднання даних та їх очищення. Використовувані дані можуть знаходитися в різних базах і на різних серверах, можуть бути представлені у вигляді текстових файлів, електронних таблиць, існувати в різноманітних форматах.

Для об'єднання та перетворення даних використовуються можливості сховища даних. Це дозволяє істотно автоматизувати процес підготовки даних. Зібрані таким чином дані, зазвичай, потребують додаткової обробки, яка й називається очищенням. В процесі очищення при необхідності може проводитися видалення "викидів" (нехарактерних та помилкових значень), обробка відсутніх значень параметрів, чисельне перетворення (наприклад, нормалізація) тощо.

Наступним етапом є *вивчення даних*, яке дозволить зрозуміти, наскільки адекватно підготовлений набір представляє досліджувану предметну область. Тут може проводитися пошук мінімальних і максимальних значень параметрів, аналіз розподілів значень та інших статистичних характеристик, порівняння отриманих результатів з уявленнями про предметну область. Етап аналізу щодо *побудови моделей* спочатку полягає у створенні структури даних, а потім у створенні для цих структур однієї або декількох моделей. Такі моделі включають вказівки на алгоритм інтелектуального аналізу даних, його параметри, а також аналізовані дані. При визначенні моделі можуть використовуватися будь-які фільтри. Таким чином, не усі наявні в описі структури даних використовуватимуться кожною створеною для них моделлю. Модель може проходити повчання, що полягає в застосуванні вибраного алгоритму до повчального набору даних. Після цього в ній зберігаються виявлені закономірності. Часто для вирішення задачі створюється декілька моделей, заснованих на різних алгоритмах, щоб була можливість порівняти результати та вибрати найкращу.

Етап *перевірки моделі* має за мету оцінку якості роботи створеної моделі перед початком її використання. Якщо створювалося декілька моделей, то на цьому етапі робиться вибір на користь тієї, що дасть найкращий результат. При вирішенні завдань інтелектуального аналізу, що передбачають певну якість видаваного моделлю прогнозу, цю якість можна оцінити на перевірочному наборі даних, для яких відоме значення прогнозованого параметра. Точність прогнозів, що створюються моделями, можна перевірити за допомогою таких засобів, як діаграма точності прогнозів і матриця класифікації.

Таким чином, на підставі проведеного аналізу архітектур сучасних систем підтримки прийняття рішень запропоновано структуру, яку найдоцільніше використовувати для побудови СППР на базі сховища просторових даних геопорталу. Проаналізовано основні функції, що мають виконувати підсистеми такої СППР, а саме – функції підсистеми витягання, перетворення і завантаження даних, функції підсистеми зберігання даних та підсистеми аналізу даних. Здійснено ґрунтовний вибір системи управління базами даних для практичної реалізації багатовимірної бази геоданих, яка виконує функції сховища просторових даних як основи СППР геопорталу.

Отже, наступним кроком є саме програмна реалізація багатовимірної бази (сховища) просторових даних із застосуванням СУБД Microsoft SQL Server.

Технологія розроблення багатовимірного сховища просторових даних геопорталу

Багатовимірний аналіз даних засобами Microsoft SQL Server. Microsoft SQL Server Analysis Services (SSAS) є базовою платформою для розгортання аналітичних систем (Business Intelligence, BI). Основні компоненти BI-рішення Microsoft наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – **Компоненти BI-рішення Microsoft**

Компонент	Опис компонента
SQL Server Database Engine	Масштабована, високопродуктивна СУБД, здатна зберігати великі об'єми даних, консолідації даних, що утворюються в результаті, в єдине сховище для аналізу і побудови звітів.
SQL Server Integration Services	Платформа для виконання операцій витягання, перетворення і завантаження даних, яке забезпечує заповнення СД та його синхронізацію з даними з різних джерел, що використовуються застосунками.
SQL Server Analysis Services	Забезпечує можливість побудови OLAP-рішень, включаючи можливість розрахунку ключових індикаторів продуктивності (KPI). Застосовується також для побудови data-mining-рішень, які використовують спеціалізовані алгоритми для виявлення і аналізу залежностей.
SQL Server Reporting Services	Інструментарій побудови звітів, призначений для створення, публікації і поширення деталізованих звітів, як для внутрішніх, так і для зовнішніх цілей.

Уніфікована багатовимірна модель даних служб SQL Server Analysis Services. Системи SSAS побудовані на основі уніфікованої багатовимірної моделі (Unified Dimensional Model, UDM), яка дозволяє різним типам клієнтських застосунків діставати доступ до даних, як з реляційних, так і з багатовимірних БД без використання окремих моделей для кожного типу баз даних. Основою UDM є архітектура вимірів на основі атрибутів, що надає можливість використати безліч джерел даних для створення багатовимірної моделі. Модель UDM може бути використана для створення єдиного представлення реляційних і багатовимірних даних, що включають об'єкти, аналітику, обчислення і метрики. Ця модель створює проміжний логічний рівень між фізичною реляційною базою даних, що використовується як джерело даних, і структурами куба, використовуваними для обробки призначених для користувача запитів. Модель UDM можна уявити собі як ядро системи OLAP, однією з ключових переваг якої є можливість поєднувати гнучкість і функціональне багатство традиційної реляційної моделі генерації звітів з потужними аналітичними засобами і високою продуктивністю класичної моделі системи OLAP.

За рахунок високої масштабованості служби SSAS дозволяють працювати з терабайтними базами даних і тисячами користувачів. Щоб забезпечити роботу великої кількості користувачів, уникнути конф-

ліктів при користуванні ресурсами і понизити витрати, є можливість горизонтального масштабування служб SSAS. Горизонтальне масштабування полягає в нарощуванні обчислювальних потужностей і місткості сховищ даних з метою зберігання і синхронізації декількох версій даних, але в той же час служби SSAS дозволяють організувати загальний доступ для читання інформації з однієї бази цих служб з декількох серверів, усуваючи необхідність в надмірних ресурсах. У той же час аналітичні куби служб SSAS забезпечують високошвидкісний доступ до великих об'ємів заздалегідь об'єднаних даних, а також дозволяють кінцевим користувачам отримувати дані, що цікавлять, в реальному часі.

Планування і програмування архітектури SSAS. Служби Microsoft SQL Server Analysis Services використовують як серверні, так і клієнтські компоненти для надання застосункам функцій оперативної аналітичної обробки (OLAP) та інтелектуального аналізу даних. Клієнти обмінюються даними із службами SSAS за допомогою загальнодоступного стандарту XML (для аналітики — XMLA), який є протоколом для виконання команд й отримання відповідей і надається у вигляді web-служби. Тому кожен екземпляр SSAS являється web-сервісом. Служби SSAS підтримують ядро локального куба, яке дозволяє застосункам клієнтів переглядати багатовимірні дані, що локально зберігаються. Екземпляр служб SSAS може містити декілька баз даних, а у базі даних можуть одночасно бути присутніми об'єкти OLAP і об'єкти інтелектуального аналізу даних. Застосування підключаються до вказаного екземпляра служб SSAS і до вказаної бази даних. На серверному комп'ютері може експлуатуватися декілька екземплярів служб SSAS. Кожен екземпляр служб SSAS розглядається як окремий об'єкт сервера і підключається до нього за допомогою окремого з'єднання. Кожен об'єкт сервера містить одне або декілька джерел даних, представлення джерела даних і об'єкти бази даних, а також складки і ролі безпеки. Кожен об'єкт бази даних містить декілька об'єктів-вимірів. Кожен об'єкт-вимір містить один або декілька атрибутів, що організовані у вигляді ієрархій.

З точки зору фізичної архітектури служби SSAS складаються із серверного та клієнтського компонентів. Серверний компонент служб SSAS реалізований у вигляді служби Microsoft Windows. Служби SSAS підтримують роботу декількох екземплярів на одному комп'ютері, при цьому кожен екземпляр служб SSAS реалізований як окремий екземпляр служби Windows. Клієнтська частина служб SSAS запускається як ізольована служба, і взаємодія з цією службою відбувається через XMLA з використанням протоколу HTTP або TCP.

Метою програміста SSAS є створення прикладної моделі даних. Прикладна модель визначає формат даних, в якому вони передаються аналітичним застосуванням. Основним користувачем прикладної моделі даних є клієнтський застосунок, що, власне, й представляє модель користувачеві. Прикладна модель створюється за допомогою мови багатовимірних виразів (Multidimensional Expressions, MDX), яка служить як для представлення запитів до багатовимірної бази даних, так і для опису моделі формування даних усередині неї за допомогою MDX-сценаріїв.

Існує стандартна бібліотека класів управління для служб SSAS, доступна для використання програмним способом через простір імен Microsoft.Analysis Services. Ці класи включені у файл AnalysisServices.dll і для роботи з ними слід вказати у проекті Visual Studio посилання на цю бібліотеку. Ці класи дозволяють створювати, змінювати і видаляти куби, виміри, структури інтелектуального аналізу, а також бази даних служб SSAS. Крім того, ці класи особливо корисні для автоматизації часто виконуваних завдань (наприклад, для створення нових секцій в групі заходів при появі нових даних в таблиці фактів або для повторного повчання моделі інтелектуального аналізу при появі нових даних). Розробникам зазначені класи дають можливість створювати інтерфейси адміністрування для певних наборів користувачів. Ці інтерфейси мають обмежувати доступ до об'єктів служб SSAS і дозволяти користувачам виконувати тільки певні завдання.

Розроблення багатовимірних баз даних. Середовище SQL BI Development Studio (BIDS) і середовище SQL Server Management Studio (SSMS) надають можливості для розробки рішень на основі багатовимірних баз даних. При створенні проекту автоматично створюється нове рішення, а в існуюче рішення при необхідності можна додавати інші проекти. Об'єкти, які містяться в проекті, залежать від його типу. Елементи в кожному контейнері проекту зберігаються у вигляді файлів, розташованих в теках проекту у файловій системі. Середовище SSMS розроблене для адміністрування і налаштування існуючих об'єктів в компонентах SQL Server Database Engine, Analysis Services, Integration Services і Reporting Services. Середовище BIDS призначене для розробки рішень в області аналітики, які включають функції служб Analysis Services, Integration Services і Reporting Services. Середовище SSMS надає інтегроване середовище для з'єднання з екземплярами служб SSAS, SQL Server і Reporting Services, щоб настроювати об'єкти, а також проводити адміністрування об'єктів і управляти ними в межах екземпляра служб SSAS. З використанням цих сценаріїв можна також використати середовище SSMS для створення або зміни об'єктів служб SSAS, але середовище SSMS не надає графічний інтерфейс для конструювання й визначення об'єктів.

Середовище BIDS надає інтегроване середовище для розробки аналітичних рішень. Середовище BIDS можна застосувати в проектному режимі, що використовує визначення на основі XML-об'єктів служб SSAS, тобто Integration Services і Reporting Services, що містяться в проектах і рішеннях. Використання середовища BIDS в проектному режимі означає, що зміни об'єктів служб SSAS в середовищі BIDS застосовуються до визначень об'єктів на основі XML, але не застосовуються безпосередньо до об'єкту в екземплярі служб SSAS до тих пір, поки рішення не буде розгорнуто. Середовище BIDS можна також використати в оперативному режимі, тобто безпосередньо підключатися до екземпляра служб SSAS і працювати з об'єктами існуючої бази даних. Створення проекту служб SSAS в середовищі BIDS виконується або за допомо-

гою шаблону проекту служб SSAS, або за допомогою майстра імпорту бази даних. Якщо в середовищі BIDS не завантажено жодне рішення, при створенні нового проекту служб SSAS буде автоматично створено нове рішення. Інакше новий проект служб SSAS може бути доданий до існуючого рішення або створений в новому рішенні. Для створення проекту служб SSAS в середовищі BIDS необхідно виконати такі кроки.

1. Створення проекту служб SSAS — виконується шляхом вибору шаблону проекту служб SSAS або за допомогою майстра імпорту бази даних, а також завдання імені та розміщення для нового проекту. Якщо створити проект служб SSAS, заснований на шаблоні, то він буде відкритий в середовищі BIDS, в якому можна визначити джерела даних, представлення джерел даних, кубів, вимірів, ролей та інших об'єктів служб SSAS. Можна сконструювати ці об'єкти на основі існуючих джерел даних або сформувати спеціальну реляційну структуру бази даних, засновану на кубі та конструкторі вимірів. Якщо знову створений проект служб SSAS був заснований на існуючій базі даних, метадані для цієї бази даних будуть відкриті в середовищі BIDS, в якому можна змінити метадані існуючої бази даних. Поки зміни не будуть розгорнуті, вони не вплинуть на існуючі бази даних.

2. Надання додаткових файлів, наприклад текстових файлів, що містять примітки до проекту, в теку «Різне» проекту у вікні оглядача рішень.

3. Визначення властивостей розгортання проекту, щоб задати сервер, на якому будуть розгорнуті метадані проекту та оброблювані об'єкти.

4. Збірка та розгортання рішення в екземплярі служб SSAS для тестування. При складанні рішення перевіряються визначення і залежності об'єктів, включених в проект, а також формується сценарій розгортання.

5. Перегляд і тестування розгорнутого проекту.

6. Змінення (при необхідності) визначень об'єктів і повторення у зв’язку з цим збірки та розгортання рішення.

У мові багатовимірних виразів можна звертатися із запитом до таких багатовимірних об'єктів, як куби, й витягати багатовимірні набори комірок, що містять дані куба. Базовий запит багатовимірних виразів — це інструкція SELECT, найбільш частий запит у багатовимірних виразах. Щоб отримати ґрунтовні знання про застосування багатовимірних виразів для запиту багатовимірних даних, необхідно зрозуміти, як в інструкції багатовимірних виразів SELECT визначається результуючий набір, синтаксис інструкції SELECT і як з її допомогою створювати прості запити. У багатовимірному вираженні інструкція SELECT вказує результуючий набір, що містить підмножину багатовимірних даних, яка витягається з куба. У службах SSAS сценарії багатовимірних виразів складаються з одного або декількох багатовимірних виразів або інструкцій, що заповнюють куб обчисленнями. Сценарій багатовимірних виразів визначає процес обчислень для куба і вважається частиною самого куба. Зміна сценарію багатовимірних виразів одразу змінює процес обчислень для куба. Для створення сценаріїв багатовимірних виразів можна скористатися конструктором кубів в середовищі BIDS. Взагалі, існує два типи сценаріїв багатовимірних виразів.

1. Сценарій багатовимірних виразів за умовчанням. При створенні куба служби SSAS створюють стандартний сценарій багатовимірних виразів для цього куба. У цьому сценарії визначається етап обчислення для усього куба.

2. Призначений для користувача сценарій багатовимірних виразів. Після створення куба можна додати призначені для користувача сценарії багатовимірних виразів, що розширюють характеристики обчислень куба.

Якщо з кубом не пов'язаний жоден сценарій багатовимірних виразів, куб обчислюється за сценарієм багатовимірних виразів за умовчанням. Куб має бути пов'язаний хоча б з одним сценарієм багатовимірних виразів, оскільки тільки в сценарії визначається порядок обчислення куба.

Особливості застосування служби SQL Server Integration Services для роботи з багатовимірними базами даних. Служби SQL Server Integration Services (SSIS) є платформою для побудови високопродуктивних рішень потоку операцій — витягання, перетворення і завантаження (ETL) для сховищ даних. Типові випадки застосування пакетів служб SSIS спільно із SSAS включають:

- злиття даних з різнорідних сховищ даних;
- заповнення сховищ даних та вітрин даних;
- очищення і стандартизація даних.

Дані, зазвичай, зберігаються у безлічі різних систем сховищ даних, і витягання даних з усіх джерел та їх злиття в єдиний погоджений набір даних може бути досить складним завданням. Ця ситуація може виникнути з ряду причин, а саме.

1. Зберігання архівних даних в традиційних системах сховищ даних. Ці дані можуть бути не занадто важливими для щоденних операцій, проте вони можуть мати цінність для аналізу, якому потрібні дані за тривалий період.

2. Використання різних технологій зберігання даних для зберігання операційних даних. Пакету може бути потрібно витягати дані з електронних таблиць, а також з реляційних БД перед тим, як він зможе об'єднати ці дані.

3. Дані можуть зберігатися у базах даних, що використовують різні схеми для одних і тих же даних. Пакету може бути потрібно змінити тип даних стовпця або об'єднати дані з декількох стовпців в один перед тим, як він зможе об'єднати дані.

Служби SSIS можуть підключитися до багатьох типів джерел даних, включаючи декілька джерел даних одного пакету. Служби SSIS містять компоненти джерела, що здійснюють роботу по витяганню даних з пласких файлів, робочих листів Excel, XML-документів, а також таблиць і представлень реляційних БД з джерела даних, до якого підключається пакет.

Потім дані трансформуються за допомогою перетворень, що містяться в службах SSIS. Після того, як дані перетворені в сумісні формати, вони можуть бути фізично об'єднані в один набір.

Після успішного злиття даних і застосування перетворень дані завантажуються по одному або де-

кільком призначенням. Служби SSIS містять призначення для завантаження даних у пласкі файли, необроблені файли, а також реляційні бази даних. Дані також можуть бути завантажені в набір записів, що зберігаються у пам'яті, та є доступними для інших елементів пакету. Дані в сховищах і вітринах даних оновлюються часто, а об'єм завантажуваних даних зазвичай досить великий. Служби SSIS містять завдання, яке проводить масове завантаження даних прямо з плаского файлу в таблиці та представлення SQL Server, а також компонент призначення, що виробляє масове завантаження даних у базу даних SQL Server у якості останнього кроку перетворення даних.

Пакет служб SSIS може бути налагоджений з можливістю перезапуску. Це означає, що можна перезапустити пакет із зумовленої контрольної точки. Можливість перезапуску пакету може значно економити час, особливо якщо пакет обробляє дані з великої кількості джерел. Можна використати пакети служб SSIS для завантаження у базу даних таблиць вимірів і фактів. Якщо джерело даних для таблиці виміру зберігається в декількох джерелах даних, то пакет може об'єднати дані в один набір і завантажити таблицю виміру впродовж одного процесу, замість використання окремих процесів для кожного джерела даних. Оновлення даних в сховищах і вітринах даних може стати складним завданням, оскільки обидва типи сховищ даних зазвичай містять виміри, що повільно змінюються і якими буває складно управляти за допомогою перетворення даних. Майстер вимірів, що повільно змінюються, автоматизує підтримку таких вимірів, динамічно створюючи інструкції SQL, які оновлюють та замінюють записи, оновлюють пов'язані записи, а також додають нові стовпці в таблиці.

Крім того, завдання і перетворення в пакетах служб SSIS можуть обробляти куби й виміри служб SSAS. Коли пакет оновлює таблицю у базі даних, на основі якої побудований куб, можна використати завдання і перетворення служб SSIS для автоматичної обробки куба, а також для автоматичної обробки вимірів. Автоматична обробка кубів і вимірів допомагає надавати поточні дані для користувачів обох середовищ: користувачам, які отримують дані з кубів і вимірів, а також користувачам, які отримують доступ до даних в реляційній базі даних.

Перед завантаженням даних для оперативної обробки транзакцій або у базу даних оперативної аналітичної обробки (OLAP), робочий лист Excel або файл, дані необхідно очистити і стандартизувати. Дані можуть вимагати оновлення з таких причин.

1. Дані були отримані у різних форматах. Перед тим, як дані мають бути використані, може бути потрібно перетворити їх в інший формат. Наприклад, може потрібно об'єднати ім'я і прізвище в один стовпець.

2. Дані можуть бути орендованими або придбаними. Перед тим, як дані можуть бути використані, може знадобитися їх стандартизація та очищення для відповідності прийнятним стандартам.

3. Формат даних залежить від мовного стандарту. Наприклад, дані можуть мати різні формати дати-часу, а також формати чисел. Якщо дані об'єднані з джерел різних мовних стандартів, то перед завантаженням їх необхідно привести в один формат, щоб уникнути ушкодження даних.

Служби SSIS містять вбудовані перетворення, які можна додати до пакетів для очищення і стандартизації даних, зміни регістра даних, перетворення даних в інший тип або формат, а також для створення нового стовпця даних на основі виразів. Наприклад, пакет може об'єднати стовпці, що містять імена і прізвища, в загальній стовпець повного імені, а потім перевести усі символи у верхній регістр.

Пакет служб SSIS також може провести очищення даних шляхом заміни значень в стовпцях на значення посилальної таблиці, використовуючи уточнювальні запити або нечіткі уточнювальні запити для пошуку значень в посилальній таблиці. Часто пакет спочатку застосовує уточнювальний запит і, у разі невдачі, нечіткий уточнювальний запит.

Таким чином, досліджено особливості застосування засобів Microsoft SQL Server Analysis Services (SSAS) для розроблення багатовимірного сховища просторових даних геопорталу з метою побудови на базі цього сховища просторових даних (СПД) системи підтримки прийняття рішень щодо геоінформаційних задач. В рамках цього дослідження сформульовано рекомендації стосовно розробки багатовимірних баз даних із використанням середовищ SQL BI Development Studio (BIDS) та SQL Server Management Studio (SSMS). При цьому для створення проекту служб SSAS в середовищі BIDS запропоновано алгоритм, що забезпечує стійке утворення проекту служб SSAS в середовищі BIDS або за допомогою шаблону проекту служб SSAS, або за допомогою майстра імпорту бази даних. Разом з тим, на основі аналізу особливостей застосування служби SQL Server Integration Services (SSIS) для роботи з багатовимірними базами даних сформульовано рекомендації щодо типових випадків застосування пакетів служб SSIS спільно із SSAS. Отже, оскільки визначено загальну стратегію розроблення системи підтримки прийняття рішень на базі сховища просторових даних геопорталу, навіть безвідносно до безмежних геоінформаційних завдань щодо геопорталів взагалі, цілком доцільно запропонувати методику практичної програмної реалізації саме багатовимірної бази даних геопорталів в цілому.

В даній роботі пропонується не стільки систематизація означеної дії у вигляді структурних схем та незаперечних програмних кодів, скільки практичні рекомендації, що нададуть суттєву допомогу розробникам у зазначеній сфері. Тим не менш, нижче пропонується програмна реалізація багатовимірного СПД геопорталу, яке є базою для СППР геоінформаційних задач.

Програмна реалізація багатовимірного сховища просторових даних геопорталу як бази підтримки прийняття рішень щодо геоінформаційних задач

Визначення методу з'єднання з сервером геопорталу. Програмування і налаштування джерел даних в середовищі BIDS призначене для визначення одного або декількох джерел даних для служб Microsoft SQL Server Analysis Services. Незалежно від того,

виконується робота з проектом служб Analysis Services або пряме підключення до сервера баз даних, визначити джерело даних можна на основі нового або існуючого з'єднання. Середовище SQL Server Analysis Services підтримує багато різних типів з'єднань (рис. 13).

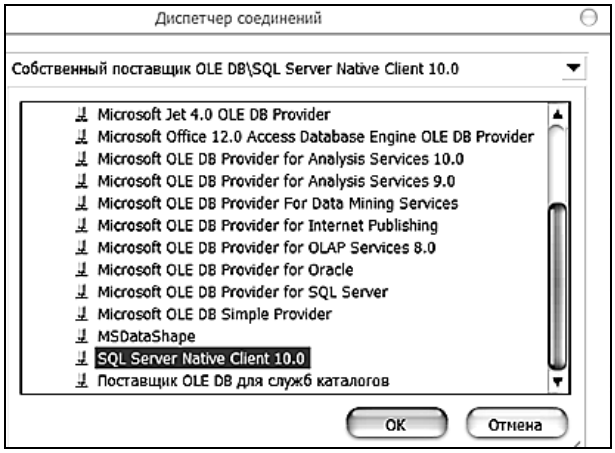


Рис. 13. Типи з'єднання з сервером середовища SSAS

У цій роботі застосовується (пропонується) з'єднання OLE DB (Object Linking and Embedding, Database) власного клієнта SQL Server. Цей набір інтерфейсів, заснованих на COM-технології, дозволяє застосункам звертатися до даних, що зберігаються в різних джерелах інформації або сховищах даних за допомогою уніфікованого доступу. Він розроблений для забезпечення високої продуктивності при підключенні до екземпляра (компонента) SQL Server Database Engine через канал OLE DB. Вибравши з'єднання, необхідно вказати дані про з'єднання, необхідні для підключення до бази даних. Це сервер або екземпляр служби, облікові дані для входу, ім'я бази даних та інші параметри, що відносяться до з'єднання. OLE DB підтримує службу перевірки достовірності екземпляра. При цьому варіанті зазвичай використовуються облікові дані процесу, що намагається отримати доступ до джерела даних задля надання доступу до них. Служби Analysis Services можна настроїти так, щоб при підключенні до базового джерела даних для виконання обробки OLAP використовувалися облікові дані запису служби, або ж задати призначений для користувача обліковий запис.

Проекти оперативної аналітичної обробки та інтелектуального аналізу даних на Microsoft SQL Server розроблені на основі логічної моделі даних пов'язаних таблиць, представлень та запитів з одного або декількох джерел даних. Ця логічна модель називається представленням джерел даних. Представлення джерела даних є об'єктом, що містить метадані з вибраних об'єктів джерела даних, включаючи зв'язки між цими об'єктами, визначені у базовому джерелі даних або в уявлених джерелах даних.

Представлення джерела даних створює кеш метаданих з джерел даних, на основі яких воно побудоване. Кешовані метадані дозволяють розробити проект служб Analysis Services без безперервного активного з'єднання з джерелом даних. Представлення джерел даних дозволяють визначати підмножину даних, що заповнюють велике сховище даних. Ще вони дозволяють визначити однорідну схему на основі різнорідних джерел даних або підмножин джерел даних. Оскільки представлення джерел даних представляють ізольовану схему, до них можна додавати усі необхідні замітки, не зачіпаючи схеми у базових джерелах даних. Представлення джерел даних містять такі елементи.

– Ім'я та опис.

– Визначення будь-якої підмножини схеми, що отримується з одного або декількох джерел даних, аж до повної схеми:

1) імена таблиць;
2) імена стовпців;
3) типи даних;
4) допустимість значень NULL;
5) довжини стовпців;
6) первинні ключі;
7) зв'язки «первинно-зовнішній ключ».

– Замітки до схеми з базових джерел даних, включаючи:

1) зрозумілі імена таблиць, представлень і стовпців;
2) іменовані запити, що повертають стовпці з одного або декількох джерел даних (що відображаються в схемі як таблиці);
3) іменовані обчислення, що повертають стовпці з джерела даних (що відображаються як стовпці таблиць або представлень);
4) логічні первинні ключі (необхідні, якщо первинний ключ у базовій таблиці не визначений або не включений в представлення чи іменований запит);
5) зв'язки «логічний первинний-зовнішній ключ» між таблицями, представленнями і іменованими запитами.

Щоб створити представлення джерела даних, в основі якого лежать декілька джерел даних, необхідно заздалегідь визначити представлення, засноване на одному джерелі даних. Це джерело даних згодом вважається первинним джерелом даних. Потім можна додати таблиці і представлення зі вторинного джерела даних. При проектуванні вимірів з атрибутами, заснованих на пов'язаних таблицях декількох джерел даних, може знадобитися визначення джерела даних Microsoft SQL Server як основного джерела даних, щоб використати його можливості обробки розподілених запитів. Вміст представлення джерела даних також відображається в конструкторі представлень джерел даних в середовищі Business Intelligence Development Studio (рис. 14). У цьому конструкторі містяться такі елементи:

– панель «Діаграма», на якій представлені в графічному виді таблиці та їх зв'язки;

– панель «Таблиці», на якій відображаються у вигляді дерева таблиці та елементи їх схем;

– панель «Організатор схем», на якій можна створювати вкладені діаграми, що дозволяють переглядати піднабори представлення джерела даних;

– панель інструментів конструктора представлень джерел даних.

Значення властивості FriendlyName для об'єкту в уявленні джерела даних можна змінити, щоб зробити його ім'я зрозумілішим. Імена цих об'єктів також можна змінювати після того, як вони були визначені. Далі буде змінено зрозуміле ім'я кожної з таблиць в

уявленні джерела даних. Це зробить зрозумілішими імена об'єктів куба і вимірів, які будуть визначені в роботі. Також в уявленні джерела даних можна привласнювати зрозумілі імена стовпцям, визначати обчислювані стовпці, сполучати таблиці і представлення, щоб зробити їх зручнішими в роботі (рис. 15).

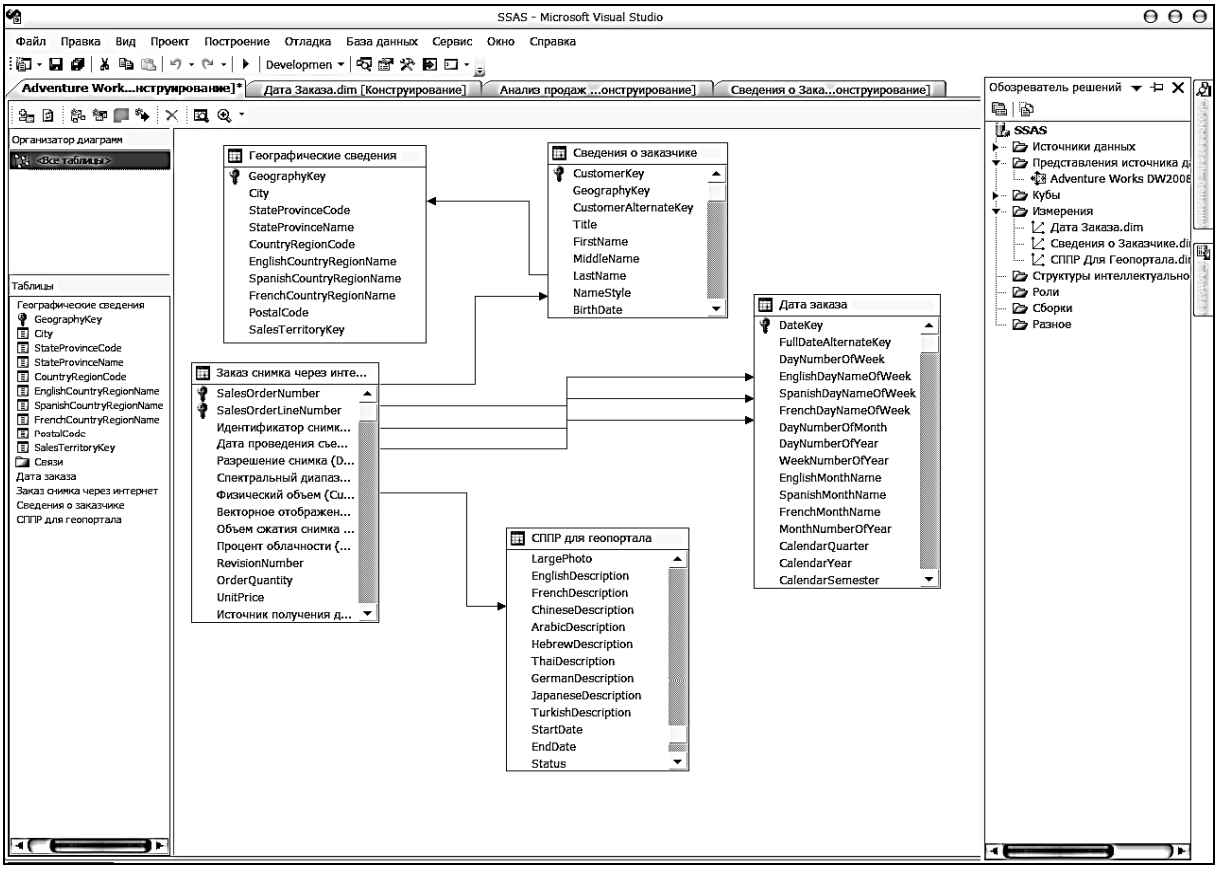


Рис. 14. Конструктор представлень джерел даних в середовищі Business Intelligence Development Studio

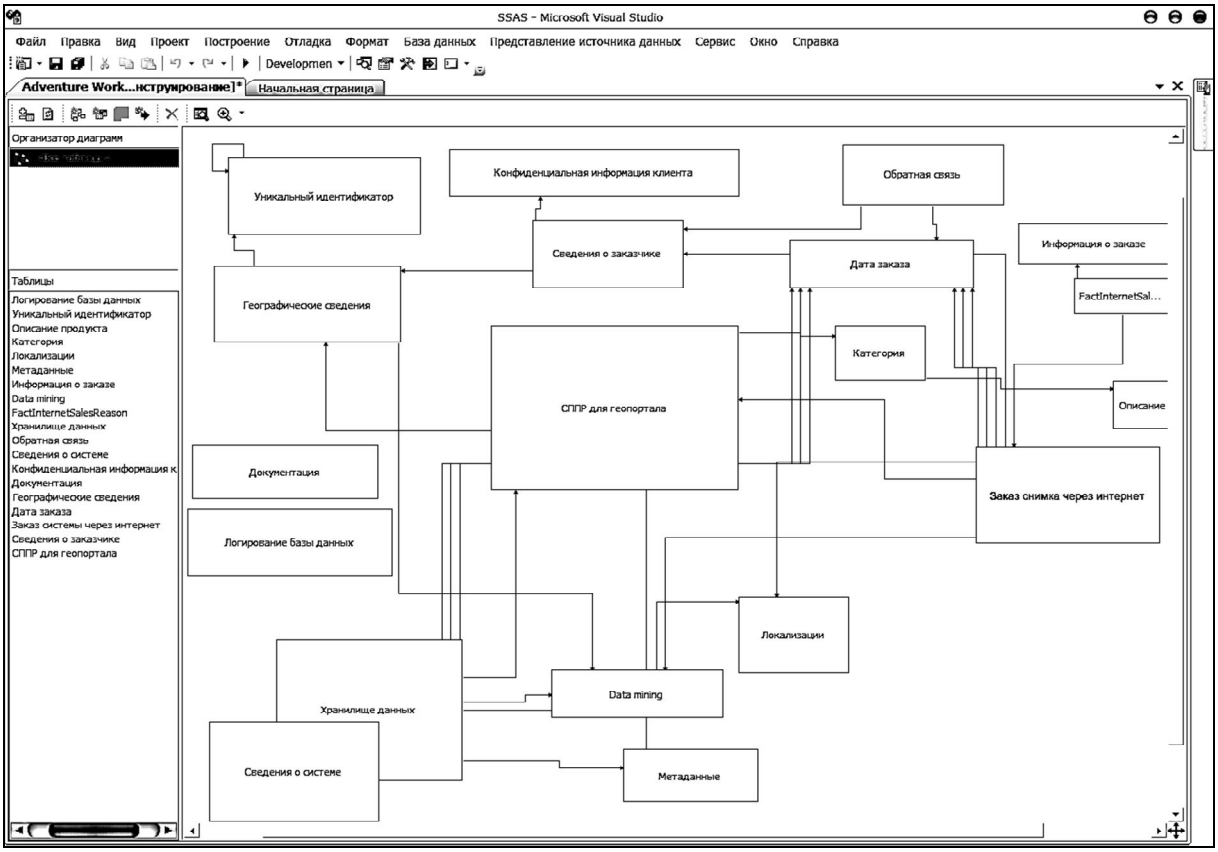


Рис. 15. Структура бази просторових даних системи підтримки прийняття рішень для геопорталу

Завдання параметрів вимірів OLAP-кубів і розгортка аналітичних служб. Куб є багатовимірною структурою, що містить виміри і заходи. Виміри визначають структуру куба, а заходи надають числові значення, що представляють інтерес для кінцевого користувача. В якості логічної структури куб дозволяє клієнтському застосуванню набувати значень у вигляді осередків куба, визначених для усіх можливих сумарних значень. Положення осередків в кубі визначаються перетином елементів вимірів. Вимір бази даних є колекцією об'єктів, що називаються атрибутами, які використовуються для надання відомостей про дані фактів в одному або декількох кубах. Ці об'єкти прив'язані до одного або до декількох стовпців в одній або декількох таблицях в уявленні джерела даних. За умовчанням ці атрибути відображаються як ієрархії атрибутів і дозволяють зрозуміти сенс даних фактів у кубі. Атрибути можуть бути організовані в призначені для користувача ієрархії, які забезпечують різні шляхи доступу до даних і допомагають користувачам при перегляді даних в кубі. Куби містять усі виміри, потрібні користувачам при аналізі даних. Екземпляр виміру бази даних в кубі називається виміром куба і відноситься до одної або декількох груп заходів в кубі. Наприклад, якщо таблиця фактів містить декілька залежних від часу фактів, то для полегшення аналізу кожного з них може бути визначений окремий вимір куба. Проте, існування тільки одного залежного від часу виміру бази даних означає необхідність існування лише однієї залежної від часу таблиці реляційної бази даних для підтримки декількох залежних від часу вимірів куба.

Для визначення вимірів, атрибутів та ієрархій бази даних і куба найпростіше скористатися майстром кубів, який дозволяє створювати виміри одночасно з визначенням куба. Майстер кубів створює виміри на основі виявлених або вказаних користувачем таблиць вимірів з представленням джерела даних, використовуваного для куба. Після цього майстер створює виміри бази даних і додає їх до нового куба, створюючи виміри куба. При створенні куба в нього можна також додати будь-які виміри, які вже існують у базі даних. Ці виміри могли бути раніше визначені майстром вимірів для іншого куба. Після того, як вимір бази даних визначений, його зміна й налаштування проводяться в конструкторі вимірів. Вимір куба може бути налагоджений за допомогою конструктора кубів (рис. 16). Програміст має можливість перегляду і редагування коду, що генерується майстром кубів. Для цього у властивостях куба необхідно вибрати функцію «Перехід до коду» (рис. 17).

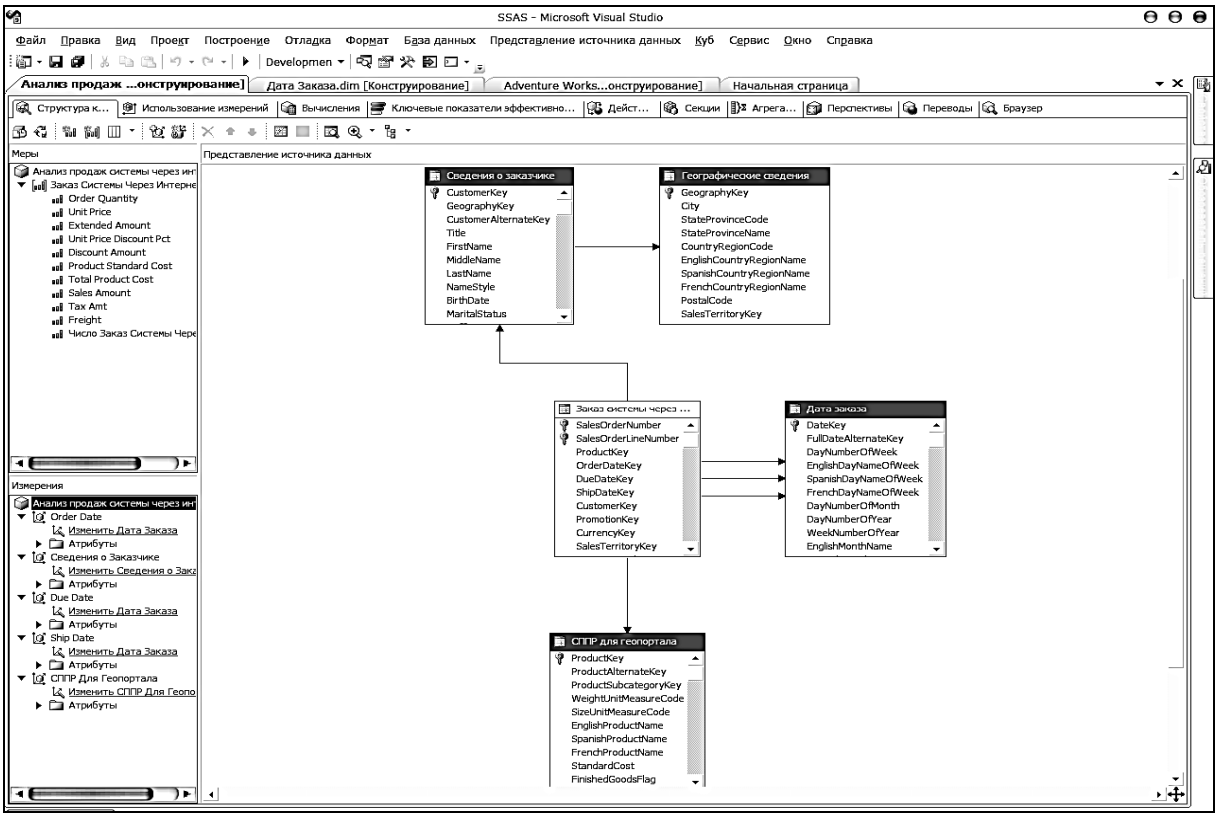


Рис. 16. Конструктор кубів

Після написання коду вимірів куба можна переходити до розгортки аналітичних служб, спираючись на XML-файл з кодогенерацією майстра кубів. В процесі розробки проекту в середовищі BI Dev Studio проект часто розгортається на сервері розробки для створення бази даних служб SSAS, визначеної проектом. Це необхідно для тестування проекту, наприклад для огляду осередків у кубі, огляду елементів виміру або перевірки формул ключових індикаторів продуктивності. Проект можна розгорнути незалежно або ж розгорнути усі проекти в рішенні. При розгортанні проекту послідовно виконуються такі дії: побудова проекту і створення вихідних файлів, що визначають базу даних служб SSAS та відповідні складові об'єкти; перевірка вибраного сервера; створення бази даних та її об'єктів на вибраному сервері.

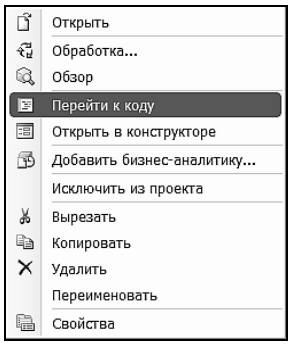


Рис. 17. Вибір функції редагування коду

Після первинного розгортання в теці <Ім'я проекту> створюється файл IncrementalSnapshot.xml. Цей файл потрібний для визначення, чи змінювалася база даних або її об'єкти на цільовому сервері поза проектом. Якщо відбувалася зміна, система запропонує переписати усі об'єкти в цільовій базі даних. Якщо усі зміни були зроблені в проекті і проект налагоджений для додаткового розгортання, на цільовому сервері будуть розгорнуті тільки зміни.

Конфігурація проекту і відповідні параметри визначають властивості розгортання, які застосовуватимуться при розгортанні проекту. У загальному проекті кожен розробник використовує свою власну конфігурацію з власними параметрами конфігурації проекту. Наприклад, кожен розробник може вказати окремий тестовий сервер для роботи окремо від інших розробників. Розгортання тестового проекту на локальному сервері віртуальної машини має такий вигляд (рис. 18). Після розгортки багатовимірного куба необхідно вказати, який зріз необхідно переглянути. Для цього слід вибрати виміри, які будуть відкладені по осях куба. На рис. 19 показаний зріз куба «Кількість замовлених знімків - Місто - Час». Після закінчення роботи з кубом, можна використати результати аналізу для створення звітів і демонстрації результатів у зручній для користувача формі. На рис. 20 показано приклад використання надбудов інтелектуального аналізу даних SQL Server для Microsoft Office щодо візуалізації результатів OLAP-аналізу.

Таким чином, отримано програмну реалізацію багатовимірного сховища просторових даних геопорталу, що забезпечує підвищення оперативності статистичного і прогнозного аналізу геоданих для ведення звітності та підтримки прийняття рішень геоінформаційних задач в режимі реального часу.

Висновки

На підставі проведеного аналізу архітектур сучасних систем підтримки прийняття рішень запропоновано структуру, яку найдоцільніше використовувати для побудови геоінформаційної СППР на базі сховища просторових даних геопорталу. Проаналізовано основні функції, що мають виконувати підсистеми такої СППР, а саме — функції підсистеми витягання, перетворення і завантаження даних, функції підсистеми зберігання даних та підсистеми аналізу даних. Розгляд зазначених підсистем СППР проведено із детальним вивченням їх структурних та функціональних схем, аналізом існуючих технологій обробки та зберігання просторової інформації, а також сучасних методів аналізу геоданих.

Разом з тим, здійснено ґрунтовний вибір системи управління базами даних для практичної реалізації багатовимірної бази геоданих, що виконує функції сховища просторових даних як основи СППР геопорталу.

Проведено ретельний аналіз засобів Microsoft SQL Server Analysis Services (SSAS) як базової платформи для розгортання аналітичних систем Business Intelligence (BI), уніфікованої багатовимірної моделі даних Unified Dimensional Model (UDM) як ядра технології комплексного багатовимірного аналізу даних Online Analytical Processing (OLAP). Проаналізовано аспекти планування і програмування архітектури SSAS, особливості розроблення багатовимірних баз даних із застосуванням середовищ SQL BI Development Studio (BIDS) та SQL Server Management Studio (SSMS), а також специфіку застосування служби SQL Server Integration Services (SSIS) для роботи з багатовимірними базами даних.

Таким чином, підготовлено підґрунтя для розроблення геоінформаційної СППР із застосуванням засобів Microsoft SQL Server багатовимірного аналізу даних для створення багатовимірного сховища просторових даних геопорталу. Врешті, запропоновано методику програмної реалізації багатовимірного сховища просторових даних геопорталу.

Запропоновані підходи щодо розроблення геоінформаційної СППР на базі сховища просторових даних геопорталу забезпечують об’єднання та інтеграцію у сховище геопорталу інформації, що містить різні типи просторових даних. Програмна реалізація багатовимірного СПД геопорталу забезпечує підвищення оперативності статистичного і прогнозного аналізу геоданих для ведення звітності та підтримки прийняття рішень геоінформаційних задач в режимі реального часу.

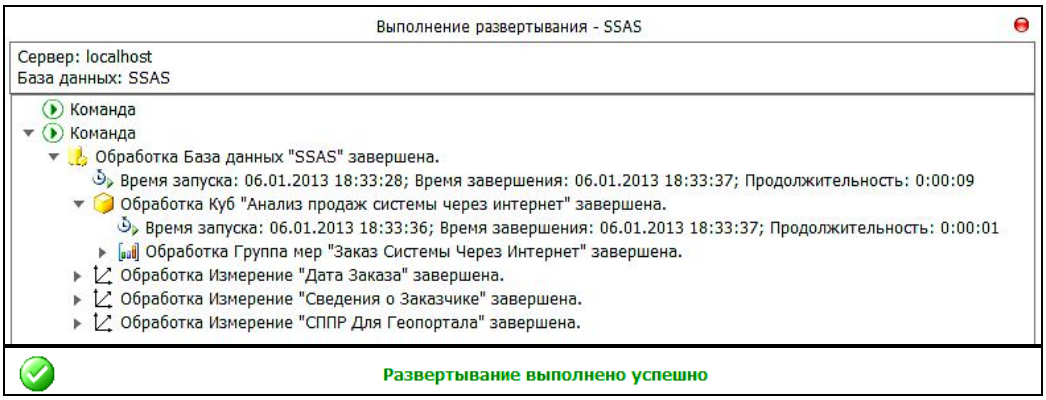


Рис. 18. Розгортка аналітичних служб на локальному сервері

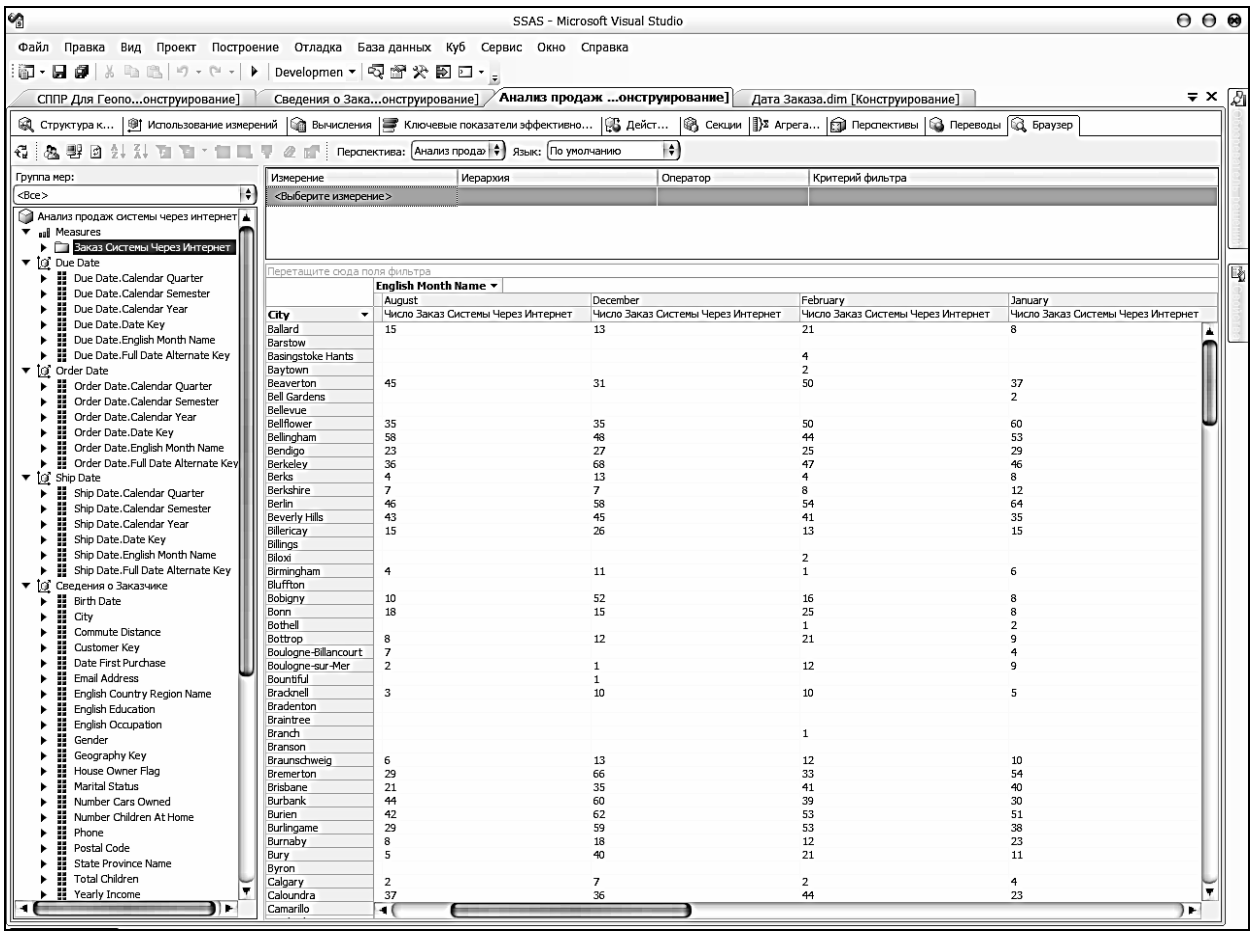


Рис. 19. Зріз куба за трьома параметрами

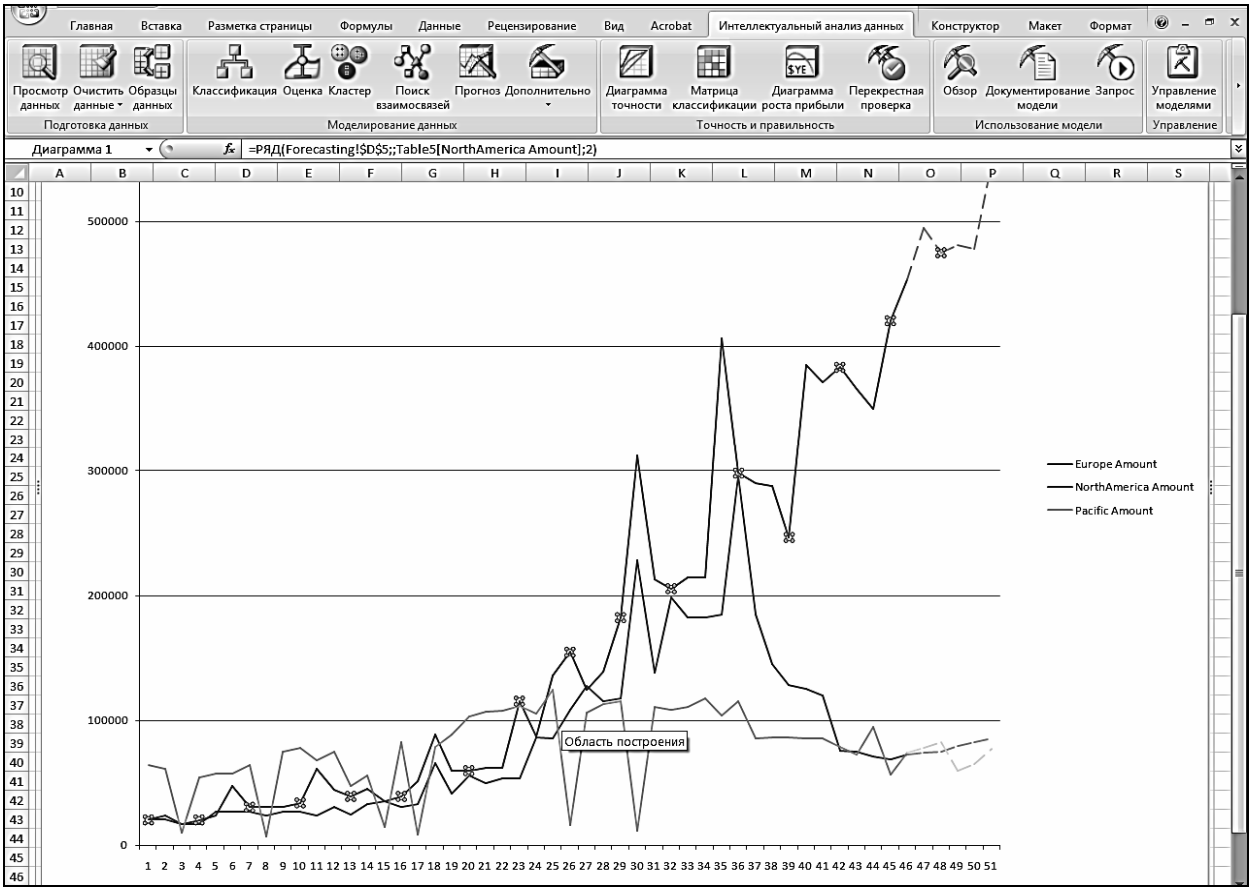


Рис. 20. Екстраполяційні оцінки замовлень знімків по статистичному часовому ряду

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Андрєєв С.М., Жилін В.А. Методика створення атласів історичних картографічних моделей за даними аерофотозйомки з використанням геоінформаційних технологій. *Сучасні інформаційні системи*. 2020. Т. 4, № 1. С. 45-62. DOI: http://dx.doi.org/10.20998/2522-9052.2020.1.08
2. Андрєєв С. М., Жилін В. А., Мельник А. П. Застосування анаморфозних картографічних моделей для аналізу геоданих. *Сучасні* інформаційні *системи*. 2019. Т. 3, № 3. С. 5-16. DOI: http://dx.doi.org/10.20998/2522-9052.2019.3.01
3. Андрєєв С.М., Жилін В.А. Застосування даних аерофотозйомки з безпілотних літальних апаратів для побудови 3D - моделей місцевості. *Системи управління, навігації та зв'язку*: збірник наукових праць. Полтава: Полтавський НТУ ім. Юрія Кондратюка, 2019. Вип. 1(53). С. 3-16. DOI: http://dx.doi.org/10.26906/SUNZ.2019.1.003
4. Marakas G. M. Decision support systems in the twenty-first century. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 1999.
5. Ларичев О. И., Петровский В. А. Системы поддержки принятия решений: Современное состояние и перспективы их развития. *Итоги науки и техники. Сер. Техническая кибернетика*. Т. 21. М.: ВИНИТИ, 1987. С. 131-164
6. Bonczek R.H., Holsapple C., Whinston A.B. Foundations of Decision Support Systems. New York: Academic Press, 1981.
7. Анисимова О. Л., Зраенко Д. Ю., Комоско В. В. Хранилище пространственных объектов в составе регионального уз-ла ИПД УрФО: модель хранилища. *Пространственные данные*. 2010. № 1. С. 62.
8. Inmon W. H. Building the Data Warehouse. New-York: John Wiley & Sons, 1991. 312 p.
9. Вейцман В. М. Проектирование экономических информационных систем. Ярославль: МУБиНТ, 2002. 213 с.
10. Терелянский П. В. Системы поддержки принятия решений. Опыт проектирования. Волгоград: ВолгГТУ, 2009. 127 с.
11. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике / К. Шеннон. – М.: ИИЛ, 1963. – 829 с.
12. Спирли Э. Корпоративные хранилища данных / Э. Спирли // Планирование, разработка, реализация. – М.: Вильямс, 2001. – 400 с.
13. Кузнецов С.Д. Проектирование и разработка корпоративных информационных систем / Д.С. Кузнецов. – М., 1998. – 120 с.
14. ДСТУ ISO 19101: 2002(Е) Комплекс стандартів «Географічна інформація / Геоматика» // Географічна інформація – еталонна модель. Київ, 2005.
15. Серебряков С.В. Новый подход к организации и хранению пространственных данных / В.С. Серебряков, Ю.Д. Баженова // Геодезия и картография, 2008. – Вып. 7.
16. Косяков С.В. Об интеграции ГИС и прикладных программных комплексов / В.С. Косяков, Н.В. Никольский // Материалы форума ГИС'97. М.: ГИС-Ассоциация, 1997.

REFERENCES

1. Andrieiev, S. and Zhilin, V. (2020), “Methodology of creation of atlases of historical cartographic models from data of aerophotography with the use of геоінформаційних technologies”, *Advanced Information Systems*, Vol. 4, No. 1, pp. 45-62, DOI: http://dx.doi.org/10.20998/2522-9052.2020.1.08
2. Andrieiev, S., Zhilin, V. and Melnyk, A. (2019), “The use of anamorphosis cartographic models for geodata analysis”, *Advanced Information Systems*, Vol. 3, No. 3, pp. 5-16, DOI: http://dx.doi.org/10.20998/2522-9052.2019.3.01
3. Andreev, S. and Zhilin, V. (2019), “Application of aerophotic data with unmanned aircraft for developing 3D models of terrain”, *Control, navigation and communication systems: collection of scientific works*, No. 1(53), Poltava NTU Yuri Kondratyuk, Poltava, pp. 3-16, DOI: http://dx.doi.org/10.26906/SUNZ.2019.1.003
4. Marakas, G.M. (1999), *Decision support systems in the twenty-first century*, Upper Saddle River, N.J, Prentice Hall.
5. Larichev, O.I. and Petrovsky V.A. (1987), “Decision Support Systems: The current state and prospects of their development”, *The results of science and technology*, Avg. Technical cybernetics, VINITI, Moscow, Vol. 21, pp. 131-164.
6. Bonczek, R.H., Holsapple, C. and Whinston, A.B. (1981), *Foundations of Decision Support Systems*, Acad. Press, New York.
7. Anisimova, O.L., Zraenko, D.Yu. and Komosko, V.V. (2010), ”Storage of spatial objects as a part of the regional node of IPD UrFO: model of storage”, *Spatial data*, No. 1, p. 62.
8. Inmon, W.H. (1991), *Building the Data Warehouse*, John Wiley & Sons, New-York, 312 p.
9. Weizmann, V.M. (2002), *Design of economic information systems*, MUBiNT, Yaroslavl, 213 p.
10. Terelyansky, P.V. (2009), *Decision support systems. Experience of design*, Volga State Techn. University, Volgograd, 127 p.
11. Shannon, K. (1963), *Works on information theory and cybernetics*, IIL, Moscow, 829 p.
12. Spirley, E. (2001), *Corporate data warehouses. Planning, development, implementation*, Williams, Moscow, 400 p.
13. Kuznetsov, S.D. (1998), *Design and development of corporate information systems*, Moscow, 120 p.
14. DSTU ISO 19101: 2002 (E) (2005), *Geographic Information* / Geomatics Complex, Geographic Information – Reference Model, Kyiv.
15. Serebryakov, S.V. and Bazhenov, Yu.D. (2008), “A new approach to the organization and storage of spatial data”, *Geodesy and Cartography*, Vol. 7.
16. Kosyakov, S.V. and Nikolsky N.V. (1997), “On the integration of GIS and applied software”, *Materials of the GIS'97 forum*, GIS-Association, Moscow.

Received (Надійшла) 27.02.2020
Accepted for publication (Прийнята до друку) 20.05.2020

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Андрєєв Сергій Михайлович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри геоінформаційних технологій та космічного моніторингу Землі, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна;
Sergey Andrieiev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Geoinformation Technologies and Space Monitoring of the Earth Department, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovskiy "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: AndreevSM@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-4256-2637

Жилін Володимир Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри геоінформаційних технологій та космічного моніторингу Землі, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна;
Volodymyr Zhilin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Geoinformation Technologies and Space Monitoring of the Earth Department, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovskiy "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: v.zhilin@khai.edu; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-7342-3456

Геоинформационная система поддержки принятия решений на базе хранилища пространственных данных геопортала

С. М. Андреев, В. А. Жилин

Аннотация. Предметом исследования является разработка геоинформационной системы поддержки принятия решений (СППР) на базе хранилища пространственных данных (ХПД) геопортала. **Объектом исследования** является процесс объединения и интеграции в хранилище геопортала информации, содержащей различные типы пространственных данных. **Целью работы** является повышение оперативности статистического и прогнозного анализа геоданных для ведения отчетности и поддержки принятия решений геоинформационных задач в режиме реального времени. **Выводы.** На основании проведенного анализа архитектур современных систем поддержки принятия решений предложена структура, которую целесообразно использовать для построения геоинформационных СППР на базе хранилища пространственных данных геопортала. Проанализированы основные функции, которые должны выполнять подсистемы такой СППР, а именно – функции подсистемы извлечения, преобразования и загрузки данных, функции подсистемы хранения данных и подсистемы анализа данных. Рассмотрение указанных подсистем СППР проведено с детальным изучением их структурных и функциональных схем, анализом существующих технологий обработки и хранения пространственной информации, а также современных методов анализа геоданных. Вместе с тем, осуществлен обоснованный выбор системы управления базами данных (СУБД) для практической реализации многомерной базы геоданных, которая выполняет функции хранилища пространственных данных как основы СППР геопортала. Проведен тщательный анализ средств Microsoft SQL Server Analysis Services (SSAS) как базовой платформы для развертывания аналитических систем Business Intelligence (BI), унифицированной многомерной модели данных Unified Dimensional Model (UDM) как ядра технологии комплексного многомерного анализа данных Online Analytical Processing (OLAP). Проанализированы аспекты планирования и программирования архитектуры SSAS, особенности разработки многомерных баз данных с применением сред SQL BI Development Studio (BIDS) и SQL Server Management Studio (SSMS), а также специфика применения службы SQL Server Integration Services (SSIS) для работы с многомерными базами данных. Таким образом, подготовлена почва для разработки геоинформационных СППР с применением средств Microsoft SQL Server многомерного анализа данных для создания многомерного хранилища пространственных данных геопортала. Также предложена методика программной реализации многомерного хранилища пространственных данных геопортала. Предложенные подходы по разработке геоинформационных СППР на базе хранилища пространственных данных геопортала обеспечивают объединение и интеграцию в хранилище геопортала информации, содержащей различные типы пространственных данных. Программная реализация многомерного ХПД геопортала обеспечивает повышение оперативности статистического и прогнозного анализа геоданных для ведения отчетности и поддержки принятия решений геоинформационных задач в режиме реального времени.

Ключевые слова: геоданные; геоинформационная система поддержки принятия решений; многомерные хранилища пространственных данных.

Geoinformation system of decision support based on the geoportal spatial data storage

S. Andrieiev, V. Zhilin

Abstract. The subject of the study is the development of a geographic information system for decision support (DSS), based on the storage of spatial data of the geoportal. **The object of the study** is the process of combining and integrating information containing various types of spatial data into the geoportal repository. **The purpose of the work** is to increase the efficiency of statistical and predictive analysis of geodata for reporting and supporting decision-making of geographic information tasks in real time. **Conclusions.** Based on the analysis of the architectures of modern decision-making systems, a structure of geoinformation DSS's based on the spatial data storage of the geoportal is proposed. The main features and functions that are included in subsystems of such a DSS are analyzed, namely the functions of the subsystem for extracting, converting and loading data, the functions of the data storage subsystem and the data analysis subsystem. The consideration of mentioned subsystems DSS was carried out with a detailed study of their structural and functional schemes, analysis of existing technologies of processing and spatial information storage, as well as modern methods of geodata analysis. At the same time, a reasonable choice of a database management system for the practical implementation of a multidimensional geodatabase is made, which performs the functions of a spatial data storage as the basis of a DSS geoportal. A substantial analysis of Microsoft SQL Server Analysis Services (SSAS), as a base platform for the deployment of Business Intelligence (BI) analytical systems, a Unified Dimensional Model (UDM) as the core of Online Analytical Processing (OLAP) complex multidimensional data analysis technology was performed. The aspects of planning and programming the SSAS architecture, the features of developing multi-dimensional databases using SQL BI Development Studio (BIDS) and SQL Server Management Studio (SSMS), as well as the specifics of using SQL Server Integration Services (SSIS) to work with multi-dimensional databases are analyzed. Thus, the groundwork has been set for the development of geoinformation DSS using Microsoft SQL Server multidimensional data analysis tools to create a multidimensional spatial data storage of the geoportal. A methodology for software implementation of a spatial data multidimensional storage of a geoportal is also proposed. The proposed approaches to the development of geoinformation DSS based on the spatial data storage provide integration into the geoportal repository of information containing various types of spatial data. The software implementation of the multidimensional geoportal provides an efficiency level increase of statistical and predictive geodata analysis for reporting and supporting decision-making of geographic information tasks in a real time.

Keywords: geodata; geoinformation decision support system; multidimensional storage of spatial data.

УДК 61:002.51.6:681.31:51:31 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.2.12**

С. В. Гадецька[1], В. Ю. Дубницький[2], О. І. Ходирєв[2]

[1] Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна
[2] Харківський навчально-науковий інститут Державного вищого навчального закладу "Університет банківської справи", Харків, Україна

СПЕЦІАЛІЗОВАНИЙ ПРОГРАМНИЙ КАЛЬКУЛЯТОР ДЛЯ ОЦІНКИ КЛІНІЧНОЇ ІНФОРМАТИВНОСТІ ЛАБОРАТОРНИХ ТЕСТІВ

Анотація. Мета роботи – розробити спеціалізований програмний калькулятор для оцінки клінічної інформативності лабораторних тестів. Методичною основою для розробки калькулятора обрано один з методів доказової медицини – аналіз чотириклітинних таблиць. Калькулятор надає медичним працівникам інструмент оцінки критеріїв діагностичної цінності лабораторного тесту на базі офісного пакету MS Office будь-яких версій без обмежень. Розроблено інструкції користувачам, які мають мінімальні уявлення про MS Excel, самостійно створити відповідний калькулятор. Спеціалізований програмний калькулятор має два блоки, які можуть працювати в будь якому порядку за вибором користувача. Розроблено блок аналізу чотириклітинної таблиці, який на основі критерію χ^2 визначає статистичну значущість оцінки діагностичної якості тесту. Розроблено блок визначення показників клінічної інформативності тесту таких, як: апріорна ймовірність захворювання; клінічна чутливість; клінічна специфічність; передбачувана цінність позитивного результату; передбачувана цінність негативного результату; діагностична ефективність; відношення правдоподібності позитивного результату; відношення правдоподібності негативного результату. Заключні висновки та професійну інтерпретація результатів обчислень покладається на фахівців у сфері медико-біологічних досліджень.

Ключові слова: доказова медицина; інформативність лабораторних тестів; чотириклітинна таблиця; спеціалізований програмний калькулятор.

Вступ

Виникнення нових нозологічних форм епідемічних захворювань, які розповсюджуються з великою швидкістю, і видозмінення традиційних інфекційних захворювань зажадало створення моделей розвитку епідемій у часі й просторі, а також засобів їх експрес-діагностики. У цьому процесі можна виділити дві складових: першу – медико-біологічну, яка залежить від конкретного виду захворювання; другу – формальну, яка визначається вибором того математичного апарату, який адекватний процесу, що моделюється. Слід зазначити, що використання в щоденній медичній практиці (у діагностиці, лікуванні й профілактиці) медичних технологій і лікувальних препаратів, ефективність яких доведено у фармако-епідеміологічних дослідженнях із застосуванням математичних оцінок імовірності успіху й ризику отримало спеціальну назву «доказова медицина» або «Evidence-Based Medicine». Список основних сайтів з цієї тематики наведено у[1].

Аналіз літератури. Процес моделювання епідемій у часі і просторі залежно від статі і віку популяції розглянуто, наприклад, у роботах [2, 3]. Основним математичним апаратом доказової медицини, який використовується при створенні засобів лабораторної діагностики, є статистичний аналіз багатоклітинних таблиць. Найбільшого розповсюдження набули чотириклітинні таблиці. Їх використання описано в роботах [4, 5], формальне обґрунтування цього методу наведено в роботі [6]. На сьогодні відомо багато пакетів цих методів. Вимоги до ліцензійності програмного забезпечення, яке використовується, і його висока вартість суттєво обмежують застосування цих засобів.

Тому, на думку авторів даного повідомлення, існує необхідність створення спеціалізованого програмного калькулятора для оцінки клінічної інформативності лабораторних тестів на базі найбільш доступних засобів, а саме офісного пакету MS Office. При опису засобів його використання використано роботу [7]. Такий спосіб дозволяє користувачу навіть середньої кваліфікації повноцінно використовувати методи, запропоновані у даному повідомленні. У зв'язку з надзвичайною ситуацією, пов'язаною з пандемією COVID-2019, яка виникла у даний час, для скорочення часу на виконання роботи по алгоритмізації оцінки клінічної інформативності обрано методи, які описано в роботі [8].

Постановка задачі. Розробка на базі офісного пакету MS Office будь-яких версій спеціалізованого програмного калькулятора, який надає медичним працівникам можливість оцінки діагностичної цінності лабораторних тестів.

Отримані результати

Спеціалізований програмний калькулятор складається з двох блоків, які можуть працювати у будь-якій послідовності за вибором користувача. Далі наведений найзручніший порядок дій. При його описі з метою мінімізації об'єму статті суміщено опис алгоритму і результати контрольного прикладу.

На першому етапі, використовуючи чотириклітинну таблицю [6], виконують контроль діагностичної спроможності тесту.

Для цього результати лабораторних досліджень оформлюють у вигляді табл.1.

У випадку, коли діагностична спроможність тесту незадовільна, калькулятор видає відповідне повідомлення і завершує подальшу роботу. Якщо діагностична спроможність тесту задовільна, то калькулятор обчислює показники його клінічної інформативності [8]. Порядок обчислень показано в табл. 2.

© С. В. Гадецька, В. Ю. Дубницький, О. І. Ходирєв, 2020

Таблиця 1 – **Результати лабораторних досліджень діагностичної спроможності тесту**

Результати дослідження	**Дійсний стан обстежених пацієнтів**	
	Захворювання присутнє	**Захворювання відсутнє**
Тест позитивний	a=**15**	b=**3**
Тест негативний	c = **2**	d=**64**
Величина критерію χ^2	$\chi^2 = \frac{(a+b+c+d)(ad-bc)^2}{(a+b)(c+d)(a+c)(b+d)}$; $\chi^2 = \frac{(15+3+2+64)\cdot(15\cdot 64-3\cdot 2)^2}{(15+3)(2+64)(15+2)(3+64)} = 56,498$	
Висновок	$\chi^2 > 3,841 \Rightarrow$ діагностична якість тесту задовільна; $\chi^2 \le 3,841 \Rightarrow$ діагностична якість тесту незадовільна; 56,498>3,841 $\Rightarrow$ діагностична якість тесту задовільна.	

Таблиця 2 – **Показники клінічної інформативності тесту**

Апріорна ймовірність захворювання	$\frac{a+c}{a+b+c+d} = \frac{15+2}{15+2+3+64} = \frac{17}{84} = 0,202$
Клінічна чутливість	$\frac{a}{a+c} = \frac{15}{17} = 0,882$
Клінічна специфічність	$\frac{d}{b+d} = \frac{64}{67} = 0,995$
Передбачувана цінність позитивного результату	$\frac{a}{a+b} = \frac{15}{18} = 0,833$
Передбачувана цінність негативного результату	$\frac{d}{c+d} = \frac{64}{66} = 0,967$
Діагностична ефективність	$\frac{a+d}{a+b+c+d} = \frac{64+15}{84} = 0,940$
Відношення правдоподібності позитивного результату	$\frac{a}{a+c}\cdot\frac{b+d}{b} = \frac{15}{17}\cdot\frac{67}{64} = 19,705$
Відношення правдоподібності негативного результату	$\frac{c}{a+c}\cdot\frac{b+d}{d} = \frac{2}{17}\cdot\frac{67}{64} = 0,123$

Порівняння двох останніх показників дає відповідь на питання про ефективність лабораторного тесту, діагностичні властивості якого вивчаються.

Найпростіший метод реалізації задачі – скористатися засобами MS Excel. Рис. 1 демонструє варіант оформлення таблиці Excel з контрольним прикладом. Комірки C4, C5, E4 і E5 містять вхідні дані, які співставлено з позначеннями, використаними в розрахункових формулах (табл. 2), тобто,

a = C4, b = E4, c = C5, d = E5.

	A	B	C	D	E
1	**Вхідні дані**				
2	Результати дослідження	Дійсний стан обстежених пацієнтів			
3		Захворювання присутнє		Захворювання відсутнє	
4	Тест позитивний	a=	**15**	b=	**3**
5	Тест негативний	c=	**2**	d=	**64**
6	Величина критерію χ^2	**56,498**			
7	Висновок	**діагностична якість тесту задовільна**			
8					
9	**Значення критеріїв діагностичної цінності лабораторного тесту**				
10	Апріорна ймовірність захворювання				**0,202**
11	Клінічна чутливість				**0,882**
12	Клінічна специфічність				**0,955**
13	Передбачувана цінність позитивного результату				**0,833**
14	Передбачувана цінність негативного результату				**0,970**
15	Діагностична ефективність				**0,940**
16	Відношення правдоподібності позитивного результату				**19,706**
17	Відношення правдоподібності негативного результату				**0,123**

Рис. 1. Приклад розв'язання задачі за допомогою MS Excel

Для оцінки діагностичної якості тесту у комірки B6 слід записати таку формулу:

= ((C4+E4+C5+E5) *(C4*E5-E4*C5)^2)/((C4+E4)*(C5+E5)*(C4+C5)*(E4+E5)),

а у комірку B7 – таку формулу:

=ЕСЛИ(И(ЕЧИСЛО(B6);B6>3,841);"діагностична якість тесту задовільна";"діагностична якість тесту незадовільна").

Для одержання результатів обчислення у комірки від E8 до E15 треба записати формули, представлені на рис. 2. Слід зауважити, що у формулах використовуються посилання на комірки, які містять початкові значення.

	E
8	=(C4+C5)/(C4+C5+E4+E5)
9	=C4/(C4+C5)
10	=E5/(E4+E5)
11	=C4/(C4+E4)
12	=E5/(C5+E5)
13	=(C4+E5)/(C4+C5+E4+E5)
14	=C4/(C4+C5)*(E4+E5)/E4
15	=C5/(C4+C5)*(E4+E5)/E5

Рис. 2. Розрахункові формули у комірках таблиці Excel

Це найпростіший варіант формул для випадку, коли у знаменнику значення не нульові. Якщо ж у комірках з початковими даними будуть відсутні числа, або значення будуть нульовими, таблиця результатів прийме вигляд рис. 3.

	A	B	C	D	E
1	**Вхідні дані**				
2	Результати дослідження	Дійсний стан обстежених пацієнтів			
3		Захворювання присутнє		Захворювання відсутнє	
4	Тест позитивний	a=		b=	
5	Тест негативний	c=		d=	
6	Величина критерію χ^2	#ДЕЛ/0!			
7	Висновок	#ДЕЛ/0!			
8					
9	**Значення критеріїв діагностичної цінності лабораторного тесту**				
10	Апріорна ймовірність захворювання				#ДЕЛ/0!
11	Клінічна чутливість				#ДЕЛ/0!
12	Клінічна специфічність				#ДЕЛ/0!
13	Передбачувана цінність позитивного результату				#ДЕЛ/0!
14	Передбачувана цінність негативного результату				#ДЕЛ/0!
15	Діагностична ефективність				#ДЕЛ/0!
16	Відношення правдоподібності позитивного результату				#ДЕЛ/0!
17	Відношення правдоподібності негативного результату				#ДЕЛ/0!

Рис. 3. Результат обчислення при відсутності початкових даних

Усі формули видають помилку, оскільки вони представлені дробовими обчисленнями і у випадку, коли дані відсутні, тобто, дорівнюють нулю, знаменних кожного дробу перетворюється на нуль.

Щоб уникнути такої ситуації, розрахункові формули можна дещо ускладнити – ввести додаткову функцію (ЕСЛИ) для аналізу значення знаменника кожного дробу. Якщо знаменник одержує значення «нуль», а це можливо, якщо усі його елементи мають нульове значення, то замість обчисленого результату треба виводити відповідне повідомлення, наприклад, «Результат не існує». У такому разі формула для оцінки діагностичної якості тесту з аналізом значення знаменника у комірці B6 буде виглядати так:

=ЕСЛИ(((C4+E4)*(C5+E5)*(C4+C5)*G5(E4+E5))=0;"Результат не існує";((C4+E4+C5+E5)*(C4*E5-E4*C5)^2)/((C4+E4)*(C5+E5)*(C4+C5)*(E4+E5))).

Розрахункові формули з аналізом значення знаменника у комірках від E8 до E15 треба змінити, як показано на рис. 4.

	E
8	=ЕСЛИ(И(C4=0;C5=0;E4=0;E5=0);"Результат не існує";(C4+C5)/(C4+C5+E4+E5))
9	=ЕСЛИ(И(C4=0;C5=0);"Результат не існує";C4/(C4+C5))
10	=ЕСЛИ(И(E4=0;E5=0);"Результат не існує";(E5)/(E4+E5))
11	=ЕСЛИ(И(C4=0;C5=0);"Результат не існує";C4/(C4+E4))
12	=ЕСЛИ(И(C5=0;E5=0);"Результат не існує";E5/(C5+E5))
13	=ЕСЛИ(И(C4=0;C5=0;E4=0;E5=0);"Результат не існує";(C4+E5)/(C4+C5+E4+E5))
14	=ЕСЛИ(И(C4=0;C5=0;E4=0);"Результат не існує";C4/(C4+C5)*(E4+E5)/E4)
15	=ЕСЛИ(ИЛИ(И(C4=0;C5=0);E5=0);"Результат не існує";C5/(C4+C5)*(E4+E5)/E5)

Рис. 4. Розрахункові формули з аналізом значення знаменника

Функція ЕСЛИ має три параметра, які відділяються один від одного крапкою з комою. Перший параметр – це умова, яка може або виконуватись, або ні. У першому випадку, коли умова виконується, результат функції ЕСЛИ буде сформований другим параметром (у нашому випадку виводиться текст, який записано у лапках – «Результат не існує»). У другому – коли умова не виконується, – результат формується третім параметром, тобто, обчислюється за відповідною формулою. Сама умова представлена вкладеною функцією «И», яка містить набір перевірок компонент знаменника на рівність нулю (параметри функції «И» також розділено крапкою з комою і взято у круглі дужки), тобто, якщо усі компоненти знаменника дорівнюють нулю, функція «И» видає значення «істина», а це означає, що знаменник перетворюється на нуль (заборонена ситуація) і результатом функції ЕСЛИ буде текст «Результат не існує». У таблиці Excel це буде виглядати, як показано на рис. 5.

	A	B	C	D	E
1	**Вхідні дані**				
2	Результати дослідження	Дійсний стан обстежених пацієнтів			
3		Захворювання присутнє		Захворювання відсутнє	
4	Тест позитивний	a=		b=	
5	Тест негативний	c=		d=	
6	Величина критерію χ^2	**Результат не існує**			
7	Висновок	**діагностична якість тесту незадовільна**			
8					
9	**Значення критеріїв діагностичної цінності лабораторного тесту**				
10	Апріорна ймовірність захворювання				**Результат не існує**
11	Клінічна чутливість				**Результат не існує**
12	Клінічна специфічність				**Результат не існує**
13	Передбачувана цінність позитивного результату				**Результат не існує**
14	Передбачувана цінність негативного результату				**Результат не існує**
15	Діагностична ефективність				**Результат не існує**
16	Відношення правдоподібності позитивного результату				**Результат не існує**
17	Відношення правдоподібності негативного результату				**Результат не існує**

Рис. 5. Результат обчислення при відсутності початкових даних з перевіркою на нульове значення знаменника формул

На рис. 6 представлено вигляд таблиці із відображенням формул.

Таким чином, запропонований у статті метод надає механізм розрахунку ключових параметрів оцінки результатів тестування, але не надає ніяких рекомендацій по їх аналізу.

	A	B	C	D	E
1	**Вхідні дані**				
2	Результати дослідження	Дійсний стан обстежених пацієнтів			
3		Захворювання присутнє		Захворювання відсутнє	
4	Тест позитивний	a=		b=	
5	Тест негативний	c=		d=	
6	Величина критерію χ^2	**=ЕСЛИ(((C4+E4)*(C5+E5)*(C4+C5)*(E4+E5))=0;"Результат не існує";((C4+E4+C5+E5)*(C4*E5-E4*C5)^2)/((C4+E4)*(C5+E5)*(C4+C5)*(E4+E5)))**			
7	Висновок	**=ЕСЛИ(И(ЕЧИСЛО(B6);B6>3,841);"діагностична якість тесту задовільна";"діагностична якість тесту незадовільна")**			
8					
9	**Значення критеріїв діагностичної цінності лабораторного тесту**				
10	Апріорна ймовірність захворювання	**=ЕСЛИ(И(C4=0;C5=0;E4=0;E5=0);"Результат не існує";(C4+C5)/(C4+C5+E4+E5))**			
11	Клінічна чутливість	**=ЕСЛИ(И(C4=0;C5=0);"Результат не існує";C4/(C4+C5))**			
12	Клінічна специфічність	**=ЕСЛИ(И(E4=0;E5=0);"Результат не існує";(E5)/(E4+E5))**			
13	Передбачувана цінність позитивного результату	**=ЕСЛИ(И(C4=0;C5=0);"Результат не існує";C4/(C4+E4))**			
14	Передбачувана цінність негативного результату	**=ЕСЛИ(И(C5=0;E5=0);"Результат не існує";E5/(C5+E5))**			
15	Діагностична ефективність	**=ЕСЛИ(И(C4=0;C5=0;E4=0;E5=0);"Результат не існує";(C4+E5)/(C4+C5+E4+E5))**			
16	Відношення правдоподібності позитивного результату	**=ЕСЛИ(И(C4=0;C5=0;E4=0);"Результат не існує";C4/(C4+C5)*(E4+E5)/E4)**			
17	Відношення правдоподібності негативного результату	**=ЕСЛИ(ИЛИ(И(C4=0;C5=0);E5=0);"Результат не існує";C5/(C4+C5)*(E4+E5)/E5)**			

Рис. 6. Вигляд таблиці з формулами

Заключні висновки та професійна інтерпретація результатів обчислень покладається на фахівців у сфері медико-біологічних досліджень.

Висновки

1. Розроблено спеціалізований програмний калькулятор для оцінки клінічної інформативності лабораторних тестів.
2. Методичною основою для розробки калькулятора обрано один з методів доказової медицини – аналіз чотириклітинних таблиць.
3. Калькулятор надає медичним працівникам інструмент оцінки критеріїв діагностичної цінності лабораторного тесту на базі офісного пакету MS Office будь-яких версій без обмежень.
4. Розроблено інструкції користувачам, які мають мінімальні уявлення про MS Excel, самостійно створити відповідний калькулятор.
5. Спеціалізований програмний калькулятор має два блоки, які можуть працювати в будь-якому порядку за вибором користувача.
6. Розроблено блок аналізу чотириклітинної таблиці, який на основі критерію χ^2 визначає статистичну значущість оцінки діагностичної якості тесту.
7. Розроблено блок визначення показників клінічної інформативності тесту, таких, як: апріорна ймовірність захворювання; клінічна чутливість; клінічна специфічність; передбачувана цінність позитивного результату; передбачувана цінність негативного результату; діагностична ефективність; відношення правдоподібності позитивного результату; відношення правдоподібності негативного результату.
8. Заключні висновки та професійну інтерпретація результатів обчислень покладається на фахівців у сфері медико-біологічних досліджень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сайти з доказової медицини [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.medlib.dp.gov.ua/jirbis2/ua/chronicle/157-korisni-posilannya/575-sajti-z-dokazovoji-meditsini.html
2. Дубницький В. Ю. Моделирование эпидемического процесса язвенной болезни с учётом факторов времени и уровня административно – территориального деления / В. Ю, Дубницкий, С. В. Харченко, А. И. Ходырев // Системи обробки інформації. – 2016. – №3(140). – С. 187 – 193.
3. Дубницкий В. Ю. Прогноз смертності від виразкової хвороби шлунку та дванадцятипалої кишки для різних статево – вікових груп населення України / В. Ю. Дубницький С. В. Харченко // Медичні перспективи. – 2016. – №1, Т. XXI, – С. 134 – 139.
4. Бірюков В. С. Доказова оцінка чутливості та специфічності загально клінічних лабораторних досліджень при деяких колагенозах / В. С. Бірюков // Збірник наукових праць співробітників Національної медичної академії післядипломної освіти імені П. Л. Шупика. – 2015. – № 24(2). – С.136 – 141.
5. Бабич П. Н. Применение современных статистических методов в практике клинических исследований. Сообщение второе. Применение критерия хи – квадрат / П. Н. Бабич, А. В. Чубенко, С. Н. Лапач // Український медичний часопис. – 2004. – №2 (40) – III / IV. – С. 138 – 144.
6. Закс Л. Статистическое оценивание / Л. Закс. – Москва: «СТАТИСТИКА», 1976. – 598 с.
7. Лапач С. Н. Статистическое оценивание в науке и бизнесе. Практическое руководство / С. Н. Лапач, А. В. Чубенко, П. Н. Бабич. – Киев: МАРИОН, 2002. – 640 с.
8. ГОСТ Р 53022.3 – 2008. Требования к качеству клинических лабораторных. исследований. Часть 3. Правила оценки клинической информативности лабораторных тестов – Москва: Стандартинформ, 2009. – 22 с.

REFERENCES

1. (2020), Sites of evidence-based medicine, available to: http://www.medlib.dp.gov.ua/jirbis2/ua/chronicle/157-korisni-posilannya/575-sajti-z-dokazovoji-meditsini.html
2. Dubnitskiy, V.Yu., Kharchenko, S.V. and Khodyrev, A.I. (2016), "Modeling the epidemic process of peptic ulcer taking into account time factors and the level of administrative – territorial division", *Information Processing Systems,* No. 3 (140). pp. 187 – 193.
3. Dubnitskiy, V.Yu. and Kharchenko, S.V. (2016), "Prediction of mortality from gastric and duodenal ulcer for various sex-age groups in Ukraine", *Medical perspectives*, Vol. XXI, pp. 134–139.
4. Babich, P.N. (2004), "Application of modern statistical methods in the practice of clinical research. The message is second. Application of the chi - square criterion", *Ukraïns'kij medichnij chasopis*, No.2 (40) – III / IV, pp. 138–144.

5. Biriukov, V.S. (2015) “Evidence-based assessment of sensitivity and specificity in general clinical laboratory studies in some collagenoses”, *Collection of scientific works of employees of the National Medical Academy of Postgraduate Education. Thug*, No 24 (2), pp. 136– 140.
6. Zaks, L. (1976), *Statistical evaluation*, STATISTICS, Moskow, 598 p.
7. Lapach, S.N., Chubenko, A.V. and Babich, P.N. (2002), “*Statistical evaluation in science and business”,* MARION, Kyiv, 640 p.
8. GOST R 53022.3 – 2008. (2009), *Quality requirements for clinical laboratory. research. Part 3. Rules for evaluating the clinical informativeness of laboratory tests*, Standartinform, Moscow, 22 p.

Received (Надійшла) 30.03.2020
Accepted for publication (Прийнята до друку) 13.05.2020

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Гадецька Світлана Вікторівна – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри вищої математики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна;
Svitlana Gadetska – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Associate Professor of Department of Higher Mathematics of Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: svgadetska@ukr.net; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-9125-2363

Дубницький Валерій Юрійович - кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник Харківського навчально-наукового інституту Державного вищого навчального закладу “Університет банківської справи”, Харків, Україна;
Valeriy Dubnitskiy - PhD in Technical Sciences, Senior Researcher, Senior Researcher of Kharkiv Educational Scientific institute SHEI “University of Banking”, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: dubnitskiy@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-1924-4104

Ходирєв Олександр Іванович - старший викладач інформаційних технологій кафедри Харківського навчально-наукового інституту Державного вищого навчального закладу “Університет банківської справи”, Харків, Україна;
Alexander Khodyrev - Senior Instructor of the Information Technologies Department of Kharkiv Educational Scientific institute SHEI “University of Banking” Kharkiv, Ukraine;
e-mail: khodyrevmjk3758@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-9871-9440

Специализированный программный калькулятор для оценки клинической информативности лабораторных тестов

С. В. Гадецкая, В. Ю. Дубницкий, А. И. Ходырев

Аннотация: **Цель работы** – разработать специализированный программный калькулятор для оценки клинической информативности лабораторных тестов. Методической основой для разработки калькулятора избран один из методов доказательной медицины – анализ четырёхклеточных таблиц. Калькулятор предоставляет медицинским работникам инструмент для оценки критериев диагностической ценности лабораторного теста на базе офисного пакета MS Office любых его версий. Разработаны инструкции пользователям, имеющим минимальные представления о MS Excel, для самостоятельного создания соответствующего калькулятора. Специализированный программный калькулятор имеет два блока, которые могут работать в любой последовательности по выбору пользователя. Разработан блок анализа четырёхклеточной таблицы, который на основе критерия χ^2 определяет статистическую значимость оценки диагностического качества теста. Разработан блок определения показателей клинической информативности теста, таких, как: априорная вероятность заболевания; клиническая чувствительность; клиническая специфичность; предполагаемая ценность позитивного результата; предполагаемая ценность негативного результата; диагностическая эффективность; отношение правдоподобия позитивного результата; отношение правдоподобия отрицательного результата. Заключительные выводы и профессиональную интерпретацию результатов вычислений выполняют специалисты в области медико – биологических исследований.

Ключевые слова: доказательная медицина; информативность лабораторных тестов; четырехклеточная таблица; специализированный программный калькулятор.

Specialized programmable calculator for laboratory test clinical informativeness estimate

S. Gadetska, V. Dubnitskiy, A. Khodyrev

Abstract. The purpose of the work is to develop a specialized software calculator for assessing the clinical informativeness of laboratory tests. Methodological basis for calculator development served one of evidence-based medicine methods – two-by-two table analysis. Calculator gives to medicos an instrument to estimate laboratory test diagnostic value criteria on the basis of MS Office package in any version. Developed guidelines permit users with minimum MS Excel proficiency to create respective calculator themselves. Specialized programmable calculator consists of two units which may operate in any succession by user’s choice. Two-by-two table analysis has been developed that. It is based on the criterion χ^2 and determines the statistical significance of the diagnostic quality assessment of the test. A block for determining indicators of clinical informativeness of the test has been developed. These indicators are as follows: priori probability of malady; clinical sensitivity; clinical specificity; probable value of positive result; probable value of negative result; diagnostic efficiency; likelihood ratio of positive result; likelihood ratio of negative result. Final conclusions and professional interpretation of calculation results should be made by specialists in medical-biological research.

Keywords: evidence-based medicine; laboratory test informativeness; two-by-two table; specialized programmable calculator**.**

UDC 004.932 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.2.13**

K. Dergachov, L. Krasnov, O. Cheliadin, R. Kazatinskij

National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine

VIDEO DATA QUALITY IMPROVEMENT METHODS AND TOOLS DEVELOPMENT FOR MOBILE VISION SYSTEMS

Abstract. Subject of study. The article proposes new methods of input and preliminary processing of video data for web- and specialized pi-cameras in monocular and stereo vision systems based on Raspberry Pi microcomputers to improve the quality of work of modern mobile vision systems. This approach is always relevant, since the design of modern vision systems constantly requires new non-trivial hardware, algorithmic and software solutions. **Objectives.** The goals are to compare quality indicators of the known methods of input and preliminary processing of video data in vision systems and to develop new methods and algorithms providing better speed, the necessary frame resolution and the independence of the frame brightness from changes in scene illumination while reading video data. **Methods used.** The paper formulates a comprehensive criterion for improving the quality of the Raspberry Pi microcomputer video input and preprocessing video data. Based on the accepted quality indicators (video input speed, resolution, and stability indicators of average brightness of the current frames of the received video stream), video input and preprocessing algorithms that satisfy the specified requirements are synthesized. This allows to find the optimal method for processing video data and to overcome the contradiction of reducing the input speed due to the need of increasing the resolution of video frames for each project. The created universal program for input and preliminary processing of these data allowed to obtain quantitative estimates of the effectiveness of the developed algorithms and formulate recommendations for their further use. All this allows you to significantly increase the efficiency of using Raspberry Pi microcomputers in modern mobile vision systems. **The results obtained** are the basis for the creation of a universal software product for high-speed input (in real time) and preliminary processing of video data for face detection and recognition systems, as well as stereo vision systems. **Conclusions.** The conducted experimental studies confirmed the efficiency and effectiveness of the proposed methods and algorithms for high-speed input of video data with different values of the resolution of the frame and the ability to adaptively adjust its brightness. Based on the created methods and algorithms, various options for its software implementation are proposed. This allows us to recommend the results for practical use. Prospects for further research include the expansion of the vector of criteria for assessing quality and features for optimizing video data, as well as the creation of new algorithms and various versions of programs based on them.

Keywords: Raspberry Pi microcomputer; algorithms and program codes for input and preprocessing of video data; OpenCV library functions.

Introduction

Rapidly developing mobile application engineering actively uses vision systems (here in after – VS) based on small-sized video recorders and micro-computers.

The need for such systems is especially big in robotics, when equipping unmanned aerial vehicles, automobile vehicles etc.

Subject of study. When designing mobile small-sized VS, designers of hardware and software systems must first solve a number of serious problems associated with choosing an economical autonomous power supply, a microcomputer with sufficient speed and memory capacity, suitable video recorders and modern software.

In addition, even at the stage of preliminary design, it is necessary to introduce quality criteria for the received video information, which correspond to accepted standards and allow using the available hardware and software resources with maximum efficiency.

The main difficulty in building modern mobile VS is the lack of a unified approach to the selection of suitable microcomputers, cameras, and methods for inputting and pre-processing video data in the conditions of limited resources of the processing system for speed. Therefore, we will conduct a comparative analysis of known methods and means, and also consider in detail new technical solutions. Such a task is quite modern and relevant, since designing effective VS requires new approaches, non-trivial hardware, algorithmic and software solutions.

The goal of this study is analysis of well-known methods of input and preliminary processing of video data during VS implementation, development and creation of new algorithms and software tools guaranteed to ensure high quality of the original video data and real-time processing of video information.

Assessment of the quality and effectiveness of new methods and means of obtaining and processing video data must be carried out in laboratory conditions, and the reliability of the results should be checked by statistical analysis of the data.

1. Problem statement

Criteria for assessing the quality of the source video in VS. A systematic analysis of existing methods of input and processing of video data in various VS is possible only on the basis of objective quality criteria. To create them, we introduce the following indicators, define and decode the corresponding abbreviations:

- FPS – (Frame per second). This value characterizes the speed of changing / reading frames of the recorded video stream. The maximum FPS value is limited by the passport data of the camcorder used;
- FR – (Frame Resolution) describes the resolution of the video frame in pixels (320x240, 640x480, 1280x960, etc.);
- FMB – (Frame medium brightness). This is an indicator of the average level of brightness of the frame, objectively reflecting the degree of illumination of the scene at the current time.

These are the most important indicators mainly

© K. Dergachov, L. Krasnov, O. Cheliadin, R. Kazatinskij, 2020

determine the quality indicators of the video processing system in VS.

Traditional methods of capturing video data significantly slow down the processing speed of video data, which often seriously limits the ability to work in real time. However, using multithreading can significantly reduce the impact of Input/Output latency, leaving the main thread without blocking. Therefore, there is the possibility of increasing FPS up to the technological limit of the camcorder used.

It is clear that in solving problems of video data visualization, the desire to improve quality by increasing the resolution of the frame (FR) is always justified. However, it should be noted that a large increase in the number of pixels in the frame will inevitably lead to a slowdown (decrease in the FPS). At the same time, a compromise can be found experimentally - using the proposed new effective algorithms for capturing and entering video data.

Note that the knowledge of the video stream frame medium brightness (FMB) in conditions of high variability of the illumination of the scene is very useful. This allows, by performing threshold procedures, to set the mode to enable / disable contrasting (equalization) of the frames of the video stream. In addition, with a low level of frame brightness (by comparing FMB with a predetermined threshold) in long-term video surveillance systems, it is convenient to turn on/off the backlight of the camcorder.

Based on the accepted quality indicators, the authors will further formulate recommendations on the construction of high-quality video input algorithms for modern mobile VS and give examples of their practical implementation.

2. Review of the literature

Key resources for building mobile VS. Consider more carefully and evaluate in detail all aspects of projects for the construction of modern mobile VSs systems. In this case, we will be guided by the accepted criteria for the quality of video data and rely on the available data of modern literature and internet resources.

Computers for mobile VS. To meet the needs of this market segment, a fairly large number of microcomputer models (Lego, Intel Galileo, Android IOIO OTG, Arduino, etc.) are now available. However, the Raspberry Pi platform holds strong leadership in this series [1 - 4]. It is represented by a line of models having various hardware implementations at affordable prices. The best of them are comparable in performance to desktop PCs. So the Raspberry Pi 4 Model B has 4 GB of RAM, a fast 4-core processor (1.5 GHz), support for two displays with a resolution of up to 4K, Gigabit Ethernet, USB 3.0, Wi-Fi, Bluetooth 5.0 and power via USB -C (5V/3A). Most importantly, the Raspberry Pi 4 has two USB 3.0 ports. They are 10 times faster compared to USB 2.0 and are well suited for connecting fast peripheral units (flash drives, web-cameras, etc.).

Digital video recorders (DVRs) for mobile VS. Typically, mobile VS are equipped with low-cost, low-resolution, non-calibrated web cameras that can be connected to the Raspberry Pi via USB ports. This method of organizing video surveillance has several disadvantages. The main one is that when synthesizing stereo vision systems, you cannot use one USB bus. This eliminates the possibility of camera synchronization and significantly reduces the total system bandwidth. At the same time, it is difficult to take into account the desynchronization due to the multitasking of modern operating systems and the functioning of the task scheduler. Camera desynchro-nization of not more than 10 ms is acceptable [7].

Specialized pi-cameras for Raspberry Pi boards have higher quality than web-cameras. They are used for monocular video surveillance systems. For example, the Raspberry Pi Camera Module v2 is a high-quality Sony IMX219 image sensor with a fixed focus. It connects to the microcomputer board using a special CSI interface (Camera Serial Interface). The sensor measures 25mm × 23mm × 9mm and weighs 3g. A short ribbon cable is used to connect to the Raspberry Pi. Key features of this sensor are:

- 8 megapixel camera capable of taking photos with a resolution of 3280 × 2464 pixels;
- Video recording with a resolution of 1080 p 30 FPS, 720 p 60FPS, 640 × 480 p 60/90FPS;
- Software is supported in the latest version of the Raspbian Operating System;

Here and further these abbreviations are used: p – pixel, FPS – frame per second.

Note that for a long time there was no technical solution for the implementation of a stereo pair with two pi-cameras. This is due to hardware design limitations − standard Raspberry Pi models contain only one camera port. To date, the problem has been resolved by the efforts of Arducam, which released the HAT stereo camera for the Raspberry Pi [13]. It allows to connect two 5-megapixel OV5647 or two 8-megapixel pi-cameras IMX219 to a standard Raspberry Pi board via an additional expansion board and simultaneously capture images or video. It is very important that both cameras are fully synchronized (accurate to units of ns). Further details on the use of this technology will be described below.

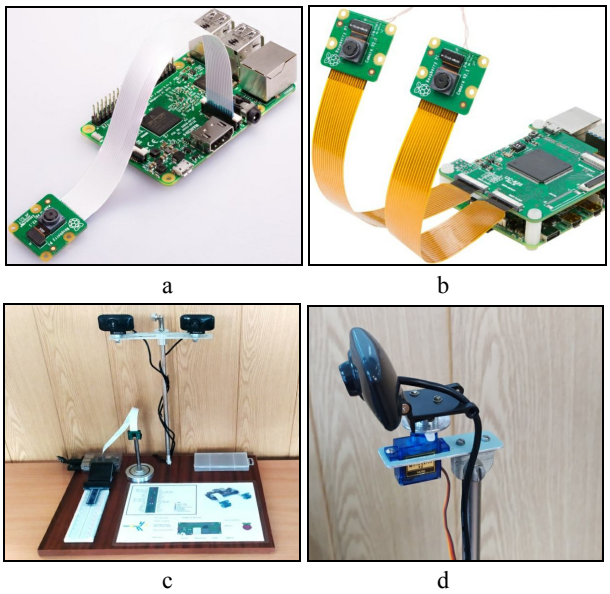
Programming tools. Raspberry Pi computer-based vision systems software typically uses the developer-recommended Raspbian operating system and the Python programming language. Python, as a modern object-oriented language, is most often used to program General Purpose Input/Output (GPIO) I/O ports on the Raspberry Pi and is part of the Raspbian operating system. It is possible to connect a large number of specialized libraries to Python, expanding the capabilities of solving the problems of necessary applications. It is especially important that in conjunction with Python you can use OpenCV − a library of algorithms for computer vision, image processing and general-purpose numerical algorithms with open source [6-12]. The convenience of working with Python also consists in the possibility of working with the Windows operating system (on a personal computer) and on the Raspberry Pi microcomputer with the Raspbian operating system. However, it is necessary to ensure that the versions of the libraries used in the project are completely identical.

In addition to the listed requirements in VS, it is necessary to carry out data input from video cameras in real time, and at the same time carry out complex video processing. In monocular video surveillance systems, for example, this is the task of detecting and recognizing faces, and in stereoscopic systems it is the task of constructing depth maps and volumetric reconstruction of the scene. In severe conditions of limited resources (hardware and software), they often resort to multi-threaded processing of the original video data, which can significantly improve the performance of video processing.

3. Materials and methods

Tools for constructing video data input algorithms. When performing the work, the authors used the following hardware and software resources:

Hardware. To conduct experimental studies, a laboratory bench was created on the basis of the Raspberry Pi 3 Model B microcomputer and a set of one or two web cameras and a pi camera. The appearance of the laboratory bench is shown in FIG. 1.



a b c d

Fig. 1. Fragments of the laboratory installation

Identical FC-250 web-cameras (FPS = 30 at resolution FR = 1280x960) are designed to create stereo pairs with the ability to connect them to a computer via USB ports.

The design features of the stereo pair are shown in FIG. 1, c. When cameras are rigidly mounted relative to each other, it is possible to change the height of the stereo pair, rotate it 360° around the vertical axis. Each camera can be rotated at a small angle in the horizontal and vertical planes. But the main thing is the adjustment of the distance between the cameras using a special control line and the installation of this distance with an accuracy of fractions of mm. This is very important when changing the base distance.

A single pi-camera (in our case, the previously described Sony IMX219 Exmor camera) is used for a monocular vision system. It is mounted on a separate tripod (Fig. 1, c) and connected to the Raspberry Pi through a special CSI video input. This significantly reduces the load on the CPU compared to connecting cameras via USB (Fig. 1, a). This 8-megapixel sensor allows you to capture, record, broadcast video and support the following video formats: 1080p (30FPS), 720p (60FPS), 640 × 480p (90FPS).

The appearance of a HAT stereo camera based on two Sony IMX219 video sensors is shown in FIG. 1, b. In Fig. 1, d another example is shown - using a web-camera with a USB connection for video surveillance purposes. This camera is mounted on a special platform, the rotation of which with the help of a servo drive can be carried out through the connector of the hardware I/O ports of the GPIO of the Raspberry Pi computer.

Main programming resources. When analyzing various methods of inputting video data, we will focus on the use of the Python programming language and available internal and external resources. The main feature of writing program codes in Python is the formation of the necessary features of the project by importing its own packages (for example, numpy, pip,pi-camera) and libraries (`Pillow`, `Matplotlib` etc.). It also significantly increases the software resources of the processing system and the connection of external libraries. In our case, this is the OpenCV library [8 − 11], the imported resources of which are relatively small for solving the assigned tasks:

```
# import the necessary packages
from imutils.video import VideoStream
from imutils.video import FPS
import numpy as np
import argparse
import imutils
import datetime
import time
import cv2
```

Connecting these (and in some cases other packages and modules) does not put a significant load on the processor and creates good prerequisites for processing data in real time.

Pay attention to the use of relatively rarely used resources (`imutils` package and `argparse` module).

`Imutils` is a set of convenient functions for simplifying basic image processing operations, such as shifting, rotating, resizing, displaying images in `Matplotlib`, using OpenCV and Python. The aka `imutils` is also used when creating a multi-threaded Python class. It provides access to the computer's built-in webcam (external camera with USB connection or pi-camera) using the OpenCV video capture functions. This allows you to significantly increase the FPS by creating a new stream, which only polls the camera for reading new frames, and the main stream processes the current frame. Next, we consider this technology in more detail. Argparse is a Python module for handling options and command line arguments with which the script is called. In our task, it is rational to use the argparse module to convert video files to regular images and save them using the OpenCV library.

Methods of input and preprocessing of video data. Next, we consider the main options for building a video input system and their preliminary processing.

1. The classical method of inputting and processing video data from a web camera in monocular

vision systems is carried out using the OpenCV function for video capture `cv2.VideoCapture (0)`. Here is a snippet of Python code for the practical implementation of this method:

```
cv2.VideoCapture(0)
while True:
    (grabbed, frame) = stream.read()
    ...
    ...
    cv2.imshow("Frame", frame)
```

However, the `VideoCapture` video capture function and the `read()` data reading method block the main stream of program code for processing video data until the frame is read from the camera device and returned to the main program. Unfortunately, this method, which is distinguished by simplicity, is often the main obstacle − it limits the ability to process the video stream in real time.

2. The Raspberry Pi hardware input method is implemented using the function of pi-camera. However, this results in a limitation of the FSP due to the action of the software load. This method does not allow the use of two or more cameras. Note also that a time delay is required to process the display of frames. The program code for this method is:

```
camera = PiCamera()
camera.framerate = 32.
Stream = camera.capture_continuous(
rawCapture,format = "bgr",use_video_port =
True)
time.sleep(2.0)
for (i,f) in enumerate(stream):
frame = f.array
    ...
    ...
cv2.imshow("Frame", frame)
```

Note that the `VideoCapture` and `PiCamera()` functions block the main stream of program code for processing video data until the frame is read from the camera device and returned to the main program. Unfortunately, this method, which is distinguished by simplicity, is often the main obstacle − it limits the ability to process the video stream in real time.

3. The method of multithreaded input of video data involves the creation of the `VideoStream()` class to transfer the reading of the frames of a web camera or usb device to another stream, completely separate from the main Python script. This allows you to continuously read frames from the I/O stream while the main stream processes the current frame. Once the main thread has finished processing the next frame, it just needs to extract the current frame from the I/O stream. This is achieved without waiting for blocking I/O operations. The program code for the VideoStream multi-threaded input class is shown below:

```
fvs=VideoStream(usePiCamera=
   =args["picamera"] > 0).start()
time.sleep(2.0)
while True:
  frame = vs.read()
  cv2.imshow("Frame",frame)
fvs.stop()
```

Creating an FPS Class. An important addition to multi-threaded video capture functionality is the definition of the FPS class. This class is used to visualize and evaluate data entry speed. It provides quantitative evidence that multithreading does increase FPS.

```
fps = FPS().start()
while fvs.more():
  ...
...
  fps.update()
fps.stop()
printfps()
```

The results of calculating the current FPS values are displayed on the Raspberry Pi monitor screen.

Creating the FR class. Frame Resolution is a very important parameter of the frame, the FPS of the video stream directly depends on the choice of it. For example, the largest possible resolution of a pi camera is FR = 1280x960. In this case, FPS reaches 30 frames per second.

To select and control the frame size, a special Resolution class was created containing the maximum frame resolution and its proportions that are most acceptable for a given project. Here is a code snippet for implementing this procedure:

```
fvs=VideoStream(usePiCamera(0)] >.start()
while fvs.more():
    resolution.frame(fvs)
  frame1=resolution.init(1,1)
  frame2=resolution.init(2,1)
  cv2.imshow("Frame1",frame1)
  cv2.imshow("Frame2",frame2)
...
...
fvs.stop()
```

Stabilization of the contrast of video data. The registration of video data usually occurs against a background of various kinds of interference with a constant dynamic change in the background of the observed scene. In this case, one of the dominant negative factors is the variability of illumination. Note that these can be both rapidly changing lighting conditions and slow changes caused by, for example, twilight. All this leads to poorly controlled variations in the contrast of the frames, and, consequently, to a deterioration in the quality of processing. Recall that usually the change in brightness values for video data is in the range of numbers 0 ÷ 255. This corresponds to the uint8 data format. To overcome these difficulties (poorly controlled changes in frame contrast depending on illumination), the authors proposed to convert the original video sequence from the RGB color space to the YUV space using the function

```
img_yuv = cv2.cvtColor
(img, cv2.COLOR_BGR2YUV).
```

The range of RGB values is [0 ÷ 255] for each component, and ranges are used for the YUV color space

- Y → [0 ÷ 255];
- U → [-112 ÷ 112];
- V → [-157 ÷ 157].

A distinctive feature of the YUV color space [5] is that it uses an explicit separation of information about brightness and color. Color is represented in the form of three components - luminance (Y) and two color difference (U and V).

After translating the RGB frame of the video sequence into the YUV color space, it performs the equalization procedure (increasing contrast) of only the Y component using the function

```
img yuv[:,:,0] =
cv2.equalizeHist(img_yuv[:,:,0]),
```

and then the frame is inversely converted from YUV format to RGB format:

```
img_output=cv2.cvtColor
(img_yuv,cv2.COLOR_YUV2BGR).
```

In this case, the color balance is maintained unchanged, since the color difference components U and V were not transformed.

Note that the transition from the RGB color space to the YUV space allows you to simply estimate the average level of brightness of the frame by the Y component. The most objective and stable indicator in our opinion is the indicator FMB (Frame medium brightness), which is calculated as

$$FMB = \frac{1}{M \cdot N} \cdot \sum_{i=0}^{N} \sum_{j=0}^{M} Y(i,j)$$

where $Y(i,j)$ – two-dimensional array of numbers defining the brightness of the pixels of the image frame size $M \times N$. This indicator is all the more useful because at low levels of frame brightness in video surveillance systems it is convenient to use the procedure of comparing it with a pre-set threshold for automatically turning on / off the scene illumination system.

Thus, the use of the equalization procedure ensures the alignment of the histogram of the brightness distribution and leads the average brightness of the image to a value (FMB = 127), regardless of what this indicator was for the original image. This makes it possible to stabilize the level of average brightness of frames, and therefore, eliminate the factors of instability of illumination of the scene, which negatively affect the further quality of video processing.

4. Experiments

To evaluate the effectiveness of the proposed methods for improving the quality of video data, a number of experimental studies were carried out using the DVRs shown in Fig. 1, and the specialized program "Test programm". It is written in Python using the appropriate resources of the OpenCV library. This program is based on the use of input and preprocessing algorithms described in our work, received using web or pi-cameras of the original video data into the Raspberry Pi microcomputer. A generalized UML diagram of the operation of this program is shown in Fig. 2.

Given the complex nature of the research, the program included the possibility of organizing various versions of the video capture and video input algorithm (classic with the `cv2.VideoCapture(0)` function, accelerated by the hardware of the Raspberry Pi computer, as well as the fastest multithreaded input using a specially created class `VideoStream`). In addition, the program can pre-set the required screen resolution, as well as in conditions of insufficient scene illumination - the mode of stabilizing the brightness of the frame.

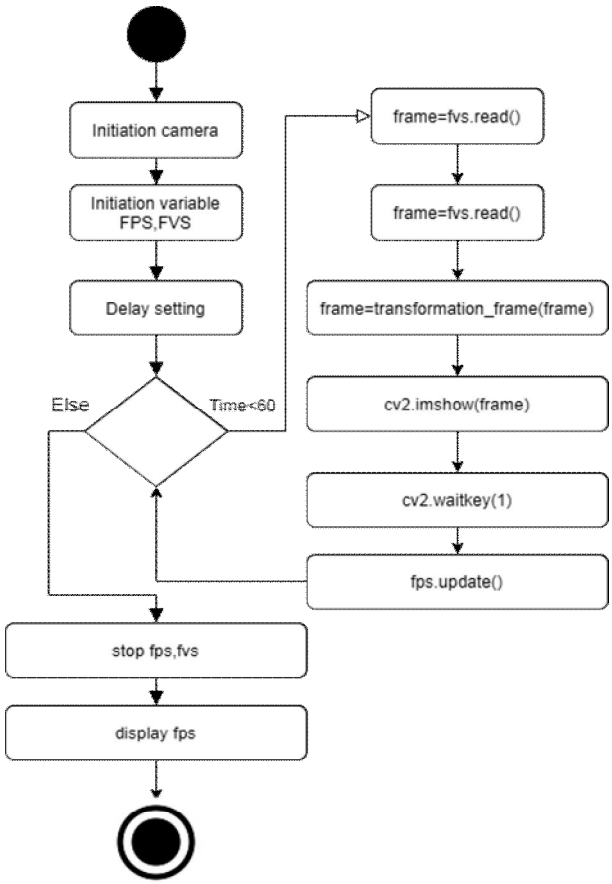


Fig. 2. UML diagram of program activities

The «Test program» also provides a number of service options. First of all, it is the ability to display the input video stream on the screen using the `cv2.imshow (frame)` function.

The `transformation_frame(frame)` function allows you to change the format of frames and their sizes, and, if necessary, set the mode for stabilizing the brightness of the frame. In addition, it is envisaged to apply special inscriptions in the frame field with information about the current FPS value of the video stream, frame sizes and stabilization of the brightness of the scene image.

Note that to establish the operating mode of the `VideoStream` class (capture the required number of frames of the input video stream), a time interval of 1 s was selected, and to obtain stable and reliable FPS estimates, the averaging interval was 10 s.

5. Results

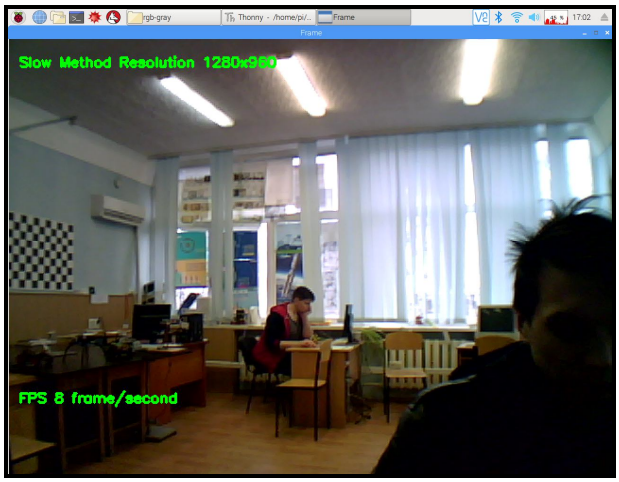
When planning the experiment, the task was to identify and study the relationship between the nature of changes in the FPS performance indicator and the resolution of the FR frames of the video stream entered into the Raspberry Pi microcomputer for various data input and preprocessing algorithms.

In addition, the task was to study the degree of influence on the speed of the procedure for entering additional load on the computer processor due to the algorithm for stabilizing the brightness of the video stream frames. Based on these data, it was necessary to formulate recommendations on the optimal

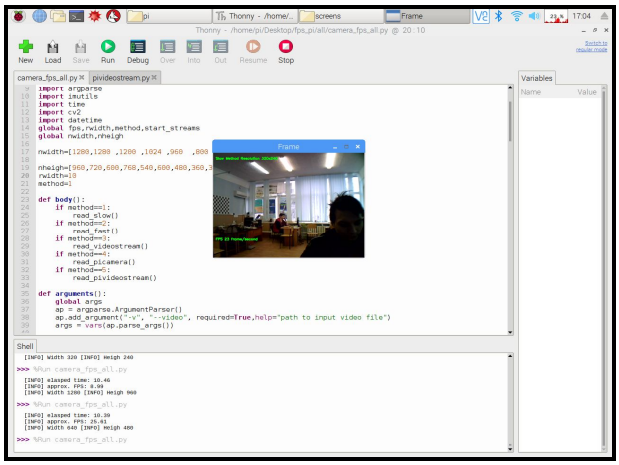
configuration of software for input and preliminary processing of received video data.

No less important is the task of convenient and clear visualization of the obtained experimental data.

In Fig. 3 two options for the formation of frames of a video stream with different resolutions and different aspect ratios of the frame are shown. In the first case, at a resolution of 1280 × 960 (Fig. 3, a), the frame almost completely covers the area of the working window. The inscription on the bottom left of the frame displays the current FPS value. When viewing a video stream, the FPS value changes in real time. The inscription in the upper left corner shows which video input method is used in this case (Slow method and Fast method appropriately).



a



b

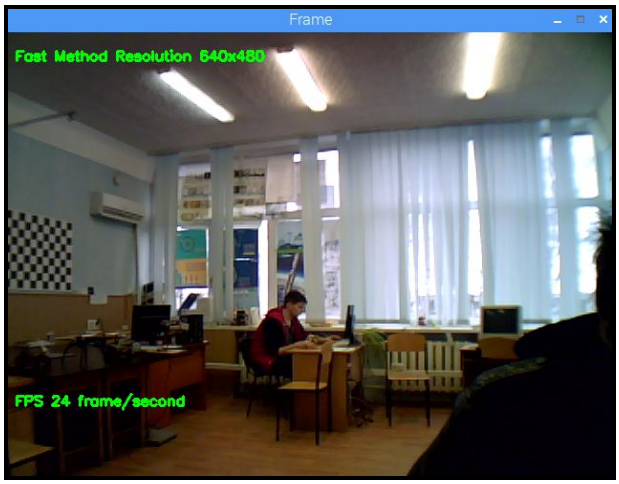
Fig. 3. Video stream frames formed with different resolutions: a – 1280 × 960; b – 320 × 240

In Fig. 3, b, a frame of a video stream with a resolution of 320 × 240 is displayed on a computer screen. Such permission is usually used in robotics. Due to the small area of this frame, you can easily see the screen fragment of the program code, and in the lower left corner of the command window the current calculated FPS values. Here is a fragment of such data:

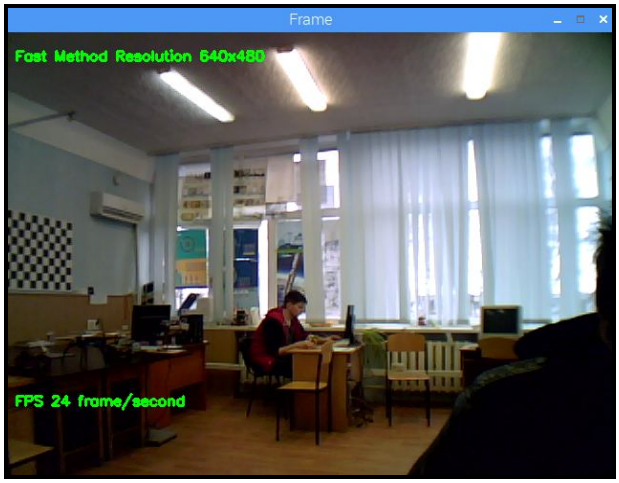
```
[INFO] elasped time: 10.67
[INFO] approx. FPS: 8.53
[INFO] Width 1280
[INFO] Heigh 960
```

When comparing the FPS in the examples shown in Fig. 3 shows that the transition from low resolution to large leads to a significant decrease in input speed − FPS decreases from 23 frame/second to 8. Potentially possible (passport FPS) is 30 frame / second).

Fig. 4 shows two 640x480 video frames inserted into a Raspberry Pi computer using the multi-stream `VideoStream` method. Due to insufficient lighting of the scene (Fig. 4a), the procedure for contrasting (equalizing) frames was introduced into the preliminary processing of the video stream (Fig. 4b). It was previously mentioned that this requires translating the RGB frame of the video sequence into the YUV color space, followed by the equalization of the luminance component Y and returning it to the RGB color space. It is clear that this creates an additional load on the processor and negatively affects the input speed − FPS decreases from 24 to 19 frame/second. However, the image quality of the frame is increasing.



a



b

Fig. 4. Stabilization of the brightness of the frames of the video stream

Fig. 5 shows the dependences of the rate of input of FPS video data using a web-camera depending on the selected resolution of the frame. Here we present possible standard options for the names of the formats and the resolution of the frames, which are recommended to be established when creating and

organizing the input of the video stream, and also determine the aspect ratio of the frame on the screen:

QVGA – Frame Resolution = 320×240 → (4 : 3);
HVGA – Frame Resolution = 640×240 → (8 : 3);
HVGA_1 – Frame Resolution = 320×480 → (2 : 3);
nHD – Frame Resolution = 640×360 → (16 :93);
VGA – Frame Resolution = 640×480 → (4 : 3);
SVGA – Frame Resolution = 800×600 → (4 : 3);
qHD – Frame Resolution = 960×540 → (16 : 9);
XGA – Frame Resolution = 1024×768 → (4 : 3);
WXVGA – Frame Resolution = 1200×600 → (2 : 1);
HD 720p – Frame Resolution = 1280×720 → (16 : 9);
Full HD – Frame Resolution = 1920x1080 → (16 : 9).

The analysis was carried out for formats with a relatively low resolution (from QVGA – 320 × 240 to Full HD - 1920 × 1080). A comparative analysis of the effectiveness of the two input methods (classical and multithreaded) showed the undoubted advantage of the latter.

This is especially true with high resolution frames. So, for example, at HD 720p resolution, the FPS of the fast method is 17.60, which is about twice as high as the slow method (FPS = 9.76). Such data are undoubtedly useful for practical use.

As in the previous study, we studied data on the characteristics of the input rate of a video stream using various methods (slow and fast). But at the same time, for video surveillance, a specialized pi-camera was used in conjunction with the Raspberry Pi microcomputer. The dependences of FPS values on the resolution of video frames are shown in Fig. 6. Obviously, the use of the method of multithreaded input (Fast method) in this case significantly exceeds the capabilities of the slow method (Slow method).

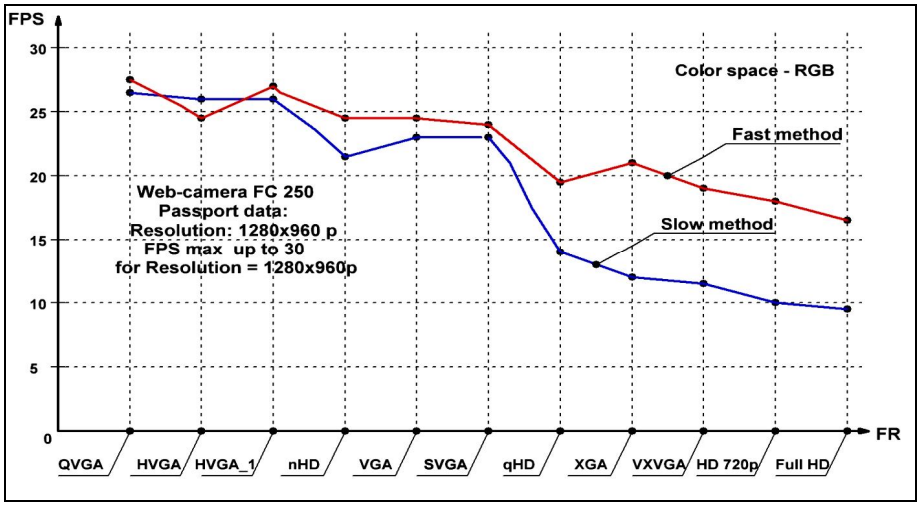


Fig. 5. Indicators of video input speed for various resolutions of video stream frames

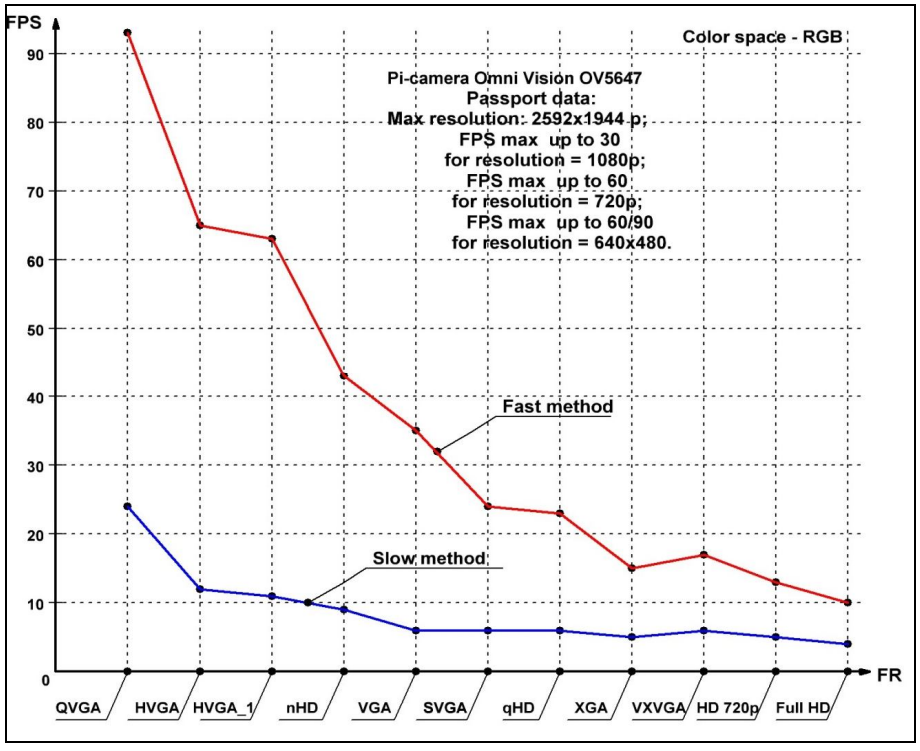


Fig. 6. Indicators of video input speed for pi-cameras

This is especially noticeable at low resolution values of the frame. For example, with QVGA resolution (320 × 240), the data input speed increases by 3.5 times and approaches the potential capabilities of the pi-camera in terms of speed. Based on these data, we can conclude that in practically important applications it is advisable to use pi-cameras and the Fast method for this task, based on the use of the multi-stream class VideoStream.

The given examples, of course, do not cover all the features of the problem under consideration. You can explore the effect on input speed and frame quality and other factors. However, due to limited publication volumes, we recommend that you do this yourself.

Conclusions

A new integrated approach to the problem of improving the quality of video processing in modern mobile VS based on Raspberry Pi microcomputers is proposed. Jointly optimized indicators of the speed of capture and processing of video data, the resolution of the video frame and the stability indicators of the brightness of the frame regardless of the lighting conditions of the scene. The effectiveness of the proposed video processing algorithms and methods for synthesizing program codes was studied experimentally.

The scientific novelty. The analysis showed a significant improvement in the quality of the recorded video stream using the proposed algorithms. For the first time, new methods for processing video data were obtained on the basis of objective optimization criteria using modern programming tools.

The practical significance. In the future, the results can be used to create various projects based on mobile VS. Based on the results of the research, it is easy to create the necessary high-quality software.

Prospects for further research. The authors consider it most appropriate to complete work in this area to conduct detailed studies of the characteristics of input and preliminary processing of video data from two cameras to form a modern mobile stereo vision system on the basis of the Raspberry Pi computer.

References

1. (2020), *The official documentation site for working with a Raspberry Pi computer*, available to: https://www.raspberrypi.org;
2. (2020), *The official site of the Python language*, available to: http://python.org/;
3. (2020), *The official website of the developers of the OpenCV library*, available to: http://opencv.org;
4. (2019), *Synchronized Dual Camera for Raspberry Pi 4*., Published by Lee Jackson on September 16, 2019, available to: https://www.arducam.com/dual-camera-hat-synchronize-stereo-pi-raspberry/;
5. Fedorov, D.Ju. (2016), *Fundamentals of programming using the Python language as an example*, Simvol-Pljus, SPb., 176 p.
6. Lutc M. (2011), *Python Programming*, Simvol-Pljus, SPb., 992 p.
7. Protasov, S.I., Kurgalin, S.D. and Kryloveckij A.A. (2011), "Using webcams as a source of stereo pair flow", *Vestnik VGU, Serija: sistemnyj analiz i informacionnye tehnologii*, Voronezh, No. 2
8. Linda G., Shapiro and George C., Stockman (2001), *Computer Vision*, Prentice Hall, 580 p.
9. Joseph, Howse and Joe Minichino (2015), *Learning OpenCV 3 Computer Vision with Python*, Second Edition, Packt Publishing, ISBN: 978-1-78528-977-4.
10. Saurabh, Kapur (2017), *Computer Vision with Python 3*, Packt Publishing, ISBN: 978-1-78829-976-3.
11. Prateek, Joshi (2015), *OpenCV with Python By Example*, Packt Publishing, ISBN: 978-1-78528-393-2.
12. Dergachov, K., Krasnov, L., Cheliadin, O. and Zymovin, A. (2018), "Adaptive algorithms of face detection and effectiveness assessment of their use", *Advanced Information Systems*, Vol. 2, No. 3, DOI: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.3.02.
13. Dergachov, K., Krasnov, L., Cheliadin, O. and Plakhotnyi, O. (2019), "Web-cameras stereo pairs color correction method and its practical implementation", *Advanced Information Systems*, Vol. 3, No. 1, pp. 29-42, DOI: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.1.06

Received (Надійшла) 24.03.2020
Accepted for publication (Прийнята до друку) 20.05.2020

Відомості про авторів / About the Authors

Дергачов Костянтин Юрійович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри систем управління літальними апаратами, Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна;
Kostiantyn Dergachov – Candidate of Technical Science, Associate Professor, Head of Aircraft Control Systems Department, National Aviation University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: kosv.v@ukr.ua; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-6939-3100.

Краснов Леонід Олександрович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри систем управління літальними апаратами, Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського «ХАІ», Харків;
Leonid Krasnov – Candidate of Technical Science, Senior Research, Associate Professor of Aircraft Control Systems Department, National Aviation University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: leonid.krasnov.1947@gmail.com; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0003-2607-8423.

Челядін Олександр Олександрович – аспірант кафедри систем управління літальними апаратами, Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна;
Oleksandr Cheliadin – Doctoral Student of Aircraft Control Systems Department, National Aviation University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: lorianua33@gmail.com; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-1201-6240.

Казатинський Роман Євгенович – магістрант кафедри систем управління літальними апаратами, Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна;

Roman Kazatinskij – Postgraduate Student of Aircraft Control Systems Department, National Aviation University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: kazatinskij.roman@gmail.com; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-7098-715X.

Розробка нових методів і засобів підвищення якості відеоданих в мобільних системах технічного зору

К. Ю. Дергачов, Л. О. Краснов, О. О. Челядін, Р. Є. Казатинський

Анотація. Предмет вивчення. У статті запропоновано нові методи введення і попередньої обробки відеоданих для web- і спеціалізованих pi-камер в системах монокулярного і стереозору на базі мікрокомп'ютерів Raspberry Pi для підвищення якості роботи сучасних мобільних систем технічного зору. Такий підхід завжди актуальний, оскільки проектування сучасних систем технічного зору постійно вимагає нових нетривіальних апаратних, алгоритмічних і програмних рішень. **Мети.** Метою є порівняльний аналіз показників якості відомих методів введення і попередньої обробки відеоданих в системах технічного зору та розробка нових методів і робочих алгоритмів, що забезпечують більшу швидкодію при читанні відеоданих, необхідний дозвіл кадрів і незалежність яскравості кадру від змін освітленості сцени. **Методи**. В роботі сформульовано комплексний критерій підвищення якості введення в мікрокомп'ютер Raspberry Pi і попередньої обробки відеоданих. На підставі прийнятих показників якості (швидкості введення відеоданих, роздільної здатності та показників стабільності середньої яскравості поточних кадрів прийнятого відеопотоку) синтезовані алгоритми введення і попередньої обробки відеоданих, що задовольняють заданим вимогам. Це дозволяє для кожного проекту знайти оптимальний метод обробки відеоданих і подолати протиріччя зменшення швидкості введення через необхідність збільшення роздільної здатності відеокадрів. Створена універсальна програма введення і попередньої обробки цих даних дозволила отримати кількісні оцінки ефективності розроблених алгоритмів і сформулювати рекомендації щодо їх подальшого використання. Все це дозволяє істотно підвищити ефективність використання мікрокомп'ютерів Raspberry Pi в сучасних мобільних системах технічного зору. **Результати.** Отримані результати покладені в основу при створенні універсального програмного продукту для швидкісного введення (в режимі реального часу) і попередньої обробки відеоданих в системах детектування і розпізнавання осіб, а також систем стереозору. **Висновки**. Проведені експериментальні дослідження підтвердили працездатність і ефективність запропонованих методів і алгоритмів швидкісного введення відеоданих з різними значеннями роздільної здатності кадру і можливістю адаптивної регулювання його яскравості. На базі створених методів і алгоритмів запропоновані різні варіанти їх програмної реалізації. Це дозволяє рекомендувати отримані результати для практичного використання. Перспективи подальших досліджень передбачають розширення вектора критеріїв оцінки якості та ознак для оптимізації відеоданих, а також створення нових алгоритмів і різних варіантів програм на їх основі.

Ключові слова: мікрокомп'ютер Raspberry Pi; алгоритми і програмні коди введення і попередньої обробки відеоданих; функції бібліотеки OpenCV.

Разработка новых методов и средств повышения качества видеоданных в мобильных системах технического зрения

К. Ю. Дергачёв, Л. А. Краснов, А. А. Челядин, Р. Е. Казатинский

Аннотация. Предмет изучения. В статье предложены новые методы ввода и предварительной обработки видеоданных для web- и специализированных pi-камер в системах монокулярного и стереозрения на базе микрокомпьютеров Raspberry Pi для повышения качества работы современных мобильных систем технического зрения. Такой подход всегда актуален, поскольку проектирование современных систем технического зрения постоянно требует новых нетривиальных аппаратных, алгоритмических и программных решений. **Цель.** Целью является сопоставительный анализ показателей качества известных методов ввода и предварительной обработки видеоданных в системах технического зрения и разработка новых методов и рабочих алгоритмов, обеспечивающих большее быстродействие при чтении видеоданных, необходимое разрешение кадров и независимость яркости кадра от изменений освещенности сцены. **Методы.** В работе сформулирован комплексный критерий повышения качества ввода в микрокомпьютер Raspberry Pi и предварительной обработки видеоданных. На основании принятых показателей качества (скорости ввода видеоданных, разрешающей способности и показателей стабильности средней яркости текущих кадров принимаемого видеопотока) синтезированы алгоритмы ввода и предварительной обработки видеоданных, удовлетворяющие заданным требованиям. Это позволяет для каждого проекта найти оптимальный метод обработки видеоданных и преодолеть противоречие уменьшения скорости ввода из-за необходимости увеличения разрешающей способности видеокадров. Созданная универсальная программа ввода и предварительной обработки этих данных позволила получить количественные оценки эффективности разработанных алгоритмов и сформулировать рекомендации по их дальнейшему использованию. Все это позволяет существенно повысить эффективность использования микрокомпьютеров Raspberry Pi в современных мобильных системах технического зрения. **Результаты.** Полученные результаты положены в основу при создании универсального программного продукта для скоростного ввода (в режиме реального времени) и предварительной обработки видеоданных в системах детектирования и распознавания лиц, а также систем стереозрения. **Выводы.** Проведенные экспериментальные исследования подтвердили работоспособность и эффективность предложенных методов и алгоритмов скоростного ввода видеоданных с разными значениями разрешающей способности кадра и возможностью адаптивной регулировки его яркости. На базе созданных методов и алгоритмов предложены различные варианты их программной реализации. Это позволяет рекомендовать полученные результаты для практического использования. Перспективы дальнейших исследований предполагают расширение вектора критериев оценки качества и признаков для оптимизации видеоданных, а также создание новых алгоритмов и различных вариантов программ на их основе.

Ключевые слова: микрокомпьютер Raspberry Pi; алгоритмы и программные коды ввода и предварительной обработки видеоданных; функции библиотеки OpenCV.

УДК 004.91 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.2.14**

О. В. Касілов, К. І. Крамська

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

МОДЕЛІ І МЕТОД СИНТЕЗУ АГЕНТНОЇ ІНФОРМАЦІЙНО-ПОШУКОВОЇ СИСТЕМИ

Анотація. Існуючі сучасні інформаційно-пошукові системи такі як Google, Яндекс, Yahoo орієнтовані на середньостатистичного користувача, для якого предметом пошуку є неспецифічна, науково-технологічна інформація. Тому ці пошукові системи не можуть в повному обсязі надати потрібну інформацію для професійного користувача. Внаслідок того, що дана інформація є довідковою або енциклопедичною, вона не відповідає заданому пошуку. Забезпечити якісний пошук інформації і вирішити проблему інформаційно-аналітичного забезпечення наукової і технологічної діяльності можливо за допомогою використання агентних технологій. Агентні технології ініціюються і управляються автоматично, а також функціонують без участі користувача. Тому вони мають більш високу продуктивність і можливість безперервної роботи. Розроблена модель багаторівневої агентної інформаційно-аналітичної системи у природничо-наукових і технологічних напрямках. Вона є найбільш доцільною під час тематичного обслуговування колективних і персональних користувачів. Також в статті розглянуто використання агентних технологій в інформаційно-пошукових системах науково-технічної інформації. Запропоновано методику структурно-параметричного синтезу подібних систем.

Ключові слова: інформаційно-пошукові системи; агентні технології; агентні системи; агентний пошук.

Вступ

Існуючі інформаційно-пошукові системи (ІПС) широкого використання не можуть повнною мірою задовольнити користувача-професіонала, тому що вони надають довідкову та енциклопедичну інформацію по предмету, що не задовольняє критеріям новизни і пертінентності. За даними International Data Corporation (IDC), обсяг згенерованих даних в 2020 року прогнозується збільшення обсягу до 40 зеттабайт [1]. Незважаючи на спроби стандартизації інформаційних ресурсів, кількість різних систем доступу до цієї інформації постійно збільшується. Нові джерела науково-технічної інформації є вкрай привабливими для професійних користувачів, так як інформація на них з'являється з мінімальними затримками [2], що також дозволяє користувачеві входити в безпосередній контакт з авторами інформаційних повідомлень різного типу, опублікованих в таких джерелах. Проблемна ситуація полягає в тому, що використання діалогових систем пошуку і структуризації цієї інформації стає практично неможливим у зв'язку з великою кількістю джерел. Збір і структуризація традиційним діалоговим способом стала неможливою у зв'язку зі збільшенням кількості інформаційних джерел і швидкості їх публікації. Велика частина завдань якісного пошуку інформації та проблеми інформаційно-аналітичного забезпечення наукової і технологічної діяльності можуть бути вирішені при використанні агентних технологій.

Мета роботи. Розробка методу реалізації багаторівневої агентної інформаційно-аналітичної системи з природничо-наукових і технологічних напрямках та програмно-технічної реалізації моделі тематичного обслуговування колективних і персональних користувачів.

Постановка задачі. ***Об'єкт дослідження*** - агентні технології пошуку та обробки інформації в інформаційно-аналітичних системах. ***Предмет дослідження*** - методи і засоби агрегування тематичної інформації, а також засоби забезпечення тематичної і лінгвістичної масштабованості мультиагентної системи. ***Методи дослідження*** - методи системного аналізу, структурно-параметричного синтезу, системного проектування, багатокритеріальні методи кількісної експертної оцінки складних об'єктів, методи тестування та експертна оцінка.

Результати досліджень

1. Метод структурно-параметричного синтезу агентних систем. Нові джерела науково-технічної інформації є вкрай привабливими для професійних користувачів тому, що мають такі властивості:

1. Інформація на кожному сайті має унікальну структуру, яка визначається незалежними розробниками.

2. Власники інформації висувають різні умови для її придбання.

3. По кожному науковому тематичному напряму кількість інформаційних джерел настільки велике, що окремий користувач фізично не може з ними усіма ознайомитися.

Перераховані вище властивості інформаційних джерел призводять до необхідності вирішення наступних завдань:

1. Визначення тематичних груп інформаційних джерел.

2. Рішення задач доступу до джерела.

3. Розробка алгоритмів автоматизованого сканування інформаційних джерел.

Також існують такі завдання, які є загальними для роботи з будь-якими електронними джерелами інформації, а саме, визначення першоджерела і оцінка достовірності інформації. Інформація, що міститься в електронних джерелах, може бути цільовим чином змінена, а в деяких випадках можуть бути наміряно спотворені метадані інформаційного повідомлення, такі як - дата публікації, автор, джерело і т. д. Сучасні інформаційно-пошукові системи (ІПС), такі як Google, Яндекс, Yahoo, орієнтовані на користувача, для якого спеціалізована природничо-наукова і технологічна інформація не є предметом пошуку [3]. При пошуку науково-технічної інфор-

© Касілов О. В., Крамська К. І., 2020

мації перед користувачем неминуче виникає завдання освоєння синтаксису пошукової системи, за допомогою якої можна будувати складні пошукові запити і отримувати найбільш релевантну видачу, ґрунтуючись на правильно підібраних ключових словах і логічних операціях між ними [4]. Рішення задач по освоєнню синтаксису пошукових систем - трудомістка робота, що вимагає постійної практики, тому середньостатистичний користувач мережі Інтернет не здатний використовувати сучасні інформаційно-пошукові системи на максимальному рівні [5]. Середня кількість ключових слів в типовому запиті користувача до пошукової системи складає від двох до трьох, а синтаксичні і логічні оператори практично не використовуються. Перераховані вище проблеми доступу користувачів до професійно-значущої інформації формулюються зараз різними авторами як проблема Big Data.

Одним з класичних методів стиснення, концентрації і класифікації науково-технічної інформації є розробка реферативних баз даних, наприклад, Web of Science, Scopus (США). Ця база містять корисну інформацію про публікації в обраних ними джерелах інформації, наводять різні статистичні характеристики про процеси публікацій з різних напрямків, але їх істотним недоліком є відсутність текстів самих публікацій.

Велика розмірність завдань реферування, різний авторитет джерел інформації призводять концентраторів до необхідності оцінки авторитетності джерела інформації, яка може і не збігатися з оцінками конкретного користувача. Зокрема, концентратором може аналізуватися інформація, видана тільки на англійській мові з англомовних джерел, а джерела на інших мовах можуть не розглядатися, якщо відсутній переклад на англійську мову. Це призводить до зниження характеристики повноти інформації з тих чи інших тематичними напрямками.

Для професійних користувачів науково-технічної інформації важливі й інші відомості, наприклад ті, що містяться в патентних базах даних, або інформація про стан різних об'єктів користувальницького інтересу. Тобто необхідно враховувати можливість вилучення з первинної текстової інформації фактографічних даних, структурованих відповідно до професійних інтересів користувача.

Велика частина завдань якісного пошуку інформації та проблеми інформаційно-аналітичного забезпечення наукової і технологічної діяльності можуть бути вирішені при використанні агентних технологій. Агентні технології ініціюються і управляються автоматично, функціонують без участі користувача, тому мають більш високою продуктивністю і можливістю безперервної цілодобової роботи.

2. Типологія користувачів і агентів. В інформаційному описі науково-технічної діяльності найбільш стійко визначена її тематична спрямованість. Це властивість науково-технічної інформації використовується і в класичній десяткової класифікації, використовуваної в бібліотечних системах [6]. Стійкість тематичної класифікації пояснюється тривалістю життєвого циклу об'єктів наукового інтересу, спеціалізацією науковців і інженерів. Тематична стійкість науково-технічну діяльність дозволяє фахівцям виробляти підмножина професійних мов, область за допомогою яких максимально точно і повно описуються об'єкти наукового дослідження і конструкторське-технологічної діяльності. Фактично це професійні підмножини природних мов. Терміни цих мов також мають високу стійкість, що дозволяє використовувати їх в якості ключових слів в автоматизованих інформаційно-пошукових системах. У розробці пошукових приписів автоматизованих систем відкривається можливість діяти за таким сценарієм: відобразити тематичні інтереси користувача ключовими словами з тематичного тезауруса; вказати мережеві джерела, що містять шукану тематичну інформацію, а далі проводити процес сканування джерел, виділення і обробку тематичної інформації без участі користувача; надавати користувачеві знайдену і структуровану інформацію. Тобто рішенням інформаційно-пошукових завдань в мережі Інтернет буде займатися не користувач, а його представник - агент [7].

У нашому випадку агент - це пошукова програма (або пошуковий робот), самостійно активізується в системі за заданим розкладом або запитом користувача і виконує дії як в мережі Інтернет, так і всередині агентної системи за заздалегідь заданими приписами.

Користувачів науково-технічної інформації можна класифікувати на колективних і персональних користувачів.

У кожної з перерахованих груп користувачів своя роль в науці і свої інформаційні інтереси і вимоги до якості інформаційного обслуговування.

Перша група користувачів зацікавлена в повноті надходить науково-технічної інформації з усіх світових джерел. Агентні технології дозволяють вирішувати цю проблему шляхом автоматичного сканування всіх джерел.

Друга група користувачів зацікавлена не тільки в повноті, а й у тематичній точності інформації. Високий рівень цієї характеристики агентні технології забезпечують за рахунок автоматичної фільтрації всього вхідного потоку інформації.

Якість обслуговування персонального користувача характеризується параметром пертінентності одержуваної інформації. Цей параметр відображає ступінь задоволеності конкретного користувача отриманими із системи даними. Пертінентність забезпечується персональними агентами, які надають фахівцям інформацію за різними тематичними напрямками, які входять до сфери його професійних інтересів.

Таким чином, встановлюється відповідність між типами користувачів і типами агентів, які здійснюють інформаційне обслуговування. Ціе три типи агентів, що виконують різні функції в агентних пошукових системах.

1. Агент-листоноша (АР) - агент, який взаємодіє з інформаційними ресурсами мережі Інтернет за заданим розкладом і агрегує отриману інформацію в текстову базу даних.

2. Агент кур'єр (АК) - агент, який взаємодіє з агентом-листоношою і текстової базою даних і систематизує інформацію за відповідними тематичними напрямками.

3. Агент-референт (AR)- агент, який взаємодіє з користувачем і агентом-кур'єром в цілях доставки пертінентної інформації з баз даних системи користувачеві.

Кожен з перерахованих вище типів агентів поділяється на функціональний і цільовий. Функціональний агент (індекс *F*, наприклад, функціональний агент-кур'єр – *AKF*) виконує стандартизовану операцію за заданим розкладом. Цільової агент (індекс *C*, наприклад, цільової агент-кур'єр – *AKC*) виконує операцію по налаштованим користувачем параметрам. Особливості інформаційно-аналітичних систем з природничонаукових і технологічних напрямках визначають і методологічні особливості їх розробки, а саме:

- створення ядра системи (одне або кілька тематичних напрямків і мов);
- тематичне масштабування (розширення) системи і лінгвістичне масштабування;
- введення декількох національних мов для моніторингу національних джерел науково-технічної інформації.

Ядро системи може бути розроблено відносно швидко і з порівняно невеликими фінансовими і трудовими затратами [8]. Подальше масштабування системи переводить її в стаціонарне стан, в якому регулярно реалізуються агентні інформаційні технології і цільові інформаційно-аналітичні дослідження, підтримувані класичними технологіями діалогового типу.

3. Обґрунтування значень цільових параметрів агентної системи. Параметрами якості інформаційно-аналітичного обслуговування виділених вище двох груп користувачів. Якість роботи автоматизованих інформаційно-пошукових систем оцінюється значеннями наступних параметрів: повнота, точність, пертінентність [9].

Введемо наступні позначення: *A* – видані документи, пертінентні запитом користувача; *B* – чи не видані документи, пертінентні запитом користувача; *C* – видані документи, які не пертінентні запитом користувача; *D* – чи не видані документи, які не пертінентні запитом користувача.

Припустимо, що загальна кількість документів, оброблюваних при пошуковому запиті – *E*, тоді *A* + *C* – кількість виданих документів, *B* + *D* - кількість не виданих документів, тобто

$$E = A + B + C + D. \quad (1)$$

Повнота інформаційного пошуку *R* визначається відношенням числа знайдених пертінентних документів до загальної кількості пертінентних документів, наявних у вихідній множині документів [10]:

$$R = A / (\mathrm{A} + B). \quad (2)$$

Точність інформаційного пошуку *P* визначається відношенням кількості знайдених пертінентних документів *A* до загальної кількості документів, виданих на запит користувача [9]:

$$P = A / (\mathrm{A} + C). \quad (3)$$

Наявність серед відібраних за результатами запитів користувача непертінентних документів – інформаційний шум системи. Коефіцієнт інформаційного шуму *K* є таким [9]:

$$K = C / (\mathrm{A} + C). \quad (4)$$

Для кожного запиту до інформаційної бази значення показників будуть різними, тобто, строго кажучи, це випадкові величини, характеристики яких можуть бути отримані шляхом статистичних експериментів. *A*, *B*, *C*, *D* – параметри «видачі», тобто відповідь пошукової системи на запити (пошукові приписи) - *Z*, які є функцією:

$$Z_j = F_j (k_1, \ldots, k_i, \ldots, k_n), \quad (5)$$

де *n* – кількість ключових слів в конкретному запиті, k_i – ключове слово, або в нашому випадку - поняття з тематичного тезауруса обсягу *N*, *j* – індекс національної мови (*j* = 1, 2, ..., *l*, де *l* – загальна кількість мов в тезаурус).

Параметри «видачі» є випадковими величинами, тому оцінку їх числових значень будемо здійснювати методом статистичних випробувань. На обраному обсязі *Ev* текстової бази даних, сформованої повідомленнями, проводилися пошукові процедури з різними пошуковими завданнями, фіксувати випадкові значення параметрів видач і обчислювати значення параметрів системи за формулами (2)–(4).

Відомо, що параметри повноти і точності автоматизованих діалогових інформаційно-пошукових систем є суперечливими. Повноту завжди можна підвищити до одиниці (при дуже низькій точності), повертаючи всі документи на всі запити. При цьому при збільшенні кількості знайдених документів повнота не убуває, з іншого боку, точність зазвичай знижується. Показник, що дозволяє знайти баланс між точністю і повнотою пошуку, називається *F*-заходом і є їх середнім гармонійним зваженим:

$$F = 1 / (\alpha * (1 / P) + (1 - \alpha) * (1 / R)) = \\ = ((\beta \,\hat{}\, 2 + 1) \cdot PR) / (\beta \,\hat{}\, 2 \cdot P + \mathrm{R}), \quad (6)$$

де α – вага параметра *P*,

$$\beta \,\hat{}\, 2 = (1 - \alpha) / \alpha, \alpha \in [0,1], \text{ тобто } \beta \,\hat{}\, 2 \in [0, \infty). \quad (7)$$

У агентну систему закладаються різні показники повноти і точності виходячи з інтересів користувача, тому α= ½, або β= 1, формула спрощується.

$$F = 2\,PR / (P + R). \quad (8)$$

З огляду на, що *P* і *R* є стохастичними параметрами, що визначаються формулами (2) і (3), вигляд *F*-заходів для системи визначається таким чином:

$$F_{\text{сист}} = [2\,(\mathrm{M}[\mathrm{P}] \pm KP) \times \\ \times (M[R] \pm \mathrm{KR})] / [(\mathrm{M}[\mathrm{P}] \pm KP) + (M[R] \pm KR)]. \quad (9)$$

Цільове значення *F*-міри синтезованої системи встановимо на рівні 0,7.

4. Модель динамічної візуальної понятійно-термінологічної інформаційної системи. Назвемо буквою ідентифікатор *b*, що є фрагментом потоку даних певного розміру, однозначно визначає знак в природній мові. Назвемо слово ідентифікатор *w*, що складається з послідовності символів, які є літерами. Назвемо символом кінця пропозиції елементи множини { ".", "?", "!"}. Назвемо (синтаксичною) пропо-

зицією S множину слів $\{w1, w2, ... wN\}$ синтаксично пов'язаних один з одним (що знаходиться в одній природно-мовній пропозиції, що закінчується символом кінця пропозиції). Нехай є текст - множина синтаксичних пов'язаних упорядкованих ідентифікаторів, які є словами $w \in \{W\} \subset \{\omega\}$, де w – слово, W – множина слів в тексті, ω – множина допустимих слів у мові. Допустима множина слів в мові визначається словниками і є каркасом онтології. Для тексту проводиться сегментація на семантично близькі компоненти. Для кожного слова проводиться нормалізація морфологічної форми з використанням функції m морфологічного аналізу: $m(w) = b$, $w \in \{W\}$, де $\{W\}$ – множина словоформ одного слово, b – нормальна форма слова (ім. падіж, однини для іменників, 1 л., однини, тепер. час для дієслів і т.д.).

Властивості функції морфологічного розбору:

$$m(b) = b;$$

$$\forall w\,(\mathrm{w} \notin \{\mathrm{W}\}) \Rightarrow \mathrm{m}(\mathrm{w}) = \mathrm{b},\ \mathrm{b} \notin \mathrm{W}\}.$$

Для кожного слова в нормальній формі будується рейтинговий розподіл ξw, яке використовується в наступних процедурах фільтрації при підготовці до візуалізації. Для слів будуються відносини $R1$ і $R2$ за таким правилом: $(W1, w2) \in R1$ якщо $w1$, $w2$ – послідовні слова в реченні, тоді

$$\forall\ \mathrm{w1} \in \mathrm{S}\ \&\ \forall\ w2 \in \mathrm{S} \Rightarrow (W1, w2) \in R2.$$

Для відносин будуються рейтингові розподілу $\xi R1$ і $\xi R2$ зв'язків елементів.

Відношення $R1$ використовується для визначення складних термінів, що складаються з декількох послідовних слів.

Якщо $\xi R1\ (w1, w2) > \varepsilon 1$, то слова $w1$ та $w2$ вважаються єдиним терміном і для нього повторюється вся обробка, при якій слова $w1$ та $w2$, розташовані послідовно, розглядаються як одне слова $w1 + 2$. Якщо $\xi R1\ (w1, w2) > \varepsilon 2$, то слова $w1$ і $w2$ вважаються семантично пов'язаними, ε1 та ε2 – значення порогів візуалізації. Для візуалізації будується множина $V2$:

$$\xi R2\ (w1, w2) > \varepsilon 2 \Rightarrow (W1, w2) \in V2.$$

Множина $V2$ візуалізується у вигляді графа, ребрами якого є елементи $(w1, w2) \in V2$.

Параметр ε2 може динамічно змінюватися користувачем для інтерактивного вивчення семантичного оточення необхідного терміну.

Експериментально показано, що найбільш ефективне сприйняття людиною інформації відбувається при одночасній візуалізації не більше 20 об'єктів.

Для досягнення цього візуалізуються перші 20 елементів множини $V1$, упорядкованих по спадаючій частоти $\xi R2$ їх використання.

5. Модель агентного пошуку та обробки науково-технічної інформації. Основна ідея трирівневої моделі агентного пошуку та обробки інформації полягає в наступному:

1. На першому рівні слід забезпечити головним чином повноту пошуку інформації в зовнішніх джерелах, чого можна домогтися за рахунок повноти маршрутної тематичної бази даних;

2. На другому рівні забезпечується точність інформації за рахунок повноти тематичних тезаурусів системи;

3. На третьому рівні досягається максимальна пертінентність пошуку інформації відповідно до вимог конкретного користувача-фахівця за рахунок персональних словників користувача.

Модель агентного пошуку і структуризації НТІ включає в себе такі рівні:

1. Збір інформації з зовнішніх джерел мережі;
2. Фільтрація і тематична рубрикація;
3. Вторинна фільтрація по персональним словників.

Модель агентної інформаційно-аналітичної системи представлена на рис. 1.

На першому рівні вирішується завдання збору науково-технічної інформації в повнотекстову базу даних. Основними елементами є *APF*, база даних управління агентним пошуком і повнотекстова база даних. У базі даних управління агентним пошуком містяться інформаційні джерела з різних напрямків. *APF,* керовані даною базою доставляють текстову інформацію і необхідні атрибути (автор, дата публікації тощо) за відповідним графіком сканування з інформаційних джерел в повнотекстову базу даних [11].

На даному рівні максимізувати параметр повноти (R_m), що досягається за рахунок охоплення максимальної кількості інформаційних ресурсів за заданим тематичним напрямком. На другому рівні з повнотекстової базою даних взаємодіють *AKF. AKF,* керовані тематичними тезаурусами, виробляють фільтрацію інформації за відповідними тематичними групами повідомлень. На цьому етапі *AKF* забезпечують граничну точність, відбираючи максимально пертінентну інформацію для користувачів за до-

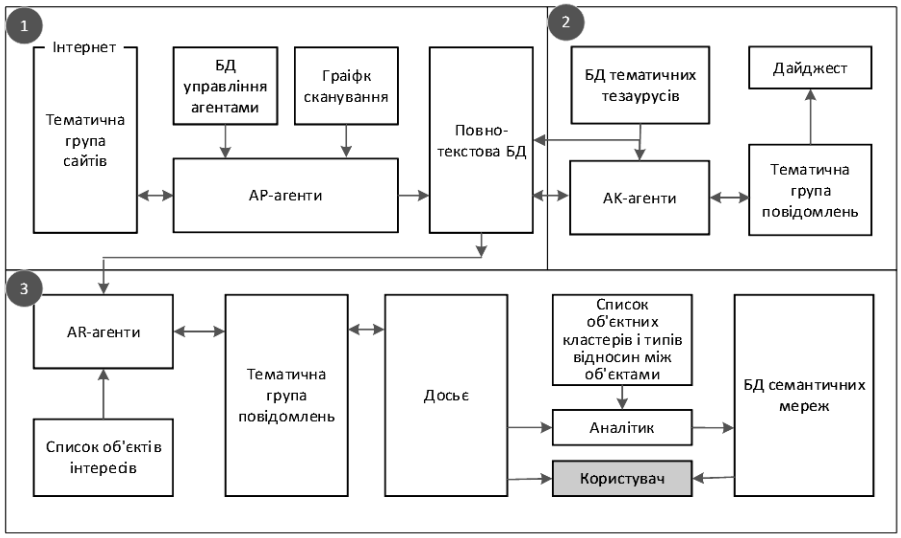


Рис. 1. Модель агентної інформаційно-аналітичної системи

помогою тематичних тезаурусів. Формуються тематичні групи повідомлень, в яких показник точності повинен бути максимізувати (*Pmax*). За підсумками угруповання інформаційних повідомлень в автоматизованому режимі формується перший тип документа - дайджест за тематичним.

На третьому рівні здійснюється персоніфікована обробка інформації. В якості керуючих даних виступає список об'єктів, що становлять професійний інтерес для користувача і персональні тезауруси кожного з фахівців. *ARF* на третьому рівні виконують технологічні операції, які полягають у виділенні з текстів інформації, пов'язаної з іменами об'єктів професійного інтересу, і передачі цих даних в досьє кожного з об'єктів. На третьому рівні формуються такі типи звітів для користувача:

1. Досьє на об'єкт інтересу - документ описує стан динамічного об'єкта в різні періоди часу. Під об'єктом інтересу маються на увазі технологія, проект, організація і т. д. Досьє на об'єкт інтересу зберігає посилання на відповідні документи - джерела інформації.

2. Семантична мережа - граф, вершинами якого є об'єкти, а дуги означають різні типи відносин між об'єктами.

Отримані семантичні мережі зберігаються у відповідній базі даних. При необхідності користувач має можливість ввести нові об'єкти в семантичну мережу, і вона буде перебудована.

Таким чином, запропонована модель відображає наступні основні принципи структуризації науково-технічної інформації, розсіяною в мережі Інтернет:

1. Інтеграція тематичної інформації з усіх джерел мережі в єдиній повнотекстової бази даних.

2. Тематична рубрикація інформації, шляхом фільтрації повнотекстової бази даних з використанням тематичних тезаурусів.

3. Формування користувацьких баз даних на основі персональних тезаурусів.

Висновки

Розглянуто об'єктивні передумови використання агентних технологій в інформаційно-пошукових системах науково-технічної інформації. Запропоновано і реалізовано методику структурно-параметричного синтезу подібних систем. Як параметричних вимог до системи обрані й обґрунтовані чисельні значення основних характеристик пошукових систем по повноті і точності.

Запропоновано модель агентного пошуку інформації, що забезпечує досягнення високих показників повноти, тематичної точності і пертінентності інформації.

Тезауруси предметних областей пропонується у вигляді візуального інтерактивного середовища. Розроблено та обґрунтовано функції агентів, що працюють на кожному з рівнів системи, і методи формування пошукових приписів для «AP», «AK», «AR». Запропоновано метод агрегування баз даних керуючих агентним пошуком, по кожному з тематичних напрямків а також агрегування тематичних тезаурусів для пошуку інформації в прикордонних тематичним областям для скорочення обсягів видачі.

Вдячність

Цю роботу було частково профінансовано Європейським Союзом у контексті проекту «dComFra – Digital competence framework for Ukrainian teachers and other citizens» (Project Number: 598236-EPP-1-2018-1-LT-EPPKA2-CBHE-SP) за програмою ERASMUS+. Підтримка Європейською Комісією створення цієї роботи не означає повного схвалення її змісту, який віддзеркалює лише погляди авторів. Комісія не може нести відповідальності за будь-яке використання інформації, яку розміщено в цій роботі.

Список літератури

1. Асеева Н.Н., Ванская Г.П. Библиотечно-библиографическая классификация. М.: Либерея, 1999.
2. Jaynarayan L.H., Hendler J. Control of Agent Based Systems (CoABS) & DARPA Agent Markup Language (DAML). DARPA, 2000. Presentation.
3. Будзко В.И., Леонов Д.В., Николаев В.С., Онукий Б.Н., Соколина К.А. Развитие информационно-аналитической поддержки научно-технической деятельности в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ», *Системы высокой доступности*. Т. 7, № 4. С. 4-17.
4. Маннинг Д., Рагхаван П., Шютце Х. Введение в информационный поиск. Вильямс, 2014.
5. Kent A., Berry M.M., Luehrs F.U., Perry J.W. Machine literature searching VIII. Operational criteria for designing information retrieval systems. *American documentation*. Vol. 6, No. 2. April 1955. pp. 93-101.
6. Rijsbergen C.J. Information Retrieval. London: Butterworths, 1979.
7. Artamonov A.A., Ananieva A.A., Tretyakov E.S., Kshnyakov D.O., Onykiy B.N., Pronicheva L.V. A three -tier model for Structuring of Scuentific and Technical Information. *Journal of Digital Information Management*. Vol. 14, № 3, June 2016. pp. 184-193.
8. Roussopoulos N.D. A semantic network model of data bases. University of Toronto, Department of Computer Science, Toronto, Dissertation TR No 104, 1976.
9. Larissa T. Moss, Shaku Atre. Are Business Intelligence Roadmap: The Complete Project Lifecycle for Decision-Support Applications. Addison-Wesley Professional, 2003.
10. Ферстер Э., Ренц Б. Методы корреляционного и регрессионного анализа. М.: Финансы и статистика, 1983.
11. Artamonov A., Ananieva A., Onykiy B., Ionkina K., Galin I., Kshnyakiv D. Thematic Thesauruses in Agent Technologies for Scientific and Technical Information Search. *Procedia Computer Science*. 2016. Vol. 88. pp. 493-498.

Reference

1. Aseeva, N.N. and Vanskaya, G.P. (1999), *Library and bibliographic classification*, Liberia, Moscow.

2. Jaynarayan, L.H. and Hendler, J. (2000), *Control of Agent Based Systems (CoABS) & DARPA Agent Markup Language (DAML)*, DARPA, Presentation.
3. Budzko, V.I., Leonov, D.V., Nikolaev, V.S., Onyky, B.N. and Sokolina, K.A. (2011), "The development of information and analytical support for scientific and technical activities at the National Research Nuclear University MEPhI", *High Availability Systems*, Vol. 7, No. 4, pp. 4-17.
4. Manning, D., Raghavan, P. and Schutze, H. (2014), *Introduction to the information search*, Williams.
5. Kent, A., Berry, M.M., Luehrs, F.U. and Perry, J.W. (1955), "Machine literature searching VIII. Operational criteria for design-information information retrieval systems", *American documentation*, Vol. 6, No. 2, pp. 93-101.
6. Rijsbergen, C.J. (1979), *Information Retrieval*, Butterworths, London.
7. Artamonov, A.A., Ananieva, A.A., Tretyakov, E.S., Kshnyakov, D.O., Onykiy, B.N. and Pronicheva L.V. (2016), "A three-tier model for Structuring of Scuentific and Technical Information", *Journal of Digital Information Management*, Vol. 14, No. 3, pp. 184-193.
8. Roussopoulos, N.D. (1976), *A semantic network model of data bases*, University of Toronto, Department of Computer Science, Toronto, Dissertation TR No 104.
9. Larissa T, Moss and Shaku, Atre (2003), *Are Business Intelligence Roadmap: The Complete Project Lifecycle for Decision-Support Applications*, Addison-Wesley Professional.
10. Ferster, E. and Renz, B. (1983), *Methods of correlation and regression analysis*, Finance and statistics, Moscow.
11. Artamonov, A., Ananieva, A., Onykiy, B., Ionkina, K., Galin, I. and Kshnyakiv D. (2016), "Thematic Thesauruses in Agent Technologies for Scientific and Technical Information Search", *Procedia Computer Science*, Vol. 88, pp. 493-498.

Received (Надійшла) 24.03.2020
Accepted for publication (Прийнята до друку) 20.05.2020

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Касілов Олег Вікторович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри систем інформації; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;
Oleg Kasilov – PhD, Associate Professor, Professor of the Information Systems Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine
e-mail: o.kasilov@hotmail.com; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-8524-2345

Крамська Катерина Ігорівна – аспірант кафедри «Інформаційних технологій і систем колісних та гусеничних машин ім. О.О. Морозова»; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;
Kateryna Kramska – graduate student of the department "Information Technologies and Systems of Wheel and Track Machines", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine
e-mail: katerina.kramskaya@ukr.net; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-9694-0552

Модели и метод синтеза агентной информационно-поисковой системы

О. В. Касилов, Е. И. Крамская

Аннотация. Существующие современные информационно-поисковые системы, такие как Google, Яндекс, Yahoo ориентированы на среднестатистического пользователя, для которого предметом поиска является неспецифическая, научно-технологическая информация. Поэтому эти поисковые системы не могут в полном объеме предоставить нужную информацию для профессиоального пользователя. Вследствие того, что данная информация является справочной или энциклопедической, она не соответствует заданному поиску. Обеспечить качественный поиск информации и решить проблему информационно-аналитического обеспечения научной и технологической деятельности возможно посредством использования агентных технологий. Агентные технологии инициируются и управляются автоматически, а также функционируют без участия пользователя. Поэтому они имеют более высокую производительность и возможность непрерывной работы. Разрботана модель многоуровневой агентного информационно-аналитической системы в естественно-научных и технологических направлениях. Она является наиболее целесообразно для тематического обслуживания коллективных и персональных пользователей. Также в статье рассмотрено использование агентных технологий в информационно-поисковых системах научно-технической информации. Предложена методика структурно-параметрического синтеза подобных систем.

Ключевые слова: информационно-поисковые системы; агентные технологии; агентные системы; агентный поиск.

Models and synthesis method of agent information retrieval system

O. Kasilov, K. Kramska

Annotation. Existing modern information retrieval systems such as Google, Yandex, Yahoo are aimed at the average user, whose subject of the search is not specific, scientific and technological information. Therefore, the aforecited search systems cannot fully provide the necessary information for the professional user. Due to the fact that this information is reference or encyclopedic which does not correspond to the specified search. It is possible to ensure a high-quality information search and to solve the problem of information and analytical support for scientific and technological activities with the using of agent technologies. Agent technologies are initiated and controlled automatically, and also function without user's participation, therefore they have higher productivity and the possibility of continuous operation. This article has developed the architecture of a multi-level agent information-analytical system in natural-scientific and technological areas. The authors proposed software and hardware implementations of a thematic service model for collective and personal users. Also, the article discusses the use of agent technologies in information retrieval systems for scientific and technical information. The technique of structural-parametric synthesis of such systems is proposed as well.

Keywords: information retrieval systems; agent technologies; agent systems; agent search.

УДК 004.7 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.2.15**

Ю. В. Хома, В. В. Хома

Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

РОЗРОБЛЕННЯ ЦИФРОВОГО ЕКВАЛАЙЗЕРА ДЛЯ БІОСЕНСОРА ПОРТАТИВНОГО АНАЛІЗАТОРА БІОІМПЕДАНСУ

Анотація. У статті описано новий підхід до побудови портативного частотного аналізатора біоімпеданса. Новизна підходу полягає у синтезі алгоритмів коригування, які виконують функцію цифрового еквалайзера із вирівнювання частотної характеристики сенсора біоімпедансу. Реалізація підходу дає змогу більш ніж на два порядки розширити діапазон робочих частот без ускладнення структури частотного аналізатора біоімпедансу. **Предметом дослідження** є метод побудови низькозатратного частотного аналізатора біоімпеданса для персонального застосування у домашніх умовах зокрема як носимого пристрою. **Мета дослідження** – розроблення нового підходу до побудови біосенсора, як базового компенента портативного частотного аналізатора біоімпедансу. Новий підхід базується на максимальному спрощенні аналогової частини біосенсора і використанні обчислювальних засобів для коригування динамічних похибок вимірювального каналу. Ключовим аспектом для реалізації такого підходу є синтез функції цифрового еквалайзера у вигляді алгоритмів коригування динамічних похибок. **Результати.** Обгрунтовано доцільність побудови сенсора біоімпедансу за методом автоматичного балансування моста. Показано, що основною проблемою на цьому шляху є динамічні похибки, які обмежують діапазон робочих частот. Проаналізовано частотну передатну функцію автокомпенсаційного перетворювача і виділено три найбільш істотні джерела динамічних похибок. Формалізовано передатну функцію, де дестабілізуючі впливи представлено трьома коефіцієнтами. Запропоновано методологію синтезу алгоритмів коригування «сирих» результатів вимірювання, які, по суті, реалізують функцію цифрового еквалайзера. Підкреслено, що імплементація цифрового еквалайзера не потребує змін у структурі сенсора біоімпедансу, а лише залучає обчислювальну потужність, яку вже мають сучасні вимірювальні засоби. Досліджено ефективність алгоритмів коригування в діапазоні частот від 10 Гц до декількох МГц шляхом симуляції сенсора біоімпедансу на моделі Pspice. Результати досліджень показали можливість розширення діапазону робочих частот більш ніж на дві частотні декади. **Висновки**. Показано необхідність розроблення цифрового еквалайзера для портативного аналізатора біоімпедансу. Запропоновано інноваційний підхід щодо зменшення динамічних похибок на основі синтезу та використання алгоритмів коригування. Досліджено ефективність синтезованих алгоритмів і показано можливість істотного розширення діапазону робочих портативного аналізатора біоімпедансу.

Ключові слова: портативний частотний аналізатор біоімпеданса; біосенсор; автокомпенсаційний перетворювач; цифровий еквалайзер; алгоритми коригування динамічних похибок.

Вступ

Імпедансна спектроскопія є потужним інструментом дослідження, що широко використовується в не лише у науці [1] і технологіях для контролю технічних об'єктів [2, 3], але також і у медицині для діагностики захворювань і моніторингу стану здоров'я [4, 5]. Ідея методу спирається на вимірювання частотної залежності складових імпеданса та її представлення діаграмами Боде чи Найквіста. На основі спектру імпедансу виконують параметричну ідентифікацію об'єкта, який моделюється за допомогою електричної схеми заміщення.

Використання імпедансної спектроскопії для багаточастотного аналізу біоімпедансу, має свою специфіку, зумовлену як природою біооб'єкта, так і завданнями дослідження. Серед поширених застосувань біоімпедансної спектроскопії можна назвати вимірювання індексу маси тіла за вмістом води, жирових тканин та ін. [6], моніторинг рівня глюкози за зміною провідності крові [7], контроль кровонаповнення окремих органів і ділянок тіла [8].

На цей час існує запит на застосування біоімпедансної спектроскопії також в домашніх умовах, зокрема і у варіанті носимих електронних пристроїв [9, 10]. Це ставить додаткові вимоги щодо мінітюаризації та здешевлення частотних аналізаторів біоімпедансу. З огляду на доступність для користувачів обчислювальної потужності у вигляді ноутбуків, смартфонів, хмарних сервісів, основний акцент зміщується на розроблення біосенсорної частини, призначеної для формування стимулів і аналізу сигналів відгуку, що несуть інформацію про біоімпеданс.

Аналіз проблеми та наукових публікацій. Існує декілька методів побудови багаточастотних вимірювачів імпеданса, кожен з яких має свої переваги та недоліки. Так званий метод моста з автоматичним балансуванням є простим у реалізації та поєднує в собі низку інших переваг, насамперед високу швидкодію, що є визначальним у його виборі для побудови біосенсора [11, 12].

Суть методу автоматичного балансування полягає у наступному [11]. В результаті збудження синусоїдальною напругою E об'єкта з імпедансом Z_X через нього протікає струм I_Z. Цей струм врівноважується струмом I_R, що формується перетворювачем струму в напругу (I/U), побудованим на операційному підсилювачі (ОП) із резистором діапазону R_O у колі зворотного зв'язку. Якщо припустити ідеальні параметри ОП, потенціал ΔU на низькому терміналі (званий віртуальною землею) дорівнює нулю, тому падіння напруги U_Z на вимірюваному імпедансі таке ж, як і сигнал збудження E. Отже, виміряний імпеданс можна обчислити за формулою:

$$Z_X = -R_O \cdot (U_Z / U_R). \qquad (1)$$

Для вимірювання комплексних напруг U_Z та U_R використовується векторний вольтметр, який керується опорними сигналами із фазами 0 та 90° для

© Хома Ю. В., Хома В. В., 2020

виділення дійсних та уявних компонент (A і j·B) напруги U_Z та компонент (C і j·D) напруги U_R. Таким чином, активну складову R і реактивну X вимірюваного імпедансу Z_X можна визначити із таких рівнянь [11]:

$$R = R_O \frac{A \cdot C + B \cdot D}{C^2 + D^2};\ X = R_O \frac{B \cdot C - A \cdot D}{C^2 + D^2}. \quad (2)$$

Розвиток технології інтегральних схем, включаючи методи цифрової обробки сигналів, дає змогу високоточного синтезу і вимірювання ортогональних компонент напруги в широкому діапазоні частот [3, 13, 14]. Наприклад, у перетворювачах AD5933 і AD5934 фірми Analog Devices використовується дискретний алгоритм перетворення Фур'є для вимірювання компонентів імпедансу [15, 16]. Основним джерелом похибок вимірювання в цьому випадку є вимірювальний каскад із автоматичним балансуванням – автокомпенсаційний перетворювач імпеданса у напругу.

Аналіз показує [11, 14, 17], що похибки автокомпенсаційного перетворювача мають динамічну природу, оскільки вони є результатом накопичення заряду у паразитарних ємностях операційного підсилювача, що, серед іншого, призводить до того, що потенціал віртуальної землі $\Delta U \neq 0$. Тому напругу U_Z слід розділити, використовуючи різницевий підсилювач, як різницю потенціалів на високих і низьких терміналах (клемах до яких підключено досліджуваний об'єкт). Однак це рішення можна використовувати на частотах нижче 100 кГц [11].

Підвищення точності вимірювання імпедансу в діапазоні частот понад 100 кГц можливе за рахунок структурних змін перетворювача I/U. Наприклад, фірма Keysight Technologies (раніше Agilent) розбудовує перетворювач I/U, вводячи детектор нуля, фазочутливі детектори, інтегратори та векторні модулятори, чим забезпечується високий рівень підсилення для високих частот (аж до 120 МГц) [11].

Таким чином, у відомих частотних аналізаторах біоімпеданса є необхідність вимірювати відношення двох комплексних напруг U_R та U_Z згідно рівняння (2). Це вимагає часової надмірності та забезпечує вимірювання опору лише до 100 кГц. Розширення діапазону частот понад 100 кГц можливе за рахунок додаткової розбудови перетворювача I/U, тобто це досягається за рахунок збільшення складності обладнання. Обидва підходи неприйнятні для побудови простого і дешевого частотного аналізатора біоімпедансу, призначеного для персонального застосування у домашніх умовах, зокрема і у варіанті носимих пристроїв.

Постановка завдання. Метою статті є розроблення нового підходу до побудови біосенсора, як базового компенента портативного частотного аналізатора біоімпедансу. Новий підхід базується на максимальному спрощенні аналогової частини біосенсора і використанні обчислювальних засобів для коригування динамічних похибок вимірювального каналу. Ключовим аспектом для реалізації такого підходу є синтез функції цифрового еквалайзера у вигляді алгоритмів коригування динамічних похибок.

Виклад основного матеріалу дослідження

Архітектура портативного аналізатора біоімпедансу. Задачі вимірювання біоімпедансу базуються на здатності біологічних тканин, в тому числі і тіла людини проводити електричний струм. Основними носіями заряду в біооб'єктах є іони. Жива біологічна тканина є неоднорідним провідником із резистивно-ємнісним характером імпедансу, яка добре моделюється електричною схемою заміщення, зображеною на рис. 1, а. Елементи на цій схемі мають такий фізичний зміст: R_E – зовнішній опір клітин, R_I - внутрішній опір клітин, C_M - ємність мембрани [6].

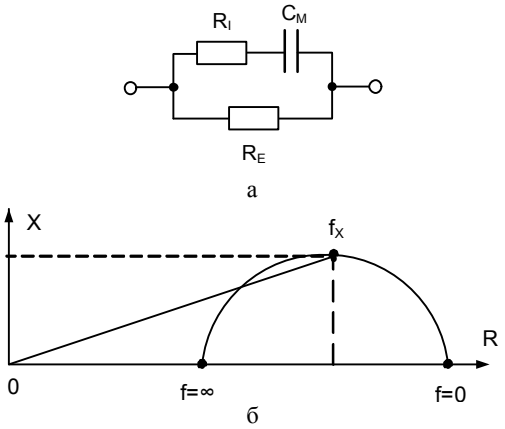


Рис. 1. Модель біоімпеданса за Коул-Коулом (а) та частотна залежність активного і реактивного опору біооб'єкту (б)

Залежно від задачі дослідження частота зондувального сигналу може змінюватися у широких межах – від 1 кГц до 1 МГц. Важливою характеристикою електричного імпедансу тканин є відношення їх ємнісного X і активного R опорів – tg $\varphi = X/R$. Фазовий кут φ характеризує зсув фази змінного струму, що протікає через об'єкт, відносно спаду напруги на ньому. На рис. 1, б зображено залежність між активним і реактивним опором при зміні частоти зондувального сигналу від 0 до $+\infty$ (так званий графік Коула-Коула). Частота, на якій спостерігається максимальне значення реактивної складової біоімпедансу, називається характеристичною.

Значення активної і реактивної складових біоімпедансу залежать від досліджуваної ділянки тіла, способу накладання, типу електродів та їх площі, Наприклад, типові X і R при вимірюванні імпедансу всього тіла складають 20÷80 і 200÷800 Ом відповідно. Значення φ на частоті 50 кГц складає в нормі 7,6±1,0º у чоловіків та 6,9±1,3º у жінок. Межі вимірювання фазового кута можуть змінюватися від 3 до 10º. За сучасними уявленнями пониження значення ємнісного опору зв'язують із порушенням діелектричних властивостей мембран клітин та збільшенням долі пошкоджених клітин в організмі. І, навпаки, підвищені значення X_C відображають кращий стан мембран клітин. На основі цього вважають, що чим більше значення фазового кута, тим кращий стан організму [6].

Вимірювання біоімпедансу має відповідати жорстким нормам безпеки від ураження електричним струмом (стандарт IEC60601). Це накладає

певні обмеження до рівнів сигналів зондування, а відтак вимагає застосування відповідних методів забезпечення завадостійкості вимірювань. Реалізацію портативного частотного аналізатора біоімпедансу у загальному вигляді зображено на рис. 2.

Рис 2. Архітектура портативного частотного аналізатора біоімпедансу

Ключовим структурнм компонентом частотного аналізатора є сенсор біоімпедансу. До функцій цього пристрою входить формування зовнішнього стимулу у вигляді зондувального синусоїдального сигналу, а також вимірювання біопотенціалів на поверхні досліджуваної ділянки тіла, які є відгуком на зондування. У сенсорі біоімпеданса відбувається низка важливих вимірювальних перетворень, спрямованих на формування результатів вимірювання активної і реактивної складових біоімпеданса для кожного значення частоти зондувального сигналу.

Процес вимірювання відбувається у складних умовах, через різні дестабілізуючі впливи зовнішнього і внутрішнього походження. Це вимушує застосовувати як відомі, так і нові методи кондиціювання вимірювального сигналу. Одним із таких є запропонований авторами метод вирівнювання частотної характеристики сенсора біоімпедансу. Цей метод імплементовано у мікроконтролері у вигляді алгоритмів коригування динамічних спотворень у результатах вимірювання складових біоімпедансу, що надходять із сенсора. У статті представлено методологію синтезу цих алгоритмів та досліджено їх ефективність.

Відкориговані значення активної і реактивної складових біоімпеданса через комунікаційний модуль передаються на комп'ютер із спеціалізованим програмним забезпеченням для подальшого аналізу та інтерпретації результатів дослідження. Залежно від сценарію використання можливі різні варіанти реалізації комунікації і комп'ютерного опрацювання: через порт USB на ноутбуку, через Bluetooth на смартфоні або далі в хмарному середовищі. На основі виміряних значень активної та реактивної складових можна обчислити первинні параметри R_E, R_I і C_M електричної схеми заміщення (рис. 1,а), а враховуючи наявність залежності параметрів біоімпеданса від частоти низку інших важливих біомедичних показників.

Структура і принцип роботи сенсора для портативного аналізатора біоімпедансу. Як показав огляд літературних джерел, динамічні похибки є серйозним бар'єром на шляху побудови малозатратного частотного аналізатора біоімпеданса. З огляду на це у роботі запропоновано іноваційний підхід до розширення діапазону робочих частот аналізатора біоімпеданса, який не потребує ні апаратної, ні часової надлишковості. Його суть полягає в програмному коригуванні впливу динамічних похибок, що вимагає лише залучення відповідної обчислювальної потужності, якою володіють сучасні вимірювальні пристрої. Для реалізації такого підходу потрібно насамперед синтезувати відповідні алгоритми коригування.

Запропонований метод коригування впливу динамічних похибок може бути використаний для побудови сенсорної частини аналізатора біоімпеданса, блок-схема якого показана на рис. 3.

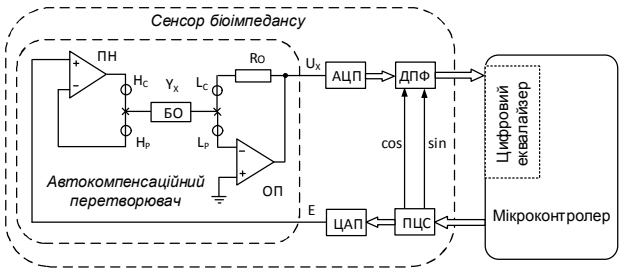


Рис. 3. Структурна схема біосенсора на основі методу автобалансування

Аналогова частина аналізатора біоімпеданса, що реалізує метод автоматичного балансування моста, побудована за допомогою перетворювача I/U на основі ОП, резистора діапазону R_O і повторювача напруги (ПН). Біооб'єкт підключається до вимірювальної системи за допомогою двох кабелів струму (H_C та L_C) та двох потенціальних кабелів (H_P та L_P). Використання повторювача напруги з боку терміналу з вищим потенціалом (літера H) забезпечує незмінність впливу паразитарних параметрів цих проводів на точність вимірювання імпедансу. Вплив паразитарних параметрів кабеля L_C можна усунути під час калібрування вимірювального контуру. А от вплив імпеданса кабеля L_P є обмеженим, оскільки додається до високого вхідного опору операційного підсилювача.

Напруга U_X на виході аналогової частини в першому наближенні (з погляду можливих динамічних похибок) пропорційна не імпедансу Z_X досліджуваного біооб'єкта, а оберненій до нього величини – адмітансу Y_X:

$$U_X \approx -Y_X \cdot R_O \cdot E = \left[G_X \cdot R_O + jB_X \cdot R_O\right] \times E \ , \quad (3)$$

де G_X і B_X – відповідно активна і реактивна складові адмітанса.

Таким чином, значення складових адмітанса отримують як результати синфазних та квадратурних вимірювань компонент напруги U_X щодо зондувального сигналу E. Для цього миттєві значення цієї напруги перетворюються в цифрову форму $U_X(n)$ з використанням АЦП. Блок цифрової обробки сигналу (Digital Signal Processing - DSP), керований ортогональними опорними цифровими сигналами sin і cos, розкладає комплексну напругу U_X на дійсну та уявну частини за алгоритмом дискретного перетворення Фур'є (Discrete Fourier Transform - DFT) [15, 16]:

$$M_1 = real\left(U_X\right) = \sum_{n=0}^{N-1} U_X\left(n\right)\cdot\cos(2\pi fnT_S) \quad (4,а)$$

$$M_2 = imag\left(U_X\right) = \sum_{n=0}^{N-1} U_X\left(n\right)\cdot\sin(2\pi fnT_S) \quad (4,б)$$

де T_S – період вибірки; n – номер вибірки в блоці; N – загальна кількість вибірок у блоці; cos(n) і sin(n) – вибірки опорних векторів, що забезпечуються ядром DDS у точці f.

Якщо дотримано умови збіжності фаз сигналу збудження E та опорного сигналу cos(n), отримані згідно виразів (4) величини M_1 і M_2 відображають активну і реактивну складові адмітанса біооб'єкта:

$$M_G = M_1 \;\text{ і }\; M_B = M_2 \quad (5)$$

Тестовий сигнал E та опорні сигнали sin та cos генеруються за методом прямого цифрового синтезу (Direct Digital Synthesis - DDS), який забезпечує перелаштування частоти з дрібним кроком зі збереженням високої стабільності [14, 18,]. ЦАП використовується для формування напруги збудження E.

На основі складових адмітанса G і B зручніше описати властивості біооб'єктів із паралельною еквівалентною схемою, а, якщо необхідно, за допомогою звичайних обчислень на ПК, можна отримати параметри імпедансу (опір R та реактивність X) для послідовної еквівалентної схеми [11].

Особливістю пропонованого рішення сенсора біоімпеданса, порівняно з відомими, є одноканальний тракт вимірювання, що вигідно для побудови простих частотних аналізаторів біоімпедансу.

Аналіз та формалізація математичної моделі сенсора біоімпеданса. Математичну модель будь-якої операційної схеми з операційним підсилювачем, яка повністю враховує її властивості в частотній області, можна звести до канонічної форми передатної функції [20]:

$$H = \left(H_\infty + \frac{H_0}{A\cdot\beta}\right)\cdot\frac{1}{1+\left(A\cdot\beta\right)^{-1}}\,, \quad (6)$$

де A - підсилення ОП з відкритим контуром; β - коефіцієнт зворотного зв'язку операційної схеми; H_∞ - ідеалізована передатна функція операційної схеми із замкнутим контуром за нескінченно великого підсилення $A = \infty$; H_0 - передатна функція операційної схеми, що відображає ефект прямого проходження сигналу за відсутності підсилення $A = 0$.

Для випадку операційної схеми біосенсора, побудованої за методом автобалансування (рис. 4), можна конкретизувати вищезазначені елементи рівняння (6). Ідеалізований коефіцієнт підсилення замкнутого контура визначається відношенням опорів $Z_2 = R_O$ у колі зворотного зв'язку ОП та на його вході $Z_1 = Z_X$:

$$H_\infty = -\frac{Z_2}{Z_1} = -\frac{R_O}{Z_X} = -R_O Y_X\,. \quad (7)$$

У наведеному вище рівнянні імпеданс подано у вигляді його зворотного значення - як адмітінс $Y_X = 1 / Z_X$, що дозволяє замінити ділення на добуток.

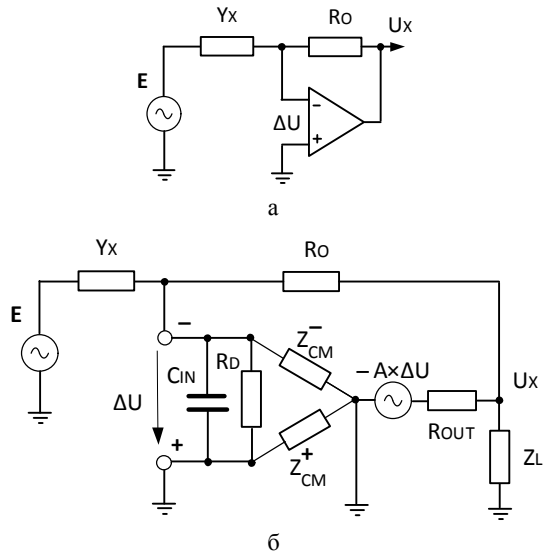


Рис. 4. Схема автокомпенсаційного перетворювача (а) та еквівалентна схема (б) для визначення передатної функції із замкнутим контуром

Обмежена динаміка операційного підсилювача призводить до появи динамічних похибок перетворювача U/I та їх зростання у міру збільшення частоти зондувального сигналу. Як результат, обчислені в блоці DSP значення M_G та M_B лише в першому наближенні представляють активну і реактивну складові адмітанса біооб'єкта. З метою зменшення цих похибок "сирі" результати вимірювань M_G та M_B обробляються комп'ютером за допомогою спеціальних алгоритмів, що дає можливість розширити діапазон робочих частот аналізатора біоімпеданса.

У свою чергу, вираз $H_0/(A\cdot\beta)$ у формулі (6) в основному враховує пряме проходження сигналу, зумовлене ненульовим значенням вихідного імпедансу ОП $R_{OUT} \neq 0$, а для розглянутого автокомпенсаційного перетворювача це описується такою формулою:

$$\frac{H_0}{A\cdot\beta} = \frac{R_{OUT}}{A\cdot Z_1} = \frac{R_{OUT}\cdot Y_X}{A}\,. \quad (8)$$

Більшість операційних підсилювачів мають частотний коефіцієнт підсилення, який можна досить точно апроксимувати простим однополюсним відгуком [20, 21]:

$$A = \frac{A_0}{1+j\left(f/f_T\right)A_0}\,, \quad (9)$$

де A_0 - підсилення відкритого контура на постійному струмі; f_T - частота одиничного підсилення; f - частота зондувального сигналу.

Відповідно до означення, коефіцієнт зворотного зв'язку β є відношенням внутрішньої вхідної напруги ОП ΔU до внутрішньої вихідної напруги E_{OUT}, тобто являє собою коефіцієнт пропускання пасивного дільника, на вході якого є напруга E_{OUT}, а на виході - ΔU. Коефіцієнт β враховує більшість реальних параметрів ОП і має вирішальний вплив на поведінку операційної схеми в частотній області. Оскільки у формулах (6) та (8) коефіцієнт β зустрічається

лише в знаменнику, простіше використовувати його зворотне значення, тобто 1/β:

$$\frac{1}{\beta}=\left(1+\frac{Z_2}{Z_1}+\frac{Z_2}{Z_P}\right)\left(1+\frac{R_{OUT}}{Z_L}\right)+\frac{R_{OUT}}{Z_1}+\frac{R_{OUT}}{Z_P}, \quad (10)$$

де Z_L - опір навантаження; $Z_P = 1/Y_P = Z_D||Z_S$ - вхідний еквівалентний імпеданс; Z_D і Z_S - диференціальний і синфазний вхідні імпеданси ОП.

Замінивши за допомогою виразів (7), (8) та (10) відповідні величини у формулі (6), отримуємо реальну функцію перетворення моста автобалансування, що включає параметри контура ОП і зворотного зв'язку та відображає джерела частотних похибок:

$$H=-\frac{Y_X R_O - Y_X R_{OUT}/A}{1+\frac{1}{A}\left[\begin{array}{c}\left(1+Y_X R_O + Y_P R_O\right)\left(1+\frac{R_{OUT}}{Z_L}\right)\\ +Y_X R_{OUT} + Y_P R_{OUT}\end{array}\right]} = real(H)+j\cdot imag(H). \quad (11)$$

Рівняння (11) є досить складним, що утруднює його використання в інженерній практиці. Тому варто запровадити деякі спрощення, які суттєво не вплинуть на адекватність моделі. Перш за все, компонентом R_{OUT}/Z_L можна знехтувати, оскільки значення вихідного опору операційних підсилювачів коливаються до декількох десятків Ом, а імпеданс навантаження може мати сотні кілоомів і більше, тобто $R_{OUT}/Z_L << 1$. У виразі (9) член $1/A_0$ також може бути опущений через те, що на частотах, де динамічні похибки вже помітні, його значення буде незначним порівняно з відношенням f/f_T.

Слід також зазначити, що у згаданому діапазоні частот вхідна ємність підсилювача операційного підсилювача C_{IN} буде шунтувати диференціальний R_D і синфазний R_S вхідні опори ОП, тому вираз для Z_P можна записати як:

$$Z_P=\frac{R_D R_{S-}}{2+j\omega C_{IN} R_D R_{S-}} \approx \frac{1}{j\omega C_{IN}}. \quad (12)$$

Крім того, якщо добуток $Y_X \cdot R_0$ винести за дужки у чисельнику виразу (10), то реальна передатна функція автокомпенсаційного перетворювача набуде такого вигляду:

$$H=\frac{-Y_X R_O\left(1-j\frac{f}{f_T}\cdot\frac{R_{OUT}}{R_O}\right)}{1+j\frac{f}{f_T}\left[\begin{array}{c}1+Y_X R_O + j\omega C_{IN} R_O +\\ +Y_X R_{OUT} + j\omega C_{IN} R_{OUT}\end{array}\right]}. \quad (13)$$

Дослідження адекватності отриманої спрощеної моделі автокомпенсаційного перетворювача (13) показало, що розбіжність із повною моделлю (11) не перевищує 0,01% в смузі частот до $f = 0{,}1\times f_T$. Крім того, порівняльний аналіз функцій перетворення схеми на основі ідеального операційного підсилювача (7) та побудованого на ОП з реальними параметрами (13) виявив, що найбільш значущими джерелами похибок є: зменшення коефіцієнта підсилення A у міру збільшення частоти, вплив вихідного імпедансу R_{OUT} операційного підсилювача та вплив його вхідної ємності C_{IN}.

Щоб простежити природу зв'язку між різними параметрами операційної схеми у виразах чисельника і знаменника, сформалізуємо модель (13) шляхом введення описаних нижче символьних змінних. Добуток $Y_X \cdot R_O$ можна інтерпретувати як нормовані результати вимірювання імпедансу, тому вони були позначені:

$$Y_X \cdot R_0 = G + j\cdot B, \quad (14)$$

де G і B - відповідно нормалізовані активна і реактивна компоненти адмітанса біооб'єкта.

Відношення вихідного опору R_{OUT} до опору резистора діапазону R_O позначається незалежною від частоти змінною D, тоді як добуток вхідної ємності C_{IN} у формалізованій моделі представлено змінною C, пропорційно залежною від частоти:

$$D=\frac{R_{OUT}}{R_O}, \quad (15)$$

$$C=\omega C_{IN} R_O. \quad (16)$$

А відношення частоти одиничного підсилення до частоти сигналу вибірки позначено як:

$$K=f_T/f. \quad (17)$$

Таким чином, формалізована математична модель моста автобалансування з урахуванням змінних (14) ÷ (17) виражається рівнянням:

$$H=-\frac{(G+jB)\left(1-j\frac{D}{K}\right)}{1+j\frac{1}{K}\left[\begin{array}{c}1+(G+jB)+jC+\\ +Y_X R_{OUT} + j\omega C_{IN} R_{OUT}\end{array}\right]}. \quad (18)$$

Добутки $Y_X \cdot R_{OUT}$ і $\omega \cdot C_{IN} \cdot R_{OUT}$ також можуть бути виражені змінними D і C таким чином:

$$Y_X R_{OUT} = Y_X R_O \frac{R_{OUT}}{R_O} = D(G+jB), \quad (19)$$

$$\omega C_{IN} R_{OUT} = \omega C_{IN} R_O \frac{R_{OUT}}{R_O} = C\cdot D; \quad (20)$$

остаточно формалізована математична модель моста з автоматичним балансуванням набуває вигляду:

$$H=\frac{(G+jB)\left(1-j\frac{D}{K}\right)}{1+j\frac{1}{K}\left[1+(G+jB)(1+D)+jC(1+D)\right]}. \quad (21)$$

Кожна зі змінних K, C і D в моделі (21), відображає одне з трьох основних джерел динамічної похибки, що виникає в автокомпенсаційному перетворювачі (про які зазначалося вище):

- змінна K - зменшення коефіцієнта підсилення операційного підсилювача з ростом частоти f;
- змінна C - шунтування вхідною ємністю C_{IN} вхідного імпеданса операційного підсилювача;
- змінна D - пряме проходження сигналу від входу до виходу операційної схеми за рахунок ненульового значення вихідного опору ОП.

Концептуалізація синтезу функції цифрового еквалайзара для коригування динамічних похибок частотного аналізатора біоімпеданса. Функцію цифрового еквалайзера можна представити алгоритмами коригування результатів вимірювання складових адмітінса біооб'єкта з метою зменшення впливу динамічних похибок вимірювального каналу. Вихідним пунктом синтезу алгоритмів коригування буде отримана в попередньому розділі формалізована модель (21). Виділимо дійсну частину P і уявну частину Q:

$$H = P + j \cdot Q = \\ = -\frac{(G + jB)\left(1 - j\frac{D}{K}\right)}{1 + j\frac{1}{K}\left[1 + (G + jB)(1 + D) + jC(1 + D)\right]}. \quad (22)$$

Це означає, що значення P і Q можна інтерпретувати як "приблизні" результати вимірювання імпедансу, оскільки "ідеальними" результатами відповідно до (7) та (14) є

$$H_\infty = -Y_X \cdot R_O = G + j \cdot B. \quad (23)$$

Синтез алгоритмів корекції включає такі етапи. Спочатку позбудемося знаменника у виразі (22), помноживши на нього праву та ліву сторони:

$$P + jQ + j\frac{(P + jQ)}{K} \times \\ \times\left[1 + (G + jB)(1 + D) + jC(1 + D)\right] = . \quad (24) \\ = (G + jB)\left(1 - j\frac{D}{K}\right).$$

Записуючи окремо дійсні та уявні частини у наведеному вище виразі, отримуємо систему двох рівнянь у дійсних числах:

$$\begin{cases} P - \frac{P}{K}(B + C)(1 + D) - \frac{Q}{K}\left[1 + G(1 + D)\right] = G + B\frac{D}{K}; \\ Q - \frac{Q}{K}(B + C)(1 + D) + \frac{P}{K}\left[1 + G(1 + D)\right] = B - G\frac{D}{K}. \end{cases} \quad (25)$$

Перегрупуючи вирази відносно G і B і перемістивши незалежні змінні вліво, отримуємо:

$$\begin{cases} G\left[1 + Q\frac{(1 + D)}{K}\right] + B\frac{\left[D + P(1 + D)\right]}{K} = \\ \quad = P\left[1 - C\frac{(1 + D)}{K}\right] - \frac{Q}{K}; \\ -G\frac{\left[D + P(1 + D)\right]}{K} + B\left[1 + Q\frac{(1 + D)}{K}\right] = \\ \quad = Q\left[1 - C\frac{(1 + D)}{K}\right] + \frac{P}{K}. \end{cases} \quad (26)$$

Вводячи наступні позначення

$$a = 1 + Q\frac{(1 + D)}{K},\ c = P - P \cdot C\frac{(1 + D)}{K} - \frac{Q}{K}, \\ b = P\frac{(1 + D)}{K},\ d = Q - Q \cdot C\frac{(1 + D)}{K} + \frac{P}{K} \quad (27)$$

рішення цієї системи рівнянь можна записати у такому вигляді:

$$G = \frac{a \cdot c - b \cdot d}{a^2 + b^2},\quad B = \frac{b \cdot c + a \cdot d}{a^2 + b^2}. \quad (28)$$

Насправді, у нас немає величин P і Q, оскільки вони представляють реальні та уявні компоненти спрощеної моделі (13). "Сирими" результатами вимірювань є відповідні $\mathrm{real}\{H\}$ та $\mathrm{imag}\{H\}$ компоненти передатної функції повної моделі (11), які на практиці можна отримати, використовуючи одноточкове дискретне перетворення Фур'є для квадратурного розкладу напруги U_X, як у рівнянні (4):

$$real\{H_\infty\} = M_G \ \text{ і } \ imag\{H_\infty\} = M_B \quad (29)$$

Тому, якщо замінити у формулах (27)

$$P \to M_G = real\{H_\infty\} \ \text{ і } \ Q \to M_B = imag\{H_\infty\}, \quad (30)$$

будуть отримані вирази алгоритмів коригування:

$$\tilde{G} = \frac{\tilde{a} \cdot \tilde{c} - \tilde{b} \cdot \tilde{d}}{\tilde{a}^2 + \tilde{b}^2} = N_G,\quad \tilde{B} = \frac{\tilde{b} \cdot \tilde{c} + \tilde{a} \cdot \tilde{d}}{\tilde{a}^2 + \tilde{b}^2} = N_B, \quad (31)$$

де $\tilde{a} = 1 + M_B\frac{(1 + D)}{K}$; $\tilde{b} = M_G\frac{(1 + D)}{K}$;

$$\tilde{c} = M_G - M_G \cdot C\frac{(1 + D)}{K} - \frac{M_B}{K};$$

$$\tilde{d} = M_B - M_B \cdot C\frac{(1 + D)}{K} + \frac{M_G}{K}. \quad (32)$$

Іншими словами, на вхід цифрового еквалайзера надходять результати вимірювань M_G та M_B спотворені динамічними похибками. Еквалайзер за синтезованими алгоритмами (31) і (32) виконує коригування і видає на вихід уточнені результати N_G та N_B, які є близькими до істинних значень складових G_X і B_X адмітанса Y_X досліджуваного біооб'єкта. Таким чином, синтезовані алгоритми коригування у неявному вигляді представляють функцію еквалайзера вимірювального каналу сенсора біоімпеденсу.

Методика і результати чисельного моделювання. Основне призначення розроблених алгоритмів - коригування динамічних похибок, що виникають на етапі перетворення адмітанса Y_X на пропорційну комплексну напругу U_X. Тому важливо дослідити можливість розширення діапазону частот за допомогою цифрового еквалайзара у частотнму аналізаторі біоімпеданса.

Для верифікації алгоритмів коригування використано прецизійний операційний підсилювач AD845 (Analog Devices) із такими параметрами:

$A_0 = 100000$; $f_T = 16$ МГц; $R_D = 10$ МОм; $C_{IN} = 4$ пФ; $R_{OUT} = 5$ Ом; $R_S = 100$ МОм; $R_L = 10$ кОм [22].

Опір зразкового резистора становив 10 кОм.

Спочатку на основі моделі (11) досліджено динамічні похибки автокомпенсаційного перетворювача, що виникають на фазовій площині $G = G_X \times R_O = 0 \div 1{,}0$ та $B = B_X \times R_O = 0 \div 1{,}0$. Дві дестабілізуючі величини D і C, які відповідно до (15) і (16) мають контраверсійну залежність від зразкового опору R_O: C – пропорційну, а D – обернено пропорційну.

Резистор діапазону R_O = 10 кОм відповідає піддіапазону вимірювання складових адмітанса від 0 до 10^{-4} См.

Калібрування вимірювального каналу спрямоване на усунення адитивних та мультиплікативних похибок. Шляхом коригування нуля у режимі відкритого входу, тобто коли G = 0 і B = 0 усувають адитивну похибку. Для усунення мультиплікативної похибки вимірювання проводять в режимі калібрування за допомогою опорного резистора $R_K = R_O$, тобто G = 1 і B = 0.

Найменш сприятливі умови вимірювання виникають, коли вимірювана складова адмітанса невелика відносно супутньої. Як показали результати чисельного моделювання динамічні похибки на частоті зондувального сигналу f = 1 МГц сягають до 15%. Тому для подальшого аналізу обрано несприятливі умови, коли складова взірцевого резистора складає лише приблизно 10% від його модуля, що відповідало:

а) вимірюванню меншої за значенням активної складової $G = G_X \cdot R_O$ = 10 [μS]×10 [kΩ] = 0,1 на тлі домінуючої реактивної

$$B = B_X \cdot R_O = 100\ [\mu S] \times 10\ [k\Omega] = 1{,}0;$$

б) вимірюванню меншої за значенням реактивної складової $B = B_X \cdot R_O$ = 10 [μS]×10 [kΩ] = 0,1 за домінуючої активної складової

$$G = G_X \cdot R_O = 100\ [\mu S] \times 10\ [k\Omega] = 1{,}0.$$

Для оцінювання ефективності синтезованих алгоритмів використано відносні похибки вимірювання активної і реактивної складових адмітанса перед коригуванням

$$\delta_G = \left(\frac{M_G}{G} - 1\right) \times 100\%\ ,\ \delta_B = \left(\frac{M_B}{B} - 1\right) \times 100\% \quad (33)$$

і після застосування алгоритмів коригування

$$\varepsilon_G = \left(\frac{N_G}{G} - 1\right) \times 100\%\ ,\ \varepsilon_B = \left(\frac{N_B}{B} - 1\right) \times 100\%\ . \quad (34)$$

Величини M_G та M_B обчислено за формулами (11) та (29), тоді як N_G та N_B із формул (32).

Чисельне моделювання проведено на основі параметрів моделі PSpice операційного підсилювача AD845 в діапазоні частот від 10 Гц до декількох МГц. У табл. 1 і 2 подано результати обчислення похибок на вході (δ_G , δ_B) і виході (ε_G , ε_B) цифрового еквалайзера, у точках, які відповідають межам частотних декад. Крім того, у таблицях погрубленим кеглем виділено значення частот, на яких динамічні похибки досягають 1,0%.

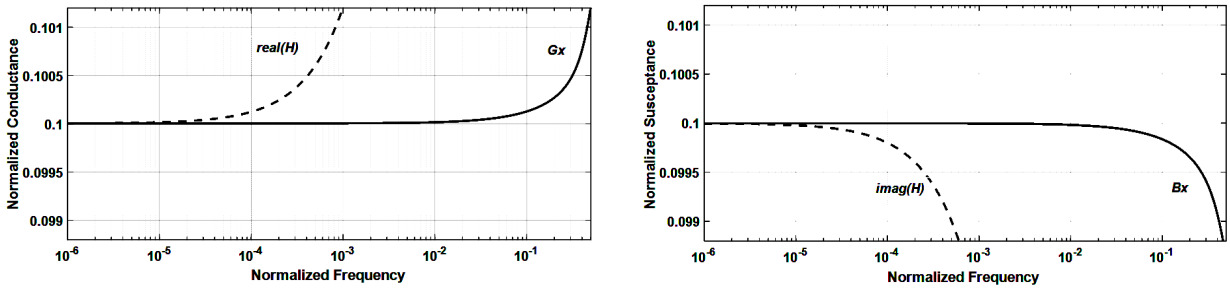
На рис. 5 показано результати вимірювання складових адмітанса для візуалізації ефективності розширення діапазону частот біосенсора з використанням цифрового еквалайзера. Для забезпечення загальності результатів та здатності проводити порівняльний аналіз, частотні характеристики вимірювального каналу біосенсора подано за відносною шкалою f/f_T.

Таблиця 1 – **Динамічні похибки вимірювання активної складової адмітанса Y_X = 10 + j 100 [мкСм]**

f, Hz	10	10^2	10^3	10^4	**~1.2×10^4**	10^5	10^6	**~5.9×10^6**
δ_G,%	0.01	0.016	0.08	0.8	**1.0**	7.6	88	**>100**
ε_G,%	0.01	0.01	0.01	0.01	**0.01**	0.017	0.09	**1.0**

Таблиця 2 – **Динамічні похибки вимірювання реактивної складової адмітанса Y_X = 100 + j 10 [мкСм]**

f, Hz	10	10^2	10^3	**~7.9×10^3**	10^4	10^5	10^6	**~4×10^6**
δ_B,%	-0.01	-0.016	-0.13	-1.0	-1.2	-12.5	>-100	>-100
ε_B,%	-0.01	-0.01	-0.01	**-0.01**	-0.01	-0.013	-0.1	**-1.0%**



а б

Рис. 5. Частотні характеристики вимірювального каналу біосенсора: (а) - вимірювання адмітанса Y_X = 10 + j 100 [мкС], (б) - вимірювання адмітанса Y_X = 100 + j 10 [μS], (пунктирна лінія – без еквалайзера, суцільна лінія – з еквалайзером)

Результати моделювання показують ефективність засосування цифрового еквалайзера для зменшення динамічних похибок біосенсора збудованого на простому автокомпенсаційному перетворювачі. Графіки на рис. 5 також ілюструють можливість розширення діапазону частот вимірювань. В обох гірших випадках, тобто коли значення вимірюваної складової становить всього десяту частину супутньої, похибки не перевищували 1% на частотах зондувального сигналу до f = 0,4 f_T із цифровим еквалайзером, тоді як без еквалайзера ця межа була нижче ніж f = 0,001 f_T. Інтерпретуючи результати в абсолютних величинах, можна констатувати, що використання у еквалайзері синтезованих алгоритмів коригування (31), (32) дає можливість розширити діапазон частот імпедансу від приблизно 10 кГц до понад 4 МГц, якщо автокомпенсаційний перетворювач біосенсора реалізовано

на базі операційного підсилювача з частотою одиничного підсилення f_T = 16 МГц.

Висновки

Імпедансна спектроскопія широко застосовуються не лише у технічних галузях, але і у біомедичних дослідженнях. На цей час існує потреба у простих переносних аналізаторах біоімпедансу, що розширить спектр вирішуваних задач і можливість персонального застосування у домашніх умовах. Ключовим структурним елементом аналізатора є біосенсор, який забезпечує формування і вимірювання складових біоімпеданса. Метод автоматичного балансування моста є одним із найпростіших для побудови портативного сенсора біоімпеданса. Проте, щоб забезпечити можливість його застосування у широкому діапазоні частот потрібно вирішити проблему динамічних похибок.

Відомі методи розширення діапазону робочих частот базуються на введені структурної або часової надлишковості, що не є ефективним для портативних аналізаторів біоімпедансу. У роботі запропоновано альтернативний іноваційний підхід, який базується на зменшенні динамічних похибок шляхом програмного коригування результатів вимірювання активної і реактивної складових біоімпеданса. По суті це функція еквалайзера, оскільки відбувається вирівнювання частотної характеристики вимірювального каналу біосенсора.

Характеристика еквалайзера є інверсною до функції перетворення вимірювального каналу, тому детально проаналізовано та виділено найбільш істотні джерела похибок. Отримана формалізована модель передатної характеритики автокомпенсаційного перетворювача біоімпедансу послужила основою для синтезу функції цифрового еквалайзера. Ця функція у неявному вигляді представлена алгоритмами коригування, процедуру синтезу яких покроково описано у роботі.

Еквалайзер імплементується на існуючих обчислювальних ресурсах (мікроконтролері) аналізатора імпедансу у вигляді алгоритмів коригування "сирих" результатів вимірювання складових адмітанса, отриманих із використанням автокомпенсаційного перетворювача. Тобто реалізація цифрового еквалайзера не вимагає ускладнення структури аналізатора, що важливо для його портативного виконання. Невідомі значення параметрів, що використовуються в алгоритмах коригування, обчислюють використовуючи результати отримані під час калібрування вимірювального каналу за допомогою зразкового резистора. Результати досліджень показали ефективність алгоритмів коригування - діапазон робочих частот можна значно розширити (приблизно в 500 разів). Отже, запропонований підхід на основі цифрового еквалайзера дає змогу зменшити вплив динамічних похибок і тим самим розширити діапазон робочих частот аналізатора біоімпедансу.

Список літератури

1. Barsoukov E., Macdonald J.R. Impedance spectroscopy: theory, experiment and application. N.Y.: Willey. 2005. 616 p.
2. Lvovich V.F. Impedance spectroscopy. Application to Electrochemical and Dielectric Phenomena. New Jersey: A John Wiley & Sons Inc. 2012. 350 p.
3. Hoja J., Lentka G. A family of new generation miniaturized impedance analyzers for technical object diagnostic. *Metr. & Meas. Syst.* 2013. Vol. 20, No 1. pp. 43–52. DOI: https://doi.org/10.2478/mms-2013-0004.
4. Sami F.K., Mas S.M., Fatimah I. The Theory and Fundamentals of Bioimpedance Analysis in Clinical Status Monitoring and Diagnosis of Diseases. *Sensors*. 2014. No. 14, 10895-10928. DOI: https://doi.org/10.3390/s140610895.
5. Nowakowski A., Palko T., Wtorek J. Advances in electrical impedance methods in medical diagnostics. *Bull. Pol. Acad. Sci.-Tech. Sci*. 2005. Vol. 53, No. 5. pp. 231-243.
6. Николаев Д.В., Смирнов А.В., Бобринская И.Г., Руднев С.Г. Биоимпедансный анализ состава тела человека. М.: Наука, 2009. 392 с. ISBN 978-5-02-036696-1.
7. Li J., Igbe T., Liu Y. et al. An approach for noninvasive blood glucose monitoring based on bioimpedance difference considering blood volume pulsation. *IEEE Access*. 2018. Vol. 6, pp. 51119–51129, DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2866601.
8. Smajda M., Khoma V., Khoma Y., Otenko V. Zastosowanie technologii cyfrowego przetwarzania sygnałów w nowoczesnych układach reograficznych. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2019. No. 11, pp. 231-237. DOI: https://doi.org/10.15199/48.2019.11.54.
9. Dutta A., Bera S.C., Das K.A. Non-invasive microcontroller based estimation of blood glucose concentration by using a modified capacitive sensor at low frequency. [Електронний ресурс]. *AIP Advances*. 2019. No. 9, 105027. Режим доступу: https://DOI.org/10.1063/1.5116059. (останнє звернення 03.04.2020).
10. Pope G.C., Halter R.J. Design and Implementation of an Ultra-Low Resource Electrodermal Activity Sensor for Wearable Applications. *Sensors*. 2019. Vol.19, 2450. DOI: https://doi.org/10.3390/s19112450.
11. Impedance Measurement Handbook. A guide to measurement technology and techniques. Application Note. 6th ed. [Електронний ресурс]. Keysight Technologies: USA, 2016, 140 p. Режим доступу: https://www.keysight.com/zz/en/assets/7018-06840/application-notes/5950-3000.pdf (останнє звернення 03.04.2020).
12. Хома В.В., Походило Є.В. Проблемно-орієнтовані засоби вимірювання імітансу. Теорія і практика: монографія. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. 264 с. IBSN 978-617-607-433-5.
13. Matsiev L. Improving Performance and Versatility of Systems Based on Single-Frequency DFT Detectors Such as AD5933. *Electronics*. 2015. No. 4, pp. 1-34. DOI: https://doi.org/10.3390/electronics4010001.
14. Stadnyk B., Khoma Y. Improving the Accuracy of the Single Chip Impedance Analyzer for Sensor Applications. [Електронний ресурс]. *Sensors & Transducers*. 2013. Vol. 150, No. 3. pp. 27-31. Режим доступу: https://www.sensorsportal.com/HTML/IFSA_Newsletter_March_February_2013.htm (останнє звернення 05.03.2020)
15. AD 5933. 1 MSPS, 12 bit Impedance Converter, Network Analyzer. Preliminary Data Sheet [Електроний ресурс]. Режим доступу: www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/AD5933.pdf (останнє звернення 05.03.2020).
16. AD 5934, 250 KSPS, 12 Bit Impedance Converter Network Analyzer. Preliminary Data Sheet. Режим доступу: www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/AD5934.pdf (останнє звернення 05.03.2020).

17. Impedance Measurement Handbook. User's Guide. 1st ed. [Електронний ресурс]. HIOKI E.E. Corporation: 2018. 36 p. Режим доступу: https://www.hioki.cn/ckeditor_assets/attachments/812/.pdf (останнє звернення 06.04.2020).
18. Analog Devices. A Technical Tutorial on Digital Signal Synthesis. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.analog.com/static/imported-files/tutorials/450968421DDS_Tutorial_rev12-2-99.pdf (останнє звернення 06.04.2020)
19. Low Power, 12.65 mW, 2.3 V to 5.5 V, Programmable Waveform Generator AD9833. DataSheet. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.analog.com/media/en/technicaldocumentation/ data-sheets/ad9833.pdf (останнє звернення 09.02.2020).
20. Dostal J. Operational Amplifiers. 2nd ed. N. Y.: Butterworth-Heinemann. 1993. 387 p.
21. Jung W.G. Op Amp Applications Handbook. Elsevier. 2005. 895 p. ISBN 0-7506-7844-5.
22. AD845, Precision, 16 MHz CBFET Op Amp. DataSheet. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD845.pdf (останнє звернення 09.02.2019).

References

1. Barsoukov, E. and Macdonald, J.R. (2005), *Impedance spectroscopy: theory, experiment and application,* 2nd ed., Willey, N.Y., 616 p.
2. Lvovich, V.F. (2012), *Impedance spectroscopy. Application to Electrochemical and Dielectric Phenomena,* A John Wiley & Sons Inc., New Jersey, 350 p.
3. Hoja, J. and Lentka, G. (2013), "A family of new generation miniaturized impedance analyzers for technical object diagnostic", *Metr. & Meas. Syst.*, Vol. 20, No. 1, pp. 43–52. DOI: https://doi.org/10.2478/mms-2013-0004.
4. Sami, F.K., Mas, S.M. and Fatimah, I. (2014), "The Theory and Fundamentals of Bioimpedance Analysis in Clinical Status Monitoring and Diagnosis of Diseases", *Sensors,* No. 14, pp. 10895-10928; DOI: https://doi.org/10.3390/s140610895.
5. Nowakowski, A., Palko, T. and Wtorek, J. (2005), "Advances in electrical impedance methods in medical diagnostics", *Bull. Pol. Acad. Sci.-Tech. Sci.*, Vol. 53, No. 5, pp. 231-243.
6. Nikolaev, D.V., Smirnov, A.V., Bobrynskaia Y.H., and Rudnev S.H. (2009), *Bioimpedansnyi analiz sostava tela cheloveka*, [Human Body Bioimpedance Analysis], Nauka, Moskow, 392 p., ISBN 978-5-02-036696-1.
7. Li, J., Igbe, T., Liu, Y. et al. (2018), "An approach for noninvasive blood glucose monitoring based on bioimpedance difference considering blood volume pulsation," *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 51119–51129, DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2866601.
8. Smajda, M., Khoma, V., Khoma, Y. and Otenko, V. (2019). "Zastosowanie technologii cyfrowego przetwarzania sygnałów w nowoczesnych układach reograficznych". [A method of rheographic system design, that is based on the wide use of digital components], *Przeglad Elektrotechniczny*, No. 11, pp. 231-237. DOI: https://doi.org/10.15199/48.2019.11.54 (In Polish).
9. Dutta, A., Bera, S. C. and Das, K. (2019), "A non-invasive microcontroller based estimation of blood glucose concentration by using a modified capacitive sensor at low frequency", *AIP Advances,* Vol. 9, No. 10, 105027, available at: https://doi.org/10.1063/1.5116059 (last accessed April 3, 2020).
10. Pope, G.C. and Halter, R.J. (2019), "Design and Implementation of an Ultra-Low Resource Electrodermal Activity Sensor for Wearable Applications", *Sensors*, No. 19, 2450, DOI: https://doi.org/10.3390/s19112450.
11. Impedance Measurement Handbook. A guide to measurement technology and techniques. *Application Note*, 6th ed., Keysight Technologies, USA, 2016, 140 p., available at: https://www.keysight.com/zz/en/assets/7018-06840/application-notes/5950-3000.pdf (last accessed April 3, 2020).
12. Khoma, V.V., Pokhodylo, Ye.V. (2013), *Problemno-oriientovani zasoby vymiriuvannia imitansu. Teoriia i praktyka,* [Problem-oriented immitance meter. Theory and Practice: Monograph], Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniky, Lviv, 264 p., IBSN 978-617-607-433-5.
13. Matsiev, L. (2015), "Improving Performance and Versatility of Systems Based on Single-Frequency DFT Detectors Such as AD5933", *Electronics,* No. 4, pp. 1-34, DOI: https://doi.org/10.3390/electronics4010001.
14. Stadnyk, B. and Khoma, Y. (2013), "Improving the Accuracy of the Single Chip Impedance Analyzer for Sensor Applications", *Sensors & Transducers*, Vol. 150, No. 3, pp. 27-31, available at: https://www.sensorsportal.com/HTML/IFSA_Newsletter_March_February_2013.htm, (last accessed March 5, 2020).
15. AD 5933. 1 MSPS, 12 bit Impedance Converter, Network Analyzer. Preliminary Data Sheet, available at: www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/AD5933.pdf (last accessed March 5, 2020).
16. AD 5934, 250 KSPS, 12 Bit Impedance Converter Network Analyzer. Preliminary Data Sheet, available at: www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/AD5934.pdf (last accessed March 5, 2020)
17. Impedance Measurement Handbook. User's Guide, 1st ed., HIOKI E.E. Corporation, 2018, 36 p. available at: https://www.hioki.cn/ckeditor_assets/attachments/812/.pdf (last accessed April 6, 2020).
18. A Technical Tutorial on Digital Signal Synthesis, Analog Devices, available at: http://www.analog.com/static/imported-files/tutorials/450968421DDS_Tutorial_rev12-2-99.pdf (last accessed April 6, 2020).
19. Low Power, 12.65 mW, 2.3 V to 5.5 V, Programmable Waveform Generator AD9833, DataSheet, available at: https://www.analog.com/media/en/technicaldocumentation/ data-sheets/ad9833.pdf (last accessed February 9, 2020).
20. Dostal, J. (1993), *Operational Amplifiers*. 2nd ed., Butterworth-Heinemann, N. Y., 387 p.
21. Jung, W.G. (2005), *Op Amp Applications Handbook*, Elsevier, 895 p. ISBN 0-7506-7844-5.
22. AD845, Precision, 16 MHz CBFET Op Amp, DataSheet, available at: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD845.pdf (last accessed February 9, 2020).

Received (Надійшла) 14.04.2020
Accepted for publication (Прийнята до друку) 13.05.2020

Відомості про авторів / About the Authors

Хома Юрій Володимирович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, Національний університет "Львівська політехніка", Львів, Україна;

Yuriy Khoma – Candidate of Technical Sciences, Asistant Professor of Information and Measurement Technology Department, National University "Lviv Polytechnic", Lviv, Ukraine;
e-mail: khomay@gmail.com; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-4677-5392.

Хома Володимир Васильович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри захисту інформації, Національний університет "Львівська політехніка", Львів, Україна;
Volodymyr Khoma – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Information Security Department, National University "Lviv Polytechnic", Lviv, Ukraine;
e-mail: volodymyr.v.khoma@lpnu.ua; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0001-9391-6525.

Разработка цифрового эквалайзера для биосенсора портативного анализатора биоимпеданса

Ю. В. Хома, В. В. Хома

Аннотация. В статье описан новый подход к построению портативного частотного анализатора биоимпеданса. Новизна подхода заключается в синтезе алгоритмов коррекции, которые выполняют функцию цифрового эквалайзера по выравниванию частотной характеристики сенсора биоимпеданса. Реализация подхода позволяет более чем на два порядка расширить диапазон рабочих частот без усложнения структуры частотного анализатора. **Предметом исследования** является метод построения низкозатратного частотного анализатора биоимпеданса для персонального применения в домашних условиях, в частности как носимого устройства. **Цель исследования** - разработка нового подхода к построению биосенсора, как базового компонента портативного частотного анализатора биоимпеданса. Новый подход основан на максимальном упрощении аналоговой части биосенсора и использовании вычислительных средств для коррекции динамических погрешностей измерительного канала. Ключевым аспектом для реализации такого подхода является синтез функции цифрового эквалайзера в виде алгоритмов коррекции динамических погрешностей. **Результаты.** Обоснована целесообразность построения сенсора биоимпеданса по методу автоматической балансировки моста. Показано, что при этом основной проблемой является динамические погрешности, ограничивающие диапазон рабочих частот. Проведен анализ частотной передаточной функции автокомпенсационного преобразователя и выделены три наиболее существенные источники динамических погрешностей. Выполнена формализация передаточной функции, при этом дестабилизирующие воздействия представлены тремя коэффициентами. Предложена методология синтеза алгоритмов коррекции «сырых» результатов измерения, которые по существу реализуют функцию цифрового эквалайзера. Подчеркнуто, что имплементация цифрового эквалайзера не требует изменений в структуре сенсора биоимпеданса, а только использует вычислительную мощность, которую уже имеют современные измерительные средства. Исследована эффективность алгоритмов коррекции в диапазоне частот от 10 Гц до нескольких МГц путем симуляции сенсора биоимпеданса на модели Pspice. Результаты исследований показали возможность расширения диапазона рабочих частот более чем на две частотные декады. **Выводы.** Показана необходимость разработки цифрового эквалайзера для портативного анализатора биоимпеданса. Предложено инновационный подход по уменьшению динамических погрешностей на основе синтеза и использования алгоритмов коррекции. Исследована эффективность синтезированных алгоритмов и показана возможность существенного расширения диапазона рабочих портативного анализатора биоимпеданса.

Ключевые слова: портативный частотный анализатор биоимпеданса; биосенсор; автокомпенсационный преобразователь; цифровой эквалайзер; алгоритмы коррекции динамических погрешностей.

Digital Equalizer Design of Biosensor for Portable Bioimpedance Analyzer

Y. Khoma, V. Khoma

Abstract. The article describes a new design approach for portable bioimpedance analyzers. The novelty of this approach is based on the idea to synthesize the correction algorithms that perform as a digital equalizer to equalize the frequency response of the bioimpedance sensor. The implementation of the approach allows expanding the operating frequency range for more than two orders without increasing the complexity of the structure of the bioimpedance measuring channel. **The subject** of the study is a method of design a low-cost bioimpedance analyzer for personal use, in particular as a wearable device. **The purpose** of the study is to develop a new design for a biosensor as a basic component of a portable bioimpedance analyzer. The approach is based on the maximum simplification of the analog part of the biosensor and the use of computational tools to correct the dynamic errors of the measuring channel. A key aspect of the implementation of this approach is the synthesis of the digital equalizer function as a set of algorithms for dynamic errors correction. **Results.** The expediency of bioimpedance sensor design by the method of auto-balancing bridge balancing has been proven in the paper. Dynamic errors that limit the operating frequency range are shown to be the main problem along the way. The transfer function of the auto-balancing circuit is analyzed and the three most significant sources of dynamic errors are identified. The transfer function is formalized, where the error sources are represented by three coefficients. The methodology of the synthesis of the correction algorithms for "raw" measurement results, which essentially realize the function of the digital equalizer, is proposed. It is stressed that the implementation of the digital equalizer does not require any additional changes in the structure of the bioimpedance sensor, as it only requires the computational resources that are already available as a part of the modern measuring instrumentation. The efficiency of the correction algorithms in the frequency range from 10 Hz to several MHz is investigated by modeling the bioimpedance sensor in the Pspice simulation software. Research results have shown the possibility of extending the operating frequency range by more than two frequency orders. **Conclusions.** The necessity of developing a digital equalizer for a portable bioimpedance analyzer is shown in the article. An innovative approach is proposed to reduce dynamic errors based on synthesis and use of correction algorithms. The efficiency of the synthesized algorithms is investigated and the possibility of significant expansion of the operation frequency range of portable bioimpedance analyzer is demonstrated.

Keywords: portable bioimpedance analyzer; biosensor; auto-balancing circuit; digital equalizer; dynamic errors correction algorithm.

Information systems research

УДК 621. 396 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.2.16**

В. І. Василишин[1], М. Й. Заремський[2], В. П. Коцюба[1], О. В. Чеховський [1]

[1] Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна
[2] Військова частина А1906, Україна

ОЦІНЮВАННЯ КУТОВИХ КООРДИНАТ ДЖЕРЕЛ ВИПРОМІНЮВАННЯ МЕТОДОМ ROOT-MUSIC ПРИ ПОПЕРЕДНЬОМУ ФОРМУВАННІ ОРТОГОНАЛЬНИХ ПРОМЕНІВ В УМОВАХ ВПЛИВУ ПОЗАСЕКТОРНОГО ДЖЕРЕЛА

Анотація. Предметом вивчення в статті є методи спектрального аналізу при перетворенні до простору променів (попередньому формуванні ортогональних променів діаграми спрямованості). **Мета даної статті** – підвищення ефективності спектрального аналізу (зменшення середньоквадратичної похибки (СКП) оцінювання кутових координат джерел випромінювання) в просторі променів в умовах впливу позасекторного джерела (завади). Використовуваними **методами** є: методи спектрального аналізу, методи цифрового статистичного моделювання. **Результати.** Для підвищення точності оцінювання кутових координат джерел випромінювання методом Root-MUSIC при попередньому формуванні ортогональних променів та впливі завади (позасекторного джерела) пропонується виконувати зсув променів, що формуються, таким чином, щоб кутовій координаті джерела завади відповідав нуль діаграми спрямованості. Для випадку, що розглядається, отримано вираз для поліному методу Root-MUSIC. Оцінка кутової координати джерела завади здійснюється за допомогою методу Бартлетта або з використанням дискретного перетворення Фур'є (ДПФ). Показано, що в умовах малого числа вибірок та низького відношення сигнал-шум (ВСШ) точність запропонованого підходу вища, ніж у оригінального методу Root-MUSIC з попереднім формуванням ортогональних променів. **Висновки.** Високий рівень бічних пелюсток, що характеризує сформовані ортогональні промені при використанні ДПФ, призводить до впливу джерела випромінювання, кутова координата якого відповідає сектору, що не охоплюється променями, на характеристики методу спектрального аналізу. Має місце ефект перетікання, характерний для ДПФ. Вплив джерела, яке є завадою по відношенню до джерел корисного сигналу, можна зменшити зсувом променів, що формуються при використанні ДПФ, таким чином, щоб нуль діаграми спрямованості відповідав напрямку на джерело завади. Розглянутий підхід доцільно використовувати і в системах радіозв'язку з OFDM та MIMO–OFDM, що ґрунтуються на ДПФ, системах зв'язку міліметрового діапазону хвиль з MIMO та MIMO–OFDM з метою підвищення їх завадостійкості.

Ключові слова: ортогональні промені; простір променів; спектральне розкладення кореляційної матриці; методи спектрального аналізу; завадостійкість.

Вступ

Постановка проблеми у загальному вигляді.

На сьогоднішній день покращення ефективності сучасних радіотехнічних систем (систем радіолокації, гідролокації, радіомоніторингу, систем зв'язку) можливе шляхом впровадження методів просторово-часової, поляризаційної обробок сигналів та методів, отриманих в нелінійній динаміці, інших споріднених областях [1-4].

Фазовані або цифрові антенні решітки (АР), що використовуються в радіолокаційних системах та в деяких системах зв'язку (супутникового і т.д.) починають широко застосовуватися в сучасних системах зв'язку. Модель OSI (open system interconnection- взаємодії відкритих систем), яка широко застосовується в системах зв'язку, поширюється і на випадок систем зв'язку з АР. Особливий інтерес викликає підрівень канального рівня OSI, що називається MAC-рівнем (Medium Access Control) [5].

Сучасні методи просторового спектрального аналізу (СА) дозволяють оцінювати кутові координати джерел випромінювання в режимі надрозділення. Теорія надрозділення, розглянута в роботах Я.Д. Ширмана, Д.І. Леховицького, С.Є. Фальковича, П.Ю Костенко та інших вчених, постійно розвивається. Спектральний аналіз, що зазвичай пов'язувався з перетворенням Фур'є, методами СА, узагальнюється результатами, отриманими в спектральній теорії операторів (відповідних їм матриць), спектральній теорії графів, ''стисненні'' (compressive sensing), методах, що використовуються при обробці сигналів та нелінійній динаміці (наприклад, сингулярний спектральний аналіз (singular spectrum analysis) і т.д.

Потреба в надрозділенні виникає в системах радіолокації (системах пеленгації, радіолокаційних станціях з синтезованою апертурою як наземного так і космічного базування), в системах зв'язку (при вирішенні задач зондування каналу зв'язку, просторовому розділенні сигналів), системах радіомоніторингу і в ряді інших випадків.

Реалізація сучасних методів СА пов'язана з спектральним розкладенням кореляційної матриці (КМ) спостережень або сингулярним розкладенням матриці даних, елементами функціонального аналізу. Такі розкладення широко застосовуються також при обробці полів (зображень) і т.д.

Спектральне подання КМ пов'язане з відомою теоремою Карунена-Лоева, методом головних компонент і т.д. [1-3].

© Василишин В. І., Заремський М. Й., Коцюба В. П., Чеховський О. В., 2020

В ряді випадків, з метою прискорення кутового СА використовують діаграмоутворюючі схеми (ДУС). Прикладом формування ортогональних променів діаграму спрямованості (ДС), що утворюють багатопроменеву ДС), є ДПФ. В цьому випадку в технічній літературі вказується на обробку у просторі променів (beamspace) [1, 7, 8]. Слід зазначити, що перетворення до простору променів використовується в системах MIMO міліметрового діапазону хвиль.

Обчислювальна складність методів СА при обробці в просторі променів зменшується до $O\left(M_b^3\right)$ операцій комплексного множення, де $M_b < M$ – число променів (beams), що формуються. Це суттєво менше ніж $O(M^3)$, де M – кількість елементів антенної решітки для випадку, коли формування променів не здійснюється.

Недоліком ДУС, основаних на ДПФ (як і ортогонального частотного дискретного мультиплексування (OFDM– Orthogonal Frequency Division Multiplexing)) є високий рівень бічних пелюсток променів, а саме 13,5 дБ. Для його зменшення використовуються різноманітні віконні функції [1,3,6].

У ряді робіт вважається, що джерела випромінювання знаходяться в кутовому секторі, що охоплюється ортогональними променями, сформованими на основі ДПФ. Разом з тим, недостатньо дослідженим в задачах СА є випадок, коли сигнал одного джерела, яке є заважаючим по відношенню до внутрішньосекторних джерел, надходить з напрямку, що не відповідає сектору, що охоплюється променями (джерело є поза секторним).

Традиційно з метою підвищення завадостійкості систем радіозв'язку та РЛС в умовах впливу завад використовують адаптивні антенні решітки (променеформування), автокомпенсатори, псевдовипадкову перебудову робочої частоти, принципи когнітивності [1-3]. У роботі аналізується доцільність використання зсуву (а не формування провалу) багатопроменевої ДС, що отримується за допомогою ДПФ.

Мета статті – підвищення ефективності спектрального аналізу методами СА при попередньому формуванні ортогональних променів діаграми спрямованості в умовах впливу джерела випромінювання в секторі, що не охоплюється променями (позасекторного джерела).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанню обробки сигналів в антенних решітках при формуванні ортогональних променів присвячено ряд робіт (їх перелік можна знайти, наприклад, в [1,3]). В таких роботах розглянуто порядок узагальнення методів СА з надрозділенням (Root-MUSIC, ESPRIT та інших) при такій обробці. В роботі [6] проаналізовано вплив віконних функцій на ефективність методу Root-MUSIC при попередньому формуванні ортогональних променів. В роботі [7] запропоновано підхід по формуванню матриці, що здійснює перетворення до простору променів з формуванням провалу у напрямку на позасекторне джерело (джерела). Проте його реалізація вимагає значного числа обчислень, що зумовлено вирішенням оптимізаційної задачі

Викликає інтерес розробка підходу, який дозволив би вирішувати завдання оцінювання кутових координат джерел випромінювання в просторі променів за умови наявності позасекторного джерела, враховував особливості використання ДПФ та міг реалізовуватися у масштабі часу, близькому до реального. Тому представляє інтерес вказана в [8] можливість вдосконалення ефективності 2-D ESPRIT з попереднім формуванням ортогональних променів. У [9] в ході СА методом MUSIC та попередньому формуванні ортогональних променів здійснювалося формування провалу в напрямку на джерело, що є заважаючим по відношенню до іншого, при їх надрозділенні [1].

Разом з тим, координата позасекторного джерела в [8] вважається відомою. Крім того, доцільно узагальнити ідею [8] на випадок лінійної еквідистантної антенної решітки та методу СА Root-MUSIC, який характеризується більшою точністю оцінювання ніж ESPRIT.

Основна частина

Розглянемо випадок, коли в якості інструмента надрозділення використовується лінійна еквідистантна антенна решітка (ЛЕАР). У випадку, коли антенна решітка не є лінійною та еквідистантною, при обробці сигналів можуть бути виконані перетворення, які дозволять обробляти отримані дані як такі, що отримані ЛЕАР. Нехай M – число елементів ЛЕАР, V – кількість джерел радіовипромінювання. Також робимо припущення, що джерела знаходяться в дальній зоні АР. Вектор, що характеризує кутові координати джерел випромінювання (ДВ) може бути поданий як

$$\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \cdots, \theta_V]^T,$$

де $(\cdot)^T$ означає операцію транспонування.

Розглянемо випадок, коли із загальної сукупності джерел декілька є корисними, а одне (чи декілька) – джерелом завад. Вважаємо, що формується $M_b < M$ променів.

$M_b \times 1$ вектор даних простору променів (ПП) може бути записаний як [1, 8-10]

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{W}_M^H \mathbf{x}(t), \quad (1)$$

де $\mathbf{W}_M$ – матриця перетворення до ПП розміром $M \times M_b$, $\mathbf{x}(t)$ – $M \times 1$ вектор спостережень, $(\cdot)^H$ означає операцію ермітового транспонування.

Вектор спостережень простору елементів може бути представлений як [1-3]

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}(\boldsymbol{\theta})\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t), \quad (2)$$

в даному виразі $\mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}) = [\mathbf{a}(\theta_1), ..., \mathbf{a}(\theta_V)]$ $-M \times V$ матриця векторів амплітудно-фазового розподілу сигналів ДВ на елементах ЛЕАР, $\mathbf{s}(t)$ – $V \times 1$ вектор сигналів, а $\mathbf{n}(t)$ – $M \times 1$ вектор адитивного шуму.

Стовпці матриці $\mathbf{A}(\boldsymbol{\theta})$ є векторами фазування, що відповідають деякому напрямку θ:

$$\mathbf{a}(\theta) = [1, \exp(j\omega), \ldots, \exp(j(M-1)\omega)]^T. \quad (3)$$

Тут $\omega = 2\pi du / \lambda = 2\pi d \sin(\theta)/\lambda$, d – відстань між антенними елементами, λ – довжина хвилі.

Шум спостереження є стаціонарним випадковим процесом з нульовим середнім і передбачається, що він є просторово та за часом білий [1, 2].

Вимога $\mathbf{W}_M^H \mathbf{W}_M = \mathbf{I}_{M_b}$ дозволяє стверджувати, що адитивний шум в ПП залишиться білим [1, 8-10].

Для систем зв'язку сигнали можуть бути з модуляцією QPSK, BPSK, QAM і т.д. У випадку пеленгації джерел активних шумових завад сигнали джерел відрізняються від шумів потужністю [1, 2].

Для формування ортогональних променів потрібно визначити кутовий сектор, в якому знаходяться джерела або володіти певною апріорною інформацією.

Інформація про сектори локалізації ДВ може бути отримана, наприклад, методом Бартлетта

$$P_{BF}(\theta) = \mathbf{a}^H(\theta)\hat{\mathbf{R}}\mathbf{a}(\theta),$$

де $\hat{\mathbf{R}}$ – вибіркова кореляційна матриця, що формується на основі $\mathbf{x}(t)$.

Матриця $\mathbf{W}_M$ при формуванні променів в напрямках $f\frac{2\pi}{M}, \cdots, (f+M_b-1)\frac{2\pi}{M}$ визначається як

$$\mathbf{W}_M = [\mathbf{a}(f\tfrac{2\pi}{M}) \vdots \cdots \vdots \mathbf{a}((f+M_b-1)\tfrac{2\pi}{M})], \quad (4)$$

де f – ціле число [7, 8].

Кореляційна матриця, що формується по даних після перетворення до ПП, може бути представлена у вигляді

$$\mathbf{R}_y = E[\mathbf{y}(t)\mathbf{y}^{\mathrm{H}}(t)] = \mathbf{W}^H \mathbf{A}\mathbf{S}\mathbf{A}^H \mathbf{W} + \sigma^2 \mathbf{I}_{M_b}, \quad (5)$$

де $E[\cdot]$ – оператор математичного сподівання;

$\mathbf{I}_{M_b}$ – $M_b \times M_b$ одинична матриця;

$\mathbf{S} = E[\mathbf{s}(t)\mathbf{s}^H(t)]$ – $V \times V$ КМ сигналів;

σ^2 – дисперсія шуму.

Вибіркова КМ ПП може бути представлена у вигляді [3]

$$\hat{\mathbf{R}}_y = (1/N)\sum_{t=1}^{N} \mathbf{y}(t)\mathbf{y}^{\mathrm{H}}(t) = \mathbf{W}^H \hat{\mathbf{R}}\mathbf{W}, \quad (6)$$

де N – число вибірок,.

У випадку ЛЕАР $\mathbf{R}_y$ є персиметричною і може перетворюватися в дійсну матрицею $\mathbf{W}$, що задовольняє вимозі $\tilde{\mathbf{I}}\mathbf{W} = \mathbf{W}^*$, де $\tilde{\mathbf{I}}$ – матриця обміну, а (*) означає комплексне спряження.

Вибіркова КМ $\hat{\mathbf{R}}_y$ ермітова, але не персиметрична. Дійсна КМ отримується як

$$\hat{\mathbf{R}}_{yr} = \mathbf{W}^H \hat{\mathbf{R}}_{fb} \mathbf{W}, \quad (7)$$

де $\hat{\mathbf{R}}_{fb} = 0.5(\hat{\mathbf{R}} + \tilde{\mathbf{I}}\hat{\mathbf{R}}^*\tilde{\mathbf{I}})$ – максимально правдоподібна оцінка персиметричної КМ [3, 8-10].

У загальному вигляді поліном методу Root-MUSIC ПП може бути поданий як [1,7,8]

$$P_{brm}(z) = \mathbf{a}^T(z^{-1})\mathbf{W}\ \mathbf{\Pi}^{\perp}\mathbf{W}^H\mathbf{a}(z), \quad (8)$$

де $\mathbf{a}(z) = [1, z, \ldots, z^{M-1}]^T$, $\mathbf{\Pi}^{\perp} = \hat{\mathbf{E}}_{b,n}\hat{\mathbf{E}}_{b,n}^T$ – оператор проектування на підпростір шуму.

Оператор формується на основі $M_b \times (M_b - \hat{V})$ матриці власних векторів підпростору шуму $\hat{\mathbf{E}}_{b,n}$ КМ $\hat{\mathbf{R}}_{yr}$, $\hat{V}$ – число джерел випромінювання [1]. Порядок поліному (8) рівний $2M-2$.

Поліном Root-MUSIC ПП порядку $2M_b - 2$ може бути представлений у вигляді [7,8]

$$P_{brm}(z) = \mathbf{a}^T(z^{-1})\mathbf{Q}^*\hat{\mathbf{E}}_{b,n}\hat{\mathbf{E}}_{b,n}^T\mathbf{Q}^T\mathbf{a}(z), \quad (9)$$

де матриця $\mathbf{Q}$ визначена в [3].

На рис. 1 для ЛЕАР з $M = 32$ антенних елементів (АЕ) наведені $M_b = 8$ променів (парціальних діаграм), отримані за допомогою $\mathbf{W}_M$, яка відповідає використанню прямокутного вікна (отримується без використання віконної функції). Кути орієнтування променів $-6/M, \ldots, 8/M$.

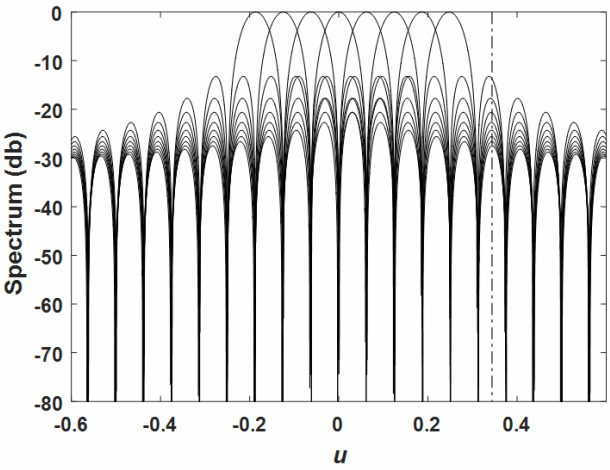


Рис. 1. Ортогональні промені, отримані при використанні ДПФ, $M_b = 8$, $M = 32$

Вважаємо, що кутова координата позасекторного джерела $11/M$ відповідає максимуму найближчої до останнього променя бічної пелюстки (на рис. 1 даній координаті відповідає пунктирна лінія).

У випадку, коли кутова координата позасекторного джерела (завади) рівна $\theta_з$

$$(\omega_з = 2\pi du_з / \lambda = 2\pi d \sin(\theta_з)/\lambda),$$

зсув променів на такий кут може здійснюватися шляхом множення на матрицю

$$\mathbf{T} = \\ = diag\{1, \exp(-j\omega_з), \ldots, \exp(-j(M-1)\omega_з)\} \quad (10).$$

матриці $\mathbf{W}_M$. У цьому випадку матрицю, що формує зсунуті на $\omega_з$ промені запишемо у вигляді

$$\mathbf{W}_{зс} = \mathbf{T}\mathbf{W}_M . \quad (11)$$

На рис. 2 для тих же умов, як і для рис. 1, і $u_з = 1/M$ наведені промені для $\mathbf{W}_{зс}$.

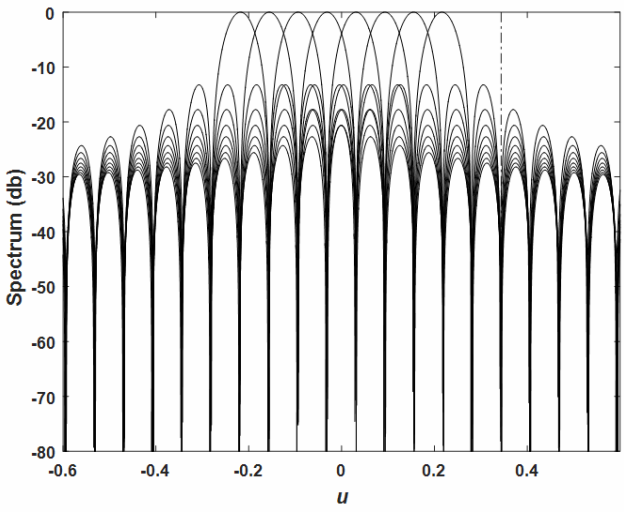


Рис. 2. Промені, отримані з використанням $W_{зс}$

Видно, що в даному випадку кутове положення позасекторного джерела відповідає нулю діаграми спрямованості.

Поліном методу Root-MUSIC ПП при використанні $\mathbf{W}_{зс}$ має вигляд

$$P_{brm}(z) = \mathbf{a}^T(z^{-1})\mathbf{W}_{зс}\hat{\mathbf{E}}_{b,n}\hat{\mathbf{E}}_{b,n}^T\mathbf{W}_{зс}^H\mathbf{a}(z) . \quad (12)$$

З метою відбору сигнальних коренів (12) доцільно використати метод Бартлетта. Кутові координати будуть визначатися як

$$\hat{\theta}_v = \arcsin\left((\lambda/(2\pi d))(\arg(\hat{z}_v) + \omega_c)\right), \quad v = 1,\ldots,\hat{V}. \quad (13)$$

Тобто в оцінках враховується (компенсується) зсув, зроблений попередньо.

Вважаємо, що вплив потужного позасекторного джерела почав здійснюватися в ході оцінювання кутових координат ДВ, сектор кутового положення джерел відомий і матриця $\mathbf{W}_M$ сформована.

Запропонований підхід може бути поданий наступною послідовністю кроків.

Крок 1. Отримати оцінку КМ сигналів на виході АР $\hat{\mathbf{R}}$.

Крок 2. За допомогою ДПФ (методу Бартлетта) визначити кутову координату позасекторного джерела та сформувати матрицю $\mathbf{W} = \mathbf{W}_{зс}$.

Крок 3. Обчислити матрицю

$$\hat{\mathbf{R}}_{yr} = \mathbf{W}^H\hat{\mathbf{R}}_{fb}\mathbf{W} .$$

Крок 4. Обчислити спектральне розкладення матриці $\hat{\mathbf{R}}_{yr}$.

Крок 5. Обчислити процедуру оцінювання числа джерел випромінювання з метою отримання $\hat{V}$.

Крок 6. Знайти корені поліному (12), відібрати з них сигнальні та оцінити кутові координати джерел за виразом (13).

Експериментальне дослідження отриманого методу оцінювання кутових координат ДВ з використанням попереднього формування ортогональних променів та їх зсуву з урахуванням положення завади проведене методом математичного моделювання.

У ході моделювання передбачалася наявність двох рівнопотужних ДВ з кутовими координатами $\theta_1 = 10^\circ$, $\theta_2 = 14^\circ$.

Використовувалися $M_b = 7$ променів з кутами орієнтування $-6/M,\ldots,6/M$, що рівномірно рознесені на $\Delta u = 2/M$ ($\Delta u = \sin(\theta)$).

Вибір кутів орієнтування променів обирався таким чином, щоб кутові координати джерел потрапляли в кутовий сектор, який охоплюється променями.

Кутова координата третього потужного джерела (потужність 20 дБ) відповідала максимуму бічної пелюстки променя з кутом орієнтування $6/M$ та рівна $9/M$. Використовувалася ЛЕАР з $M = 11$ АЕ, число знімків $N = 50$, число повторень моделювання дорівнювало 1000.

Розглядався випадок оцінювання координат джерел шумового випромінювання [1]. СКП оцінювання корисних джерел усереднювалась по джерелам [7]. У ході моделювання в якості початкового методу Root-MUSIC ПП розглядався варіант, що визначається по аналогії з виразом (9).

На рис. 3 показані залежності СКП оцінювання (RMSE – root mean square error) кутових координат корисних ДВ від відношення сигнал/шум (SNR – signal-to-noise ratio) оригінальним методом Root-MUSIC при попередньому формуванні променів з використанням ДПФ, запропонованим методом з зсувом променів та при використанні вікна Хеммінга з ортогоналізацією променів [6].

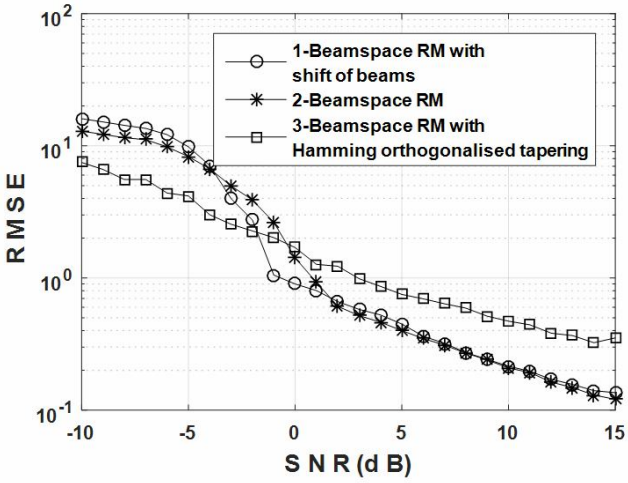


Рис. 3. СКП оцінювання кутових координат ДВ, $N = 50$

Під ВСШ розумілася величина $10\log(\sigma_s^2/\sigma^2)$, де σ_s^2 – потужність ДВ.

З аналізу рис. 3 видно, що запропонований підхід характеризується кращою ефективністю у порівнянні з випадком використання вікна Хеммінга з наступною ортогоналізацію променів в області середніх та високих ВСШ. Його порогове ВСШ є меншим у порівнянні з класичним методом Root-MUSIC при попередньому формуванні променів (Beamspace Root-MUSIC).

Результати моделювання підтверджують вказане у [6] зауваження, що переваги використання вагових (віконних) функцій проявляються у випадку наявності позасекторного джерела випромінювання.

Кращу точність оцінювання у випадку використання віконних функцій при низькому ВСШ можна пояснити тим, що при таких ВСШ променеформувач Бартлетта має пік просторового спектра, що відповідає заваді.

Пік, що відповідає корисним джерелам, з'являється при середніх ВСШ.

Результати моделювання вказують на те, що ефективність запропонованого методу погіршується при недооцінюванні числа джерел (для даного випадку, коли $\hat{V} = 2$). При цьому ефективність оригінального методу погіршується ще більше. Разом з тим, переоцінювання (коли $\hat{V} = 4$) несуттєво вливає на його ефективність.

В наступному випадку число вибірок зменшено до $N = 20$. Результати наведено на рис. 4.

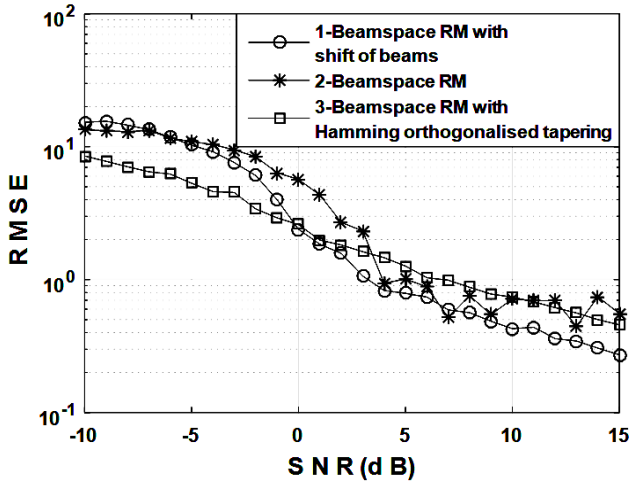


Рис. 4. СКП оцінювання кутових координат ДВ, $N = 20$

У цьому випадку, що викликає практичний інтерес, ефективність запропонованого підходу вища, ніж звичайного методу Root-MUSIC ПП. Ефективність останнього погіршується при середніх та високих відношення сигнал-шум.

Запропонований підхід доцільний до використання у системах зв'язку з OFDM та її модифікаціями [11]. Особливістю цього випадку є потреба оцінювання частоти джерела, яке є завадою. При цьому здійснюється зміна частот піднесучих (відбувається зсув за частотою) з метою отримання ефекту, показаного на рис. 2. Це дозволить підвищити завадостійкість таких систем.

Такий підхід може бути використаний разом з іншими методами підвищення завадостійкості. Можливим підходом є вибір частот піднесучих (частот хопсета при ППРЧ) на основі принципу когнітивності, вибір кутів орієнтування променів для систем зв'язку міліметрового діапазону хвиль і т.д.

Вказана постановка задачі близька до розподілу частотних каналів в багатоканальних мережах зв'язку [12].

Висновки і напрямки подальших досліджень

З метою підвищення точності оцінювання кутових координат джерел випромінювання в умовах впливу потужного позасекторного джерела (завади) та при попередньому формуванні багатопроменевої діаграми спрямованості на випадок методу Root-MUSIC узагальнена пропозиція [8] щодо зсуву променів діаграми таким чином, щоб положенню завади відповідав нуль діаграми.

Усунуто певні обмеження [8], а саме припущення, що координата позасекторного джерела відома. Проведено порівняння ефективності запропонованого підходу, оригінального методу Root-MUSIC при формуванні ортогональних променів та методу Root-MUSIC при формуванні ортогональних променів та використанні віконних функцій (на прикладі віконної функції Хеммінга з наступною ортогоналізацією променів).

Використання віконних функцій дозволяє підвищити точність оцінювання в умовах впливу позасекторних джерел випромінювання при низьких ВСШ.

Запропонований підхід характеризується кращою ефективністю у порівнянні з оригінальним методом особливо в умовах малого числа вибірок та низького ВСШ.

Застосування розглянутого підходу доцільне в системах зв'язку з використанням ДПФ, а саме OFDM. В цьому випадку можливе підвищення завадостійкості таких систем.

Викликає інтерес узагальнення отриманих результатів на випадок систем зв'язку з OFDM при використанні дискретного перетворення Хартлі, при забезпеченні множинного доступу.

Крім того, доцільно провести аналіз впливу променеформуючої матриці, що забезпечує формування провалу в напрямку на джерело завади, на ефективність методів СА.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ширман Я. Д., Багдасарян С. Т., Маляренко А. С., Леховицкий Д. И., Лещенко С. П., Лосев Ю. И., Николаев А. И., Горшков С. А., Москвитин С. В., Орленко В. М. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. Я. Д. Ширмана. М.: Радиотехника, 2007. 512 с.

2. Фалькович С. Е. Основы статистической теории радиотехнических систем / С. Е. Фалькович, П. Ю. Костенко. – Харьков: Нац. аэрокосмический ун-т "Харьк. авиац. ин-т", 2005. – 390 с.
3. Trees H. L. V. Optimum array processing. Part IV of Detection, Estimation and modulation theory / H. L. V. Trees. –Wiley–interscience, 2002.
4. Volosyuk V. K. Review of modern algorithms for high resolution imaging with passive radar / V. K. Volosyuk, V. F. Kravchenko, B. G. Kutuza, V. V. Pavlikov // 2015 International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT), Kharkiv. – 2015. – P. 1-6.
5. Гурський Т. Г. Напрямки вдосконалення множинного доступу в мобільних радіомережах з направленими антенами / Т. Г. Гурський, О. Я. Сова, С. М. Боголій, К. М. Гриценок //З бірник наукових праць ВІТІ. – Київ, 2019. – № 2. – С. 29-37.
6. Василишин В. І. Аналіз впливу віконних функцій на точність оцінювання кутових координат джерел випромінювання при попередньому формуванні ортогональних променів / В. І. Василишин, В. В. Лютов, А. І. Шкода, А. П. Глушко // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2018. – № 1(30). – С. 80-83.
7. Hassanien A. A Robust adaptive dimension reduction technique with application to array processing / A. Hassanien, S. A. Vorobyov // IEEE Signal processing letters. –2009. – Vol. 16, no. 1. – P. 22-25.
8. Mathews C. P. Implementation and performance analysis of 2D DFT beamspace ESPRIT / C. P. Mathews, M. Haardt, M. D. Zoltowski // Proc. of the 48th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, Pacific Grove, CA, Nov. –1995. – P. 726-730.
9. Vasylyshyn V. I. Antenna array signal processing with high-resolution by modified beamspace MUSIC algorithm / V. I. Vasylyshyn // Proc. of 2007 6th International Conference on Antenna Theory and Techniques, Sevastopol. – 2007. – P. 455-457.
10. Vasylyshyn V. I. High-resolution phased array signal processing via DFT Beamspace TLS-ESPRIT with structure weighting / V. I. Vasylyshyn // IEEE Phased Array Systems and Technology Symposium: int. symp., USA. – 2003. – P. 605-610.
11. Зинченко А. А. Использование N-OFDM сигналов двойной поляризации для формирования комплексной формы их представления. Коррекция поляризационной неидентичности / А. А. Зинченко // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил. – 2009. – Вип. 3. – С. 41-45.
12. Лемешко А. В. Классификация методов распределения частотных каналов в многоинтерфейсных многоканальных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11 / А. В. Лемешко, С. В. Гаркуша // Проблемы телекоммуникаций.– 2011.– № 2 (4). – С. 139-149.

References

1. Shirman, Ya.D., Bagdasaryan, S.T., Malyarenko, A.S., Lehovitskiy, D.I., Leshenko, S.P., Losev, Yu.I., Nilolaev, A.I., Gorshkov, S.A., Moskvitin, S.V. and Orlenko, V.M. (2007), *Radioelectronic systems: fundamentals of construction and theory*, Reference book, Second ed., Shirman Ya. D. Ed., Radiotechnika, Moscow, 512 p.
2. Falkovich, S.E. and Kostenko, P.Yu. (2005), *Fundamentals of statistical theory of radio technical systems*, Kharkiv: National aerospace university "KhAI", 2005. 390 p.
3. Trees, H.L.V. (2002), Optimum array processing. *Part IV of Detection, Estimation and modulation theory*, Wiley–interscience, 2002.
4. Volosyuk, V.K., Kravchenko, V.F., Kutuza, B.G. and Pavlikov, V.V. (2015), "Review of modern algorithms for high resolution imaging with passive radar", V. K. Volosyuk, *Proc. of the 2015 International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT)*, Kharkiv, pp. 1-6.
5. Gurskiy, T.G., Sova, O.Ya., Bogoliy, S.M. and Gritsenok, K.M. (2019), "Directions of improvement of multiple access in mobile radio networks with directional antennas", *Scientific works of military institute of telecommunication and informatization*, No. 2, pp. 29-37.
6. Vasylyshyn, V., Lyutov, Shkoda, A. and Glushko, A. (2018), "Analysis of influence of window functions on the accuracy of angular coordinate estimation of emitting sources when preliminary forming orthogonal beams", *Science and technology of Air Force of Ukraine*, No. 1(30), pp. 80-83.
7. Hassanien, A.A and Vorobyov, S.A. (2009), "Robust adaptive dimension reduction technique with application to array processing", *IEEE Signal processing letters*, vol. 16, no. 1, pp. 22-25.
8. Mathews, C.P., Haardt, M. and Zoltowski, M.D. (1995), "Implementation and performance analysis of 2D DFT beamspace ESPRIT", *Proc. of the 48th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*, Pacific Grove, CA, Nov, pp. 726-730.
9. Vasylyshyn, V.I. (2007), "Antenna array signal processing with high-resolution by modified beamspace MUSIC algorithm", *Proc. of 2007 6th International Conference on Antenna Theory and Techniques*, Sevastopol, pp. 455-457.
10. Vasylyshyn, V.I. (2003), "High-resolution phased array signal processing via DFT Beamspace TLS-ESPRIT with structure weighting", *IEEE Phased Array Systems and Technology Symposium*, int. symp., USA, pp. 605-610.
11. Zinchenko, A.O. (2009), "The use of N-OFDM signals of double polarization for forming a complex form of their presentation. Polarization Non-Identity Correction", *Scientific works of Kharkiv air force university*, Kharkiv Air Force University, Kharkiv, is. 3, pp. 41-45.
12. Lemeshko, O.V. and Harkusha, S. (2011), "Classification of frequency channel allocation methods in multi-interface multichannel mesh networks of IEEE 802.11 standard", *Problems of telecommunications*, No. 2 (4), pp. 139-149.

Received (Надійшла) 28.02.2020
Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.04.2020

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Василишин Володимир Іванович – доктор технічних наук, начальник кафедри радіоелектронних систем пунктів управління Повітряних Сил, Національний університет Повітряних Сил, Харків, Україна;
Volodymyr Vasylyshyn – Doctor of Technical Science Associate Professor, Head of department of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: vladvas@ukr.net; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-5461-0125

Заремський Микола Йосипович – провідний науковий співробітник відділу управління в/ч А1906**,** Україна
Mykola Zaremskyi - leader research assistant of control department of military unit A1906, Ukraine
e-mail: kievpost1982@i.ua; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0003-1356-3972

Коцюба Василь Петрович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри радіоелектронних систем пунктів управління Повітряних Сил, Національний університет Повітряних Сил, Харків, Україна;
Vasyl Kotsiuba – Ph.D, Associate Professor, Associate Professor of department of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine
e-mail: vasyl.kotsyuba@ukr.net; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-6336-8193

Чеховський Олег Вадимович – курсант, Національний університет Повітряних Сил, Харків, Україна;
Oleg Chehovsky –cadet of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine
e-mail: olegis250593@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-0687-5575

Оценивание угловых координат источников излучения методом Root- MUSIC при предварительном формировании ортогональных лучей в условиях влияния внесекторного источника

В. И. Василишин, Н. И. Заремский, В. П. Коцюба, О. В. Чеховский

Аннотация. Предметом изучения в статье есть методы спектрального анализа при преобразовании к пространству лучей (предварительном формировании ортогональных лучей диаграммы направленности). **Цель данной статьи** – повышение эффективности спектрального анализа (уменьшение среднеквадратичной ошибки (СКО) оценивания угловых координат источников излучения) в пространстве лучей в условиях влияния внесекторного источника (помехи). Используемыми **методами** есть: методы спектрального анализа, методы цифрового статистического моделирования. **Результаты.** Для повышения точности оценивания угловых координат источников излучения методом root- MUSIC при предварительном формировании ортогональных лучей и влиянии помехи (внесекторного источника) предлагается выполнять сдвиг формируемых лучей таким образом, чтобы угловой координате источника помехи соответствовал нуль диаграммы направленности. Для рассматриваемого случая получено выражение для полинома метода Root– MUSIC. Оценка угловой координаты источника помехи осуществляется с помощью метода Бартлетта или с использованием дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Показано, что в условиях малого числа выборок и низкого ОСШ точность предложенного подхода выше, чем у оригинального метода Root–MUSIC с предварительным формированием ортогональных лучей. **Выводы.** Высокий уровень боковых лепестков, характерный для сформированных ортогональных лучей при использовании ДПФ, приводит к влиянию источника излучения, угловая координата которого отвечает сектору, который не охватывается лучами, на характеристики методов спектрального анализа. Имеет место эффект перетекания, характерный для ДПФ. Влияние источника, который является помехой по отношению к источникам полезного сигнала, можно уменьшить сдвигом лучей, формируемых с использованием ДПФ, таким образом, чтобы нуль диаграммы направленности отвечал направлению на источник помехи. Рассмотренный подход целесообразно использовать и в системах радиосвязи с OFDM и MIMO-OFDM, основанных на ДПФ, системах связи миллиметрового диапазона волн с MIMO и MIMO-OFDM с целью повышения их помехоустойчивости.

Ключевые слова: ортогональные лучи; пространство лучей; спектральное разложение корреляционной матрицы; методы спектрального анализа; помехоустойчивость.

Estimation of the radiation source angular coordinates by Root-MUSIC method with the preliminary forming of orthogonal beams under the influence of out-of-band source

V. Vasylyshyn, M. Zaremskyi, V. Kotsiuba, O. Chehovsky

Abstract. The **subject of stud**y in the article is the methods of spectral analysis in the beamspace (in the case with preliminary forming of pattern orthogonal beams). The purpose of this article is to increase the efficiency of spectral analysis (reduction of root mean square error (RMSE) of estimation of radiation source angular coordinates in the beamspace under conditions of influence of out-of-band (interfering) source. The used **methods** are: spectral analysis methods, digital statistical modeling methods. The following **results** were obtained. In order to improve the estimation accuracy of the radiation source angular coordinates by Root-MUSIC method with the preliminary forming of orthogonal beams and the influence of interference, it is proposed to shift the formed beams so that the angular coordinate of the interfering source corresponds to the null of array pattern. For the case under consideration, the expression is obtained for the polynomial of the Root–MUSIC method. The angular coordinate of the interfering source can be estimated using the Bartlett method or discrete Fourier transform (DFT). It is shown that in conditions of a small sample number and low SNR, the accuracy of the proposed approach is higher than accuracy of original beamspace Root-MUSIC. **Conclusions.** The high level of the side lobes of the formed orthogonal beams when using the DFT leads to the influence of the radiation source, whose angular coordinate corresponds to a sector that is not covered by the beams, on the characteristics of the spectral analysis methods. The leakage effect of DFT has a place. The influence of the source, which is an interference with respect to the useful signal sources, can be reduced by the shift of the beams formed using the DFT, so that the null of beampattern corresponds to the interfering source direction. The considered approach is also advisable to use in radio communication systems with OFDM and MIMO-OFDM, based on DFT, millimeter-wave communication systems with MIMO and MIMO-OFDM in order to increase their noise immunity.

Keywords: orthogonal beams; beamspace; spectral decomposition of correlation matrix; spectral analysis methods; interference immunity.

UDC 355+623.4+519.8 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.2.17**

S. Kopashynskii[1], O. Serpukhov[2], H. Makogon[2], H. Karakurkchi[2], O. Klimov[2], Yu. Babkin[2]

[1] The National Defense University of Ukraine named after Ivan Cherniakhovskyi, Kyiv, Ukraine
[2] Military Institute of Tank Troops of National Technical University "KhPI", Kharkiv, Ukraine

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF OPERATIONAL-TACTICAL AND MILITARY-GEOGRAPHICAL FACTORS OF THE COMBAT AREA ON THE FUNCTIONING OF ELEMENTS OF THE ARMORED WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT RECOVERY SYSTEM

Abstract. **The subject matter** of the article is the influence of operational-tactical and military-geographical factors of the combat area on the functioning of elements of the system for restoring armored weapons and military equipment during combat operations in modern conditions. The **goal** of the study is investigation of the correlation effects between operational-tactical and military-geographical factors of the combat area on the functioning of the armored weapons and military equipment recovery system. **The tasks** to be solved are: to analyze the influences of the factors of the combat area on the functioning of the system of restoration of armored weapons and military equipment during the performance of the Armed Forces missions by purpose; form formal sets of conditions and factors and elements and functional links of the system of armored weapons recovery and military equipment subject to their influence; calculate the factor loadings of each factor and construct correlation Pleiades of influence. General scientific and special **methods** of scientific knowledge are used. The method of hierarchy analysis, mathematical apparatus of probability theory and multidimensional statistical analysis were used. The following **results** are obtained. Operational-tactical and military-geographical factors of the area of operations and elements the functional relationships between the recovery system of armored weapons and military equipment are formally represented as sets of random variables, and the significance of each factor is expressed by the numerical value of the factor load. Based on the results of correlation and factor analysis, correlation Pleiades are constructed, which provide tools for algorithmic accounting of the essence and qualitative characteristics of the influence of factors in managing the renewal of armored weapons and military equipment. **Conclusions.** Operational-tactical and military-geographical factors for any region have an impact on the functioning of the system for restoring armored weapons and military equipment, different both in terms of semantic loads and the results of actions on individual elements of the system. Based on the results of factor analysis, the significance of the influence of each factor can be expressed as a numerical value of the factor load. The influence of both military-geographical and operational-tactical factors of the combat area and the quality of functioning of elements of the recovery system of armored weapons and military equipment correlate with each other. Correlation Pleiades of influence of military-geographical and operational-tactical factors of the combat area provide tools for managing the renewal of armored weapons and military equipment.

Keywords: restoration of armored weapons and military equipment; operational-tactical and military-geographical factors of the area of hostilities; factor analysis; correlation Pleiades**.**

Introduction

Formulation of the problem and research tasks. Changing the nature of modern military conflicts, improving existing ones and the emergence of new forms of use of troops (forces) require the introduction of new standards in the Armed Forces (AF) of Ukraine aimed not only at the purposeful acquisition by military authorities and military units of certain combat forces and means to perform a specific list of tasks, but also to organize the restoration of armored weapons and military equipment (AWME) whose structure and inter-elemental relationships are justified by the conditions and factors that affect it.

At the present level of society development both operational-tactical and military-geographical factors have impacts on the functioning of the system of reconstruction of the AWME, different both in content load and in time and the consequences of action on individual elements of the system. In this regard, the effectiveness of the functioning of the AWME system depends not only on the correct assessment of the qualitative and quantitative characteristics of the impact on one or another factor, but also on the consideration of the relationships between them.

The above induces the authors to consider it relevant to study the correlation effects on the functioning of the system of renewal of arms and military equipment of the operational grouping of troops (forces) by operational-tactical and military-geographical conditions and factors in local wars and armed conflicts of the present.

Analysis of recent research and publications on the above issues shows that the features of the AF of Ukrainian performance for their intended tasks purpose outline the main problems and directions of development of the justification theory of decisions on the AWME recovery system management.

Experts also describe the consequences of the influence of a particular factor on the operation of weapons and military equipment during the preparation and use of troops (forces).

Using of such research results can greatly improve the technical support troops (forces) quality as a whole and the functioning of the AWME recovery system particularly. Nevertheless, factor analysis can provide a toolkit for algorithmic consideration of the nature and qualitative characteristics of the influence of factors in managing the restoration of AWME [1–3].

The goal of the study is investigation of the correlation effects between operational-tactical and military-geographical factors of the combat area on the functioning of the armored weapons and military equipment recovery system. To achieve this goal the

© Kopashynskii S., Serpukhov O., Makogon H., Karakurkchi H., Klimov O., Babkin Yu., 2020

following **research tasks** are solved: : to analyze the influences of the factors of the combat area on the functioning of the system of restoration of armored weapons and military equipment during the performance of the Armed Forces missions by purpose; form formal sets of conditions and factors and elements and functional links of the system of armored weapons recovery and military equipment subject to their influence; calculate the factor loadings of each factor and construct correlation Pleiades of influence.

Main material

1. The number, composition and training of personnel, the AWME number and quality, the availability of reserves of military-technical equipment and the possibility of their recovery, location and nature of the enemy's actions are considered **as operational and tactical factors** affecting the functioning of the AWME recovery system. and opportunities to interact with other power structures.

Thus, the critically low staffing of repair and rehabilitation bodies to a large extent contributes to the reduction of production capacity for the repair of AWME ultimately leads to low performance.

Shortcomings in the training of personnel, poor knowledge of driver mechanics on the device and operation of units, operation of machines had a negative impact on the AWME quality involved in performing tasks for the intended purpose.

The effectiveness of the operation of the AWME recovery system certainly depends on the correct assessment of the qualitative and quantitative status of weapons and equipment that will be subject to maintenance and repair, that is, forecasting task volumes for evacuation units and repair and restoration agencies.

According to statistics, the main AWME malfunctions during decommissioning tasks are predominantly random and hardly predictable, which causes the receipt of failures in the AWME recovery system in the form of a flow of orders with variable intensity. In general, the condition and completeness of the AWME in a certain way influences the choice of a rational method of restoration of details, since it requires consideration of technological and economic features of the Ministry of Defense of Ukraine specific repair enterprises [2, 3].

The existing military-technical equipment resupply system is morally outdated and has shortcomings that impede the timely implementation of AWME restoration measures.

Lack of training, intelligence equipment, problems with clevises and targeting led to the fact that the consumption of ammunition had at times exceeded the standards prescribed for the respective purposes in the post- Soviet courses of fire.

Obviously, during combat operations, weapons and military equipment will fail due to the fire influence on the troops by the enemy. Given the location and the nature of the enemy's actions in modern conditions, the organization of recovery should be aimed at restoring the maximum number of AWME at the site of failure (at checkpoints, fighting positions, areas of failure), and during the march and regrouping, usually after the evacuation of it to the national team point of damaged machines.

During the advance of troops, it is advisable for repair and evacuation groups to act as closing marching columns in order to restore the mobility of AWME samples or evacuating them to an area where it is possible to organize repairs. These circumstances indicate the need for rapid response to changes in the technical situation, which is possible if a reliable management system and the manifestation of all-round creative activity of commanders to organize the AWME restoration.

Equally significant for the functioning of the AWME recovery system are the **military-geographical factors** of the area of hostilities and the level of operational equipment of the territory. These circumstances complicate the process of organizing technical reconnaissance and evacuation of damaged equipment during combat operations.

The next factor that has an impact on the functioning of the AWME recovery system when performing tasks for their intended purpose is naturally considered to be **climatic conditions**. These circumstances should be taken into account when organizing the AWME operation (GB, cooling and lubrication systems, etc.), evacuation of damaged equipment samples (identification of escape routes, equipping repair and evacuation groups and repairs in the field (placement of repair tools on the ground, their deployment, equipment of work stations, setting up the production process).

As we can see, both operational-tactical and military-geographical factors that influence the nature of combat operations and the AWME recovery system have different characteristics in time and space. The temporal multiplicity (frequency of use) of such information in managing the system of recovery of AWME will be less in comparison with the variable information. Variable information can be attributed to the current weather forecast, the state of green space spaces in accordance with the season, the availability of AWME stocks, etc. Similarly, for each factor, the consequences of the aftereffect, the number of elements and functional relationships of the AWME recovery system fall under their influence, the degree and scale of action in space are different.

Thus, at the current level of society development both operational-tactical and military-geographical factors for any region have impacts on the functioning of the system of restoration of military-industrial complex, different characteristics both in content load and the consequences of actions on individual elements of the system.

2. We define the following set $FO = \{fo_j\}, j = \overline{1,m}$, $(m = 5)$ of operational and tactical factors to be investigated:

fo_1 – quantitative and qualitative status of weapons;

fo_2 – number and training of personnel;

fo_3 – availability of the military-technical equipment resupply;

fo_4 – the location and nature of the enemy's actions;

fo_5 – possibilities of interaction with other power structures.

By analogy, the set $FG = \{fg_j\}, j = \overline{1,m}$ $(m = 5)$ of military-geographical factors will contain the following elements:

fg_1 – locality;

fg_2 – climate conditions;

fg_3 – territory operational equipment level;

fg_4 – combat area infrastructure;

fg_5 – the other states' ability to support or participate on the side of the enemy.

We will consider the elements of sets as random variables.

Similarly, we distinguish the following characteristics of a factor influence:

a_1 – multiplicity and duration of action;

a_2 – the number of elements and functional links of the AWME recovery system are affected;

a_3 – degree (intensity) of action;

a_4 – the spatial scale of the action;

a_5 – aftereffects.

In the theory of multidimensional statistical analysis, the coefficients a_k, $k = \overline{1,p}$, $(p = 5)$ are called factor loadings characterize the significance of the influence of each factor [4].

Each of these factors influences the functioning of the AWME recovery system, namely its individual elements. For the study let's select the following:

$V = \{v_j\}, j = \overline{1,m}$, $(m = 5)$.

v_1 – state of technical intelligence implementation;

v_2 – organization of the AWME evacuation;

v_3 – using the technological potential of repair and restoration units;

v_4 – AWME protection, security and defense measures;

v_5 – creation and replenishment of military-technical equipment stocks.

To simplify the mathematical calculations, we assume that the value vo_{ji} will characterize the influence of the j-th operational-tactical factor on the functioning of the i-th element of the AWME recovery system and can be calculated by the expression

$$vo_{ji} = \sum_{k=1}^{p} a_{jk} fo_{ki}, \quad (1)$$

$i = 1, 2, ..., n$; $j = 1, 2, ..., m$; $k = 1,2,..., p$.

here a_{jk} – elements of the operational-tactical factors loadings matrix $A = \{a_{jk}\}$, $j = 1,2,...m$; $k = 1,,2,....p$.

Analytical determination of values for calculations is proposed to be carried out both by the results of the expert survey and by the mathematical apparatus of probability theory, since certain characteristics can be considered as discrete or continuous random variables (multiplicity and the duration of the action, the number of failures in the AWME samples, etc.).

In order to eliminate the influence of dimensionality and ensure comparison of factors, the matrix of initial data was normalized by standardization [5].

Thus, it is natural to require the condition

$$\sum_{k=1}^{p} a_{jk} = 1 \ , k = 1,2,..., p. \quad (2)$$

The result of such calculations is the matrix A.

$$A = \begin{pmatrix} 0,17 & 0,20 & 0,23 & 0,14 & 0,26 \\ 0,22 & 0,24 & 0,19 & 0,16 & 0,19 \\ 0,21 & 0,16 & 0,18 & 0,19 & 0,27 \\ 0,25 & 0,22 & 0,14 & 0,11 & 0,28 \\ 0,25 & 0,20 & 0,20 & 0,18 & 0,17 \end{pmatrix} \quad (3)$$

For similar reasons, the matrix B of factor loadings of military-geographical factors on the functioning of the AWME recovery system was calculated

$$B = \begin{pmatrix} 0,1 & 0,14 & 0,22 & 0,24 & 0,21 \\ 0,27 & 0,16 & 0,25 & 0,15 & 0,17 \\ 0,19 & 0,23 & 0,19 & 0,20 & 0,19 \\ 0,16 & 0,22 & 0,19 & 0,17 & 0,26 \\ 0,15 & 0,26 & 0,21 & 0,18 & 0,20 \end{pmatrix} \quad (4)$$

In this case, an influence indicator of the j-th military-geographical factor on the functioning of the i-th element of the AWME recovery system will be a value vg_{ji} that can be calculated by the expression

$$vg_{ji} = \sum_{k=1}^{p} b_{jk} fg_{ki} \quad (5)$$

$i = 1, 2, ..., n$; $j = 1, 2, ..., m$; $k = 1,2,..., p$.

here $B = \{b_{jk}\}$, $j = 1,2,...m$; $k = 1,,2,....p$ – military-geographical factor loadings matrix.

Thus, the matrix $VO = \{vo_{ji}\}$, $i = 1,2,...,n$, $j = 1,2,...m$ will characterize the influence of the j-th operational-tactical factor on the functioning of the i-th element of the AWME recovery system.

The matrix $VG = \{vg_{ji}\}, i = 1,2,...,n$, $j = 1,2,...m$ will characterize the influence j- го military-geographical factor on the functioning of the i-th element of the AWME recovery system.

Values $FO = \{fo_j\}$ and $FG = \{fg_j\}, j = \overline{1,m}$ were calculated on the basis of the results of statistical processing and expert surveys on the theory of probabilities and modifications of the method of hierarchy analysis.

The results obtained were used to calculate the elements of the matrices $VO = \{vo_{ji}\}$ and $VG = \{vg_{ji}\}$,

$i = 1,2,...,n$, $j = 1,2,...m$ by the way by applying formulas (1) and (2) used for further correlation analysis.

In order to achieve greater clarity of statements about correlated values fo, fg та vo, vg cross-correlation matrices were used. They are: $RO = \{ro_{ji}\}$ and $RG = \{rg_{ji}\}$, $i = 1,2,...,n$, $j = 1,2,...m$ [6-9].

$$RG = \begin{pmatrix} 0,56 & 0,88 & 0,18 & 0,80 & 0,31 \\ 0,45 & 0,63 & 0,29 & 0,3 & 0,2 \\ 0,72 & 0,89 & 0,57 & 0,54 & 0,3 \\ 0,52 & 0,79 & 0,84 & 0,7 & 0,67 \\ -0,57 & -0,61 & -0,50 & -0,91 & -0,73 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$RO = \begin{pmatrix} 0,82 & 0,68 & 0,83 & 0,66 & 0,69 \\ 0,66 & 0,73 & 0,81 & 0,6 & 0,4 \\ 0,55 & 0,65 & 0,81 & 0,41 & 0,91 \\ -0,69 & -0,78 & -0,64 & -0,92 & -0,8 \\ 0,62 & 0,59 & 0,45 & 0,46 & 0,57 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

The results of correlation and factor analysis showed that the influences of both military-geographical and operational-tactical factors of the combat area and the quality of functioning of the elements of the system of recovery of military-industrial complex are correlated with each other. Correlation analysis (Pearson's criterion was used) of indicators of influence of military-geographical and operative-tactical factors of combat area on functioning of elements of system of reconstruction of military-industrial complex and presentation of generalized results in the form of correlation Pleiades makes it possible to draw conclusions about operational-tactical and military-geographical component during preparation and during operation [11].

To summarize the results of the correlation dependence analysis, the method of correlation Pleiades, illustrated in Fig. 1, was applied.

This figure shows the elements shows the elements of the operational-tactical factors set $FO = \{fo_j\}, j = \overline{1,m}$, $(m = 5)$, of the combat area military-geographical factors set $FG = \{fg_j\}, j = \overline{1,m}$, $(m = 5)$ and elements of the AWME recovery system $V = \{v_j\}, j = \overline{1,m}$, $(m = 5)$ (statistically significant relationships are taken into account).

The correlative of the influence of military-geographical and operational-tactical factors of the combat area give the tools of algorithmic consideration of the nature and qualitative characteristics of the influence of factors in the AWME recovery.

According to the authors, taking into account these dependencies in the management of the system will greatly increase the efficiency of its functioning and will provide significant assistance in planning the AWME restoration.

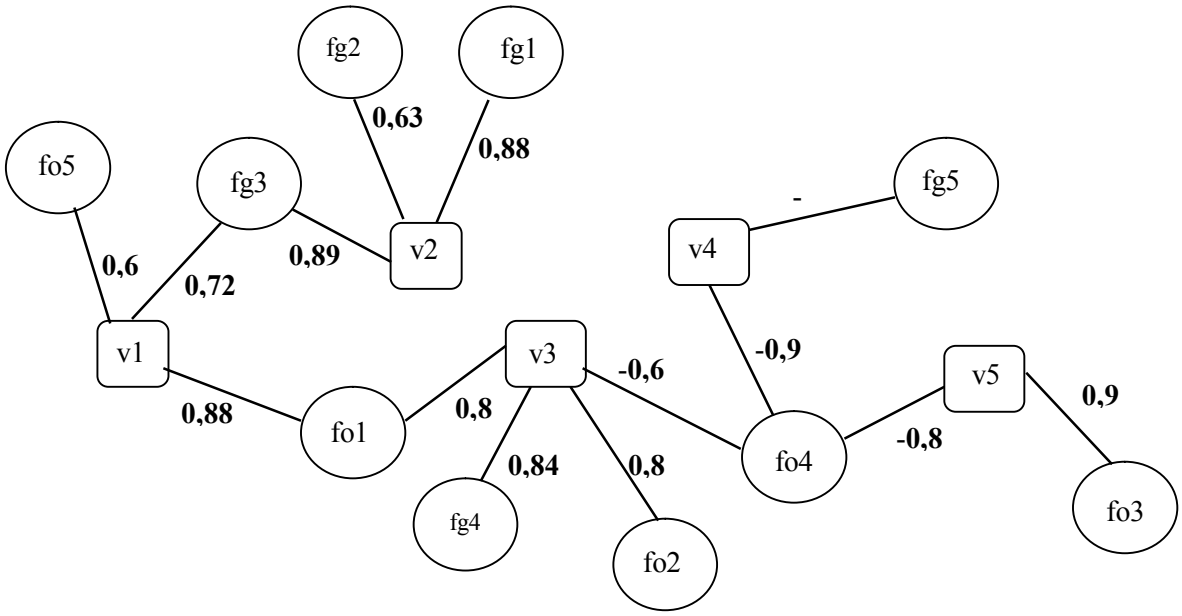


Fig. 1. Correlation Pleiades of the influence of military-geographical and operational-tactical factors of the area of hostilities on the functioning of elements of the AWME recovery system

Prospects for further research in this direction. The successful solution of tasks that are assigned to the recovery system at any level of the hierarchy depends, first of all, on the purposeful management of this system's activities.

The effectiveness of management and, as a result, the effectiveness of the recovery system depends on the ability to analyze the initial data that affects its functioning at the planning stage.

Thus, the results of correlation and factor analysis can be used in the design of decision support systems for the AWME restoration.

Conclusions

1. Operational-tactical and military-geographical factors for any region have an impact on the functioning of the system for restoring armored weapons and military equipment, different both in terms of semantic

loads and the results of actions on individual elements of the system.

2. Based on the results of factor analysis, the significance of the influence of each factor can be expressed as a numerical value of the factor load.

3. The influence of both military-geographical and operational-tactical factors of the combat area and the quality of functioning of elements of the recovery system of armored weapons and military equipment correlate with each other.

4. Correlation Pleiades of influence of military-geographical and operational-tactical factors of the combat area provide tools for managing the renewal of armored weapons and military equipment.

References

1. (2018), *The use of repair parts and units. Part 2. Repair and reconstruction of the military unit*, National Defense University of Ukraine named after Ivan Cherniakhovskyi, Kyiv, Ukraine, 244 p.
2. (2014), *Information and analytical materials 64on the implementation of technical support for military units during the execution of tasks in the anti-terrorist operation,* National Defense University of Ukraine, Kyiv, Ukraine, 180 p.
3. (2014), *Analysis of the technical support of the operations of units (units) during the anti-terrorist operation,* National Defense University of Ukraine, Kyiv, Ukraine, 220 p.
4. Harman, G. (1972), *Modern factor analysis*, Translated by Braverman, Statistika, Moscow, Russia, 336 p.
5. Gmurman, V.E. (2005), *Probability Theory and Mathematical Statistics*, Textbook, manual for universities, Vyssh. shkola, Moscow, 430 p.
6. Saati, T.L. (2008), *Decision making with dependencies and feedbacks*. *Analytical Networks*, LKI, Moscow, 312 p.
7. Makogon, Ye.A. and Seraya, O.V. (2007), "Evaluation of the effectiveness of complex systems using the modified method of pairwise comparisons", *Zbirnyk naukovykh prats Kharkivs'koho universytetu Povitryanykh Syl,* no. 3(15), pp. 112-116.
8. Venttsel, Ye.S. (1969), *Probability Theory*, A Textbook, Nauka, Fizmatgiz, Moscow, SU, 520 p.
9. Monson, H. (1996), *Hayes-statistical Digital Signal Processing and Modeling*, John Wiley & Sons, Inc. New York, USA, 264 p.
10. Yarovyy, A.T and Strakhov, YE. M. (2015), *Multidimensional Statistical Analysis*, A Beginner's Guide to Mathematical and Economic Students, Astroprint, Odesa, UA, 240 p.
11. Venttsel, Ye. S. (1972), *Operations Research*, Sov. Radio, Moscow, SU, 410 p.

Надійшла (reviewed) 30.01.2020
Прийнята до друку (accepted for publication) 15.04.2020

Відомості про авторів / About the Authors

Копашинський Сергій Анатолійович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, начальник кафедри технічного забезпечення інституту оперативного забезпечення та логістики, Національний університет оборони України імені Івана Черняховського, Київ, Україна;
Serhiy Kopashynskii – Candidate of Technical Sciences, Senior Research, Head of Technical Security Institute of Operational Security and Logistics Department, National Defense University of Ukraine named after Ivan Cherniakhovskyi, Kyiv, Ukraine;
e-mail: kopashinskyas@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0117-0664

Серпухов Олександр Васильович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, начальник інституту, Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету "ХПІ", Харків, Україна;
Oleksandr Serpukhov – Candidate of Technical Sciences, Senior Research, Head of Institute, Military Institute of Tank Troops of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: serpuhov1960@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5029-1016

Макогон Олена Анатоліївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри бронетанкового озброєння та військової техніки, Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету "ХПІ", Харків, Україна;
Helen Makogon – Candidate of Technical Sciences**,** Associate Professor of the Armored vehicles and military equipment Department, Military Institute of Tank Troops of National Technical University "KhPI", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: helmkg@ukr.net; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1112-8707

Каракуркчі Ганна Володимирівна – кандидат технічних наук, начальник навчального відділу, Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету "ХПІ", Харків, Україна;
Hanna Karakurkchi – Candidate of Technical Sciences**,** Head of Study Department, Military Institute of Tank Troops of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: anyutikukr@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1287-3859

Клімов Олексій Петрович – заступник начальника кафедри бронетанкового озброєння та військової техніки, Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету "ХПІ", Харків, Україна;
Alexej Klimov – Deputy Head the Armored weapons and military equipment Department, Military Institute of Tank Troops of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: klimovaleksej800@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0727-2976

Бабкін Юрій Валерійович – старший викладач кафедри бронетанкового озброєння та військової техніки, Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету "ХПІ", Харків, Україна;

Yuri Babkin – Senior Lecture of the Armored weapons and military equipment Department, Military Institute of Tank Troops of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: yribabkn@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9156-9523

Дослідження впливу
оперативно-тактичних та воєнно-географічних чинників району бойових дій
на функціонування елементів системи відновлення бронетанкового озброєння та військової техніки

С. А. Копашинський, О. В. Серпухов, О. А. Макогон, Г. В. Каракуркчі, О. П. Клімов, Ю. В. Бабкін

Анотація. Предметом вивчення в статті є впливи оперативно-тактичних та воєнно-географічних чинників району бойових дій на функціонування елементів системи відновлення бронетанкового озброєння та військової техніки під час ведення бойових дій в сучасних умовах. **Метою дослідження** є дослідження кореляційних впливів оперативно-тактичних і воєнно-географічних чинників району бойових дій на функціонування системи відновлення бронетанкового озброєння та військової техніки. **Завдання:** проаналізувати впливи чинників району бойових на функціонування системи відновлення бронетанкового озброєння та військової техніки під час виконання ЗСУ завдань за призначенням; сформувати формальні множини умов і чинників та елементів і функціональних зв'язків системи відновлення бронетанкового озброєння та військової техніки, що підпадають під їх вплив; обчислити факторні навантаження кожного чинника та побудувати кореляційні плеяди впливовості. Методологічною основою дослідження стали загальнонаукові та спеціальні **методи** наукового пізнання. Були використані **метод аналізу ієрархій,** математичний апарат **теорії імовірності** та **багатовимірного статистичного аналізу**. Отримані такі **результати**. Оперативно-тактичні та воєнно-географічні чинники району бойових дій та елементи і функціональні зв'язки системи відновлення бронетанкового озброєння та військової техніки формально представлені у вигляді множин випадкових величин, а суттєвість впливу кожного чинника виражена числовою величиною факторного навантаження. За результатами кореляційного та факторного аналізу побудовані кореляційні плеяди, які дають інструментарій алгоритмічного врахування сутності та якісних характеристик впливу чинників при управлінні відновленням бронетанкового озброєння та військової техніки. **Висновки.** Оперативно-тактичні і воєнно-географічні чинників для будь-якої регіону мають впливи на функціонування системи відновлення бронетанкового озброєння та військової техніки, різні як за змістовним навантаженням так і за наслідками дій на окремі елементи системи. За результатами факторного аналізу суттєвість впливу кожного чинника може бути виражена числовим значенням величини факторного навантаження. Впливовості як воєнно-географічних, так і оперативно-тактичних чинників району бойових та якість функціонування елементів системи відновлення бронетанкового озброєння та військової техніки корелюють між собою. Кореляційні плеяди впливовості воєнно-географічних і оперативно-тактичних чинників району бойових дають інструментарій при управлінні відновленням бронетанкового озброєння та військової техніки.

Ключові слова: відновлення бронетанкового озброєння та військової техніки; оперативно-тактичні та воєнно-географічних чинники району бойових дій; факторний аналіз; кореляційні плеяди.

Исследование влияния
оперативно-тактических и военно-географических факторов района боевых действий
на функционирования элементов системы восстановления бронетанкового вооружения и военной техники

С. А. Копашинский, А. В. Серпухов, Е. А. Макогон, А. В. Каракуркчи, А. П. Климов, Ю. В. Бабкин

Аннотация. Предметом изучения в статье является влияния оперативно-тактических и военно-географических факторов района боевых действий на функционирование элементов системы восстановления бронетанкового вооружения и военной техники во время ведения боевых действий в современных условиях. **Целью исследования** является исследование корреляционных воздействий оперативно-тактических и военно-географических факторов района боевых действий на функционирование системы восстановления бронетанкового вооружения и военной техники**. Задачи:** проанализировать влияние факторов района боевых на функционирование системы восстановления бронетанкового вооружения и военной техники во время выполнения ВСУ задач по назначению; сформировать формальные множества условий и факторов, элементов и функциональных связей системы восстановления бронетанкового вооружения и военной техники, подпадающих под их влияние; вычислить факторные нагрузки каждого фактора и построить корреляционные плеяды влияния. Методологической основой исследования стали общенаучные и специальные **методы** научного познания. Были использованы **метод анализа иерархий**, математический аппарат **теории вероятности** и *многомерного статистического анализа.* Получены следующие **результаты.** Оперативно-тактические и военно-географические факторы района боевых действий, элементы и функциональные связи системы восстановления бронетанкового вооружения и военной техники формально представлены в виде множеств случайных величин, а существенность влияния каждого фактора выражена числовой величиной факторного нагрузки. По результатам корреляционного и факторного анализа построены корреляционные плеяды, которые дают инструментарий алгоритмического учета сущности и качественных характеристик влияния факторов при управлении восстановлением бронетанкового вооружения и военной техники. **Выводы.** Оперативно-тактические и военно-географические факторы для любого региона имеют влияния на функционирование системы восстановления бронетанкового вооружения и военной техники, разные как по факторной содержательной нагрузке, так и по результатам действий на отдельные элементы системы. По результатам факторного анализа сущность влияния каждого фактора может быть выражена числовым значением величины факторного нагрузки. Влияние как военно-географических, так и оперативно-тактических факторов района боевых и качество функционирования элементов системы восстановления бронетанкового вооружения и военной техники коррелируют между собой. Корреляционные плеяды влияния военно-географических и оперативно-тактических факторов района боевых дают инструментарий при управлении восстановлением бронетанкового вооружения и военной техники**.**

Ключевые слова: восстановление бронетанкового вооружения и военной техники; оперативно-тактические и военно-географических факторов района боевых действий; факторный анализ; корреляционные плеяды.

UDC 621.391.26 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.2.18**

O. Kuznietsov[1], V. Karlov[1], O. Kolomiitsev[2], K. Sadovyi[1], O. Biesova[1]

[1] Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine
[2] National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine

THE INFLUENCE OF STATISTICAL CHARACTERISTICS OF THE FLUCTUATIONS OF THE RADIATION SIGNAL INITIAL PHASES ON THE ACCURACY OF THE MEASUREMENT AERODYNAMIC OBJECT RADIAL VELOCITY

Abstract. The article deals with the estimation of radial velocity when using a coherent packet of radio pulses regarding the case of the presence of correlated fluctuations of the initial phases in the reflected from the aerodynamic object pulses. **The subject** of the research is the accuracy of measuring the frequency of the received packet for the case of concerted processing without taking into account the phase fluctuations of its radio pulses. **The purpose** is a numerical analysis of the influence of the statistical characteristics of the fluctuations of the received pack's initial phases on the decrease in the accuracy of measuring the radial velocity of the aerodynamic object. **The task**: to estimate the possible values of fluctuation constituent middling quadratic error of measuring of radial speed of aerodynamic object. Consideration is given to the assumption that an additive mixture of deflected signal and uncorrelated Gaussian noise is input to the radar receiver. It is considered that the phase fluctuations of the received packet are distributed according to the normal law with zero mean, and the correlation of phase fluctuations with the increase of the interval between the packet radio pulses decreases according to the alternating law. **Methods used:** methods of probability theory and mathematical statistics. **The following results are obtained:** the accuracy of frequency measurement of the pack had been estimated in the presence of correlated phase fluctuations of its radio pulses. **Conclusions**. The results indicate that for modern radars in the conditions of regular measurement the accuracy of estimating the frequency of the packet of radio pulses is much more influenced by the statistical characteristics of the phase fluctuation than the signal-to-noise ratio. Due to the phase fluctuations of the radio pulses of the received packet, the mean-square error (MSE) of radial velocity measurement of the aerodynamic object is able to exceed the values determined by the requirements for coherent pulse radar.

Keywords: coherent pulse radar; packet of radio pulses; phase fluctuations; radial velocity aerodynamic object; Gaussian noise; radar surveillance; optimization efficiency.

Introduction

Formulation of the problem. Improvements and development of modern aerodynamic objects of radar surveillance, performance of their tasks at low and limiting low altitudes cause increasing requirements for their detection and tracking facilities. The increase in the maneuverability of aerodynamic objects makes it necessary to evaluate radars of different classes of range derivatives to the aerodynamic object with maximum accuracy. The determination of the radial velocity of the aerodynamic object during the primary time-frequency processing of the radar signal is realized in coherent pulse radars, which use a coherent packet of radio pulses as the probing signal. The degree of coherence of a packet determines the duration of its regular phase structure and, as a result, the radial velocity resolution and the accuracy of measuring the radial velocity of an air object. The real conditions for the propagation and reflection of a radar signal could substantially limit its temporal coherence and the quality of its time-frequency processing.

These conditions include the influence of atmospheric heterogeneities [1-3], Doppler objective noise [4-6] and the reflection of radio waves from the earth's surface with complicated terrain [7- 9].

The degree of coherence of the packet determines the duration of its regular phase structure and, as a result, the measure of the frequency resolution and the accuracy of measuring the frequency of the specified radar signal. In modern coherent-pulse radars that provide radar surveillance of maneuvering aerodynamic objects in a complicated aerodynamic object and interference condition, algorithms for digital coherent accumulation of the received packet radio signal are implemented. Therefore, it is of practical use to estimate the error of measuring the frequency of the received pack depending on the statistical characteristics of the phase fluctuations of its radio pulses.

The estimation of the possible decrease in the accuracy of the radial velocity measurement of the aerodynamic object due to the signal's phase fluctuations will allow to determine the conditions for optimization of its processing.

Analysis of recent research and publications. A considerable amount of work is devoted to radar surveillance of aerodynamic objects and the measurement of their coordinates and motion parameters under complicated conditions.

The distortions of the phase structure of the radar signal have a different nature. Phase fluctuations due to an atmospheric heterogeneities and the peculiarities of the use of radio engineering systems under the conditions of their influence are described in [1, 7, 10-12]. In addition, phase distortions of the received signal, which are due to the complex shape of the aerodynamic object and its ability to perform sudden maneuver, cause the wandering of its radar center and, as a result, the appearance of velocity's noise of the aerodynamic object [1, 4, 5, 13, 14]. If radar surveillance is implemented for aerodynamic objects moving at low angles of location, and due to the multipath propagation of the radar signal, additional phase distortions are appeared [4, 7, 8, 15-26].

© O. Kuznietsov, V. Karlov, O. Kolomiitsev, K. Sadovyi, O. Biesova, 2020

There is [28, 29] the method for calculating the error of the packet's frequency arising due to the influence of phase fluctuations of its radio pulses.

As shown in [30, 31], the possible values of the measurement errors of the time-frequency parameters of the radar signal resulting from its phase distortions are capable of exceeding the allowable radar values of different wavelength ranges. The assumptions about the statistical characteristics of the reflected signals are confirmed by the results of the experimental investigation, which were elucidated in [32].

The purpose of the article is a numerical analysis of the influence of the statistic characteristics of the initial phase fluctuations of the radio pulses for the received coherent pack on the decrease of the accuracy of the radial velocity measurement of the aerodynamic object.

Basic material

The radial velocity of the aerodynamic object is estimated according to the expression [1, 2]:

$$V_r = \frac{\lambda}{4\pi}\Omega, \qquad (1)$$

where $\Omega = 2\pi F_D$ – the cyclic Doppler shift of the frequency; F_D – Doppler frequency; λ – the wavelength of the radar signal.

It is assumed that the received realization is the sum of the reflected of the packet radio pulses from the aerodynamic object and the internal noise:

$$y(t,\Omega) = x(t,\Omega) + n(t), \qquad (2)$$

where $y(t,\Omega)$ – realization of the received oscillation; $x(t,\Omega)$ – realization of a useful signal; $n(t)$ – realization of internal Gaussian noise.

A useful signal is a coherent packet of radio pulses with random amplitude and initial phase whose complex amplitude is described by expression:

$$\dot{X}(t,\Omega) = b\sum_{i=1}^{n}\dot{X}_i(t,\Omega)\exp[j(\beta)], \qquad (3)$$

where $\dot{X}_i(t,\Omega)$ – the complex amplitude of the i-th radio impulse; b – random amplitude of the radio signal, which is distributed according to Rayleigh's law; β – the random initial phase of the radio signal, which is distributed according to a equable law; i – the radio pulse number that counted from the beginning of the packet; n – the number of radio pulses in the packet.

According to [1] it is determined that estimating the shift of the frequency of the packet of radio pulses could be realized by finding the argument of the maximum natural logarithm of the likelihood ratio:

$$\hat{\Omega} = \arg\max \ln \ell(\Omega). \qquad (4)$$

where $\ell(\Omega)$ – the likelihood ratio as a function of the measured parameter.

It is determined in [1] that the likelihood ratio for a coherent signal with a uniformly distributed random phase and a random amplitude which distributed according to the Rayleigh law, as a result of the statistical averaging by the random parameters b and β has the form:

$$\ell(\Omega) = \frac{1}{1+q^2/2}\exp\frac{q^2/2}{2\left(1+q^2/2\right)}\left|Z_n(\Omega)\right|^2, \qquad (5)$$

where q^2 – the signal-to-noise ratio for power; $\left|Z_n(\Omega)\right|^2$ – the square of the module of the normalized complex weight integral as a function of the measured parameter.

In the conditions of regular measurement ($q^2 >> 1$), equality is valid:

$$\left|Z_n(\Omega)\right| = \left|Z_н(\vec{\Phi}_n, \vec{\Phi}_o)\right| \approx q\rho(\vec{\Phi}_s\vec{\Phi}_o) = q\rho(\Omega), \qquad (6)$$

where $\vec{\Phi}_s = \left\|\Phi_{si}\right\|^T$ $(i = 1, 2, ..., n)$ – vector of observed values of the initial phases of the packet radio pulses; $\vec{\Phi}_o = \left\|\Phi_{oi}\right\|^T$ – vector of the expected values of the initial phases of the packet radio pulses; $\rho(\vec{\Phi}_s, \vec{\Phi}_o) = \rho(\Omega)$ – a normalized mismatch function by the phase of the observed and expected radio signal.

Taking into account (6) the likelihood ratio (5) is taking the form when $q^2 >> 1$:

$$\ell(\Omega) \approx \left(2/q^2\right)\cdot\exp\left(q^2\rho^2(\Omega)/2\right). \qquad (7)$$

As shown in [28], in the case of a coherent pack with a constant period of radio pulses, the square of the normalized mismatch function by the frequency is described by the expression:

$$\rho^2(\Omega) = 1 - \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\xi_i\xi_j(\Phi_i - \Phi_j)^2 -$$

$$-\frac{1}{2}T^2\Omega^2\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\xi_i\xi_j(i-j)^2 +$$

$$+T\Omega\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\xi_i\xi_j(i-j)(\Phi_i - \Phi_j), \qquad (8)$$

where $\Omega = \omega - \omega_0$ – the mismatch between the observed ω and expected ω_0 cyclic frequencies of the pulse packet; i, j – pulse numbers that are counted from the beginning of the packet; Φ_i, Φ_j – observed values of the initial phase of the i-th and j-th radio pulses accordingly; $\xi_i = \frac{Z_i}{Z_\Sigma}$; $Z_i = \frac{1}{2}\left|\int_{-\infty}^{\infty}\dot{Y}_i(t)\dot{X}_i^*(t)dt\right|$ – module of the signal part of the complex correlation integral for the i-th radio pulse; $\dot{Y}_i(t)$ – complex envelope of the received i-th radio pulse; $\dot{X}_i^*(t)$ – complex conjugate envelope of the reference voltage during the processing of the i-th radio pulse; $Z_\Sigma = \sum_{i=1}^{n}Z_i$; T – period of packet radio pulses.

For a symmetric amplitude distribution of radio pulses in the packet $\xi_i = \xi_{n+1-i}$, using the expression (8) into (7), computing logarithm and leaving only the dependent on the measured parameters subtrahends, we obtain an expression for sufficient statistics:

$$S(\Omega) = \ln \ell(\Omega) = -\frac{q^2}{2}\{\frac{T^2}{2}\Omega^2 \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\xi_i\xi_j(i-j)^2 -$$

$$-T\Omega\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\xi_i\xi_j(i-j)(\Phi_i - \Phi_j)\}. \quad (9)$$

Estimation and dispersion of the error of estimation of the frequency of a packet of radio pulses is obtained according to the method of maximum likelihood [1] by the expressions:

$$\frac{dS(\Omega)}{d\Omega} = 0 \text{ when } \Omega = \hat{\Omega}, \quad (10)$$

$$\frac{1}{\sigma_\Omega^2} = -\frac{d^2 \ln \ell(\Omega)}{d\Omega^2} = -\frac{d^2 S(\Omega)}{d\Omega^2} \text{ when } \Omega = \hat{\Omega}, \quad (11)$$

where $\ln \ell(\Omega)$ – the natural logarithm of the likelihood ratio (7) or its sufficient statistics $S(\Omega)$; $\hat{\Omega}$ – estimation of frequency of the packet radio pulses.

After a one-time and two-time differentiation by the measured parameter of sufficient statistics (9), the estimation and dispersion of the error of frequency estimation in the next form are obtained:

$$\hat{\Omega} = \sum_{j=1}^{m}\xi_j(2j-1)R_j \Big/ T\sum_{j=1}^{m}\xi_j(2j-1)^2, \quad (12)$$

$$\frac{1}{\sigma_\Omega^2} = \frac{q^2T^2}{2}\sum_{j=1}^{m}\xi_j(2j-1)^2, \quad (13)$$

where R_j – the difference of the j-th initial phases of the symmetric pair radio pulses; m – the number of pairs of radio pulses symmetrical about the center of the packet.

If the packet of radio pulses has a rectangular envelope $(\xi_i = 1/n)$, expressions (12) and (13) could be converted to the form:

$$\hat{\Omega} = \frac{3}{m(4m^2-1)T}\sum_{j=1}^{m}(2j-1)R_j, \quad (14)$$

$$\frac{1}{\sigma_\Omega^2} = \frac{q^2(4m^2-1)}{12}T^2. \quad (15)$$

Random error of frequency measurement caused by fluctuations of initial phases of packet pulses could be represented by the expression:

$$\Delta\Omega = \frac{3}{m(4m^2-1)T}\sum_{j=1}^{m}(2j-1)\Delta R_j, \quad (16)$$

where ΔR_j – fluctuations in the phase difference of the j-th symmetric pair of radio pulses.

The dispersion of this error is determined by the expression:

$$\sigma^2_{\Omega фл} = \frac{9}{m^2(4m^2-1)^2T^2}\left\langle[\sum_{j=1}^{m}(2j-1)\Delta R_j]^2\right\rangle, \quad (17)$$

where ((– the operation of statistical averaging.

The dispersion of the total measurement error of the frequency of the packet of radio pulses is determined by the sum of the error dispersion σ^2_Ω which conditioned by the influence of the internal noise of the receiving device and the error dispersion $\sigma^2_{\Omega fl}$ (17) caused by the phase fluctuations of the radio pulses:

$$\sigma^2_\Sigma = \sigma^2_\Omega + \sigma^2_{\Omega fl}. \quad (18)$$

It is believed that the phase fluctuations of the received packet radio pulses are distributed according to the normal law with zero mean, and the correlation of phase fluctuations of the adjacent radio pulses of the packet decreases according to the alternating law [1].

The realization of the statistical averaging (17) allows to obtain the expression of the dispersion of the total error of measuring the frequency of a packet of radio pulses at the alternating correlation function of phase fluctuations:

$$\sigma^2_\Sigma = \frac{12}{q^2T^2(4m^2-1)} + \frac{18\sigma_\varphi{}^2}{m^2T^2(4m^2-1)^2}\times$$

$$\times[\sum_{k=1}^{m}(2k-1)^2(1-(-a)^{(2k-1)}) + 2\times$$

$$\times\sum_{k=1}^{m-1}\sum_{i=1}^{m-k}(-a)^i(2k-1)(2k+2i-1)(1-(-a)^{(2k-1)})], \quad (19)$$

where σ^2_φ – dispersion of phase fluctuations; a – the correlation coefficient of phase fluctuations of adjacent radio pulses of the packet.

There is a graph of the dependency of the square product of the measurement MSE of the frequency of a packet for ten radio pulses and their period $(\sigma_\Sigma T)^2$ on the signal-to-noise ratio in power q^2 when a=0,99 (Fig. 1, a) and the correlation coefficient of phase fluctuations (Fig. 1, b) when $q^2 = 1000$. Graphs are obtained for different values of phase fluctuation dispersion $\sigma^2_\varphi = 0,01;\ 0,1;\ 1;\ 10\ rad^2$.

The results are shown in Fig. 1, and indicate that, under the conditions of regular measurement (when $q^2 >> 1$), the accuracy of measuring the frequency of the packet of radio pulses mainly depends on the statistical characteristics of phase fluctuations than on the magnitude of the signal-to-noise ratio.

Increasing the dispersion of phase fluctuations by an order of magnitude has almost no effect on changing the magnitude of the error dispersion of the

measurement of the frequency of the packet radio pulses for the small values ($\sigma_\varphi^2 = 0,01...10\ rad^2$). Increasing this dispersion by an order of magnitude ($\sigma_\varphi^2 = 1...10\ rad^2$), which can occur in practical cases, leads to an increase in the dispersion of the error measurement of the frequency of the packet radio pulses by an order of magnitude and more.

These results were obtained for the alternating correlational function of phase fluctuations, with a decrease in the inter-pulse correlation coefficient by only 1% ($a = 0,99$).

The graphs in Fig. 1, b indicate that, as the dispersion of phase fluctuations ($\sigma_\varphi^2 = 0,01...10\ rad^2$) increases, the effect of their inter-pulse correlation coefficient on the measurement error of the frequency of the packet radio pulses increases. Most significantly, this effect occurs at large dispersion of phase fluctuations ($\sigma_\varphi^2 = 1...10\ rad^2$), which can indeed take place under the real conditions of the use of the radar.

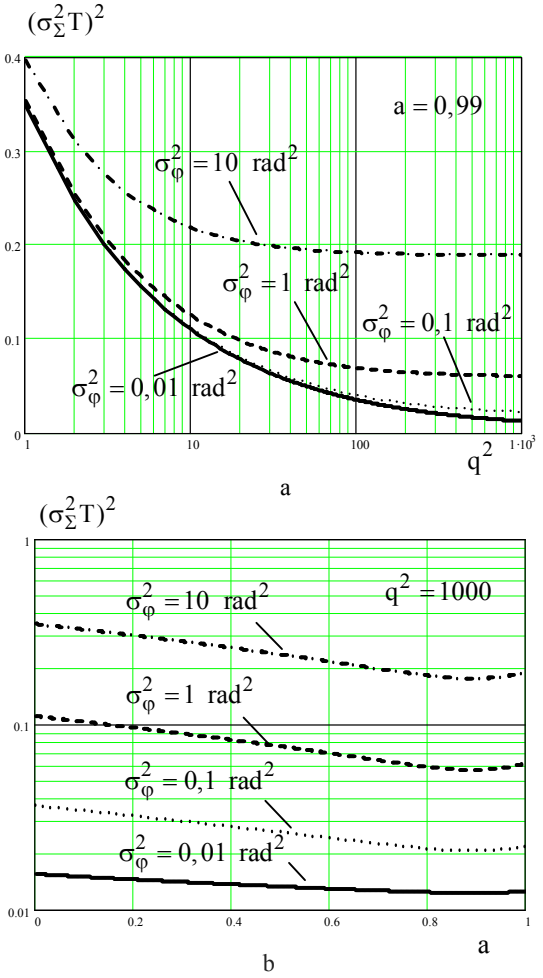


Fig. 1. Dispersion of measurement error of the frequency of the packet radio pulses in the absence of consideration of phase fluctuations

For a packet of pulses with rectangular envelope and pair number of pulses, the dispersion error of the measured parameter Ω in the presence of only the internal noise of the receiving device is estimated according to expression (15) and has the form:

$$\sigma_\Omega^2 = \frac{12}{q^2(4m^2-1)T^2}. \qquad (20)$$

For phase fluctuations of the radio pulses of a received pack with an oscillating correlation function, the dispersion of the measurement error of the parameter Ω by the presence of only phase fluctuations is estimated according to the expression obtained in [28]:

$$\sigma_{\Omega fl}^2 = 18\sigma_\varphi{}^2 \Big/ \left(m^2(4m^2-1)^2T^2\right)\times$$

$$\times[\sum_{j=1}^{m}(2j-1)^2(1-\exp(-\frac{T}{\tau}(2j-1))\cos((2j-1)\gamma T)) + 2\times$$

$$\times\sum_{l=1}^{m-j}\exp(-\frac{T}{\tau}l)\sum_{j=1}^{m-1}(2j-1)(2j+2l-1)\times$$

$$\times(\cos(j\gamma T) - \exp(-\frac{T}{\tau}(2j-1))\cos((2j+l-1)\gamma T))], \quad (21)$$

where τ – the interval of the correlation of the phase fluctuation; γ – oscillation frequency of the phase correlation coefficient.

The corresponding components of the MSE of radial velocity measurement of the aerodynamic object can be calculated according to the expressions:

$$\sigma_\upsilon = (\lambda/4\pi)\cdot\sigma_\Omega, \qquad (22)$$

$$\sigma_{\upsilon fl} = (\lambda/4\pi)\cdot\sigma_{\Omega fl}. \qquad (23)$$

It is of practical benefit to obtain the possible values of the MSE components of the measurement of the aerodynamic object's radial velocity in the signal-to-noise ratio $q^2 = 1000$, for the cases of coherent accumulation of short $n = 8$, medium $n = 16$ and long $n = 32$ packets of radio pulses.

For the case of the radio waves propagation in a randomly-heterogeneous environment, in [1, 2] the magnitudes of the dispersion of the phase fluctuations of a radio signal σ_φ^2 which passed through the perturbed Earth troposphere are given. The interval of correlation of phase fluctuations can be $\tau = 0,1...1$ s.

The heterogeneities of the troposphere 100 m in size can cause phase fluctuations with dispersion $\sigma_\varphi^2 = 1,74$ rad at $\lambda = 0,1$ m for the surveillance radar at the range of detection of aerodynamic objects over 200 km.

The troposphere heterogeneities of 100 m size can cause phase fluctuations with dispersion $\sigma_\varphi^2 = 4,8...9,7$ at $\lambda = 3...5$ cm for the tracking radar at detection ranges of aerodynamic objects 50… 150 km.

For the given data, the expressions (22) and (23) can be used to calculate the component of the measurement MSE of the aerodynamic object's radial velocity which are conditioned by the internal noise and phase fluctuations of the received packet radio pulses accordingly for $n = 8$, 16 and 32. The results of the

calculations of the components of the measurement MSE of the radial velocity for the surveillance radar are shown in table 1.

The results of the calculations of the components of the measurement MSE of the radial velocity for the tracking radar are shown in table 2.

The obtained results indicate that the values of the components of the measurement MSE of the radial velocity which are conditioned by the phase fluctuations of the radio pulses of the received packet, can several times exceed the components which are conditioned by the influence of the internal noise of the radar receiving device.

Table 1 – **Components of the measurement MSE of the radial velocity for the surveillance radar, m/s**

n	σ_υ	$\sigma_{\upsilon fl}$
8	0,08…0,18	0,5…0,76
16	0,04…0,09	0,36…0,54
32	0,02…0,05	0,26…0,38

Table 2 – **Components of the measurement MSE of the radial velocity for the tracking radar, m/s**

n	σ_υ	$\sigma_{\upsilon fl}$
8	0,66	1,85…6,9
16	0,33	1,3…4,82
32	0,16	0,91…3,4

In addition to the effect of troposphere heterogeneities, the effect of aerodynamic object Doppler noise and multipath propagation causes an additional increase of the fluctuation component of the measurement MSE of the radial velocity to several units of m/s or more. Moreover, the phase distortions of the radar signal significantly exerts influence on the operation of the tracking radar, causing the danger of disruption of the aerodynamic object from the autotracking in the range and radial velocity.

Conclusions and Directions of Further Research

There are fluctuations in the initial phases of the received packet pulses with a normal distribution law and alternating correlation function when a coherent-pulse radar is operating in real conditions. These fluctuation can greatly reduce the quality of the time-frequency processing of a radar signal. The accuracy of radial velocity measurement essentially depends on the statistical characteristics of phase fluctuations – dispersion and correlation, which values determines the conditions and the usefulness of optimizing the time-frequency processing of the received packet radio pulses.

Areas of further research are: evaluation of influence of casual phase distortions radio of локационного signal on quality of accompaniment of aerodynamic object.

REFERENCES

1. Shirman, Ya.D. (1999), *Radio electronic systems*, Z.A.O. *"*MAKVISC*"*, Moscow, 828 p.
2. Shifrin, Ya.S. (1970), *Statistical antenna theory issues*, Sov. radio, Moscow, 383 p.
3. Karlov, V.D., Petrushenko, N.N., Chelpanov, V.V. and Kvitkin, K.P. (2010), "The influence of the propagation medium of radio waves in the coastal direction in measuring the angular coordinates of the radar targets", *Scientific Works of Kharkiv Air Force University*, No. 3 (25), pp. 51-53.
4. Skolnik, M. (1976), *Radar Reference Guide*, Sov. radio, Moscow, 456 p.
5. Ostrovityanov, R.V. and Basalov, F.A. (1982), *The statistical theory of radar extended targets], Radio and communication*, Moscow, 232 p.
6. Karlov, V.D., Leonov, I.G., Prisyazhny, A.E. and Lukovskiy, O.Ya. (2006), "Detection of aerodynamic targets in the conditions of noise and passive interference with a wide Doppler spectrum", *Information Processing Systems*, No. 9 (58), pp. 34-36.
7. Krasyuk, N.P. (1988), "The influence of the troposphere and underlying surface on the radar's work", *Radio and communication*, Moscow, 223 p.
8. Kotov, A.F. (1992),"Influence of reflections from a laying surface on the process of location objects", *Teory and practice of synchronization systems,* pp. 4-8.
9. Karlov, V.D., Minervin, N.N., Petrushenko, N.N. and Lukashuk, E.V. (2008), "Influence of inhomogeneities of radar station's position on the effectiveness of suppressing external interference when locating of the overwater targets", *Navigation and communication control systems*, No. 4 (8), pp. 34-36.
10. Petrushenko, M.M. (2009), "Features of the use of radio systems of the Air Force in unstable hydrometeorological conditions and natural meteorological phenomena", *Navigation and communication control systems*, No. 2 (10), pp. 54-57.
11. Karlov, V.D., Minervin, N.N., Petrushenko, N.N., Lukashuk, E.V. and Lukovskiy, O.Ya. (2008), "Influence of fluctuations of the noise wave front on the efficiency of its suppression by the correlation compensator in radio-technical systems of coastal basing", *Information Processing Systems*. No. 7 (74), pp. 87-93.
12. Karlov, V.D., Kucher, D.B., Strutsinskiy, O.V. and Lukashuk, O.V. (2016), "On the issue of measuring the range of low-altitude target during its radiolocation within the tropospheric waveguide over the sea", *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, No. 3 (24), pp. 98-101.
13. Karlov, V.D., Kondratenko, A.P., Sheygas, A.K. and Sytnyk, Yu.B. (2014), "On the question of measuring the Doppler frequency of a signal is reflected from a target is located outside the horizon above the sea", *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, No. 1 (14), pp. 115-117.
14. Karlov, V.D., Petrushenko, M.M., Pevtsov, G.V. and Nos, A.I. (2012), "Features of the measurement of the radial component of the target velocity, which is located at small angles of the place above the sea", *8th Scientific Conference of Ivan Kozhedub Kharkiv Air Force University: New technologies – for air space protection*, April 18-19, 2012, Kharkiv, p. 295.
15. Karlov, V.D., Petrushenko, N.N. and Nos, A.I. (2012), "Using the phase method for optimizing the measurement of the radial component of the target velocity is located outside the radio horizon above the sea", *12th Scientific Conf.: The creation and modernization of weapons and military equipment in modern condition*, September 6-7, 2012, Theodosius, p. 198.
16. Donets V., Kuchuk N., Shmatkov S. Development of software of e-learning information system synthesis modeling process. *Advanced Information Systems*, Vol. 2, No 2. P. 117–121. DOI: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.20.

17. Kuchuk G., Nechausov S., Kharchenko, V. Two-stage optimization of resource allocation for hybrid cloud data store. *International Conference on Information and Digital Technologies*. *Zilina*, 2015. P. 266-271. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/DT.2015.7222982
18. Merlac V. Resourses Distribution Method of University e-learning on the Hypercovergent platform / V. Merlac, S. Smatkov, N. Kuchuk, A. Nechausov // *Conf. Proc. of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Service and Technologies. DESSERT'2018*. Ukraine, Kyiv, May 24-27, 2018. – P. 136-140. – URL :http://dx.doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409114
19. Kuchuk N. Method for calculating of R-learning traffic peakedness / N. Kuchuk; O. Mozhaiev, M. Mozhaiev; H. Kuchuk // 2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2017. – 2017. – P. 359 – 362. URL : http://dx.doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2017.8246416
20. Nechausov A., Mamusuĉ I., Kuchuk N. Synthesis of the air pollution level control system on the basis of hyperconvergent infrastructures. *Advanced Information Systems*, Vol. 1, No 2. P. 21 – 26. DOI: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2017.2.04
21. Yaloveha, V., Hlavcheva, D. and Podorozhniak, A. (2019), "Usage of convolutional neural network for multispectral image processing applied to the problem of detecting fire hazardous forest areas", *Advanced Information Systems*, Vol. 3, No 1, pp. 116–120, DOI: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.1.19
22. Mozhaev O. Multiservise network security metric / O. Mozhaev, H. Kuchuk, N. Kuchuk, M. Mozhaev, M. Lohvynenco // IEEE Advanced information and communication technologies-2017. Proc. of the 2th Int. Conf. – Lviv, 2017. – P. 133-136. – DOI: https://doi.org/10.1109/AIACT.2017.8020083
23. Kuchuk G., Kovalenko A., Komari I.E., Svyrydov A., Kharchenko V. Improving big data centers energy efficiency: Traffic based model and method. *Studies in Systems, Decision and Control*, vol 171. Kharchenko, V., Kondratenko, Y., Kacprzyk, J. (Eds.). Springer Nature Switzerland AG, 2019. Pp. 161-183. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4_8
24. Svyrydov, A., Kuchuk, H., Tsiapa, O. (2018), "Improving efficienty of image recognition process: Approach and case study", *Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2018*, pp. 593-597, DOI: http://dx.doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409201
25. Ruban, I. Redistribution of base stations load in mobile communication networks / I. Ruban, H. Kuchuk, A. Kovalenko // Innovative technologies and scientific solutions for industries. – 2017. – No 1 (1) – P. 75-81. – DOI : https://doi.org/10.30837/2522-9818.2017.1.075.
26. Kovalenko, A. and Kuchuk H. (2018), "Methods for synthesis of informational and technical structures of critical application object's control system", *Advanced Information Systems*, Vol. 2, No. 1, pp. 22–27, DOI: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04
27. Karlov, V.D., Petrushenko, N.N. and Nos, A.I. (2012), "Using the phase method for optimizing the measurement of the radial component of the target acceleration above the sea", *12th Scientific Conferencey: The creation and modernization of weapons and military equipment in modern condition*, September 6-7, 2012, Theodosius, p. 210.
28. Minervin, N.N. and Kuznetsov, A.L. (2001), "Errors of measurement of radial velocity and radial acceleration of the target, due to the neglect of fluctuations of the phases of the burst pulses", *Aerospace and Technology*, No. 22, pp. 288-294.
29. Karlov, V.D., Besova, O.V., Oleshchuk, M.M. and Petrushenko, M.M. (2014), "About the influence of the propagation mechanism of radio waves on the location of targets in a tropospheric radio waveguide above the sea", *10th Scientific Conf. of I. Kozhedub Kharkiv Air Force University: New technologies – for air space protection*, April 9-10, 2014, Kharkiv, p. 254.
30. Minervin, M.M., Kuznietsov, O.L. and Tarshin, V.A. (2006), "Limit the accuracy of measuring the radial velocity of the target due to the conditions of propagation, reflection and processing of the radar signal", *Scientific Works of Kharkiv Air Force University*, No. 3 (9), pp. 116-118.
31. Karlov, V.D., Oleshchuk, M.M., Pevtsov, G.V. and Misaylov, V.L. (2014), "The results of experimental studies of the locations of low-altitude targets that fly over the sea surface", 3th *International STC NTU KhPI: Information problems of the theory of acoustic radio electronic and telecommunication systems IPST*, 2014, Kharkiv, p. 35.
32. Karlov, V.D., Rodyukov, A.O. and Pichugin, I.M. (2015), „"Statistical characteristics of radar signals are reflected from local objects in conditions of abnormal refraction", *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, No. 4 (21), pp. 71-74.
33. Kuznietsov, O.L, Kolomiitsev, O.V., Sadovyi, K.V. (2017), "Distinction after way distance РЛС with the synthesized aerial by a grate in the conditions of influence of not homogeneity atmosphere", *Collection of scientific works Ivan Kozhedub Kharkiv Air Force University,* Kharkiv, No. 2(51), pp. 130-133.
34. Aloshin, G.V., Kolomiytsev, A.V. (2015), "Optimal choice of parameters of radio-location signals on the conditional criterion of a maximum of economic efficiency", *The Informatively-managing systems are on a railway transport,* Kharkiv, No. 6, pp. 3-7.

Надійшла (reviewed) 25.03.2020
Прийнята до друку (accepted for publication) 06.05.2020

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Кузнєцов Олександр Леонідович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри фізики та радіоелектроніки Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;
Oleksandr Kuznietsov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Physics and Radio Electronics Department; Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: SAG 2121@ukr.net; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-5915-8107.

Карлов Володимир Дмитрович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри фізики та радіоелектроніки Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;
Vladimir Karlov – Doctor of Technical Sciences Professor Head of Physics and Radio Electronics Department, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: Karlov@ukr.net; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-1043-684X.

Коломійцев Олексій Володимирович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри обчислювальної техніки та програмування, Національний технічний університет «ХПІ», Харків, Україна;
Oleksii Kolomiitsev – Doctor of Technical Sciences, Senior Research, Professor of Computer Science and Programming Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
e-mail: Alexus_k@ukr.net; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-8228-8404.

Садовий Костянтин Віталійович – кандидат технічних наук, доцент, заступник начальника кафедри Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;
Kostiantyn Sadovyi – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Chief of the Department of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, lieutenant colonel, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: 971sadovyi@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-2703-9696.

Бєсова Оксана Василівна – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Наукового центру Повітряних Сил Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;
Oksana Biesova – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of Air Force Science Centre of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: bytko75@ukr.net; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-7744-1339.

Вплив статистичних характеристик флуктуацій початкових фаз радіолокаційного сигналу на точність вимірювання радіальної швидкості аеродинамічного об'єкту

О. Л. Кузнєцов, В. Д. Карлов, О. В. Коломійцев, К. В. Садовий, О. В. Бєсова

Анотація. В статті розглядаються питання оцінювання радіальної швидкості при використанні когерентної пачки радіоімпульсів стосовно випадку наявності у відбитих від аеродинамічного об'єкту радіоімпульсах корельованих флуктуацій початкових фаз. **Предметом** вивчення є точність вимірювання частоти пачки для випадку погодженої обробки без урахування фазових флуктуацій її радіоімпульсів. **Метою** є чисельний аналіз впливу статистичних характеристик флуктуацій початкових фаз радіоімпульсів прийнятої пачки на зниження точності вимірювання радіальної швидкості аеродинамічного об'єкту. **Завдання:** оцінити можливі значення флуктуаційної складової середньоквадратичної похибки вимірювання радіальної швидкості аеродинамічного об'єкту. Розгляд проводиться в припущенні, що на вхід приймального пристрою радіолокаційної станції (РЛС) надходить адитивна суміш відбитих від аеродинамічних об'єктів сигналів і некорельованого гаусового шуму. Передбачається, що фазові флуктуації радіоімпульсів прийнятої пачки розподілені за нормальним законом з нульовим середнім, а кореляція фазових флуктуацій зі збільшенням інтервалу між радіоімпульсами пачки убуває за знакозмінним законом. Використовувані **методи:** теорії ймовірності та математичної статистики. Отримані наступні **результати**. Проведено оцінювання точності вимірювання частоти пачки при наявності корельованих фазових флуктуацій її радіоімпульсів. **Висновки.** Отримані результати свідчать про те, що для сучасних РЛС, в умовах регулярного вимірювання, на точність оцінювання частоти пачки радіоімпульсів в значно більшому ступені впливають статистичні характеристики флуктуацій фаз, чим відношення сигнал-шум. Внаслідок фазових флуктуацій радіоімпульсів прийнятої пачки, середньоквадратична похибка вимірювання радіальної швидкості аеродинамічного об'єкту здатна перевищувати значення, які визначаються вимогами до когерентно-імпульсних РЛС. Подальший напрямок досліджень полягає у оцінюванні впливу випадкових фазових спотворень радіолокаційного сигналу на якість супроводження аеродинамічного об'єкту.

Ключові слова: когерентно-імпульсна радіолокаційна станція; пачка радіоімпульсів; фазові флуктуації; радіальна швидкість аеродинамічного об'єкту; гаусовий шум; радіолокаційне спостереження; ефективність оптимізації.

Влияние статистических характеристик флуктуаций начальных фаз радиолокационного сигнала на точность измерения радиальной скорости аэродинамического объекта

А. Л. Кузнецов, В. Д. Карлов, А. В. Коломийцев, К. В. Садовый, О. В. Бесова

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы оценивания радиальной скорости при использовании когерентной пачки радиоимпульсов применительно к случаю наличия в отраженных от аэродинамического объекта радиоимпульсах коррелированных флуктуаций начальных фаз. **Предметом** изучения является точность измерения частоты пачки для случая согласованной обработки без учета фазовых флуктуаций ее радиоимпульсов. **Целью** является численный анализ влияния статистических характеристик флуктуаций начальных фаз радиоимпульсов принятой пачки на снижение точности измерения радиальной скорости аэродинамического объекта. **Задача:** оценить возможные значения флуктуационной составляющей среднеквадратической ошибки измерения радиальной скорости аэродинамического объекта. Рассмотрение проводится в предположении, что на вход приемного устройства радиолокационной станции (РЛС) поступает аддитивная смесь отраженных от аэродинамических объектов сигналов и некоррелированного гауссово шума. Предполагается, что фазовые флуктуации радиоимпульсов принятой пачки распределены по нормальному закону с нулевым средним, а корреляция фазовых флуктуаций с увеличением интервала между радиоимпульсами пачки убывает по знакопеременному закону. Используемые **методы:** теории вероятности и математической статистики. Получены следующие **результаты**. Проведено оценивание точности измерения частоты пачки при наличии коррелированных фазовых флуктуаций ее радиоимпульсов. **Выводы.** Полученные результаты свидетельствуют о том, что для современных РЛС, в условиях регулярного измерения, на точность оценивания частоты пачки радиоимпульсов в значительно большей степени влияют статистические характеристики флуктуаций фаз, чем отношение сигнал-шум. Вследствие фазовых флуктуаций радиоимпульсов принятой пачки, среднеквадратическая ошибка измерения радиальной скорости аэродинамического объекта способна превышать значения, которые определяются требованиями к когерентно-импульсным РЛС. Дальнейшее направление исследований лежит в оценивании влияния случайных фазовых искажений рвдиолокационного сигнала на качество сопровождения аэродинамического объекта.

Ключевые слова: когерентно-импульсная радиолокационная станция; пачка радиоимпульсов; фазовые флуктуации; радиальная скорость аэродинамического объекта; гауссовый шум; радиолокационное наблюдение; эффективность оптимизации.

UDC 004.94 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.2.19**

O. Malyeyeva[1], V. Kosenko[2], Yu. Davydovskyi[1], D. Boiev[1]

[1] National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine
[2] State Enterprise "National Design & Research Institute of Aerospace Industries", Kharkiv, Ukraine

FACTOR SYNERGY ANALYSIS AND MERGER STRATEGY MODELS IN INVESTIGATION OF TELECOMMUNICATION OPERATORS' PERFORMANCE

Abstract. The subject of the study is the process of choosing a strategy to improve the effectiveness of telecom operators, given the trend of growth in multitraffic in data networks. **The purpose** of the work is to analyze the synergy of factors and develop models of traffic of data networks in the implementation of the strategy of merger of telecommunication operators. The following **tasks** are solved in the article: analysis of telecommunication development strategies; building a network model of synergistic effect in the implementation of development strategies; development of a model of data flow intensity in the integrated networks. The following research **methods** are used: statistical and system analysis, cause and effect models, mathematical programming models, and vector matrix models. The following **results** are obtained: The tendencies of development of multiservice services in the sphere of infocommunications are considered. Here are some basic strategies for developing a communications company. It is shown that merger and acquisition strategies are nowadays a means of integrating the necessary resources, contributing to competitive advantage. A mathematical model of linear programming is used to make the decision to invest in development strategies. The task of evaluating the effectiveness of development towards expanding the number of service users is considered. A network model in the form of a cause and effect diagram to investigate the mutual influence of sales factors was formed. The economic manifestation of the synergistic effect of companies in the implementation of the merger strategy is considered. A multilevel data flow model is used to study the intensities of data flows in a unified network. **Conclusions:** Due to the increasing volume and heterogeneity of infocommunication network traffic, telecom operators are using merger strategies to pool network management resources. Thus there is a synergistic effect of factors affecting sales of services. The changes in traffic and performance of the consolidated network structure are investigated on the basis of a three-tier hierarchical model. The direction of further research is to simulate network load with different technical structure characteristics to evaluate the effectiveness of a reengineering strategy.

Keywords: telecom operators; data networks; development strategies; influence of factors; traffic intensity.

Introduction

The rapid growth of traffic and the change in its structure, the need to provide services to a growing number of mobile users determines the modern requirements for data networks. The traditional network architecture will no longer be able to handle growing user requests in the near future. The development of information and communication technologies, new principles for building communication networks, changing the structural composition of subscribers and the range of services provided are all factors that significantly influence the parameters of traffic and cause the creation of new mathematical models of its research.

The introduction of new services (especially services related to video traffic) will increase the load on data networks. In addition, the networks function as multiservice using the latest IP technologies. The level of loading of the border nodes is 60-70% already. Further increase in load through the introduction of new services requires analysis of their efficiency and study of forecast traffic.

Effective decisions must be made regarding the choice of network development strategies to maximize the use of its resources. Setting up a flexible traffic management system takes time, knowledge and considerable resources. A comprehensive analysis of network resources and traffic should be undertaken to form a decision-making system for managing network development. The main tasks in managing traffic are minimizing packet loss and delays, optimizing bandwidth and ensuring quality of service.

Reviewing publications and setting a task. Despite the considerable number of theoretical and methodological publications on management of activity of telecommunication and telecommunication operators, enterprises of the telecommunication industry, in the existing publications, only relations from the positions of supplier (equipment manufacturers) and consumer (operators and providers) are considered [1 - 5]. The process of formation and implementation of strategies for the development of telecommunication operators to maintain the efficiency of their activity in the conditions of heterogeneous and growing traffic remains insufficiently studied [6, 7]. In addition, the development of economic relations in the field of data transmission causes the expansion of the sphere of cooperation of telecommunication operators on the basis of cooperation and integration [8, 9]. These processes are also poorly understood from the point of view of data transmission efficiency in the unified networks.

Therefore, the purpose of the article is to investigate the synergy of factors of activity of telecommunication operators and to develop models of traffic of data networks in the implementation of the merger strategy.

The following tasks are solved:

1) analysis of telecommunications development strategies;

2) building a network model for the study of synergistic effect in the implementation of development strategies;

3) development of a model of data flow intensity in the integrated networks.

© O. Malyeyeva, V. Kosenko, Yu. Davydovskyi, D. Boiev, 2020

Main part

1. Analysis of development strategies of the operators. The modern development of infocommunication services is characterized by an increase in the volume of traffic (Fig. 1), which is caused by the growth of consumption of "bulk" types of content (Fig. 2) [10]. In addition, the information market is characterized by increased competition of its participants [11, 12]. This leads to the need for companies to find and apply the most effective development strategies [8]. For example, Jio and Microsoft are competing for and deploying advanced technologies such as data analytics, artificial intelligence, cognitive services, blockchain, the Internet of Things and peripheral computing. AT&T Communications and Microsoft have formed a long-term alliance that will utilize innovative technologies such as cloud computing, AI and 5G. SK Telecom and Microsoft are partner operators and plan to test gaming streaming capabilities [13].

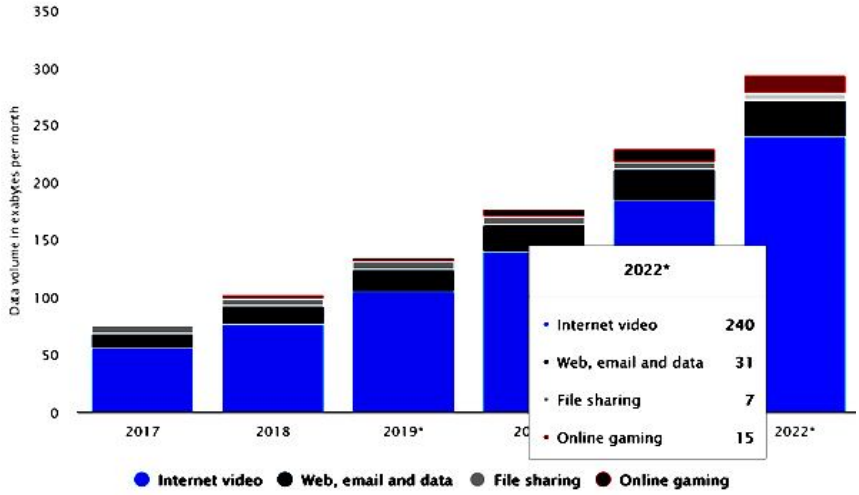


Fig. 1. The trend of increasing the consumption of communications services

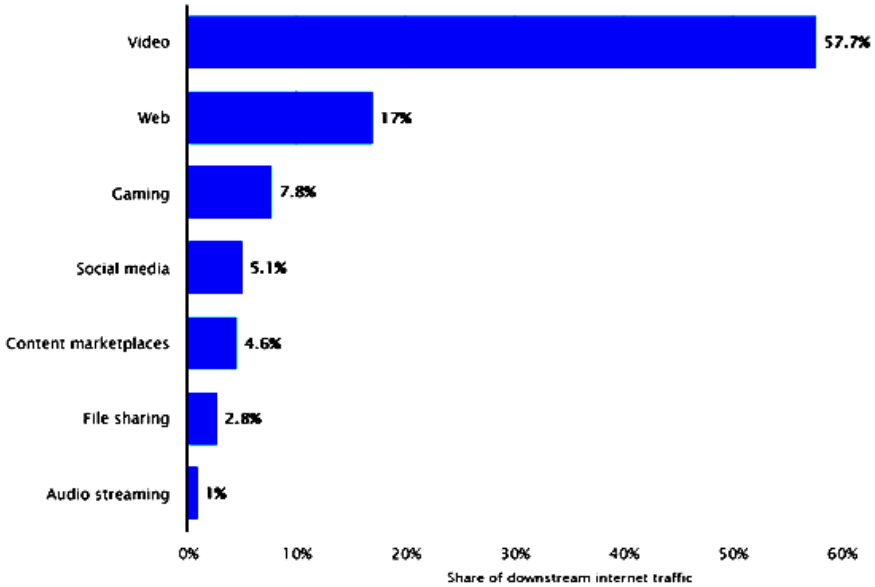


Fig. 2. Distribution of different types of content when consuming telecommunication services

Depending on the development goals of the company, there are three main types of strategies [8]:

- growth strategy, including sub-strategies of concentration, integration and diversification (Fig. 3);
- stabilization strategy that includes reengineering (redesign), mass service provision and termination of investment;
- protection and survival strategy that includes mergers and acquisitions.

Growth strategies are aimed at expanding market activities, increasing operator assets, increasing investment. Stabilization, protection and survival strategies are applied by major operators who already dominate the market and aim to preserve it. There is a search for internal reserves and profitable opportunities with minimal risk. This strategy is used by businesses at the stage of the life cycle.

In addition, there is also a downsizing strategy that includes business restructuring, bankruptcy and liquidation. Reduction strategies have the primary purpose of minimizing company costs for those business processes that are unprofitable. But in this article, we only look at the strategies that characterize the campaign's development to some extent.

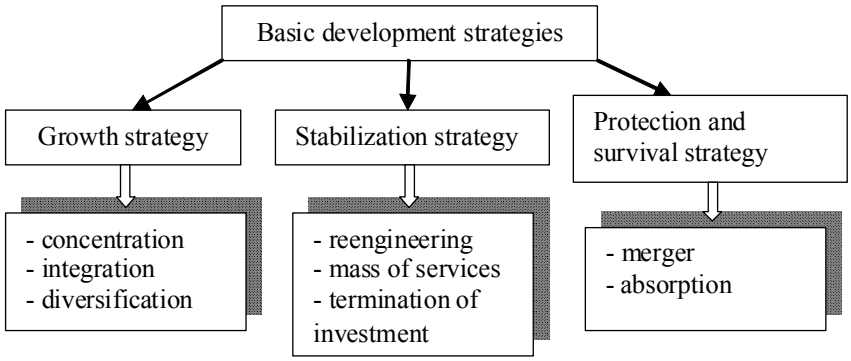


Fig. 3. Basic strategies for developing communications companies

The integration of M&A processes has led to an increase in M&A market volumes in recent years [9]. Therefore, these strategies are a means of integrating the necessary resources, which contributes to the achievement of competitive advantages. Depending on the type of integration (vertical or horizontal), the integration of telecommunication operators enables to increase the volume of consumption and increase the diversification of services. In addition, there is a synergistic effect, which is understood as an overall increase in the effectiveness of integration activities [8].

Leading operators are developing a new business model that leverages existing production resources in developed market segments or develops them through merger and acquisition strategies. The merger strategy is also used to address traffic management issues and ensure that users have access to information resources.

To make the decision to invest in the most effective development strategies, a mathematical model of linear programming is used in which the objective function is maximized:

$$F_{\max} = \sum_{i=1}^{5} a_i x_i \qquad (1)$$

where a_i – the weights on the estimates of investment efficiency; x_1 – efficiency of investment in new communication services and technologies; x_2 – efficiency of investments in technological re-equipment; x_3 – efficiency of investments in improvement of operational activity; x_4 – effectiveness of investment in the development of innovative infrastructure; x_5 – efficiency of investment in management for entering new markets (expanding the circle of consumers).

Investment performance is defined as

$$x_i = y_i / d_i \,, \qquad (2)$$

where y_i – investment income, d_i – volume of investments.

The problem is solved with restrictions on the total amount of investment:

$$\sum_{i=1}^{5} d_i \le D \,. \qquad (3)$$

Forecasting methods based on generalized industry development indicators are used to determine investment performance weights [14].

Consider the task of evaluating the effectiveness of development towards expanding the number of service users. It should be noted that there is no linear dependence of financial indicators (income of operators) of the market on the number of consumers [15, 16] Thus, in simplified form, the average revenue per subscriber is determined by the formula $Y = N \times S$, where N is the volume of consumption of services (number of consumers), S - cost of services.

Thus, as consumers grow, revenue should increase in proportion. But in the context of price competition, there is a tendency to significantly reduce the cost of services, which in turn slows revenue growth. As an example Fig. 4 shows the profits of the Vodaphone division in Germany [10].

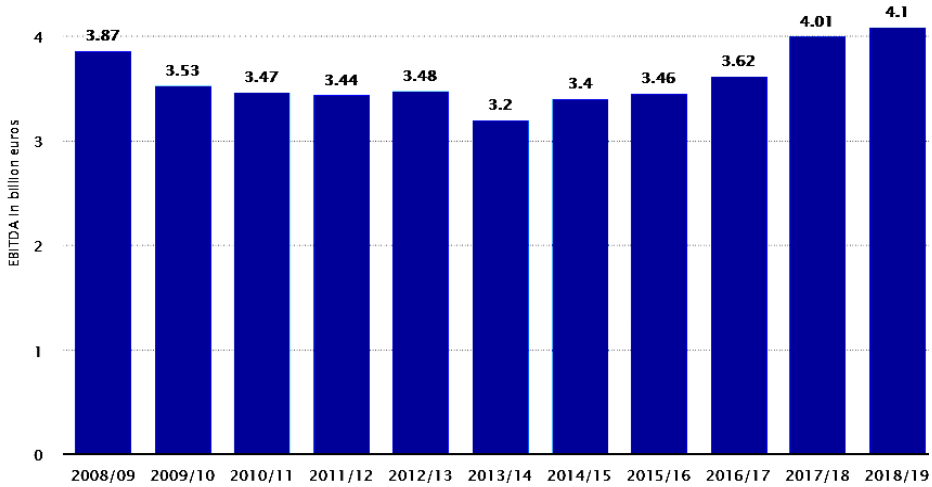


Fig. 4. The trend of changing the profit of the carrier

The figure shows a fall in revenues of 16% by 2013, followed by a 22% increase in revenues. If you relate this data to the trend of a steady increase in traffic (see Fig. 1), the change in revenue can be explained by the overall decrease in the price of data transmission and at the same time the rapid increase in the volume of traffic after 2014.

2. Network model of synergistic effect in the implementation of development strategies. When studying the effectiveness of investments in the field of infocommunications, the synergistic effect associated with the size of the operator's network and the number of subscribers should be taken into account [17-23]. With increasing number of consumers, the following effects occur:

- communicative aspect, which means effective exchange of information and development of the contact network;
- content that enhances the value of the network in terms of content distribution and aggregation;
- brand of a company that increases customer loyalty.

You can distinguish the following factors, which affect the sales of your business (which leads to an increase in its efficiency) and are related in turn:

a) factors that are directly controllable:

- network scale,
- operational activity,
- financial investments,
- level of management;

b) second-order management factors (which depend on the factors of group a):

- • number of users,
- • customer loyalty.

To investigate the network effect of the interaction of these factors [24], it is necessary to construct a cause and effect diagram with the corresponding coefficients of influence (interaction of factors) (Fig. 5).

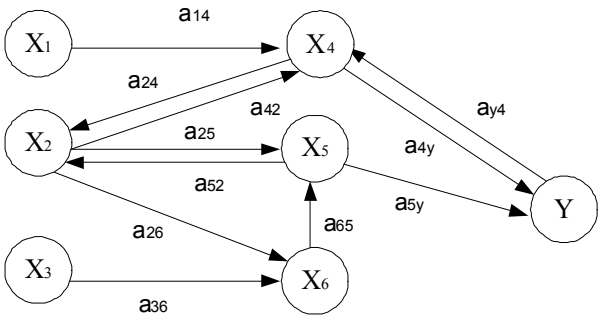


Fig. 5. Cause-and-effect diagram of the mutual influence of factors of sales volume of services of the company

The figure shows: studied variable Y - sales volume and multiple factors X_1 - operating activities, X_2 - financial investments, X_3 - level of management, X_4 - scale of network X_5 - number of users, X_6 - customer loyalty; impact factors - a_{ij} and a_{iy}, $i, j = \overline{1,6}$.

It should be noted that between some elements there is mutual influence, and on the diagram there are three loops, which causes the corresponding effect of self-development.

So, for example, the factor of increase of sales volume is revealed at realization of services to a larger subscriber base (effect of critical mass) through unified channels of distribution. Metclough's law also works here, according to which the value of the network increases nonlinearly (corresponding to the square of the number of additional consumers). Expansion of the consumer market, in turn, reduces the cost of telecommunication services. Networking results in increased revenue through the use of a single infrastructure and increased customer loyalty.

Let's consider the economic manifestation of the synergistic effect of companies in the implementation of the merger strategy. The total income of both companies for the merger is defined as

$$Y_0 = N_1 S_1 + N_2 S_2 \ , \qquad (4)$$

where N_1, N_2 – appropriate volumes of services provided to consumers, S_1, S_2 – cost of services of two operators.

As a result of the merger, the total revenue can be reported in the form:

$$Y_0 = Y_S + N_1 S_1 + N_2 S_2 \ , \qquad (5)$$

where Y_S – the effect of synergy on consolidation.

Influence of network effect in the sphere of infocommunications is also non-linear, it can be expressed by an exponential function. Thus, even when the price drops after the consolidation of the operators, the revenue can be greater than the gain in network expansion, since it generates more network resources. The network effect of merging operators can be displayed using an index (β):

$$Y_0 = Y_S + \beta(N_1 S_1 + N_2 S_2). \qquad (6)$$

Consider the variants of the values of this index:

if $\beta = 1$, then the increase in value from network integration did not occur and the volume of services provided is unchanged;

$\beta > 1$ - there is a synergistic effect;

$\beta < 1$ - only the number of consumers increases.

3. Model of the intensity of data flows in the integrated networks. Combining networks leads to changes in traffic in each network, which require decisions to effectively manage it [25]. To solve this problem, let's consider a hierarchical model, at the upper level of which the combined network is represented, the lower level is made up of separate subsystems (networks of operators before their merger) [26]. However, large operators have their own subnet level in their structure. Therefore, the tiered structure is formed, which occurs when combining networks of two or more operators (the first level of partitioning), which in turn implement unions of their own subnets (the second level) [27].

A multilevel data flow model is used to study the intensities of data flows in a unified network.

Suppose there are k_1 networks in the consolidated network (denote the network number $n = \overline{1,k_1}$). The composition of each network number n is given by a vector column

$$(c_{1n})^T = (c_{1n1},...,c_{1ni},...,c_{1nt}), \qquad (7)$$

where $c_{1ni} = \begin{cases} 1, & \text{if the i- th subnet is a part of the n- th net;} \\ 0, & \text{if the i- th subnet is not a part of the n- th net;} \end{cases}$, $\sum_{i=1}^{t} c_{1ni} \geq 1$, $\sum_{n=1}^{k_1} c_{1ni} = 1$.

From the vector columns c_{1n}, you can construct a matrix that defines the networking $C_1 = \|c_{1n}\|$. The total intensities of data flows transmitted between network nodes are determined by a matrix $A = \|\alpha_{ij}\|$, where α_{ij} is the total intensities of data flows from node *i* to node *j:*

You can calculate the intensities of data flows between networks:

$$A_1(C_1) = \|a_{1ij}\| = C_1 A (C_1)^T, \quad (8)$$

where a_{1ij} – total data flow intensity between node group number *i* and node group number *j* of the network structure :

$$a_{1ij} = \sum_{k=1}^{t} c_{1jk} \sum_{r=1}^{t} c_{1ir} a_{rk}. \quad (9)$$

Let's calculate the data flows of a single user request between networks. So for the query number *k* we get

$$A_{1k}(C_1) = \|a_{1kij}\| = C_1 A_k (C_1)^T, \quad (10)$$

where a_{1kij} – the total intensity of the request data stream number *k* between the node group number *r* and the node group number *j* of the network structure

$$a_{1kij} = \sum_{m=1}^{t} c_{1jm} \sum_{r=1}^{t} c_{1ir} a_{krm}. \quad (11)$$

The results obtained allow us to estimate the data flows, respectively, the loading of the structure-forming equipment of the networks at the first level as a whole and the flows of each request.

For the second layer of the structure, we similarly define: the matrix of association of the second layer subnets in the network of the first layer; the intensity of data flows between the second level subnets; the intensity of data flows of one request between the second level subnets.

The total intensity of data flows in the network of nodes of the first level:

$$A_{10}^{*} = \sum_{i=1}^{t} \sum_{j=1}^{t} a_{ij}. \quad (12)$$

The total intensity of data flows within the first tier networks:

$$A_1^{*}(A_1(C_1)) = \sum_{i=1}^{K_1} a_{1ii}, \quad (13)$$

where $A_1(C_1)$ – the total intensity of data flows that are transmitted only within the first tier networks.

Total intensity of data flows at the second level:

$$A_{20}^{*}(A_1(C_1)) = \sum_{i=1}^{k_1} \sum_{j=1}^{k_1} a_{1ij} - \sum_{i=1}^{k_1} a_{1ii}, \quad (14)$$

the total intensity of data flows within the second level subnets:

$$A_2^{*}(A_2(C_2)) = \sum_{i=1}^{k_1} a_{2ii}. \quad (15)$$

The absorption coefficients of the data flow intensities at each level are used as a measure of structure efficiency. Absorption coefficient for the first level:

$$\sigma_1(C_1) = \frac{A_1^{*}(A_1(C_1))}{A_{10}^{*}(A_1(C_1))}, \quad 0 < \sigma_1 < 1. \quad (16)$$

Absorption coefficient for the second level:

$$\sigma_2(C_2) = \frac{A_2^{*}(A_2(C_2))}{A_{20}^{*}(A_2(C_2))}, \quad 0 < \sigma_2 < 1. \quad (17)$$

Based on this model, the intensities of data flows between nodes, as well as the exchange of data between subnets to determine the load of communication channels and network equipment can be calculated.

Conclusions

The article discusses the strategies of development of modern telecommunication operators, caused by the increasing volume and heterogeneity of traffic of infocommunications networks.

The tendency of application of merger strategy of several operators is made, its advantages are considered.

A synergistic network effect model has been developed under the conditions of operator unification. The model allows us to evaluate the impact of changing the quantitative parameters of the network on the change of its economic efficiency indicators.

A three-level hierarchical network model is used to study traffic changes and the effectiveness of the combined network structure.

The direction of further research is to simulate network load with different characteristics of the technical structure to evaluate the effectiveness of a network conversion strategy development.

REFERENCES

1. Koval, V. V. (2015), "Socio-economic efficiency of development of innovation and investment activities of telecommunications operators", *Bulletin of the Volyn Institute of Economics and Management,* Vol. 13, P. 154-161.
2. Pevcin, P. (2018), "The Analysis of the Implementation of municipal Cooperation and Merger Strategies: Case Study for Slovenia", *Economics and Culture*, No. 15 (1), P. 15-21. DOI: https://doi.org/10.2478/jec-2018-0002
3. Hong ,Y., Li, Z. and Wang, J. (2019), "Business Value of Telecom Operators' Big Data", *Journal of Physics: Conference Series,* Vol. 1437, 2nd International Symposium on Big Data and Applied Statistics (ISBDAS2019) 20–22 September 2019, Dalian, China. DOI: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1437/1/012067

4. Smoliy, D. A. (2019), "Study of IMS capabilities for providing new services in infocommunication networks in the implementation of the FMC concept", *KPI them. Igor Sikorsky*, 124 p., available at : https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/31219/1/Smoliy_magistr.pdf
5. Granaturov, V. M., Litovchenko, I. V. (2010), *Communication Services Management*, Kyiv : Education of Ukraine, 254 p.
6. Ulset, S (2007), "Restructuring diversified telecom operators". *Telecommunications Policy,* No. 31 (3), P. 209-229. DOI: https://doi.org/10.1016/j.telpol.2007.01.006
7. Zhang, X., Du, Y., Li, Z. and Wang, Q. (2018), "Analyzing the operational performance migration of telecom operators", *China Communications*, Vol. 15, No. 6, P. 139-157.
8. Shostak, L. V., Pavlova, S. V. (2013), "Development of corporate strategy of telecommunications operators", *Efficient economy,* No. 4, available at : http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=1948
9. Makedon, V. V. (2011), "Strategies for the formation of integrated structures of international corporations as a result of mergers and acquisitions", available at : http://www.nbuv.gov.ua/portal/Soc_Gum/Vamsu_econ/2011_1/Makedon.htm
10. (2020), Statistics and market data on Technology & Telecommunications, available at : https://www.statista.com/markets/418/technology-telecommunications/
11. Gilka, U. L. (2009), "Features of competition in the telecommunications services market", *Scientific notes of the Ukrainian Research Institute of Communications*, No. 3, P. 11.
12. Stryi, L. A., Orlov, V. N., Petenko, I. V., Golubev, A. K. (2004), "Formation of the market of communication services of Ukraine", *Social management and management of information processes: a series of "Public Administration": Coll. Science. wash*., Donetsk : Don. ДУУ, No. 31, Vol. 5, P. 329 – 340.
13. (2020), *Intelligent Telecommunications*, available at : https://www.microsoft.com/ru-ru/industry/telecommunications
14. Filon, M. M. (2012), "Study of factors influencing the functioning of the structure of the telecommunications sector", *Problems of the system approach in economy: coll. Science. pr.*, Kyiv : NAU, No. 41, P. 163–170.
15. Vlasova, O. A. (2009), "Building a Value Management System for a Cellular Company: Practical Aspects", *Economic analysis: theory and practice,* No. 36, P. 81-91.
16. Tkalich, O. P. et al. (2013), "Improving the efficiency of using the corporate network according to the BYOD concept", *Problems of creation, testing, application and operation of complex information systems*, No. 7, P. 77-87.
17. Davydovskyi, Y., Reva, A. and Malyeyeva, O. (2018), "Method of modelling the parameters of data communication network for its upgrading", *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, No. 4 (6), P. 15-22. DOI: https://doi.org/10.30837/2522-9818.2018.6.015
18. Zhulego, V. (2008), "Modeling Mergers and Acquisitions of Companies. A few hypotheses", *Economic strategies*, No. 8, P. 132-140.
19. Kosenko ,V. (2017), "Mathematical model of optimal distribution of applied problems of safety-critical systems over the nodes of the information and telecommunication network", *Advanced Information Systems*, Vol. 1, No. 2, pp. 4–9, doi: http://doi.org/10. 20998/2522-9052.2017.2.01
20. Svyrydov, A., Kuchuk, H., Tsiapa, O. (2018), "Improving efficienty of image recognition process: Approach and case study", *Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2018*, pp. 593-597, DOI: http://dx.doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409201
21. Kovalenko, A. and Kuchuk H. (2018), "Methods for synthesis of informational and technical structures of critical application object's control system", *Advanced Information Systems*, Vol. 2, No. 1, pp. 22–27, DOI: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04
22. Sviridov, A., Kovalenko, A. and Kuchuk, H. (2018), "The pass-through capacity redevelopment method of net critical section based on improvement ON/OFF models of traffic", *Advanced Information Systems*, Vol. 2, No. 2, pp. 139–144, DOI: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.24
23. Kovalenko, A.A., Kuchuk, G.A. and Ruban I.V. (2018), "The use of timelines for approximating the length of queues of computer networks", *The current state of research and technology in industry*, No. 2(4), pp. 12–18. – DOI: http://doi.org/10.30837/2522-9818.2018.4.012
24. Koval, V. V. (2013), "Strengthening the network effect of the synergy of consolidation of the subjects of the infocommunications market", *Economic innovations,* No. 55, P. 61-72.
25. Davydovskyi, Yu. Reva, O. Malyeyeva, O. Kosenko V. (2020), "Application of the sliding window mechanism in simulation of computer network loading parameters", *Advanced Information Systems*, Vol. 4, No. 1, P. 16-22. DOI: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.1.03
26. Mukhin, V., Kuchuk, N., Kosenko, N., Artiukh, R., Yelizyeva, A., Maleyeva, O. etc. (2019), "Decomposition Method for Synthesizing the Computer System Architecture", *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 938, P. 289–300. Springer, Cham. DOI https://doi.org/10.1007/978-3-030-16621-2_27
27. Dai, R. and Tang, S. (2009), "Analysis on Vertical Integration of Telecom Operators", *International Conference on Management of e-Commerce and e-Government*, Nanchang, P. 277-280.

Received (надійшла) 25.02.2020
Accepted for publication (прийнята до друку) 22.04.2020

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Малєєва Ольга Володимирівна – доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна;
Olga Malyeyeva – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Computer science and information technologies, National Aerospace University "KhAI", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: o.maleyeva@khai.edu; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-9336-4182.

Косенко Віктор Васильович – доктор технічних наук, професор, помічник директора з наукової роботи, ДП "Південний державний проектно-конструкторський та науково-дослідний інститут авіаційної промисловості", Харків, Україна;

Viktor Kosenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Assistant Director for Research, State Enterprise "National Design & Research Institute of Aerospace Industries", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: kosv.v@ukr.ua; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-4905-8508.

Давидовський Юрій Костянтинович – аспірант кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна;
Yurii Davydovskyi – graduate student of the Department of Computer science and information technologies, National Aerospace University "KhAI", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: davidovskyi2350@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-2813-4169.

Боєв Дмитро Олександрович – аспірант кафедри інформаційних технологій проектування, Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна;
Dmitriy Boiev – graduate student of the Department of Information Technologies Design, National Aerospace University "KhAI", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: d.boev@khai.edu; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-9690-8352.

Аналіз синергії факторів та моделі стратегії злиття в дослідженні ефективності діяльності операторів зв'язку

О. В. Малєєва, В. В. Косенко, Ю. К. Давидовський, Д. О. Боєв

Анотація. Предметом дослідження в статті є процеси вибору стратегії для підвищення ефективності діяльності операторів зв'язку з огляду на тенденції зростання мультитрафіку в мережах передачі даних. **Мета** роботи – аналіз синергії факторів і розробка моделей трафіку мереж передачі даних при реалізації стратегії злиття операторів зв'язку. В статті вирішуються наступні **завдання:** аналіз стратегій розвитку операторів зв'язку; побудова мережної моделі синергетичного ефекту при реалізації стратегій розвитку; розробка моделі інтенсивності потоків даних в об'єднаних мережах. Використовуються такі **методи** дослідження: статистичного та системного аналізу, причинно-наслідкові моделі, моделі математичного програмування та векторно-матричні моделі. Отримано наступні **результати**: Розглянуто тенденції розвитку мультисервісних послуг у сфері інфокомунікацій. Наведено основні стратегії розвитку компаній з надання послуг зв'язку. Показано, що стратегії злиття та поглинання сьогодні виступають засобом інтеграції необхідних ресурсів, що сприяє досягненню конкурентних переваг. Для прийняття рішення з інвестування у стратегії розвитку застосовується математична модель лінійного програмування. Розглянуто завдання оцінювання ефективності розвитку в напрямку розширення кількості споживачів послуг. Сформована мережна модель у вигляді причинно-наслідкової діаграми для дослідження взаємовпливу факторів обсягу продажів. Розглянуто економічний прояв синергетичного ефекту компаній при реалізації стратегії злиття. Для дослідження інтенсивностей потоків даних в об'єднаній мережі використовується модель потоків даних багаторівневої структури. **Висновки:** Внаслідок зростаючих обсягів та неоднорідності трафіку інфокомунікаційних мереж операторами зв'язку застосовуються стратегії злиття для об'єднання ресурсів управління мережею. При цьому виникає синергетичний ефект факторів, що впливають на обсяги продажів послуг. Дослідження змін трафіку та ефективності структури об'єднаної мережі проводиться на основі трирівневої ієрархічної моделі. Напрямком подальших досліджень є моделювання навантаження мережі з різними характеристиками технічної структури для оцінки ефективності стратегії реінжинирінгу.

Ключові слова: оператори зв'язку; мережі передачі даних; стратегії розвитку; вплив факторів; інтенсивність трафіку.

Анализ синергии факторов и модели стратегии слияния в исследовании эффективности деятельности операторов связи

О. В. Малєєва, В. В. Косенко, Ю. К. Давыдовский, Д. А. Боєв

Аннотация. Предметом исследования в статье являются процессы выбора стратегии для повышения эффективности деятельности операторов связи с учетом тенденции роста мультитрафика в сетях передачи данных. **Цель** работы - анализ синергии факторов и разработка моделей трафика сетей передачи данных при реализации стратегии слияния операторов связи. В статье решаются следующие **задачи:** анализ стратегий развития операторов связи; построение сетевой модели синергетического эффекта при реализации стратегий развития; разработка модели интенсивности потоков данных в объединенных сетях. Используются такие **методы** исследования: статистического и системного анализа, причинно-следственные модели, модели математического программирования и векторно-матричные модели. Получены следующие **результаты:** Рассмотрены тенденции развития мультисервисных услуг в сфере инфокоммуникаций. Приведены основные стратегии развития компаний по предоставлению услуг связи. Показано, что стратегии слияния и поглощения сегодня выступают средством интеграции необходимых ресурсов, способствуют достижению конкурентных преимуществ. Для принятия решения по инвестированию в стратегии развития применяется математическая модель линейного программирования. Рассмотрены задачи оценки эффективности развития в направлении расширения количества потребителей услуг. Сформирована сетевая модель в виде причинно-следственной диаграммы для исследования взаимовлияния факторов объема продаж. Рассмотрено экономическое проявление синергетического эффекта компаний при реализации стратегии слияния. Для исследования интенсивностей потоков данных в объединенной сети используется модель потоков данных многоуровневой структуры. **Выводы:** В результате возрастающих объемов и неоднородности трафика инфокоммуникационных сетей операторами связи применяют стратегии слияния для объединения ресурсов управления сетью. При этом возникает синергетический эффект факторов, влияющих на объемы услуг. Исследование изменений трафика и эффективности структуры объединенной сети проводится на основе трехуровневой иерархической модели. Направлением дальнейших исследований является моделирование нагрузки сети с различными характеристиками технической структуры для оценки эффективности стратегии реинжиниринга.

Ключевые слова: операторы связи; сети передачи данных; стратегии развития; влияние факторов; интенсивность трафика.

Methods of information systems protection

UDC 003.26 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.2.20**

V. Pevnev, Yu. Voikov

National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine

RESEARCH AND PROTOTYPING METHODS OF STEGANOGRAPHY USING MOSAIC

Abstract. The paper considers the possibility of using a mosaic composed of many miniature images to hide the fact of text information transmission. The results of the study of optimal mosaic construction when using steganographic methods of hiding information are presented. The use of the proposed algorithms implies the use of cryptographically secure pseudorandom number generator with dynamically changing parameters for concealing information. The generators are used to determine the location of information bits in a certain mini-images, as well as in a specific pixels and color channels. Using the proposed algorithm, no more than twenty-five percent of the color channels are changed, provided that one bit per color is used. This paper is supplemented with illustrations and examples of how the algorithm works.

Keywords: mosaic; steganography; pseudo-random sequence generators; pixel; color channel; information bit.

Introduction

Every day IT increases influence in all of the sides of our life. Even in Art it becomes more and more popular and helps to create new masterpieces. One of the examples is a painting but how it can help to create a picture? There is a new trend that became popular last years – a photographic mosaic. It is a compilation of small photos grouped together in a way, that they look like a certain big picture. You can see the example of a photographic mosaic bellow on the Fig. 1.

Fig. 1. A photographic mosaic made from different small pictures

To implement this concept, a certain set of images of the same size is used and a mosaic of existing images is formed on the basis of the original image. There are many different principles and parameters that provide effective comparison, and choose the most appropriate variant from all possible by comparing it with the original [1].

It is necessary to understand that it is impossible to achieve a hundred percent match, though it is not required. One of the main ideas of the mosaic is that the viewer is aware that any large composition consists of many small parts and each of them is a complete work.

It should also be noted that the issue of user data security and confidentiality is more pressing than ever. In recent years, many ways of intercepting transmitted information have been created. This is due to the fact that the information is in the least secure state at the very moment of transmission from one hand to another, which greatly simplifies the work for malicious users.

There are various ways of combating unauthorized access to information, but steganography (the implicit transfer of information) is particularly notable. It allows you to hide the fact of data transfer, so that other users will not even know that the information was successfully transmitted. However, in order to implement this approach, it is necessary that the sender and the receiver have previously accepted arrangements. For example, when hiding information in an image, it is necessary that all participants have the original image or know how the used algorithm of steganorgaphy works.

The obvious problem with this method is the possibility of information leakage about the method of hiding data, which will instantly compromise all the messages transmitted in this way. Steganography is also easily recognized by simple comparison algorithms, which can negate the whole point of hiding information in another object. In such a case, you can additionally secure the transmitted information using encryption algorithms, or create an algorithm that allows you to use the transmitted object not only as a container for information, but also as an encryption tool. Thus, even if the fact of transfer is known, the information cannot be read by a third party.

This paper considers various methods for comparing a set of pixels, analysis and algorithm for hiding information in a mosaic, as well as a description of the requirements for a pseudo-random sequence generator.

Image analysis

All of the raster type digital images and displays consist of small dots. Typically, they have particular structure – RGB [1]. It stands for Red, Green and Blue. A set of RGB colors forms one point that is called a "pixel" and image is made of rows and columns of pixels. Then pixels are placed a matrix with a size n by m (Fig. 2).

© Pevnev V., Voikov Yu., 2020

1,1	…	1,n
…		
m,1	…	m,n

Fig. 2. Pixel structure of a RAW(uncompressed) digital raster image where n is column number and m is row number

The combination of these colors can give us majority of existing color that can be recognized by human's eye. The only difference is the number of bits that are used to store the value of each color. The bigger amount of values leads to a wider color range we get. It is also called a "color depth", which is easily shown on smooth gradient transitions. Commonly, there are 8 bits for each color so it gives us the following result:

$$8b \cdot 3 = 24b = 16777216 \quad (1)$$

Based on this structure there are many different types of image analysis but here would be described only easy and effective ones. It is important due to service requirements. It should be efficient and fast enough so user won't have to wait a lot of time until the output image is done. Using mosaic in stenography gives us big advantage of not sending the original image to the receiver. Since the database contains all of the images used in the mosaic it can be easily compared with originals. The original image is divided into patches, which can hold from 1 pixel to several hundreds or even thousands, in the end each patch will be replaced by the most suitable image from the database. Choosing how many pixels a patch will hold directly affects the quality and size of the mosaic (Fig. 3).

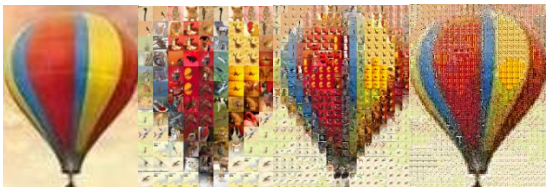


Fig. 3. Original image and mosaics with different patch size

Next step is to choose the most appropriate images for the database in order to replace created patches. The most accurate is a pixel-by-pixel comparison, but it takes too much time, moreover, it is almost impossible to find the perfect picture for the required patch, so it is necessary to calculate the overall picture characteristic.

All images from the database are processed and the required metadata for each of them is calculated, allowing comparison by properties that we need. Then, the same metadata is calculated for each patch of the original image. For each patch a certain number of best images is selected, after which the patch and these images are further split into 4 parts, each of which as a result receives its own metadata and another comparison is made. The results select the most suitable image from the available ones. There are several criteria for comparing the similarity of images: Saturation; Contrast; Average values of color channels; Boundaries of color transitions (Edges).

Perhaps the main way to compare pixels similarity is measuring mean values of the color channels and calculating the difference, the rest help to improve the accuracy of the final selection. For example, partial coincidence of borders of transitions of colors allows to achieve selection not only on color, but also on various lines, figures and the original image (Fig. 4).

Fig. 4. Grey scale image and applied edge detection filter image [1]

One of the main ideas of using stenography in combination with image mosaics is that there is no need to convey the original image. All original images are stored in the application database.

As a source of images, you can use any set of small pictures of the same shape. The easiest to use are square images with the side equal to 2^n pixels.

This size allows you to quickly make calculations on changing the size of the image without the need for additional cropping of the photo.

Steganography

Steganographic system is an association of methods and algorithms used for creation of the hidden channel for information transfer [2]. In other words, steganography refers to the process of information transfer, which hides the very fact of transfer.

The majority of experts in the field of steganography, describe three groups of methods with different approaches to the implementation of the implicit information transfer. These are the following methods [3-7]: usage of special properties of computer data formats; usage of less important audio and visual information; linguistic steganography.

Methods based on the use of special properties of computer formats are divided into groups [8]: computer data formats reserved for field expansion; special formatting text files; hiding in unused places of CD-disk; removing the identifying header file. All researchers pay great attention to the methods of using redundancy of audio and visual information. At the same time, audio steganography methods include [9]: LSB (Least Significant Bit); even coding; phase coding; spread spectrum method. In a general case, the following scheme represents steganographic system work (Fig. 5).

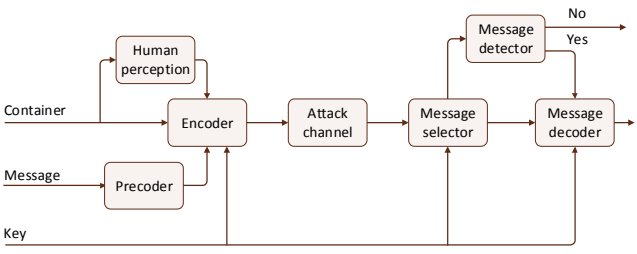


Fig. 5. Steganographic system work scheme

It contains the following elements: ***Human perception*** – actions or algorithms that source data which has minor influence on human perception (ability to see or hear) in order to make the message existence almost invisible; ***Precoder*** – changes the message to a suitable for encoder form; ***Encoder*** – encodes the message into container; ***Attack channel*** – data transfer channel; ***Message selector*** – selects the data where the message could be stored; ***Message detector*** – detects if the message it is hidden inside data; ***Message decoder*** – decodes the message from data.

Depending on container we need to know which data we can modify so a user will not recognize any changes. Then we can modify message if encoder requires different format of data. After it, encoder inserts message into the container in a way that it became invisible for a user.

Data that contains hidden message can be damaged by channel noise or other reasons so it might be necessary to use noise-resistant coding algorithm.

When encoding is completed the container with hidden message goes to untrusted channel. We assume that anyone can see our container there. After receiver gets the container, message selector retrieves the data where the message could be stored. Then message detector analyses if this data has a hidden message and id so decoder convert it to original message.

Like most objects that were created from real-world information, photographs are not of ideal quality, there are always all kinds of noises and artifacts, so they are widely used in steganography for the implicit transmission of information. However, in order to record information in an image, it is necessary to change it, which, if implemented incorrectly, can be visible even to an average user. In order to avoid this situation, it is necessary to understand what effect on the final image will have a change of a certain bit in the color channel (Fig. 6).

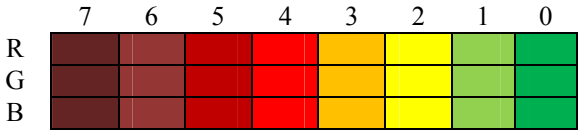


Fig. 6. Impact of changes in bits on the final image

Therefore, changing a lower bit has almost no effect on the final result, and vice versa, changing a higher bit can have a significant effect on the final image. On this basis, it can be concluded that the safest bit is the lowest bit, but if more information needs to be packed, the next highest bit can be used.

Encoding

One of the key features of the steganography algorithm is how and in what sequence it places information in the container. Thus, when information is written sequentially to the lower bits of pixels in a row, the information can be easily read as soon as the user realizes that the picture is different from the original.

For reliable data protection, a distributed recording of information across all pixels with a normal distribution of random values is the best option (Fig. 7). This approach helps to minimize the risks of encrypted information disclosure. You can also use the following method to ensure better information privacy [10].

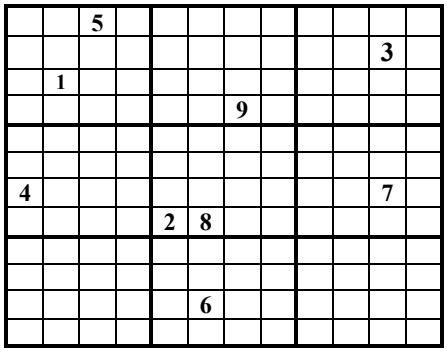


Fig. 7. Example of a distributed recording with normal distribution probability

When converting a message to a bit sequence, the number of zeros and units is compared. If the number of units is greater than the number of zeros, the message is inverted (Fig. 8). Then a pseudorandom bit sequence is generated. The bits of the original container data sequence are selected based on the indexes of the PRBS elements whose value is equal to zero. The message bit values are written to the container bits using the XOR logical operation as shown below (Fig. 9).

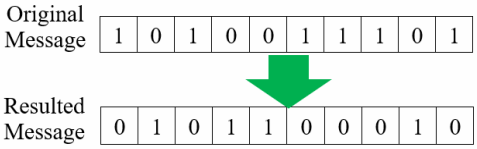


Fig. 8. Example of message changing

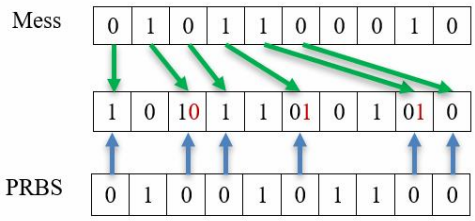


Fig. 9. Encoding algorithm example

This way, in the worst-case scenario, the number of modified bits will not exceed twenty-five percent of the bits used for encoding.

However, a random sequence of sufficient length and stability must be generated to allocate the bits.

Pseudorandom number generator

Generators of true random numbers are usually based on natural processes, such as pickups in the transmission channel, so that they can produce a crypto-resistant sequence of any length, but they cannot reproduce the same sequence a second time.

The most common types of PRBS generators are shift register-based and congruent generators. The congruent generators are based on numerical sequences, in which each member depends on one or more previous ones. Generators based on shift registers are based on the generating polynomial. These generators are not

crypto-resistant enough, because they are easy enough to hack, but have a big advantage in simplicity and speed of operation.

Successful use of a generator directly depends on its crypto resistance, so it is critical for a reliable generator. Improved generators are perfectly suited for this task. The main features of these generators are the use of dynamically changing parameters. Depending on the type of generator it can be parameters a and c for the congruent generator(2) and generating polynomials for the generator based on the shift registers:

$$X_{n-1} = (aX_n + c) \bmod m . \quad (2)$$

In addition to using dynamic parameters to improve the cryptographic stability of the output sequence, there are a modification of the algorithm of generating PRBS, which consists in using the operation XOR over the generated sequences of a certain length, obtained from two registers with different digit capacity. The used registers change their parameters at least every 2*N* - 1 bit, where N is the product of the two registers' digit capacity.

Conclusion

In the paper we investigate the possibility of using steganography in combination with a mosaic of miniature images for covert information transfer. The crucial parameters of the images that most affect the selection of the most suitable image for a certain area of the original drawing have been described. It was pointed out that the main criterion is the average value of the color channel. The algorithm of division of the original image into patches and the system of rounds of selection of the most suitable pictures to replace the selected area were also described, and examples were given.

The described approach allows to achieve a reliable result and also has flexibility that allows to easily add various criteria for evaluation of the image, as well as choose in which round it will be applied.

In such a way, it is possible to perform resource-intensive operations on the most promising variants of pictures only. The basic principles of steganography for understanding the significance of the next steps were presented, and the variant of hiding information in a mosaic was suggested and described. This method allows to achieve no more than 25 percent of lower bit changes, which is about 3.125 percent of all information, provided that the lower bits are fully filled with information. In the real situation, when encoding a message is used a significantly smaller number of bits, which in turn dramatically reduces the percentage of changes in the mosaic data, and visual detection of the transfer is almost impossible.

Also, the principle of uniform pseudo-random distribution of information bits throughout the mosaic makes it almost impossible to use brute-force attack to evaluate the hidden message. The concept of using the PRBS generator was described, as well as security problems that arise when using simple implementations of generators that do not have sufficient crypto resistance. To generate and restore a pseudo-random sequence, it was proposed to use an improved generator with dynamic parameters [2]. It has significant resistance to known crypto attacks, which allows its use in modern cryptosystems. As a result, the proposed system allows you to secretly transfer information inside the mosaic, and has sufficient protection to protect information from unauthorized reading in case of detection of the transfer of information.

The presented steganographic algorithm can be easily adapted to work with usual raster images, sound files and other types of data which could be presented as an array of numerical values.

References

1. Inad, Aljarrah, Abdullah, Al-Amareen, Abdelrahman, Idries and Osama, Al-Khaleel (2014), "Image Mosaicing Using Binary Edge Detection", *Proc. of the Int. conf. on Comp. Technology and Information Management*, Dubai, UAE, 2014, pp. 187-190, available to: https://www.researchgate.net/figure/Gray-scale-image_fig1_261551383
2. Pevnev, V. and Frolov, V. (2018), "Results of studies of generators of pseudorandom sequences with dynamic parameters", *Control, navigation and communication systems*, Vol. 4 (50), pp. 139-143, DOI: https://doi.org/10.26906/SUNZ.2018.4.139.
3. Neil F., Johnson, Zoran, Duric and Sushil, Jajodi (2012), [Information Hiding: Steganography and Watermarking-Attacks and Countermeasures, Springer Science & Business Media, 137 p.
4. Abdelrahman Desoky, *Noiseless Steganography: The Key to Covert Communications*, CRC Press, 2016 – 300 p.
5. Jessica, Fridrich (2010), *Steganography in Digital Media: Principles, Algorithms, and Applications*, Cambridge University Press, 437 p.
6. Frank Y., Shih (2017), *Digital Watermarking and Steganography: Fundamentals and Techniques*, CRC Press, 200 p.
7. Frank Y., Shih (2017), *Multimedia Security: Watermarking, Steganography, and Forensics*, CRC Press, 423 p.
8. Kazuhiro, Kondo (2012), *Multimedia Inf. Hiding Technologies and Methodologies for Controlling Data*, IGI Global, 497 p.
9. Barney, Warf (2018), *The SAGE Encyclopedia of the Internet*, SAGE, 1120 p.
10. Pevnev, V., Novakov, Y., Tsuranov, M. and Kharchenko V. (2017), "The Method of Data Integrity Assurance for Increasing IoT Infrastructure Security", *Proc. of the 31 th Int. Conference on Information Technologies* (InfoTech-2017), pp. 27-36.

Received (Надійшла) 10.03.2020
Accepted for publication (Прийнята до друку) 13.05.2020

Відомості про авторів / About the Authors

Пєвнєв Володимир Яковлевич – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки, Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна;
Volodymyr Pevnev– Candidate of Technical Science, Associate Professor, Associate Professor of Computer Systems, Networks and Cyber security Department, National Aviation University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: v.pevnev@csn.khai.edu; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-3949-3514.

Войков Юрій Володимирович – магістрант кафедри комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки Харківського національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського, Харків, Україна;
Yurii Voikov – Master's Degree in Computer Systems, Networks and Cyber Security, Kharkiv National Aerospace University. M.E. Zhukovsky, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: y.voykov@student.csn.khai.edu; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-0926-4833

Дослідження та прототипирування методів стеганографії з використанням мозаїки

В. Я. Півнєв, Ю. В.Войков

Анотація. Предметом вивчення в статті є можливість використання мозаїки в сукупності зі стеганографічними алгоритмами для прихованої передачі повідомлення. З кожним днем IT збільшує вплив на всі сторони нашого життя. Навіть в мистецтві він стає все більш популярним і допомагає створювати нові шедеври. З'явився новий напрямок, що стало популярним в останні роки - фотографічна мозаїка. Це збірка маленьких фотографій, згрупованих так, щоб вони виглядали як якась велика картина. **Мотивація**. В останні роки було створено безліч способів перехоплення інформації, що передається. Це пов'язано з тим, що інформація в момент передачі з одних рук в інші знаходиться в найменш безпечному стані, що значно спрощує роботу для зловмисників. Стеганографія дозволяє приховати факт передачі даних, так що інші користувачі навіть не знатимуть, що інформація була успішно передана. Однак для реалізації такого підходу необхідно, щоб відправник і одержувач попередньо мали домовленості, такі як наявність у обох учасників однакової оригінальної картинки. Очевидною проблемою цього методу є можливість витоку інформації про спосіб приховування даних. **Метою** цього дослідження є отримання алгоритму приховування повідомлення всередині мозаїки, що забезпечує мінімальну видимість, надійний захист даних навіть у тому випадку, якщо зображення мозаїки і алгоритм відомі зловмиснику і в першу чергу не потребує відправки оригінального зображення. **Результати**. Описаний підхід дозволяє добитися якісного результату, а також має значну гнучкість, що дозволяє легко додавати різні критерії оцінки зображення, а також вибирати в якому раунді воно буде застосовуватися. Таким чином можна виконувати ресурсомісткі операції тільки над найбільш перспективними варіантами картинок. Запропоновані алгоритми мають на увазі використання криптографічно-безпечного генератора псевдовипадкових чисел з динамічно змінними параметрами для приховування інформації. Генератори псевдо-випадкової послідовності використовуються для визначення місця розташування інформаційних бітів в певних міні-зображеннях, а також в окремих пікселях і колірних каналах. При використанні запропонованого алгоритму змінюється не більше двадцяти п'яти відсотків колірних каналів за умови, що використовується один біт на колір. **Висновки**. Запропонована система дозволяє приховано передавати інформацію в мозаїці, а також володіє достатньою захищеністю для захисту інформації від несанкціонованого читання в випадки виявлення факту передачі інформації. У поєднанні з даним підходом можна використовувати додатково будь-який алгоритм шифрування для забезпечення ще більшої захищеності даних. Представлений алгоритм кодування і приховування даних можна легко адаптувати для роботи зі звичайними растровими зображеннями, звуковими файлами та іншими типами даних, які представлені у вигляді масиву значень.

Ключові слова: мозаїка; стеганографія; генератор псевдо-випадкової послідовності; піксель; канал кольору; інформаційний біт.

Исследование и прототипирование методов стеганографии с использованием мозаики

В. Я. Певнев, Ю. В. Войков

Аннотация. Предметом изучения в статье является возможность использования мозаики в совокупности со стеганографическими алгоритмами для скрытной передачи сообщения. С каждым днем IT увеличивает влияние на все стороны нашей жизни. Даже в искусстве он становится все более популярным и помогает создавать новые шедевры. Появилось новое направление, ставшее популярным в последние годы - фотографическая мозаика. Это сборник маленьких фотографий, сгруппированных так, чтобы они выглядели как некая большая картина. **Мотивация**. В последние годы было создано множество способов перехвата передаваемой информации. Это связано с тем, что информация в момент передачи из одной рук в другие находится в наименее безопасном состоянии, что значительно упрощает работу для злоумышленников. Стеганография позволяет скрыть факт передачи данных, так что другие пользователи даже не будут знать, что информация была успешно передана. Однако для реализации такого подхода необходимо, чтобы отправитель и получатель предварительно имели договорённости, такие как наличие у обоих участников одинаковой оригинальной картинки. Очевидной проблемой с этим методом является возможность утечки информации о способе сокрытия данных. **Целью** этого исследования является получение алгоритма скрытия сообщения внутри мозаики, обеспечивающего минимальную видимость, надежную защиту данных даже в том случае, если изображение мозаики и алгоритм известны злоумышленнику и в первую очередь не требующего отправки исходного изображения. **Результаты**. Описанный подход позволяет добиться качественного результата, а также обладает гибкостью, что позволяет легко добавлять различные критерии оценки изображения, а также выбирать в каком раунде оно будет применяться. Таким образом можно выполнять ресурсоёмкие операции только над наиболее перспективными вариантами картинок. Предлагаемые алгоритмы подразумевают использование криптографически-безопасного генератора псевдослучайных чисел с динамически изменяющимися параметрами для сокрытия информации. Генераторы псевдо-случайной последовательности используются для определения местоположения информационных битов в определённых мини-изображениях, а также в отдельных пикселях и цветовых каналах. При использовании предложенного алгоритма изменяется не более двадцати пяти процентов цветовых каналов при условии, что используется один бит на цвет. **Выводы**. Предложенная система позволяет скрытно передавать информацию в мозаике, а также обладает достаточной защищенностью для защиты информации от несанкционированного чтения в случаи обнаружения факта передачи информации. В сочетании с данным подходом можно использовать дополнительно какой-либо алгоритм шифрования для обеспечения ещё большей защищённости данных. Представленный алгоритм кодирования и скрытия данных можно легко адаптировать для работы с обычными растровыми изображениями, звуковыми файлами и другими типами данных, которые представлены в виде массива значений.

Ключевые слова: мозаика; стеганография; генератор псевдослучайной последовательности; пиксель; цветовой канал; информационный бит.

UDC 003.26 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.2.21**

V. Pevnev, Yu. Trehub

National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine

ANALYSIS AND RESEARCH OF WELL-KNOWN ORCHESTRATION SYSTEMS FOR THE CONSTRUCTION OF MICROSERVICE INFRASTRUCTURE

Abstract. Modern orchestration systems are being studied. Using different virtualization methods is it a good way to reduce construction time, equipment costs and support system operations during infrastructure construct. The article provides a detailed analysis of existing virtualization tools. A comparative analysis of modern solutions shows that the Kubernetes tool is one of the best tools for orchestration. The features of sharing orchestration systems together with different Cloud providers are presented in the article, comparisons of the cloud providers themselves are presented too.

Keywords: virtualization technologies; orchestration systems; Docker; Docker Swarm; Kubernetes; Amazon Web Services, Google Cloud Platform, Microsoft Azure.

Introduction

Due to the development of information technology, the amount of data processed is increasing every day. That is why the problems of choosing a reliable system for storing and processing user data are also increasing.

Based on the requirements for guarantee systems, we can conclude that it is necessary to ensure the availability and integrity of the information that circulates in different information systems. Methods for ensuring the integrity of information are given in sufficient detail in [1].

Today we have many infrastructure systems, but one of the most popular is Cloud systems. The choice of the system depends on the requirements that a particular organization applies to own IT infrastructure. A comparative analysis of the market share of leading cloud providers shows that 35% of the market is owned by AWS-based systems, 11% by Microsoft Azure and 7% by Google Cloud Services. It was noted that growth was an average of about 2% over 2018, with only Microsoft Azure rising to 3% [2]. All of these providers allow users to create reliable and easily scalable infrastructure.

However, any infrastructure requires a large amount of resources. That is why it is necessary to use solutions that will help to use these resources efficiently, without losing all the advantages provided by Cloud provider. The virtualization helps users with creating a secure, reliable and scalable infrastructure.

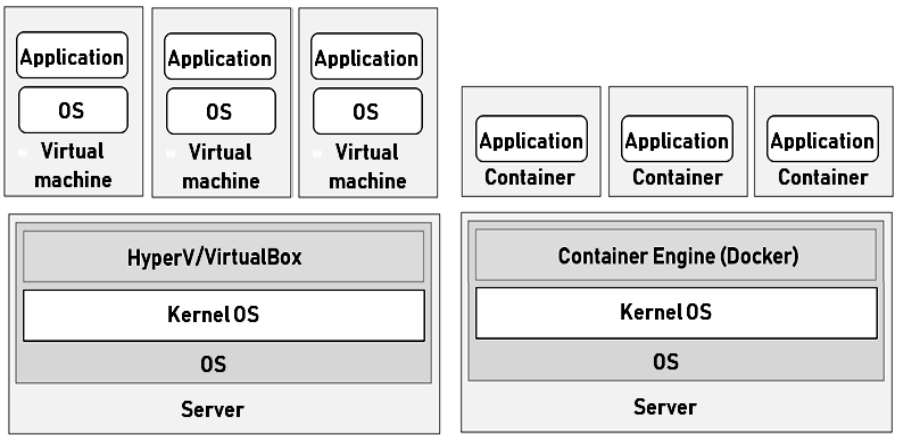
The main goal of the article is the comparable analysis of well-known orchestration systems and choosing the most secure and reliable system for the construction of microservice infrastructure.

Analysis of orchestration systems

The main virtualization technologies are hypervisor-based virtualization (eg, Hyper-V, Virtual Box, VMware) and container virtualization (eg, Docker) (Fig. 1).

Hypervisors are hardware-level virtualization. There is a layer between the host and guest OSs that emulates hardware.

The method of hypervisor virtualization have some disadvantages – the decrease in efficiency and idle computing resources, the complexity of porting various applications between virtual operating systems, the ability to lose all virtual machines in the event of failure of one hypervisor on which they are installed, etc. [2].



a b

Fig. 1. Virtualization technologies (a – virtualization using hypervisor, b – container virtualization)

Container virtualization is a virtualization at the operating system level, not hardware level, when each guest OS uses the same kernel (and in some cases, other parts) as the host OS. This gives the containers a big advantage: they are smaller and more compact in hypervisional guest environments. Container

© Pevnev V., Trehub Yu., 2020

virtualization uses the capabilities of the kernel to create an isolated environment for processes. Unlike hypervisor-based virtualization, containers do not receive their own virtual hardware, but use host operating system hardware [3]. One of the features of containers is that they can be managed (orchestrated) as a cluster of multiple applications. A system that is a container cluster is called a container orchestration system. The most popular container management systems (or container orchestration systems) are: Kubernetes and OpenShift. There are also other container orchestration systems, such as: Amazon Web Services (AWS) Elastic Compute Cloud (EC2) Container Service (ECS) and others.

Docker is a software platform for quickly developing, testing, and deploying applications in containers. Each container includes everything that you need for the program: libraries, system tools, code, and runtime. Using Docker allows you to use applications faster and more efficiently, standardizes the operations performed by the applications and optimizes the use of resources. With Docker, users get an object that can be run on any platform with high reliability. But part of the professional systems engineers is to avoid using Docker in production because it is not stable tool [4]. Today, Docker is not a reliable tool for using in production, but it continues to be used by many customers.

Docker Swarm is a tool for clustering and managing Docker containers [5]. Clustering is an important function of container technology because it creates a common group of nodes that can be used to achieve a reliability and resiliency, when one of the nodes fails. Containers and nodes are controlled through a manager node, which organizes and plans containers at other worker nodes [6]. Docker Swarm is tightly works with Docker, and developers can easily customize it without installing additional software services.

Kubernetes is an open source platform designed to deploy, scale and manage a Docker or rkt container cluster as a single system across multiple hosts. The project was started by Google in 2014, it has invested one and a half decades of experience with containers [7]. Now Kubernetes has an active community and is supported by companies such as Microsoft, RedHat, IBM and Docker. Kubernetes has many advantages over other container orchestration systems. It speeds up the development process, simplifies and automates deployments and sequential updates [8]. It also manages applications and services, allowing to build a resilient infrastructure that works without downtime. Kubernetes allows to recover lost containers (in the event of a container failure) or to find and restart existing containers on another node (in case of a node loss).

Kubernetes clusters can run on EC2 and integrate with other Amazon services, such as Amazon Elastic Block Storage, Elastic Load Load Balancing, Auto Scaling, etc. Kubernetes is still popular because has flexible architecture, open source innovations [9]. Kubernetes has become one of the most popular orchestration systems, ranked first on the market and used by many real projects with great success [8], [9].

Comparative analysis of the Docker Swarm and Kubernetes orchestration systems

Comparative analysis of Kubernetes and Docker Swarm shows that each container orchestrator has own advantages and disadvantages. If you need a quick installation and simple configuration requirements, Docker Swarm can be a good solution. If the application is complex and uses hundreds of thousands of containers in production, then Kubernetes should be selected. Although both orchestrators have the same functions, but they have a fundamental differences between their work. Below are the biggest differences between these two platforms.

Cluster installation and configuration. Docker Swarm is much easier to set up, it doesn't take a lot if time to deploy a container group. Along with ease of use, Swarm also provides flexibility by allowing any new node to join existing cluster as manager or employee, and move or manage the nodes and their roles. Each node encrypts the data before sharing with neighboring nodes. Shared data encryption keys are stored in the master nodes inside Swarm, only hosts in that cluster can access cluster management.

Kubernetes requires several manual configurations to connect components. Before starting the Kubernetes should also know a lot of the cluster configuration, as the IP addresses of the nodes, which role each node must take, and how many nodes they have in common. Kubernetes allows you manually manage settings and access to containers from the outside. Also, there is a Pod Network Communications Policy the main load is on pods, that contained of one or more containers that are deployed together. Kubernetes assigns each pod an IP address that can be routed from all other pod, even through major servers. Kubernetes network policies set access permissions for pod groups, similar to security groups, which are used to control access to VM instances.

Customize the container. The Swarm API provides much of the functionality from Docker, but does not cover all of commands. It supports many tools that work with Docker, but if the Docker API lacks a specific operation, there is no easy way to get around it with Swarm. Kubernetes uses own client definitions, APIs and YAML files, which are different from the standard docker equivalents. Using them, you can easily manage containers and the Kubernetes cluster.

Scalability. Docker Swarm deploys containers faster than Kubernetes in very large clusters and high clustering stages, allowing you to quickly respond to scaling as needed. You can run new replicas with one upgrade command. The complexity of Kubernetes stems from providing a unified API suite and reliable cluster state guarantees that slow container deployment and scaling.

Accessibility. Kubernetes and Docker Swarm provide high availability of replication services. The same service is deployed to multiple nodes to provide redundancy. If the host that runs the service has shut down, the service is being redistributed on the other

hosts. It makes services are self-renewing. Although any of the orchestral containers can run on the same server, true redundancy requires additional nodes.

Load balancing. Docker Swarm provides built-in load balancing. All containers in a single cluster are connected to a shared virtual network that allows connection from any node to any container. Docker Swarm also does not allow managing the internal balancer on a node and is bound to ports on which containers are deployed. Kubernetes allows you to manage and adjust load balancing. Each service is accessible through a set of rules that can be accessed without worrying about ports, IPs, and other physical settings.

Container updates and cluster restore. The Docker Swarm container is upgraded by telling the planner to use the new image instead. You can then roll out the updates, preventing the service from shutting down and letting you roll back if something goes wrong. Kubernetes processes the upgrade process by gradually tracking the health of the service to maintain accessibility throughout the upgrade process, making changes to one each container incrementally.

Table 1 gives the results of comparative analysis.

The choice of orchestration system depends on the tasks and goals that you want to achive. If you need a simple system that does not require additional configuration and allows you to quickly build a cluster, then you can choose Docker Swarm. But if you want to run more containers in a secure and well-tuned environment, then you need to choose the Kubernetes orchestration system.

Table 1 - **Comparative analysis of Docker Swarm and Kubernetes**

Criterion for comparison	Docker Swarm	Kubernetes
Cluster installation	Easy and quick to install and configure.	It takes some time to install and configure.
Customize the container	Functionality is provided and limited by the Docker API.	Client definitions, APIs and YAML are unique to Kubernetes.
Scalability	Quick deployment and scaling in not very large clusters. Adding a new node does not require additional master node settings.	Quick deploy and scale in very large clusters. Adding a new node requires additional master node settings.
Accessibility	High availability is ensured through the replication of containers, their constant monitoring and maintenance.	
Load balancing	Automated internal load balancing across any cluster node.	You can manually adjust the internal load balancing.
Container updates and cluster restore	Early planning of service maintenance processes during the upgrade.	Progressive updates and health monitoring through updates.

Research on Kubernetes cluster architecture

The main function of Kubernetes is the orchestration of containers, the scheduling of containers of varying capacity on physical and virtual devices. Containers must be packaged efficiently, and they must comply the constraints that imposed by the deployment environment and cluster configuration. In addition, the Kubernetes platform must monitor all running containers and replace those that have failed, failed, or experienced any other difficulties.

The Kubernetes architecture is designed to extend the cluster and consists of two nodes: a master server and a large number of working servers which called worker nodes (Fig. 2). The master node performs the main function and manages the cluster. Worker nodes cannot function properly without a working master node and are only used to deploy Kubernetes objects.

A. The main elements of the Kubernetes cluster

The Kubernetes cluster include:

– node is a cluster server or virtual machine;

– pods are containers that are grouped together, typically, pod includes from 1 to 5 containers;

– services is an abstraction over pods that defines the access policy for them. Service automatically distributes load between nodes, finds and route traffic to the required container;

– etcd is an instance that stores the status of the master server. It provides reliable storage of configuration data and notification of different changes;

– Kubernetes API Server is an API that enables API server to work. It is intended to be a CRUD server with embedded business logic implemented in separate components or in plugins. It basically handles REST operations, checking them and updating the objects in etcd;

– scheduler binds pod to node via call API;

– Kubernetes Controller Manager Server responsible for other cluster level functions. For example, the nodes are detected, managed, and controlled by node controller. As a result, this entity can be divided into separate components to make them independently connected;

– replication controller is a mechanism based on the pod API. Responsible for the number of pods;

– kubectl is a command line interface for managing Kubernetes;

– kubelet manages pod, their containers, images, partitions, etc;

– kube-proxy is a simple proxy balancer. This service is started on every note and configured in the Kubernetes API. Kube-Proxy can perform the simplest redirection;

– volumes is a directory (section) with data in it that is available in the container. This directory is the shared between the container and the nod.

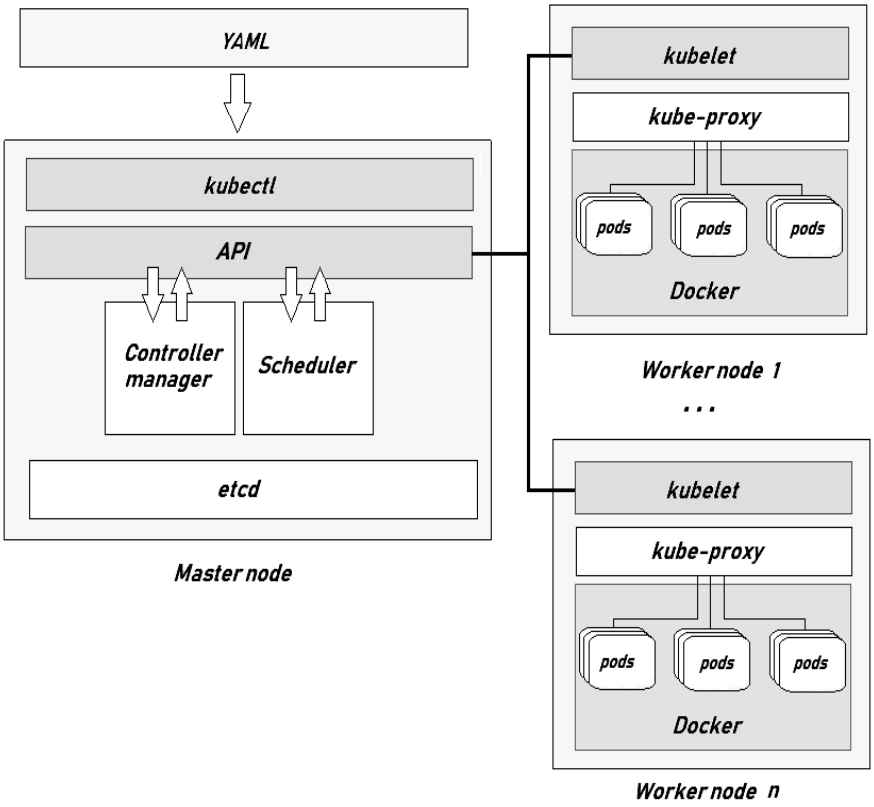


Fig. 2. Master node and Worker node architecture

The main benefits of the Kubernetes cluster. Kubernetes allows you to quickly and efficiently deploy applications, scale at runtime, integrate new features, and use only the resources you need, optimizing your resources.

Kubernetes fully supports the DevOps model and allows you to manage full application lifecycle.

The following benefits of Kubernetes can be distinguished:

– scalable. Software can be deployed via pods, deployment process can be scaled or disabled;

– monitoring. Kubernetes lets you track completed, incompleted, and unsuccessful deployments with the ability to query the status of each container;

– version control. Kubernetes allows you to update Pods which have been deployed, using newer versions of applications and revert to the previous deployment if the current version is not stable. Kubernetes provides an option to revert to an earlier version if the application deployment process fails;

– horizontal scaling. Kubernetes automatically deploys the number of application deployment replicas based on the using defined server resources (within defined limits);

– self-healing. Kubernetes has different features such as auto-reload, replication, placement, scaling, and container load balancing.

Also, Kubernetes has its own disadvantages. These include the lack of properly built documentation and the high complexity of cluster construction. Compared to other orchestration systems such as Docker Swarm, Kubernetes is more difficult to understand but more reliable orchestration systems.

Kubernetes cluster and Cloud providers

Cloud providers like Amazon (AWS), the Google Cloud Platform (GCP), and Microsoft Azure (MA) have services capable of configuring Kubernetes clusters.

Amazon Web Services. AWS is a public cloud, is the first in the public cloud market, with a huge and growing suite of available services, as well as the world's largest network of data centers [1]. AWS has its own ECS container orchestrator, but it's different from Kubernetes.

The Kubernetes Operations (kops) project has become the standard for creating, upgrading and managing Kubernetes clusters on Amazon Web Services [7].

Advantages of using Kubernetes with AWS Kubernetes is node updates, additions, and deletions.

The disadvantages of using Kubernetes with Amazon Web Services:

– lack of support for Kubernetes in the Amazon Web Services Management Console;

– no backup;

– high cost of use.

AWS uses a several payment models. You only pay for the resources and services you use. The more resources you use, the less the cost of services provided. Amazon Web Services rounding works based on hours of use [1], [7], [10].

Microsoft Azure. Microsoft Azure - Microsoft's cloud platform. Azure Kubernetes (AKS) fully managed service makes it easy to deploy and manage container applications. AKS does not include features for

updating the cluster after it is deployed. To upgrade clusters with AKS, you need to use AKS to create a new cluster, move containers to it, and remove the old cluster [10, 11].

Advantages of using Kubernetes with Azure Kubernetes:

– cluster backup is a feature of AKS;

– the Azure Management Console supports some operations with Kubernetes. You can add or delete work nodes by command in console.

The disadvantages of using Kubernetes with Microsoft Azure is the non-automated Kubernetes node upgrade.

Microsoft Azure uses a more flexible pricing system, payment for the use of cloud resources, with rounding by the minute [2].

Google Cloud Platform. Google Cloud Platform is the third in the market because it doesn't have so many different services and features as Amazon Web Services and Azure Cloud providers. However, Google offers significant scaling and load balancing. Load balancing is a major feature because Google provides a built-in general load balancer that is automatically configured when creating services.

In Amazon Web Services and Azure, the load balancer is another instance of a container that needs to be scaled.

Advantages of using Kubernetes with Azure Kubernetes:

– management of host and worker nodes is possible through the available GCP management console;

– management of master and worker nodes is possible through the available GCP management console;

– global zoom and built-in load balancer.

The disadvantages of using Kubernetes with GCP is that some features cannot be changed or configured.

The Google Cloud Platform has a similar billing system as Azure, but with a rounded usage of resources over a period of 10 minutes [2]. Google Billing also takes into account the network traffic used by the features in the aggregate.

Conclusion

The Docker Swarm and Kubernetes are two of the most popular container orchestration systems today.

Kubernetes is the most popular system that builds an efficient container system for cluster nodes, depending on current load and available services. Kubernetes is suitable for deploying infrastructure that requires a large amount of resources. It allows you to manage a large number of hosts, run multiple

Docker containers, monitor their status, monitor collaboration, perform load balancing. Kubernetes also allows you to build a big reliable system. Compared to other orchestrators, Kubernetes is the best in terms of fault tolerance.

But Kubernetes has one major disadvantage - incomplete documentation, especially for such a complex orchestration system.

Docker Swarm is the second container orchestration system.

The advantage are simplicity, the relative ease of operation and speed of development. The disadvantage is the functionality, which does not allow to build a reliable container management system.

The choice of orchestration system depends on the tasks and goals of your project. If you need a simple system, you can choose Docker Swarm. But if you want to run more container clusters with high reliability, then you need Kubernetes.

References

1. Pevnev V.Ya. “Metody obespecheniya tselostnosti informatsii v infokommunikatsionnykh sistemakh”. *Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu KhPI*. 2015. № 51. pp. 74-77.
2. Hypervisor [online] Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Hypervisor.
3. Gipervizor i ego rol' v virtualizatsii [online] Available at: https://vps.ua/blog/hypervizor-and-virtualization/ .
4. Sistema upravlinnya obchislyuval'nimi resursami zastosunkiv v umovakh konteinernoї virtualizatsiї (2018). Kubernetes. [online] Available at: http://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/25529/1/Zagorulko_magistr.pdf.
5. Docker Documentation. (2019). *Swarm mode overview*. [online] Available at: https://docs.docker.com/engine/swarm/
6. Mesosphere.github.io. (2018). *Marathon: A container orchestration platform for Mesos and DC/OS*. [online] Available at: https://mesosphere.github.io/marathon/.
7. Amazon Web Services, Inc. (2019). *Amazon Elastic Container Service – Управление контейнерами Docker – AWS*. [online] Available at: https://aws.amazon.com/ru/ecs/.
8. Docker swarm vs Kubernetes [online] Available at: https://habr.com/ru/company/d2cio/blog/349138/ .
9. A comparative analysis of two container management systems: docker swarm and kubernetes [online] Available at: http://synergy-journal.ru/archive/article2263/.
10. Sravnenie uslug oblachnykh provaiderov: Microsoft Azure, AWS ili Google Cloud. [online] Available at: http://la.by/blog/sravnenie-uslug-oblachnyh-provayderov-microsoft-azure-aws-ili-google-cloud/.
11. Publishing, Jie Xiong, (2018). *Cloud Computing for Scientific Research*. school of Electronics and Information, Yangtze University, China.

Received (Надійшла до редколегії) 14.02.2020
Accepted for publication (Схвалена до друку) 22.04.2020

Відомості про авторів / About the Authors

Пєвнєв Володимир Яковлевич – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп’ютерних систем, мереж та кібербезпеки, Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна;

Volodymyr Pevnev– Candidate of Technical Science, Associate Professor, Associate Professor of Computer Systems, Networks and Cyber security Department, National Aviation University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: v.pevnev@csn.khai.edu; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-3949-3514.

Трегуб Юлія Володимирівна – магістрантка кафедри комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки Харківського національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського, Харків, Україна;
Yuliia Trehub – Master's Degree in Computer Systems, Networks and Cyber Security, Kharkiv National Aerospace University. M.E. Zhukovsky, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: j.tregub@student.csn.khai.edu; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0003-1495-3112

Аналіз та дослідження відомих систем оркестрації для побудування мікросервісної інфраструктури

В. Я. Пєвнєв, Ю. В.Трегуб

Анотація. Предметом вивчення в статті є сучасні системи оркестрації. При розробці, для скорочення часу побудування інфраструктури та зменшення затрат на обладнання та підтримку роботи системи, існує велика потреба у застосуванні різних методів віртуалізації. Основними технологіями віртуалізації є віртуалізація на основі використання гіпервізора і контейнерна віртуалізація. Найбільш популярними системами управління контейнерами (або системами оркестрації контейнерів) є Kubernetes та Docker Swarm, обидві з яких базуються на платформі Docker. Використання однієї із них дозволяє швидше і ефективніше розроблювати додатки, стандартизує виконувані додатками операції та оптимізує використання ресурсів. Завдяки Docker користувачі отримують об'єкт, який з високою надійністю можна запускати на будь-якій платформі. Також, у статті наведено особливості спільного використання систем оркестрації разом з різними Cloud провайдерами, а також порівняння самих хмарних постачальників. **Метою** є детальний аналіз існуючих інструментів оркестраціїї контейнерів, проведення порівняльної характеристики Kubernetes і Docker Swarm, та вибір кращої із них. **Результати** порівняння Kubernetes та Docker Swarm показують, що Kubernetes – один із найкращих інструментів оркестрації. Kubernetes підходить для розгортання інфраструктури, яка потребує великої кількості ресурсів, та дозволяє обслуговувати величезну кількість хостів, запускати на них численні контейнери Docker, відстежувати їх стан, контролювати спільну роботу, проводити балансування навантаження. Kubernetes дозволяє побудувати надійну систему. У порівнянні з іншими оркестраторами, Kubernetes є найкращим з точки зору реалізації відмовостійкості. Якщо потрібне швидке налаштування і є прості вимоги до конфігурації, Docker Swarm може стати хорошим варіантом завдяки своїй простоті. **Висновки**. Сьогодні на ринку представлено дві системи оркестрації контейнерів: Docker Swarm та Kubernetes. Kubernetes – найпопулярніша система, яка вибудовує ефективну систему оркестрації контейнерів по вузлах кластеру в залежності від поточного навантаження і наявних потреб в роботі сервісів. Docker Swarm – друга, але більш проста за реалізацією система оркестрації контейнерів. Вибір системи оркестрації залежить від поставлених завдань. Якщо потрібна проста система, можна вибрати Docker Swarm. Але якщо потрібно запускати більшу кількість контейнерних кластерів, тоді потрібно використовувати Kubernetes.

Ключові слова: технології віртуалізації; системи оркестрації; Docker; DockerSwarm; Kubernetes; Ansible; Terraform; Amazon Web Services, Google Cloud Platform, Microsoft Azure.

Анализ и исследование известных систем оркестрации для построения микросервиснои инфраструктуры

В. Я. Певнев, Ю. В.Трегуб

Аннотация. Предметом изучения в статье являются современные системы оркестрации. При разработке, для сокращения времени построения инфраструктуры и уменьшения затрат на оборудование и поддержку работы системы, существует большая потребность в применении различных методов виртуализации. Основными технологиями виртуализации является виртуализация на основе использования гипервизора и контейнерная виртуализация. Наиболее популярными системами управления контейнерами (или системами оркестрации контейнеров) являются: Kubernetes и Docker Swarm, обе из которых базируются на платформе Docker. Использование одной из них позволяет быстрее и эффективнее разрабатывать приложения, стандартизирует выполняемые приложениями операции и оптимизирует использование ресурсов. Благодаря Docker пользователи получают объект, который с высокой надежностью можно запускать на любой платформе. Также, в статье приведены особенности совместного использования систем оркестрации вместе с различными Cloud провайдерами, а также сравнение самих облачных поставщиков. **Целью** является детальный анализ существующих инструментов оркестрации контейнеров, проведение сравнительной характеристики Kubernetes и Docker Swarm, и выбор лучшей из них. **Результаты** сравнения Kubernetes и Docker Swarm показывают, что Kubernetes - один из лучших инструментов оркестрации. Kubernetes подходит для развертывания инфраструктуры, которая требует большого количества ресурсов, и позволяет обслуживать огромное количество хостов, запускать на них многочисленные контейнеры Docker, отслеживать их состояние, контролировать совместную работу, проводить балансировку нагрузки. Kubernetes позволяет построить надежную систему. По сравнению с другими оркестратор Kubernetes является наилучшим с точки зрения реализации отказоустойчивости. Если требуются быстрые настройки и требования к конфигурации просты, то Docker Swarm может стать хорошим вариантом благодаря своей простоте. **Выводы**. Сегодня на рынке представлены две системы оркестрации контейнеров: Docker Swarm и Kubernetes. Kubernetes - самая популярная система, которая выстраивает эффективную систему оркестрации контейнеров по узлам кластера в зависимости от текущей нагрузки и имеющихся потребностей в работе сервисов. Docker Swarm - вторая, но более простая по реализации система оркестрации контейнеров. Выбор системы оркестрации зависит от поставленных задач. Если нужна простая система, можно выбрать Docker Swarm. Но если нужно запускать большее количество контейнерных кластеров, тогда нужно выбирать Kubernetes.

Ключевые слова: технологии виртуализации; системы оркестрации; Docker; DockerSwarm; Kubernetes; Ansible; Terraform; Amazon Web Services, Google Cloud Platform, Microsoft Azure.

Applied problems of information systems operation

UDC 681.142 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.2.22**

V. Krasnobayev[1], A. Yanko[2], S. Tur[2]

[1] V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine
[2] National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine

METHOD FOR THE CONTROL VERIFICATION OF DIGITAL INFORMATION, REPRESENTED IN A RESIDUE NUMBER SYSTEM

Abstract. The subject of the research in the article is the control methods for the data presented in the residue number system. **The object** of research is the process of monitoring data presented in the residue number system. **The purpose** of the work is to develop a method for increasing the reliability of control of data presented in the residue number system. The following **tasks** are solved in the article: research of data control methods presented in the residue number system; development of a method for increasing the reliability of data control; consideration of examples of application of the developed method for a specific residue number system; demonstration of examples of calculation and comparative analysis of the reliability of data control presented in the residue number system. The following research **methods** are used: the basics of system analysis and the basics of machine arithmetic in the residue number system. The following **results** were obtained: A method for increasing the reliability of data control was developed; examples of application of the developed method for a specific residue number system are presented; examples of calculation and comparative analysis of the reliability of data control presented in the residue number system are given. **Conclusions:** This article presents the theoretical foundations of the process of increasing the reliability of control of data presented in the residue number system, based on the use of the procedure of zeroing numbers. A method for increasing the reliability of data control has been directly developed and presented. Examples of application of the developed method for a specific residue number system are given and examples of calculating the reliability of control of data presented in the residue number system are given. A method has been developed to increase the reliability of data control; it is a definite contribution to the theory of noise-resistant coding in a residue number system. Examples of calculation and comparative analysis of the reliability of data control confirm the practical significance of the results of this article.

Keywords: control system of information; data transmission and processing system; nulevization of number; residue number system.

Introduction

Scales and complexity of the tasks solved by modern computer systems impose qualitatively new requirements to their main characteristics: productivity, reliability and efficiency of systems that causes need of improvement existing, creations of new means of information processing.

The trend of development of computer systems and components is aimed at increasing the speed (productivity) and reliability of the implementation of integer arithmetic operations [1].

Scientific researches were conducted in recent years, identify promising ways to improve the reliability of data processing, control, diagnostics and correction of data errors of computer systems, which are based on the use of the residue number system (RNS).

Error control in the RNS is a non-positional operation and requires the development of special methods, designed to increase the efficiency of this procedure. This article focuses on finding ways for increasing the reliability of digital information control for data transmission and processing systems (DTPS) that function in a RNS are described.

Analysis of recent studies and publications

The results of studies of methods for increasing the reliability and control of calculations of computer systems and data processing tools, which have been carried out over the past decades, have shown that it is practically impossible to achieve this within the limits of the positional systems of the calculus [2].

This fact led to the need to find ways to increase reliability, for example, based on the use of new structural solutions in the creation of computer systems, through the use of non-positional machine arithmetic. In particular, on the basis of the use of a non-positional numerical system in residual classes.

The results of research in the field of the creation of high-speed and high-control computer systems of processing data of well-known authors (Valakh M., Svoboda A., Sabo N., Aksushskyi I.Y., Yuditskyi D.I., Glushkov V.M., Torgashov V.A., Amberbaev V.M., Kolyada A.A., Shimbo A., Paulier P., Thornton M.A., Dreschler R., Miller D.M., and others) shown that the use of RNS as a system for increasing the reliability of digital information control for DTPS allows developing methods based on which it increases the reliability of data control several times.

Highlighting previously unsolved parts of a common problem. The goal of the work

Currently, there are many methods for data error control in a RNS. Results of a research of control methods of the data in RNS which are carried out in this scientific field have shown that the existing control methods of data in RNS based on use of application of the zeroing procedure reduce control time [2].

© Krasnobayev V., Yanko A., Tur S., 2020

This article will present the theoretical foundations of the process of increasing the reliability of the control of data presented in the system of residual classes based on the use of the nullification process of numbers.

On this considered a method for error control in the RNS based on the use of the zeroing procedure is proposed. The control verification of digital information in the RNS is a non-positional operation and requires the development of special ways, designed to increase the efficiency of this procedure. Therefore, the main task is to find effective ways for increasing the reliability of digital information control for DTPS that function in a RNS are described.

The main goal of the work is to directly develop a method for increasing the reliability of data control, give examples of the application of the developed method for a specific RNS and examples of calculating the reliability of data control presented in the system of residual classes.

Materials and methods

Considerable time spent on data control leads to a decrease in the overall efficiency of application of non-positional code structures (NCSs) in a RNS in implementing integer arithmetic and other modular operations [3]. On-line data verification methods that are recently developed in DTPSs and function in RNSs allow one to appreciably reduce verification time but, at the same time, the problem of increasing the reliability of this verification arises [4].

The objective of this article is the development of a method for increasing the reliability of data verification in DTPSs functioning in RNSs.

The well-known method of on-line data verification in RNSs is based on the obtaining and use of the so-called position indicator of a non-positional code (PINC) [5, 6]. This PINC is one of characteristics of a special code (SC) obtained from the initial NCS (being verified) $A=(a_1, a_2, ..., a_{i-1}, a_i, a_{i+1}, \dots, a_n, a_{n+1})$ of data represented in an RNS by bases $\{m_i\}$ $(i=\overline{1,n+1})$ with one check residue of a_{n+1} to the check base (modulus) m_{n+1} and, in this case,

$$M=\prod_{i=1}^{n} m_i \ ; \ M_0=\prod_{i=1}^{n+1} m_i \ .$$

Let us consider a procedure for obtaining a PINC from the NCS $A=(a_1, a_2, ..., a_{i-1}, a_i, a_{i+1}, \dots, a_n, a_{n+1})$ being verified. In the general form, an SC:

$$K_N^{(n_A)}=\left\{Z_{N-1}^{(A)}\ Z_{N-1}^{(A)} \dots Z_1^{(A)}\ Z_0^{(A)}\right\}, \qquad (1)$$

is a sequence of bits $Z_K^{(A)}$ $(K=\overline{0,N-1})$ consisting of ones and one zero at the n_A-th place (from right to left from the $Z_0^{(A)}$-th bit to the $Z_{N-1}^{(A)}$ bit). The parameter n_A is the PINC of the non-positional code structure $A=(a_1, a_2, ..., a_{i-1}, a_i, a_{i+1}, \dots, a_n, a_{n+1})$ of data [7].

Proceeding from mathematical considerations, n_A is a natural number referring to the location of the zero bit $Z_{n_A}^{(A)}=0$ in the notation of the SC $K_N^{(n_A)}$. It determines the number j_i of the numerical interval $[j_i\cdot m_i,\ (j_i+1)\cdot m_i)$ containing the number A, i.e., the value of n_A with a definite accuracy W that depends on the magnitude of the value of the RNS modulus m_i and determines the location of the number $A=(a_1, a_2, ..., a_{i-1}, a_i, a_{i+1}, \dots, a_n, a_{n+1})$ on the numerical axis $0\div M_0$. We first consider a procedure that forms the SC $K_N^{(n_A)}$. For the chosen RNS base m_i (the rules for selecting an RNS base m_i will be described below), a constant of the form $KH_{m_i}^{(A)}=\left(a_1^{'}, ..., a_{i-1}^{'}, a_i, a_{i+1}^{'}, ..., a_{n+1}^{'}\right)$ is determined from the value of the residue a_i of the number $A=(a_1, a_2, ..., a_{i-1}, a_i, a_{i+1}, \dots, a_n, a_{n+1})$ in the DTPS nulevization constant block (NCB). Next, using the chosen nulevization constant $KH_{m_i}^{(A)}$, the following subtraction operation is executed:

$$\begin{aligned} A_{m_i}=A-KH_{m_i}^{(A)}&=\left(a_1, a_2, ..., a_{i-1}, a_i, a_{i+1}, ..., a_n, a_{n+1}\right)- \\ &-\left(a_1^{'}, a_2^{'}, ..., a_{i-1}^{'}, a_i, a_{i+1}^{'}, ..., a_n^{'}, a_{n+1}^{'}\right)= \\ &=\left[a_1^{(1)}, a_2^{(1)}, ..., a_{i-1}^{(1)}, 0, a_{i+1}^{(1)}, ..., a_n^{(1)}, a_{n+1}^{(1)}\right]. \end{aligned}$$

This operation corresponds to the shift of the number $A=(a_1, ..., a_{i-1}, a_i, a_{i+1}, \dots, a_n, a_{n+1})$ being verified to the left end of the interval $[j_i\cdot m_i,\ (j_i+1)\cdot m_i)$ of its initial location. In this case, we have $A_{m_i}=j_i\cdot m_i$, i.e., the number A_{m_i} is a multiple of the value of the RNS modulus m_i.

As is well known, the correctness of the number A in the RNS is determined by its presence or absence in the numerical information interval [0, M). If the number A is out of this interval $(A\geq M)$, then it is considered to be distorted (incorrect) [8]. In this case, using the value of n_A, it is necessary to verify the correctness or incorrectness of the initial number A by determining the fact of the presence or absence of the initial number A in the interval [0, M). To determine the fact of the presence of the number in the information numerical interval [0, M), it is necessary to execute a collection of operations of the form:

$$A_{m_i}-K_A\cdot m_i=Z_{K_A}^{(A)}. \qquad (2)$$

Operations (2) are executed in parallel (simultaneously in time) by means of a collection of N constants $K_A\cdot m_i$ $\left(K_A=\overline{0,N-1}\right)$ of the form:

$$\begin{cases} A_{m_i}-0\cdot m_i=Z_0^{(A)}, \\ A_{m_i}-1\cdot m_i=Z_1^{(A)}, \\ \dots \\ A_{m_i}-(N_i-1)\cdot m_i=Z_{N-1}^{(A)}, \end{cases} . \qquad (3)$$

where $N_i = \prod_{K=1;\, K\neq i}^{n+1} m_K$. In this case, the SC will be represented in the form (1), and the method of formation of the PINC n_A in the RNS can be described as follows [9].

1. Choose some information $\{m_i\}$, $i = \overline{1,n}$, and check $m_k = m_{n+1}$ ($m_i < m_{i+1}$) bases to represent the data $A = (a_1, a_2, ..., a_{i-1}, a_i, a_{i+1}, \dots, a_n, a_{n+1})$ in the RNS; GCD $(m_i, m_j) = 1$, $i \neq j$.

2. Choose of a base $m_i \in \{m_j\}$, $(j = \overline{1, n+1})$ from which the number j_i of the numerical interval $[j_i \cdot m_i, (j_i + 1) \cdot m_i)$ is determined that contains the number $A = (a_1, a_2, ..., a_{i-1}, a_i, a_{i+1}, \dots, a_n, a_{n+1})$.

3. Determine a nulevization constant of the form $KH_{m_i}^{(A)} = \left(a_1', a_2', ..., a_{i-1}', a_i, a_{i+1}', ..., a_{n+1}'\right)$ from the value of the residue a_i of the number $A = (a_1, a_2, ..., a_{i-1}, a_i, a_{i+1}, \dots, a_n, a_{n+1})$.

4. Determine the value of

$$j_i \cdot m_i = A_{m_i} = A - KH_{m_i}^{(A)} =$$
$$= \left(a_1, a_2, ..., a_{i-1}, a_i, a_{i+1}, ..., a_n, a_{n+1}\right) -$$
$$- \left(a_1', a_2', ..., a_{i-1}', a_i, a_{i+1}', ..., a_n, a_{n+1}\right) =$$
$$= \left[a_1^{(1)},\ a_2^{(1)},\ ...,\ a_{i-1}^{(1)}, 0, a_{i+1}^{(1)}, ..., a_n^{(1)}, a_{n+1}^{(1)}\right].$$

5. Determine an SC $K_N^{(n_A)} = \left\{Z_{N-1}^{(A)}\ Z_{N-2}^{(A)} \dots Z_0^{(A)}\right\}$ in the form $K_{N_i}^{(n_A)} = \left\{Z_{N_i-1}^{(A)}\ Z_{N_i-2}^{(A)} \dots Z_0^{(A)}\right\}$. $N = \prod_{K=1;\, K\neq i}^{n+1} m_K$, $N_i =]M / m_i[$, $M = \prod_{i=1}^{n} m_i$. $A_{m_i} - K_A \cdot m_i = Z_{K_A}^{(A)}$.

6. Determine the PINC of the number $A = (a_1, a_2, ..., a_{i-1}, a_i, a_{i+1}, \dots, a_n, a_{n+1})$ namely, find the numerical value of n_A for which $Z_{K_A}^{(A)} = Z_{n_A}^{(A)} = 0$, i.e. $A_{m_i} - n_A \cdot m_i = 0$; at the same time, $Z_l^{(A)} = 1$, $(A_{m_i} - l \cdot m_i \neq 0;\ \ l \neq n_A)$.

Analytical relationships (3) provide a unique value of from collection (2) for which $Z_{K_A}^{(A)} = Z_{n_A}^{(A)} = 0$ $(K_A = n_A)$, i.e. $A_{m_i} - n_A \cdot m_i = 0$. The other values of collection (2) equal $Z_l^{(A)} = 1$ $(A_{m_i} - l \cdot m_i \neq 0;\ \ l \neq n_A)$. In the general case, the number of bits in the notation of the SC $K_N^{(n_A)}$ equals the value of *N*. But we note that, to determine only the fact of distortion of the number *A*, there is no need to have and analyze the entire sequence of the collection of *N* values $Z_{K_A}^{(A)}$ of the SC $K_N^{(n_A)}$. To this end, it suffices to have an SC $K_N^{(n_A)}$ whose length equals only $N_i =]M / m_i[$ bits (a quantity $]M / m_i[$ denotes an integer larger than and closest to the number M / m_i, i.e., the number M / m_i is rounded up to the nearest larger integer).

This fact can be explained as follows. In performing the verification procedure to establish the fact of correctness of the number This $A = (a_1, a_2, ..., a_{i-1}, a_i, a_{i+1}, \dots, a_n, a_{n+1})$, there is no need to analyze all numerical intervals $[j_i \cdot m_i, (j_i + 1) \cdot m_i)$ in which a distorted number is located outside of the information interval [0, *M*). In this case, to establish only the fact of correctness of the number *A*, the determination of numbers and analysis of locations of these intervals $[j_i \cdot m_i, (j_i + 1) \cdot m_i)$ are inessential. To verify the NCS *A* in the RNS, it suffices to know the location of zero in SC notation (1) (to know the numerical value of n_A) only in numerical intervals $[j_i \cdot m_i, (j_i + 1) \cdot m_i)$ belonging to the information numerical interval $0 \div M_0$, i.e., belonging to the first interval located on the segment $0 \div M_0$ after the value of *M*. In this case, to verify the data $A = (a_1, a_2, ..., a_{i-1}, a_i, a_{i+1}, \dots, a_n, a_{n+1})$, it suffices to have an SC $K_{N_i}^{(n_A)}$ whose length is only $N_i =]M / m_i[$ bits. Thus, the method for data verification in such an RNS is as follows.

1. Determine the SC $K_{N_i}^{(n_A)}$ for the number $A = (a_1, a_2, ..., a_{i-1}, a_i, a_{i+1}, \dots, a_n, a_{n+1})$.

2. Determine the PINC n_A: $A_{m_i} - n_A \cdot m_i = 0$, $Z_{n_A}^{(A)} = 0$; $Z_l^{(A)} = 1$, $A_{m_i} - l \cdot m_i = 1$; $l \neq n_A$.

3. Perform the data verification procedure over $A = (a_1, a_2, ..., a_{i-1}, a_i, a_{i+1}, \dots, a_n, a_{n+1})$ in the RNS. If $n_A > N_i$, then the number $\tilde{A}$ is incorrect (distorted). If $n_A \leq N_i$, then the number *A* is correct (undistorted).

For the NCS *A* being verified that is represented in an RNS, its PINC n_A is determined by forming an SC $K_{N_i}^{(n_A)} = \left\{Z_{N_i-1}^{(A)}\ Z_{N_i-2}^{(A)} \dots Z_1^{(A)}\ Z_0^{(A)}\right\}$ in the form of a sequence of N_i bits. An RNS base m_i is chosen in a special way according to definite criteria [10].

Proceeding from the value of the residue a_i of the number $A = (a_1, a_2, ..., a_{i-1}, a_i, a_{i+1}, \dots, a_n, a_{n+1})$ some nulevization constant of the form $KH_{m_i}^{(A)} = \left(a_1', a_2', ..., a_{i-1}', a_i, a_{i+1}', ..., a_n', a_{n+1}'\right)$ is chosen. Then the operation $A_{m_i} = A - KH_{m_i}^{(A)}$ is performed. Using N_i constants $K_A \cdot m_i$ $\left(K_A = \overline{0, N_i - 1}\right)$, subtraction operations $A_{m_i} - K_A \cdot m_i$ are simultaneously performed and, as a result, values of bits of $Z_{K_A}^{(A)}$ is obtained, i.e., the SC $K_{N_i}^{(n_A)}$ is formed. The value of the PINC n_A is determined from the equality $A_{m_i} - n_A \cdot m_i = 0$.

The verification procedure for the number A is as follows. If $n_A > N_i$, then the number A is considered to be incorrect. Otherwise ($n_A \le N_i$), the number A is correct.

Let us consider examples of implementation of the verification method for a concrete RNS specified by the bases $m_1 = 3$, $m_2 = 4$, $m_3 = 5$, $m_4 = 7$ and $m_k = m_{n+1} = m_5 = 11$. This RNS provides data processing in a DTPS with single-byte words ($l = 1$). In this case, $M = \prod_{i=1}^{4} m_i = 420$, $M_0 = M \cdot m_{n+1} = . = 4620$. Moreover, we consider that $m_i = 11$. In this case, $N_i = N_{n+1} =]M / m_i[=]M / m_{n+1}[=]420/11[=]38{,}18[= 39$.

Table 1 presents the NCB data of the DTPS with respect to the base $m_K = m_{n+1} = 11$.

Table 1 – **Nulevization Constants** $KH_{m_{n+1}}^{(A)}$

Value of the residue $a_K = a_{n+1}$ of the number A	Constants of nulevization with respect to m for the value of a'				
	$m_1 = 3$	$m_2 = 4$	$m_3 = 5$	$m_4 = 7$	$m_k = m_5 = 11$
	a'_1	a'_2	a'_3	a'_4	a'_5
0000	00	00	000	000	0000
0001	01	01	001	001	0001
0010	10	10	010	010	0010
0011	00	11	011	011	0011
0100	01	00	100	100	0100
0101	10	01	000	101	0101
0110	00	10	001	110	0110
0111	01	11	010	000	0111
1000	10	00	011	001	1000
1001	00	01	100	010	1001
1010	01	10	000	011	1010

Example 1. Verify the data represented in the form $A = (01, 00, 000, 010, 0001)$ with $m_k = m_{n+1} = m_5 = 11$. Using the value of the residue $a_K = a_{n+1} = a_5 = 0001$ of the number A in the NCB (Table 1), choose the nulevization constant $KH_{m_{n+1}}^{(A)} = (01, 01, 001, 001, 0001)$. Then determine $A_{m_{n+1}} = A - KH_{m_{n+1}}^{(A)} = (00, 11, 100, 001, 0000)$.

By realizing relationship (3), create an SC of the form $K_{N_i}^{(n_A)} = K_{39}^{(9)} = \{11...110111111111\}$. Proceeding from the form of the SC and using the expression $A_{m_{n+1}} - n_A \cdot m_{n+1} = 0$, we obtain $n_A = 9$ ($A_{m_{n+1}} - n_A \cdot m_{n+1} = 99 - 9 \cdot 11 = 0$), i.e., $Z_{n_A}^{(A)} = Z_9^{(A)}$. We have $N_i = 39 > n_A$ and $n_A = 9$. Hence, a data error is absent.

Verification: $A = 100 < M$ and $M = 420$ (the number A is correct).

Example 2. Verify the data $A = (00, 01, 000, 010, 1010)$. Using the value of $a_5 = 1010$, choose the constant of the form $KH_{m_{n+1}}^{(A)} = (01, 10, 000, 011, 1010)$ from the NCB (Table 1). We obtain $A_{m_{n+1}} = A - KH_{m_{n+1}}^{(A)} = (10, 00, 000, 110, 0000)$. Since $A_{m_{n+1}} - n_A \cdot m_{n+1} = 440 - 44 \cdot 11 = 0$, the SC is of the form $K_{N_i}^{(n_A)} = K_{39}^{(40)} = \{11...11...11\}$ and $n_A = 40$. Here, $N_i = 39 < n_A$ and $n_A = 40$. Hence, there is an error in these data.

Verification: $A = 450 > M$ and $M = 420$ (the number A is incorrect).

Example 3. Verify the data $A = (01, 11, 010, 000, 1001)$. Using the value of $a_5 = 1001$, choose the constant $KH_{m_{n+1}}^{(A)} = (00, 01, 100, 010, 1001)$ from the NCB (Table 1). Determine $A_{m_{n+1}} = A - KH_{m_{n+1}}^{(A)} = (01, 10, 011, 101, 0000)$. Since $A_{m_{n+1}} - n_A \cdot m_{n+1} = 418 - 38 \cdot 11 = 0$, the obtained SC is of the form $K_{N_i}^{(n_A)} = K_{39}^{(38)} = \{011...11...11\}$ adn $n_A = 38$. Since $n_A = 38 < N_i$ and $N_i = 39$, the following conclusion is drawn: the number A is correct (is not distorted). However, the verification shows that $A = 427 > M$ and $M = 420$, i.e., the number A is incorrect. In this case, an error has been made in verifying data [10].

As is obvious from Example 3, the use of the considered method for on-line data verification in are RNSs not always provides reliable verification results. In fact, there is a collection of $(j_{n+1} + 1) \cdot m_{n+1} - M$ incorrect values of $\tilde{A}$ that are recognized as correct by the DTPS verification system (VS), which stipulates a low reliability of verification. For Example 3, the totality of such numbers can exceed 80%. In the numerical range [418, 429), there are two correct numbers A, namely, 418 and 419. At the same time, the collection of incorrect numbers $\tilde{A}$ that are determined by the DTPS VS as correct is as follows: 420, 421, 422, 423, 424, 425, 426, 427 and 428.

Thus, it is obvious that the developed method of on-line data verification in RNS and the device that implements it have a very low reliability of verification [11]. This low reliability of data verification is a result of the presence of the following nonzero residue value a:

$$\alpha = M / m_{n+1} - [M / m_{n+1}], \qquad (4)$$

In turn, the presence of a nonzero residue $\alpha \neq 0$ is determined by the fact of the non-multiplicity of the value of M to the RNS check modulus m_{n+1} that determines the range of some numerical interval $[j_{n+1} \cdot m_{n+1}, (j_{n+1} + 1) \cdot m_{n+1})$ of the possible location of the number A. In this case, the verification of data $A = (a_1, a_2, ..., a_{i-1}, a_i, a_{i+1}, ..., a_n, a_{n+1})$ is performed on the basis of the use of the RNS check base m_{n+1} by forming the following SC:

$$K_{N_{n+1}}^{(n_A)} = \left\{ Z_{N_{n+1}-1}^{(A)} \; Z_{N_{n+1}-2}^{(A)} \ldots Z_0^{(A)} \right\}, \qquad (5)$$

This geometrically low reliability of data verification can be explained as follows [12]. The

numerical information interval [0, $M = \prod_{i=1}^{n} m_i$) does not hold an integer number of segments whose length equals to the value of $m_i = m_{n+1}$. In this case, the numerical axis $0 \div M_0$ includes a numerical interval $[j_{n+1} \cdot m_{n+1},\ (j_{n+1}+1) \cdot m_{n+1})$ or a numerical interval $[(N_{n+1}-1) \cdot m_{n+1},\ N_{n+1} \cdot m_{n+1})$ that contains a number *M*. Therefore, this interval simultaneously includes a collection $((j_{n+1}+1) \cdot m_{n+1}) - M$ or $[N_{n+1} \cdot m_{n+1}) - M]$ of incorrect numbers and a collection $M - j_{n+1} \cdot m_{n+1}$ (or $M - (N_{n+1}-1) \cdot m_{n+1}$) of correct numbers. In the course of verification of data *A*, in performing the nulevization procedure, all incorrect $((j_{n+1}+1) \cdot m_{n+1}) - M$ and correct $M - j_{n+1} \cdot m_{n+1}$ numbers are shifted to the left end (to one correct number $j_{n+1} \cdot m_{n+1}$) of the interval $[j_{n+1} \cdot m_{n+1},\ (j_{n+1}+1) \cdot m_{n+1})$. In this case, the DTPS VS will recognize incorrect numbers $[N_{n+1} \cdot m_{n+1}) - M]$ as correct [13]. By the reliability of data verification in a residue class we understand the probability of obtaining the true result of the operation of verification of data represented in an RNS [14]. The following ratio can be used as the quantitative index of the reliability of an estimate for data verification in RNSs:

$$P_{vr} = V_{cw} / V_{tw}, \quad (6)$$

where, in the general case, $V_{cw} = M$ is the number (from 0 to $M \div 1$) of correct ($A < M$) code words in the operating numerical range $[0, M_0)$ for a given RNS; $V_{tw} = (V_{cw} + V_{iw})$ is the total amount of code words that are considered as correct after performed data verification; $V_{iw} = (N_i \cdot m_i - M)$ is the number of incorrect code words ($A \geq M$) that are considered as correct after performed data verification (note that $N_i =]M / m_i[= j_i + 1$).

With allowance for the aforesaid, verification reliability index (6) is specified by the relationship:

$$P_{vr} = M / (M + N_i \cdot m_i - M) = M / (N_i \cdot m_i), \quad (7)$$

When $m_i = m_{n+1}$, we have $V_{iw} = (N_{n+1} \cdot m_{n+1} - M)$. In this case, expression (7) assumes the form:

$$P_{vr} = \frac{M}{M + N_{n+1} \cdot m_{n+1} - M} = \frac{M}{N_{n+1} \cdot m_{n+1}}, \quad (8)$$

If we take an RNS information base, for example, $m_i = m_1$, in the capacity of the base m_i determining ranges of numerical intervals $j_i \cdot m_i \div (j_i+1) \cdot m_i$ then $N_i =]M / m_i[= N_1 =]M / m_1[$ and $N_1 = \prod_{i=2}^{n} m_i$. In this case, expression (7) assumes the form:

$$P_{vr} = M / (M + N_1 \cdot m_1 - M) = M / (N_1 \cdot m_1) = 1, \quad (9)$$

In this case (see expression (4)), we always have $P_{vr} = 1$, i.e., when $m_i = m_1$ is chosen, the DTPS VS always provides a reliable result of data verification in an RNS [15].

The results of the of the developed method

The proposed method for increasing the reliability of verification is based on the well-known method of on-line information verification in RNSs and includes procedures of obtaining and using PINCs [10]. This feature is one of characteristics of the SC formed from the initial NCS *A* of data represented in an RNS by bases $\{m_i\}$, $i = \overline{1,\ n+1}$, with one check base number m_{n+1}.

The essence of the proposed method of increasing the reliability of data verification in RNSs consists of ensuring the maximum reliability of data verification $P_{vr} = 1$ by providing the fulfillment of the condition $\alpha = 0$ (see expression (4)). In this case, to compute the value of $N_i =]M / m_i[$, the modulus m_i that determines the number j_i of the numerical interval $[j_i \cdot m_i,\ (j_i+1) \cdot m_i)$ containing the number $A = (a_1, a_2, ..., a_{i-1}, a_i, a_{i+1}, ..., a_n, a_{n+1})$ is chosen only from the collection of *n* RNS information bases that, naturally, are multiples of the value of *M*. In this case, $\alpha = M - [M / m_i] \cdot m_i = 0$, which provides the maximum value of the verification reliability index $P_{vr} = 1$ (see relationship (7)). Let us consider an example of using the developed method for increasing the reliability of data verification in RNSs [16].

Example 4. In the RNS considered above, we choose, for example, the information base $m_i = m_1 = 3$. We obtain $N_i = N_1 = M / m_1 = 4 \cdot 5 \cdot 7 = 140$. In this case, the operating numerical range $[0, M_0)$ of the RNS is divided into intervals $[j_i \cdot m_i,\ (j_i+1) \cdot m_i)$. For the value of $m_1 = 3$, the information numerical interval [0, *M*) is divided exactly into $N_1 = M / m_1 = 140$ segments of length 111 each. From Table 1, we choose the NCB content concerning the base $m_1 = 3$. It is necessary to verify the number $A = (01, 11, 010, 000, 1001)$. With the help of the value of $a_1 = 01$, we choose the nulevization constant of the form $KH_{m_1}^{(A)} = (01, 01, 001, 001, 0001)$ from the NCB. Next, we determine $A_{m_1} = A - KH_{m_1}^{(A)} = (00, 10, 001, 110, 1000)$. If $A_{m_1} - n_A \cdot m_1 = 426 - 142 \cdot 3 = 0$, then the SC is of the form $K_{N_i}^{(n_A)} = K_{140}^{(142)} = \{Z_{139}^{(A)}\ Z_{138}^{(A)} \ldots Z_1^{(A)}\ Z_0^{(A)}\} = \{11...11...11\}$. Since $N_i = 140 < n_A$ and $n_A = 142$, the number *A* contains an error.

Verification: $A = 427 > M$ and $M = 420$. The number $A > M$, i.e. it is incorrect (distorted).

By way of example. Table 2 (Fig. 1) presents the results of computation of the data verification reliability p_{rv} for six different values (11, 13, 17, 19, 23, and 29) of check bases m_{n+1} in the RNS specified by the information bases $m_1 = 3$, $m_2 = 4$, $m_3 = 5$, and $m_4 = 7$.

Since it is known that $N_{n+1} \cdot m_{n+1} > M$ (see expression (4)), we always have $P_{vr} < 1$.

Table 2 – **Results of computation of data verification reliability values**

Values of check bases m_{n+1}	Results of computing reliability verification values in the RNS for the parameters				
	M	$\frac{M}{m_{n+1}}$	$\left\rceil \frac{M}{m_{n+1}} \right\lceil$	$N_{n+1} = \left\rceil \frac{M}{m_{n+1}} \right\lceil \cdot m_{n+1}$	P_{vr}
11	420	38,2	39	429	0,979
13	420	32,3	33	429	0,979
17	420	24,7	25	425	0,988
19	420	22,1	23	437	0,961
23	420	18,2	19	437	0,961
29	420	14,4	15	435	0,965

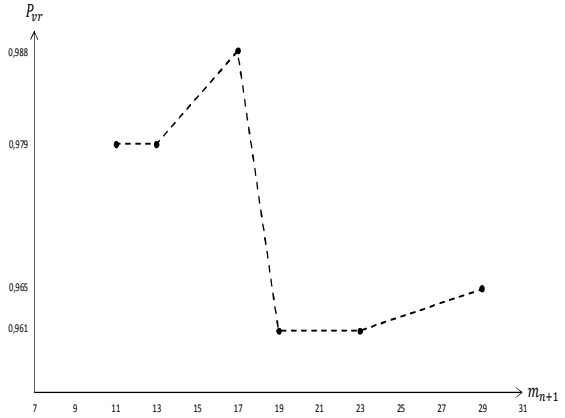


Fig. 1. The data verification reliability values

In addition to the efficiency of data verification [10], an important characteristic of a DTPS is the amount of equipment in a verification system. Note that, in an RNS, the amount of equipment of an VS depends mainly on the number of summators implementing operations of the form (3). Thus, the amount of equipment of an VS depends on the value of the quantity $N_1 = \prod_{i=2}^{n} m_i$ $(i = \overline{1,\ n})$. In this case, with allowance made for $\alpha = 0$ and the requirement of the avoidance of the decrease in the efficiency of verification, to minimize the amount of equipment of the VS in an RNS, an information base of maximum should be chosen. For an ordered RNS $(m_i < m_{i+1})$, such a base is m_n.

A preliminary estimate for the amount of equipment for DTPS with machine words consisting of l bytes can be obtained through the value of the efficiency factor:

$$K_{\text{ef}}^{(l)} = N_1 / N_n = \left(M / m_1\right) / \left(M / m_n\right) = m_n / m_1 . \quad (10)$$

Let us consider an example of data verification in an RNS for the value of $m_i = m_n$.

Example 5. The maximum information base for the above-mentioned RNS is $m_n = m_4 = 7$. In this case, $N_i = N_4 = M / m_4 = 3 \cdot 4 \cdot 5 = 60$. The operating numerical range $[0, M_0)$ is divided into intervals $[j_4 \cdot m_4, (j_4 + 1) \cdot m_4)$, i.e., into $M_0 / m_4 = 4620 / 7 = 660$ segments. For the value of $m_4 = 7$, the information interval [0, M) is divided into $N_4 = M / m_4 = 60$ numerical segments each of which has the length equal to seven ones. From Table 1, the NCB content with respect to the base $m_4 = 7$ is determined.

Assume that the number $A = (01, 11, 010, 000, 1001)$ should be verified. Using the value of $a_4 = 000$, choose the constant $KH_{m_n}^{(A)} = KH_7^{(A)} = (00, 00, 000, 000, 0000)$ from the NCB (Table 1). Then determine the value of $A_{m_n} = A_7 = A - KH_7^{(A)} = (01, 11, 010, 000, 1001)$.

As a result of execution of operations (2), we obtain the sought-for SC in the form $K_{N_4}^{(n_A)} = K_{60}^{(61)} = \left\{ Z_{59}^{(A)}\ Z_{58}^{(A)} \ldots Z_1^{(A)}\ Z_0^{(A)} \right\} = \{11 \ldots 11 \ldots 11\}$. Proceeding from the form of the SC and using the expression $A_{m_n} - n_A \cdot m_n = 0$, we determine $n_A = 61$ $(A_{m_n} - n_A \cdot m_n = 427 - 61 \cdot 7 = 0)$. Since $N_4 = 60 < n_A$ and $n_A = 61$ the data A contain an error.

Verification: $A = 427 > M = 420$.

Table 3 (Fig. 2) presents design data on the conditional amount of equipment of a DTPS verification system functioning in an RNS and data on the comparative analysis of the decrease in the amount of the VS equipment when $m_i = m_n$.

Table 3 – **Comparative data on the amount of equipment of a DTPS verification system**

Word size of an l-byte DTPS (ρ, n, k)	RNS information bases m_i $(i = \overline{1, n})$	RNS check base m_{n+1}	RNS information base		$K_{\text{ef}}^{(l)}$
			minimum, m_1	maximum, m_n	
$l = 1$ ($\rho = 8$, $n = 4$, $k = 3$)	$m_1 = 3$, $m_2 = 4$, $m_3 = 5$, $m_4 = 7$	$m_5 = 11$	$m_1 = 3$	$m_4 = 7$	2,3
$l = 3$ ($\rho = 24$, $n = 8$, $k = 5$)	$m_1 = 3$, $m_2 = 4$, $m_3 = 5$, $m_4 = 7$, $m_5 = 11$, $m_6 = 13$, $m_7 = 17$, $m_8 = 19$	$m_9 = 23$	$m_1 = 3$	$m_8 = 19$	6,3
$l = 4$ ($\rho = 32$, $n = 10$, $k = 5$)	$m_1 = 2$, $m_2 = 3$, $m_3 = 5$, $m_4 = 7$, $m_5 = 11$, $m_6 = 13$, $m_7 = 17$, $m_8 = 19$, $m_9 = 23$, $m_{10} = 29$	$m_3 = 5$	$m_1 = 2$	$m_{10} = 29$	14,5
$l = 8$ ($\rho = 64$, $n = 16$, $k = 6$)	$m_1 = 3$, $m_2 = 4$, $m_3 = 5$, $m_4 = 7$, $m_5 = 11$, $m_6 = 13$, $m_7 = 17$, $m_8 = 19$, $m_9 = 23$, $m_{10} = 29$, $m_{11} = 31$, $m_{12} = 37$, $m_{13} = 41$, $m_{14} = 43$, $m_{15} = 47$, $m_{16} = 53$	$m_{17} = 59$	$m_1 = 3$	$m_{16} = 53$	17,6

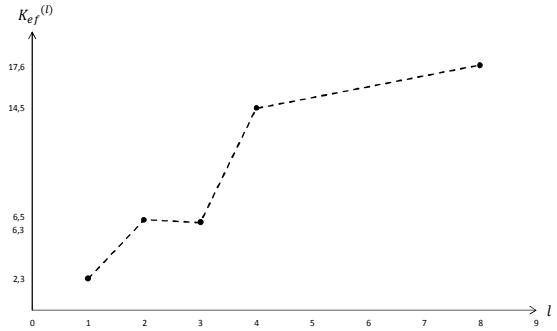


Fig. 2. The data on the amount of equipment of a DTPS verification system

The ways for increasing the reliability of digital information control for data transmission and processing systems that function in a residue number system are described [17]. The developed method increases the reliability of data control in a RNS to 3.5 percent, depending on the value of the control basis. Based on the use of this method, operational data monitoring systems can be synthesized.

Conclusions

Thus, this article describes a method developed for increasing the reliability of verification of data represented in an RNS. This method is based on the use of a PINC n_A that is one of SC characteristics. In this case, a modulus m_i that determines the number of the numerical interval containing an NCS is chosen from a collection of n possible information bases of the corresponding RNS [18]. The use of this method provides the obtaining of a reliable result of data verification in the RNS. The design data and a comparative analysis of reliability of their verification and the amount of equipment of a verification system have shown that the efficiency of non-positional data coding in RNSs considerably increases with increasing the word size of a DTPS.

REFERENCES

1. Shu, S., Wang, Y. and Wang, Y. (2016), "A research of architecture-based reliability with fault propagation for software-intensive systems", *2016 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, Tucson, AZ, pp. 1-6.
2. Ponochovniy, Y., Bulba, E., Yanko, A., Hozbenko, E. (2018), "Influence of diagnostics errors on safety: Indicators and requirements. *2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*. DOI: https://doi.org/10.1109/dessert.2018.8409098
3. Akushskiy, I. Ya., Yuditskiy, D. I. (1968), *Machine arithmetic in residual classes*, M., Radio i svyaz, 444 p.
4. Torgashev, V. A. (1973), *System of residual classes and reliability of digital computers*, M., Sov. radio, 118 p.
5. Amerbaev, V. M. (1976), *Theoretical Foundations of Machine Arithmetic*, Alma-Ata, Nauka, 324 p.
6. Krasnobayev, V., Kuznetsov, A., Koshman, S. and Moroz, S. (2018), "Improved Method of Determining the Alternative Set of Numbers in Residue Number System", In: Chertov O., Mylovanov T., Kondratenko Y., Kacprzyk J., Kreinovich V., Stefanuk V. (eds) Recent Developments in Data Science and Intelligent Analysis of Information. *ICDSIAI 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 836. Springer, Cham, pp. 319-328. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-97885-7_31
7. Krasnobayev, V.A., Yanko, A.S. and Koshman, S.A. (2016), "A Method for arithmetic comparison of data represented in a residue number system" *Cybernetics and Systems Analysis*, vol. 52, issue 1, pp. 145-150. DOI: https://doi.org/10.1007/s10559-016-9809-2
8. Krasnobayev, V., Koshman, S. and Mavrina, M. (2013), "Method for correcting one-time data errors represented by a deduction class code", *Elektronnoe modelirovanie*, vol. 75, issue 5, pp. 43-56.
9. Fan, C. and Ge, G. (2014) "A Unified Approach to Whiteman's and Ding-Helleseth's Generalized Cyclotomy Over Residue Class Rings,", *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 60, no. 2, pp. 1326-1336, DOI: https://doi.org/10.1109/TIT.2013.2290694
10. Krasnobayev, V.A., Koshman, S.A. and Mavrina, M.A. (2014), "A Method for Increasing the Reliability of Verification of Data Represented in a Residue Number System*", Cybernetics and Systems Analysis*, vol. 50, issue 6, pp. 969–976.
11. Yanko, A., Koshman, S. and Krasnobayev, V. (2017), "Algorithms of data processing in the residual classes system", *4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkiv, pp. 117-121, DOI: https://doi.org/10.1109/infocommst.2017.8246363
12. Krasnobaev, V. A. (1990), *Methods to improve the reliability of specialized computer systems and communications*, Kharkiv, HVVKIU RV, 172 p.
13. Krasnobayev, V., Koshman, S., Yanko, A. and Martynenko, A. (2018), "Method of Error Control of the Information Presented in the Modular Number System", *2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T). IEEE (2018)*, DOI: https://doi.org/10.1109/infocommst.2018.863204
14. Krasnobayev, V., Kuznetsov, A., Kononchenko, A. and Kuznetsova, T. (2019), "Method of data control in the residue classes", *Second International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2019)*. Zaporizhzhia, Ukraine, pp. 241–252.
15. (2017) *Security and noise immunity of telecommunication systems: new solutions to the codes and signals design problem*. Collective monograph. Edited by Ivan D. Gorbenko and Alexandr A. Kuznetsov: ASC Academic Publishing, Minden, Nevada, USA, 198 p.
16. Kasianchuk, M., Yakymenko, I., Pazdriy, I. and Zastavnyy, O. (2015), "Algorithms of findings of perfect shape modules of remaining classes system", *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics.*
17. Krasnobaev, V. A., Koshman, S. A., Moroz, S. A., Kurchanov, V. N. and Yanko, A. S. (2017), *Models and methods of data processing in the system of residual classes*, Monografiya, Harkov, OOO "V dele", 197 c.
18. (2017) *ISCI'2017: Information Security in Critical Infrastructures.* Collective monograph. Edited by Ivan D. Gorbenko and Alexandr A. Kuznetsov: LAP Lambert Academic Publishing, OmniScriptum GmbH & Co. KG, Germany, 216 p.

Received (надійшла) 10.03.2020
Accepted for publication (прийнята до друку) 13.05.2020

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Краснобаєв Віктор Анатолійович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри електроніки і управляючих систем, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, Україна;
Victor Krasnobayev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Electronics and Control Systems, V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: v.a.krasnobaev@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-5192-9918.

Янко Аліна Сергіївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна;
Alina Yanko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Computer and Information Technologies and Systems, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine;
e-mail: al9_yanko@ukr.net; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0003-2876-9316.

Тур Сергій Геннадійович – студент спеціальності «Телекомунікації та радіотехніка» кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна;
Serhii Tur – student majoring in "Telecommunications and Radio Engineering" of the Department of Automation, Electronics and Telecommunications, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine;
e-mail: sergiotur30@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-0670-1206.

Метод контрольної перевірки цифрової інформації, представленої в системі залишкових класів

В. А. Краснобаєв, А. С. Янко, С. Г. Тур

Анотація. Предметом дослідження в статті є методи контролю даних, представлених в системі залишкових класів. **Об'єкт** досліджень - процес контролю даних, представлених в системі залишкових класів. **Мета** роботи - розробка методу підвищення достовірності контролю даних, представлених в системі залишкових класів. У статті вирішуються наступні **завдання**: дослідження методів контролю даних, представлених в системі залишкових класів; розробка методу підвищення достовірності контролю даних; розгляд прикладів застосування розробленого методу для конкретної системи залишкових класів; демонстрація прикладів розрахунку і порівняльного аналізу достовірності контролю даних, представлених в системі залишкових класів. Використовуються такі **методи** дослідження: основи системного аналізу та основи машинної арифметики в системі залишкових класів. Отримані наступні **результати**: Розроблено метод підвищення достовірності контролю даних; представлені приклади застосування розробленого методу для конкретної системи залишкових класів; наведені приклади розрахунку і порівняльного аналізу достовірності контролю даних, представлених в системі залишкових класів. **Висновки:** В даній статті представлені теоретичні основи процесу підвищення достовірності контролю даних, представлених в системі залишкових класів, на основі використання процедури нулевізації чисел. Безпосередньо розроблений і представлений метод підвищення достовірності контролю даних. Наведені приклади застосування розробленого методу для конкретної системи залишкових класів і наведені приклади розрахунку достовірності контролю даних, представлених в системі залишкових класів. Розроблено метод підвищення достовірності контролю даних, є певним внеском в теорію завадостійкого кодування в системі залишкових класів. Приклади розрахунку і порівняльного аналізу достовірності контролю даних підтверджують практичну значимість результатів даної статті.

Ключові слова: обнуління числа; система передачі та обробки даних; система управління інформацією; система числення.

Метод контрольной проверки цифровой информации, представленной в системе остаточных классов

В. А. Краснобаев, А.С. Янко, С. Г. Тур

Аннотация. Предметом исследования в статье являются методы контроля данных, представленных в системе остаточных классов. **Объект** исследований - процесс контроля данных, представленных в системе остаточных классов. **Цель** работы - разработка метода повышения достоверности контроля данных, представленных в системе остаточных классов. В статье решаются следующие **задачи**: исследование методов контроля данных, представленных в системе остаточных классов; разработка метода повышения достоверности контроля данных; рассмотрение примеров применения разработанного метода для конкретной системы остаточных классов; демонстрация примеров расчета и сравнительного анализа достоверности контроля данных, представленных в системе остаточных классов. Используются следующие **методы** исследования: основы системного анализа и основы машинной арифметики в системе остаточных классов. Получены следующие **результаты**: Разработан метод повышения достоверности контроля данных; представлены примеры применения разработанного метода для конкретной системы остаточных классов; приведены примеры расчета и сравнительного анализа достоверности контроля данных, представленных в системе остаточных классов. **Выводы:** В данной статье представлены теоретические основы процесса повышения достоверности контроля данных, представленных в системе остаточных классов, на основе использования процедуры нулевизации чисел. Непосредственно разработан и представлен метод повышения достоверности контроля данных. Приведены примеры применения разработанного метода для конкретной системы остаточных классов и приведены примеры расчета достоверности контроля данных, представленных в системе остаточных классов. Разработан метод повышения достоверности контроля данных, является определенным вкладом в теорию помехоустойчивого кодирования в системе остаточных классов. Примеры расчета и сравнительного анализа достоверности контроля данных подтверждают практическую значимость результатов данной статьи.

Ключевые слова: обнуление числа; система передачи и обработки данных; система управления информацией; система счисления.

UDC 621.396 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.2.23**

H. Khudov, K. Tahyan, V. Chepurnyi, I. Khizhnyak, K. Romanenko, A. Nevodnichii, O. Yakovenko

Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine

OPTIMIZATION OF JOINT SEARCH AND DETECTION OF OBJECTS IN TECHNICAL SURVEILLANCE SYSTEMS

Abstract. The **subject matter** of the article is joint search and detection of objects in technical surveillance system. The **goal** is solve the problem of optimizing joint search and detection of objects in technical surveillance system and develop a method for assessing the effectiveness of joint search and detection of objects for technical surveillance systems. **Results.** Introduced the current discrete area of view. The task of finding the optimal Bayes decision-making rule in the introduced current discrete area of view is posed and solved. The specified Bayes optimal decision rule is formulated. Proposes the efficiency estimation method of joint search and detection of objects for surveillance technical systems. An algorithm has been developed for calculating the unconditional probability of detecting an object of surveillance during a joint search and detection of objects in technical surveillance systems. **Conclusions.** Shown, that a joint search and detection of the objects of surveillance using a uniformly optimal search strategy provides a higher unconditional probability of the correct detection of the object of surveillance. In future research, it is necessary to assess the average time that is needed to detect the object of surveillance during the joint search and detection of objects and uniform distribution of the search potential of technical surveillance systems.

Keywords: technical surveillance system; area of view; joint search and detection of objects; minimum average risk criterion; optimal Bayes decision rule.

Introduction

Today, in the development of technical surveillance systems, the main issues are the joint optimization of the stages of search and detection of objects [1-3]. A number of significant scientific results were obtained in optimizing the search and detection of objects. However, existing optimization methods consider search as a single task to review space, process signals and make decisions only in the production plan.

Solutions are obtained only for individual components of the task. The solution to the problem as a whole has not been received. A unified approach to the selection of an efficiency criterion that adequately reflects the tasks of a technical system at the stage of searching and detecting objects of interest has not been formulated. The problem of optimization of joint discrete search and detection of objects of interest in technical systems is not solved [4].

Formulation of the problem. In [5, 6], the problem of joint search and detection optimization was solved as follows. For the case of a continuous a certain area of survey Ω, an improved Bayes rule for deciding on the detection of an object is formulated. This rule is as follows. When solving the task of testing a simple hypothesis against a simple alternative, the joint optimization of the search and detection of objects reduces to finding a uniformly optimal search strategy, calculating the maximum of the unconditional likelihood ratio in the current area of view and comparing it with the threshold. In [7], the results of joint search and detection of objects efficiency are briefly analyzed. The weight criterion of an optimality of detection in a zone of search elementary cell is formulated. The differential characteristics of Bayes criterion of a minimum of average risk are taken into account. The weight criterion of joint optimization of search and detection of objects in the current zone of search is specified. Expression for the ratio of likelihood in the current zone of search is received.

Consider the results obtained in [8-10] for the case of solving task of the discrete searching and detecting a stationary single object. We solve the problem of optimizing joint search and detection of objects of interest in technical surveillance systems. We will develop a method for assessing the effectiveness of joint search and detection of objects for technical surveillance systems.

Results of researches

Consider the task of joint Bayesian optimization of discrete search and detection of objects. We will use the criterion of minimum average risk.

Figure 1 shows the ratio of the current viewing area $\Omega(t)$ and the search area Ω.

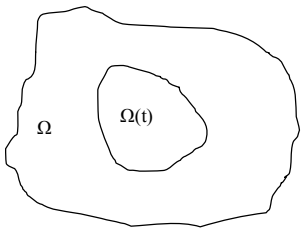


Fig. 1. The ratio of the current viewing area $\Omega(t)$ and the search area Ω

where $\Omega(t)$ – current area of view that meets the conditions $\Omega(t) \to \Omega$ for $t \to T$; T – time of view of a given search area Ω.

Divide the area of search Ω into N subareas Ω_i ($\sum_{i=1}^{N} \Omega_i = \Omega$). The average risk in subarea Ω_j is denoted as R_j. Introduce the current area of search $\Omega(t_i) = \sum_{j(t_i)} \Omega_j$, where j – number of subarea of search and detection of an object at time t.

When searching for an optimal Bayes decision rule in the current discrete search area $\Omega(t_i)$, additional optimization parameters appear. These are the current dimensions and position of the discrete area $\Omega(t_i)$ in the common area Ω. Conditions are created for finding the optimal strategy for joint search and detection of an

 © Khudov H., Tahyan K., Chepurnyi V., Khizhnyak I., Romanenko K., Nevodnichii A., Yakovenko O., 2020

object in the search area of a discrete structure. A solution to such a problem was previously absent.

The average risk in the current area of search $\Omega(t_i)$ can found as expression (1):

$$R(t_i) = \sum_{\Omega(t_i)} R_j = R_0 - ((I_{10} - I_{11}); \sum_{\Omega(t_i)} P_{1j}(\gamma_1, t_i) - (I_{01} - I_{00}) \sum_{\Omega(t_i)} P_{0j}(\gamma_1, t_i)), \quad (1)$$

where $P_{0j}(\gamma_1, t_i)$ – the current value of the unconditional probability of false alarm in the j-th subarea at a time t; $P_{1j}(\gamma_1, t_i)$ – the current value of the unconditional probability of the correct detection of objects in the j-th subarea at a time t; R_0 – a non-negative constant for the current area of search $\Omega(t_i)$ at time t. Write the Bayes rule for testing simple hypothesis H_0 against simple alternative H_1 in the current discrete sub-area $\Omega(t_i)$ of area Ω as follows:

$$\frac{\sum_{\Omega(t_i)} P_{1j}(\gamma_1, t_i)}{\sum_{\Omega(t_i)} P_{0j}(\gamma_1, t_i)} \underset{\gamma_0}{\overset{\gamma_1}{\gtrless}} \frac{I_{01} - I_{00}}{I_{10} - I_{11}}, \quad (2)$$

Passing to the unconditional likelihood ratio write expression (2) as follows:

$$l(t_i) = \frac{\sum_{\Omega(t_i)} P_{1j}(\gamma_1, t_i)}{\sum_{\Omega(t_i)} P_{0j}(\gamma_1, t_i)}; \quad l(t_i) \underset{\gamma_0}{\overset{\gamma_1}{\gtrless}} \frac{I_{01} - I_{00}}{I_{10} - I_{11}}. \quad (3)$$

Thus, the optimal Bayes rule (3) for testing a simple hypothesis against a simple alternative, which was obtained on the basis of expressions (1) and (2), is to maximize the unconditional likelihood ratio $l(t_i)$ in the current discrete area $\Omega(t_i)$ and compare it with the threshold (4):

$$c_b = \frac{I_{01} - I_{00}}{I_{10} - I_{11}}. \quad (4)$$

If $l(t) \geq c_b$, then decision γ_1 is made (the hypothesis H_0 is rejected). If $l(t) < c_b$, then decision γ_0 is made (hypothesis H_0 is accepted).

In accordance with (2) optimization should be carried out by:

parameters of conditional probability of correct detection of $P(\gamma_1 / H_1, x)$ in sub-areas Ω_j;

parameters of the current discrete area of search $\Omega(t_i)$.

Consider an important special case. Assume that, similarly to the Neumann-Pearson criterion, the value of the unconditional probability of false alarm in subarea Ω_j at a time t is fixed at a constant level – $P_{0j}(\gamma_1, t_i)$. Then, according to expression (2), finding the maximum of the unconditional likelihood ratio reduces to finding the maximum of the unconditional probability of the correct detection of the object in the current discrete subarea $\Omega(t_i)$.

Thus, to find the optimal Bayes decision rule in the current discrete area $\Omega(t_i)$ of the common area Ω, along with the solution of the hypothesis testing problem in this area, the problem of finding the optimal object search strategy (using the Bayes criterion of minimum average risk) must be solved.

Search strategy $\lambda(\Omega_j, t_i)$ is a rule that at any moment of time t_λ establishes in which subarea Ω_j of the area the search should be carried out and with what energy costs.

The condition of compulsory viewing of area Ω during the search T must be fulfilled. It's obvious that:

$$\lambda\left(\Omega_j, t_i\right) > 0, \quad for \quad \Omega_j \in \Omega(t_i); \quad (5,a)$$

$$\lambda\left(\tilde{\Omega}, t_i\right) = 0, \quad for \quad \tilde{\Omega} \in \Omega / \Omega(t_i). \quad (5,b)$$

Assume that the search strategy should be constant for all subareas that are viewed at a fixed moment of time t_i. The measure of the current area $\Omega(t_i)$ consists of the sub-areas Ω_j viewed at the moment t_i.

$$\Omega(t_i) = \sum_j \Omega_j. \quad (6)$$

In addition to the above properties of the search strategy, require that it satisfy the optimality condition. This condition is that if each T-truncated strategy $\lambda(\Omega_j, t_i)$ has a functional $P(\lambda(\Omega_j, t_i))$, then strategy $\lambda_{opt}(\Omega_j, t_i)$ will be optimal if:

$$P(\lambda_{opt}(\Omega_j, t_i)) = \sup P(\lambda(\Omega_j, t_i)), \quad (7)$$

where $P(\lambda(\Omega_j, t_i))$ – unconditional probability of correct detection of an object at time t_i at strategy $\lambda(\Omega_j, t_i)$.

From the analysis of the results for the selection of search strategies that are studied in the theory of search, of all the strategies, the class of uniformly optimal search strategies most fully satisfies expressions (5)–(7).

Strategy $\lambda(\Omega_j, t_i)$ is uniformly optimal if any T-truncated strategy is optimal, i.e.

$$P(\lambda(\Omega_j, t_i)) = P(\lambda_{opt}(\Omega_j, t_i)), \quad \forall t_i \leq T. \quad (8)$$

Thus, when solving the problem of finding, according to the Bayes criterion of the minimum of the average risk of the search strategy and object detection, the uniformly optimal search strategy is optimal. In accordance with which the current sizes and position of sub-area $\Omega(t_i)$ in the common search area Ω should be selected.

In accordance with expression (2) with a value of the unconditional probability of false alarm fixed at a constant level, the optimization task is formulated as follows:

$$P_1(\gamma_1, t_i) \to \max;$$

$$\lambda(\Omega_j, t_i) \geq 0, \quad t_i > 0;$$

$$\sum_{\Omega(t_i)} \lambda(\Omega_j, t_i) = L_0, \quad t_i > 0; \tag{9}$$

$$\sum_j \lambda(\Omega_j, t_i) = \varphi(t_i);$$

$$\sum_{\Omega(t_i)} \varphi(t_i) = L_0 t_i,$$

where $P_1(\gamma_1, t_i)$ – the unconditional probability of detecting an object at time t_i in the discrete area of search $\Omega(t_i)$; L_0 – characterizes the power of a search engine; $\varphi(t_i)$ – search effort in search area Ω at t_i.

Based on the studies performed, the following refined optimal Bayes decision rule can be formulated. When solving the task of testing a simple hypothesis against a simple alternative, the joint optimization of discrete search and object detection is reduced to: finding a uniformly optimal search strategy; calculating the maximum unconditional likelihood ratio in the current discrete area $\Omega(t_i)$; comparing it with a threshold.

To optimize the decision rule in detection systems, along with the Bayes criterion of minimum average risk, the maximum likelihood criterion is widely used [11]. The synthesis of the optimal decisive rule of deciding on the detection of the object by the criterion of maximum likelihood in the interests of joint search optimization and detection of objects in technical surveillance systems.

The weight criterion is clarified in the joint search and detection of objects in the current area of view.

Optimized two-alternative solutions according to this criterion. Synthesis of the decision rule was carried out during a two-alternative test of hypotheses in the current area and joint optimization of the search and detection of objects by the criterion of maximum likelihood.

Let us consider an algorithm for calculating the unconditional probability of the correct detection of an object and the average time for detection of this object.

We will calculate the unconditional probability of the correct identification of the object and the average time to detect the object in a joint search and detection in two coordinates for a particular case. Namely, when the a priori probability density of the location of the object is set in the form of a truncated normal law, and the viewing area is a circle with a radius of S.

We assume that the amplitude of the signal that is received is distributed according to the Nakagami distribution.

Define function $\lambda(x,t)$ of search strategy

$$\lambda_1(x_1, x_2; t) = \begin{cases} L_0 / z(t); & for \quad x_1^2 + x_2^2 < r^2(t); \\ 0; & for \quad x_1^2 + x_2^2 \geq r^2(t), \end{cases} \tag{10}$$

where $z(t)$ – a measure of the current search area.

This search strategy function will be distributed in a circle centered in the center of the viewing area and the current radius $r(t)$.

This will happen until the scope of the search strategy becomes equal to the size of the viewing area.

We define this moment of time t_1 on condition that the dimensions of the current viewing area are equal to the dimensions of the entire area of view. We get the expression (11):

$$\sigma\sqrt{2\pi L_0 t} = \pi S^2, \tag{11}$$

where σ – standard deviation in the a priori law of the location of the object. from expression (11) we obtain:

$$t_1 = \frac{\pi S^4}{4\sigma^2 L_0}. \tag{12}$$

In the points of the viewing area where the search strategy is distributed, the search potential will be accumulated over time $[0, t_1]$. This search potential is proportional to the detection parameter, which can be calculated according to expression (13):

$$\varphi_1 = \int_{t(x_1,x_2)}^{t_1} \lambda(x_1, x_2) dx, \tag{13}$$

where $t(x_1, x_2)$ – function that matters the start time of viewing the points of the viewing area.

We find this function $t(x_1, x_2)$ under condition:

$$x_1^2 + x_2^2 = 2\sigma\sqrt{\frac{L_0 t(x_1, x_2)}{\pi}}, \tag{14}$$

From (14) we obtain the expression (15):

$$t(x_1, x_2) = \frac{\pi(x_1^2 + x_2^2)^2}{4\sigma^2 L_0}. \tag{15}$$

We substitute (10), (12) and (15) into (13). Take the integral (13) and get the expression (16):

$$\varphi_1(x_1, x_2) = \begin{cases} \dfrac{S^2 - x_1^2 - x_2^2}{2\sigma^2}; & for \quad x_1^2 + x_2^2 < S^2; \\ 0; & for \quad x_1^2 + x_2^2 \geq S^2. \end{cases} \tag{16}$$

To find function $\varphi_1(x_1, x_2)$ at any moment of time, we replace in (13) the upper integration boundary for the current time t.

As a result we get the expression (17):

$$\varphi_1(x_1, x_2) = \int_{t(x_1,x_2)}^{t} \lambda_1(x_1, x_2; t) dt. \tag{17}$$

After time moment t_1 at the accepted density of a priori probability, the search strategy will be distributed under conditions of uniform distribution density (base).

While the current viewing area $\Omega(t)$ will completely coincide with the entire viewing area, and

$$\Omega(t) = \pi S^2. \tag{18}$$

In this case, taking into account expression (18), the search strategy has the following form:

$$\lambda_2(x_1,x_2;t)=\begin{cases}\dfrac{L_0}{\pi S^2}; & for \quad x_1^2+x_2^2<S^2;\\ 0; & for \quad x_1^2+x_2^2\geq S^2.\end{cases} \tag{19}$$

In time interval $[t_1,T]$, the search potential, taking into account expression (19), can be determined according to expression (20):

$$\varphi_2(x_1,x_2)=\int_{t_1}^{T}\lambda_2(x_1,x_2;t)dt. \tag{20}$$

We substitute (19), (12) into (20). As a result we get the expression (21):

$$\varphi_2(x_1,x_2)=\frac{L_0(T-t_1)}{\pi S^2}, \tag{21}$$

where T – time to view the entire viewing area.

We calculate the unconditional probability of the correct detection of the object during the search T when continuously searching for objects in two coordinates in a circular viewing area.

In this case, we will take into account the proportional dependence of the detection parameter and the calculated value of the search potential. We restrict ourselves to the case of detecting a signal with an amplitude that is distributed according to the Nakagami distribution with coefficient m.

If $m=1$, the Nakagami distribution is converted into a Rayleigh distribution.

If $m=2$, the Nakagami distribution is converted into a Swerling distribution.

For the convenience of subsequent calculations, we introduce a polar coordinate system.

Then, taking into account the transition to the polar coordinate system and the transition in both parts of the expression to dimensionless quantities by multiplying by the search time, expressions (10) and (19) will have the form (22):

$$\lambda(\rho_1,\beta,s)T=\begin{cases}\dfrac{k^{1/2}}{2(\pi s)^{1/2}}; & s\in[0,s_1];\\ & \rho_1<h;0\leq\beta\leq 360^0;\\ \dfrac{k}{\pi h^2}; & s\in[s_1,1];\\ & \rho_1<h;0\leq\beta\leq 360^0,\end{cases} \tag{22}$$

where k – value that determines the total search potential of the surveillance technical system; h – value that determines the size of the entire viewing area.

And for the search potential when changing the value of s in the interval of expression (16), expression (17) is converted to the next expression (23):

$$\varphi(\rho_1,\beta)=\frac{h^2}{4}+\frac{k^2}{\pi h^2}-\frac{\rho_1^2}{2};\quad \rho_1<h;\quad 0\leq\beta\leq 360^0. \tag{23}$$

Thus, the expressions for the unconditional probability of the correct detection of the object of surveillance:

for $m=1$

$$P_1(\gamma_1,T)=1\Big/\left(1-e^{-h^2/2}\right)\times \times\int_0^h\exp\left(-\frac{\ln(1/F)}{1+\dfrac{h^2}{4}+\dfrac{k^2}{\pi h^2}-\dfrac{\rho_1^2}{2}}\right)\rho_1 d\rho; \tag{24}$$

for $m=2$

$$P_1(\gamma_1,T)=1\Big/\left(1-e^{-h^2/2}\right)\times \times\int_0^h\left(\left(1+\frac{\dfrac{h^2}{8}+\dfrac{k^2}{2\pi h^2}-\dfrac{\rho_1^2}{4}}{\left(1+\dfrac{h^2}{8}+\dfrac{k^2}{2\pi h^2}-\dfrac{\rho_1^2}{4}\right)^2}\mp\right)\times \times\ln(1/F)\right)\times \times\exp\left(-\frac{\ln(1/F)}{1+\dfrac{h^2}{8}+\dfrac{k^2}{2\pi h^2}-\dfrac{\rho_1^2}{4}}\right)\rho_1 d\rho; \tag{25}$$

We calculate the unconditional probability of correct detection according to obtain expressions (24) and (25).

Fig. 2 and 3 show the dependences of the calculated values on a value that characterizes the speed and time of viewing the entire viewing area.

Fig. 2 and 3 show the dependence of the unconditional probability of correct detection on a value of k for the values of the conditional probability of false alarm $F=10^{-2}$ (upper curve) and $F=10^{-4}$ (lower curve).

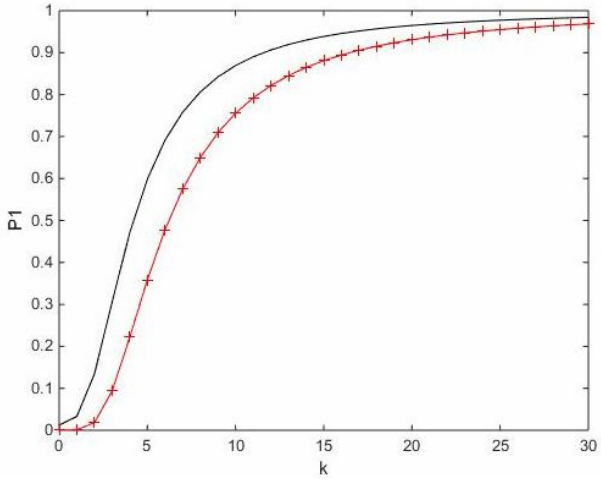


Fig. 2. The dependence of the unconditional probability of correct detection on the value of ($m=1,h=1$)

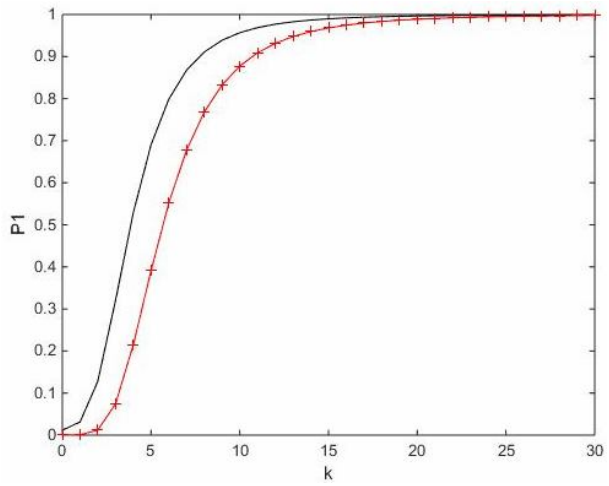


Fig. 3. The dependence of the unconditional probability of correct detection on the value of k ($m=2, h=1$)

The minimum value of the value, which is proportional to the value of the total search potential of the surveillance system, is selected subject to mandatory viewing of the entire viewing area.

To assess the effectiveness of the search algorithm and object detection using a uniformly optimal search strategy, we will compare this algorithm with the known algorithms of the space-temporal distribution of search efforts in surveillance systems.

Provided that the known algorithms assume a uniform distribution of the search potential across the viewing area. With a uniform distribution, the expression for the detection parameter, and, consequently, for the search potential, has the following form:

$$\varphi(x_1, x_2) = \frac{L_0 T}{\pi S^2}, \tag{26}$$

which, taking into account the introduced notation, has the form:

$$\varphi(x_1, x_2) = k \Big/ \left(\pi h^2\right). \tag{27}$$

The expressions for the conditional probability of the correct surveillance of the object under surveillance with a uniform distribution of the search potential over the search area, taking into account expression (27), have the following form:

for $m=1$

$$P_1(\gamma_1 / H_1, x_1, x_2) = F^{1 \Big/ \left(1+k/\pi h^2\right)}, \tag{28}$$

for $m=2$

$$P_1(\gamma_1 / H_1, x_1, x_2) = F^{\frac{1}{1+k/\pi h^2}} \times \times \left(1 + \frac{k}{\left(2\pi h^2 \left(1 + k \Big/ \left(\pi h^2\right)\right)^2\right)} \cdot \ln\left(1/F\right) \right). \tag{29}$$

Using expressions (28) and (29) we get the unconditional probability of the correct detection of the object with a uniform distribution of the search potential across the viewing area. We will use the notation introduced earlier:

for $m=1$

$$P_1(\gamma_1, T) = F^{1 \Big/ \left(1+k/\pi h^2\right)} \times \times \frac{\int_0^h \exp\left(-\rho_1^2/2\right)\rho_1 d\rho_1}{1 - e^{-h^2/2}}. \tag{30}$$

for $m=2$

$$P_1(\gamma_1, T) = F^{1 \Big/ \left(1+k/\pi h^2\right)} \times \times \int_0^h \exp\left(-\rho_1^2/2\right)\rho_1 d\rho_1 \times \times \frac{\left(1 + k \ln\left(1/F\right)\right) \Big/ \left(2\pi h^2 \left(1 + \frac{k}{2\pi h^2}\right)^2\right)}{1 - e^{-h^2/2}}. \tag{31}$$

Fig. 4 and 5 show graphs of the dependence of the unconditional probability of detecting an object:

the lower curve – when a uniform distribution of the search potential across the viewing area, which are calculated by the expressions (30) and (31) versus the value of k;

the upper curve – when searching and discovering objects together, which are calculated by the expressions (24) and (25) versus value of k.

The value of the conditional probability of false alarm was taken equal to $F = 10^{-3}$.

From these graphs it can be concluded that a joint search and detection of the object of surveillance using a uniformly optimal search strategy provides a higher unconditional probability of the correct detection of the object of surveillance.

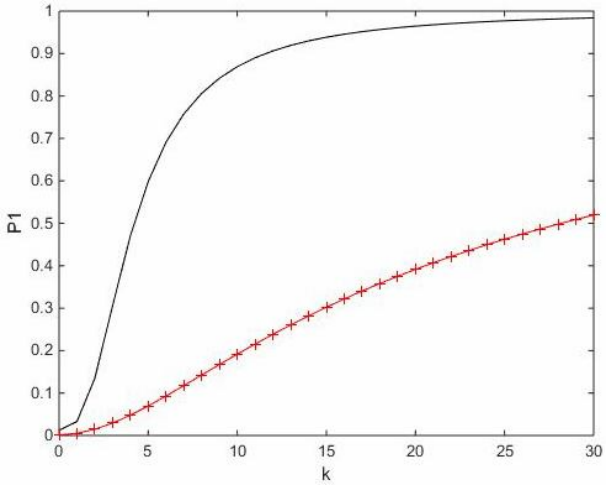


Fig. 4. The dependence of the unconditional probability of correct detection on the value of k ($m=1, h=1$)

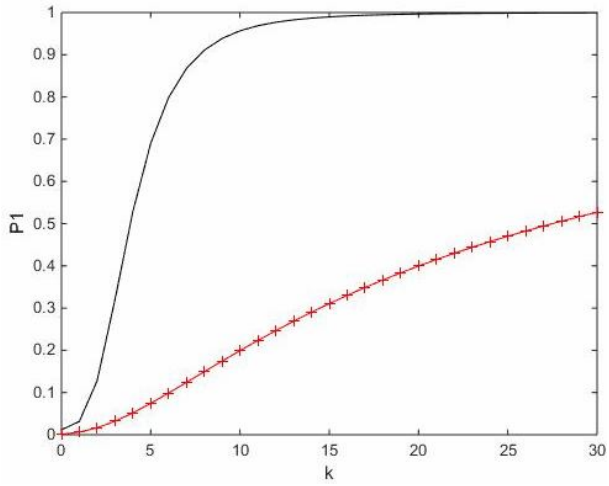


Fig. 5. The dependence of the unconditional probability of correct detection on the value of k ($m=2, h=1$)

This is especially noticeable provided that there is a strict restriction on the value of k.

Conclusions

Introduced the current discrete area of view. The task of finding the optimal Bayes decision-making rule in the introduced current discrete area of view is posed and solved. The specified Bayes optimal decision rule is formulated. When solving the task of testing a simple hypothesis against a simple alternative, the joint optimization of discrete search and object detection is reduced to: finding a uniformly optimal strategy for finding an object in discrete cells of the search area; calculating the maximum unconditional likelihood ratio in the current group of search subdomains; comparing it with a threshold.

Proposes the efficiency estimation method of joint search and detection of objects for surveillance technical systems. The differential characteristics of the Bayes criterion of minimum average risk, a priori probabilities of hypotheses about the absence of an object and its presence are taken into account in the calculations.

An algorithm has been developed for calculating the unconditional probability of detecting an object of surveillance during a joint search and detection of objects in technical surveillance systems.

Shown, that a joint search and detection of the objects of surveillance using a uniformly optimal search strategy provides a higher unconditional probability of the correct detection of the object of surveillance.

In future research, it is necessary to assess the average time that is needed to detect the object of surveillance during the joint search and detection of objects and uniform distribution of the search potential of technical surveillance systems.

References

1. Nguyen, H.V., Rezatofighi, H., Vo, Ba-Ngu and Ranasinghe, D. (2019), "Online UAV Path Planning for Joint Detection and Tracking of Multiple Radio-tagged Objects", Proc. *IEEE Transactions on Signal Processing*, Sept., pp. 5365–5379, DOI: https://doi.org/10.1109/TSP.2019.2939076.
2. Nguyen, H.V., Chesser, M., Koh, L.P., Rezatofighi, S.H. and Ranasinghe, D.C. (2019), "TrackerBots: Autonomous UAV for Real-Time Localization and Tracking of Multiple Radio-Tagged Animals", *Journal of Area Robotics*, vol. 36, no. 3, pp. 617–635, DOI: https://doi.org/10.1002/rob.21857.
3. Hoang, H.G. and Vo, B.T. (2014), "Sensor management for multi-target tracking via multi-Bernoulli filtering", *Automatica*, vol. 50, no. 4, pp. 1135–1142, DOI: https://doi.org/10.1016/j.automatica.2014.02.007.
4. Wickens T.D. 92002), *Elementary signal detection theory*, Oxford University Press, New York, 2002, 277 p.
5. Li, J., Chu, X., He, W., Ma, F., Malekian, R. and Li, Z. (2019/0, "A Generalised Bayesian Inference Method for Maritime Surveillance Using Historical Data", *Symmetry*, No. 11(2), 188, DOI: https://doi.org/10.3390/sym11020188.
6. Petrović, N., Jovanov, L., Pizurica, A. and Philips, W. (2008), "Object Tracking Using Naïve Bayesian Classifiers", *Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems: 10th International Conference (ACIVS 2008)*, pp. 775–784. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-88458-3_70.
7. Khudov, H., Fedorov, A., Holovniak, D. and Misiyuk, G. (2018), "Improving the Efficiency of Radar Control of Airspace with the Multilateration System Use", *Intern. Scient.-Pract. Conf. Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, pp. 680-684, DOI: https://doi.org/10.1109/infocommst.2018.8632141.
8. Barniv, Y. (1985), "Dynamic programming solution for detecting dim moving targets", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, January 1985, Vol. AES-21, Iss. 1, pp. 144-156, DOI: https://doi.org/10.1109/TAES.1985.310548.
9. Khudov, H., Zvonko, A., Kovalevskyi, S., Lishchenko, V. and Zots, F. (2018), "Method for the detection of smallsized air objects by observational radars", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, No. 2(92), pp. 61-68, DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126509.
10. Khudov, H., Khizhnyak, I., Zots, F., Misiyuk, G. and Serdiuk, O. (2020), "The Bayes Rule of Decision Making in Joint Optimization of Search and Detection of Objects in Technical Systems", *IJETER*, No. 8(1), pp. 7–12. DOI: https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/02812020.
11. Khudov, H., Zvonko, A., Khizhnyak, I., Shulezko, V., Khlopiachyi, V., Chepurnyi, V. and Yuzova, I. (2020), "The Synthesis of the Optimal Decision Rule for Detecting an Object in a Joint Search and Detection of Objects by the Criterion of Maximum Likelihood", *IJETER*, No. 8(2), 2020, p. 520–524. DOI: https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/40822020.

Received (Надійшла) 31.03.2020
Accepted for publication (Прийнята до друку) 20.05.2020

Худов Геннадій Володимирович – доктор технічних наук, професор, начальник кафедри, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;
Hennadii Khudov – doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: 2345kh_hg@ukr.net; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-3311-2848.

Тах'ян Крістина Альбертівна – науковий співробітник, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;
Kristina Tahyan – Research Associate, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: tahyan_k@gmail.com; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0003-0087-9601.

Чепурний Вячеслав Петрович – начальник навчально-тренувального комплексу, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;
Viacheslav Chepurnyi – Department of Tactic and Military Disciplines, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine
e-mail: chvpximv@ukr.net; ORCID ID: http://orcid.org/ 0000-0002-1341-1904;

Хижняк Ірина Анатоліївна – кандидат технічних наук, викладач кафедри математичного та програмного забезпечення АСУ, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;
Irina Khizhnyak – Candidate of Technical Sciences, Lecturer of the Department of Mathematical and Software of ACS, Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: iren_gontarenko@ukr.net; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0003-3431-7631

Романенко Костянтин Олегович – курсант, Харківський національний університет Повітряних Сил, Харків, Україна;
Konstantin Romanenko – cadet, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: Konstantin_Romanenko@ukr.net; ORCID ID: http://orcid.org/ 0000-0003-3107-3475

Неводничий Артем Олегович – курсант, Харківський національний університет Повітряних Сил, Харків, Україна;
Artem Nevodnichii – cadet, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine
e-mail: Artem_Nevodnichii@ukr.net; ORCID ID: http://orcid.org/ 0000-0003-4572-8807

Яковенко Олександр Васильович – курсант, Харківський національний університет Повітряних Сил, Харків, Україна;
Olexandr Yakovenko – cadet, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: Olexandr_Yakovenko @ukr.net; ORCID ID: http://orcid.org/ 0000-0002-7099-9011

Оптимізація спільного пошуку та виявлення об'єктів в технічних системах спостереження

Г. В. Худов, К. А. Тах'ян, В. П. Чепурний, І. А. Хижняк, К. О. Романенко, А. О. Неводничий, О. В. Яковенко

Анотація. Предметом статті є оптимізація спільного пошуку та виявлення об'єктів в технічних системах спостереження. **Мета** - вирішити проблему оптимізації спільного пошуку та виявлення об'єктів в технічних системах спостереження та розробити метод оцінки ефективності спільного пошуку та виявлення об'єктів для систем технічного спостереження. **Результати.** Була введена у розгляд поточна дискретна зона огляду. Поставлена і вирішена задача пошуку оптимального байєсовського правила прийняття рішення у введеній поточній дискретній зоні огляду. Сформульовано уточнене оптимальне байєсовське правило прийняття рішення. Проведений синтез оптимального правила прийняття рішення про виявлення об'єкту при сумісному пошуку та виявленню в технічних системах спостереження по критерію максимальної правдоподібності. Запропоновано метод оцінки ефективності спільного пошуку та виявлення об'єктів в технічних системах спостереження. Розроблено алгоритм обчислення безумовної вірогідності виявлення об'єкта спостереження під час спільного пошуку та виявлення об'єктів у системах технічного спостереження. **Висновки.** Показано, що спільний пошук та виявлення об'єктів спостереження з використанням рівномірно-оптимальної стратегії пошуку забезпечує більш високу безумовну ймовірність правильного виявлення об'єкта спостереження. У майбутніх дослідженнях необхідно оцінити середній час, необхідний для виявлення об'єкта спостереження під час спільного пошуку та виявлення об'єктів та рівномірного розподілу пошукового потенціалу систем технічного спостереження.

Ключові слова: технічна система спостереження; зона огляду; спільний пошук та виявлення об'єктів; критерій мінімуму середнього ризику; оптимальне байєсовське правило прийняття рішення.

Оптимизация совместного поиска и обнаружения объектов в технических системах наблюдения

Г. В. Худов, К. А. Тахьян, В. П. Чепурной, И. А. Хижняк, К. О. Романенко, А. О. Неводничий, А. В. Яковенко

Аннотация. Предметом статьи является оптимизация общего поиска и обнаружения объектов в технических системах наблюдения. **Цель** - решить проблему оптимизации совместного поиска и обнаружения объектов в технических системах наблюдения и разработать метод оценки эффективности совместного поиска и обнаружения объектов для систем технического наблюдения. **Результаты.** Была введена в рассмотрение текущая дискретная зона обзора. Поставлена и решена задача поиска оптимального байесовский правила принятия решения в введенной текущей дискретной зоне обзора. Сформулировано уточненное оптимальное байесовский правило принятия решения. Проведенный синтез оптимального правила принятия решения об обнаружении объекта при совместном поиске и выявлению в технических системах наблюдения по критерию максимального правдоподобия. Предложен метод оценки эффективности совместного поиска и обнаружения объектов в технических системах наблюдения. Разработан алгоритм вычисления безусловной вероятности обнаружения объекта наблюдения во время совместного поиска и обнаружения объектов в системах технического наблюдения. **Выводы.** Показано, что совместный поиск и выявление объектов наблюдения с использованием равномерно-оптимальной стратегии поиска обеспечивает более высокую безусловную вероятность правильного обнаружения объекта наблюдения. В будущих исследованиях необходимо оценить среднее время, необходимое для обнаружения объекта наблюдения во время совместного поиска и обнаружения объектов и равномерного распределения поискового потенциала систем технического наблюдения.

Ключевые слова: техническая система наблюдения; зона обзора; совместный поиск и выявление объектов; критерий минимума среднего риска; оптимальное байесовский правило принятия решения.

УДК 656. 051 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.2.24**

П. Ф. Горбачов, Д. М. Ву, І. І. Штанько

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна

ЗАКОНОМІРНОСТІ РОЗПОДІЛУ ШВИДКОСТІ РУХУ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ НА МІСЬКИХ ВУЛИЦЯХ

Анотація. Проблема. Метою досліджень швидкості руху транспортних засобів є визначення загальних тенденцій швидкості, визначення її раціональних меж, оцінка рівня безпеки руху, прогнозування обсягу викидів шкідливих речовин в атмосферне повітря та інтегральна оцінка часу поїздки в міських мережах, що враховує випадковий характер цієї величини. Особливої актуальності задача її оцінки набуває в міських умовах, коли умови руху не можуть вважатися вільними. Виникаючі тут транспортні ситуації часто обмежують простір і час для здійснення маневрів, так само як і скорочують набір маневрів для водіїв. Різна реакція водіїв на виникаючі в русі складності можуть призводити до зростання рівня випадковості швидкості, що вимагає дуже уважного ставлення до параметрів її розподілу. Попередні дослідження в цьому напрямку підтвердили такі тенденції, але не дозволили зробити остаточних висновків про характер розподілу швидкості транспортних засобів на міських вулицях. **Мета.** Перевірити справедливість гіпотези про можливість описання коливань швидкості руху однотипних транспортних засобів в різних умовах гамма-розподілом. **Методологія.** Статистична оцінка фактичних значень швидкості руху транспортних засобів перед стоп-лінією міського регульованого перетину доріг за допомогою теоретичного закону розподілу та регресійного аналізу зв'язку між математичним сподіванням та параметром форми гама розподілу швидкості руху. **Результати.** Підтверджено справедливість гіпотези про можливість використання гамма-розподілу для опису коливання значень швидкості руху однотипних транспортних засобів в різних умовах. **Оригінальність.** Проведено оцінку швидкості автомобілів та мотоциклів в нових умовах руху. **Практична значущість.** Отримані результати дозволяють підвищити точність прогнозів швидкості руху в аналітичних та імітаційних моделях функціонування транспортних мереж.

Ключові слова: швидкість руху; автомобіль; мотоцикл; регульований перетин; випадкова величина; закон розподілу.

Вступ

Швидкість руху (ШР) транспортних засобів (ТЗ) є об'єктом вивчення для багатьох дослідників транспорту. Вимірювання швидкості найчастіше проводяться в точці (або на короткій ділянці) проїзної частини в умовах вільного потоку. Метою таких досліджень є визначення швидкості, яку обирають водії [1]. Ця інформація використовується для визначення загальних тенденцій швидкості, для визначення раціональних меж швидкості та для оцінки рівня безпеки руху [1]. Задля цього також виконують дослідження швидкості руху в містах, але вони передбачають прогнозування обсягу викидів шкідливих речовин в атмосферне повітря [2] та визначення інтегральної оцінки часу поїздки в міських мережах, що враховує випадковий характер цієї змінної.

ШР ТЗ є випадковою величиною, яка свідомо обирається водієм в конкретній транспортної ситуації. Її випадковість обумовлена різноманітністю можливих транспортних ситуацій та індивідуальним характером реакції водіїв на них, що має узагальнену назву «манера керування».

Задача оцінки ШР набуває особливої актуальності в міському автомобільно-дорожньому середовищі, коли умови руху не можуть вважатися вільними. Виникаючі тут транспортні ситуації часто обмежують простір і час для здійснення маневрів, так само як і скорочують набір можливих маневрів для водіїв. Останнє твердження здебільшого відноситься до вибору саме ШР ТЗ, яка зазвичай зменшується при ускладненні умов руху. Однак різноманітна реакція водіїв на виникаючі складнощі при русі може призводити до зростання рівня випадковості ШР, що вимагає дуже уважного ставлення до параметрів її розподілу. Попередні дослідження в цьому напрямку підтвердили такі тенденції [3, 4], але не дозволили зробити остаточних висновків про характер розподілу ШР транспортних засобів на міських вулицях. Необхідне подальше дослідження цього параметра в нових умовах руху для формування остаточних висновків про закономірності її коливання в міських умовах.

Аналіз літератури. Спосіб опису закону розподілу (ЗР) швидкості руху ТЗ запропоновано в роботах [3, 4], в яких досліджується вплив ширини проїзної частини та наявності світлофора на ЗР швидкості. Для опису коливань ШР використано гамма-розподіл, який добре підходить як для вільних умов руху на міжміських автомобільних дорогах, так і для обмежених міських умов.

У першому випадку для опису ШР зазвичай використовується нормальний розподіл [5]. При деякому ускладненні умов руху автомобілів та зниженні середньої швидкості руху, мода емпіричного розподілу переміщується ліворуч від центру симетрії [6]. У найбільш складних умовах, що виникають перед стоп-лінією міського перетину, гамма-розподіл впритул наближається до свого окремого випадку – показникового розподілу, коли параметр форми наближається до одиниці [3]. Ці результати свідчать на користь використання гамма-розподілу для опису ШР автомобілів в різних умовах, проте не можуть вважатися її підтвердженням. Необхідно вивчити розподіл ШР в ситуаціях з більш складними умовами руху, ніж були розглянуті в роботі [3].

Окрема частина досліджень ШР присвячена її вивченню на прикладі двоколісних транспортних

© Горбачов П. Ф., Ву Д. М., Штанько І. І., 2020

засобів – різного роду мопедів, моторолерів і мотоциклів, які широко використовуються мешканцями східної Азії [7, 8]. Таких робіт значно менше, ніж робіт, що присвячені ШР автомобілів, але вони присвячені вивченню руху двоколісних ТЗ саме в містах. В роботі [7] наведено графіки щільності ймовірності розподілу ШР мотоциклів в центральній частині Ханоя, столиці В'єтнаму. Спостереження проводилися на перегонах вулиць, і результати досліджень забезпечили візуальну відповідність коливань ШР нормальному закону. З нашої точки зору, цей факт може пояснюватися значно меншою потребою двоколісних ТЗ в дорожньому просторі, що забезпечує їм більшу свободу руху в міських умовах. Цей факт також вимагає перевірки, результати якої дадуть відповідь на питання щодо можливості застосування гіпотези щодо відповідності коливань ШР ТЗ гамма-розподілу.

Мета та постановка задачі. Метою роботи є подальша перевірка висунутої в роботі [4] гіпотези щодо можливості використання гамма-розподілу для опису ШР ТЗ в різноманітних дорожніх ситуаціях, а також щодо зв'язку між умовами руху і параметром форми цього розподілу.

Інтегральним показником, який достатньо характеризує умови руху ТЗ, є середня швидкість руху на конкретній ділянці дороги в певних умовах. Ця величина в основному залежить від поведінки водіїв в конкретній дорожній ситуації і може бути легко визначена за допомогою натурних спостережень.

Тому для досягнення поставленої мети необхідно встановити статистичний зв'язок між середньою ШР автомобілів і параметром форми гамма-розподілу, для чого необхідно оцінити її значення в більш складних умовах руху, ніж були розглянуті раніше. Це дасть можливість розширити межі статистичного ряду експериментальних значень для проведення регресійного аналізу та встановлення досліджуваного зв'язку.

До того ж, необхідно підвищити рівень впевненості щодо ступеня спільності гіпотези про зв'язок між розподілом ШР, який висунуто в роботах [3, 4], і умовами руху його учасників. Для цього доцільно оцінити ШР двоколісних ТЗ перед стоп-лінією міського регульованого перехрестя. Більша свобода руху таких ТЗ повинна привести до меншої трансформації нормально розподіленої в вільних умовах ШР, ніж це характерно для автомобілів. Для забезпечення порівняння результатів спостереження повинні бути збережені загальні умови проведення експерименту.

При цьому необхідно усвідомлювати, що проведення активного експерименту призводить до необхідності свідомого ускладнення умов руху ТЗ і практично не може бути реалізованим. Такі дії регулюються пунктами 1.5, 1.6 та 1.8 Правил дорожнього руху України [9], які не дозволяють проводити їх без відповідних законодавчих обґрунтувань, до переліку яких наукові дослідження не відносяться.

Тому продовження експериментальних досліджень повинно здійснюватися в формі пасивного експерименту (спостереження) з виконанням вимог збереження спільності умов обмеження свободи руху для всіх ТЗ, а також додатковим ускладненням умов руху для автомобілів. Таким умовам відповідає ситуація, що виникає перед стоп-лінією міського регульованого перехрестя. Для неї можливе ускладнення умов руху при розгляді такого підходу до перехрестя, в якому як частка сигналу, що дозволяє рух, в тривалості циклу, так і його абсолютна тривалість будуть менше, ніж аналогічні показники тривалості циклу світлофорного регулювання та його елементів, що розглянуті в попередніх спостереженнях [3].

Характеристикою ШР, яку можливо оцінити, є середня швидкість перетину корпусом ТЗ поперечного перерізу дороги перед стоп-лінією перехрестя, методика вимірювання якої детально описана в [3].

Результати досліджень

Вимірювання ШР ТЗ перед стоп-лінією міського регульованого перетину доріг на підході другорядного напрямку. Поставлена мета ускладнення умов проїзду автомобілями світлофорного об'єкта в місті може бути досягнута при виборі для обстеження другорядного напрямку на міському регульованому перетині доріг з тривалим циклом світлофорного регулювання. Цим умовам добре відповідає ділянка прилягання проспекту Перемоги до вулиці Клочківської, на якій дві смуги руху призначені для повороту ліворуч, для виконання якого в циклі виділений основний такт, рис. 1.

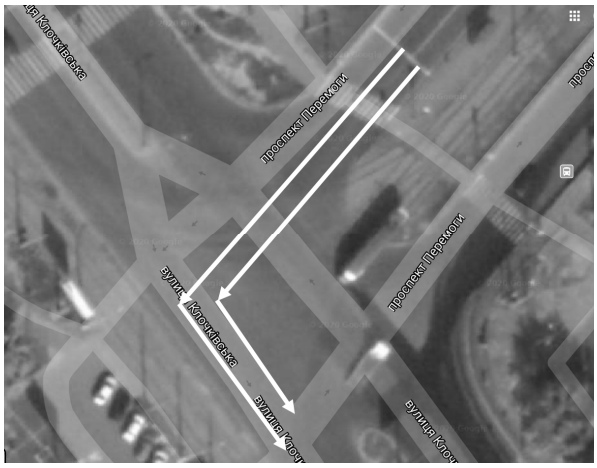


Рис. 1. Світлофорний об’єкт, обраний для проведення спостережень за ШР автомобілів

Ця ділянка прилягання має велику площу і гарне дорожнє покриття, що забезпечує досить вільні умови руху на об'єкті, тобто не обмежує ШР автомобілів при старті від стоп-лінії і надалі при розгоні. Тому умови спостереження за ШР автомобілів безпосередньо перед стоп-лінією можна вважати схожими з умовами руху автомобілів в попередньому експерименті [3].

Водночас умови світлофорного регулювання на обраному напрямку обстеження помітно відрізняються від аналогічних умов в попередньому експерименті [3], табл. 1.

Таблиця 1 – **Характеристика циклів світлофорного регулювання**

Назва перетину доріг	Тривалість, с		Частка фази , що дозволяє рух, %
	циклу	фази, що дозволяє рух	
Вул. Я. Мудрого – Вул. Алчевських	60	20	33,3
Пр. Перемоги – Вул. Клочківська	90	16	17,8

Зважаючи на дані з табл. 1, тривалість фази, що дозволяє руху, для обраного напрямку на новому перетині доріг не є гранично низькою й дорівнює 16 с. У відносному вигляді вона зменшилася на 25 % в порівнянні з попередніми спостереженнями. Проте значно, майже вдвічі, зменшилася частка фази, що дозволяє рух, в циклі для досліджуваного напрямку. Це створює тверде підґрунтя для проведення дослідження на даному перетині, так як спостереження такого роду розширить ряд значень швидкості, що характеризує умови проїзду обраної ділянки.

Спостереження проводилися протягом однієї години робочого дня, п'ятниці, 10 січня 2020 року за допомогою відео-фіксації процесу проїзду автомобілями поперечного перерізу пр. Перемоги безпосередньо перед стоп-лінією перетину доріг по двох смугах. В результаті обробки відеоматеріалів отримано 260 значень часу проїзду автомобілів власного габариту через поперечний переріз дороги і, власне, значень довжини автомобілів, рис. 2.

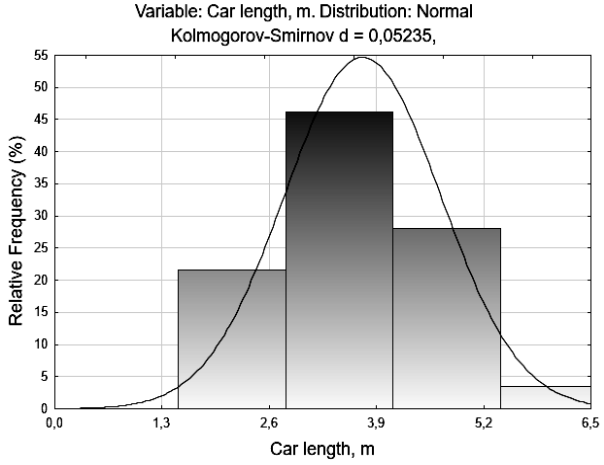


Рис. 2. Розподіл довжини корпусу автомобілів, що охоплені спостереженням

Відповідність розподілу довжини автомобілів, які охоплені спостереженням, нормальному закону підтверджено значенням категорійного критерія Колмогорова-Смирнова, яке виявилося значно менше табличного, що дорівнює 0,381 для цього випадку, і 20% довірчої ймовірності [10]. Це свідчить про правомірність використання отриманого набору спостережень для формування масиву ШР перед стоп-лінією міського регульованого перетину в нових умовах, табл. 2.

Значення, які наведено в табл. 2, свідчать на користь гіпотези про те, що при зниженні середньої ШР ТЗ відбувається відносне зростання її стандартного відхилення, що в підсумку призводить до зниження параметра форми. У порівнянні із попереднім досвідом [3], середня швидкість зменшилася з 5,30 до 2,42 м/с, тобто в 2,2 рази, а стандартне відхилення з 4,94 до 3,00 м/с, тобто в 1,45 рази.

Таблиця 2 – **Статистична характеристика значень ШР автомобілів перед стоп-лінією перетину доріг**

Характеристика вибірки	Значення, м/с
Кількість спостережень, од.	260
Мінімум	0,03
Максимум	11,50
Математичне очікування	2,423
Стандартне відхилення	3,005
Параметр масштабу гамма-розподілу	3,719
Параметр форми гамма- розподілу	0,651

Проте в даному випадку зростання стандартного відхилення виявилося значним, і зрештою параметр форми гамма-розподілу прийняв значення менше, ніж одиниця. Тому при використанні методу моментів в підборі теоретичного закону його результати для гамма-розподілу виявилися незадовільними, рис. 3.

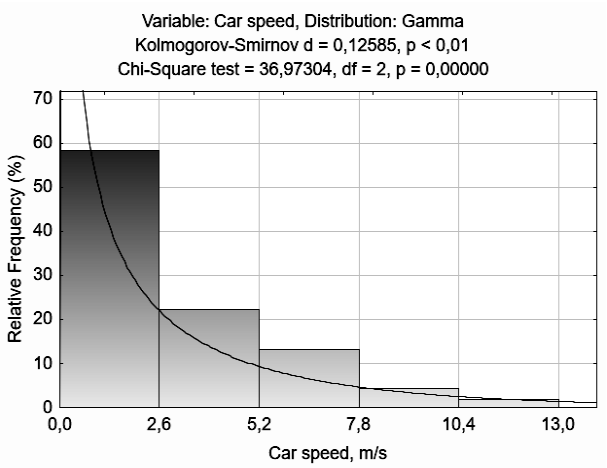


Рис. 3. Гама-розподіл ШР автомобілів, що отриманий за допомогою методу моментів

Однак, використовуючи метод максимальної правдоподібності, результати переконливо свідчать про можливість використання гамма-розподілу для опису ШР автомобілів і в останньому випадку, рис. 4.

Параметри гамма-розподілу, що підібраний методом максимальної правдоподібності, склали: масштаб - 3,011 і форма - 1,005.

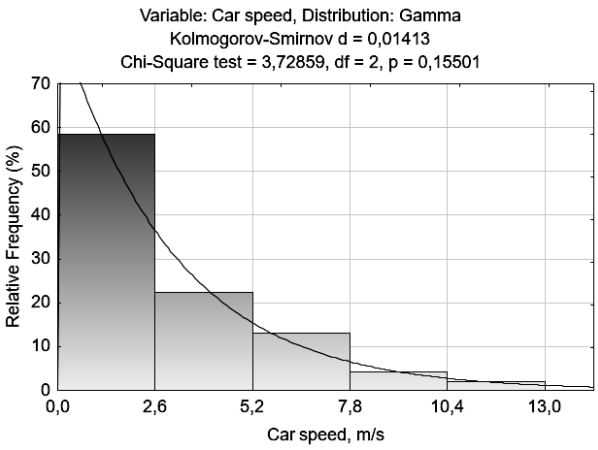


Рис. 4. Гама-розподіл ШР автомобілів, що отриманий за допомогою методу максимальної правдоподібності

При таких параметрах математичне очікування гамма-розподілу приблизно дорівнює стандартному відхиленню, і обидва близькі до значення параметра масштабу. Загалом, значення параметра форми гамма-розподілу, що близьке до одиниці, свідчить про можливість опису емпіричного розподілу ШР автомобілів перед стоп-лінією показниковим законом, що підтвердилося при відповідній перевірці, рис. 5.

Дані результати свідчать на користь гіпотези про можливість використання гамма-розподілу для опису ШР ТЗ, а також створюють основу для встановлення статистичного зв'язку між математичним очікуванням швидкості і параметром форми гамма-розподілу.

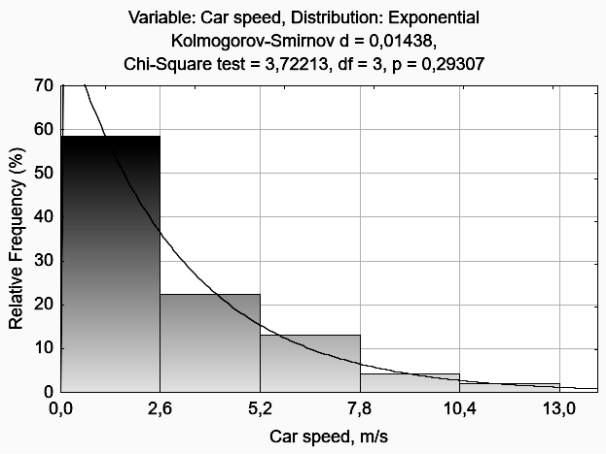


Рис. 5. Показниковий розподіл ШР автомобілів, що отриманий за допомогою методу максимальної правдоподібності

Встановлення статистичного зв'язку між математичним очікуванням швидкості і параметром форми гамма-розподілу. Цей зв'язок можна оцінити після складання відповідного статистичного ряду, який отримано з доступних даних, враховуючи дане дослідження. Відповідні для цієї мети дані зведено до табл. 3, із зазначенням джерела, звідки вони були взяті.

Таблиця 3 – **Результати дослідження ШР в різноманітних умовах, м/с**

Середня швидкість, v	**Стандартне відхилення**	**Форма гама-розподілу**	**Джерело**
2,42	3,00	0,649	–
5,30	4,94	1,151	[3]
5,99	2,32	6,666	[4]
12,08	3,06	15,638	[6]
13,24	4,19	9,989	[6]
14,17	4,72	9,025	[6]
14,78	5,18	8,143	[6]
15,48	4,91	9,928	[11]
16,36	4,08	16,054	[12]
23,14	4,78	23,455	[13]

Ці дані були оброблені в пакеті аналізу Excel, в результаті чого отримана найпростіша регресійна залежність між параметром форми гамма-розподілу n і середньою швидкістю v:

$$n = 0,85 \cdot v \,. \qquad (1)$$

Отримана модель має настільки переконливі статистичні параметри, що пошук більш сильних варіантів статистичного зв'язку між незалежною та результуючою ознаками далі можна не продовжувати, табл. 4.

Настільки сильний лінійний зв'язок між параметром форми гамма-розподілу і середньою швидкістю переконливо свідчить на користь можливості використання гамма-розподілу для опису коливання ШР автомобілів в різних умовах.

Оцінка розподілу ШР мотоциклів перед стоп-лінією перетину доріг. Така оцінка проводиться з метою перевірки гіпотези про можливість використання гамма-розподілу для опису коливання ШР інших ТЗ, відмінних від автомобілів, а також для оцінки можливості використання статистичної залежності (1) при описі ШР мотоциклів. Обстеження проводилося на перехресті вулиць Cat Linh-An Trach і Trinh Hoai в столиці В'єтнаму, Ханої, 10 грудня 2018 року, з $9^{\underline{00}}$ до $11^{\underline{00}}$, рис. 6.

Таблиця 4 – **Статистична характеристика моделі (1)**

Показник моделі	Значення
Множинний R	0,963
R-квадрат	0,928
Нормований R-квадрат	0,817
Стандартна похибка	3,402
Кількість спостережень	10
Інформаційна спроможність моделі	4,88735E-06
Стандартна похибка коефіцієнта	0,079
t-статистика коефіцієнта	10,763
P-значення коефіцієнта	1,93E-06

Рис. 6. Ділянка вулиці Cat Linh-An Trach, обрана для проведення спостережень за ШР мотоциклів

Тривалість світлофорного циклу на перетині складає 95 с, з яких 80 с триває основний такт по вулиці Cat Linh-An Trach, рух мотоциклів якою є об'єктом вивчення. Процес оцінки часу проїзду відстані, що дорівнює габариту мотоциклів, виявився значно трудомістким через невеликі габарити цих ТЗ, тому з усього обсягу спостережень оцінено 300 значень ШР мотоциклів, табл. 5.

Таблиця 5 – **Статистична характеристика значень швидкості руху мотоциклів перед стоп-лінією перетину доріг**

Характеристика вибірки	Значення, м/с
Кількість спостережень, од.	300
Мінімум	0,07
Максимум	12,73
Математичне сподівання	5,508
Стандартне відхилення	2,463
Параметр масштабу гама-розподілу	1,102
Параметр форми гамма-розподілу	4,999

Ці результати доволі відрізняються від ШР автомобілів перед стоп-лінією як за значенням середньої ШР і стандартного відхилення, так і за параметром форми гамма-розподілу, який у випадку з мотоциклами має високе значення, значно більше одиниці. Цей випадок за результатами близький до випадку звуження проїзної частини вулиці для автомобілів [4], який надає більше свободи руху, ніж регульований перетин. Проте, при використанні залежності (1), параметр форми дорівнював би $n = 0,85 \cdot 5,508 = 4,681$. Це значення лише на 6,37% менше параметру форми гамма-розподілу, який отримано в результаті спостережень. Така дотичність може свідчити про спільність залежності (1) для оцінки параметрів гамма-розподілу ШР як автомобілів, так і мотоциклів. Однак для мотоциклів вважати цей факт підтвердженим після однієї перевірки передчасно.

Водночас не спростовується й гіпотеза про можливість використання гамма-розподілу для опису коливання значень ШР мотоциклів, про що свідчать результати підбору методом моментів цього розподілу під емпіричний ряд швидкостей, що зображено на рис. 7. До того ж, отриманий ряд ШР мотоциклів досить добре може бути описаний нормальним розподілом, рис. 8.

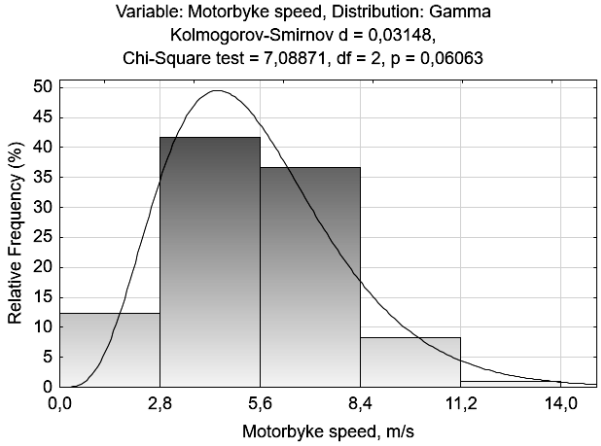


Рис. 7. Гамма-розподіл ШР мотоциклів, що отриманий за допомогою методу моментів

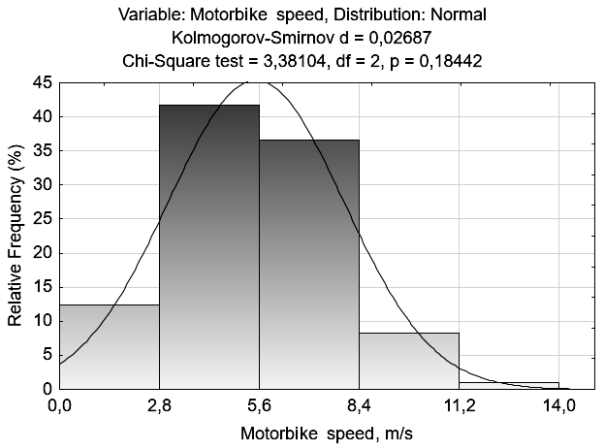


Рис. 8. Нормальний розподіл ШРмотоциклів, що отриманий за допомогою методу моментів

Такий двічі позитивний для мотоциклів результат, враховуючи результати попередніх досліджень [3, 4], може вважатися достатнім для оста-

точного висновку про можливість використання гамма-розподілу при описі коливання значень ШР. Проте, для того, щоб використовувати його для інших ТЗ, відмінних за своїми габаритними і швидкісним параметрами від легкових автомобілів, необхідно додатково оцінити статистичний зв'язок між математичним очікуванням і параметром форми гамма-розподілу ШР відповідних ТЗ в різних умовах руху.

Висновки

Ускладнення умов руху автомобілів на перетині доріг, що викликане абсолютним і питомим скороченням основного такту світлофорного циклу для досліджуваного напрямку руху, призводить до зниження середньої швидкості руху, при якому спостерігається відносне зростання її стандартного відхилення, що в підсумку призводить до зниження параметра форми гамма-розподілу, а також його наближення до одиниці.

У складних умовах руху швидкість автомобілів добре описується показниковим законом розподілу, що свідчить на користь гіпотези щодо можливості використання гамма-розподілу для опису коливання значень швидкості руху.

Ця гіпотеза також підтверджується близьким статистичним зв'язком між параметром форми гамма-розподілу і середньою швидкістю руху автомобілів, що отримано на основі спостережень за швидкості руху в різних країнах, в різних дорожніх умовах. Відповідно до залежності (1) близький до прогнозу параметр форми гамма-розподілу також виявлено у зафіксованому ряді швидкості руху мотоциклів.

Для опису коливання значень швидкості руху мотоциклів перед стоп-лінією перетину також підлягає гамма-розподіл з параметром форми, що значно вище одиниці, і нормальний розподіл, що свідчить про універсальний характер висунутої гіпотези.

Список літератури

1. Cascetta E. Transportation Systems Engineering: Theory and Methods, Springer US, Boston, 2001, 710 p.
2. Говорущенко Н. Я. Системотехника автомобильного транспорта (расчётные методы исследований). Монография. 2011. Харьков. ХНАДУ. 292 с.
3. Макаричев А. В. Распределение скорости движения автомобилей перед стоп-линией городского регулируемого перекрёстка. *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*. Харьков, ХНАДУ, 2019. Вып. 85. С. 107-116.
4. Макаричев А. В., Горбачёв П. Ф., Минь В. Д., Горбачёва Е. А. Влияние ширины проезжей части на скорость движения автомобилей в городских условиях. *Автомобильный транспорт.* Харьков: ХНАДУ, 2019. Вып. 43. С. 93-102.
5. Berry D.S., Belmont D.M. Distribution of vehicle speeds and travel times, *Proc. Second Berkeley Symp. on Math. Statist. and Prob.*, Univ. of Calif. Press, California, 1951. P. 589-602. Available at: https://projecteuclid.org/euclid.bsmsp/1200500257
6. Maurya A. K., Dey S., Das S. Speed and Time Headway Distribution under Mixed Traffic Condition. Indian Institute of Technology Guwahati, India, 2015. 19 p.
7. Minh C.C., Sano K., Matsumoto S. The speed, flow and headway analyses of motorcycle traffic, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 2005. Vol. 6. P. 1496-1508.
8. Nguyen Cao Y, Minh C. C., Sano K., Matsumoto S. Motorcycle Equivalent Units at Road Segments under Mixed Traffic Flow in Urban Road, *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 2009. Vol. 7. 14 p.
9. Правила дорожнього руху (затверджені постановою Кабінету Міністрів України №1306 від 10.10.2001 зі змінами).
10. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности. Москва: Наука, 1965. 524 с.
11. Rao A.M., Rao K.R. Free Speed Modeling for Urban Arterials – A Case Study on Delhi, *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*. 2015. No. 43(3). P. 111-119.
12. Dhamaniya A., Chandra S. Speed Characteristics of Mixed Traffic Flow on Urban Arterials, *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, 2013. Vol. 7, No. 11. P. 883-888.
13. Free speed survey 2011 (Urban and Rural), Research Department, Road Safety Authority, 2012. Ireland. 50 p.

References

1. Cascetta, E., (2001), *Transportation Systems Engineering: Theory and Methods*, *Springer US*, Boston, 710 p.
2. Govoruschenko, N.Ya., (2011), *System engineering of automobile transport (calculated methods of researching)*, Monografiya, KhNADU, Kharkiv, 292 p.
3. Makarichev, A.V., (2019), “Distribution of automobile speed in the stop-line front of the urban signalized intersection”, *Vestnik Harkovskogo natsionalnogo avtomobilno-dorozhnogo universiteta*, KhNADU, Kharkiv, No. 85, pp. 107-116.
4. Makarichev, A.V., Horbachov, P.F., Min, V.D. and Horbachova, V.A., (2019), “The influence of carriageway width on the automobile speed in city conditions”, *Avtomobilnyiy transport*, KhNADU, Kharkiv, No. 43, pp. 93-102.
5. Berry, D.S. and Belmont, D.M. (1951), “Distribution of vehicle speeds and travel times”, *Proc. Second Berkeley Symp. on Math. Statist. and Prob.*, Univ. of Calif. Press, California, pp. 589-602, available at: https://projecteuclid.org/euclid.bsmsp/1200500257
6. Maurya, A.K., Dey, S. and Das, S. (2015), “Speed and Time Headway Distribution under Mixed Traffic Condition”, *Indian Institute of Technology Guwahati*, India, 19 p.
7. Minh, C.C., Sano, K. and Matsumoto, S. (2005), “The speed, flow and headway analyses of motorcycle traffic”, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 6, pp. 1496-1508.
8. Nguyen, Cao Y, Minh, C.C., Sano, K. and Matsumoto, S. (2009), “Motorcycle Equivalent Units at Road Segments under Mixed Traffic Flow in Urban Road”, *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 7, 14 p.
9. (2010), *Traffic rules*, Resolution of Cabinet of Ministers of Ukraine.
10. Gnedenko, B.V., Belyaev, Yu.K. and Solovev, A.D. (1965), *Mathematical methods in reliability engineering*, Science, Moscow, 524 p.

11. Rao, A.M. and Rao, K.R., (2015), “Free Speed Modeling for Urban Arterials – A Case Study on Delhi”, Periodica Polytechnica Transportation Engineering, No. 43(3), pp. 111-119.
12. Dhamaniya, A. and Chandra, S. (2013), “Speed Characteristics of Mixed Traffic Flow on Urban Arterials”, *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, Vol. 7, No. 11, pp. 883-888.
13. (2012), *Free speed survey 2011 (Urban and Rural)*, Research Department, Road Safety Authority, Ireland, 50 p.

Received (Надійшла) 30.03.2020
Accepted for publication (Прийнята до друку) 13.05.2020

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Горбачов Петро Федорович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри транспортних систем і логістики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна;
Peter Horbachov – Doctor of Science (Transport Systems), Professor, Head of Transport Systems and Logistics Department, Kharkiv National Automobile and Highway University, 61002, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: gorbachov.pf@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-8180-4072.

Ву Дик Мінь – аспірант, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна;
Vu Dic Minh – doctoral student, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: vdminh1969@yahoo.com.vn; ORCID ID: https://orcid.org/0000- 0002-4753-3694

Штанько Ігор Ігорович – магістрант, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна;
Ihor Shtanko – master’s degree student, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine
email: shtanko000@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-3935-5322

Закономерности распределения скорости движения транспортных средств на городских улицах

П. Ф. Горбачев, В. Д. Минь, И. И. Штанько

Аннотация. Проблема. Целью исследований скорости движения транспортных средств является определение общих тенденций скорости, определение ее рациональных границ, оценка уровня безопасности движения, прогнозирование объема выбросов вредных веществ в атмосферный воздух и интегральная оценка времени поездки в городских сетях, учитывая случайный характер этой величины. Особую актуальность задача ее оценки приобретает в городских условиях, когда условия движения не могут считаться свободными. Возникающие здесь транспортные ситуации часто ограничивают пространство и время для осуществления маневров, так же, как и сокращают набор маневров для водителей. Разная реакция водителей на возникающие в движении сложности может приводить к росту уровня случайности скорости, что требует очень внимательного отношения к параметрам ее распределения. Предыдущие исследования в этом направлении подтвердили такие тенденции, но не позволили сделать окончательных выводов о характере распределения скорости транспортных средств на городских улицах. **Цель.** Проверить справедливость гипотезы о возможности описания колебаний скорости движения однотипных транспортных средств в различных условиях гамма-распределением. **Методология.** Статистическая оценка фактических значений скорости движения транспортных средств перед стоп-линией городского регулируемого перекрестка с помощью теоретического закона распределения и регрессионного анализа связи между математическим ожиданием и параметром формы гамма распределения скорости движения. **Результаты.** Подтверждено справедливость гипотезы о возможности использования гамма-распределения для описания колебания значений скорости движения однотипных транспортных средств в различных условиях. **Оригинальность.** Проведена оценка скорости автомобилей и мотоциклов в новых условиях движения. **Практическая значимость.** Полученные результаты позволяют повысить точность прогнозов скорости движения в аналитических и имитационных моделях функционирования транспортных сетей.

Ключевые слова: скорость движения; автомобиль; мотоцикл; регулируемый перекресток; случайная величина; закон распределения.

Distribution regularities of motor vehicle speed on city streets

P. Horbachov, V.D. Minh, I. Shtanko

Abstract. Problem. The purpose of vehicle speed studies is to identify general trends in speed and its rational limits, to assess the level of traffic safety, to forecast harmful emissions into the air and to provide an integrated assessment of travel time in urban networks that takes into account the random nature of this variable. Its assessment is particularly relevant in urban environments where traffic conditions cannot be considered free. Transport situations here often limit space and maneuver time, as well as reducing opportunities for drivers. Different drivers' reactions to the difficulties in traffic can lead to an increase in the level of speed randomness, which requires very careful attention to the parameters of its distribution. Previous studies in this direction have confirmed such trends but have not let definitive conclusions about the nature of speed distribution in urban streets. **Goal.** Testing the hypothesis that the gamma distribution is suitable to describe the speed oscillations of the same type of vehicles in different conditions. **Methodology.** Statistical evaluation of vehicle speed actual values in the stop-line front of the urban signalized intersection by means of the distribution theoretical law and regression analysis of the relationship between the mathematical expectation and the form parameter of the gamma distribution of speed. **Results.** The hypothesis that the gamma distribution can be used to describe oscillations in the speed of similar vehicles under different conditions has been confirmed. **Originality.** The speed of cars and motorcycles under new driving conditions was assessed. **Practical value.** The obtained result allows increasing accuracy of the car and motorcycles speed prediction in analytical and simulation models of transport networks functioning.

Keywords: driving speed; car; motorcycle; signalized intersection; random variable; distribution law.