



Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”

National Technical University
“Kharkiv Polytechnic Institute”



Сучасні інформаційні системи

Том 4, № 3

Щоквартальний
науково-технічний журнал

Заснований у березні 2017 року

У журналі публікуються результати дослідень 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 редакції:

kuchuk56@ukr.net

Інформаційний сайт:

<http://ais.khpi.edu.ua>

Затверджений до друку Вченою Радою Національного технічного університету
“Харківський політехнічний інститут” (протокол від 02 жовтня 2020 року № 5).

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

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);

РДЄВ 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-Biala, 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, Ukraine);

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).

З МІСТ

ПРОБЛЕМИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

- Гавриленко С. Ю., Шевердин І. В.,
Казарінов М.**
Розробка ансамблевого методу класифікації стану
комп'ютерної системи на основі дерев рішень (eng.) 5
- Триснюк В. М., Нагорний Є. І., Сметанін К. В.,
Гуменюк І. В., Уварова Т. В.**
Метод автентифікації користувачів до об'єктів
критичної інфраструктури на основі ідентифікації
особи за голосовим повідомленням (eng.) 11
- Хорошун Г. М.**
Метод опису явища дифракції за сукупністю
топологічних об'єктів та алгоритм розрізняння
мінімуму від нуля інтенсивності 17

МОДЕЛЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

- Андрієв С. М., Жилин В. А.**
Методика побудови гідрологічних картографічних
моделей за даними дистанційного зондування Землі 22
- Каргін А. О., Іванюк О. І.**
Модель ситуаційного планування й керування
переміщеннями автономного роботу 41
- Мелешко Є. В., Дрієв О. М.,
Аль-Орайкат А. М.**
Вдосконалена модель обчислення коефіцієнтів подоби
користувачів рекомендаційних систем (eng.) 52

МЕТОДИ СИНТЕЗУ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

- Плющ О. Г., Вишнівський В. В., Березовська Ю. В.**
Стійкий телекомуникаційний канал зі зміною
параметрів від кадру до кадру (eng.) 62
- Пустоваров В. В.**
Побудова інформаційної технології розробки бази
знань про розпізнавання міських будов на цифрових
космічних та аерофотознімках при автоматизованому
моніторингу міського середовища (eng.) 70
- Туровський О. Л.**
Уточнення алгоритму оцінки частоти сигналу,
що приймається системою супутникового зв'язку
в безперервному режимі при умові впливу
«сусідніх каналів» (eng.) 74

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

- Василишин В. І.**
Оцінювання напрямків надходження радіохвиль,
основане на близькості коренів декількох
поліномів методів надрозділення (eng.) 80
- Індик С. В., Лисечко В. П.**
Дослідження властивостей ансамблів складних сигналів,
отриманих шляхом перестановок часових інтервалів (eng.) 85
- Крючков Д. М., Рошуцькін Є. С.,
Джус В. В., Титаренко Р. В.**
Удосконалення підготовки персоналу для обслуговування
радіотехнічних засобів контролю повітряного простору
шляхом урахування питань технічної експлуатації
в тренажніх імітаційних комплексах 89
- Олізаренко С. А., Аргунов В. В.**
Дослідження особливостей визначення семантичної
подібності текстового контенту довільної довжини
з використанням багатомовних моделей
на основі Transformer (eng.) 94

TABLE OF CONTENTS

PROBLEMS OF IDENTIFICATION IN INFORMATION SYSTEMS

- Svitlana Gavrylenko, Illia Sheverdin,
Michael Kazarinov**
The ensemble method development of classification
of the computer system state based on decisions trees 5
- Vasyl Trysnyuk, Yevhen Nagornyi, Kirill Smetanin,
Igor Humeniuk, Tetyana Uvarova**
A method for user authenticating to critical
infrastructure objects based on voice
message identification 11

- Ganna Khoroshun**
Diffraction phenomenon description method based on
by the topological objects set and the algorithm for
distinguishing the minimum from zero intensity (ukr.) 17

INFORMATION SYSTEMS MODELING

- Sergey Andrieiev, Volodymyr Zhilin**
Methods of construction of hydrological cartographic
models according to remote sensing of the Earth data (ukr.) ... 22
- Anatoliï Kargin, Oleksandr Iviuk**
Autonomous robot motion control situational
planning model (ukr.) 41
- Yelyzaveta Meleshko, Oleksandr Driev,
Anas Mahmoud Al-Oraiqat**
The improved model of user similarity coefficients
computation for recommendation systems 52

METHODS OF INFORMATION SYSTEMS SYNTHESIS

- Oleksandr Pliushch, Viktor Vyshnivskyi, Yuliia Berezovska**
Robust telecommunication channel with parameters
changing on a frame-by-frame basis 62
- Volodymyr Pustovarov**
Construction of information technology for development
of knowledge base on identification of urban structures
on digital space and aerial photographs
in the urban environment monitoring 70
- Oleksandr Turowsky**
Clarification of the algorithm for estimating the frequency
of the signal received by the satellite communication
system in a continuous mode under the influence
of «neighboring channels» 74

INFORMATION SYSTEMS RESEARCH

- Volodymyr Vasylyshyn**
DOA estimation based on proximity
of the roots of several polynomials
of superresolution methods 80
- Serhii Indyk, Volodymyr Lysechko**
The study of ensemble properties of complex signals
obtained by time interval permutation 85
- Dmytro Kriuchkov, Evgeniy Roshchupkin,
Volodymyr Djus, Roman Tytarenko**
Personnel improvement preparations for air space
radiotechnical facilities maintenance by the technical
exploitation questions account in trainer
imitation complexes (ukr.) 89
- Serhii Olizarenko, Vladimir Argunov**
Research on the specific features of determining
the semantic similarity of arbitrary-length
text content using multilingual
Transformer-based models 94

Орловський О. В., Остапов С. Е.

Аналіз впливу методів попередньої обробки тексту на роботу класифікатора деструктивних повідомлень (eng.) .. 104

Проценко А. А., Іванов В. Г.

Порівняльний аналіз методів, що базуються на RRT для пошуку шляху у підземних структурах (eng.) 109

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ**Чалий С. Ф., Лещинський В. О.**

Темпоральне представлення каузальності при конструкуванні пояснень в інтелектуальних системах (eng.) 113

МЕТОДИ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ**Киричок Р. В., Шуклін Г. В.,
Барабаш О. В., Гайдур Г. І.**

Моделювання механізму валідації вразливостей при активному аналізі захищеності корпоративних мереж за допомогою поліномів Бернштейна 118

Можаєв М. О., Давидов В. В., Чжан Ліцян

Аналіз та порівняльні дослідження методів підвищення рівня безпеки програмного забезпечення (eng.) 124

Семенов С. Г., Цао Вейлін

Модифікація математичної моделі процесу тестування на проникнення в комп'ютерні системи (eng.) 133

**ПРИКЛАДНІ ПРОБЛЕМИ
ЕКСПЛУАТАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ****Бєсова О. В., Карлов В. Д.,****Лукашук О. В., Петрушенко В. М.**

Вимірювач часу затримки сигналу відбитого від маловисотної цілі при її локації над морем (eng.) 139

Григоренко І. В., Григоренко С. М.,**Овчаренко М. М.**

Обґрунтuvання вибору методів неруйнівного контролю елементів енергетичного обладнання за допомогою апарату нечіткої логіки (eng.) 143

Козлов В. Є., Козлов Ю. В., Щербина О. О.,**Новикова О. О., Іохов О. Ю.**

Багатофункціональний антенний пристрій для захисту каналів радіозв'язку підрозділів сил охорони правопорядку (eng.) 150

Сидоренко Є. А., Макогон О. А., Корда М. В.,**Ісааков О. В., Бабкін Ю. В., Калінін І. В.**

Застосування ймовірнісних економіко-математичних моделей для оптимізації планування незнижуvalного запасу та підвищення ефективності логістичного забезпечення сил оборони держави без зниження рівня надійності (eng.) 156

Алфавітний покажчик 162**Oleksandr Orlovskyi, Sergey Ostapov**

Analysis of the text preprocessing methods influence on the destructive messages classifier 104

Andrii Protsenko, Valerii Ivanov

Comparative analysis of RRT-based methods for path finding in underground environment 109

INTELLIGENT INFORMATION SYSTEMS**Serhii Chalyi, Volodymyr Leshchynskyi**

Temporal representation of causality in the construction of explanations in intelligent systems 113

**METHODS OF INFORMATION
SYSTEMS PROTECTION****Roman Kyrychok, Herman Shuklin,****Oleg Barabash, Galyna Gaidur**

Modeling the vulnerabilities validation mechanism in the active analysis of the security of corporate networks using Bernstein polynomials (ukr.) 118

Mykhailo Mozhaiev, Viacheslav Davydov, Zhang Liqiang

Analysis and comparative researches of methods for improving the software security 124

Serhii Semenov, Cao Weilin

Testing process for penetration into computer systems mathematical model modification 133

**APPLIED PROBLEMS
OF INFORMATION SYSTEMS OPERATION****Oksana Biesova, Vladimir Karlov,****Olena Lukashuk, Valentin Petrushenko**

Signal relay time measurer reflected from a small purpose at its location over the sea 139

Ihor Hryhorenko, Svitlana Hryhorenko,**Mykola Ovcharenko**

Substantiation of the choice of methods of non-destructive testing of elements of energy equipment using a fuzzy logic apparatus 143

Valentyn Kozlov, Yury Kozlov, Alexander Shcherbina,**Olena Novykova, Alexander Iokhov**

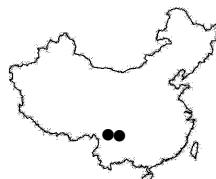
Multifunctional antenna device for protection of radio communication channels of units of law enforcement forces 150

Yevhen Sydorenko, Helen Makogon, Mykyta Korda,**Oleksandr Isakov, Yuri Babkin, Igor Kalinin**

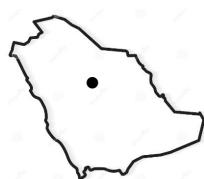
Application probabilistic economic mathematical models for optimization planning of an irreducible stock and improving the efficiency of logistics supply management of the state defence forces without reducing the level of reliability 156

Alphabetical index 162

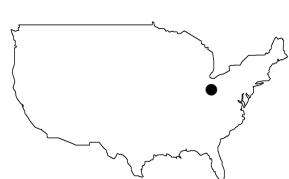
За достовірність викладених фактів, цитат та інших відомостей відповідальність несе автор.

Географія статей цього номера

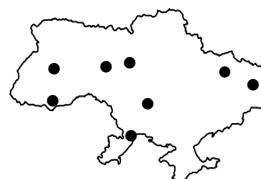
Китай
China



Саудівська Аравія
Saudi Arabia



США
United States of America



Україна
Ukraine

Problems of identification in information systems

UDC 004.9:519.2

doi: 10.20998/2522-9052.2020.3.01

Svitlana Gavrylenko¹, Illia Sheverdin¹, Michael Kazarinov²¹ National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine² Northeastern Illinois University, Chicago, USA

THE ENSEMBLE METHOD DEVELOPMENT OF CLASSIFICATION OF THE COMPUTER SYSTEM STATE BASED ON DECISIONS TREES

Abstract. The subject of this article is exploration of methods for identifying the status of a computer system. The purpose of the article is development of a method for classifying a computer system anomalous state based on ensemble methods. Task: To investigate the usage of algorithms for building decision trees: REPTree, Random Tree, J48, HoeffdingTree, DecisionStump and bagging and boosting decision tree ensembles to identify a computer system anomalous state by analyzing operating system events. The methods used are artificial intelligence, machine learning and ensemble classification methods. The following results were obtained: the methods of identifying the computer systems anomalous state based on ensemble methods were investigated, namely, bagging, boosting, and classifiers: REPTree, Random Tree, J48, HoeffdingTree, DecisionStump to identify a computer system anomalous state. The different classifiers set and classifiers ensembles were developed. Training and cross-validation on each algorithm was performed. The developed classifiers performance has been evaluated. The research suggests an ensemble method of a computer system state classifying based on the J48 decision tree algorithm. **Conclusions.** The scientific novelty of the obtained results consists in creating an ensemble method for classifying the state of a computer system based on a decision tree, which makes it possible to increase the reliability and speed of classification.

Keywords: computer system; decision trees; ensemble methods; boosting; bagging; operating system events; anomalous state.

Introduction

An ordinary feature of the modern country is the use of computer systems in almost all sectors of the national economy. The secure function of such systems is a priority and determines the role of the country in the world. This is why the study of identifying the state of computer systems methods and means is an urgent task.

The computer system is characterized by a huge number of functioning indicators. One of the most common methods of analysing large amount of data (data mining) is machine learning. Machine learning algorithms are designed to work directly with huge amounts of information.

Problem analysis and scientific publications. Issues related to problems encountered when dealing with large amounts of information, especially when used to evaluate the state of a computer system, are discussed in [1-5]. Complex mathematical algorithms based on machine learning methods are used for data analysis and classification: classical methods [6], reinforcement learning methods [7], decision trees and ensemble methods [8,9], neural networks and deep learning [10] and so on.

Different approaches to solving the problems proposed in the work [11-13]. One of the classification effective method is ensemble, which are based on a basic classifier set, which results are combined and operate the aggregated classifier prediction [14].

In [15-17], a comparative investigation of various building ensemble methods was performed. Nevertheless, this work does not include the effectiveness of using different decision trees methods in conjunction with different ensemble decision-making methods.

Algorithms analysis for building decision trees and decision tree ensembles

One of the main tasks of machine learning is to learn from use cases, according to which the object M is studying. Objects with M are described by a set of attributes $\{x_1, \dots, x_n\}$. Each object $S \in M$ is represented by a vector of the length n , where the coordinate j is equal to the attribute value x_j for the object S . It was set a set of ‘answers’ and a selection of objects (precedents) $T = \{S_1, \dots, S_m\} \subset M$ so that for each object $S_i \in T$ there is an ‘answer’ $y_i, y_i \in Y$. By the selection T , we need to build an algorithm $AT: M \rightarrow Y$, which puts in correspondence to each object the value y with Y .

One of the main types of case-based learning is the classification problem for which the ‘response’ y for an object S from M is a class label, including a binary classification where $Y = \{-1, +1\}$.

One of the well-known tools for solving case-based learning problems is decision trees. The procedure of building a classical decision tree (DT) is iterative. As a rule, to build the next vertex of the tree, the attribute that best meets branching criteria is selected. The values of this attribute are used for branching. Then the specified procedure is repeated for each leaf.

One of the first algorithms for building a decision tree is the ID3 algorithm [18]. The idea of the ID3 algorithm is to divide the selection into two parts until each part contains objects of only one class. An improved version of the ID3 algorithm is the C4.5 algorithm, which has been added the pruning procedure, the ability to work with numeric attributes, and the ability to build a tree with an incomplete training

sample that lacks the values of some attributes. The C4.5 algorithm selects an attribute based on the normalized information gain or information entropy (Gain Ratio):

$$H = -\sum_{i=1}^n \frac{N_i}{N} \log\left(\frac{N_i}{N}\right),$$

where n – number of classes in the original subset, N_i – the number of samples of i class, N – the total number of samples in the subset.

The best attribute for splitting A_j is the one that provides the maximum reduction in the entropy of the obtained subsets relative to the parent set. However, in practice, it is more convenient to use the concept of information, which is the reverse of entropy. Then the best partition attribute is the result, which provides the maximum increase in information of the resulting node relative to the original one:

$$\text{Gain}(A) = \text{Info}(S) - \text{Info}(S_A),$$

where $\text{Info}(S)$ – information related to a subset of S before splitting, $\text{Info}(S_A)$ – information associated with a subset of S after splitting by attribute A .

The J48 algorithm is the analog of the C4.5 algorithm, which is implemented in Java in the Weka application.

The Decision Stump algorithm is a single-level tree with a statistical branching criterion [19]. This tree has a root vertex that is connected by an edge to each branch of the tree. Decision Stump considers each attribute of x sequentially and builds a separate tree for this attribute. Possible option: 1) for each value of attribute x , one leaf is built; 2) the number a (threshold) is selected and two leaves are built, in one of which $x < a$, and in the second $x \geq a$; 3) the set of values of attribute x is divided into intervals and a tree is built with the number of leaves equal to the number of these intervals.

To select the optimal rule, we use the partition quality estimation function, which is formalized in the Gini index. If the data set S contains data from n classes, then the Gini index is defined as:

$$Gini(S) = 1 - \sum_{i=1}^n p_i^2,$$

where p_i – probability (relative frequency) of class i in S .

If the set M is split into two parts S_1 and S_2 with the number of samples in each N_1 and N_2 , respectively, then the partition quality indicator will be equal to:

$$Gini_{split}(S) = \frac{N_1}{N} \cdot Gini(S_1) + \frac{N_2}{N} \cdot Gini(S_2).$$

The best partition is where $Gini_{split}(S)$ is minimal.

The REPTree (Reduced Error Pruning Tree) algorithm builds binary trees for classification and regression problems using entropic or statistical branching criteria, respectively. This algorithm was first proposed by Quinlan in 1987 [20]

HoeffdingTree is an incremental decision tree induction algorithm that can learn from data flows, assuming that the distribution generation examples do not change over time [21]. Hoeffding trees take

advantage of the fact that a small sample is often enough to select the optimal splitting attribute. This idea is supported mathematically by the Hoeffding estimate, which quantifies the number of observations needed to evaluate some statistical data of a given accuracy.

RandomTree is a tree building algorithm that considers k randomly selected attributes for each node [22]. The algorithm makes it possible to estimate the probability value of a class based on a set selection by combining multidimensional linear regression and one-dimensional smoothing. Thus, a nonlinear problem is reduced to solving a sequence of linear problems.

To improve the efficiency of various algorithms for building decision trees are used ensembles, in which several models (weak students or basic models) are learning to solve the same problem and are combined to improve performance. Today, the most popular are meta-algorithms that aimed to combining weak students such as bagging, boosting.

Bagging is an ensemble of homogeneous weak classifiers that learn in parallel and independently from each other on different random samples from the source data using the same decision-making algorithm. The results are then combined, following some deterministic averaging process. At the same time, classifiers do not correct each other's mistakes, but compensate for them when voting [23]. The main idea of Bagging is to select several independent models and find the optimal average value to get the model with the smallest spread. The most common bagging algorithm is the Random Forest algorithm.

Boosting combines homogeneous weak classifiers, training them consistently in an adaptive way (the weak classifier depends on the previous ones) and combines them, following a deterministic strategy [24]. By reducing the variance, accuracy increases and the number of matching and training operations decreases. The most common boosting algorithms are AdaBoost, LogitBoost, and Gradient boosting.

Development of an ensemble classification method

In the Windows operating systems all events can be divided into 4 main types: process communication events, file system interaction events, Internet connection events, and operating system registry interaction events.

The developed software made it possible to collect changes in the state of the computer system. Weka software [25] was chosen for an analysis of the system state and quality assessment of methods for building decision trees and classification algorithms. It provides a set of virtualization tools and components for data mining and solving forecasting problems. The functionality of the program allows to perform the task of data analysis, clustering, regression analysis etc.

For further analysis of the computer system state were used classifiers based on boosting and bagging. Each of the classifiers was investigated using different types of the above decision trees.

For evaluating the quality of classifiers, the following criteria were selected as the main:

1. The number of correctly classified objects in absolute and percentage value (Correctly Classified Instances).

2. The number of incorrectly classified objects in absolute and percentage value (Incorrectly Classified Instances).

3. The Kappa coefficient (Kappa statistic). The Kappa-Cohen coefficient is a metric that compares the accuracy of an observation with the expected accuracy. Kappa statistics are used not only to evaluate a single classifier, but also to evaluate classifiers among themselves. A value greater than 0 means that your classifier works better than the probability that it will function properly:

$$\kappa = \frac{p_e - p_0}{1 - p_0} = 1 - \frac{1 - p_0}{1 - p_e}$$

where p_0 – is the relative observed agreement among raters and p_e – is the hypothetical probability of chance agreement.

4. Mean absolute error (MAE). MAE-a value used to measure how close forecasts are to possible results:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |f_i - y_i| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i|$$

where f_i – is the prediction and y_i – is the true value.

5. Root mean squared error (RMSE) is the standard deviation for sampling differences between predicted and observed values:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{\theta}_i - \theta_i)^2}$$

where the vector of observed values of the variable being predicted – θ_i , with $\hat{\theta}_i$ – being the predicted values.

6. Relative absolute error (RAE) – the absolute difference between the measurement result and the true value of the measured value, which is a sign of the quality of the measurement:

$$RAE = \sum_{i=0}^n (P - T_i) / \sum_{i=0}^n (T_i - \bar{T}),$$

where P is the predicted value; T_i is the target value for case i ; and is given by the formula:

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n T_j.$$

7. Root relative squared error (RRSE). The RRSE takes the General squared error and normalizes it by dividing by the General squared error of a simple predicate. By taking the square root of the relative square error, we can reduce the error to the same size as the predicted value:

$$RRSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (P - T_i)^2} / \sqrt{\sum_{i=0}^n (T_i - \bar{T})^2}.$$

8. Total Number of Instances.

9. Testing time.

10. Learning time.

Studies of various classifiers of ensemble methods in conjunction with various algorithms for building decision trees allow us to obtain the following results.

The results of the Boosting algorithm in conjunction with various algorithms for building decision trees are presented on the Table 1.

As can be seen from the Table 1, the meta-algorithm of machine learning is an effective ensemble method for evaluating the state of CS. The best results are obtained when using decision trees: J48, REPTree, and Random Tree.

The results of the Bagging algorithm in conjunction with various algorithms for building decision trees are shown in Table 2.

As can be seen from the Table.2 Bagging is also an effective ensemble method for assessing the state of the CS. The best results are obtained when using decision trees: J48, REPTree, and Random Tree.

It is shown on the Fig. 1 and 2 histograms of the absolute error of classification and time of CS testing when using decision trees based on algorithms: J48, REPTree, and Random Tree.

As can be seen from the histogram on Fig. 1, at the learning stage, the accuracy of the classification of the ensemble classifier based on boosting is slightly lower compared to the accuracy of the classification of the ensemble classifier based on Begging. However, the testing time for this classification is slightly better for an ensemble classifier based on boosting.

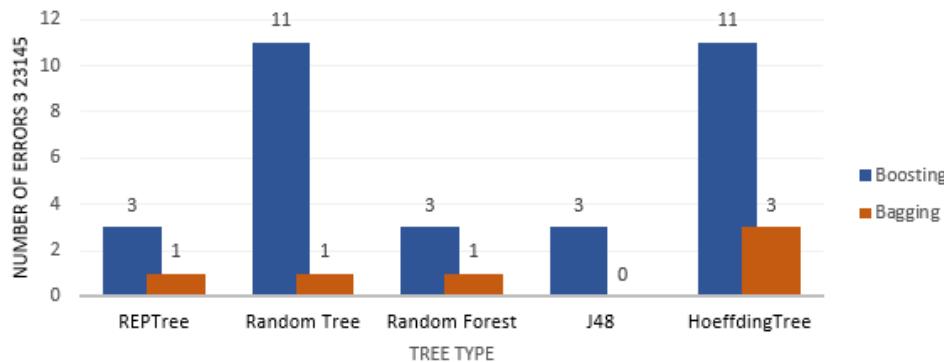
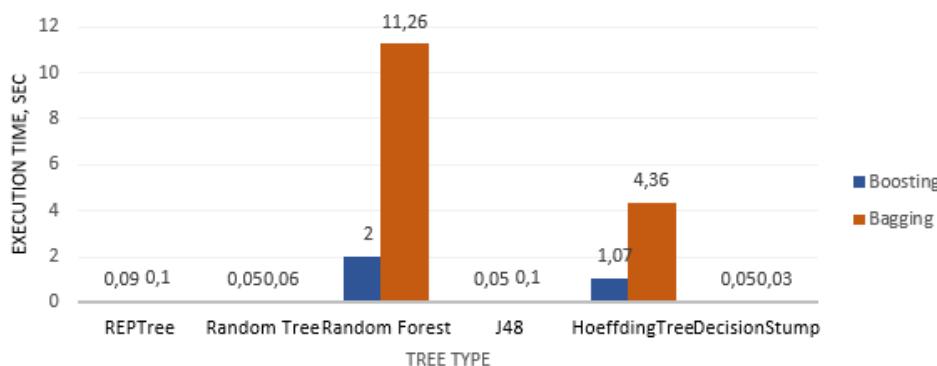


Fig. 1. Absolute error classification histogram

**Fig. 2.** Testing time histogram

In order to make sure that the decision-making algorithm is stable and accurate, Cross Validation was performed and the results were checked on the test data. Cross Validation was performed as follows. The original data was divided into 10 parts. Then each of the parts was used for testing and training: once for testing

and 9 times for training at a time. Ten obtained results were averaged. Later, after performing a 10-fold cross-check and calculating the evaluation results, the training algorithm was obtained for the last 11th time on the entire data set. Afterwards, the resulting model was built.

Table 1 – Boosting algorithm results

Boosting	REPTree	Random Tree	J48	HoeffdingTree	Decision Stump
Correctly Classified Instances	23142	23134	23142	23134	20827
Incorrectly Classified Instances	3	11	3	11	2318
Correctly %	99,99	99,9525	99,987	99,9525	89,9849
Incorrectly %	0,019	0,0475	0,0131	0,0475	10,0151
Kappa statistic	0,9997	0,9988	0,9997	0,9988	0,7313
Mean absolute error	0	0,0001	0	0	0,0575
Root mean squared error	0,0032	0,0061	0,0029	0,0069	0,1372
Relative absolute error	0,0339	0,1491	0,0339	0,1242	150,2427
Root relative squared error	2,3429	4,3693	2,1164	4,9879	99,1314
Total Number of Instances	23145	23145	23145	23145	23145
Learning Time	0,1401	0,0601	0,1301	1,5103	0,1801
Testing Time	0,0902	0,0502	0,0502	1,0702	0,0503

Table 2 – Bagging algorithm results

Bagging	REPTree	Random Tree	J48	HoeffdingTree	Decision Stump
Correctly Classified Instances	23144	23144	23145	23142	20831
Incorrectly Classified Instances	1	1	0	3	2314
Correctly %	99,9957	99,9957	100	99,987	90,0022
Incorrectly %	0,0043	0,0043	0	0,0131	9,9978
Kappa statistic	0,9999	0,9999	1	0,9997	0,7317
Mean absolute error	0	0	0	0	0,0142
Root mean squared error	0,0019	0,0023	0,0017	0,0028	0,0841
Relative absolute error	0,0328	0,0853	0,0328	0,0508	37,0307
Root relative squared error	1,3592	1,647	1,2477	2,0455	60,882
Total Number of Instances	23145	23145	23145	23145	23145
Learning Time	0,6502	0,21	0,37	5,41	0,18
Testing Time	0,1	0,06	0,1	4,36	0,03

Thus, the results of Cross Validation also confirmed the high quality of decision trees based on algorithms: J48, REPTree.

The classifier based on decision trees of the Random Tree algorithm has slightly worse results. But, as shown by the results of the cross validation (Fig. 3) the classification accuracy of ensemble classifier on the basis of bagging is a little lower compared with the classification accuracy of ensemble classifier based on boosting.

Conclusion

This article discusses methods of identifying the abnormal state of computer systems based on ensemble methods.

The following events were used as outgoing data for evaluating the state of the computer system: process communication events, file system interaction events, Internet connection events, operating system registry interaction events.

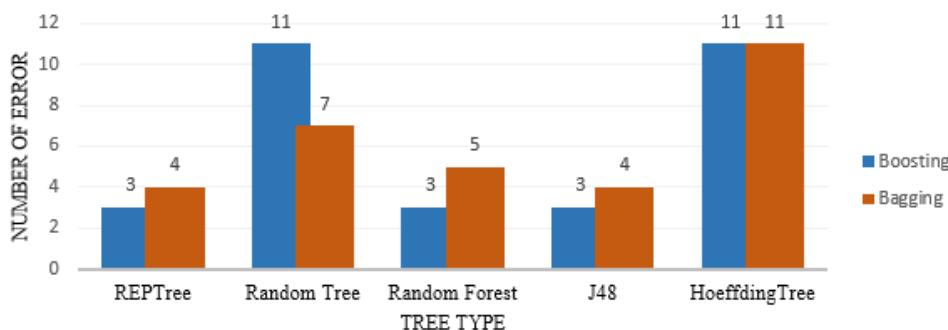


Fig. 3. Absolute error of classification after Cross Validation histogram

Ensemble meta-algorithms for machine learning that combine classifiers based on decision trees: REPTree, Random Tree, J48, HoeffdingTree, and DecisionStump were evaluated. Meta-algorithms were trained and cross-qualified. The effectiveness of the developed classifiers was evaluated according to the following criteria: the number of correctly and incorrectly classified objects in absolute and percentage values, Kappa coefficient, absolute error, average absolute error, standard error, relative squared error, training and testing time.

It was found that the ensemble meta-algorithms of machine learning learning and boosting are effective tools for evaluating the state of a computer system. The best results were obtained by combining classifiers

based on algorithms for building decision trees: J48, REPTree, and Random Tree.

The most effective, both for boosting and bagging ensembles, is a classifier based on the J48 decision tree construction algorithm.

The classification accuracy and testing time of computer systems based on it is almost the same for both ensemble classifiers.

Thus, to identify the state of a computer system based on research results, a method based on the j48 classifier was proposed, which is an effective tool for ensemble meta-algorithms of bagging and boosting.

Further studies of computer system state identification technologies can be performed in computer intrusion prevention systems.

REFERENCES

- Korchenko, A.A. (2012), "Sistema vyyavleniya anomalnogo sostoyaniya v kompyuternykh setyakh", *Bezpeka informacziyi*, Kyiv, Vol. 2 (18), pp. 80-84.
- Chowdhury, M. (2017), "Malware Analysis and Detection Using Data Mining and Machine Learning Classification", *International Conference on Applications and Techniques in Cyber Security and Intelligence*, ATCI, pp. 266-274.
- Gavrilenko, S.Yu. (2019), "Metodika vidboru sistemi pokaznikiv dlya identifikacziyi stanu komp'yuternoyi sistemi kritichnogo zastosuvannya", *Radioelektronni i komp'yuterni sistemi*, Vol. 2 (90), pp. 127-135, DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2019.2.12>
- Krivenko, M.P. and Vasilev, V.G. (2013), *Metody klassifikaczii dannykh bolshoj razmernosti*, IPI RAN, Moscow, 204 p.
- Bargesyan, A.A. (2007), *Tekhnologii analiza dannykh: Data Mining, Visual Mining, Text Mining, OLAP*, BKhV-Peterburg, Sankt-Peterburg, 384 p.
- Vipin, Kumar (2009), *The Top Ten Algorithms in DataMining*, Taylor & Francis Group, LLC, 2006 p.
- Sutton, Richard and Barto, Endryu G. (2020), *Obuchenie s podkrepleniem = Reinforcement Learning*, DMK press, Moscow, 552 p.
- Kaftannikov I.L. and Parasich, A.V. (2015), "Osobennosti primeneniya derevьев решений в задачах классификации", *Vestn. YuUrGU. Ser. «Kompyuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika»*, Vol. 15, No. 3, pp. 26-32.
- Cha, Zhang (2012), *Ensemble Machine Learning. Methods and Applications*, Springer, London, 329 p.
- Tarkhov, D.A. (2014), *Nejrosetevye modeli i algoritmy*, Radiotekhnika, Moscow, 352 p.
- Vyugin, V.V. (2013), *Matematicheskie osnovy mashinnogo obucheniya i prognozirovaniya*, MCzNMO, Moscow, 304 p.
- Marchenko, O.O. and Rossada, T.V. (2017), *Aktualni problemi Data Mining*, Kyiv, 150 p.
- Bolshakov, A.S. and Gubankova, E.V. (2020), "Obnaruzhenie anomalij v kompyuternykh setyakh s ispolzovaniem metodov mashinnogo obucheniya", *Telekommunikacionnye ustroystva i sistemy*, Vol. 20 (1), pp. 37-42.
- Joseph, Rocca and Baptiste, Rocca (2020), "Ensemble methods: bagging, boosting and stacking", available at: <https://towardsdatascience.com/ensemble-methods-bagging-boosting-and-stacking-c9214a10a205>.
- Bauer, E. (1999), "An Empirical Comparison of Voting Classification Algorithms: Bagging, Boosting, and Variants", *Machine Learning*, Springer Link, pp. 105–139.
- Kristína, Machová, Miroslav, Puszta, František, Barčák, and Peter, Bednár (2006), "A Comparison of the Bagging and the Boosting Methods Using the Decision Trees Classifiers", *Computer Science and Information Systems*, Vol. 3(2), pp.57-72.
- (2020), *Metody postroeniya derevьев решений в задачах классификации в Data Mining*, available at: https://ami.nstu.ru/~vms/lecture/data_mining/trees.htm.
- Mitchell, N. and Tom, Michael (1997), *Machine Learning*, McGraw-Hill, New York, 432 p.
- Iba, Wayne and Langley, Pat. (1992), "Induction of One-Level Decision Trees", *ML92 – Proceedings of the Ninth International Conference on Machine Learning*, Morgan Kaufmann, San Francisco, pp. 233-240.

20. Zontul, M., Aydin, F., Dogan, G., Sener, S and Kaynar, O. (2013), "Wind speed forecasting using REPtree and bagging methods in kirkclare-turkey", *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, Vol. 56(1), pp.17-29.
21. (2020), *Class HoeffdingTree*, available at: <https://weka.sourceforge.io/doc.dev/weka/classifiers/trees/HoeffdingTree.html>.
22. (2020), *Class RandomTree*. available at: <http://weka.sourceforge.net/doc.dev/weka/classifiers/trees/RandomTree.html>.
23. Krivenko, M.P. and Vasilev V.G. (2013), *Metody klassifikac dannykh bolshoj razmernosti*, IPI RAN, 2013, Moskow, 204 p.
24. Myuller, A. (2017), *Vvedenie v mashinnoe obuchenie s pomoshchyu Python. Rukovodstvo dlya speczialistov po rabote s dannymi*, Alfa-kniga, Moskow, 480 p.
25. (2020), *The workbench for machine learning*, available at: <https://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka>

Received (Надійшла) 17.06.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 09.09.2020

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”, Харків, Україна;

Svitlana Gavrylenko – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of 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>.

Шевердин Ілля Валентинович – аспірант, кафедра обчислювальної техніки та програмування, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна;

Illya Sheverdin – PhD Student of Department of "Computer Engineering and Programming", National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; e-mail: illia.sheverdin@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7881-0658>.

Казарінов Міхаел – викладач, кафедра інформатики, Північно-східний Іллінойський університет, Чикаго, штат Іллінойс, Сполучені Штати Америки;

Michael Kazarinov – teacher, Computer Science Department, Northeastern Illinois University, Chicago, IL US; e-mail: kazarinov@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0790-5262>

Розробка ансамблевого методу класифікації стану комп’ютерної системи на основі дерев рішень

С. Ю. Гавриленко, І. В. Шевердин, М. Казарінов

Анотація. Предметом статті є дослідження методів ідентифікації стану комп’ютерної системи. **Метою** статті є розробка методу класифікації аномального стану комп’ютерної системи на основі ансамблевих методів. **Завдання:** дослідити використання алгоритмів побудови дерев рішень: REPTree, Random Tree, J48, HoeffdingTree, DecisionStump та ансамблів дерев рішень на основі беггінгу та бустінгу для ідентифікації аномального стану комп’ютерної системи на основі аналізу подій операційної системи. Використовуваними **методами** є: методи штучного інтелекту, машинного навчання та ансамблеві методи класифікації. Отримано такі **результати**: досліджено методи ідентифікації аномального стану комп’ютерних систем на базі ансамблевих методів, а саме беггінгу, бустінгу та класифікаторів: REPTree, Random Tree, J48, HoeffdingTree, DecisionStump для ідентифікації аномального стану комп’ютерної системи. Розроблено набір різних класифікаторів та ансамблів класифікаторів, виконано їх навчання та кросвалідацію. Виконано оцінку ефективності розроблених класифікаторів. За результатами досліджень запропоновано ансамблевий метод класифікації стану комп’ютерної системи на основі алгоритму побудови дерева рішень J48. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в створенні ансамблевого методу класифікації стану комп’ютерної системи на основі дерева рішень, що надає можливість підвищити надійність та швидкість класифікації.

Ключові слова: комп’ютерна система; дерева рішень; ансамблеві методи; бустинг; беггінг; події операційної системи; аномальний стан.

Разработка ансамблевого метода классификации состояния компьютерной системы на основе деревьев решений

С. Ю. Гавриленко, И. В. Шевердин, М. Казаринов

Аннотация. Предметом статьи является исследование методов идентификации состояния компьютерной системы. Целью статьи является разработка метода классификации аномального состояния компьютерной системы на основе ансамблевых методов. Задача: исследовать использование алгоритмов построения деревьев решений: REPTree, Random Tree, J48, HoeffdingTree, DecisionStump и ансамблей деревьев решений на основе беггинга и бустинга для идентификации аномального состояния компьютерной системы на основе анализа событий операционной системы. Используемыми **методами** являются: методы искусственного интеллекта, машинного обучения и ансамблевые методы классификации. Получены следующие **результаты**: исследованы методы идентификации аномального состояния компьютерных систем на базе ансамблевых методов, а именно беггинга, бустинга и классификаторов: REPTree, Random Tree, J48, HoeffdingTree, DecisionStump для идентификации аномального состояния компьютерной системы. Разработан набор различных классификаторов и ансамблей классификаторов, выполнены их обучение и кроссвалидация. Выполнена оценка эффективности разработанных классификаторов. По результатам исследований предложено ансамблевый метод классификации состояния компьютерной системы на основе алгоритма построения дерева решений J48. **Выходы.** Научная новизна полученных результатов заключается в создании ансамблевого метода классификации состояния компьютерной системы на основе дерева решений, дает возможность повысить надежность и скорость классификации.

Ключевые слова: компьютерная система; деревья решений; ансамблевые методы; бустинг; беггинг; события операционной системы; аномальное состояние.

Vasyl Trysnyuk¹, Yevhen Nagornyi¹, Kirill Smetanin², Igor Humeniuk², Tetyana Uvarova³

¹ Institute of Telecommunications and Global Information Space
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

² Korolov Zhytomyr Military Institute, Zhytomyr, Ukraine

³ National University of Defense of Ukraine named after Ivan Chernyakhovsky, Kyiv, Ukraine

A METHOD FOR USER AUTHENTICATING TO CRITICAL INFRASTRUCTURE OBJECTS BASED ON VOICE MESSAGE IDENTIFICATION

Abstract. The **subject** of the research is the protection of critical infrastructure objects from unauthorized access based on voice message identification. The **purpose of the research** is to consider the main methods and algorithms for identifying an individual by voice, as well as the development of a software implementation of the restricted zone access control system, which allows improving the security of the standard password system by introducing voice authorization technologies and improving the algorithm for selecting voice fragments in audio files. Therefore, the purpose determines **following tasks**: analysis of the advantages and disadvantages of existing methods of information protection to infrastructure objects; determination of the optimal method of identification by voice message; a description of the main features of the implementation and use of Mel-frequency kastelnik coefficients (MFKC). Are used such **methods**: system approach, system analysis, theory of algorithms. The following **results** were obtained: an algorithm was developed for storing users' voice data for further use in authorization, the voice authorization subsystem; the corresponding software of the computer system has been developed. **Conclusions:** based on the example of applying the biometric method of user authentication to critical infrastructure objects based on voice message identification, this method of user authentication should be used as an additional method of multi-factor authentication by entering an additional password or another method of biometric user authentication.

Keywords: biometric identification; identification by voice; authentication by voice message; information protection; unauthorized access; cyber security.

Introduction

Problem statement. The current stage of technological development of society is closely related to the active use and improvement of information technology (IT), the creation of information space [1]. Under such conditions, ensuring information security and information protection are of paramount importance in all spheres of human life.

With the beginning of the armed aggression of the Russian Federation on the territory of Ukraine, which requires more decisive action to protect this information.

Existing methods of information protection are divided into hardware, software and mixed (ie a combination of the two previous methods). Given the damage that can be caused by unauthorized access to information with limited access, any distortion or destruction, it is important to protect general and special information systems (military, law enforcement, etc.) by entering an access password. Password identification is the simplest in both implementation and use, but it has a number of disadvantages that significantly reduce the level of information security.

Today, biometric technologies for personal identification are becoming increasingly important. Biometrics is a very effective device for face recognition, which on the basis of biometric characteristics makes it possible to identify a person [2].

The latest biometric technologies and systems recognize a person based on the characteristics that are given to a person at birth, ie anatomical features such as fingerprints, facial images, palms, iris, voice or behavioral traits (signature, gait, keyboard handwriting).

The main advantages of this method include the fact that personal characteristics are individual to each person, they can not be lost or forgotten, as a password, as well as biometric identifiers are more difficult to forge. Since these features are directly related to the physiology of the user, it can be argued that biometric recognition has a high level of reliability and gives access to systems and facilities only to those users who have the appropriate authority to do so [2,3].

Of course, like any complex system, biometric identification has certain disadvantages, however, it is the most reliable, especially in the case of identification by several biometric identifiers.

Therefore, the purpose of this work is to create a method of biometric authentication of users to critical infrastructure based on voice signals and its software implementation is an urgent scientific task [4].

Recent events on the world stage are accompanied by the process of redistribution of zones of influence in the technological, economic and cyber spaces, the development of information technology (IT), which give rise to new ways of obtaining information. In this regard, ensuring the protection of classified information is an urgent issue and requires states, regardless of their development, to constantly strengthen national security, as well as the ability to counter threats and minimize the risks of real leakage of important information and data.

Analysis of recent research and publications. To date, a number of identification methods based on human biometric characteristics have been developed and implemented.

To date, there are several approaches to the identification of a person by voice, which are based on the analysis of the structure of the voice signal. The

procedure for processing the voice signal is to use short-term analysis, ie the signal is divided into fragments (frames) of a fixed size. Then to each window algorithms of selection of signs are applied. Most popular identification systems use chalk-frequency keptral coefficients (MFCC) or linear prediction coefficients (LPCS) as feature vectors [5]. These methods are based on the selection of vectors of signs of the voice signal, taking into account the peculiarities of sound perception by the human ear. Another method of analyzing voice fragments is the analysis of formant frequencies. The analysis of formant frequencies is one of the oldest methods of identification of a person by voice, and the identification of a person in the formant approach is most often performed on vowel sounds, in which formants can be effectively distinguished [2, 4, 5].

Thus, as can be seen from the analysis of the sources for the implementation of software authentication of users based on human voice biometrics, a sufficient number of methods, but to ensure timely detection of unauthorized access to critical infrastructure.

Setting objectives. To develop a computer control system for critical infrastructure using biometric voice authentication, which will improve standard password systems and solve the problem of confidentiality of user credentials by introducing voice authorization mechanisms.

Presentation of the main material of the research

At the moment of development of information technologies, the result of identification of the person by voice completely depends on input data, mathematical algorithms and computing power. Input data means a sample of a person's voice obtained by recording from a microphone. The quality of such a sample depends on the type of input device (eg professional microphone or mobile phone) and the environment (loud street or quiet room).

Mathematical algorithms are used to compare the obtained voice sample with the samples in the database. Computing power is understood as the speed and quality of processing of biometric features of the user, which depends on the hardware features of the system.

To date, there are several approaches to the identification of a person by voice, which are based on the analysis of the structure of the voice signal. The procedure for processing the voice signal is to use short-term analysis, ie the signal is divided into fragments (frames) of a fixed size. Then to each window algorithms of selection of signs are applied. Most popular identification systems use chalk-frequency keptral coefficients (MFCC) or linear prediction coefficients (LPCS) as feature vectors [5]. These methods are based on the selection of vectors of signs of the voice signal, taking into account the peculiarities of sound perception by the human ear. Another method of analyzing voice fragments is the analysis of formant frequencies. The analysis of formant frequencies is one of the oldest methods of identification of a person by voice, and the identification of a person in the formant

approach is most often performed on vowel sounds, in which formants can be effectively distinguished [2, 4, 5]. The method of developing biometric voice authentication at critical infrastructure facilities can be divided into three stages:

- normalization of the input voice signal;
- selection of characteristic features of the voice;
- comparing the received voice message with the message of the reference signal;

An important stage of voice authentication is the preliminary preparation of the input voice signal (Fig. 1) to highlight the characteristics. One of the main methods of normalizing the input voice signal is to remove fragments from the audio file that do not contain voice (fragments of silence or noise).

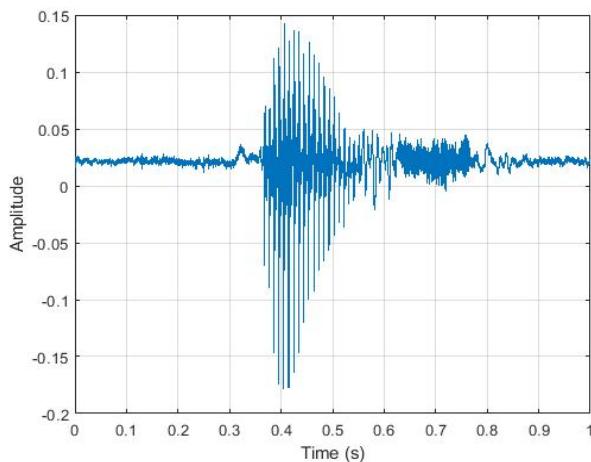


Fig. 1. Audio input signal

To do this, the input audio signal passes through the Voice Activity Detector (VAD), which allows you to select fragments of voice and thus reduce the load on the computer system and increase its speed by reducing the number of unnecessary calculations on areas of audio file that do not contain useful information about the physiological features of the vocal apparatus of the person. An algorithm based on statistical evaluation of the input audio signal was used to select voice fragments. Usually, all audio files recorded with a microphone start with a fragment that does not contain a voice (silence). This is due to the fact that in the process of authorization or registration in the system, the user responds to the beginning of the recording of voice fragments with some delay. This initial fragment of the audio file, lasting 100-200 ms, is the input parameter of the algorithm and contains information about the external environment in which the voice samples are recorded. According to this approach, the values of the audio signal amplitude are considered as random variables that depend on a large number of factors, each of which makes a small contribution, and according to the central limit theorem such random variables (in this case signal amplitude) have a distribution close to normal with parameters. According to the rule of "three sigma", almost all values of a normally distributed random variable lie in the interval $x - 3 \cdot \delta; x + 3 \cdot \delta$.

In the next step, all signal amplitude values for which this rule is not met are considered as voice, and

all others are considered as fragments of silence or noise. This approach has its drawbacks due to the correct selection of voice fragments in audio files. According to this approach, fragments of the voice begin where the amplitude values are outside the interval $x - 3 \cdot \delta; x + 3 \cdot \delta$ [6]. However, in an experimental research, it was found that audio files often have areas with very small deviations, or their number is small (5-10 amplitude values, which is equivalent to a duration of approximately 0.000625 s at a sampling rate of 8000 Hz). Such parts of the audio file cannot be considered as a fragment of the voice, because the average duration of the letters in a word is tens of milliseconds, words - hundreds of milliseconds, or even a few seconds. However, in an experimental research, it was found that audio files often have areas with very small deviations, or their number is small (5-10 amplitude values, which is equivalent to a duration of approximately 0.000625 s at a sampling rate of 8000 Hz). Such parts of the audio file cannot be considered as a fragment of the voice, because the average duration of the letters in a word is tens of milliseconds, words - hundreds of milliseconds, or even a few seconds. For each frame, a temporary array of boolean values is created, which contains only the value "true" or "1" if the "three sigma" rules are met, and "false" or "0" if such a condition is not met. The next step is to calculate the probability of occurrence of the element with the value "true" P1 and the probability of occurrence of the value "false" P0. Probabilities are calculated by finding the ratio of the number of occurrence of a value to the total number of values in the array (the length of the array, or the number of amplitude values in the fragment). If the value of P1 is less than some threshold value, it is considered that this fragment contains a voice, and if not, then silence. The value of α was determined by experimental research of the results of the algorithm for the selection of fragments of voice in audio files and the results of the experiments were taken to be equal α to 0.65. The parameter α can be interpreted as follows: if 65% of the values of the amplitude of the audio signal in the fragment is outside the interval $x - 3 \cdot \delta; x + 3 \cdot \delta$, the system decides that the fragment contains a voice, and otherwise - the fragment contains pauses (silence). After signal normalization, it is necessary to identify the features that characterize the features of the voice apparatus of a particular user. In the field of digital signal processing (DSP) and, in particular, speech recognition and voice identification, the most active applications are the so-called Mel-frequency cepstral coefficients (MFCC). The main idea of the MFCC method is to approximate as much as possible the information coming to the input of the system to the information coming to the auditory analyzer of the human brain. The voice signal is initially an array of amplitude values obtained by sampling the output analog signal with a certain frequency F_s using an analog-to-digital converter (ADC) of the sound card. The next step is to divide the input signal into frames, usually lasting 25-30 ms [4]. The frames overlap each other by 25-70%. Frame overlaps are used to

compensate for information loss at the beginning and end of each frame that occurs as a result of applying a window function in the next step of the algorithm. In most digital processing tasks, it is not possible to examine the signal at an infinite interval. Limiting the analysis interval is equivalent to the product of the output signal on the window function [4, 5, 7]. The window function is used in order to avoid unnatural breaks in the voice fragments of the audio file and, accordingly, distortions in the spectrum of the audio signal [6]. Multiplying the output signal by the value of the window function allows you to reduce the amplitude value at both ends of the current frame and thus prevent a sharp change in the values at the endpoints. The point is that the fast Fourier transform algorithm [6] assumes that the signal is continuous and periodic, and in this case the signal is divided into frames of fixed length and a window function is used to avoid distortions in the spectrum. Hemming's window is used as a window function, as it is most often used in the tasks of speech recognition and identification of a person by voice [3, 5]:

$$w_n = 0,54 - 0,46 \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \frac{n}{N-1}\right), n = 0, \dots, N-1, \quad (1)$$

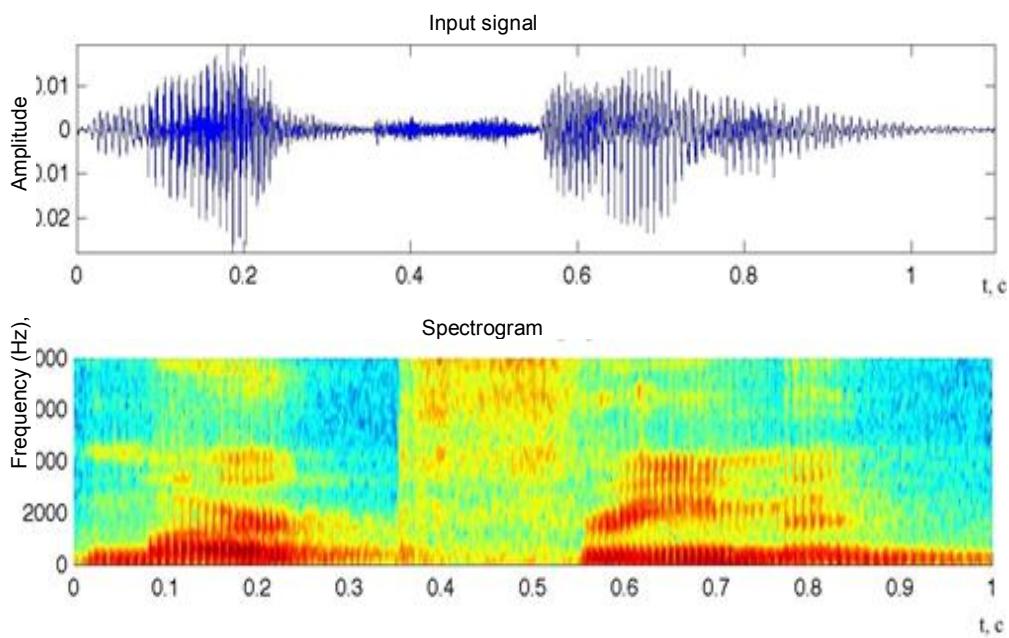
where N is the length of the window.

In Fig. 2 shows the input signal and its spectrogram. The horizontal axis of the spectrogram shows the time in seconds, the vertical axis - the frequency, and the color of each point of the image is determined by the value of the amplitude at a certain frequency at a particular time t . Each person when pronouncing sounds, letters is characterized by its own set (combination) of frequencies and due to this the human ear is able to distinguish one sound from another and, in particular, the voices of different people. In order to select this set of frequencies for each frame of the input audio signal, chalk frequency analysis is used. According to this method, the obtained representation of the signal in the frequency domain is divided into bands using a jar (comb) of triangular filters. The filter limits are calculated on the Mel scale, which is the result of studies of the ability of the human ear to the perception of sounds at different frequencies [4, 5].

Conversion to chalk scale is carried out by the formula:

$$B(f) = 1127 \cdot \ln\left(1 + \frac{f}{700}\right), \quad (2)$$

It is believed that the information carried by the low-frequency components of the voice signal is more important than the high-frequency components and therefore the chalk scale is linear up to 1 kHz and logarithmic above 1 kHz, ie at low frequencies, filters are applied linearly, while at high frequencies - logarithmically. These filters are unevenly located on the frequency axis, so such filters have more in the spectrum with low frequencies (up to 1 kHz) and less in the high frequency range (over 1 kHz) [2, 6, 8]. The filters are applied to the squares of the modules of the Fourier transform coefficients, and the obtained values are logarithmic:

**Fig. 2.** Spectrogram of the input signal

$$e_m = \ln \left(\sum_{k=0}^N |X_k|^2 \cdot H_{m,k} \right), m = 0, \dots, N_{FB-1}, \quad (3)$$

where N_{FB} is the number of filters (most often about 24 filters are used [2]), $H_{m,k}$ - weights of the obtained filters.

The approach partially eliminates the noise components in the frequency domain, as the most important frequencies of the human voice are in the range from 70 Hz to 3400 Hz. The last stage of the process of selection of voice features is the use of discrete cosine transformation (DCT, Discrete Cosine Transform), which will result in a set of chalk-frequency kepral coefficients (MFCC), which will be elements of the vectors of facial features:

$$C_i = \sum_{m=0}^{N_{FB}-1} e_m \cdot \cos \left(\frac{\pi \cdot i \cdot (m+0,5)}{N_{FB}} \right), \quad i = 0, \dots, N_{MFCC},$$

where e_m - logarithmic values of Fourier transform coefficients, N_{MFCC} - number of coefficients (size of feature vectors). Kepral coefficients can also be obtained using the IFFT algorithm (inverse fast Fourier transform), but in this case the DCT algorithm is used, which is more efficient because it does not use work with complex numbers [7, 8, 9]. As a result, for each fragment of the original voice signal we obtain a finite set of chalk frequency coefficients of $C_i = (C_1; C_2; \dots; C_N)$ the kepter, which contains N elements and is a vector of characteristic features of the voice of a particular user.

Voice recognition differs from other systems in that in this case the subject of recognition is a process, not a static image as in the case of fingerprint recognition or iris.

Therefore, most often the voice sample is not represented as a single feature vector, but as a sequence of feature vectors, each of which describes the

characteristics of a small area of the voice signal [5, 7, 9]. Therefore, most often the voice sample is not represented as a single feature vector, but as a sequence of feature vectors, each of which describes the characteristics of a small area of the voice signal [5, 7, 9]. The sequence of vectors obtained after the signal processing step is used to build a model of a person's voice. The main parameter used to identify the user is a measure of the similarity of the two sound fragments (input sample and sample in the database) [9, 10, 11]. Fig. 3 shows a block diagram of user authentication to critical infrastructure [12].

In authorization mode, the user tries to log in by presenting the ID as a voice message. The system analyzes this sample, compares it with the reference sample presented from the voice message database and tries to identify the person by voice. If the person is identified, the system decides to grant access. [13-14]

Conclusions and prospects for further research

The article presents the results of solving a topical scientific problem, which was to develop a method of user authentication to critical infrastructure based on the identification of a person by voice message and its software implementation. During the analysis of technological development of IT it is established that one of the potentially possible methods of reliable protection of information and OID from NSD is biometric identification and / or authentication of users, in particular on the basis of voice message of the user. The peculiarity of this method is the possibility of its implementation in mobile applications, which is especially relevant in today's informatization. One of the most effective ways to increase the security of the system is the use of multifactor authentication mechanisms, which is based on the simultaneous use of several authentication factors (knowledge of the secret, possession of the object, physical characteristics), which significantly increases the security of the system.

Therefore, this user authentication system should be used as an additional method of multifactor authentication by entering an additional password or another method of biometric user authentication.

Prospects for further research are to improve the proposed method by integrating into the system of biometric authentication by voice another method of biometric authentication (eg, facial geometry).

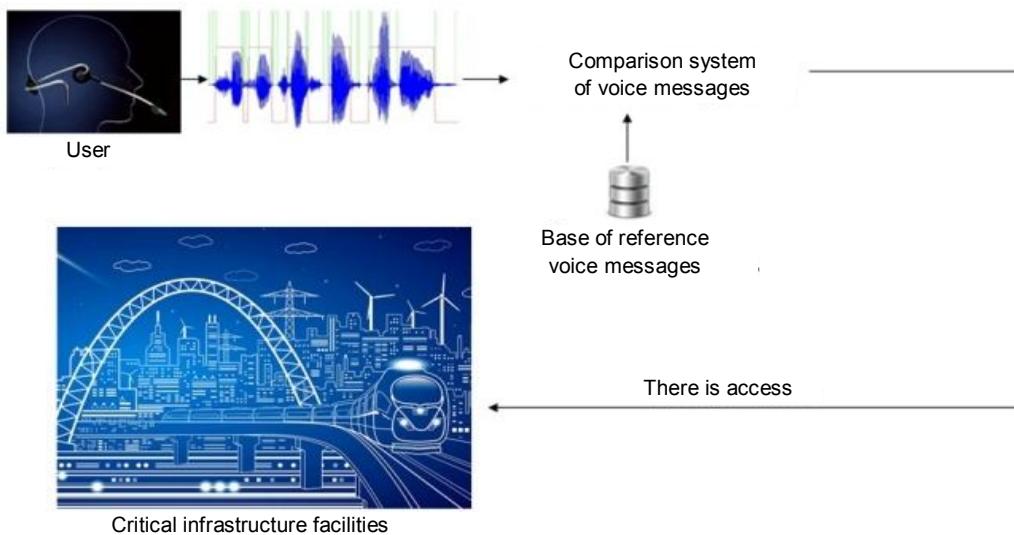


Fig. 3. Block diagram of user authentication to critical infrastructure

REFERENCES

- (2015), *The concept of creating a national system of identification of citizens of Ukraine, foreigners and stateless persons*, Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine № 1428-2015-r dated 23.12.2015, available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/1428-2015-%D1%80>.
- Bugaenko, H. and Gorbenko, I. (2012), “Analysis of three biometric methods of identity authentication”, *Applied Radio Electronics*, Vol. 11, No. 2, pp. 262-266.
- Tsarev, R. and Lemekha, T. (2016), *Biometric technologies*, textbook, ONAZ, Odessa, 140 p.
- Moroz, A. (2011), “Biometric technologies of human identification. System overview”, *Mathematical machines and systems*, No. 1, pp. 39-45.
- (2020), *Chalk-frequency keptral coefficients*, available at: <http://poisk-ru.ru/s62453t2.html>.
- Bidyuk, P. and Bondarchuk, V. (2009), “Modern methods of biometric identification”, *Legal, regulatory and metrological support of information security in Ukraine*, No. 1 (18), pp. 137-146.
- Lalit R., Bahl, Peter F., Brown, Peter V., de Souza and Robert L., Mercer (1987), “Speech Recognition With Continuous Parameter Hidden Markov Models”, *Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Vol. 2, Issues 3-4, September–December 1987, IEEE, New York, pp. 219-234.
- Viola, P. and Jones, M. (2001), “Rapid object detection using a boosted cascade of simple features”, *IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol. 1, pp. 511-518.
- Smetanin, K., Humeniuk I. and Nekrylov A. (2020), “Protection from unauthorized access to information and telecommunication systems through biometric user identification”, *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "PERSPECTIVES OF TELECOM*, available at: <http://conferenc.its.kpi.ua/proc/article/view/200915>.
- Campbell, J.P. (1997), “Speaker Recognition: A Tutorial”, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 85, No. 9, pp. 1437-1462.
- Ing-Jr, Ding, Chih-Ta, Yen and Yen-Ming, Hsu (2013), “Development so Machine Learning Schemes for 135 Dynamic Time-Wrapping-Based Speech Recognition”, *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2, pp. 35-42.
- Voronov A.A. (1983), *Methods of automatic speech recognition*, Vol. 1, MIR, Moscow, 328 p.
- Trysnyuk, V., Demydenko, O., Smetanin, K. and Zozulia, A. (2020), “Improvement of the complex evaluation method of vital activity risks”, *European Association of Geoscientists & Engineers, Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects 2020*, May 2020, Vol. 2020, pp. 1-5, DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo071>.
- Smetanin, K., Litvinenko, A. and Kostenko, D. (2019), “Biometric authentication of users based on voice signals in cyberspace”, *Problems of theory and practice of information confrontation in the conditions of hybrid wars, scientific-practical. Conf.*, Oct. 24–25. 2019, ZhVI, Zhytomyr, pp. 205-207.

Received (Надійшла) 11.05.2020
Accepted for publication (Прийнята до друку) 01.07.2020

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Триснюк Василь Миколайович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу дослідень навколошнього середовища, Інститут телекомунікацій і глобального Інформаційного простору НАН України, Київ, Україна;

Vasyl Trysnyuk – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of the environmental research department, Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine; e-mail: trysnyuk@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9920-4879>.

Нагорний Євген Ігорович – аспірант, Інститут телекомунікацій і глобального Інформаційного простору НАН України, Київ, Україна;

Yevhen Nagornyi – postgraduate student, Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine; e-mail: rhbz777@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5902-9295>.

Сметанін Кирило Володимирович – кандидат технічних наук, викладач кафедри захисту інформації та кібербезпеки, Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова, Житомир, Україна;

Kirill Smetanin – PhD (Technical), lecturer at the Department of Information Security and Cybersecurity, Korolov Zhytomyr Military Institute, Zhytomyr, Ukraine; e-mail: kiry221982@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6062-550X>.

Гуменюк Ігор Володимирович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри захисту інформації та кібербезпеки, Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова, Житомир, Україна;

Igor Humeniuk – PhD (Technical), Senior lecturer at the Department of Information Security and Cybersecurity, Korolov Zhytomyr Military Institute, Zhytomyr, Ukraine; e-mail: ig_gum@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5853-3238>.

Уварова Тетяна Володимирівна – науковий співробітник, Національний університет оборони України імені Івана Черняховського, Київ, Україна;

Tetyana Uvarova – Researcher, National University of Defense of Ukraine named after Ivan Chernyakhovsky, Kyiv, Ukraine; e-mail: rhbz777@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5807-2563>.

Метод автентифікації користувачів до об'єктів критичної інфраструктури на основі ідентифікації особи за голосовим повідомленням

В. М. Триснюк, Є. І. Нагорний, К. В. Сметанін, І. В. Гуменюк, Т. В. Уварова

Анотація. Предметом дослідження статті є захист об'єктів критичної інфраструктури на основі ідентифікації особи за голосовим повідомленням від несанкціонованого доступу. Мета роботи розглянути основні методи і алгоритми ідентифікації особи за голосом, а також розроблення програмної реалізації системи контролю доступу до забороненої зони, яка дозволяє покращити захищеність стандартної парольної системи шляхом запровадження механізмів голосової авторизації. Удосконалення алгоритму виділення фрагментів голосу в аудіофайлах. В статті вирішуються наступні завдання: аналіз переваг та недоліків існуючих методів захисту інформації до об'єктів критичної інфраструктури; визначення оптимального методу ідентифікації особи за голосовим повідомленням; характеристика основних особливостей впровадження і використання мел-частотних кепстральних коефіцієнтів (MFCC); Використовуються такі методи: системний підхід, системний аналіз, теорія алгоритмів. Отримано наступні результати: розроблено алгоритм збереження голосових даних користувачів з метою їх подальшого використання під час авторизації, підсистему голосової авторизації; розроблено відповідне програмне забезпечення комп’ютерної системи. Висновки: на прикладі застосування біометричного методу автентифікації користувачів до об'єктів критичної інфраструктури на основі ідентифікації особи за голосовим повідомленням, саме цей метод автентифікації користувачів слід застосовувати як додатковий спосіб багатофакторної автентифікації шляхом введення додаткового пароля або ще одного метода біометричної автентифікації користувачів.

Ключові слова: біометрична ідентифікація; ідентифікація особи за голосом; автентифікація особи за голосовим повідомленням; захист інформації; несанкціонований доступ; кібербезпека.

Метод аутентификации пользователей к объектам критической инфраструктуры на основе идентификации личности по голосовому сообщению

В. Н. Триснюк, Е. И. Нагорный, К. В. Сметанин, И. В. Гуменюк, Т. В. Уварова

Аннотация. Предметом исследования статьи является защита объектов критической инфраструктуры на основе идентификации личности, по голосовому сообщению, от несанкционированного доступа. Цель работы - рассмотреть основные методы и алгоритмы идентификации личности по голосу, а также разработка программной реализации системы контроля доступа к запрещенной зоне, которая позволяет улучшить защищенность стандартной парольной системы путем введения механизмов голосовой авторизации. Усовершенствование алгоритма выделения фрагментов голоса в аудиофайлах. В статье решаются следующие задачи: анализ преимуществ и недостатков существующих методов защиты информации к объектам инфраструктуры; определение оптимального метода идентификации личности по голосовому сообщению; характеристика основных особенностей внедрения и использования мел-частотных кепстральных коэффициентов (MFCC). Используются такие методы: системный подход, системный анализ, теория алгоритмов. Получены следующие результаты: разработан алгоритм сохранения голосовых данных пользователей с целью их дальнейшего использования при авторизации, подсистеме голосовой авторизации; разработано соответствующее программное обеспечение компьютерной системы. Выводы: на примере применение биометрического метода проверки подлинности пользователей к объектам критической инфраструктуры на основе идентификации личности, по голосовому сообщению, именно этот метод аутентификации пользователей следует применять как дополнительный способ многофакторной аутентификации путем ввода дополнительного пароля или еще одного метода биометрической аутентификации пользователей.

Ключевые слова: биометрическая идентификация; идентификация лица по голосу; аутентификация пользователя по голосовому сообщению; защита информации; несанкционированный доступ; кибербезопасность.

Г. М. Хорошун

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, Сєвєродонецьк, Україна

МЕТОД ОПИСУ ЯВИЩА ДИФРАКЦІЇ ЗА СУКУПНІСТЮ ТОПОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ТА АЛГОРИТМ РОЗРІЗНЯННЯ МІНІМУМУ ВІД НУЛЯ ІНТЕНСИВНОСТІ

Анотація. В роботі розроблено метод опису явища дифракції по сукупності топологічних об'єктів за допомогою системного аналізу. Топологічними об'єктами дифракційного поля є максимум, мінімум і нуль інтенсивності, що тоді ж фазові сингулярності або оптичному вихору. Розглянуто математичне представлення топологічних об'єктів, визначення яких у полі проводиться стандартними методами пошуку екстремуму функції. Розроблено алгоритм розрізняння мінімуму та нуля інтенсивності на експериментальних зображеннях, завдяки чому виникла можливість класифікації дифракційних зображень за кількістю оптичних фазових сингулярностей без додаткового інтерференційного аналізу. Для підвищення швидкості аналізу отриманих даних розглянуто метод сегментації зображення. Застосування отриманих результатів та рекомендацій можливе в різних областях медицини і техніки, в яких використовується лазерне випромінювання.

Ключові слова: дифракція; топологічні об'єкти; ідентифікація; сегментація.

Постановка та аналіз проблеми

Дифракційні явища спостерігаються, як переважно відображення інтенсивності в результуючому оптичному полі, внаслідок проходження світла крізь оптичні фазові елементи, діафрагми та середовища. Існує декілька підходів до опису дифракції, основними з яких є розв'язок хвильового рівняння диференціальними методами з використанням рівняння Леонтьєва [1] та інтегральним методом із застосуванням рівняння Кірхгофа та його модифікацій [2]. Стандартним методом вивчення дифракції є визначення інтенсивності та фази результуючого поля з подальшим аналізом їх еволюції у просторі. Розподіл інтенсивності дифрагованого поля використовується для формування певної структури об'єкта лазером в задачах техніки та медицини [3].

Якщо подивитись на сукупність дифракційних зображень, отриманих для різних джерел світла: плоска хвиля, сферична хвиля, Лагер-Гаусові пучки, пучки Куммера та інші, що проходили крізь апертури або фазові елементи, то можна побачити, що на всіх дифракційних картинах присутні такі топологічні об'єкти, як максимуми, мінімуми та нулі інтенсивності, якими можна достатньо повно описати отримане зображення. Екстремуми типу максимум та мінімум добре відомі, а нуль інтенсивності ще має назву фазова сингулярність та оптичний вихор [4]. Він формується в полі як дуже стійка структура до зовнішніх збурень та має унікальні властивості щодо маркування світлових пучків та захоплення світлопоглинаючих мікрочастинок [5].

Існують різні методи розпізнавання об'єктів на зображеннях: за геометричною відповідністю розподілів точок, що належать об'єкту в геометричних фігурах [6], за асоціативною пам'яттю і скалярному критерію [7], засобами штучного інтелекту [8,9]. Основними задачами роботи є розробка методу опису явища дифракції по сукупності топологічних об'єктів за допомогою системного аналізу та методу розрізняння мінімуму та нуля інтенсивності (фазової сингулярності) на дифракційному зображенні.

Результати дослідження

Метод опису дифракції поля. Розглянемо модель дифракції з точки зору системного аналізу. Формально опис явища дифракції представимо кортежем:

$$D = \left\langle \{K\} \left\{ p_l^K \right\}_{l=1}^6, \{T\} \left\{ p_m^T \right\}_{m=1}^6, \{A\}, \left\{ p_b^A \right\}_{b=1}^6, \{C\}, \left\{ p_d^C \right\}_{d=1}^6, \{O\}, \left\{ p_f^O \right\}_{f=1}^3 \right\rangle, \quad (1)$$

де $\{K\}$ – множина «поле в площині джерел», $\left\{ p_l^K \right\}_{l=1}^6$ – множина параметрів, що є ознаками поля в площині джерел;

$\{T\}$ – множина «оптичний елемент в площині джерела», $\left\{ p_m^T \right\}_{m=1}^6$ – множина параметрів, що є ознаками оптичного елементу в площині джерел;

$\{A\}$ – множина «теоретичне зображення дифракційної картини», $\left\{ p_b^A \right\}_{b=1}^6$ – множина параметрів, що є ознаками зображення, отриманого за допомогою теоретичного розрахунку;

$\{C\}$ – множина «експериментальне зображення дифракційної картини», $\left\{ p_d^C \right\}_{d=1}^6$ – множина параметрів, що є ознаками експериментальне зображення;

$\{O\}$ – множина «якість експериментального зображення», $\left\{ p_f^O \right\}_{f=1}^3$ – множина параметрів, що є ознаками якості експериментального зображення.

Множина «поле в площині джерел» $\{K\}$ має таку множину параметрів $\left\{ p_l^K \right\}_{l=1}^6$:

- p_1^K – номер сегменту максимуму,
 p_2^K – висота максимуму,
 p_3^K – номер сегменту мінімуму,
 p_4^K – висота максимуму,
 p_5^K – номер сегменту сингулярності,
 p_6^K – кількість сегментів.

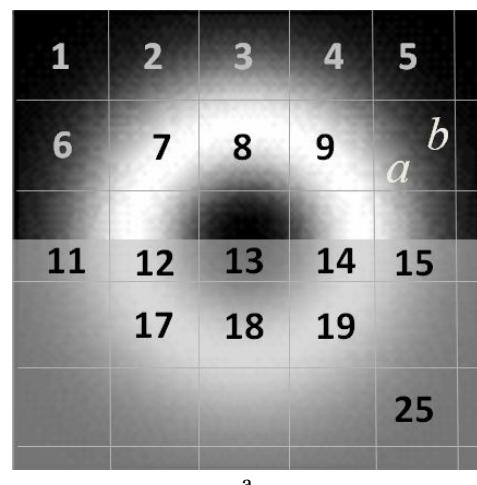
Множини $\{A\}$ та $\{C\}$ мають подібний набір параметрів до $\{K\}$ відповідно для дифракційного розрахункового та експериментального зображення. Стандартний метод обробки зображення включає в себе роботу з матрицею значень інтенсивності кількість яких відповідає кількості пікселів ПЗС-камери, яка використовувалась при реєстрації картини. Визначення шумів, контрасту та індексу структурної схожості є основними параметрами аналізу якості зображення [10]. Множина $\{O\}$ містить параметри що є ознаками якості експериментального зображення:

- p_1^O – співвідношення сигнал/шум,
 p_2^O – контраст зображення,
 p_3^O – індекс структурної схожості.

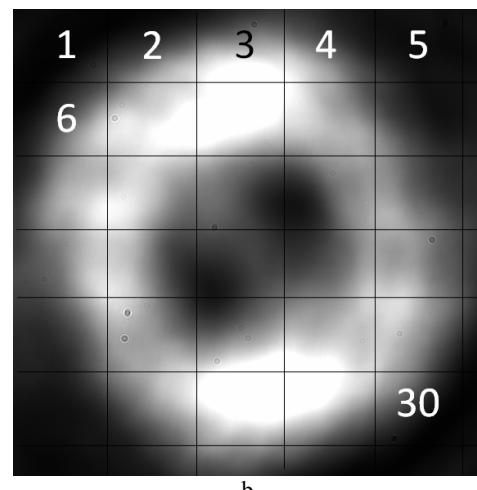
Розглянемо розподіл інтенсивності початкового поля, як моди Лагера-Гауса, нижня половина якого перекрита фазовою пластинкою висотою в π (рис. 1, а). Першим кроком роботи з зображенням є проведення його сегментації. Спочатку треба визначити розміри всього зображення з шириною А та висотою В та розміри топологічних об'єктів, що є на зображенні. Характерний розмір топологічного об'єкта приблизно дорівнює за шириною $(a \pm \Delta a)$ та за висотою $(b \pm \Delta b)$, як показано на рис. 1, а. Тобто сегментацію зображення пропонується проводити прямоугутниками зі сторонами a та b з відповідною кількістю прямоугутників $N = n_1 \times n_2$, де $n_1 = A/a$ та $n_2 = B/b$, $n_1, n_2 \in \mathbb{Z}$.

В приведеному прикладі на (рис. 2, б) $n_1 = 5$, $n_2 = 6$, $N = 30$. Якщо топологічний об'єкт знаходиться на лінії сегмента, то існує вірогідність того, що він не буде врахований. Для цього випадку є два варіанти розв'язку: перший - зсунути сітку сегментації на величину $\Delta x, \Delta y$ в межах похиби $\Delta a, \Delta b$ та другий збільшити кількість сегментів n_1 або n_2 на один.

Можна визначити сукупність параметрів для дифракційного явища з зображенням на рис. 1, а, яке містить сингулярний пучок та оптичний елемент у вигляді фазової пластинки з краєм вздовж осі X. Зображення має рівні сторони, тому розділимо його на однакову кількість сегментів по осям x та y, всього 25 прямоугутників. Для того щоб показати неперевність топологічного об'єкту в просторі використаний елемент стрілочки, напрям якої вказує з яким наступним елементом поєднується попередній.



a



b

Рис. 1. Початкове поле в площині джерел – сингулярний пучок та фазова π -пластинка в нижній напівплощині (а) дифракційна картина в площині спостереження (б)

Сингулярний пучок містить осьовий нуль інтенсивності та кільце максимуму.

$$\begin{aligned} \{p_1^K\} &= \{7 \rightarrow, 8 \rightarrow, 9 \downarrow, 14 \downarrow, 19 \leftarrow, 18 \leftarrow, 17 \uparrow, 12 \uparrow\}, \\ \{p_2^K\} &= \{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1\}, \\ \{p_5^K\} &= \{13\}, \\ \{p_6^K\} &= \{25\}. \end{aligned}$$

Висота фази пластинки в π є тим стрибком, що сприятиме утворенню фазової сингулярності, тому ми позначаємо зону стрибка, як таку, що містить топологічний об'єкт.

$$\begin{aligned} \{p_5^T\} &= \{11 \rightarrow, 12 \rightarrow, 13 \rightarrow, 14 \rightarrow, 15\}, \\ \{p_6^T\} &= \{25\}. \end{aligned}$$

Результатуюче дифракційне поле (рис. 1b) втратило свою симетрію і є доречним розділити його на 30 сегментів. Воно містить декілька максимумів та дві фазових сингулярності.

$$\{p_1^C\} = \{7 \rightarrow, 8, 12, 15, 17, 25, 28 \rightarrow, 29\},$$

$$\begin{aligned}\{p_2^C\} &= \{255, 255, 250, 230, 190, 220, 255, 255\}, \\ \{p_1^O\} &= \{128\}, \\ \{p_2^O\} &= \{0.98\}.\end{aligned}$$

Метод ідентифікації топологічних об'єктів на дифракційній картині. Ідентифікація топологічних об'єктів у полі дозволяє відновити дифракційну структуру поля без повного розрахунку дифракційного інтегралу та застосовувати цю інформацію в прикладних задачах.

Сутність задачі визначення об'єкту зводиться до ідентифікації топологічних об'єктів в площині ХУ по тотожності невідомого об'єкта відомому на підставі збігу ознак. Розглянемо ознаки, які дозволяють визначити наявність топологічного об'єкту та його тип на дифракційному зображенні.

Якщо в деякому δ -околі точки $C(x_1, y_1)$ виконано нерівність $I(x, y) < I(x_1, y_1)$, то кажуть, що функція $z = I(x, y)$ має максимум в точці $C(x_1, y_1)$. При цьому точка $C(x_1, y_1)$ називається точкою максимуму, а відповідне значення функції $I(x_1, y_1)$ – «висотою» максимуму.

Якщо в деякому δ -околі точки $M(x_2, y_2)$ виконано нерівність $I(x, y) > I(x_2, y_2)$, то кажуть, що функція $z = I(x, y)$ має мінімум в точці $M(x_2, y_2)$. При цьому точка $M(x_2, y_2)$ називається точкою мінімуму.

Метод розрізняння мінімуму та фазової сингулярності. Розглянемо дифракційне зображення на

рис.2, а, що містить максимуми, мінімуми та нулі інтенсивності.

а відповідне значення функції $I(x_2, y_2)$ – «висотою» мінімуму.

Якщо мінімум інтенсивності в точці $S(x, y)$ дорівнює нулю, то амплітуда поля $A(x, y) = 0$, тоді реальна та уявна частини амплітуда поля

$$A(x, y) = \operatorname{Re}(A(x, y)) + i \cdot \operatorname{Im}(A(x, y))$$

теж дорівнюють нулю.

Фаза в точці визначається як

$$\Phi(x, y) = \operatorname{Im}(A(x, y)) / \operatorname{Re}(A(x, y)).$$

Тобто для нульового значення інтенсивності з нульовою висотою, фаза буде невизначена і в точці $S(x, y)$ спостерігається фазова сингулярність.

Отже, фазова сингулярність має такі властивості:

- на розподілі інтенсивності – нульове значення;
- на фазовій карті – точку з невизначеністю або сингулярністю фази;
- є елементом зображення, що має темну серцевину характерної форми;
- в дифрагованому полі свідчить про наявність в початковому полі значного стрибка фази та/або амплітуди.

Метод розрізняння мінімуму та фазової сингулярності. Розглянемо дифракційне зображення на

рис.2, а, що містить максимуми, мінімуми та нулі інтенсивності.

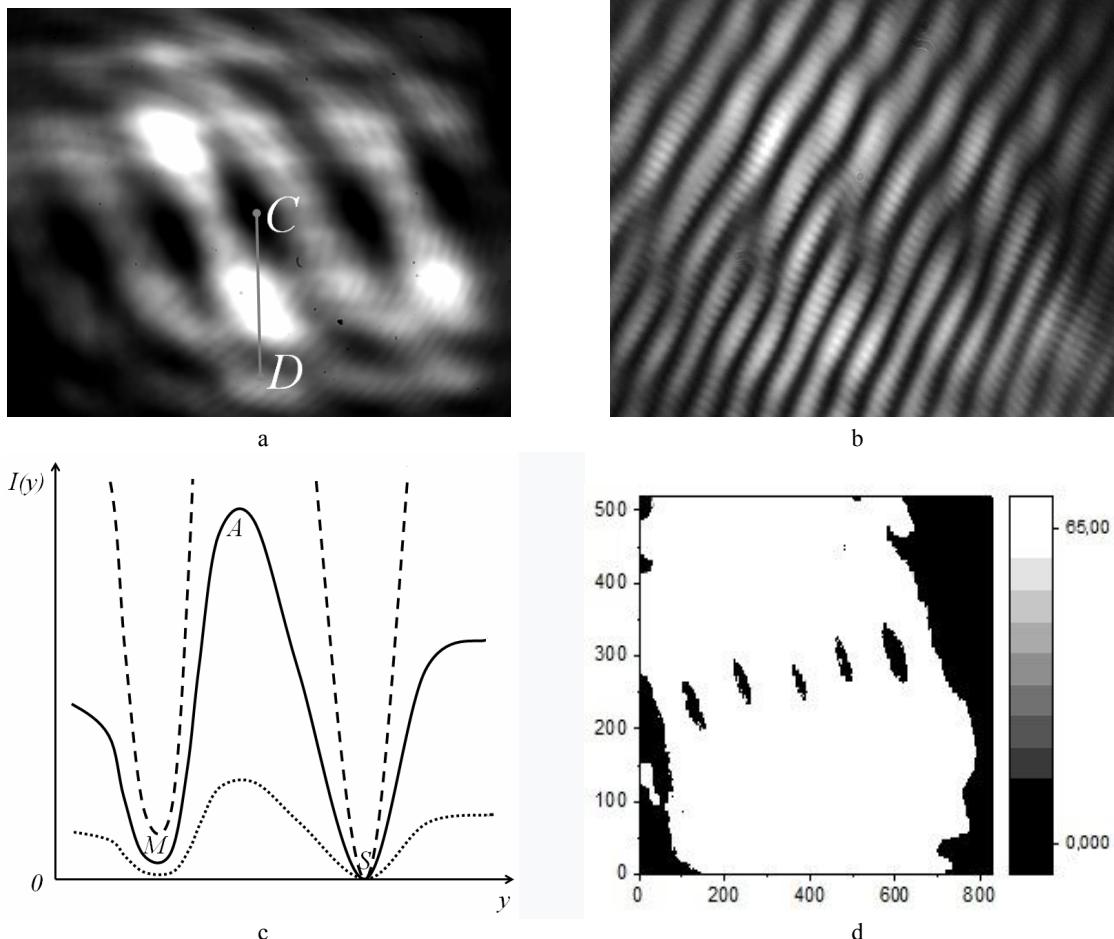


Рис. 2. Експериментальна дифракційна картина (а) та її інтерференція з гауссовим пучком (б); схематичний вид інтенсивності в перетині дифракційного зображення (с) вздовж лінії CD; дифракційна картина з розподілом інтенсивності розтягнутим в 10^3 раз (д)

Для того, щоб дати однозначну відповідь чи є темна пляма мінімумом інтенсивності чи нулем необхідно провести додатковий експеримент та зареєструвати інтерференційну картину з плоскою хвилею (рис. 2, б) на якій місце локалізації фазової сингулярності визначається по областях розгалуження інтерференційних смуг.

На рис. 2, б видно, що спостерігається п'ять фазових сингулярностей, розташованих вздовж осі x .

Всі інші темні плями на зображені є мінімумами.

Не завжди існує можливість зробити інтерфограму у зв'язку з відсутністю місяця в схемі для розташування додаткового оптичного елементу для отримання референтного променя, а також в тому випадку коли вже не має можливості відтворити цей експеримент і в наявності є лише набір інтенсивностей.

Як відомо досягти абсолютний нуль неможливо завдяки обмеженню точності розрахунку в чисельних методах та шуму ПЗС-камери в експерименті. В роботі пропонується наступний метод визначення сингулярності лише по інтенсивності експериментального зображення.

Теорема: Якщо у полі достеменно відомо, що присутня фазова сингулярність, яка має висоту по інтенсивності h_s то всі мінімуми, які мають таку ж або меншу висоту $h \leq h_s$ є також фазовими сингулярностями.

Підтвердження. Для більшої наочності розглянемо переріз дифракційного зображення на рис. 2, с вздовж осі відрізу CD позначеній сірим кольором на рис. 2, а. Переріз містить мінімум в точці М, максимум в точці А та фазову сингулярність в точці S (суцільна крива на рис. 2, с). Якщо збільшувати яскравість зображення, максимум А збільшується таким чином що виходить за межі рисунка, мінімум М стає вищим, а нуль інтенсивності S залишається на своєму місці (показано пунктиром). Завдяки тому, що в теорії будь-яке число помножене на нуль буде нуль, а в експерименті мінімум для фазової сингулярності глибший за інші мінімуми.

Докажемо це: на експериментальному зображені в якому для початкового зображення на рис. 2, с максимум становив $6,5 \cdot 10^4$, а при вибору рівня інтенсивності в 10^3 раз меншого за початковий на зображені лишились лише фазові сингулярності в кількості п'яти (рис. 2, д), а мінімуми зникли, тому що їх висота $h > h_s$. Тобто, всі мінімуми, які мають таку ж або меншу висоту $h \leq h_s$ є також фазовими сингулярностями.

Висновки

В роботі розроблено метод опису явища дифракції по сукупності топологічних об'єктів за допомогою системного аналізу.

Розглянуто методи ідентифікації топологічних об'єктів дифракційного поля типу максимум, мінімум і сингулярність.

Для підвищення швидкості аналізу отриманих даних розглянуто метод сегментації зображення. Визначено кортеж параметрів для опису дифракційного явища з урахуванням початкових та результатуючих характеристик поля та властивостей оптичного елементу.

Описано алгоритм розрізняння мінімуму інтенсивності та нульової інтенсивності (фазової сингулярності) на експериментальних зображеннях.

Наведений метод дозволяє класифікувати зображення по кількості фазових сингулярностей, якщо відомо що один з топологічних об'єктів визначений, як фазова сингулярність.

Застосування отриманих результатів та рекомендацій можливе в різних областях медицини і техніки, в яких використовується лазерне випромінювання.

Подяка

Автор дякує проф. Яну Масаяду за можливість проведення експериментальної роботи по отриманню оптичних зображень в лабораторії Вроцлавського технологічного університету, м. Польща в рамках виконання спільногоД українсько-польського проекту у 2018-2019 роках.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Леонтович М. А. Решение задачи о распространении электромагнитных волн вдоль поверхности земли по методу параболического уравнения / М. А. Леонтович, В. А. Фок // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1946. – Т. 16, № 7. – С. 557.
- Матвеев А. А. Оптика / А. А. Матвеев. – М. Мир, 1988. – 445 с.
- Reinhard Voelkel, Micro-Optics: Enabling Technology for Illumination Shaping in Optical Lithography, 2014, SPIE, 9052. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2046116>
- Coullet P., Gil L., Rocca F. Optical vortices // Optics Communications – 1989. – V.73 – P. 403.
- Zhao, J. Curved singular beams for three-dimensional particle manipulation. Sci. Rep. 5, 12086; DOI: <https://doi.org/10.1038/srep12086>.
- Квєтний Р. Н. Високошвидкісний метод класифікації зображень / Р. Н. Квєтний, О. А. Ремінний // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2009. – № 2. – С. 22-27.
- Четирбок П. В. Асоціативна пам'ять і скалярний критерій для розпізнавання / П. В. Четирбок // Матеріали Х міжнародної науково-технічної конференції «Системний аналіз і інформаційні технології» (САІТ-2008, Київ, 20 – 24 травня 2008). – Київ: НТУУ «КПІ», 2008. – С. 266.
- Шворов С. А. Нейромережеве розпізнавання оптичних образів у системах спеціального призначення / С. А. Шворов, В. М. Штепа, Н. А. Засець // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – 2014. – Вип. 45. – С. 102-108.

9. The Development of an Application for Microparticle Counting Using a Neural Network / Ganna Khoroshun, Ruslan Luniakin, Andrii Riazantsev, Oleksandr Ryazantsev, Tetiana Skurdyina, Halyna Tatarchenko // Proceedings of the 4th Int. Conf. on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS 2020). – Vol. I: Main Conference. – P. 1186-1195.
10. Statistical Optical Image Analysis for Information System / Oleksandr Ryazantsev, Ganna Khoroshun, Andrii Riazantsev, Vitalii Ivanov, Aleksandr Baturin // Proc. of 2019 7th International Conference on Future Internet of Things and Cloud Workshops (FiCloudW), Istanbul, Turkey. – IEEE 2019. – P. 130-134, DOI: <https://doi.org/10.1109/FiCloudW.2019.00036>.

REFERENCES

1. Leontovich, M.A. and Fock, V.A. (1946), “Solution of the problem of the propagation of electromagnetic waves along the earth's surface by the method of parabolic equation”, *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, Vol. 16, no. 7, p. 557.
2. Matveev, A.A. (1988), *Optics*, Mir, Moscow. 445 p.
3. Reinhard, Voelkel (2014), *Micro-Optics: Enabling Technology for Illumination Shaping in Optical Lithography*, SPIE, 9052, DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2046116>.
4. Coullet, P., Gil L. and Rocca, F. (1989), “Optical vortices”, *Optics Communications*, Vol. 73, p. 403.
5. Zhao, J. (2015), *Curved singular beams for three-dimensional particle manipulation*, *Sci. Rep.* 5, 12086; DOI: <https://doi.org/10.1038/srep12086>.
6. Kvyetnyi, R.N. and Reminniy, O.A. (2009), “High-speed image classification method”, *Opto-electronic information and energy technologies*, No. 2, pp. 22-27.
7. Chetyrbok, P.V. (2008), “Associative Memory and Scalar Criterion for Recognition”, *Proceedings of the X International Scientific and Technical Conference "System Analysis and Information Technologies"*, NTUU "KPI", Kyiv, p. 266.
8. Shvorov, S.A., Shtepa, V.M. and Zayets, N.A. (2014), “Neural network recognition of optical images in special purpose systems”, *Collection of scientific works of the Military Institute of the T. Shevchenko*, Issue 45, pp. 102-108.
9. Khoroshun, G., Luniakin, R., Riazantsev, A., Ryazantsev, O., Skurdyina, T. and Tatarchenko, H. (2020), “The Development of an Application for Microparticle Counting Using a Neural Network”, *Proc. of the 4th Int. Conf. on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS)*, Vol. I: Main Conference, pp. 1186-1195.
10. Ryazantsev, O., Khoroshun, G., Riazantsev, A., Ivanov, V. and Baturin, A. (2019), “Statistical Optical Image Analysis for Information System”, *Proc. of 2019 7th Int. Conf. on Future Internet of Things and Cloud Workshops (FiCloudW)*, Istanbul, Turkey, IEEE 2019, pp. 130-134, DOI: <https://doi.org/10.1109/FiCloudW.2019.00036>.

Received (Надійшла) 30.04.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 24.06.2020

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Хорошун Ганна Миколаївна – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри будівництва, урбаністики та просторового планування, Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, Сєвєродонецьк, Україна;
Ganna Khoroshun – PhD (Optics and Laser Physics), Associated Professor of Department of Construction, Urban and Spatial Planning, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Severodonetsk, Ukraine;
e-mail: an_khor@i.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1272-1222>.

**Метод описания явления дифракции по совокупности топологических объектов
и алгоритм различия минимума от нуля интенсивности**

Г. Н. Хорошун

Аннотация. В работе разработан метод описания явления дифракции по совокупности топологических объектов с помощью системного анализа. Топологическими объектами дифракционного поля есть максимум, минимум и ноль интенсивности, которые тождественны фазовой сингулярности или оптическому вихрю. Рассмотрено математическое представление топологических объектов, определение которых в поле проводится стандартными методами поиска экстремума функции. Разработан алгоритм различия минимума и нуля интенсивности на экспериментальных изображениях, благодаря чему появилась возможность классификации дифракционных изображений по количеству оптических фазовых сингулярности без дополнительного интерференционного анализа. Для повышения скорости анализа полученных данных рассмотрен метод сегментации изображения. Применение полученных результатов и рекомендаций возможно в различных областях медицины и техники, в которых используется лазерное излучение.

Ключевые слова: дифракция; топологические объекты; идентификация; сегментация.

**Diffraction phenomenon description method based on the topological objects set
and the algorithm for distinguishing the minimum from zero intensity**

Ganna Khoroshun

Abstract. Diffraction phenomenon describing method based on the topological objects set by means of system analysis was developed in the work. Diffraction field topological objects are maximum, minimum and zero intensity, which is identical to the phase singularity or optical vortex. Topological objects mathematical representation by standard extremum search function methods was considered. The algorithm for distinguishing the minimum has been developed and zero intensity at the experimental images due to the algorithm the diffractive optical images classification possibility by the number of phase singularities without further interference analysis was shown. To increase the speed of data analyses the image segmentation method is suggested. Obtained results and recommendations applying is possible in various fields of medicine and technology, which use laser radiation.

Keywords: diffraction; topological objects; identification; segmentation.

Information systems modeling

УДК 528.855

doi: 10.20998/2522-9052.2020.3.04

С. М. Андреєв, В. А. Жилін

Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна

МЕТОДИКА ПОБУДОВИ ГІДРОЛОГІЧНИХ КАРТОГРАФІЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЗА ДАНИМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

Анотація. Предметом дослідження є розроблення методики побудови гідрологічних картографічних моделей за даними дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Об'єктом дослідження є процес безперервного забезпечення природозахисних закладів держави тематичними гідрологічними картами, що постійно актуалізуються і відображають поточний стан прісноводних природних ресурсів. Метою роботи є підвищення інформативності, оперативності та достовірності статистичного і прогнозного аналізу геоданих ДЗЗ про стан прісноводних природних ресурсів за рахунок безперервної актуалізації їх картографічних моделей. **Висновки.** На підставі проведеного аналізу класифікації географічних карт за змістом, масштабом та просторовим охопленням визначено місце гідрологічних карт вод суші в загальній класифікації карт. Проведено детальний аналіз різновидів гідрологічних карт і карт водного господарства з урахуванням призначення і складових гідрологічної науки, методів отримання та обробки гідрологічних даних. Проаналізовано основні завдання водного господарства як області діяльності, що має забезпечувати управління раціональним використанням водних ресурсів, а також завдання картографування водного господарства і класифікацію відповідних карт. Розглянуто господарський та екологічний аспекти картографування вод. Проведено аналіз існуючих досліджень використання технологій геоінформаційних систем у гідрології та розробці гідрологічних карт, у тому числі розглянуто дослідницькі досягнення України в даній галузі. Разом з тим, проведено аналіз сучасних параметрів та стану річки Дніпро як прикладу предметного дослідження. Все зазначене забезпечує актуальність і методологічні основи для розроблення методики побудови гідрологічних картографічних моделей за даними дистанційного зондування Землі. В процесі розроблення вказаної методики детально проаналізовано джерела даних для побудови картографічних моделей, а також етапи створення карт — від редакційно-підготовчого до етапів уведення та обробки даних і завершального етапу видання карти. Запропоновану методику в подroбцах описано структурно й покроково, що надає користувачеві повне уявлення щодо необхідних до виконання процедур, ресурсів вхідних даних та відповідного програмного забезпечення для отримання будь-якої гідрологічної картографічної моделі із заданими параметрами і тематичним наповненням. Отримані із використанням запропонованої методики електронні гідрологічні картографічні моделі забезпечують на вимогу користувача видання за допомогою програмного пакету ArcGIS баз даних, графічних, картографічних та інших матеріалів, що стосуються певного об'єкту водного господарства. Таким чином, природозахисні заклади матимуть актуалізовані із заданою регулярністю тематичні гідрологічні карти, що відображають стан прісноводних природних ресурсів.

Ключові слова: водні ресурси; гідрологічні картографічні моделі; дистанційне зондування Землі; технології ГІС.

Вступ

Наявність прісної чистої води — необхідна умова існування всіх живих організмів на планеті. На частку прісної води, придатної до вживання, припадає лише 3% від загальної її кількості. Незважаючи на це, людина в процесі своєї діяльності нещадно забруднює прісні води. Через це значний обсяг прісних вод став наразі зовсім непридатним. Різке погіршення якості прісної води відбулося в результаті забруднення її хімічними та радіоактивними речовинами, отрутохімікатами, синтетичними добриками і каналізаційними стоками.

На сьогодні проводиться багато досліджень водних ресурсів та пов'язаних з ними явищ, кожного року проводяться наукові конференції присвячені вивченням водних ресурсів та створенню нових методів і засобів їх дослідження. Низка проведених досліджень дають підстави для розуміння, що загальна урбанізація, промислова та сільськогосподарська діяльність, витоки хімічних речовин, теплове забруднення, атмосферне забруднення та багато інших факторів негативно впливають на стан водних об'єктів. Через низький пріоритет екологічного контролю в Україні щороку у поверхневі води скидаються великі

об'єми недостатньо очищених вод. Зважаючи на це на сьогоднішній день задача безперервного моніторингу стану прісноводних природних ресурсів є стратегічним питанням національної безпеки України. Отже, екологічний моніторинг для запобігання екологічного забруднення річок, озер та інших водних об'єктів є актуальним напрямком досліджень задля збереження прісноводних ресурсів України.

Однією з найважливіших задач цього дослідницького напрямку є забезпечення відповідних природозахисних закладів держави тематичними гідрологічними картами, що постійно актуалізуються і відображають поточний стан процесів формування водного балансу та стоку, структури річкових потоків, руслових та берегових процесів, термічних, льодових фізичних явищ, хімічного складу вод тощо.

Саме тому метою даної роботи є підвищення інформативності, оперативності та достовірності статистичного і прогнозного аналізу геоданих ДЗЗ про стан прісноводних природних ресурсів за рахунок безперервної актуалізації їх картографічних моделей. А звідси — предметом дослідження обрано розроблення методики побудови гідрологічних картографічних моделей за даними дистанційного зондування Землі (ДЗЗ).

Розроблення зазначеної методики проведено із використанням у якості прикладу річкової мережі басейну Дніпра. І це не випадково, адже площа басейну Дніпра в межах України становить понад 290 тисяч квадратних кілометрів, водою Дніпра користується близько 30 млн. жителів України.

Для досягнення поставленої мети і коректної постановки задачі дослідження по-перше необхідно провести узагальнення методологічних основ гідрологічних картографічних моделей та їх класифікації.

Місце гідрологічних картографічних моделей у загальній класифікації географічних карт

Загальна класифікація карт. Для того щоб орієнтуватися у величезному масиві карт усіляких видів, типів та змісту, виданих у різні часи в різних країнах світу, необхідно їх класифікувати та упорядкувати. Найбільш складною є класифікація карт за змістом, оскільки все або майже все, що існує в світі, можна картографувати.

Це так само важко, як класифікувати самі явища природи та суспільства: зоряне небо, моря та океани, рельєф і рослинність, промисловість і сільське господарство, екологічний стан територій та захворюваність населення грипом, історичні військові походи та голосування на виборах.

Класифікація карт — це система, що представляє сукупність карт, які поділяються (впорядковуються) за певною обраною ознакою. Класифікації карт необхідні для їх інвентаризації, зберігання та пошуку, наукової систематизації, складання списків та каталогів, створення банків даних і картографічних інформаційно-довідкових систем.

У якості підстави для класифікації можна обрати будь-яку властивість карти: масштаб, тематику, епоху створення, мову і спосіб графічного оформлення та видання тощо.

На сьогоднішній день загальна класифікація (рис. 1) представляє собою поділ усіх географічних карт за двома основними критеріями: за масштабом і просторовому охопленню, а також за змістом.

Класифікація карт за масштабом та просторовим охопленням. Поділ карт за масштабом та просторовим розділом не є універсальним. Різні країни часто мають різноманітні класифікаційні критерії. Наприклад, для Франції великимасштабними вважаються карти в інтервалі від 1:10 000 до 1:25 000, а дрібномасштабними — від 1: 100 000 до 1: 500 000.

За просторового охоплення як найбільшого підрозділу виділяють карти Сонячної системи та зоряного неба, потім — карти планет, у тому числі карти Землі. Далі йдуть карти найбільших планетарних структур. Для Землі — це карти материків і океанів, а після цього можливі різні розгалуження класифікації.

Класифікація карт за змістом. У цій класифікації виділяють три великі групи: загальногеографічні карти, тематичні карти, спеціальні карти.

Загальногеографічні карти відображають сукупність елементів місцевості, мають універсальне багатоцільове застосування при вивченні території, орієнтуванні на ній, вирішенні науково-практичних завдань. На загальногеографічних картах зображені усі об'єкти, видимі на місцевості, і всім елементам приділяється майже рівна увага. Подальша ієрархічна класифікація загальногеографічних карт збігається з їх розподілом за масштабом.

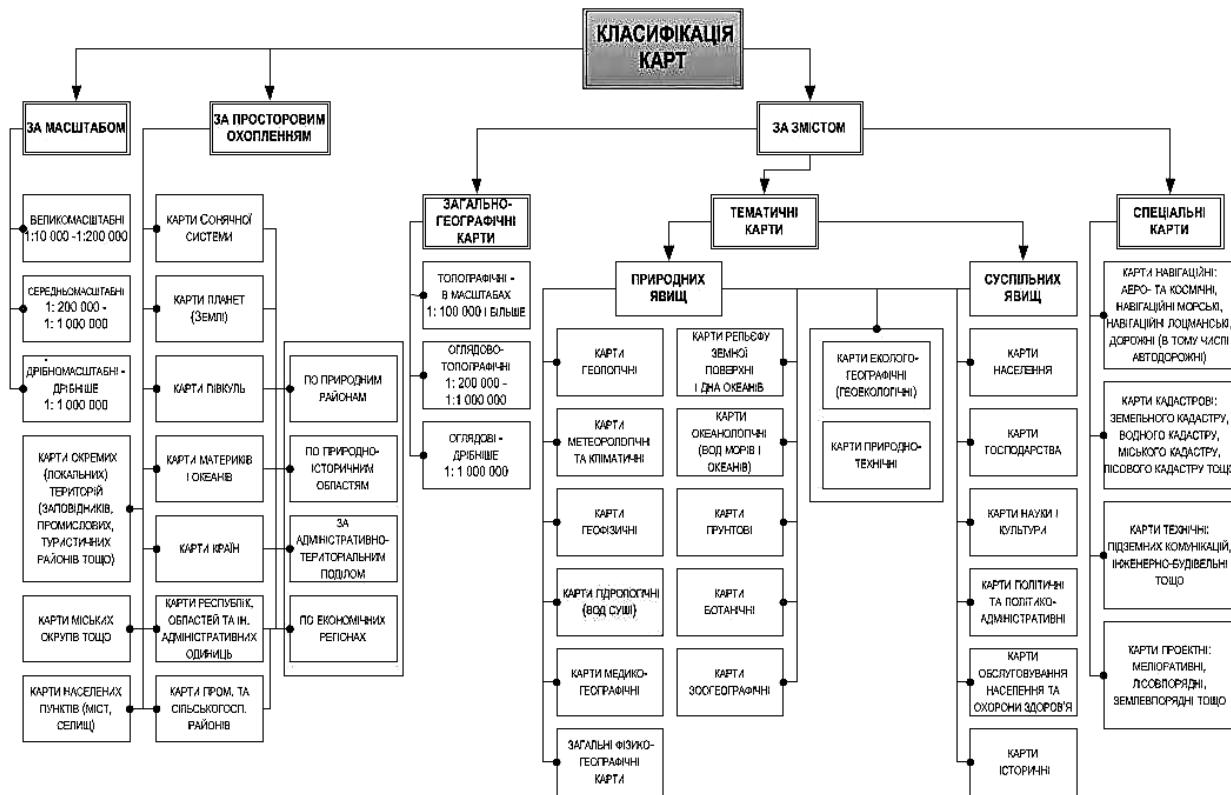


Рис. 1. Загальна класифікація географічних карт

Тематичні карти — найбільш велика та різноманітна категорія карт природних та суспільних (соціальних та економічних) явищ, їх поєднань та комплексів. Зміст карт визначається тією чи іншою конкретною темою.

Група карт природи охоплює карти літосфери, гідросфери, атмосфери, педосфери та біосфери.

Карти суспільних явищ охоплюють соціосферу та техносферу. Їх тематика відрізняється великою різноманітністю: населення, економіка та господарство, наука, освіта та культура, обслуговування та охорона здоров'я, громадські рухи, релігія та політика, археологія та історія розвитку суспільства та багато іншого. Ця група карт постійно розширяється за рахунок все нових і нових тем, які характеризують суспільство з усіма прогресивними і негативними аспектами його розвитку.

Особливу складність для класифікації представляють явища, які не можуть бути цілком віднесені до однієї якої-небудь сфери, вони належать відразу до двох або декількох сфер. Найбільш очевидна необхідність виділення особливої природно-суспільної сфери (гіперсфери), що характеризує взаємодію природи, населення і господарства.

Спеціальні карти призначені для вирішення певного кола завдань або розраховані на визначені кола користувачів. Найчастіше це карти технічного призначення.

З огляду на об'єктивні труднощі ця класифікація не відрізняється строгістю. До числа спеціальних можна, наприклад, віднести карти навчальні, агітаційно-просвітницькі, екскурсійні, спортивні та деякі інші. Іноді в основу класифікації кладуть призначення карт. Однак не завжди легко провести межу між картами різного призначення і картами тематичними та загальногеографічними, які завдяки своїй багатофункціональноті можуть використовуватися в якості навчальних або, скажімо, екскурсійних. Особливу групу складають спеціальні тактильні (дотикові) карти для людей з вадами зору.

Аналіз різновидів гідрологічних карт і карт водного господарства

Гідрологія як наука вивчає гідросферу, її властивості, процеси та явища, що відбуваються в ній у взаємозв'язку із атмосферою, літосфорою та біосферою. Сучасна гідрологія об'єднує в собі окремі науки про складові частини гідросфери (рис. 2).

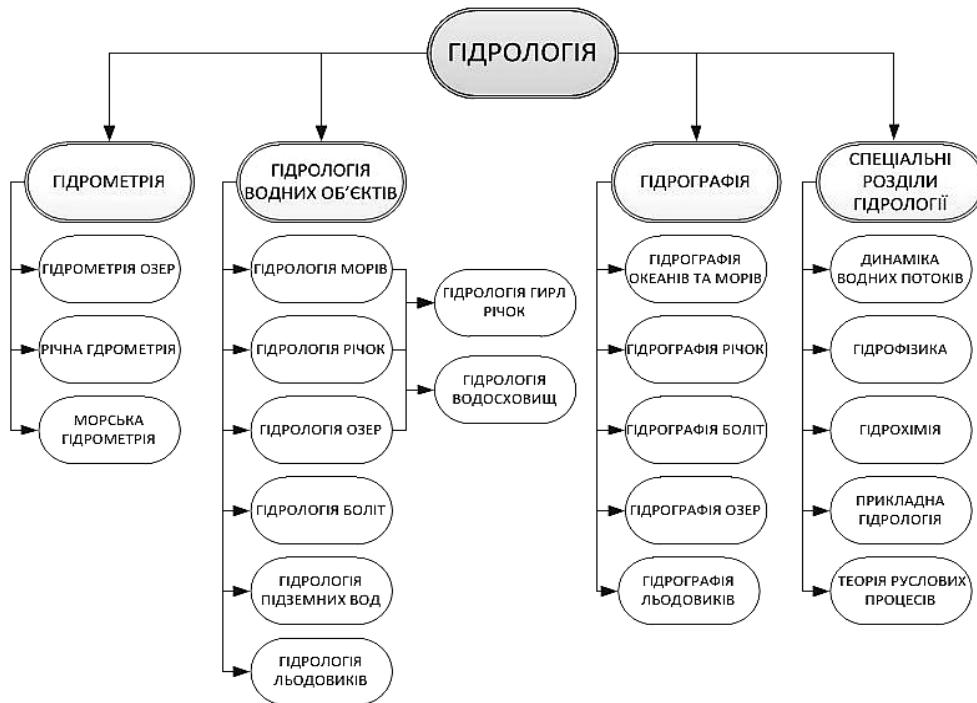


Рис. 2. Складові частини гідрології

Гідрологія водних об'єктів вивчає розподіл та кругообіг води на земній кулі, окрім частини гідросфери, взаємозв'язок між ними, найбільш загальні закономірності гідрологічних процесів і явищ, що в них відбуваються у взаємодії з атмосферою, літосферою і біосферою та під впливом господарської діяльності. Гідрографія вивчає й описує конкретні водні об'єкти, а також установлює закономірності географічного розподілу вод на земній кулі, особливості їхнього режиму та господарського значення.

Вода, як будь-яке природне тіло, має ряд фізичних властивостей. Пізнання та розуміння суті процес-

ів, які відбуваються в гідросфері та окремих її частинах, неможливе без знання властивостей води. Вони вивчаються окремими науковими дисциплінами. Однією з характерних властивостей води є її рухомість. Вивченням законів руху і рівноваги рідин, зокрема води, та їхньої взаємодії з твердими тілами займається гідромеханіка та її прикладний розділ гідрравліка. Фізичні властивості води як речовини і процеси, що відбуваються у водній масі, вивчає гідрофізика, а хімічний склад та процеси – гідрохімія.

Гідрологія, вивчаючи води гідросфери, тісно пов'язана з іншими науками, які досліджують геог-

рафічну оболонку та діяльність води на Землі. Серед них найближче до гідрології знаходиться метеорологія та кліматологія, геологія, геоморфологія, фізична географія, картографія та інші науки.

У сучасній гідрології застосовуються різноманітні методи досліджень елементів гідрологічного режиму водних об'єктів. Основними серед них є методи польових досліджень: експериментальні, нетрадиційні дистанційні та польові (рис. 3).

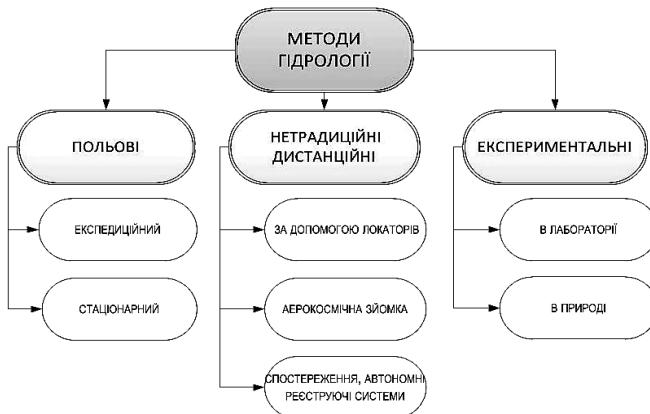


Рис. 3. Методи отримання гідрологічних даних

Найважливіше місце в гідрології займають методи польових досліджень. Польові дослідження поділяють на експедиційні та стаціонарні. Перші з них полягають у проведенні відносно короткочасних (від декількох днів до декількох років) експедицій на водних об'єктах. Другі полягають у проведенні тривалих (зазвичай багаторічних) спостережень в окремих місцях водних об'єктів — на спеціальних гідрологічних станціях та постах. Традиційно при гідрологічних дослідженнях експедиційний та стаціонарний методи поєднують.

Останнім часом стали широко застосовуватися так звані нетрадиційні дистанційні методи спостереження і вимірювання за допомогою різноманітних локаторів, аерокосмічної зйомки та спостереження, автономних систем реєстрації геоданих (автоматичні гідрологічні пости на річках, буйкові станції в океанах тощо). За допомогою радіолокаторів ведуть спостереження за дощовими хмарами, що вже зараз дозволяє деякою мірою прогнозувати атмосферні опади і викликані ними дощові паводки. Потужні можливості у напрямку нетрадиційних дистанційних методів спостереження надає використання авіації та космічних апаратів для спостережень за станом водних об'єктів.

Широко використовуються в гідрології методи експериментальних досліджень. Розрізняють експерименти в лабораторії та експерименти в природі. У першому випадку на спеціальних лабораторних установках проводять експерименти в умовах, повністю контролюваних експериментатором. Так, в лабораторіях вивчають різні режими руху води і наносів, розмиви річкового русла, гідрохімічні процеси тощо.

Завершальним етапом будь-яких гідрологічних досліджень є обробка зібраних даних, для цього існує безліч методів. Теоретичні методи в гідрології

базуються, з одного боку, на законах фізики, а з іншого — на географічних закономірностях просторово-часових змін гідрологічних характеристик. Серед цих методів останнім часом на перший план виходять методи математичного моделювання, системного аналізу, гідролого-географічних узагальнень, включаючи гідрологічне районування та картографування, а також геоінформаційні методи (рис. 4).



Рис. 4. Методи обробки гідрологічних даних

Гідрологічні карти відображають розподіл вод на земній поверхні, який характеризує режим водних об'єктів і дозволяє оцінити водні ресурси окремих частин суші. До гідрологічних карт належать карти річкової мережі, її густоти та кількості озер, карти стоку, карти складових водного балансу, карти джерел живлення, льодового режиму, каламутності води в річках, мінералізації та хімічного складу природних вод, коефіцієнта стоку, гідрологічного районування, використання та перспектив використання водних ресурсів, а також певних характерних явищ: пересихання та перемерзання, повеней, випаровування з поверхні суші та водної поверхні тощо (рис. 5).

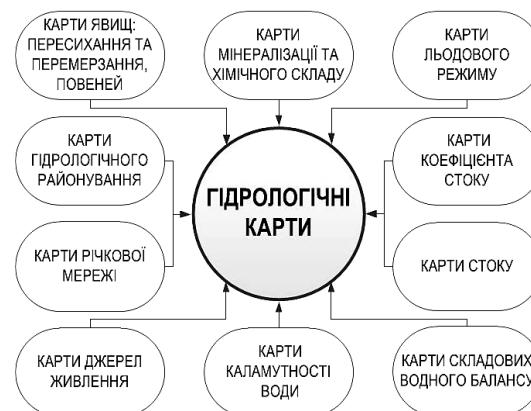


Рис. 5. Класифікація гідрологічних карт

Картографія водного господарства. Водне господарство — це область діяльності, яка має забезпечувати управління раціональним використанням водних ресурсів з метою задоволення потреб населення і національної економіки у водопостачанні, займатися попередженням та ліквідацією катастрофічних техногенних і природних ситуацій, а також охороною водних ресурсів від забруднення, засмічення і виснаження.

Карти водного господарства показують потреби у водних ресурсах населення, промисловості та сільського господарства, річкового судноплавства та рибного господарства, водопостачання та водоспоживання для потреб гідроенергетики і транспорту, а

також потреби у захисті населених пунктів та об'єктів економіки від повеней та інших видів шкідливо-го впливу вод. Основні завдання картографування водного господарства такі:

- 1) зображення водних об'єктів як джерела питного водопостачання;
- 2) відображення водокористування і водоспоживання для потреб населення;
- 3) зображення збалансованої соціально-екологічної та еколого-економічної систем басейнів річок, що передбачає детальний розгляд проблеми використання води;

4) зображення екологічного чинника водогосподарської діяльності та антропогенного навантаження на басейни річок.

До теперішнього моменту можна умовно виділити чотири групи карт, що так чи інакше стосуються теми водного господарства (рис. 6).

Властивостями картографування водних ресурсів мають бути глибоке розкриття їх природної специфіки та надання користувачеві можливості оперативного і досконалого вивчення специфіки використання води населенням, промисловістю, сільським господарством.

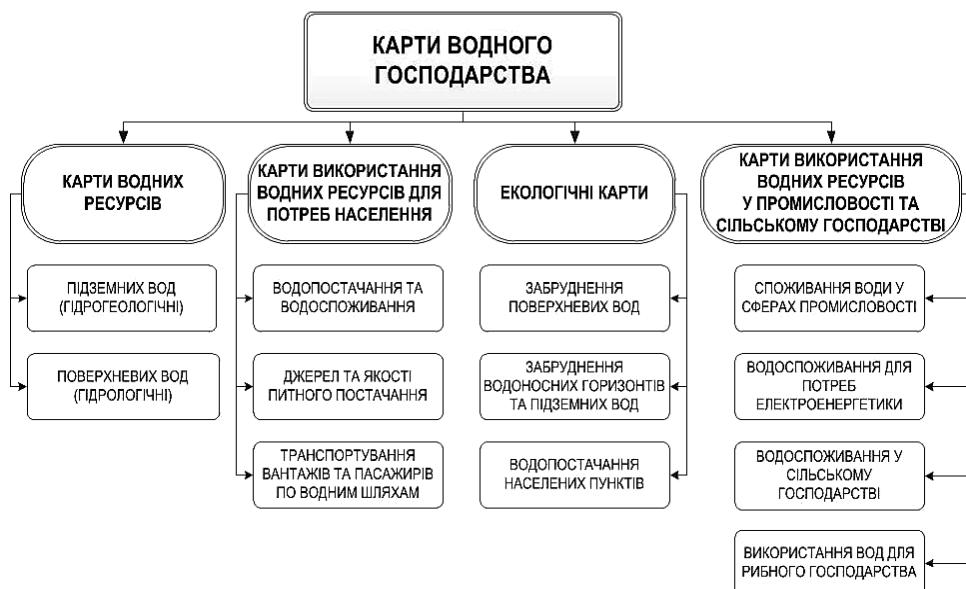


Рис. 6. Класифікація карт водного господарства

Отже, карти прісноводних ресурсів характеризують як основу для водогосподарської діяльності стан річок, озер, водосховищ, каналів, підземних вод тощо.

Природний аспект водних ресурсів розкривається на картах середньорічного стоку, максимального елементарного модуля стоку 1% забезпеченості, районування територій по співвідношенню сезонного стоку та ін.

Гідрографічні карти характеризують приналежність річок басейнів, наявність гідрологічних постів, дають загальну характеристику водних ресурсів регіону. Додатково включаються карти якісної характеристики поверхневих вод (каламутності, хімізму, мінералізації та хімічного складу вод), а також деяких небезпечних явищ, пов'язаних із водою, – селів, лавин, а так само наявності мінеральних або термальних вод та їх практичного використання.

Комплексні гідрогеологічні карти містять інформацію щодо запасів підземних вод, придатних для питного водопостачання, їх експлуатаційних та хімічних особливостей. Група карт «Підземні води» відображає поширення водоносних горизонтів та комплексів, умови їх залягання, кількість та якість підземних вод.

Господарський аспект картографування вод. Господарський аспект картографування передбачає створення карт соціально-економічної спрямованос-

ті. Як правило, це карти водопостачання населення, що характеризують типи водопостачання території регіону (водопровідне, криничне тощо).

Джерелами для складання таких карт служать статистичні дослідження, прив'язані до адміністративних одиниць. Звичайний спосіб для відображення водопостачання населення або технічної оснащеності території — це картограма.

В рамках промислово-економічного спрямування картографується зв'язок водного господарства з промисловістю та сільським господарством. Такі карти показують, перш за все, споживання води відповідними сферами.

Свій внесок в характеристику водного господарства здійснюють також карти, що характеризують гідроенергетичний потенціал районів та економічні зв'язки, які здійснюються за водними шляхами. Одним з головних споживачів води в сільському господарстві є зрошуване землеробство. Карти водоспоживання на зрошення мають показувати залежність від трьох чинників: площа поливу, його техніки, складу культур.

Карти рибальства та рибних промислів зазвичай поміщають в розділ «Промисловість» атласів тих регіонів, де рибні ресурси відіграють значущу роль в економіці та є основою збереження життєвого укладу корінних нечисленних народів. Особливості використання води населенням відображаються

на картах територіальної організації водоспоживання та на картах водопостачання, де показується як тип водопостачання, так і обсяг споживаної води по населеним пунктам.

Транспортування вантажів і пасажирів водним транспортом також важливий фактор водного господарства регіону. Даний вид транспорту розвинений практично повсюдно та базується на природних водних артеріях. Він широко використовується та не вимагає дорогої будівництва трас, що є істотним чинником в малоосвоєніх та гірських районах, де будівництво доріг становить серйозну проблему. Для характеристики водного транспорту зазвичай показують річки, що використовуються в якості транспортних магістралей, вантажо- та пасажиропотоки, перевезення водними шляхами вантажів провідної галузі промисловості або особливо важливих вантажів, частку водного транспорту у всій транспортній мережі. Найпоширенішим способом для відображення будь-яких перевезень є знаки руху.

В цілому, набір карт, що характеризують водне господарство, залежить, перш за все, від специфіки використання вод в конкретному регіоні.

Екологічні карти вод. Водокористування має найважливіше значення при переході країни до стального розвитку, що забезпечує збалансоване вирішення соціально-економічних завдань і проблем збереження навколошнього середовища та природних ресурсів. Такі карти фіксують не тільки фактичний стан вод, а й мають можливості для моделювання виникнення несприятливих гідро-екологічних ситуацій, відображати реальну якість питної води.

Серед карт, присвячених екології вод, можуть бути карти забруднення водних об'єктів, охорони вод, іригації і меліорації, останні дві категорії особливо важливі для посушливих або, навпаки, обводнених територій. До карт екологічного змісту можуть бути віднесені й ті, що відображають структуру існуючого моніторингу геологічного середовища і поверхневих вод.

Карти антропогенних навантажень на геологічне середовище і поверхневі води показують об'єкти (промислові підприємства та ін.), які здійснюють скид стічних вод у поверхневі та підземні джерела. На цих же картах можна показати витрати виробництва на очистку вод, якість очищення, обсяг зливних потоків. Карти забруднення підземних вод певних водоносних горизонтів відображають ступінь забрудненості в конкретних точках обстеження, при цьому, як правило, визначальним є показник відношення ступеня забрудненості до гранично допустимої концентрації (ГДК). Синтетичними є карти, що відображають ступінь захищеності ґрунтових вод або основних експлуатованих водоносних горизонтів від різного роду забруднень. Вони складаються шляхом бальних оцінок декількох основних ранжируваних факторів. Число регіонів, де водопостачання стас кризову проблемою, постійно збільшується. Для районів та міст обласного підпорядкування цих територій розраховуються такі показники:

- 1) число джерел питного водопостачання (централізованого та децентралізованого) на тис. осіб;

- 2) число джерел питного водопостачання на тис. км²;

- 3) співвідношення числа джерел централізованого та децентралізованого водопостачання;

Для відображення первого та другого показників використовується спосіб картограм із застосуванням кольору або штрихування. Співвідношення числа джерел централізованого та децентралізованого водопостачання, будучи абсолютним показником, подається способом картодіаграм. Ці показники можуть бути використані для оцінки навантаження на джерела водопостачання, а при забрудненні вод — опосередковано охарактеризувати ймовірність спалахів захворювань.

Медико-соціальні карти можуть доповнити розділ «Водне господарство», розкриваючи вплив екологічної обстановки на людину. Тут доречні карти захворювань, пов'язаних із якістю води та вмістом в ній мікроорганізмів. Такі карти також можуть показувати шляхи можливого поширення епідемій.

Інженерно-технічний напрям передбачає комплексне картографування інженерно-технічних споруд системи питного водопостачання (системи очищення води, водопроводи та ін.) з оцінкою їх стану та експлуатаційних можливостей.

Серед основних особливостей побудови гідрологічних карт та карт водного господарства можна зазначити такі:

- 1) застосування для побудови гідрологічних карт даних ДЗЗ у різних спектральних діапазонах (видимий та близький інфрачервоний, радіохвильовий);

- 2) обробка великих масивів даних та необхідність створення і ведення хронологічної бази даних;

- 3) урахування динаміки зміни водних об'єктів на помітно великому проміжку часу (20-50 років);

- 4) необхідність проведення великої кількості польових робіт, що збільшує трудомісткість досліджень;

- 5) необхідність використання даних у режимі реального часу, швидку обробку та відображення даних для можливості контролю і прогнозування;

- 6) співпраця зі спеціалістами з гідрології, екології та інших сфер діяльності;

- 7) залежність від пори року;

- 8) складність топологічних відношень при створенні карт;

- 9) робота з лінійними геометричними об'єктами;

- 10) складність генералізації та масштабування картографічних об'єктів гідрології;

- 11) обмеження в стилістичному оформленні.

Аналіз існуючих досліджень використання ГІС-технологій у гідрології та розробці гідрологічних карт

Щорічно проводяться міжнародні наукові конференції, присвячені дослідженням гідрологічних об'єктів та вивченням нових методів їх досліджень. Відповідні публікації містять узагальнену інформацію про останні досягнення в цій галузі. У якості прикладів конференцій, пов'язаних з гідрологією, доречно навести такі, як: Міжнародна конференція з гідрології та метеорології, Конференція по гідроло-

гії, океану і атмосфери (HOAC), NGWA Groundwater Expo, Міжнародна конференція з управління річковими басейнами, включаючи всі аспекти гідрології, екології, природокористування, заплав та водно-болотних угідь, Конгрес Міжнародного комітету з іригації та дренажу (МКІД), Конгрес МАГ — Підземні води: виклики та стратегії. На таких конференціях представляються існуючі та нові дослідження щодо використання ГІС та ДЗЗ в гідрологічних розрахунках, в оцінці водних ресурсів і прогнозуванні небезпечних гідрологічних явищ. ГІС-технології використовуються практично для вирішення всіх завдань гідрології. Існує безліч прикладів успішного застосування ГІС для прогнозування та моделювання сценаріїв паводків та повеней. Створювані при цьому цифрові карти відображають потенційні площини затоплень і служать основою для проектування та будівництва захисних споруд.

Багато сучасних актуальних наукових робіт присвячено використанню цифрових моделей висот для вивчення морфології водозбірних басейнів і оцінки зсуvinої небезпеки.

Приклади дослідницьких досягнень України щодо використання ГІС-технологій у розробці гідрологічних карт.

1. Картографічні моделі, створені на основі звіту про науково-дослідну роботу «Проведення просторового аналізу змін водного режиму басейнів поверхневих водних об'єктів на території України внаслідок зміни клімату» (2013 рік). За мету дослідження малається оцінка зміни водного режиму в басейнах головних річок України на основі аналізу багаторічної динаміки середньорічного стоку води, а також прогнозне моделювання середньорічного

стоку води за даними регіональних кліматичних моделей на основі сценаріїв зміни кліматичних умов в Україні до 2050 р. (рис. 7, 8).

2. Картографічні моделі, представлені у науковій доповіді «Ресурси та якість поверхневих вод України в умовах антропогенного навантаження та кліматичних змін» (2017 рік). На основі розробленої концепції системних гідрохімічних досліджень виконано оцінку впливу природних і антропогенних чинників на формування хімічного складу та якість поверхневих вод України. Відзначено вплив кліматичної складової на зміни умов формування водного стоку річок України (рис. 9 – 10).

3. Картографічні моделі створені на основі досліджень всеукраїнської екологічної ліги, громадської організації, що заснована 12 грудня 1997 року.

Можна наводити незчисленну кількість прикладів наукових результатів, що свідчать про невичерпний інтерес науковців нашої країни до стану і перспектив розвитку прісноводних гідроресурсів, адже вони є запорукою економічної стабільності та державної безпеки України.

Аналіз параметрів та стану річки Дніпро як прикладу предметного дослідження

У якості прикладу щодо розроблення та реалізації запропонованої в даній роботі методики побудови гідрологічних картографічних моделей за даними ДЗЗ обрано басейн річки Дніпро – найбільшої водної артерії України, третьої за величиною річки Європи (після Волги та Дунаю). Загальна довжина Дніпра становить 2201 км, у межах України – 981 км. В Україні басейн Дніпра займає 48,6% усієї її території.

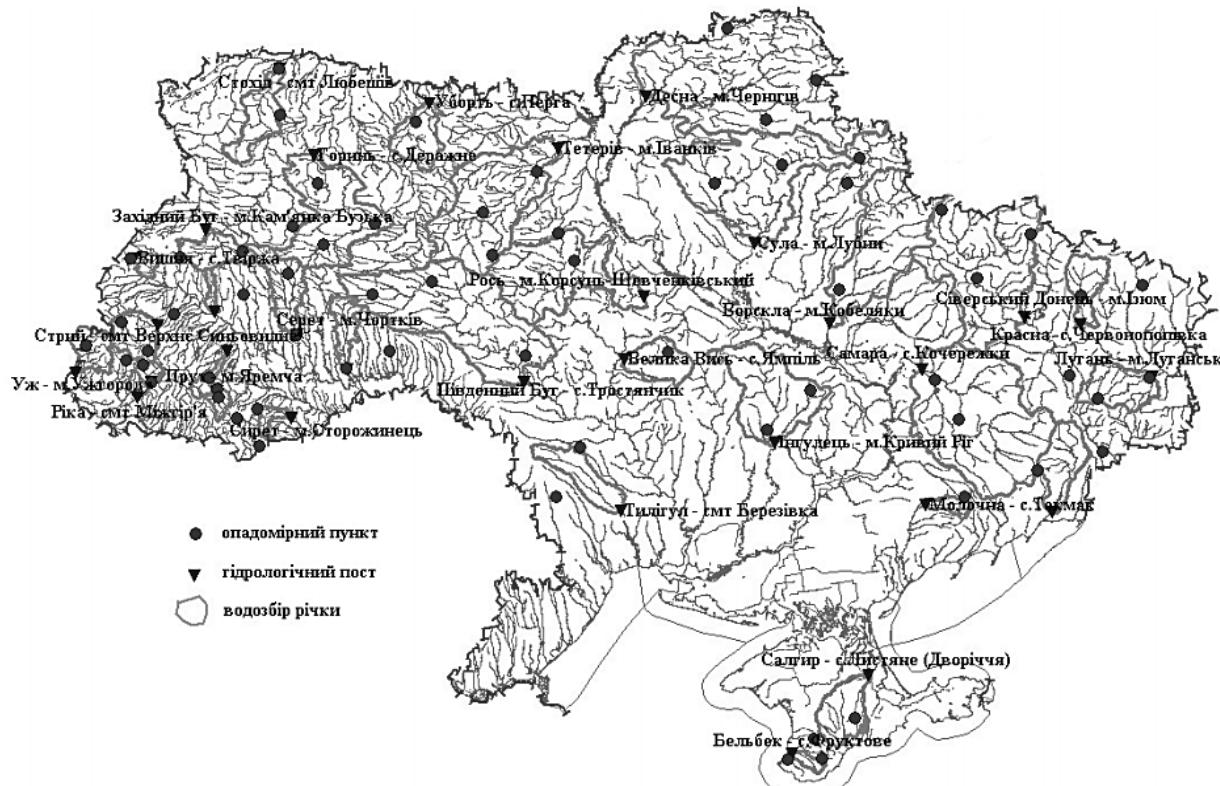


Рис. 7. Карта водозбірних басейнів річок України

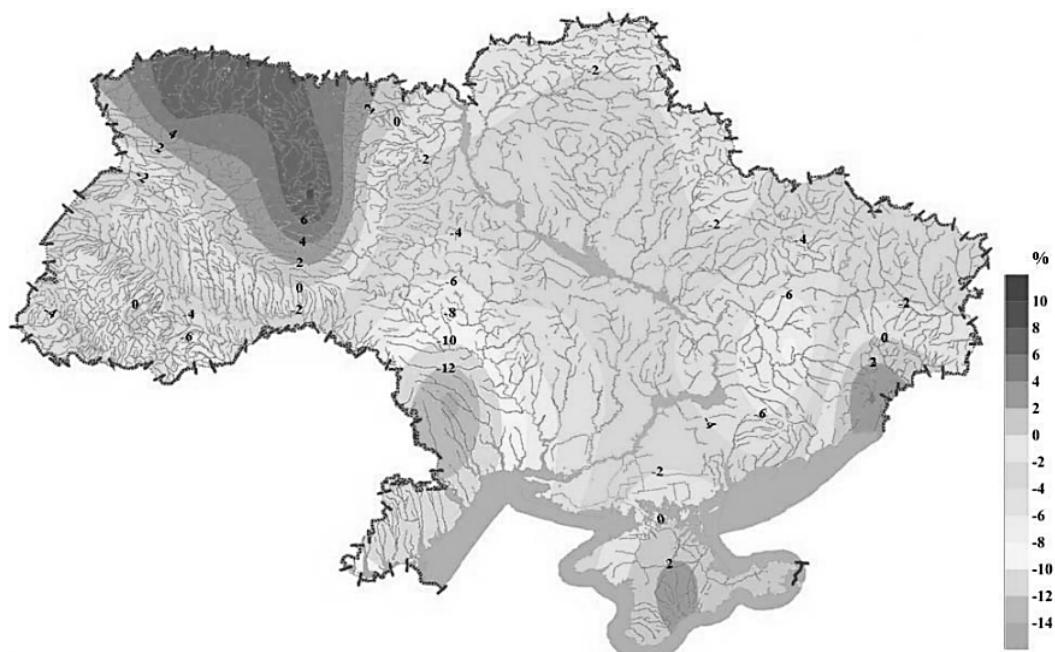


Рис. 8. Карта середньорічного стоку води річок України

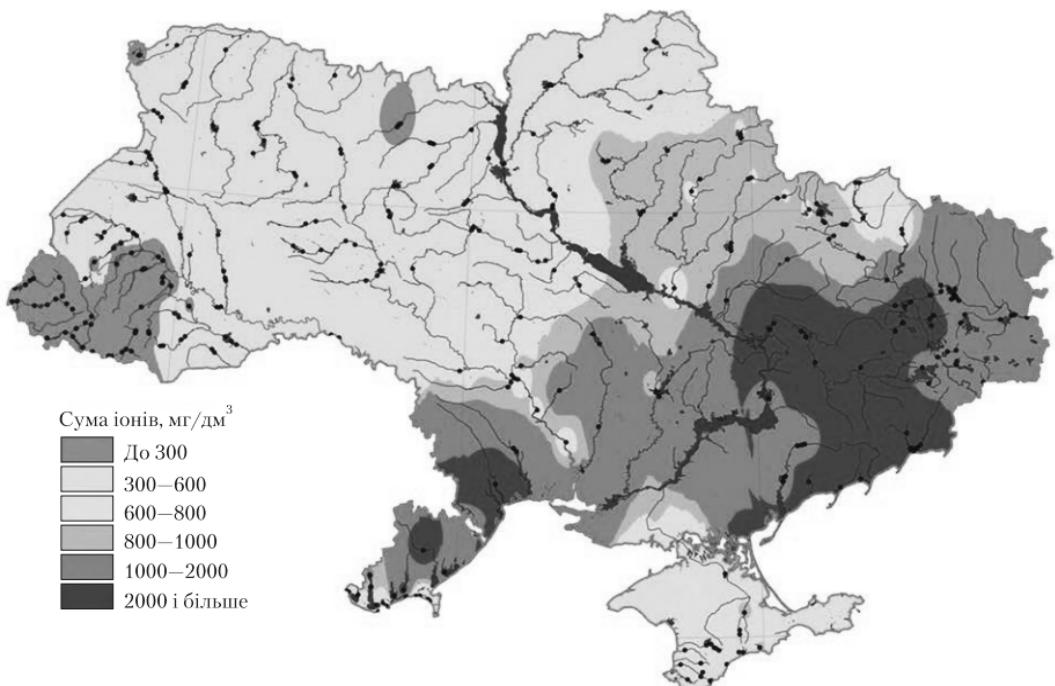


Рис. 9. Карта мінералізації поверхневих вод України

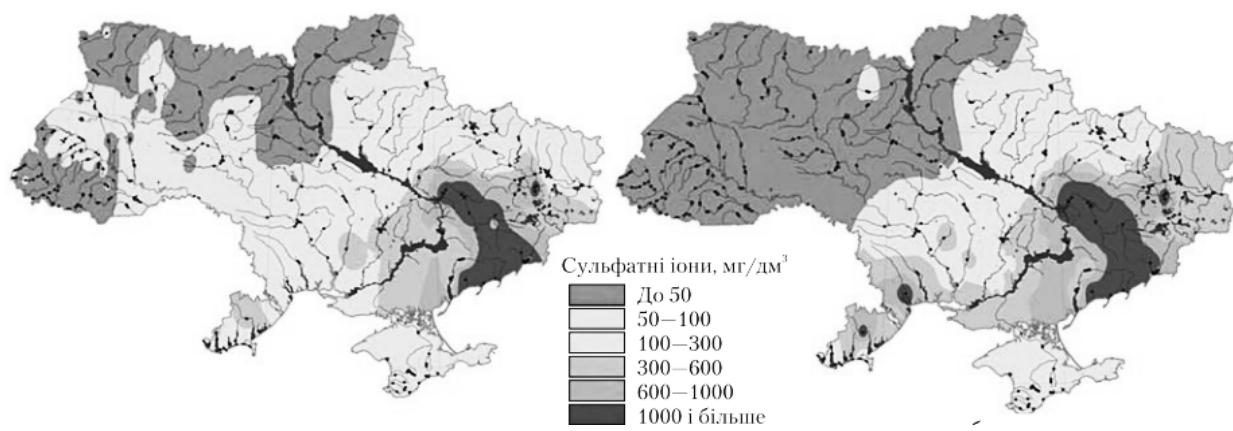


Рис. 10. Карти вмісту сульфатних іонів у поверхневих водах України

Дніпро бере початок на північному заході Росії – на Валдайській височині, де витікає невеликим струмком з болотного масиву Аксенінський Мох. Поповнюючись численними притоками, впадає в Дніпровський лиман — витягнуту зі сходу на захід (на 58 км) затоку північної частини Чорного моря. В Україні на басейн Дніпра припадає 27% місцевих річок. Дніпро — головний постачальник води в Україні. Водними ресурсами Дніпра користуються близько 30 млн. жителів України (дві третини від загальної кількості населення). На Дніпрі працює близько 10 тис. промислових підприємств України, він зрошує майже 1,5 млн. гектарів сільськогосподарських угідь. На березі Дніпра лежить багато великих міст України — столиця держави Київ, Черкаси, Кременчук, Дніпродзержинськ, Дніпро, Запоріжжя, Нікополь, Херсон. Дніпро є найбільшою судноплавною річкою України. Від кордону з Білоруссю Дніпро тече у південному, а далі в південно-східному напрямі. Між містами Дніпро та Запоріжжя річка перетинає Український щит та змінює свій напрям на південно-західний. До спорудження Дніпрогесу в 1932 році тут були Дніпровські пороги — Козацький, Сурський, Лоханський, Дзвонецький, Ненаситець, Вовнишський, Будило, Лишній та Вільний. Дніпро приймає більш як 1000 приток. Довжина лише 90 з них перевищує 100 км. Найбільшими притоками Дніпра є Прип'ять, Рось, Базовлук, Інгулець, Десна, Трубіж, Ворскла, Оріль, Самара. Основний стік Дніпра формується у більш зволожених північних районах. У багатьох місцях своєї нижньої частини, де випадає значно менше опадів, Дніпро практично не має приток. Майже 60-80% стоку припадає на весняний період. Влітку та взимку Дніпро характеризується низькою меженню, замерзає з грудня до першої-другої декади березня. У верхній течії Дніпро живиться сніговими (50%), дощовими (20%) та підземними водами, у нижній — в основному сніговими (80-90%). Ширина Дніпра у верхній частині на території України (без водойм) — 90-700 м, від Києва до міста Дніпро — 300-1500 м, нижче від Херсона річка Дніпро розділяється на рукави і багатьма гирлами впадає в Дніпровський лиман. Переважна глибина річки — 3-7 м, швидкість течії — 0,4-1,2 м/с. Навігація на Дніпрі триває від 240 діб на півночі до 285 діб на півдні.

Значні рибні ресурси Дніпра у зв'язку з посиленням його забруднення зменшуються, їх якість погіршується. Промислове значення мають лящ, окунь, щука, чехонь, сом, судак, короп, білій амур, товстолобик. Зменшується і так незначне промислове виловлювання риби. Найбільше виловлюють товстолобика, ляща, плоскирку.

У донних відкладах дніпровських водосховищ виявлено значні площини з підвищеними рівнями радіації. Причому в міру віддалення від Чорнобиля вміст радіоактивних речовин зменшується, хоча помічено інтенсивне переміщення радіонуклідів з півночі на південь.

Дніпро протікає через господарсько-освоєні та густо заселені райони, через що він забруднений також відходами виробництва та комунального гос-

подарства. Актуальною є проблема забезпечення належного захисту цієї водної артерії. Потребують розв'язання питання підвищення рибопродуктивності Дніпра, кращого очищення використаних вод, зменшення «цвітіння» води, особливо у водосховищах.

Конфігурацію берегів Дніпра за останні десятиліття дуже змінили водосховища. Штучно створені дніпровські водойми — одна з невід'ємних частин його ландшафтів. Отже, Дніпро на великій відстані перетворився з колись швидкоплинної чистої річки на забруднену водойму із застійною водою озерного типу. За часів СРСР відбувалася прискорена трансформація дніпровського регіону з аграрного на промисловий. Грубе втручання у природний стан басейну Дніпра викликало значні екологічні проблеми, з яких першочергового вирішення потребують такі.

1. Зміни гідрологічного режиму поверхневих вод. Ці зміни пов'язані із надмірною зарегулюваністю стоку малих і середніх річок, будівництвом каскаду Дніпровських водосховищ та каналів для перекидання стоку.

2. Хімічне забруднення. Вплив хімічного забруднення антропогенного походження викликаний інтенсивним розвитком промисловості, сільського господарства, урбанізацією та розвитком транспортної мережі в басейні Дніпра.

3. Затоплення та підтоплення територій. Ці явища викликаються замуленням русел річок, руйнуванням заплавних ділянок, вирубкою лісів та меліоративною діяльністю.

4. Забруднення радіонуклідами. Пов'язане, в першу чергу, з наслідками аварії на ЧАЕС.

5. Зміна і втрата екосистем та збіднення біорізноманіття. У басейні Дніпра втрачено не менше 80% природних екосистем.

Без нинішнього зарегулювання Дніпра було б значно ускладнено забезпечення водою великої кількості господарських об'єктів та промислових підприємств. Завдяки великим каналам (Північно-Кримському, Каховському, Дніпро-Донбас, Дніпро-Кривий Ріг, Дніпро-Інгулець) вода з дніпровських водосховищ перекидається на значні відстані, в тому числі за межі басейну. Дніпровські водосховища є важливими рибно-господарськими об'єктами, в яких щорічно виловлюється до 10 тис. тонн риби. Береги водосховищ і приток Дніпра служать вирішенню задач рекреації і туризму.

Постановка задачі дослідження

Отже, із зазначеного вище виникає актуальна задача безперервного екологічного моніторингу за діяльністю збереження прісноводних ресурсів України, що піддаються таким згубним факторам, як загальна урbanізація, промислова та сільськогосподарська діяльність, витоки хімічних речовин, теплове забруднення, атмосферне забруднення тощо. Крім того, через низький пріоритет екологічного контролю в Україні щороку в поверхневі води скидаються великі об'єми недостатньо очищених вод. Зазначена проблема вже стає питанням національної безпеки щодо стратегічних запасів прісної води України.

Звідси об'єктом дослідження має бути процес безперервного забезпечення природозахисних закладів держави тематичними гідрологічними картами, що постійно актуалізуються і відображають поточний стан прісноводних природних ресурсів. Відповідно, предметом дослідження є розроблення методики побудови гідрологічних картографічних моделей за даними ДЗЗ. Метою роботи є підвищення інформативності, оперативності та достовірності статистичного і прогнозного аналізу геоданих ДЗЗ про стан прісноводних природних ресурсів за рахунок безперервної актуалізації їх картографічних моделей. Етапи досягнення поставленої мети і розроблення методики побудови гідрологічних картографічних моделей за даними ДЗЗ відображені на рис. 11. У якості програмного забезпечення для виконання поставлених завдань використовувався програмний пакет геоінформаційної системи ArcGIS 10.5 компанії ESRI (США).

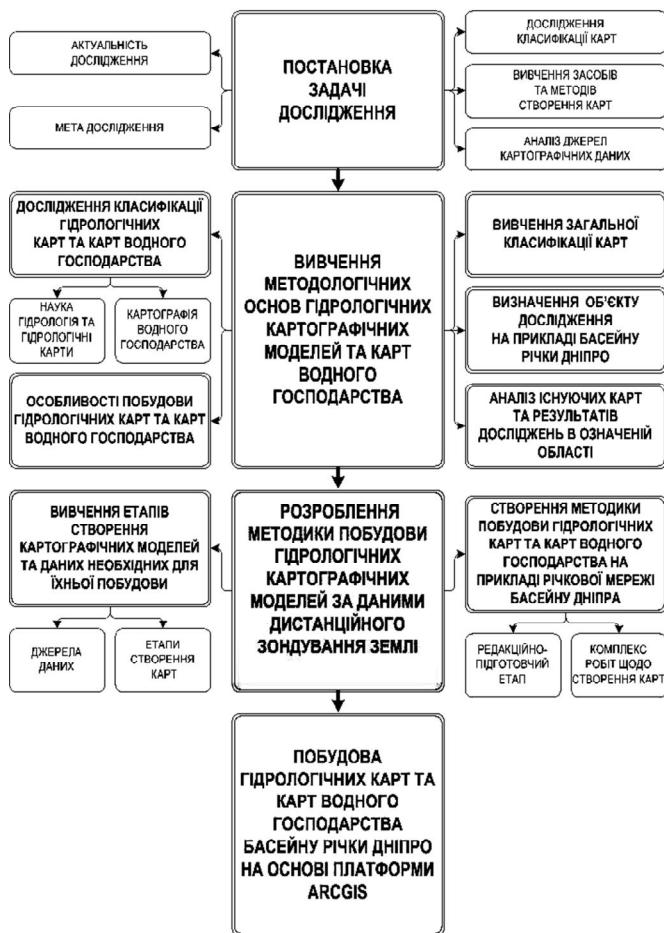


Рис. 11. Схема етапів розроблення і застосування методики побудови гідрологічних картографічних моделей за даними ДЗЗ

Методологічні основи розроблення методики побудови картографічних моделей за даними ДЗЗ

Джерела даних для побудови картографічних моделей. Отримання даних, необхідних для створення карт, передбачає використання багатьох джерел інформації та різноманітних документів, за якими, власне, й виконується складання карт (рис. 12).



Рис. 12. Джерела отримання даних для створення карти

Розрізняють джерела сучасні, які відображають нинішній стан об'єкта, що картографується, і старі, що показують минулий стан об'єкта або ранні стадії його вивченості.

Крім того, джерела, залучені для картографування, підрозділяють на первинні, отримані в ході прямих вимірювань і спостережень, і вторинні, що є результатом обробки і перетворення первинних матеріалів.

Астрономо-геодезичні дані. До цього виду джерел відносять результати астрономічних спостережень, дані систем супутникового позиціонування, гравіметричних вимірювань, тріангуляції та трилатерації, полігонометрії, нівелювання на місцевості. Вони необхідні, перш за все, для створення координатної (планової та висотної) основи карт, тобто мережі пунктів, для яких визначені планове положення і висота щодо рівня моря, а також для обчислення фігури Землі і розрахунку параметрів земного еліпсоїда. При створенні гідрологічних карт та карт водного господарства переважно застосовують описи водних мереж, які проходять через населені пункти, описи штучно створених водойм, а також водних об'єктів, розташованих в зонах рекреації.

Картографічні джерела. Загальногеографічні карти використовують як джерела при складанні будь-яких тематичних карт. Вони служать основою для нанесення тематичного змісту. Топографічні, оглядово-топографічні та оглядові карти — це надійні і достовірні джерела, які створюють за державними інструкціями, в стандартній системі умовних знаків з певними, строго фіксованими вимогами до точності.

Значення загальногеографічних карт не обмежується використанням їх для прив'язки тематичного змісту. Вони забезпечують географічну достовірність картографування, граючи роль основи, тобто того каркаса, відносно якого проводиться нанесення і подальша ув'язка накопичуваного тематичного змісту карти, а також взаємне узгодження карт різної тематики.

Особливий вид джерел — кадастрові карти і плани. Вони з документальною точністю відобра-

жають розміщення, якісні та кількісні характеристики явищ та природних ресурсів, дають їх економічну або соціально-економічну оцінки, містять рекомендації щодо раціонального використання та охорони.

Матеріали дистанційного зондування. Матеріали дистанційного зондування отримують в результаті неконтактної зйомки з літальних повітряних і космічних апаратів, судів і підводних човнів, наземних фототеодолітних станцій. Найбільш широко застосовуються в картографії матеріали аерокосмічного зондування, особливо космічної зйомки, яка, будучи більш економічною, по детальності тепер наближається до аерозйомки. Матеріали аерокосмічного зондування мають важливі переваги перед іншими джерелами для складання карт:

- 1) оглядовість космічних зображень — від глобального охоплення до десятків кілометрів при детальній зйомці забезпечує економічне картографування великих просторів;

- 2) зйомка з космосу однієї й тієї ж території з різним розрізненням та генералізацією дозволяє паралельно створювати та оновлювати карти різних масштабів, позбавляючи від необхідності складати карти дрібніших масштабів по великому масштабу, що неминує подовжувало би процес картографування;

- 3) центральна проекція, в якій будеться зображення, при великий висоті центру проектування близька до ортональної, що спрощує фотограмметричну обробку при створенні карт;

- 4) повторні зйомки із заданою періодичністю забезпечують динамічні картографування та моніторинг швидко мінливих в часі процесів та явищ;

- 5) забезпечення картографування важкодоступних районів — пустель, високогір'я, полярних островів, Антарктиди тощо, до того ж, вирішується проблема зйомки інших планет та їх супутників;

- 6) виразність і наочність космічних знімків зумовили появу нових видів картографічної продукції — фотокарт та супутникових карт біофізичних характеристик земної поверхні;

- 7) комплексне відображення на одному знімку всіх компонентів земних ландшафтів сприяє найбільш правильній передачі просторових взаємозв'язків об'єктів, що картографуються.

Зйомки ведуть в ультрафіолетовому, видимому та близькому інфрачервоному (ІЧ), середньому ІЧ, тепловому ІЧ, а також радіохвильовому діапазонах спектру. Зйомка у видимому та близькому ІЧ діапазонах реєструє сонячне випромінювання, відбиті об'єктами відповідно до їх спектральної відбивної здатності. В тепловому ІЧ діапазоні реєструється власне випромінювання Землі та температурні характеристики об'єктів. Зйомка в цьому діапазоні не залежить від освітлення, може виконуватися вночі, але хмарність все ж таки є перешкодою. Спектральна яскравість води падає зі зростанням довжини хвилі сонячного випромінювання. Промені близької ІЧ ділянки спектра майже повністю поглинаються водою (до 80%), що дає можливість бачити на знімках тільки кордони водойми. Щодо глибини водоймища та об'єктів під водою можна отримати у видимій ділянці спектра від 0,4 до 0,7 мкм (рис. 13).

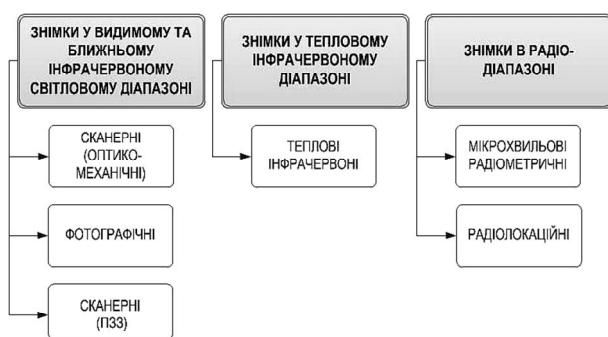


Рис. 13. Діапазони та засоби отримання знімків дистанційного зондування

Натурні спостереження і вимірювання. Ці дані — найважливіший фактичний матеріал для складання будь-яких тематичних карт. Ніякі непрямі та дистанційні методи не можуть замінити безпосередні спостереження. Більш того, без них неможливе використання теоретичних закономірностей, інтерпретація непрямих спостережень, дешифрування аеро- і космічних знімків.

Форма подання натурних спостережень різна. При гідрографічних спостереженнях — це результати вимірювань, які заносять у журнали і таблиці, при фізико-географічних дослідженнях — описи, що фіксуються в щоденниках та звітах, фотографії та схеми, при геологічно-геоморфологічних дослідженнях — профілі, розрізи, дані буріння свердловин, описи шурфів тощо, при геофізичній зйомці — значення спостережених фізичних параметрів.

За локалізацією дані безпосередніх спостережень поділяють на точкові, виконані в окремих пунктах та полігональні, що охоплюють всю досліджувану територію. Особливо виділяють стаціонарні спостереження, наприклад на геофізичних полігонах, біостанціях, в пунктах екологічного моніторингу тощо.

Гідрометеорологічні спостереження. Для багатьох видів картографування широко використовують результати спостережень, проведених на метеорологічних, гідрологічних та океанологічних станціях і постах. Це дані регулярних вимірювань параметрів атмосфери, атмосферних процесів, окремих метеорологічних елементів (температури, тиску, рівня опадів, яскравості сонячного сяйва, швидкості вітру, типу хмарності тощо), гідрологічного режиму річок, озер, водосховищ, фізико-хімічних характеристик морських та океанічних вод та десятків інших показників. При цьому розраховують середні денні, місячні, сезонні та річні значення, а також інші похідні показники по різним висотним рівнями атмосфери і стандартним горизонтам глибин озер, морів і океанів.

Економіко-статистичні дані. При створенні карт і атласів соціально-економічної тематики основними джерелами служать масові дані, що містять кількісні відомості про стан та динаміку виробничих ресурсів, їх використання, розвитку промисловості та сільського господарства, транспорту, енергетики, фінансів та інших галузей народного господарства, населення, освіти, культури, сфери обслуговування тощо. До основних економіко-статистичних джерел

належать матеріали державної статистики і дані, що публікуються міжнародними організаціями.

Текстові джерела. До текстових або літературно-географічних джерел відносяться різного роду географічні (геологічні, історичні та ін.) описи, отримані в ході безпосередніх спостережень або в процесі теоретичних досліджень. Вони, зазвичай, не формалізовані та не мають точної координатної прив'язки, але зате мають образність та оглядовість, необхідні для створення уявлення про об'єкти, що картографуються. Звіти експедицій, монографічні праці, статті містять фактичний матеріал та теоретичні положення, необхідні для тлумачення багатьох інших джерел, що застосовуються при картографуванні.

Етапи створення карт. Створення топографічних та тематичних карт складається з основних двох етапів: редакційно-підготовчого етапу та комплексу робіт з виготовлення карти.

Редакційно-підготовчий етап. Редакційно-підготовчий етап — це перший етап, з якого починається створення карти. На ньому відбувається проектування карти, розробка її концепції, складання програми необхідних дій та збір необхідної інформації з джерел даних. Цей етап завершується створенням проекту (програми) карти та створенням тематичної бази даних (БД) (рис. 14).



Рис. 14. Редакційно-підготовчий етап створення карти

Комплекс робіт з виготовлення карт містить три етапи: уведення даних, обробка даних, видання карти. Етап уведення даних являє собою внесення зібраних на редакційно-підготовчому етапі даних за допомогою різних методів та технічних засобів (рис. 15).



Рис. 15. Складові етапу уведення даних

Наступний та найбільший етап комплексу робіт з виготовлення карти — це етап обробки даних, на якому відбувається складання карти, тобто комплекс робіт з виготовлення оригіналу карти. Складання виконують в обраних картографічній проекції, компонуванні та масштабі, прийнятій системі умовних знаків, із заданим рівнем генералізації. Даний етап включає такі елементи, як:

- 1) підготовка та обробка завантажених даних;
- 2) встановлення математичної основи карти;
- 3) етап створення карти;
- 4) розробка змісту карти та легенд;
- 5) складання оригіналу карти з одночасною генералізацією та стилістичним оформленням.

Результатом даного етапу є створена картографічна модель в електронному вигляді (рис. 16).

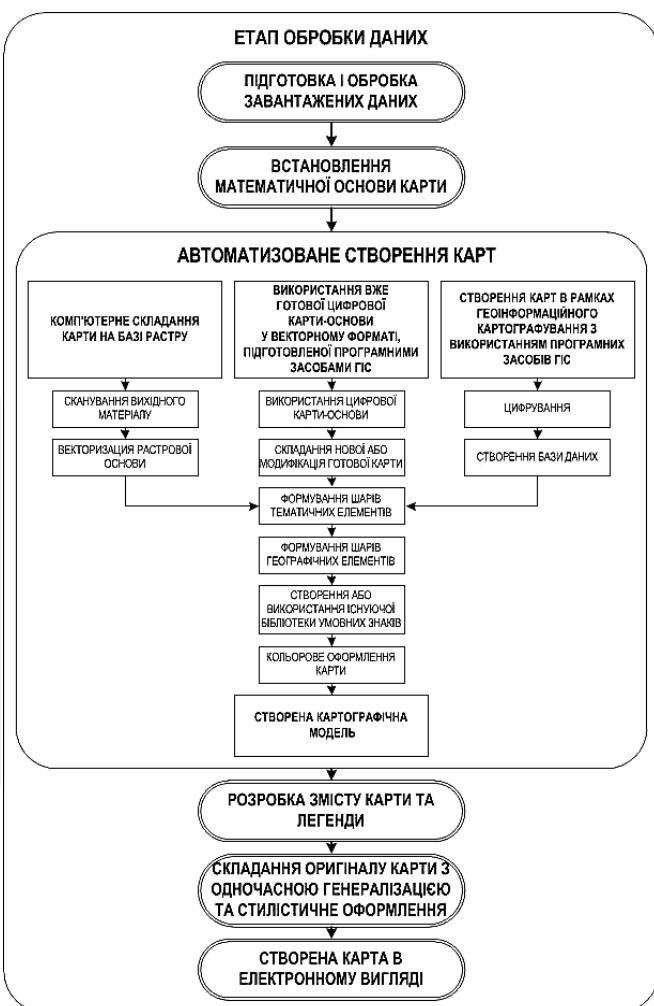


Рис. 16. Складові етапу обробки даних

Завершальним етапом комплексу робіт з виготовлення карти є підготовка до видання та видання карти, розмноження її в друкованій (поліграфічній) або комп'ютерній формі (рис. 17). Іноді підготовку до видання й саме друкування поділяють на два самостійні етапи. Вони охоплюють такі процеси: виготовлення друкованих форм, збереження даних в цифровому вигляді, використання карти для формування інших картографічних моделей (аналітичних, синтетичних).



Рис. 17. Складові етапу видання карти

Розроблення методики побудови гідрологічних картографічних моделей за даними ДЗЗ на прикладі річкової мережі басейну Дніпра

Редакційно-підготовчий етап. Проектування карти. Першим кроком при розробці картографічних моделей є проектування карти. На етапі проектування карти були вивчені характеристики досліджуваної області картографування території водного басейну річки Дніпро, за результатами яких було визначено актуальність та раціональність проведення експериментального дослідження саме цього гідрологічного об'єкта. Також було вивчено вже наявні дослідження по даному об'єкту на сьогоднішній день, за результатами яких було виявлено можливості для уdosконалення, оновлення існуючих даних та вивчення інших напрямків щодо проведення досліджень по даному об'єкту, зокрема:

- 1) можливість створення інтерактивних карт при використанні ГІС;
- 2) формування комплексних картографічних моделей;
- 3) відображення просторових даних, зручне для користувача;
- 4) оновлення існуючих картографічних моделей;
- 5) більш глибокий аналіз з аналізом сторонніх чинників впливу в даній області;
- 6) застосування даних ДЗЗ.

Після аналізу існуючих досліджень були визначені технології для проведення експериментального дослідження. При проведенні такої роботи основна перевага при вивченні характеристик поверхневих вод віддавалась застосуванню даних ДЗЗ, що мають ряд переваг перед іншими методами дослідження:

- 1) об'єктивність — кожен космічний знімок об'єктивно відображає стан місцевості на момент зйомки;
- 2) актуальність та хронологічність — матеріали космічної зйомки можна отримати на різні дати;
- 3) масштабність — сучасна зйомка в оглядових масштабах дозволяє одночасно зняти величезні території з високою деталізацією;
- 4) екстериторіальність — ділянки зйомки ніяк не прив'язані до державних або адміністративних кордонів, а отже для проведення зйомки не потрібні будь-які дозволи;
- 5) висока швидкість отримання даних;
- 6) можливість отримання інформації про об'єкти, практично недоступні для дослідження іншими способами, зокрема, коли об'єкти, що цікавлять, знаходяться у важкодоступних місцях;
- 7) отримання інформації в різних спектральних діапазонах;
- 8) отримання інформації різної розрізнюваної здатності в залежності від розв'язуваної задачі.

Великі можливості дає використання ГІС для аналізу гідрологічної інформації, моніторингу екологічного стану, управління водними ресурсами, проведення системного аналізу, проектування моделей та проведення інших робіт, пов'язаних з гідрологією та водним господарством, де необхідно точно знати часовий та просторовий розподіл різних гідрологічних характеристик на річковому водозборі та мати можливість як оцінки їх стану, так і прогнозу можливих змін. Бази цифрових даних, комп'ютерне обладнання та програмне забезпечення є обов'язковими складовими частинами ГІС. Виходячи з цього, на даному етапі робіт були вивчені інформаційні бази та різні джерела даних, на основі яких були створені бази даних для подальшої побудови картографічних моделей. У даній роботі за результатами збору даних були побудовані такі БД:

- 1) база цифрових географічних даних водних об'єктів у векторному форматі на основі даних SRTM;
- 2) цифрова база гідрологічних даних, отриманих з постів моніторингу поверхневих вод у форматі XLSX;
- 3) база цифрових географічних даних у вигляді DEM-набору параметрів рельєфу за даними SRTM;
- 4) база даних показників використання водних ресурсів України у форматі .XLSX;
- 5) растроївий набор супутникових знімків з топографічними характеристиками і математичною основою у форматі .tiff.

Далі було проведено аналіз програмних продуктів для можливості найбільш раціонального використання. У даній роботі для аналізу, обробки, створення і візуалізації зібраних даних використано програмний комплекс ArcGIS, розроблений компанією ESRI для побудови геоінформаційних систем будь-якого рівня. Одним з головних чинників, який вплинув на вибір саме програмного забезпечення ArcGIS є наявність у ньому додаткового набору інструментів Spatial Analyst і його групи інструментів Hydrology, які являються спеціальними інструментами для безпосередньої роботи, аналізу і обробки гідрологічних даних. Інструменти групи Гідрологія (Hydrology) використовуються для моделювання потоку води по поверхні. Інструменти з групи Гідрологія можуть застосовуватися окремо та використовуватися послідовно для побудови мережі водотоків або виділення вододілів. Дані група включає в себе такі інструменти:

- 1) басейн (Basin) — створює растр, що містить контури всіх складових дренажного басейну;
- 2) заповнення (Fill) — заповнює локальні зниження в растрі поверхні для видалення всіх невеликих помилок і неточностей, притаманних уведеним даним;
- 3) сумарний стік (Flow Accumulation) — створює растр потоку накопичення в кожну клітинку, дозволяє додатково застосувати фактор ваги;
- 4) напрямок стоку (Flow Direction) — створює растр напрямку стоку з кожного осередку по найближчому сусідньому осередку вниз по схилу найбільшої крутини;
- 5) довжина лінії стоку (Flow Length) — обчислює відстань вгору або вниз за течією, або зважено відстанню, уздовж потоку для кожного осередку;

6) локальне зниження (Sink) — створює растр, який визначає локальні зниження або райони внутрішнього дренажу;

7) прив'язка точки гирла (Snap Pour Point) — прив'язує точки гирла до осередку з найбільшим сумарним стоком у межах заданої відстані;

8) ідентифікація видатків (Stream Link) — надає унікальні значення секціям растрою лінійної мережі, розташованим між зчленуваннями ліній;

9) порядок водотоку (Stream Order) — надає число, що визначає порядок сегментів раstra, тобто сегментів лінійної мережі;

10) водотік у просторовий об'єкт — перетворює растр, який представляє лінійну мережу у векторні об'єкти, що представляють мережу ліній;

11) вододіл (Watershed) — визначає водозбірну область, розташовану вище набору осередків раstra.

Комплекс робіт щодо створення карт. Уведення даних. У даній роботі були використані готовий набір даних водних об'єктів SRTM, створений на базі даних ДЗЗ, радіолокаційних даних SRTM, дани аерокосмічного моніторингу землі і бази даних моніторингу стану поверхневих вод зібраних з пунктів екологічного моніторингу поверхневих вод. Розглянемо вхідні дані більш детально.

1. Дані про водні об'єкти SRTM (SWBD) — це набір географічних даних, який кодує обриси берего-вої лінії з високою роздільною здатністю по всьому світу у векторному форматі, опублікований НАСА й призначений для використання в географічних інформаційних системах і картографічних додатках. Він був створений компанією BAESystems ADR для Національного агентства геопросторової розвідки США (NGA) як додатковий продукт при редагуванні бази даних цифрових моделей рельєфу (ЦМР) Місії топографічних радарів Shuttle (SRTM). Дані SWBD покривають поверхню Землі між 56° південної широти і 60° північної широти. Він поширюється у форматі шейп-файлу ESRI, розділеного на 12 229 файлів, кожен з яких охоплює одну плитку поверхні Землі розміром $1\text{-}1^{\circ}$.

2. SRTM (Shuttle radar topographic mission) — здійснена у лютому 2000 року з борту космічного корабля багаторазового використання "Шатл" радарна інтерферометрична зйомка поверхні земної кулі. Дана зйомка проведена на більшій частині території Землі (між 54° південної широти і 60° північної широти), а також океанів. Результатом зйомки стала цифрова модель рельєфу 85% поверхні Землі. Всього в результаті зйомки було отримано 12 терабайт радіолокаційних даних, які протягом 2 років проходили обробку фахівцями NASA.

3. Дані дистанційного зондування американського супутника Landsat-8. Landsat-8 — американський супутник ДЗЗ, восьмий в рамках програми Landsat. У даній роботі були використані знімки близь-

нього інфрачервоного спектра або NIR (Near Infrared). Ця частина спектра особливо важлива для екологів, оскільки відображає воду в листі здорових рослин. Порівнюючи з зображеннями інших діапазонів, отримуємо індекси накшталт NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). NDVI — нормалізований відносний індекс рослинності, простий кількісний показник кількості фотосинтетичний активній біомаси. Один з найпоширеніших і використовуваних індексів для вирішення завдань кількісної оцінки рослинного покриву.

4. Загальні показники використання водних ресурсів України формуються щороку Державним агентством з водних ресурсів та містять Відомості про великі водозабори та скиди стічних та інших вод басейнів основних річок України у вигляді таблиць формату .XLSX.

5. Відкриті дані державного моніторингу поверхневих вод України за 2003 – 2018 роки у вигляді таблиць формату .XLSX.

6. Географічна основа у векторному форматі (шари областей, міст, кордону держави).

На рис. 18 наведено структурну схему методики побудови гідрологічних картографічних моделей за даними ДЗЗ.

Створення шарів карт. Більшість ГІС дозволяє розділяти інформацію на карті на логічні категорії, яка називається шарами. Шари містять інформацію тільки про один тип об'єктів (наприклад, тип ґрунту ділянок) або про невелику групу об'єктів (наприклад, комунальні транспортні магістралі). Шари

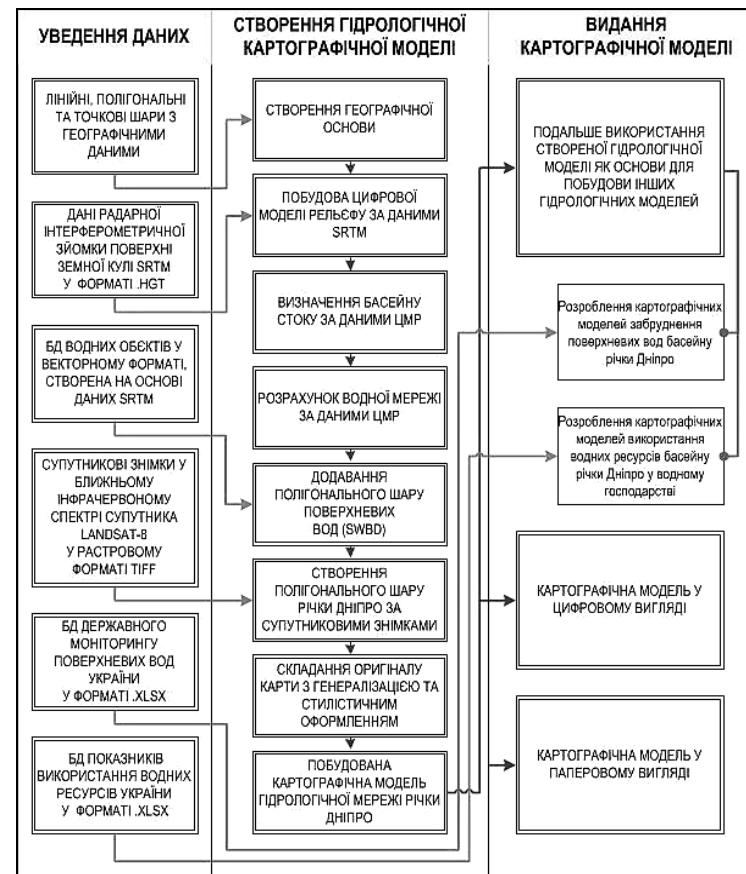


Рис. 18. Структурна схема методики побудови гідрологічних картографічних моделей за даними ДЗЗ

можна використовувати для створення композитних карт, поєднуючи їх зображення на дисплей комп'ютера. При аналізі нових перекривок створюються математичні комбіновані перекриття вже існуючих.

Комплексна карта водних ресурсів басейну річки Дніпро складається з шарів. Кожен шар містить різні види інформації — полігони, точки, лінії, тексти. Шари карти є структурними одиницями, з якими користувач працює в ArcGIS. Першим шаром завантажена географічна основа — лінійні шар державного кордону, полігональні шари областей та точкові шари міст України (рис. 19).



Рис. 19. Шари обласного поділу України

Наступний шар — шар рельєфу, створений для подальшої можливості визначення басейна річки Дніпро на основі раніше завантажених радіолокаційних даних SRTM (рис. 20).

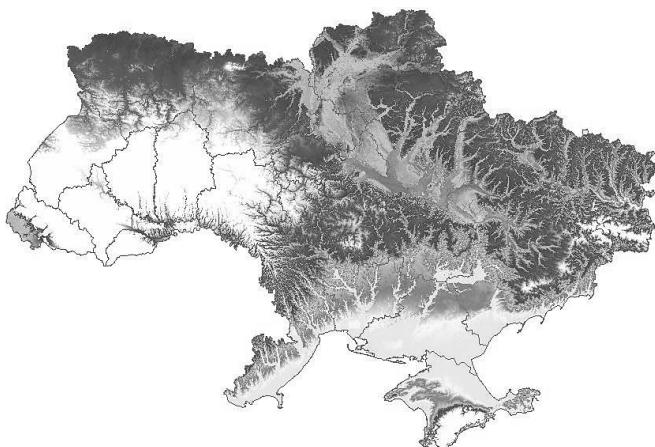


Рис. 20. Шар рельєфу України

Після утворення шару рельєфу за допомогою набору інструментів Spatial Analyst та його групи інструментів Hydrology створюється полігональний шар басейну річки Дніпро (рис. 21). Далі на базі створених шару рельєфу та шару басейна річки Дніпро отримуємо шар водної мережі річок басейну Дніпра (рис. 22). Далі додається набір географічних даних SWBD у вигляді полігональних шарів поверхневих водних об'єктів (рис. 23, 24).

Для створення векторного шару річки Дніпро використано супутникові знімки Landsat-8 та створено мозаїку знімків для подальшої роботи з ними (рис. 25).

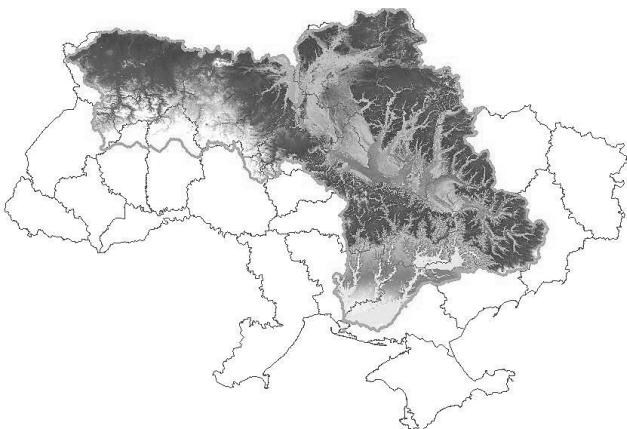


Рис. 21. Шар басейну річки Дніпро

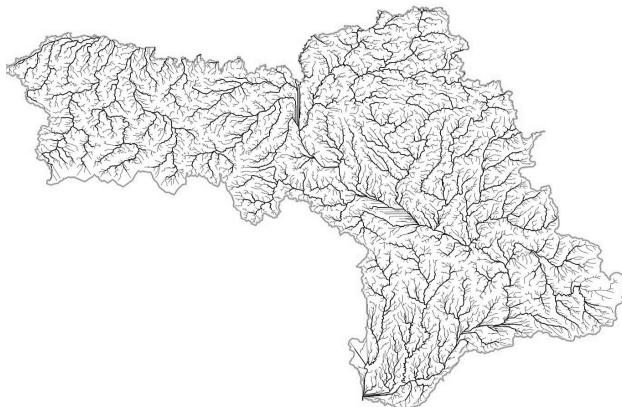


Рис. 22. Шар гідрологічної мережі річок басейну Дніпра

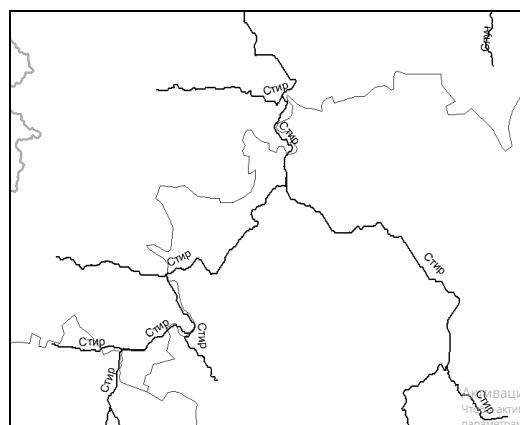


Рис. 23. Річкова мережа річки Стир басейну Дніпра

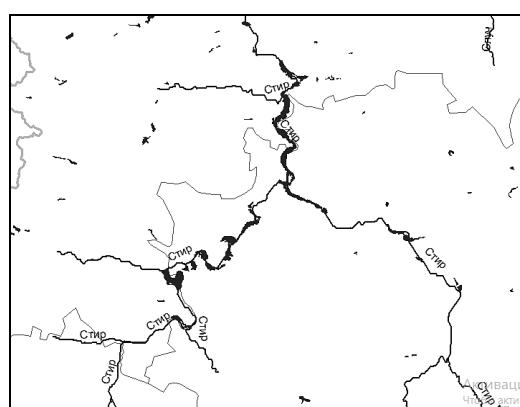


Рис. 24. Шар поверхневих вод басейну річки Стир басейну Дніпра

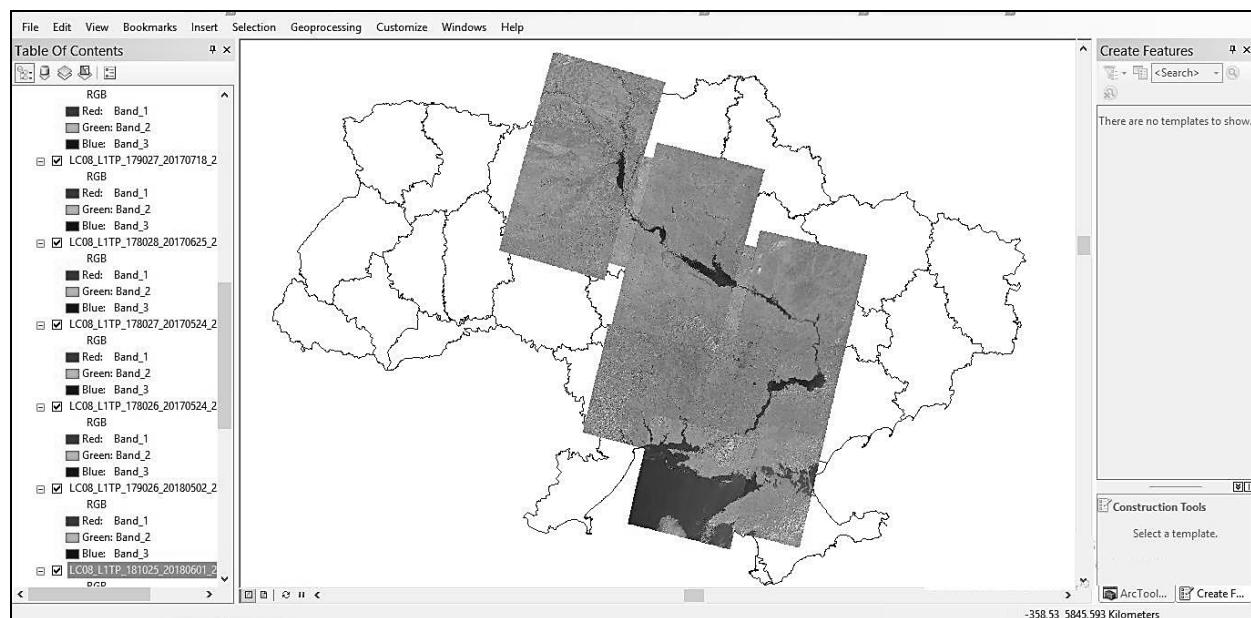


Рис. 25. Мозаїка супутникових знімків річки Дніпро (в середовищі ArcGIS)

На основі створеної мозаїки знімків побудовано полігональний шар русла річки Дніпро за допомогою набору інструментів Spatial Analyst та групи інструментів Multivariate (рис. 26).

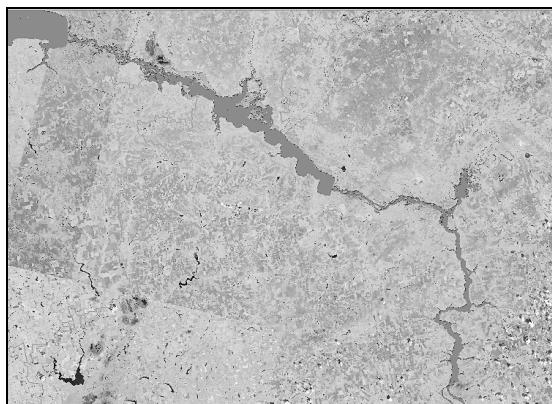


Рис. 26. Полігональний шар русла річки Дніпро, створений за супутниковими знімками

В результаті отримано базовий комплекс шарів гідрологічної мережі басейну річки Дніпро (рис. 27).

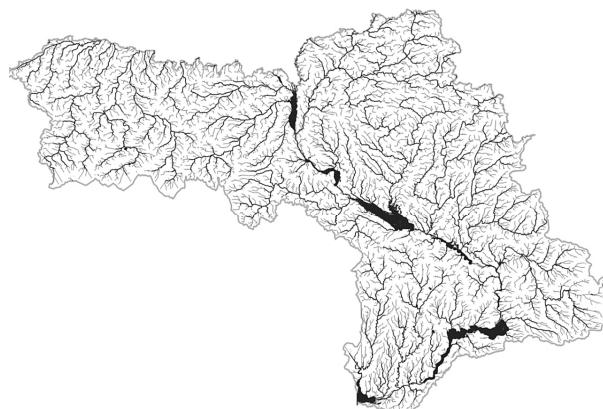


Рис. 27. Шар поверхневих вод басейну річки Дніпро

Наступним кроком є створення змісту карти, застосування комплекту умовних знаків, проведення

генералізації та стилістичного оформлення. В результаті створено картографічну модель гідрологічних ресурсів басейна річки Дніпро. Врешті, картографічна модель готова до видання (рис. 28).

Видання картографічної моделі. Взагалі, програмні засоби ГІС мають досить широкий набір засобів виведення з електронних картографічних моделей різноманітних даних, включаючи їх картографічну візуалізацію як найбільш технологічно складний вид підсумкової або проміжної документації. До документів, що зазвичай містять картографічні моделі, належать таблиці, картографічні та графічні матеріали. В даній роботі блок візуалізації даних у вигляді цифрових карт виступає в якості одного з основних елементів. Високоякісна картографічна графіка, яка імітує традиційні засоби картографічної мови та способи картографічного зображення за підтримки різноманітних пристрій відображення, належить до числа обов'язкових засобів програмного забезпечення ГІС. Кarta є моделлю дійсності і має гносеологічні властивості, такі як змістовна відповідність, абстрактність, просторово-часова подoba, вибірковість, синтетичність тощо.

Цифрова карта дозволяє більш повно аналізувати наявні дані, отримувати нову інформацію з певними властивостями. Вона містить не тільки картографічні дані про просторові об'єкти, але й описову інформацію (атрибути). Також цифрова карта має ряд можливостей для подальшого використання при створенні інших картографічних моделей (рис. 28).

Висновки

На підставі проведеного аналізу класифікації географічних карт за змістом, масштабом та просторовим охопленням визначено місце гідрологічних карт вод суші в загальній класифікації карт. Проведено детальний аналіз різновидів гідрологічних карт і карт водного господарства з урахуванням призначення і складових гідрологічної науки, методів отримання та обробки гідрологічних даних.

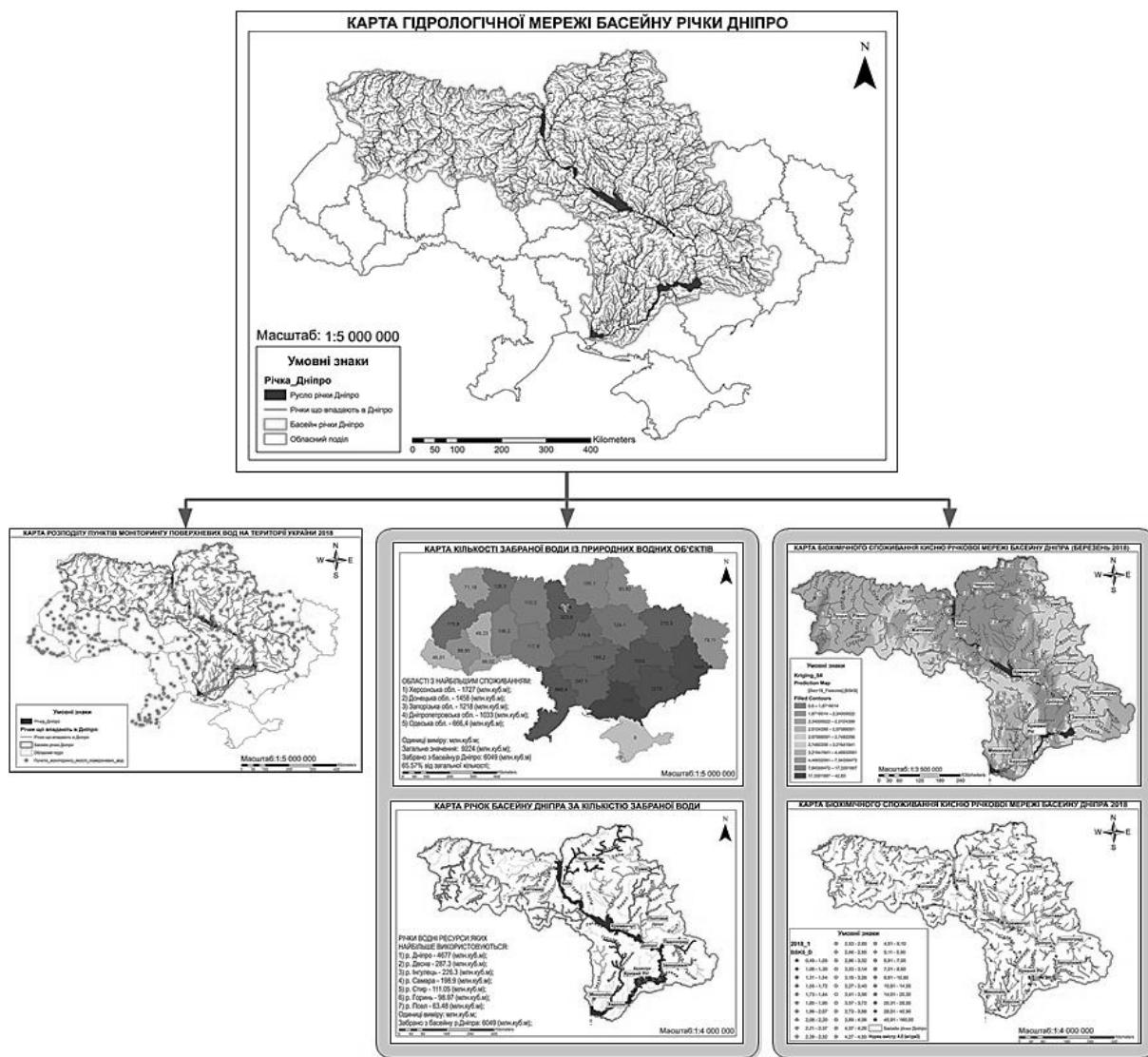


Рис. 28. Схема подальшого використання створеної гідрологічної картографічної моделі басейну річкової мережі Дніпра

Проаналізовано основні завдання водного господарства як області діяльності, що має забезпечувати управління раціональним використанням водних ресурсів, а також завдання картографування водного господарства і класифікацію відповідних карт. Розглянуто господарський та екологічний аспекти картографування вод.

Проведено аналіз існуючих досліджень використання технологій геоінформаційних систем у гідрології та розробці гідрологічних карт, у тому числі розглянуто дослідницькі досягнення України в даній галузі. Разом з тим, проведено аналіз сучасних параметрів та стану річки Дніпро як прикладу предметного дослідження.

Все зазначене забезпечує актуальність і методологічні основи для розроблення методики побудови гідрологічних картографічних моделей за даними дистанційного зондування Землі.

В процесі розроблення вказаної методики детально проаналізовано джерела даних для побудови

картографічних моделей, а також етапи створення карт — від редакційно-підготовчого до етапів уведення та обробки даних і завершального етапу видання карти. Запропоновану методику в подroбiciях описано структурно й покроково, що надає користувачеві повне уявлення щодо необхідних до виконання процедур, ресурсів вхідних даних та відповідного програмного забезпечення для отримання будь-якої гідрологічної картографічної моделі із заданими параметрами і тематичним наповненням. Отримані із використанням запропонованої методики електронні гідрологічні картографічні моделі забезпечують на вимогу користувача видання за допомогою програмного пакету ArcGIS баз даних, графічних, картографічних та інших матеріалів, що стосуються заданого об'єкту водного господарства. Таким чином, природозахисні заклади матимуть актуалізовані із завданою регулярністю тематичні гідрологічні карти, що відображають стан прісноводних природних ресурсів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Андреєв 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: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.3.01>.

2. Андреев С. М., Жилін В. А. Застосування даних аерофотозйомки з безпілотних літальних апаратів для побудови 3D-моделей місцевості. Системи управління, навігації та зв'язку: Полтава: Полтавський НТУ ім. Юрія Кондратюка, 2019. Вип. 1(53). С. 3-16. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2019.1.003>.
3. Андреев С. М., Жилін В. А. Геоінформаційна система підтримки прийняття рішень на базі скриньки просторових даних геопорталу. Сучасні інформаційні системи. 2020. Т. 4, № 2. С. 60-79. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.2.11>.
4. Де Мерс, Майкл Н. Географічні інформаційні системи. Основи. Дата +, Москва, 1999, 506 с.
5. Чалов Р. С. Принципы и методические подходы к подготовке карт гидрологической изученности речных бассейнов с помощью ГИС-технологии. Тр. Академии проблем водохозяйственных наук. М.: МГУ, 2003. Вып. 9. С. 44-54.
6. Шихов А. Н., Черепанова Е. С., Пономарчук А. И. Геоинформационные системы: применение ГИС-технологий при решении гидрологических задач: практикум. Пермь, ПГНИУ, 2014. 91 с.
7. Методические указания по формализации качественной оценки вод по гидрохимическим показателям. Москва: Гидромет, 1985.
8. Чалов Р. С. О применении ГИС-технологий для расчета гидрографических характеристик. Результаты исследований в области гидрометеорологии и мониторинга загрязнения природной среды. СПб.: Гидрометеоиздат, 2002. С. 150-151.
9. Введение в ArcGIS Geostatistical Analyst Extension. 2019. URL: <http://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/guide-books/extensions/geostatistical-analyst/what-is-geostatistics-.htm>.
10. Офіційний сайт Міністерства екології та природних ресурсів України. URL: <http://www.menr.gov.ua>.
11. Державна служба статистики України. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua>.
12. Карты водного хозяйства. URL: <https://bookonlime.ru/lecture/glava-15-karty-vodnogo-hozyaystva>.
13. Определение гидрологических характеристик водных объектов и земной поверхности на которой они размещены с использованием ГИС-технологий. URL: http://mapexpert.com.ua/index_ru.php?id=34&table=news.
14. Обзор группы инструментов Гидрология (Hydrology). URL: <http://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/an-overview-of-the-hydrology-tools.htm>.
15. Чиста вода. URL: <http://texty.org.ua/water>.
16. Типы загрязнения воды и их последствия. URL: <https://www.akvantis.com.ua/stati-i-obzory/tipy-zagryazneniya-vody-i-ih-posledstviya>.

REFERENCES

1. Andrieiev, S.M., Zhilin, V.A. and Melnyk, A.P. (2019), "The use of anamorphosis cartographic models for geodata analysis", *Advanced Information Systems*, Vol. 3, No. 3, pp. 5-16, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.3.01>.
2. Andreev, S. and Zhilin, V. (2019), "Application of aerophotic data with unmanned aircraft for developing 3D models of terrain", *Control, navigation and communication systems*, No. 1(53), pp. 3-16, DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2019.1.003>.
3. Andrieiev, S.M. and Zhilin, V.A. (2020), "Geoinformation system of decision support based on the geoportal spatial data storage", *Advanced Information Systems*, Vol. 4, No. 2, pp. 60-79, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.2.11>.
4. De Mers and Michael, N. (1999), *Geographic information systems. Foundations*, Date +, Moscow, 506 p.
5. Chalov, R.S. (2003), "Principles and methodological approaches to the preparation of maps of hydrological study of river basins using GIS technology", *Coll. Academy of Problems of Water Management Sciences*, MSU, Moscow, Vol. 9, pp. 44-54.
6. Shikhov, A.N., Cherepanova, E.S. and Ponomarchuk, A.I. (2014), *Geoinformation systems: the use of GIS technologies in solving hydrological problems, a workshop, textbook. manual*, Perm, 91 p.
7. (1985), *Methodical instructions on formalization of qualitative assessment of waters on hydrochemical indicators*, Hydromet, Moscow.
8. Chalov R.S. (2002), "On the application of GIS technologies for the calculation of hydrographic characteristics", *Sc. conf. on the results of research in the field of hydrometeorology and pollution monitoring*, Hydrometeoizdat, St.P., pp. 150-151.
9. Introduction to ArcGIS Geostatistical Analyst Extension, available at: <http://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/guide-books/extensions/geostatistical-analyst/what-is-geostatistics-.htm>.
10. Official site of the Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine, available at: <http://www.menr.gov.ua>.
11. State Statistics Service of Ukraine, available at: <http://www.ukrstat.gov.ua>.
12. Water management maps, available at: <https://bookonlime.ru/lecture/glava-15-karty-vodnogo-hozyaystva>.
13. Determination of hydrological characteristics of water bodies and the earth's surface on which they are located using GIS technologies, available at: http://mapexpert.com.ua/index_ru.php?id=34&table=news.
14. Overview of the Hydrology toolkit, available at: <http://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/an-overview-of-the-hydrology-tools.htm>.
15. Clean water, available at: <http://texty.org.ua/water>
16. Types of water pollution and their consequences, available at: <https://www.akvantis.com.ua/stati-i-obzory/tipy-zagryazneniya-vody-i-ih-posledstviya>.

Received (Надійшла) 20.05.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 01.07.2020

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Андреєв 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>

Методика построения гидрологических картографических моделей по данным дистанционного зондирования Земли

С. М. Андреев, В. А. Жилин

Аннотация. Предметом исследования является разработка методики построения гидрологических картографических моделей по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Объектом исследования является процесс непрерывного обеспечения природоохранных учреждений государства тематическими гидрологическими картами, которые постоянно актуализируются и отражают текущее состояние пресноводных природных ресурсов. Целью работы является повышение информативности, оперативности и достоверности статистического и прогнозного анализа геоданных ДЗЗ о состоянии пресноводных природных ресурсов за счет непрерывной актуализации их картографических моделей. **Выводы.** На основании проведенного анализа классификации географических карт по содержанию, масштабу и пространственному охвату определено место гидрологических карт вод суши в общей классификации карт. Проведен детальный анализ разновидностей гидрологических карт и карт водного хозяйства с учетом назначения и составляющих гидрологической науки, методов получения и обработки гидрологических данных. Проанализированы основные задачи водного хозяйства как области деятельности, которая должна обеспечивать управление рациональным использованием водных ресурсов, а также задачи картографирования водного хозяйства и классификация соответствующих карт. Рассмотрены хозяйственный и экологический аспекты картографирования вод. Проведен анализ существующих исследований использования технологий геоинформационных систем в гидрологии и разработке гидрологических карт, в том числе рассмотрены исследовательские достижения Украины в данной отрасли. Вместе с тем, проведен анализ современных параметров и состояния реки Днепр как примера предметного исследования. Все указанное обеспечивает актуальность и методологические основы для разработки методики построения гидрологических картографических моделей по данным дистанционного зондирования Земли. В процессе разработки указанной методики подробно проанализированы источники данных для построения картографических моделей, а также этапы создания карт — от редакционно-подготовительного к этапам ввода и обработки данных и завершающего этапа издания карты. Предложенная методика подробно описана структурно и пошагово, что предоставляет пользователю полное представление о необходимых к выполнению процедурах, ресурсах входных данных и соответствующего программного обеспечения для получения любой гидрологической картографической модели с заданными параметрами и тематическим наполнением. Полученные с использованием предложенной методики электронные гидрологические картографические модели обеспечивают по требованию пользователя издание с помощью программного пакета ArcGIS баз данных, графических, картографических и других материалов, касающихся определенного объекта водного хозяйства. Таким образом, природоохранные учреждения будут иметь возможность получать актуализированные с заданной регулярностью тематические гидрологические карты, отражающие состояние пресноводных природных ресурсов.

Ключевые слова: водные ресурсы; гидрологические картографические модели; дистанционное зондирование Земли; технологии ГИС.

Methods of construction of hydrological cartographic models according to remote sensing of the Earth data

Sergey Andrieiev, Volodymyr Zhilin

Abstract. The subject of the study is the development of methods for constructing hydrological cartographic models based on remote sensing of the Earth (RSE). The object of the study is the process of continuous provision of nature protection institutions of the state with thematic hydrological maps, which are constantly updated and reflect the current state of freshwater natural resources. The aim of the work is to increase the informativeness, efficiency and reliability of statistical and forecast analysis of remote sensing geodata on the state of freshwater natural resources through continuous updating of their cartographic models. **Conclusions.** Based on the analysis of the classification of geographical maps by content, scale and spatial coverage, the place of hydrological maps of inland waters in the general classification of maps was determined. A detailed analysis of the types of hydrological maps and water management maps, taking into account the purpose and components of hydrological science, methods of obtaining and processing hydrological data. The main tasks of water management as an area of activity that should ensure the management of rational use of water resources, as well as the task of mapping water management and classification of relevant maps are analyzed. The economic and ecological aspects of water mapping are considered. The analysis of existing researches about the geoinformation technologies usage in hydrology and development of hydrological maps is carried out, including research achievements of Ukraine in this branch. At the same time, the analysis of modern parameters and condition of the Dnieper river as an example of subject research is carried out. Aspects mentioned above provide relevance and methodological basis for the development of methods for constructing hydrological cartographic models according to remote sensing of the Earth. In the process of developing this methodology, data sources for the construction of cartographic models are analyzed in detail, as well as the stages of maps creating process - from editorial and preparatory to the stages of data entry and processing and the final stage of map publication. The proposed method is described in detail structurally and step by step, which gives the user a complete picture of the necessary procedures, input resources and appropriate software to obtain any hydrological cartographic model with the specified parameters and thematic content. The obtained by using the proposed technique electronic hydrological cartographic models provide, at the request of the user of the publication, with the help of the ArcGIS software package the export of created databases, graphic, cartographic and other materials related to a certain water management facility. Thus, nature protection institutions will have thematic hydrological maps updated with a given regularity, reflecting the state of freshwater natural resources.

Keywords: water resources; hydrological cartographic models; remote sensing of the Earth; GIS technologies.

А. О. Каргін^{1,2}, О. І. Іванюк¹

¹ Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна

² Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

МОДЕЛЬ СИТУАЦІЙНОГО ПЛАНУВАННЯ Й КЕРУВАННЯ ПЕРЕМІЩЕННЯМИ АВТОНОМНОГО РОБОТУ

Анотація. На сьогодні актуальну є проблема навігації автономних мобільних систем в просторі, де можливі обурення. Проблема полягає в тому, що різноманітні збурення, що виникають у процесі руху роботу, не дозволяють реалізувати переміщення вздовж заздалегідь запланованого маршруту й вимагають поточного перепланування відповідно отриманій від датчиків ситуації. Для автономних систем проблема посилюється необхідністю автоматичного формування моделі поточної ситуації на основі даних від сенсорів й інтегруванні цієї моделі ситуації з моделями планування й керування у реальному часі. **Предметом дослідження** є знанняорієнтовані моделі обробки даних від сенсорів, що застосовуються в навігації автономних мобільних систем. **Мета дослідження** – імплементація когнітивної моделі сприйняття, заснованої на правилах, для класу задач ситуаційного керування й перепланування руху автономного роботу вздовж маршруту в умовах перешкод. Дослідити спроможність моделі задовільнити вимогам до автономних систем. **Результати.** Модель сприйняття даних від сенсорів представлена множиною багаторівневих фактів, що у вербальній формі на різних рівнях узагальнення описують поточну ситуацію в оточенні робота. База знань, якою користується робот при навігації, представлена п'ятирівневою ієрархічною структурою нечітких правил: знання про цілі, маршрут й план усунення перешкод, картографічні знання про робочий простір, стратегії і конкретні керівні впливи, необхідні для досягнення мети. Розроблено алгоритм й програму, у якій інтегровані модель сприйняття й модифікована модель Такагі-Сугено, що реалізує ситуаційне керування з переплануванням маршруту. Для дослідження моделі розроблено штучне оточення та наведені результати комп’ютерних експериментів по переміщенню робота по заданому маршруту в оточенні з перешкодами. **Висновки.** Показана спроможність імплементації моделі сприйняття для класу задач навігації роботу. Модель сприйняття, що інтегрована з модифікованою моделлю Такагі-Сугено, вирішує завдання ситуаційного керування з переплануванням маршруту і задовільняє вимогам щодо автономних систем та має переваги в порівнянні з методами програмного та евристичного керування по критеріям гнучкість, масштабованість та опрацювання невизначеності.

Ключові слова: мобільний робот; ситуаційне планування та керування; навігація; когнітивна модель сприйняття; нечіткі системи; дані від сенсорів.

Вступ

Постановка завдання в загальному вигляді.

Концепція автономних систем (АС) знаходить все більш широке поширення при створенні великомасштабних розподілених в просторі об'єктів. АС включають сукупність компонентів, що реалізують в автономному режимі певну функцію, для виконання якої потрібно різноманітна інформація. Індустриальні АС компонуються з автоматичних ліній, ЧПУ верстатів, транспортних систем, роботів [1]. Залізнична [2] і автомобільна [3] галузі в перспективних планах передбачають створення АС на базі розумних автомобілів і розумних поїздів. АС, що виконують функції моніторингу ситуацій включають мобільні пристрой (роботи, безплотні літальні апарати) для спостереження і отримання інформації. У проектах розумних міст [3], як і у всіх вище передбачованих, основним компонентом АС є розумна автономна машина (РАМ) що переміщується у просторі. Проблема що виникає при створенні РАМ – навігація в умовах перешкод в автономному режимі.

Проблема навігації автономних систем властива мобільній робототехніці. Завдання навігації мобільного роботу розглядається з трьох точок зору [4, 5]: планування маршруту переміщення, локалізація ділянок маршруту де знаходиться робот (локальна навігація) і відображення місцевознаходження роботу на карту оточення. Для автономної навігації роботу важливо одночасне рішення переліченних задач. Такий підхід, відомий як SLAM (simultaneous

localization and mapping) [6, 7], базується на методах й моделях штучного інтелекту [6, 7].

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Навігаційні моделі глобального планування маршруту (побудова послідовності керуючих реакцій, які забезпечують переміщення роботу в заздалегідь визначену точку), а також окремі задачі навігації такі, як управління переміщенням, відстеження пройдено-го шляху, пошук цілі, патрулювання території, збереження цілі в області видимості [8, 9] не можуть бути використані в АС, так як припускають наявність повної інформації про геометрію навколошнього середовища. Більш того, головне обмеження на автономність поведінки накладають, по-перше, традиційний або модифікований метод програмного керування при реалізації плану і, по-друге, припущення про відсутність завад для руху. Цих недоліків позбавлені моделі локального планування шляху [10], коли навколошнє середовище є заздалегідь невідоме або допускається поява перешкод, що порушують попе-редній опис середовища. Моделі локального планування потенційно можуть бути використані в АС, оськільки РАМ, як правило, не доступні повні знання про навколошнє середовище, реальні середовища є мінливими. Такі моделі засновані на використанні даних від сенсорів про стан навколошнього середовища та онлайн прийняття рішення на основі цих даних про процес переміщення.

Можна виділити два напрямки досліджень під-ходу на основі сенсорних даних для вирішення за-вдань навігації: створення евристичних алгоритмів

під конкретне застосування; побудова моделей обробки даних від сенсорів, запозичених у живої природи.

До евристичних алгоритмів розв'язання задачі локального планування переміщень відносять Vector Field Histogram (VFH) і його подальші розвитки – VFH +, VFH *; Generalized Voronoi Graph (GVG) [11]. Можливості евристичних алгоритмів розглянемо на прикладі сімейства Bug – алгоритмів (Bug1, Bug2, Bug3, Dist Bug, Tangent Bug) [12, 13]. Даний алгоритм дозволяє роботу досягти цілі в процесі переміщення, за умови, що в будь-який момент часу роботу доступна інформація про напрямок на ціль і відстані до неї, робот може виявляти перешкоди на шляху руху і виконувати їх обхід. Зазначені умови підтримуються методами локалізації роботу в навколошньому середовищі, наприклад, бортовою інерційною системою на основі акселерометра та гіроскопа та, опціонально, одометру при наявності вихідних даних про початкові координати роботу і цілі переміщення. Для більшості завдань РАМ не може мати постійний доступ (на всіх етапах переміщення) до даних щодо кінцевої цілі. Тому для досягнення цілі потрібно знати маршрут, що проходить через послідовність підцілей. В умовах перешкод РАМ повинна мати здатність ситуаційного перепланування маршруту [14]. Тому модель формування керуючих реакцій повинна бути інтегрована з моделлю ситуаційного планування. Очевидно, що реалізація зазначених вимог до РАМ не може базуватися на згаданих евристичних алгоритмах.

Моделі обробки даних від сенсорів, що запозичені у живої природі інтенсивно розробляються в рамках напрямків когнітивної робототехніки [15] і вбудованих когнітивних систем [16]. В роботі [17] представлена модель сприйняття, що відноситься до класу моделей на основі сенсорних даних. Запропонована модель сприйняття формує на підставі даних від сенсорів уявлення ситуації у вигляді фактів що мають багатошарову структуру й відображають сенсорних словами різного рівня узагальнення. Така організація дозволили інтегрувати модель сприйняття із моделлю що заснована на правилах (МСП – модель сприйняття, заснована на правилах) [18]. Інтегрована МСП реалізує прийняття керуючих рішень у два етапи обробки даних від сенсорів. На першому етапі виконується інтерпретація просторово-часового набору даних про середовище в якій переміщається РАМ. Результат інтерпретації є структурований факт, що представляє ситуацію на різних рівнях абстрагування у вигляді нечіткого семантичного опису (слів природної мови) [18, 20]. На другому етапі нечіткий висновок за правилами з лінгвістичними змінними (ЛЗ) формує керуючі реакції РАМ. МСП було запропоновано й апробовано на концептуальному рівні для ситуаційного керування переміщеннями вздовж маршруту РАМ. Однак, реалізація МСП у реальних ситуаціях потребує розробки підходу щодо створення багатошарової бази знань для представлення у вигляді нечітких правил безпосередньо маршруту, стану середовища, способів пересунення в умовах обмежень, усунення перешкод на маршруті і таке інше. Це, у свою чергу,

потребує конкретизації компонентів моделі таких як контекстні ЛЗ, умовні ЛЗ та предметні ЛЗ.

Мета статті – імплементація МСП для класу задач ситуаційного керування й перепланування руху РАМ вздовж маршруту в умовах перешкод. Дослідити вплив перешкод на стійкість керування РАМ. Розглядається три класи перешкод. По-перше, коли через перешкоди фізично недоступно для РАМ ділянка маршруту із декількох суміжних підцілей й потрібно ситуаційне перепланування фрагменту маршруту. По-друге, коли збурення можуть перервати рух РАМ між двома суміжними підцілями маршруту і потрібно ситуаційне керування оминанням перешкоди. Потрете, коли через перешкоди недостатньо інформації для вирішення завдання локалізації РАМ.

Модель навігації, заснована на даних від сенсорів

Імплементація моделі МСП в навігації (МСПН) базується на припущеннях, що в просторі, в якому функціонує РАМ, довільним чином розподілено множину маркерів (Landmark, LM) $L = \{LM_1, \dots, LM_m\}$. LM_i характеризується набором унікальних ознак. На множині L може бути задано кілька маршрутів. Наприклад, j -й маршрут переміщення РАМ задається у вигляді впорядкованої послідовності LM $Route_j = (LM_{j,1}, \dots, LM_{j,p})$, де p – довжина маршруту. При переміщенні РАМ по маршруту можуть виникати перешкоди таким чином, що рух між $LM_{j,i}$, $LM_{j,i+1}$ є неможливим. Перешкоди можна розділити на два види: перешкода, що усувається шляхом «локального об'їзду» та $LM_{j,i+1}$ в кінцевому підсумку досягається; перешкода, що усувається шляхом зміни фрагмента маршруту таким чином, щоб досягнути наступного доступного LM по маршруту за $LM_{j,i+1}$, наприклад, $LM_{j,i+2}$ або $LM_{j,i+3}$. Останній тип перешкоди унеможливлює досягнення точки маршруту $LM_{j,i+1}$ і вимагає відхилення від маршруту з подальшим поверненням до маршруту в точці $LM_{j,i+n}$ ($n > 1$).

При таких припущеннях МСПН, яка використовується для керування переміщеннями РАМ уздовж маршруту, базується на таких знаннях: цілі й плани переміщень та усунення перешкод; факти, що представляють на основі даних від сенсорів можливі ситуації в оточенні РАМ; правила, що представляють знання про маршрути, робочій простор РАМ та стратегії керування; базові алгоритми керування РАМ в типових ситуаціях.

1. Множина фактів. Дані від сенсорів в РАМ обробляються механізмом абстрагування [19, 20] з метою отримання їх опису у вигляді багаторівневого факту у вербалльній формі на різних рівнях узагальнення. Факт має нечітку характеристику (НХ), яка показує, наскільки зміст верbalного подання ситуації (прототип) відповідає конкретному набору даних від сенсорів РАМ. НХ представляє собою нечітке LR число з гаусовою функцією приналежності. На основі НХ, визначається фактор впевненості (cf) [19, 20].

2. Знання. Знання РАМ про ціль, план і маршрут переміщення, про стратегію і конкретні керівні впливи, необхідні для досягнення мети, представлені на різних рівнях абстрагування у вигляді нечітких

правил з використанням фактів різних рівнів узагальнення. У загальному вигляді правила мають однакову (модифікована Такагі-Сугено, MTS) модель (1) для всіх рівнів:

$$\begin{aligned} R_i^l \text{ IF } & \text{event}(\mathbf{f}_i^l) \text{ and } \text{CF}_{-}^{\text{sat}} \mathbf{f}_i^l \text{ is high} \\ & \text{and } \text{CF}_{-}^{\text{sat}} \mathbf{f}_j^{l+1} \text{ is high} \quad (1) \\ \text{THEN } & \text{cf}_{-}^{\text{sat}} \mathbf{f}_k^l = 1, \text{ cf}_{-}^{\text{sat}} \mathbf{f}_i^l = -1, [\text{cf}_{-}^{\text{sat}} \mathbf{f}_j^{l+1} = -1], \end{aligned}$$

де $\text{CF}_{-}^{\text{f}_i}$ – ім'я ЛЗ, яка нечітко за допомогою трьох термів (high, low, zero) представляє числове значення фактора впевненості cf факту [19, 20].

В (1) наведено правило l -го рівня абстрагування, в яке включено: \mathbf{f}_i^l – факт l -го рівня абстрагування даних від сенсорів, ${}^{\text{sat}} \mathbf{f}_i^l$ – супутник факту \mathbf{f}_i^l що використовується для вказівки на поточну мету l -го рівня та актуальній контекст що супроводжує процес досягнення мети; ${}^{\text{sat}} \mathbf{f}_j^{l+1}$ – супутник факту $l+1$ -го рівня абстрагування. Правило активізується подією $\text{event}(\mathbf{f}_i^l)$, що породжується появою даних від сенсорів про ознаки i -го LM, за умови що поточна підціль переміщення досягнута, про що свідчить активність супутника цього факту $\text{CF}_{-}^{\text{sat}} \mathbf{f}_i^l \text{ is high}$. Умова $\text{CF}_{-}^{\text{sat}} \mathbf{f}_j^{l+1} \text{ is high}$ в правилі (1) вказує на актуальну підціль $l+1$ -го рівня та зв'язує це правило з актуальним контекстом (правило представляє фазу актуального плану верхнього рівня). Правило при активізації змінює підціль l -го рівня після досягнення актуальної підцілі цього рівня і опційно (при досягненні останньої підцілі l -го рівня) деактуалізує підціль $l+1$ -го рівня ($[\text{cf}_{-}^{\text{sat}} \mathbf{f}_j^{l+1} = -1]$).

У статті для вирішення задачі навігації РАМ пропонується така модель стратифікації БЗ за рівнями абстрагування.

На верхньому рівні знаходиться множина правил, які описують цілі РАМ (різні завдання чи функції). Нижче рівнем знаходяться знання про план досягнення мети (опис маршруту переміщень у вигляді послідовності LM через які пролягає маршрут). Ще нижче рівнем організовані картографічні знання: для кожного LM робочого простору даються плани досягнення суміжних з ним LM. На самому нижньому рівні БЗ організовані знання про можливі способи керування актуаторами РАМ (елементарні стратегії управління актуаторами). На рис. 1 в графічному вигляді показано стратифікацію БЗ за рівнями абстрактного представлення керування переміщенням РАМ.

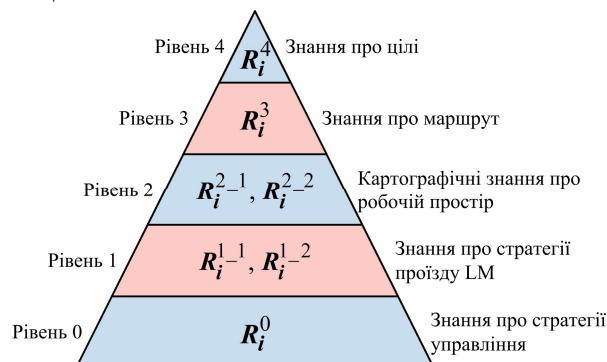


Рис. 1. Стратифікація БЗ за рівнями абстрактного представлення керуючих рішень

3. Знання про цілі. Всі цілі РАМ, що вимагають переміщень, задаються зовні й для досягнення мети потребують плану дій (маршруту переміщень). На верхньому рівні БЗ знаходяться правила, що актуалізують знання нижніх рівнів про конкретний маршрут, які використовуються у якості контексту при керуванні переміщеннями. Для кожного k -го маршруту з n_s можливих задається таке правило:

$$\begin{aligned} R_k^4 \text{ IF } & \text{event}(\mathbf{f}_{\text{Start}_k}) \text{ and } \text{CF}_{-}^{\text{sat}} \mathbf{f}_{\text{Start}_k} \text{ is high} \\ \text{THEN } & \text{cf}_{-}^{\text{sat}} \mathbf{f}_{\text{Route}_j} = 1, \text{ cf}_{-}^{\text{sat}} \mathbf{f}_{\text{LM}_{j,1}} = 1, \\ & \text{cf}_{-}^{\text{sat}} \mathbf{f}_{\text{Line_in}} = 1, \text{ cf}_{-}^{\text{sat}} \mathbf{f}_{\text{Start}_l} = -1, \dots, \\ & \text{cf}_{-}^{\text{sat}} \mathbf{f}_{\text{Start}_{n_s}} = -1; \\ & j = 1, 2, \dots, n_r; \quad k = 1, 2, \dots, n_s. \end{aligned} \quad (2)$$

На цьому ж рівні БЗ знаходяться правила, які деактуалізують контекст (порцію знань що описують маршрут), коли мета досягнута про що світить досягнення останньої точки маршруту, яка описується фактом $\mathbf{f}_{\text{LM}_{j,p}}$. Це така множина правил:

$$\begin{aligned} R_{j,p}^4 \text{ IF } & \text{event}(\mathbf{f}_{\text{LM}_{j,p}}) \text{ and } \text{CF}_{-}^{\text{sat}} \mathbf{f}_{\text{LM}_{j,p}} \text{ is high} \\ & \text{and } \text{CF}_{-}^{\text{sat}} \mathbf{f}_{\text{Route}_j} \text{ is high} \\ \text{THEN } & \text{cf}_{-}^{\text{sat}} \mathbf{f}_{\text{Route}_j} = -1, \text{ cf}_{-}^{\text{sat}} \mathbf{f}_{\text{LM}_{j,p}} = -1, \quad (3) \\ & \text{cf}_{-}^{\text{sat}} \mathbf{f}_{\text{Start}_l} = 1, \dots, \text{cf}_{-}^{\text{sat}} \mathbf{f}_{\text{Start}_{n_s}} = 1; \\ & i = 1, 2, \dots, p; \quad j = 1, 2, \dots, n_r. \end{aligned}$$

Друга група цілей переміщення РАМ пов'язана з появою перешкод, що порушують нормальній режим переміщення. Аналогічно, як і для вище розглянутих цілей, на верхньому рівні БЗ знаходяться правила що актуалізують знання нижніх рівнів про плани усунення перешкоди та правила що деактуалізують цю порцію знань, коли мета досягнута. В (4) наведено множину правил що актуалізують:

$$\begin{aligned} R_i^4 \text{ IF } & \text{event}(\mathbf{f}_{\text{Obst}_i}) \text{ and } \text{CF}_{-}^{\text{sat}} \mathbf{f}_{\text{Obst}_i} \text{ is high} \\ \text{THEN } & \text{cf}_{-}^{\text{sat}} \mathbf{f}_{\text{PlanObst}_i} = 1, \text{ cf}_{-}^{\text{sat}} \mathbf{f}_{\text{LM}_{i,1}} = 1, \quad (4) \\ & i = 1, 2, \dots, n_{ob}. \end{aligned}$$

Факти $\mathbf{f}_{\text{Start}_k}$ в (2) й $\mathbf{f}_{\text{Obst}_i}$ в (4) формуються на основі даних від сенсорів, наприклад, кнопка, що активізує команду на виконання завдання або голосова команда, або сенсор відстані до перешкоди. Для активізації правила, наприклад, (2), крім події $\text{event}(\mathbf{f}_{\text{Start}_k})$, потрібна актуальнна ціль $\text{CF}_{-}^{\text{sat}} \mathbf{f}_{\text{Start}_k} \text{ is high}$.

Її актуалізацію було виконано механізмом уваги, коли була досягнута попередня ціль цього рівня. Застосування механізмів управління контекстом та перемикання уваги [17] будуть розглянуті нижче. Активне правило (2) актуалізує контекст, що пов'язаний з досягненням поточної мети $\text{cf}_{-}^{\text{sat}} \mathbf{f}_{\text{Route}_j} = 1$ для нижчих рівнів. Крім цього, правило (2) деактуалізує цілі цього рівня $\text{sat} \mathbf{f}_{\text{Start}_l}, \dots, \text{sat} \mathbf{f}_{\text{Start}_{n_s}}$ щоб унеможливити реалізацію інших команд що можуть надходити до РАМ під час виконання вже прийнятої команди. Аналогі-

чні функції з планування усунення перешкоди, коли вона з'являється виконують правила з групи (4). В обох випадках правила активізують факт-супутник першого LM ${}^{sat}\mathbf{f}_{LM_{j,1}}$ в маршруті переміщення і плані обходу перешкоди ${}^{sat}\mathbf{f}_{LM_{i,1}}$.

4. Знання про маршрут. Маршрут, наприклад, j -й у вигляді впорядкованої послідовності $LM_{Route_j} = (LM_{j,1}, \dots, LM_{j,p})$ представлений множиною з p правил. Правило $R_{j,i}$ описує ділянку маршруту між $LM_{j,i}$ та $LM_{j,i+1}$. Для цієї ділянки маршруту поточною ціллю переміщення є $LM_{j,i+1}$, представлений супутником ${}^{sat}\mathbf{f}_{LM_{j,i+1}}$ факту $\mathbf{f}_{LM_{j,i+1}}$, що описує ознаки $LM_{j,i+1}$. Вхідний LM ділянки шляху представлений фактом $\mathbf{f}_{LM_{j,i}}$. Нечіткі правила в БЗ представлені відповідно до (1):

$$\begin{aligned} R_{j,i}^3 \text{ IF } & event(\mathbf{f}_{LM_{j,i}}) \text{ and } CF_{-}{}^{sat}\mathbf{f}_{LM_{j,i}} \text{ is high} \\ & \text{and } CF_{-}{}^{sat}\mathbf{f}_{Route_j} \text{ is high} \\ \text{THEN } & cf_{-}{}^{sat}\mathbf{f}_{LM_{j,i+1}} = 1, cf_{-}{}^{sat}\mathbf{f}_{LM_{j,i}} = -1; \\ & i = 1, 2, \dots, p-1; j = 1, 2, \dots, n_r. \end{aligned} \quad (5)$$

5. Картографічні знання про робочий простір. LM_i безпосередньо пов'язаний дорогами зі скінченою множиною LM $\{LM_j\}$ ($j = 1, 2, \dots, k$) робочого простору. Дорога, яка примикає до LM_i і йде до LM_j має ідентифікатор, пов'язаний з її напрямком (північ, схід, південь, захід) або більш детально. Знання в БЗ про карту місцевості представлені множиною правил, що описують дороги, що безпосередньо пов'язують LM, наприклад, LM_i з усіма іншими LM_j :

$$\begin{aligned} R_i^{2-1} \text{ IF } & CF_{-}\mathbf{f}_{LM_i} \text{ is high and } CF_{-}{}^{sat}\mathbf{f}_{LM_j} \text{ is high} \\ \text{THEN } & cf_{-}{}^{sat}\mathbf{f}_{Out_dir} = 1; \\ & i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, k. \end{aligned} \quad (6)$$

У правилі (6) цільовий LM_j представлений супутником ${}^{sat}\mathbf{f}_{LM_j}$ факту \mathbf{f}_{LM_j} , а вхідний LM представлений двома фактами: \mathbf{f}_{LM_i} та фактами-супутником ${}^{sat}\mathbf{f}_{Out_dir}$ факту \mathbf{f}_{Out_dir} , який є ідентифікатором виїздної дороги від LM_i що безпосередньо зв'язує його з LM_j . Правила (6) не пов'язані з конкретним маршрутом. Вони можуть бути активізовані сенсорними даними про місце знаходження PAM, коли вона знаходиться в оточенні LM_i .

Якщо PAM знаходиться на під'їзді дорозі до деякого LM (в зоні доступу до даних), на основі ідентифікатора цієї дороги формуються ознаки факту \mathbf{f}_{In_dir} . Ціллю переміщення PAM є виїзна дорога з ідентифікатором, що представлений супутником факту ${}^{sat}\mathbf{f}_{Out_dir}$. Картографічні знання про те, який маневр потрібно виконати, щоб потрапити з під'їзної дороги на виїзну формують правила такого типу:

$$\begin{aligned} R_i^{2-2} \text{ IF } & CF_{-}\mathbf{f}_{In_dir} \text{ is high and } CF_{-}{}^{sat}\mathbf{f}_{Out_dir} \text{ is high} \\ \text{THEN } & cf_{-}{}^{sat}\mathbf{f}_{Maneuver_type} = 1, cf_{-}{}^{sat}\mathbf{f}_{Out_dir} = -1. \end{aligned} \quad (7)$$

6. Знання про стратегії проїзду LM. LM являє собою певне розгалуження доріг або глухий кут. На рис. 2 показані можливі типи розгалужень, які використовувалися в моделі простору. Передбачається, що на кожній з доріг, що примикають до LM, на деякій відстані від розгалуження є розмітка у вигляді суцільної смуги «стоп». Інформація про цю лінію, отримана за допомогою сенсорів РАМ, формує факт \mathbf{f}_{Line_in} . План проїзду LM розчленований на дві фази. Перша фаза це виконання маневру (проїзд прямо або поворот) щоб потрапити до старт-стоп лінії на виїзний дорозі зі старт-стоп лінії на в'їзний дорозі. Друга фаза це початок руху по виїзний дорозі. Знання про маневр на першій фазі представлені правилом (8). Правило актуалізується при появі події (наїзд на старт-стоп лінію, $event(\mathbf{f}_{Line})$) і при виконанні умов: безпечна ситуація на розгалуженні доріг ($CF_{-}\mathbf{f}_{Safe} \text{ is high}$), тип маневру ($CF_{-}{}^{sat}\mathbf{f}_{Maneuver_type} \text{ is high}$), спосіб виконання маневру ($CF_{-}\mathbf{f}_{Maneuver_method} \text{ is high}$). Дані, на базі яких формується представлення ситуації оточення LM у вигляді фактів \mathbf{f}_{Safe} , $\mathbf{f}_{Maneuver_type}$, $\mathbf{f}_{Maneuver_method}$, зберігаються у пам'яті кожного LM і становуть доступні сенсорам РАМ, коли вона знаходиться на старт-стоп лінії. Правило (8) актуалізує супутники фактів: ціль переміщення до старт-стоп лінії на виїзний дорозі $cf_{-}{}^{sat}\mathbf{f}_{Line_out} = 1$, і стратегію управління:

$$\begin{aligned} R_i^{1-1} \text{ IF } & event(\mathbf{f}_{Line}) \text{ and } CF_{-}{}^{sat}\mathbf{f}_{Line_in} \text{ is high} \\ & \text{and } CF_{-}\mathbf{f}_{Safe} \text{ is high} \\ & \text{and } CF_{-}{}^{sat}\mathbf{f}_{Maneuver_type} \text{ is high} \\ & \text{and } CF_{-}\mathbf{f}_{Maneuver_method} \text{ is high} \\ \text{THEN } & cf_{-}{}^{sat}\mathbf{f}_{Line_out} = 1, \\ & cf_{-}{}^{sat}\mathbf{f}_{U_Maneuver_type_method} = 1, \\ & cf_{-}{}^{sat}\mathbf{f}_{Line_in} = -1, cf_{-}{}^{sat}\mathbf{f}_{Maneuver_type} = -1. \end{aligned} \quad (8)$$

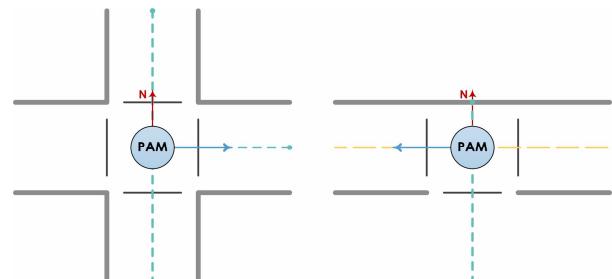


Рис. 2. Типи розгалужень

Правило (9) описує знання про другу фазу – початок руху по виїзний дорозі. На рис. 3 показані можливі типи виїзних доріг, які використовувалися в моделі простору.

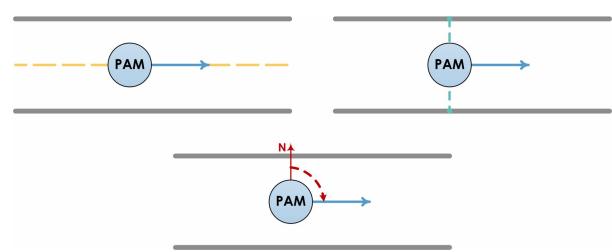


Рис. 3. Типи доріг

Актуалізується правило подію наїзду на старт-стоп лінію при очікуванні її на вийзний дорозі $CF_{sat} f_{Line_out} \text{ is high}$. При заданому типі руху по вийзний дорозі $CF_f_{Moving_method} \text{ is high}$ актуалізується стратегія управління $cf_{sat} f_{U_Moving_method} = 1$ і цільова ситуація до появи якої дана стратегія управління залишатиметься актуальною $cf_{sat} f_{Line_in} = 1$.

$$\begin{aligned} R_i^{1-2} \quad & \text{IF } event(cf_f_{Line}) \text{ and } CF_{sat} f_{Line_out} \text{ is high} \\ & \text{and } CF_f_{Moving_method} \text{ is high} \\ \text{THEN } & cf_{sat} f_{Line_out} = -1, \\ & cf_{sat} f_{U_Moving_method} = 1, cf_{sat} f_{Line_in} = 1. \end{aligned} \quad (9)$$

7. Знання про стратегії управління. Стратегія управління реалізується контролером, наприклад, ПІД, нейро або нечітким, який заснований на певному алгоритмі управління за прямими або зворотним зв'язкам [21]. Правило (10) активує контролер що керує маневром (проїзд від в'їзної старт-стоп лінії до вийзної старт-стоп лінії розгалуження яке представлено LM, рис. 2). Правило (11) активує контролер що керує проїздом відповідним методом (рис.3) від вийзної старт-стоп лінії одного LM до в'їзної старт-стоп лінії другого LM:

$$\begin{aligned} R_i^0 \quad & \text{IF } CF_{sat} f_{U_Maneuver_type_method} \text{ is high} \\ & \text{and } CF_{sat} f_{Line_out} \text{ is high} \\ \text{THEN } & U_Maneuver_type_method; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} R_i^0 \quad & \text{IF } CF_{sat} f_{U_Moving_method} \text{ is high} \\ & \text{and } CF_{sat} f_{Line_in} \text{ is high} \\ \text{THEN } & U_Moving_method. \end{aligned} \quad (11)$$

Експерименти

Для дослідження моделі було розроблено штучне оточення у вигляді ортогонального лабіринту (рис. 4). В ключових точках лабіринту (розгалуженнях та глухих кутах) містяться LM. Рух по дорогам між LM організовано з використанням трьох сенсорних систем: на основі лінії розмітки (на рис. 4 показано жовтим кольором) з використанням сенсора лінії; на основі відстані до обмежуючих стін (показано зеленим кольором) з використанням далекомірів; на основі руху по азимуту (показано червоним кольором) з використанням цифрового компасу.

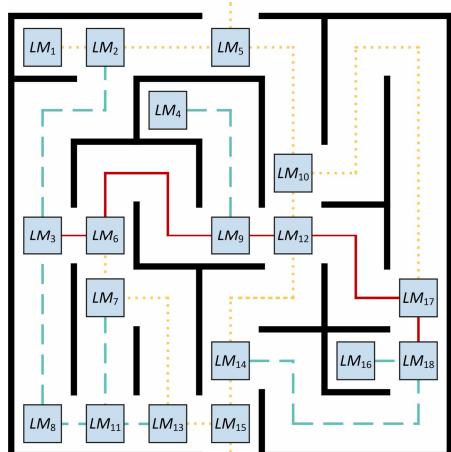


Рис. 4. Оточення для експериментів

У відповідності до описаної моделі сформована чотирьох шарова БЗ, що описує знання про цілі, різні маршрути в штучному оточенні, картографічні знання про робочій простір, знання про способи управління актуаторами РАМ. Для апробації підходу було розроблено програму що реалізує обробку даних від сенсорів на основі знань (2)-(10) за модифікованою моделлю Такагі-Сугено що включає механізми відстеження контексту та перемикання уваги.

Нижче наведено приклад одного з проведених експериментів. База правил (2)-(10) конкретизована для одного маршруту $Route_1 = (LM_5, LM_2, LM_3, LM_6, LM_7, LM_{13}, LM_{15})$ (рис. 4). Конкретизовані правила (2), (3) мають вигляд:

$$\begin{aligned} R_1^4 \quad & \text{IF } event(f_{Start_1}) \text{ and } CF_{sat} f_{Start_1} \text{ is high} \\ \text{THEN } & cf_{sat} f_{Route_1} = 1, cf_{sat} f_{LM_5} = 1, \\ & cf_{sat} f_{Line_in} = 1, cf_{sat} f_{Start_1} = -1, \dots, \\ & cf_{sat} f_{Start_4} = -1; \\ R_{1,6}^4 \quad & \text{IF } event(f_{LM_{15}}) \text{ and } CF_{sat} f_{LM_{15}} \text{ is high} \\ & \text{and } CF_{sat} f_{Route_1} \text{ is high} \\ \text{THEN } & cf_{sat} f_{Route_1} = -1, cf_{sat} f_{LM_{15}} = -1, \\ & cf_{sat} f_{Start_1} = 1, \dots, cf_{sat} f_{Start_4} = 1. \end{aligned} \quad (12)$$

Правила (5) що безпосередньо описують маршрут $Route_1$ представлені нижче:

$$\begin{aligned} R_{1,1}^3 \quad & \text{IF } event(f_{LM_5}) \text{ and } CF_{sat} f_{LM_5} \text{ is high} \\ & \text{and } CF_{sat} f_{Route_1} \text{ is high} \\ \text{THEN } & cf_{sat} f_{LM_2} = 1, cf_{sat} f_{LM_5} = -1; \\ R_{1,2}^3 \quad & \text{IF } event(f_{LM_2}) \text{ and } CF_{sat} f_{LM_2} \text{ is high} \\ & \text{and } CF_{sat} f_{Route_1} \text{ is high} \\ \text{THEN } & cf_{sat} f_{LM_3} = 1, cf_{sat} f_{LM_2} = -1; \\ R_{1,3}^3 \quad & \text{IF } event(f_{LM_3}) \text{ and } CF_{sat} f_{LM_3} \text{ is high} \\ & \text{and } CF_{sat} f_{Route_1} \text{ is high} \\ \text{THEN } & cf_{sat} f_{LM_6} = 1, cf_{sat} f_{LM_3} = -1; \\ R_{1,4}^3 \quad & \text{IF } event(f_{LM_6}) \text{ and } CF_{sat} f_{LM_6} \text{ is high} \\ & \text{and } CF_{sat} f_{Route_1} \text{ is high} \\ \text{THEN } & cf_{sat} f_{LM_7} = 1, cf_{sat} f_{LM_6} = -1; \\ R_{1,5}^3 \quad & \text{IF } event(f_{LM_7}) \text{ and } CF_{sat} f_{LM_7} \text{ is high} \\ & \text{and } CF_{sat} f_{Route_1} \text{ is high} \\ \text{THEN } & cf_{sat} f_{LM_{13}} = 1, cf_{sat} f_{LM_7} = -1; \\ R_{1,6}^3 \quad & \text{IF } event(f_{LM_{13}}) \text{ and } CF_{sat} f_{LM_{13}} \text{ is high} \\ & \text{and } CF_{sat} f_{Route_1} \text{ is high} \\ \text{THEN } & cf_{sat} f_{LM_{15}} = 1, cf_{sat} f_{LM_{13}} = -1. \\ R_3^{2-1} \quad & \text{IF } CF_f_{LM_2} \text{ is high and } CF_{sat} f_{LM_3} \text{ is high} \\ \text{THEN } & cf_{sat} f_{Out_S} = 1; \\ R_6^{2-1} \quad & \text{IF } CF_f_{LM_3} \text{ is high and } CF_{sat} f_{LM_6} \text{ is high} \\ \text{THEN } & cf_{sat} f_{Out_E} = 1; \\ R_9^{2-1} \quad & \text{IF } CF_f_{LM_5} \text{ is high and } CF_{sat} f_{LM_2} \text{ is high} \\ \text{THEN } & cf_{sat} f_{Out_W} = 1; \end{aligned} \quad (13)$$

- R_{12}^{2-1} IF CF_{LM₆} is high and CF_{sat}f_{LM₇} is high
THEN cf_{sat}f_{Out_S} = 1;
- R_{15}^{2-1} IF CF_{LM₇} is high and CF_{sat}f_{LM₁₁} is high
THEN cf_{sat}f_{Out_S} = 1;
- R_{16}^{2-1} IF CF_{LM₇} is high and CF_{sat}f_{LM₁₃} is high (14)
THEN cf_{sat}f_{Out_E} = 1;
- R_{27}^{2-1} IF CF_{LM₁₁} is high and CF_{sat}f_{LM₁₃} is high
THEN cf_{sat}f_{Out_E} = 1;
- R_{28}^{2-1} IF CF_{LM₁₃} is high and CF_{sat}f_{LM₁₅} is high
THEN cf_{sat}f_{Out_E} = 1.

- R_2^{2-2} IF CF_{In_N} is high and CF_{sat}f_{Out_E} is high
THEN cf_{sat}f_{Maneuver_left} = 1, cf_{sat}f_{Out_E} = -1;
- R_3^{2-2} IF CF_{In_N} is high and CF_{sat}f_{Out_S} is high
THEN cf_{sat}f_{Maneuver_forward} = 1,
cf_{sat}f_{Out_S} = -1;
- R_4^{2-2} IF CF_{In_N} is high and CF_{sat}f_{Out_W} is high
THEN cf_{sat}f_{Maneuver_right} = 1, cf_{sat}f_{Out_W} = -1; (15)
- R_7^{2-2} IF CF_{In_E} is high and CF_{sat}f_{Out_S} is high
THEN cf_{sat}f_{Maneuver_left} = 1, cf_{sat}f_{Out_S} = -1;
- R_{14}^{2-2} IF CF_{In_W} is high and CF_{sat}f_{Out_E} is high
THEN cf_{sat}f_{Maneuver_forward} = 1,
cf_{sat}f_{Out_E} = -1;
- R_{15}^{2-2} IF CF_{In_W} is high and CF_{sat}f_{Out_S} is high
THEN cf_{sat}f_{Maneuver_right} = 1, cf_{sat}f_{Out_S} = -1;

Картографічні знання (6), (7) про робочій простір (рис. 4) представлени 9-ю правилами (14), (15). Знання про стратегії проїзду розгалужень що на рис. 3 показані відповідними LM представлені множиною нижче наведених правил:

- R_1^{1-1} IF event(f_{Line}) and CF_{sat}f_{Line_in} is high
and CF_{f_Safe} is high
and CF_{sat}f_{Maneuver_right} is high
and CF_{sat}f_{Maneuver_mark} is high
THEN cf_{sat}f_{Line_out} = 1,
cf_{sat}f_{U_Maneuver_right_mark} = 1,
cf_{sat}f_{Line_in} = -1, cf_{sat}f_{Maneuver_right} = -1;
- R_3^{1-1} IF event(f_{Line}) and CF_{sat}f_{Line_in} is high
and CF_{f_Safe} is high
and CF_{sat}f_{Maneuver_left} is high
and CF_{sat}f_{Maneuver_mark} is high (16)
THEN cf_{sat}f_{Line_out} = 1,
cf_{sat}f_{U_Maneuver_left_mark} = 1,
cf_{sat}f_{Line_in} = -1, cf_{sat}f_{Maneuver_left} = -1;
- R_9^{1-1} IF event(f_{Line}) and CF_{sat}f_{Line_in} is high
and CF_{f_Safe} is high
and CF_{sat}f_{Maneuver_right} is high
and CF_{sat}f_{Maneuver_azim} is high
THEN cf_{sat}f_{Line_out} = 1,

- cf_{sat}f_{U_Maneuver_right_azim} = 1,
cf_{sat}f_{Line_in} = -1, cf_{sat}f_{Maneuver_right} = -1;
- R_{11}^{1-1} IF event(f_{Line}) and CF_{sat}f_{Line_in} is high
and CF_{f_Safe} is high
and CF_{sat}f_{Maneuver_left} is high
and CF_{sat}f_{Maneuver_azim} is high
THEN cf_{sat}f_{Line_out} = 1,
cf_{sat}f_{U_Maneuver_left_azim} = 1, cf_{sat}f_{Maneuver_left} = -1.

- R_1^{1-2} IF event(f_{Line}) and CF_{sat}f_{Line_out} is high
and CF_{f_Moving_mark} is high
THEN cf_{sat}f_{Line_out} = -1,
cf_{sat}f_{U_Moving_mark} = 1, cf_{sat}f_{Line_in} = 1;
- R_2^{1-2} IF event(f_{Line}) and CF_{sat}f_{Line_out} is high
and CF_{f_Moving_dist} is high (17)
THEN cf_{sat}f_{Line_out} = -1,
cf_{sat}f_{U_Moving_dist} = 1, cf_{sat}f_{Line_in} = 1;

- R_3^{1-2} IF event(f_{Line}) and CF_{sat}f_{Line_out} is high
and CF_{f_Moving_azim} is high
THEN cf_{sat}f_{Line_out} = -1,
cf_{sat}f_{U_Moving_azim} = 1, cf_{sat}f_{Line_in} = 1.

Знання про можливі стратегії управління представлені множиною правил:

- R_1^0 IF CF_{sat}f_{U_Maneuver_right_mark} is high
and CF_{sat}f_{Line_out} is high
THEN U_{Maneuver_right_mark};
- R_3^0 IF CF_{sat}f_{U_Maneuver_left_mark} is high
and CF_{sat}f_{Line_out} is high
THEN U_{Maneuver_left_mark};
- R_9^0 IF CF_{sat}f_{U_Maneuver_right_azim} is high
and CF_{sat}f_{Line_out} is high
THEN U_{Maneuver_right_azim};
- R_{11}^0 IF CF_{sat}f_{U_Maneuver_left_azim} is high
and CF_{sat}f_{Line_out} is high
THEN U_{Maneuver_left_azim}; (18)
- R_{13}^0 IF CF_{sat}f_{U_Moving_mark} is high
and CF_{sat}f_{Line_in} is high
THEN U_{Moving_mark};
- R_{14}^0 IF CF_{sat}f_{U_Moving_dist} is high
and CF_{sat}f_{Line_in} is high
THEN U_{Moving_dist};
- R_{15}^0 IF CF_{sat}f_{U_Moving_azim} is high
and CF_{sat}f_{Line_in} is high
THEN U_{Moving_azim};
- R_{16}^0 IF CF_{sat}f_{U_Obst_i} is high
and CF_{sat}f_{Line_in} is high
THEN U_{Obst_i}.

Передбачається що в довільний момент контролю може бути реалізована тільки одна стратегія керування. Цю умову реалізують модифіковані (18)

правила. Наприклад, правило R_1^0 в (18) прийме вигляд:

$$\begin{aligned} R_1^0 \quad & \text{IF } CF_{\text{U}_\text{Maneuver_right_mark}}^{\text{sat}} \text{ is high} \\ & \text{and } CF_{\text{Line_out}}^{\text{sat}} \text{ is high} \\ \text{THEN } & U_{\text{Maneuver_right_mark}}, \\ & cf_{\text{U}_\text{Maneuver_left_mark}}^{\text{sat}} = -1, \\ & cf_{\text{U}_\text{Maneuver_right_azim}}^{\text{sat}} = -1, \dots, \\ & cf_{\text{U}_\text{Moving_azim}}^{\text{sat}} = -1. \end{aligned} \quad (19)$$

Нижче наведено алгоритм що реалізує MTS модель обробки даних від сенсорів й прийняття керуючих рішень. На кожному такті керування виконуються обчислення що приведені на рис. 5.

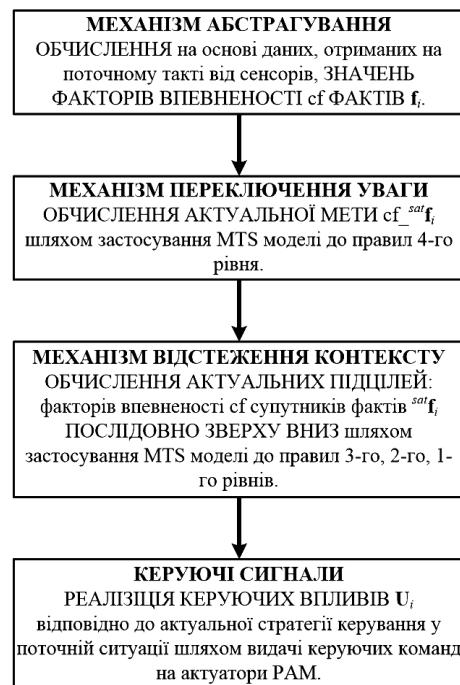


Рис. 5. Алгоритм формування керуючих впливів по модифікованій моделі TS

Модифікація моделі TS зводиться до наступного. По-перше, правило у полі ЯКЩО може мати терм $event(f_i)$. Це означає що правило застосовується механізмом виведення (MB) TS у випадку, коли сталася подія: фактор впевненості факту f_i на поточному кроці обробки даних прийняв значення $cf_{f_i} > \varepsilon$, а на попередньому кроці ця умова не виконувалася. Коли на поточному кроці з фактом f_i події не відбувається, то правило, яке входить факт f_i вимикається з обробки механізмом TS (в класичних продукційних системах штучного інтелекту це правило є таким що викреслюється). По-друге, якщо супутник $sat f_i$ фактіу f_i активовано $cf_{sat f_i} = 1$ (поточна мета актуальна), то механізм контексту приділяє ідентифікації події цим фактом більш уваги, що реалізовано шляхом зменшення порогу ε в умові визначення події $cf_{f_i} > \varepsilon - \Delta$, де Δ – експериментально обрана константа. Інші пояснення до алгоритму дані нижче при обговоренні результатів емуляції (табл. 1) проїзду РАМ по маршруті $Route_1$. У першому стовбці наведено множину фактів та їх супут-

ників що задіяні в маршруті $Route_1$. Інші стовбці відповідають подіям що породжуються зміною ситуації при переміщенні РАМ вздовж маршруту.

Крок 0. Початкова ситуація: РАМ знаходиться в режимі очікування будь якої події про що свідчать $cf_{sat f_{Start_1}} = 1$, $cf_{sat f_{Obst_1}} = 1$.

Крок 1. На цьому кроці відбулася подія $cf_{f_{Start_1}} > \varepsilon - \Delta$ для $\varepsilon = 0.75$, $\Delta = 0.25$, оскільки $cf_{f_{Start_1}} = 0.8$. В табл. 1 комірки для факторів впевненості, значення яких мало місце на початку кроці обробки MTS відображені зеленим кольором, події для цих фактів – рожевим, результати обчислень правил – жовтим. Для цієї ситуації MB MTS буде застосовано тільки одне правило на верхньому рівні R_1^4 , яке визначить $cf_{sat f_{Route_1}} = 1$,

$cf_{sat f_{LM_5}} = 1$, $cf_{sat f_{Line_in}} = 1$. Умови для активізації будуть яких правил нижчих рівнів відсутні, тому немає більш змін в статусі фактів.

Крок 2. Актуалізовани на попередньому кроці ціль переміщення $sat f_{Route_1}$ та перша підціль маршруту $sat f_{LM_5}$ активізувало механізм переключення уваги. Це дозволило на поточному кроці обробки даних обчислити значення фактів у тому числі $cf_{f_{LM_5}} = 0.9$ і зареєструвати подію $cf_{f_{LM_5}} > \varepsilon - \Delta$. Для цієї ситуації MB MTS на третьому рівні буде активізовано правило $R_{1,1}^3$, яке визначить $cf_{sat f_{LM_5}} = -1$, $cf_{sat f_{LM_2}} = 1$. На першому підрівні другого рівня на цьому кроці з'являється факт $cf_{f_{In_N}} = 1$, через що буде активізовано правило R_9^{2-1} , в результаті визначається $cf_{sat f_{Out_W}} = 1$. На другому підрівні другого рівня активізується правило R_4^{2-2} , що визначає $cf_{sat f_{Out_W}} = -1$, $cf_{sat f_{Maneuver_right}} = 1$. В табл. 1 блакитним кольором показано факт, що на одному кроці активізується та деактивізується.

Крок 3. На цьому кроці відбулася подія $cf_{f_{Line}} > \varepsilon - \Delta$ оскільки $cf_{f_{Line}} = 0.8$. З'являються факти $f_{Maneuver_mark} = 1$ та $LM f_{Safe} = 1$. Застосовується правило R_1^{1-1} , тобто $cf_{sat f_{Line_out}} = 1$, $cf_{sat f_{U_Maneuver_right_mark}} = 1$, $cf_{sat f_{Line_in}} = -1$, $cf_{sat f_{Maneuver_right}} = -1$, $cf_{sat f_{U_Maneuver_right_mar}} = 1$. Правило нульового рівня R_1^0 запускає на виконання стратегію $U_{Maneuver_right_mark}$.

Крок 4. На цьому кроці відбулася подія $cf_{f_{Line}} > \varepsilon - \Delta$, оскільки $cf_{f_{Line}} = 0.9$. З'являється факт f_{Moving_mark} . Застосовується правило R_1^{1-2} , що визначає $cf_{sat f_{Line_out}} = -1$, $cf_{sat f_{U_Moving_mark}} = 1$ та $cf_{sat f_{Line_int}} = 1$. Правило R_{13}^0 для якого виконується умова $cf_{sat f_{U_Moving_mark}} = 1$ запускає на виконання стратегію U_{Moving_mark} . РАМ починає рух до LM_2 (рис. 4).

Крок 4a. На цьому кроці ситуація, коли РАМ рухається між LM_5 й LM_2 без перешкод, задовільняє вимогам тільки одного правила R_{13}^0 в (18) із зауваженнями (19). Згідно цього правила стратегія керування зберігається без змін.

Таблиця 1 – Результати комп’ютерного експерименту cf_fi

Факт	Номери кроків обробки даних від сенсорів																
	0	1	2	3	4	4a	4б	5	...	14	14а	14б	14г	14д	14е	15	...
f_{Start}	-1	0.8	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
$sat f_{Start}$	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
$sat f_{Route}$	-1	1	1	1	1	1	1	1	...	1	1	1	1	1	1	1	...
f_{Obst}	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
$sat f_{Obst}$	1	1	1	1	1	1	1	1	...	1	1	1	1	1	1	1	...
$sat f_{Opsti}$	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
$sat f_{Obsti_mark}$	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
f_{LM5}	-1	-1	0.9	0.9	0.9	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
$sat f_{LM5}$	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
f_{LM2}	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
$sat f_{LM2}$	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
f_{LM3}	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
$sat f_{LM3}$	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
f_{LM7}	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	1	1	1	1	-1	-1	-1	...
$sat f_{LM7}$	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
f_{LM11}	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	...
$sat f_{LM11}$	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	1	1	1	-1	-1	-1	...
f_{LM13}	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	...
$sat f_{LM13}$	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	1	1	1	1	1	1	-1	...
f_{LM15}	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
$sat f_{LM15}$	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	...
f_{Out_E}	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
$sat f_{Out_S}$	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
$sat f_{Out_W}$	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
f_{In_N}	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	...	1	1	-1	-1	1	-1	-1	...
f_{In_E}	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
f_{In_W}	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	...
$sat f_{Maneuver_left}$	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	...	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	...
$sat f_{Maneuver_right}$	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
$sat f_{Maneuver_forward}$	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	...
f_{Line}	-1	-1	-1	0.8	0.9	-1	-1	-1	...	-1	-1	1	1	-1	1	-1	...
$sat f_{Line_in}$	-1	1	1	-1	1	1	1	1	...	1	1	-1	1	1	-1	1	...
$sat f_{Line_out}$	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	...
f_{Safe}	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	...
$f_{Maneuver_mark}$	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	0.8	...	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	...
$sat f_{Maneuver_mark}$	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
$sat f_{U_Maneuver_left_mark}$	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	...
$sat f_{U_Maneuver_right_mark}$	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
$sat f_{U_Maneuver_forward_mark}$	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	...
f_{Moving_dist}	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	...
f_{Moving_mark}	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
$sat f_{U_Moving_dist}$	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	1	1	-1	1	-1	...
$sat f_{U_Moving_mark}$	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
$U_{Maneuver_left_mark}$	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	...
$U_{Maneuver_right_mark}$	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
$U_{Maneuver_forward_mark}$	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
U_{Moving_dist}	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	...
U_{Moving_mark}	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...
U_{Obsti}	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	...	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	...

Крок 4б. На цьому кроці моделюється поява перешкоди на шляху РАМ. Для спрощення припускається, що факт f_{Obst_i} у правилі (4) достовірно ідентифікує перешкоду, наприклад, яку можливо об’їхати справа на основі даних від сенсору відстані. Нижче наведені додаткові правила які активують стратегію керування оминанням перешкоди поки знову не з’явиться розмітка:

$$\begin{aligned}
 R_i^4 \quad & \text{IF } event(f_{Obst_i}) \text{ and } CF_{sat f_{Obst_i}} \text{ is high} \\
 & \text{THEN } cf_{sat f_{U_Obst_i}} = 1, \\
 & cf_{sat f_{Maneuver_mark}} = 1, cf_{sat f_{Obst_i_mark}} = 1; \quad (20)
 \end{aligned}$$

and $CF_{sat f_{Maneuver_mark}}$ is high
 and $CF_{sat f_{Obst_i_mark}}$ is high

$$\begin{aligned}
 \text{THEN } cf_{sat f_{U_Moving_mark}} &= 1, \\
 cf_{sat f_{Maneuver_mark}} &= -1, \\
 cf_{sat f_{Obst_i_mark}} &= -1.
 \end{aligned}$$

Крок 5. Аналогічно до кроку 2, коли досягнуто LM_2 . Крохи 6-13 відображають симуляцію безперешкодного руху на ділянках (LM_2, LM_3, LM_6, LM_7). Крохи 5, 8, 11, 14 описують ситуації, коли виникає подія, появ’язана із прибуттям РАМ до чергового LM за маршрутом $f_{LM_{i,i+1}}$, напрямку виїзду з LM cf_{Out_dir} та типу маневру $cf_{Maneuver_type}$, що необхідно виконати для проїзду LM . Крохи 6, 9, 12, 15. описують ситуації, коли виникає подія досягнення старт-стоп лінії на в’їзний дорозі f_{Line} . З’являються факти $f_{Maneuver_method}$

методу виконання маневру для проїзду LM та безпечності проїзду \mathbf{f}_{Safe} . Актуалізуються супутники фактів появи старт-стоп лінії на виїзний дорозі ${}^{sat}\mathbf{f}_{Line_out}$ та стратегії проїзду LM. Запускається стратегія керування рухом $\mathbf{U}_{Maneuver_type_method}$. На кроках 7, 10, 13, 16 виникає подія досягнення старт-стоп лінії на виїзний дорозі \mathbf{f}_{Line} відповідних LM. З'являється факт методу руху по виїзний дорозі $\mathbf{f}_{Moving_method}$. Актуалізуються супутники фактів появи старт-стоп лінії на виїзний дорозі ${}^{sat}\mathbf{f}_{Line_in}$ та стратегії руху на виїздних дорогах. Запускаються стратегії керування рухомна на виїзних дорогах $\mathbf{U}_{Moving_method}$. Крок 17 описує подію появи ознак кінцевого LM за маршрутом \mathbf{f}_{LM14} . Виконується деактуалізація факту руху по маршруті ${}^{sat}\mathbf{f}_{Route1}$. Актуалізуються факти, що показують готовність РАМ до виконання нових завдань ${}^{sat}\mathbf{f}_{Start1}$.

Особливості уваги заслуговують кроки 14, 14а, 14б, 14в. На 14-му кроці досягнуто LM_7 . На кроці 14а моделюється небезпечна ситуація: рух на ділянці $LM_7 - LM_{13}$ небезпечний ($CF_f_{Safe} \text{ is low}$). Тому правило з (16) не буде активізованим і, як наслідок, не буде визначена стратегія керування. Якщо базу знань доповнити правилами об'їзду з LM_7 через LM_{11} до LM_{13} , то далі рух по маршруті буде продовжений. Нижче наведено правило об'їзду небезпечної ділянки

$$\begin{aligned} R_{j,7}^3 & \text{ IF } CF_f_{Safe} \text{ is low and } CF_{}^{sat}\mathbf{f}_{LM_{13}} \\ & \quad \text{is high and } CF_f_{LM_7} \text{ is high} \\ & \text{THEN } cf_{}^{sat}\mathbf{f}_{LM_{11}} = 1, cf_{}^{sat}\mathbf{f}_{detour} = 1 \end{aligned}$$

після активізації якого будуть активізованими правила з (14), що вкажуть напрям виїзду до LM_{11} і правила нижчих рівнів що активізують стратегію управління рухом від LM_7 через LM_{11} . Крохи 14г, 14д, 14е описують ситуації проїзду від LM_{11} до LM_{13} . Оскільки поточна ціль перерваного руху по маршруті

$CF_{}^{sat}\mathbf{f}_{LM_{13}}$ is high весь час об'їзду залишається активною, то при досягненні LM_{11} планування маршруту відбувається на початковій базі правил що і для маршруті без перешкод.

Особливість полягає в необхідності деактивізації факту $cf_{}^{sat}\mathbf{f}_{detour} = -1$.

Висновки і напрямки подальших досліджень

Дослідження моделі сприйняття, заснованої на правилах, показали спроможність її імплементації для класу задач навігації роботу. Модель сприйняття що інтегрована з модифікованою моделлю Такагі-Сугено вирішує завдання ситуаційного керування та перепланування маршруту і задовольняє вимогам щодо автономних систем та має переваги в порівнянні з методами програмного та евристичного керування за такими критеріями:

- гнучкість забезпечується завдяки представленню нечіткими правилами різного рівня узагальнення знання про цілі, маршрут й план усунення перешкод, картографічні знання про робочій простір, стратегії і конкретні керівні рішення, що дозволяє адаптувати знання під конкретні умови без пере програмування системи керування;

- масштабованість забезпечується заміною фрагментів бази знань. На рівні маршрутів додаються нові правила що задають ділянки маршруту між двома суміжними маркерами. На рівні картографічних даних додаються правила що описують зв'язки нових маркерів з існуючими. На рівні функціональних можливостей роботу додаються правила що описують нові стратегії поведінки та керування роботом. На рівні інформаційного забезпечення додаються нові факти що описують відповідні концепти, побудовані на даних від доданих в систему нових сенсорів;

- опрацювання невизначеності забезпечується механізмами відстеження контексту та перемикання уваги, завдяки яким знання про перешкоди та стратегії їх подолання автоматично застосовуються у небезпечних ситуаціях. Результати комп'ютерних експериментів підтвердили можливості роботу щодо автономного виконання завдання у ситуаціях коли, по-перше, перешкоди що потребують ситуаційного перепланування фрагменту маршруту або усунення завади шляхом переключення на іншу стратегію, по-друге, через перешкоди недостатньо інформації для вирішення завдання локалізації роботу.

Подальші дослідження націлені на створення механізмів адаптації й навчання щодо автоматичної побудови картографічних знань.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Mintchell G. Industry 4.0 survey: building the digital enterprise. 2016. URL: <https://themanufacturingconnection.com/2016/09/industry-4-0-survey-building-digital-enterprise>.
2. Darlington P. Rail industry capability delivery plan. 2017. URL: <https://www.railengineer.co.uk/2017/02/16/rail-industry-capability-delivery-plan>.
3. Duarte F., Ratti C. The impact of autonomous vehicles on cities: a review. *Journal Of Urban Technology*. 2018. No. 25 (4), pp. 3-18. DOI: <https://doi.org/10.1080/10630732.2018.1493883>.
4. Stachniss C. Robotic mapping and exploration. Springer-Verlag Berlin, 2009. 198 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01097-2>.
5. Rone W., Ben-Tzvi P. Mapping, localization and motion planning in mobile multi-robotic systems. *Robotica*. Cambridge University Press, 2013. No. 31 (1), pp. 1-23. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0263574712000021>.
6. Bresson G., Alsayed Z., Yu L., Glaser S. Simultaneous localization and mapping: a survey of current trends in autonomous driving. *IEEE Trans. On Intelligent Vehicles*, 2017. No. 2 (3), pp. 194-220. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIV.2017.2749181>.
7. Fuentes-Pacheco J., Ruiz-Ascencio J., Rendón-Mancha J. Visual simultaneous localization and mapping: a survey. *Artificial Intelligence Review*, 2012. No. 43 (1), pp. 55-81. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10462-012-9365-8>.
8. Hoy M., Matveev A., Savkin A. Algorithms for collision-free navigation of mobile robots in complex cluttered environments: a survey. *Robotica*, 2014. No. 33 (3), pp. 463-497. DOI: <https://doi.org/10.1017/s0263574714000289>.
9. Lv T., Zhao C., Bao J. A global path planning algorithm based on bidirectional SVGA. *Journal Of Robotics*, 2017. Vol. 2017, pp. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/8796531>.

10. Lu Y., Xue Z., Xia G., Zhang, L. A survey on vision-based UAV navigation. *Geo-Spatial Information Science*, 2018. No. 21(1), pp. 21-32. DOI: <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1420509>.
11. Mac T., Copot C., Tran D. De Keyser, R. Heuristic approaches in robot path planning: A survey. *Robotics And Autonomous Systems*, 2016. Vol. 86, pp. 13-28. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2016.08.001>.
12. Yufka A., Parlaktuna O. Performance comparison of bug algorithms for mobile robots. *5th International Advanced Technologies Symposium (IATS'09)*, 2009. pp. 61-65. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2043.7920>.
13. McGuire K., de Croon G., Tuyls, K. A comparative study of bug algorithms for robot navigation. *Robotics And Autonomous Systems*, 2019. Vol. 121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.103261>.
14. Russel S., Norvig, P. Artificial intelligence: a modern approach. Prentice Hall, 2010, 1132 p.
15. Asada M., Hosoda K., Kuniyoshi Y., Ishiguro H., Inui T. Cognitive Developmental Robotics: A Survey. *IEEE Trans. On Autonomous Mental Development*, 2009. No. 1 (1), pp. 12-34. DOI: <https://doi.org/10.1109/tamd.2009.2021702>.
16. Alippi C. Intelligence for Embedded Systems. Springer International Publishing, 2014. 283 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-05278-6>.
17. Kargin A., Petrenko, T. Spatio-Temporal Data Interpretation Based on Perceptual Model. In Mashtalir V., Ruban I., and Levashenko V. (eds) *Advances in Spatio-Temporal Segmentation of Visual Data*, Studies in Computational Intelligence, 2020. Vol. 876. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-35480-0_3.
18. Kargin A., Panchenko S., Vasiljevs A., Petrenko, T. Implementation of cognitive perception functions in fuzzy situational control model. *Procedia Computer Science*, 2019. Vol. 149, pp. 231-238. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.01.128>.
19. Каргин А.А., Петренко Т.Г. Абстрагирование и категоризация в умных машинах на основе гранулярных вычислений. *Вісник НТУ "ХПІ"*, 2017. №50. С. 130-141. DOI: <https://doi.org/10.20998/2411-0558.2017.50.06>.
20. Каргин А.А. Введение в интеллектуальные машины. Кн. 1. Интеллектуальные регуляторы. Норд-Пресс, Донецк, 2010. 526 с.
21. Kargin A., Ivaniuk O., Galych G., Panchenko A. Polygon for smart machine application. *2018 IEEE 9th Int. Conf. on Dependable Systems, Services and Technologies*. IEEE, 2018. Pp. 464-468. DOI: <https://doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409178>.

REFERENCES

1. Mintchell, G. (2016), “Industry 4.0 survey: building the digital enterprise”. Available at: <https://themanufacturingconnection.com/2016/09/industry-4-0-survey-building-digital-enterprise>.
2. Darlington, P. (2017), “Rail industry capability delivery plan”. Available at: <https://www.railengineer.co.uk/2017/02/16/rail-industry-capability-delivery-plan>.
3. Duarte, F. and Ratti, C. (2018), “The impact of autonomous vehicles on cities: a review”, *Journal Of Urban Technology*, No. 25 (4), pp. 3-18, DOI: <https://doi.org/10.1080/10630732.2018.1493883>.
4. Stachniss, C. (2009), *Robotic mapping and exploration*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 198 p., DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01097-2>.
5. Rone, W. and Ben-Tzvi, P. (2013), “Mapping, localization and motion planning in mobile multi-robotic systems,” *Robotica*. Cambridge University Press, No. 31 (1), pp. 1-23, DOI: <https://doi.org/10.1017/S0263574712000021>.
6. Bresson, G., Alsayed, Z., Yu, L. and Glaser, S. (2017), “Simultaneous localization and mapping: a survey of current trends in autonomous driving”, *IEEE Trans. On Intelligent Vehicles*, No. 2 (3), pp. 194-220, DOI: <https://doi.org/10.1109/TIV.2017.2749181>.
7. Fuentes-Pacheco, J., Ruiz-Ascencio, J. and Rendón-Mancha, J. (2012), “Visual simultaneous localization and mapping: a survey”, *Artificial Intelligence Review*, No. 43 (1), pp. 55-81, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10462-012-9365-8>.
8. Hoy, M., Matveev, A. and Savkin, A. (2014), “Algorithms for collision-free navigation of mobile robots in complex cluttered environments: a survey”, *Robotica*, No. 33 (3), pp. 463-497, DOI: <https://doi.org/10.1017/s0263574714000289>.
9. Lv, T., Zhao, C. and Bao, J. (2017), “A global path planning algorithm based on bidirectional SVGA”, *Journal Of Robotics*, Vol. 2017, pp. 1-11, DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/8796531>.
10. Lu, Y., Xue, Z., Xia, G. and Zhang, L. (2018), “A survey on vision-based UAV navigation”, *Geo-Spatial Information Science*, No. 21 (1), pp. 21-32, DOI: <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1420509>.
11. Mac, T., Copot, C., Tran, D. and De Keyser, R. (2016), “Heuristic approaches in robot path planning: A survey”, *Robotics And Autonomous Systems*, Vol. 86, pp. 13-28, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2016.08.001>.
12. Yufka, A. and Parlaktuna, O. (2009), “Performance comparison of bug algorithms for mobile robots”, *5th International Advanced Technologies Symposium (IATS'09)*, pp. 61-65, DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2043.7920>.
13. McGuire, K., de Croon, G. and Tuyls, K. (2019), “A comparative study of bug algorithms for robot navigation”, *Robotics And Autonomous Systems*, Vol. 121, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.103261>.
14. Russel, S. and Norvig, P. (2010), *Artificial intelligence: a modern approach*, Prentice Hall, 1132 p.
15. Asada, M., Hosoda, K., Kuniyoshi, Y., Ishiguro, H. and Inui, T. (2009), “Cognitive Developmental Robotics: A Survey”, *IEEE Trans. On Autonomous Mental Development*, No. 1 (1), pp. 12-34, DOI: <https://doi.org/10.1109/tamd.2009.2021702>.
16. Alippi, C. (2014), *Intelligence for Embedded Systems*, Springer International Publishing, 283 p., DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-05278-6>.
17. Kargin, A. and Petrenko, T. (2020), “Advances in spatio-temporal segmentation of visual data” in Mashtalir, V., Ruban, I., and Levashenko, V. (eds) *Advances in Spatio-Temporal Segmentation of Visual Data*, Studies in Computational Intelligence, Vol. 876. Springer, Cham, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-35480-0_3.
18. Kargin, A., Panchenko, S., Vasiljevs, A. and Petrenko, T. (2019), “Implementation of cognitive perception functions in fuzzy situational control model”, *Procedia Computer Science*, Vol. 149, pp. 231-238, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.01.128>.
19. Kargin, A. and Petrenko, T. (2017), “Abstragirovaniye i kategorizatsiya v umnyih mashinah na osnove granulyarniyh vyis-chisleniy [Abstraction and categorization in smart machines based on granular computations]”, *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnogo universytetu “KhPI”*, No. 50, pp. 130-141, DOI: <https://doi.org/10.20998/2411-0558.2017.50.06>.
20. Kargin, A. (2010) *Vvedenie v intellektualnyie mashiny. Kniga 1. Intellektualnyie regulatoryi* [Introduction to intelligent machines. Book 1. Intelligent Regulators], Nord-Press, Donetsk, 526 p.
21. Kargin, A., Ivaniuk, O., Galych, G. and Panchenko, A. (2018), “Polygon for smart machine application”, *2018 IEEE 9th Int. Conf. on Dependable Systems, Services and Technologies*. IEEE, pp. 464-468, DOI: <https://doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409178>.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Каргін Анатолій Олексійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних технологій, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна;

Anatolii Kargin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Information Technology, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: kargin@kart.edu.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2885-9071>.

Іванюк Олександр Ігорович – аспірант кафедри інформаційних технологій, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна;

Oleksandr Ivaniuk – PhD student of the Department of Information Technology, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: ivaniuk@kart.edu.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4007-2215>.

Модель ситуаціонного планирования и управлениння перемещениями автономного робота

А.А. Каргин, А.И. Иванюк

Аннотация. На сегодня актуальной является проблема навигации автономных мобильных систем в пространстве где возможны возмущения. Проблема заключается в том, что различные возмущения, возникающие в процессе движения робота, не позволяют реализовать перемещение вдоль заранее запланированного маршрута и требуют текущей перепланировки в соответствии с полученной от датчиков ситуации. Для автономных систем проблема усугубляется необходимостью автоматического формирования модели текущей ситуации на основе данных от сенсоров и интегрировании этой модели ситуации с моделями планирования и управления в реальном времени. **Предметом исследования** является знаниеориентированные модели обработки данных от сенсоров, применяемые в навигации автономных мобильных систем. **Цель исследования** – имплементация когнитивной модели восприятия, основанной на правилах, для класса задач ситуационного управления и перепланировки движения автономного робота вдоль маршрута в условиях помех. Исследовать способность модели удовлетворить требованиям к автономным системам. **Результаты.** Модель восприятия данных от сенсоров представлена множеством многоуровневых фактов, в вербальной форме на разных уровнях обобщения, описывающих текущую ситуацию в окружении робота. База знаний, которой пользуется робот при навигации, представлена пятиуровневой иерархической структурой нечетких правил: знания о целях, маршруте и плане устранения препятствий, картографические знания о рабочем пространстве, стратегиях и конкретных управляющих воздействиях, необходимых для достижения цели. Разработаны алгоритм и программа, в которой интегрированы модель восприятия и модифицированная модель Такаги-Сугено, которая реализует ситуационное управление с перепланировкой маршрута. Для исследования модели разработаны искусственное окружение и приведены результаты компьютерных экспериментов по перемещению робота по заданному маршруту в окружении с препятствиями. **Выводы.** Показана состоятельность имплементации модели восприятия для класса задач навигации робота. Модель восприятия, интегрированная с модифицированной моделью Такаги-Сугено, решает задачи ситуационного управления с перепланировкой маршрута и удовлетворяет требованиям автономных систем и имеет преимущества по сравнению с методами программного и эвристического управления по критериям гибкости, масштабируемости и обработки неопределенности.

Ключевые слова: мобільний робот; ситуаціонне планировання і управління; навігація; когнітивна модель восприяния; нечітки системи; дані від сенсорів.

Autonomous robot motion control situational planning model

Anatolii Kargin, Oleksandr Ivaniuk

Abstract. Today, the urgent problem is the autonomous mobile systems navigation in a space where disturbances are possible. The problem is that various disturbances that occur during the robot motion do not allow movement along a pre-planned route and require ongoing re-planning in accordance with the situation received from the sensors. For autonomous systems, the problem is complicated by the need to automatically generate the current situation model based on data from sensors and integrate this situation model with real-time planning and control models. **The subject of the research** is the knowledge-based models of processing data from sensors used in the autonomous mobile systems navigation. **The purpose of the study** is the implementation of a rule-based perception cognitive model for the situational control tasks class and re-planning the autonomous robot motion along a route under interference. Investigate the model ability to meet the autonomous systems requirements. **Results.** Perception data model from sensors is represented by multilevel facts set, in verbal form at generalization different levels, describing the current situation in the robot environment. The knowledge base that the robot uses when navigating is represented by the fuzzy rules five-level hierarchical structure: knowledge about the goals, route and plan for obstacles avoidance, cartographic knowledge about the workspace, strategies and specific control actions necessary to achieve the goal. An algorithm and a program in which the perception model and the modified Takagi-Sugeno model are integrated, which implements situational control with route re-planning have been developed. To study the model, an artificial environment was developed and the results of computer experiments on moving the robot along a given route surrounded by obstacles are presented. **Conclusions.** The consistency of the perception model implementation for the robot navigation tasks class is shown. The perception model, integrated with the modified Takagi-Sugeno model, solves the situational control problems with route re-planning and satisfies the autonomous systems requirements and has advantages over the program methods and heuristic management according to the criteria of flexibility, scalability and processing of uncertainty.

Keywords: mobile robot; situational planning and control; navigation; perception cognitive model; fuzzy systems; data from sensors.

Yelyzaveta Meleshko¹, Oleksandr Drieiev¹, Anas Mahmoud Al-Oraiqat²

¹ Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

² Onaizah University, Onaizah, Kingdom of Saudi Arabia

THE IMPROVED MODEL OF USER SIMILARITY COEFFICIENTS COMPUTATION FOR RECOMMENDATION SYSTEMS

Annotation. The subject matter of the article is a model of calculating the user similarity coefficients of the recommendation systems. The urgency of the development is determined by the need to improve the quality of recommendation systems by adapting the time characteristics to possible changes in the similarity coefficients of users. The goal is the development of the improved model of user similarity coefficients calculation for recommendation systems to optimize the time of forming recommendation lists. The tasks to be solved are: to investigate the probability of changing user preferences of a recommendation system by comparing their similarity coefficients in time, to investigate which distribution function describes the changes of similarity coefficients of users in time. The methods used are: graph theory, probability theory, radioactivity theory, algorithm theory. Conclusions. In the course of the researches, the model of user similarity coefficients calculating for the recommendation systems has been improved. The model differs from the known ones in that it takes into account the recalculation period of similarity coefficients for the individual user and average recalculation period of similarity coefficients for all users of the system or a specific group of users. The software has been developed, in which a series of experiments was conducted to test the effectiveness of the developed method. The conducted experiments showed that the developed method in general increases the quality of the recommendation system without significant fluctuations of Precision and Recall of the system. Precision and Recall can decrease slightly or increase, depending on the characteristics of the incoming data set. The use of the proposed solutions will increase the application period of the previously calculated similarity coefficients of users for the prediction of preferences without their recalculation and, accordingly, it will shorten the time of formation and issuance of recommendation lists up to 2 times.

Keywords: recommendation systems; similarity coefficients; collaborative filtering; data analysis; optimization.

Introduction

Recommendation systems (RSs) are a powerful tool for goods and services digital marketing. They are often used on web-resources with a large number of users and items. In this case, during the recommendation system operation, there may be a shortage of computing resources and a decrease in its work quality. The analysis of the main criteria for the

evaluation of RSs allowed us to present the main characteristics of their work quality as shown in Fig. 1.

Each of these characteristics has a significant effect on the quality of the recommendation system, but it should be noted that first of all system users form their judgments about the recommendation system in the process of its operation. However, this evaluation is largely influenced by the characteristic of the time (speed) of the recommendation.

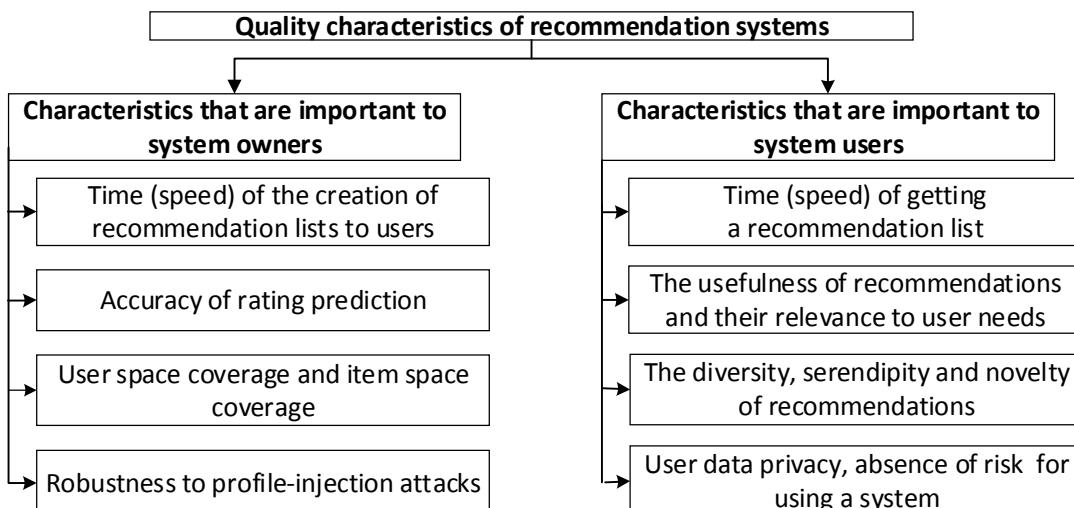


Fig. 1. The main quality characteristics of recommendation systems

The conducted research has shown that the main time components of formation and issuance of recommendations in RSs are:

– t_{coef} the computing time of the similarity coefficients between users (or items) for *memory-based*

algorithms (or the computing time of latent factors for model-based algorithms);

– t_{pred} the time of predicting individual preferences based on user actions and similarity coefficients for *memory-based* algorithms (or the time

of predicting individual preferences based on latent factors for model-based algorithms);

- t_{form} the formation time of Top N preferences to create recommendation lists for users based on predicted ratings.

The conducted research has shown that one of the main indicators that affect the total time of creating recommendations is the time computing similarity coefficients between users. This is largely due to the significant increase in the use of RSs, their introduction into a wide range of applications, a significant increase in the quantity of these systems users. As well as an increase in the quantity of the content items amount, and consequently an increase in the frequency of changes in the users' preferences, and therefore their similarity coefficients.

One way to optimize this characteristic is to predict changes in user interests and adapt the RSs to identified trends in time characteristics.

Thus, the question of improving the quality of recommendation systems by adapting the time characteristics to possible changes in preferences of users becomes topical.

Analysis of the literature [1-17] showed that there are currently many methods and models for improving the quality of recommendation systems. One of the main ways to achieve this is to use hybrid RSs. It should be noted that one of the main means of formation recommendations in hybrid systems is collaborative filtering, using either *user-based* or *item-based* approaches. In works [1-7] describes the basic models of collaborative filtering: *memory-based* and *model-based*.

The conducted research has shown that the *memory-based* approach is simpler, has high accuracy, can use incremental input of new data. However, this approach is *resource-intensive*, cannot provide a descriptive analysis of existing patterns, give more insight into available data, and explain a prediction.

At the same time, *model-based* methods have models that give a greater understanding of formed recommendations, as well as the process of generating recommendations is divided into two stages: *resource-intensive* model training in the pending mode and simple computing recommendations based on the existing model in real times. The disadvantages of this approach are that it does not support incremental learning and have a lower accuracy of prediction.

One of the main reasons for the high resource consumption of *user-based*, based on *memory-based* collaborative filtering methods, is to use the procedure computing similarity coefficients between users whenever it is necessary to form recommendations. Currently, statistics changes in user behavior are not counted for reducing the frequency of the recomputing their similarity coefficients, so there is no possibility to adapt the recomputing time of similarity coefficients to the probability of their change.

In the works [1, 18-23] models of user preference change dynamics in time, both for periodic and for non-periodic changes, were researched and proposed. These models were developed and used to increase the work accuracy of recommendation systems, but not to

reduce the recalculating frequency of user similarity coefficients.

This work proposes to improve the recommendation lists formation method in such systems by using statistics on user behavior when using collaborative filtering to reduce the formation time of recommendations.

The conducted research has shown that the similarity coefficients recompute can be used not only to form recommendations but also, to identify the networks of bots. Bots from the same network will have consistently the same preferences because since they will have the same target items for rating changes. Such bots should be identified and their data disregarded when recommendation lists formation created for normal users. A sign of a bot network will be the presence of a certain quantity of users with similarity coefficients between them equal or very close to one $1 - \varepsilon \leq k \leq 1$. In this case, the question arises how often the similarities between users be recomputed? Moreover, for how long should the similarity coefficients for the detected suspicious user group remain the same to make sure that it is a bot network?

In this formulation of the problem, it becomes justified to use *user-based* and *memory-based* collaborative filtering, because it is necessary to determine namely the similarity between users. In this case, the prediction of ratings and generating recommendation lists can generally be based on other methods and models. This can lead to delays in customer service when users need to wait for recommendations unsatisfactorily long. To reduce the load on computing resources, it is advisable to determine which data of a recommendation system does not lose its relevance for a certain period and to recompute them no more frequently than with the defined periodicity.

In *neighborhood-based* models of recommendation systems [1-5], the creation of a user recommendation list can be divided into three separate processes:

1. Computing the similarity coefficients between users (or items).
2. Predicting individual preferences based on the similarity coefficients.
3. Create a Top N of preferences to form recommendation lists for users based on predicted preferences.

This paper proposes to reduce the quantity of computations related to the recomputation of user similarity coefficients. Namely, the similarity coefficients between pairs of users to recompute not every time the recommendation lists are formed, but only when such a recomputation is required. The similarity coefficients between user pairs of a recommendation system may remain unchanged for some time but will change eventually. There may be several reasons for changing the similarity coefficients between users:

1. The *cold-start* problem: When new users are added to the system their preferences are not known, arises a *cold-start* problem [8], recommendations for new users are created based on contextual (including

demographic) and popular data. When the first actions of the user appear, it is possible to compute similarity coefficients for him, but this information is few at the beginning, so they do not fully reflect the preferences of the user and his similarity to other users. Therefore, even with a small amount of new data about such a user, the recompute of similarity coefficients for him can give significantly different values.

2. Changing preferences or the *continuous cold-start* problem. In practically implemented recommendation systems, user preferences have a frequent change that may be related to changing a user's needs or changing their tastes and interests. Changing the preferences of already known users of a recommendation system, which has accumulated enough information to correctly identify their tastes, is known in scientific publications as the *continuous cold-start* problem [9].

Recommendation systems based on collaborative filtering are most sensitive to the *cold-start* problem, and therefore the *continuous cold-start* problem [1, 8, 9]. Thus, the conducted researches have shown that the main components of the improved method of formation recommendation lists can be an improved model of recomputing similarity coefficients of users (items), a time optimization model of similarity coefficients recomputation. Consider the main components of forming the recommendation lists method in more detail.

The improved model of computing user similarity coefficients

The conducted researches have shown that the basis for developing the improved model of computing similarity coefficients can be the *user-based* collaborative filtering approach and testing it using the graph database *Neo4j*. In this case, similarity coefficients between users can be used Pearson correlation coefficient [24, 25]:

$$k(u_1, u_2) = \frac{\sum_{i=0}^n (r_{1i} - \bar{r}_1)(r_{2i} - \bar{r}_2)}{\sqrt{\sum_{i=0}^n (r_{1i} - \bar{r}_1)^2} \sqrt{\sum_{i=0}^n (r_{2i} - \bar{r}_2)^2}}, \quad (1)$$

where u_1 and u_2 users between whom the similarity coefficient is determined; r_1, r_2 ratings are set by 1st and 2nd users respectively; n the quantity of the items in the system; \bar{r}_1, \bar{r}_2 average ratings of 1st and 2nd users respectively.

The value $k(u_1, u_2)$ belongs to the interval from -1 to 1, where -1 corresponds to the absolute dissimilarity of users, and 1 the absolute similarity.

Formula (1) provides that it is necessary to need to compute the difference between each rating r_{1i} and the average value of the ratings \bar{r}_1 .

For optimization in real applications for computations similarity coefficients, this formula is rewritten as:

$$k(u_1, u_2) = \frac{n \cdot \sum_{i=0}^n (r_{1i} \cdot r_{2i}) - (\sum_{i=0}^n r_{1i}) \cdot (\sum_{i=0}^n r_{2i})}{\sqrt{n \cdot \sum_{i=0}^n r_{1i}^2 - (\sum_{i=0}^n r_{1i})^2} \cdot \sqrt{n \cdot \sum_{i=0}^n r_{2i}^2 - (\sum_{i=0}^n r_{2i})^2}}. \quad (2)$$

By periodically enumerating $k(u_1, u_2)$, it is possible to detect the relative change in the preferences of users u_1 and u_2 , that is, when changing $k(u_1, u_2)$ can say that u_1 or u_2 or both users changed their preferences. Other approaches should be used to detect the absolute change in the user's preferences, but in this work, the authors are interested in the relative change of preferences because due to relative change of preferences it is necessary to recompute the similarity coefficients.

Since recompute all the similarity coefficients in a database for any user at each access to the system is a labor-intensive process. In this paper, it is proposed to add to the system the following parameters: the maximum allowable *recomputation period of similarity coefficients* for each user and the maximum allowable *average recomputation period of similarity coefficients* for all users system or a specific group of users. The recomputation period of similarity coefficients can be determined based on a level of user activity in the system and a frequency of his preferences change, which should be determined based on accumulated statistics about him.

It is proposed to compute the average recomputation period of similarity coefficients based on the accumulated statistics about all system users. Besides, to use it during the process of the *cold-start* problem for an individual user, whose the authors do not have yet enough data so that to determine his recomputation period of similarity coefficients. Also, possibly divide users into groups by a specific criterion. For example, activity level, and compute for each group its average recomputation period of similarity coefficients.

Consider the example of the graph part in the database of the developed recommendation system is shown in Figure 2 and Figure 3. Therefore, Figure 2 shows the graph part of the recommendation system database after computing user similarity coefficients. As the figure shows, the developed graph database contains users and items that are written as vertices of the graph, and ratings that are written as oriented edges of the graph that connect users vertices and items vertices. Based on the ratings of formula (2), the users' similarity coefficients are computed and recorded into the database in the form of non-oriented edges between users.

In Fig. 2 schematically shows the format of recording the above vertices and edges in the developed database. Since only oriented edges can be created in DBMS *Neo4j*, both types of edges are created oriented, but in the edges of the "Similarity" type (Figure 3b), the direction of the edges is ignored during the operation of the recommendation system. This figure shows in which format in the developed system proposes to save the values of the recomputation periods of similarity coefficients.

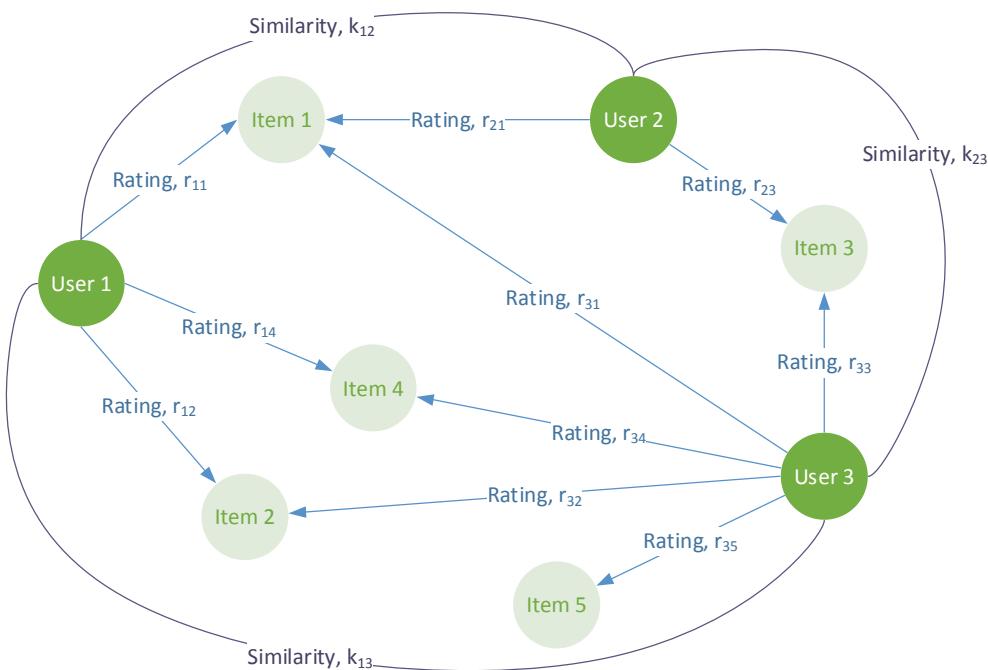


Fig. 2. The graph part of the recommendation system database after computing user similarity coefficients

Nodes, representing users, contain the label: *User* and have the property *id*. Also, nodes, meaning items, contain the label: *Item* and the property *id*. A relationship that contains user rating (Fig. 3, a) has the label: *Rated*, the property *rating* that contains a value of rating, and the property *time* that contains the value of time when the user rated item. Relationships, that containing the user similarity coefficients (Fig. 3, b), have the label: *Similarity* and the following properties:

- *coefficient* the value of the similarity coefficient,
- *recountPeriod* the recomputation period of similarity coefficients for the given user (containing the empty value at the moment of *cold-start*),
- *averageRP* the average recomputation period of similarity coefficients for all users of the system (or for a group of users to which that user belongs),
- *lastRecountTime* the last recomputation time of similarity coefficients for that given user.

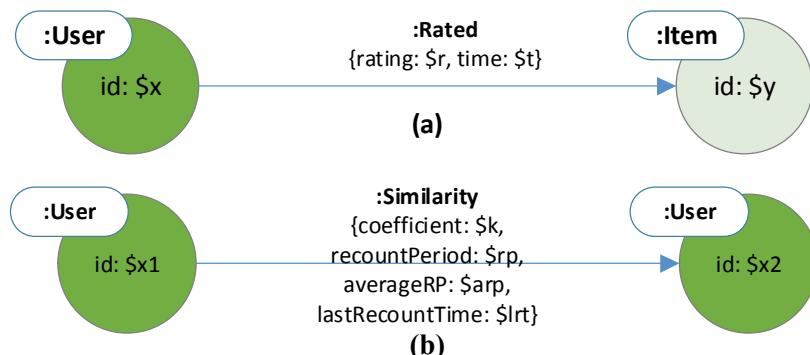


Fig. 3. The format of relationships between nodes of graph for type "Rated" (a) and type "Similarity" (b)

Thus, user similarity coefficients must be recomputed if the system requests their reading at the time $t \geq \text{lastRecountTime} + \text{recountPeriod}$ for an already known user or at the time $t \geq \text{lastRecountTime} + \text{averageRP}$ for a user during the cold-start.

After similarity coefficients are recomputed, their values are rewrites to new ones in the database, and the time of the last recomputation is recorded in the property *lastRecountTime*.

The reasons for changing the similarity coefficients between a pair of users x_1 and x_2 can be:

- User x_1 changed his preferences.

- User x_2 changed his preferences.
- Users x_1 and x_2 changed their preferences.
- Enough data about user x_1 was accumulated to more accurately determine his similarity coefficients, and the previous data was not enough to determine the correct similarity coefficients.

- Enough data about user x_2 was accumulated to more accurately determine his similarity coefficients, and the previous data was not enough to determine the correct similarity coefficients.

- Enough data about users x_1 and x_2 were accumulated to more accurately determine their similarity coefficients, and the previous data was not

enough to determine the correct similarity coefficients.

The experiment that values of the similarity coefficients between user pairs were recomputing at some time intervals, and comparing with the previous ones to determine the stability periods of the user similarity coefficients were conducted. Instability times of user similarity coefficients, to make their recomputations there is no sense. Moreover, knowing the average recomputation period of similarity coefficients, It is possible to determine the optimum intervals of time through that it is possible to recompute the similarity coefficients between users without significant loss of the system accuracy.

Experiment description

The open dataset *MovieLens* was used for the experiment [26]. This dataset was created based on the movie recommendation system. The dataset *MovieLens* contains the following data: user IDs, user ratings for movies, tags for movies (that were added by users), movie IDs, movie titles, movie genres, time of user action (namely rating time, tag creation time). Since users of this system must rate items using the number of stars. Besides, they can use half the star, and the maximum number of stars is five, then the ratings can be as follows: 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0.

The relationships between the elements of dataset *MovieLens* are specified using adjacency lists in spreadsheet files of .csv format, that contain, in one row, related elements such as user id, movie id, and the rating that a corresponding user has set a corresponding movie. In the dataset *MovieLens*, time is recorded in *Unix-time* format and represents a date from 28.07.1996.

For the experiment, all the time in the dataset was divided into intervals, in this example, these intervals were chosen for a duration of 1 million seconds - approximately 11 days. This period was chosen because of the particularities of the data set being used, namely that people's preferences for movies do not change so often, and the desire to watch movies of other genres may take several days. Initially, different time intervals were used, but stability/change periods for user similarity coefficients could be observed at the selected above interval duration, and the recomputations quantity of similarity coefficients on the dataset did not exceed 700, therefore experiments with such the time interval did not take much time.

Similarity coefficients between users were recomputed at the end of each period that determined by the given time interval, the data for the recomputation was taken from the start of the dataset and to the end of a current period. The computation data were recorded in a .csv file in the format shown in Table 1.

As a result, time series were obtained for each pair of users that contained values of their similarity coefficients at different time intervals. Similarity coefficients were considered only for the activity periods of the investigated users. That is, when users ceased their activity on the system, the similarity coefficients for them were no more computed, as they would remain unchanged, not because of their preferences changes, but because of the new information absence, as similarity coefficients would be computed based on old data that ceased to be updated. The limited number of user pairs were selected to process the data received, for which activity periods overlapped enough for analysis.

Table 1 – The data format for comparing user similarity coefficients

User Id 1	User Id 2	Similarity coefficients for users 1 and 2, k				
		time 1	time 2	...	...	time N
1	2	$k_{12} \in [-1;1]$	$k_{12} \in [-1;1]$	...	...	$k_{12} \in [-1;1]$
1	3	$k_{13} \in [-1;1]$	$k_{13} \in [-1;1]$	...	...	$k_{13} \in [-1;1]$
...
n	m	$k_{nm} \in [-1;1]$	$k_{nm} \in [-1;1]$	...	...	$k_{nm} \in [-1;1]$

The purpose of processing data from Table 1 is counting of stability periods k_{ij} , that means a time during which none of the pair users have changed their preferences (the similarity coefficient between a pair of users has not changed). To determine such a period, in the table valid values of correlation for rating $k_{ij}(t_1)$ are searched. Then the time interval $[t_1; t_2]$ is searched:

$$|k_{i,j}(t_1) - k_{i,j}(t_2)| > d, \quad (3)$$

where d the limit of sensitivity, in this case, d is selected to be equally 0.01.

In most of the data, user activity is insufficient, for some values of time t the correlation coefficient is impossible to compute. In such cases, it is not possible to determine the fact of period completion where the correlation coefficient is constant. As a result, for

defined intervals, the array $T(n)$ was created, where n the serial number of the defined sequence; T the sequence duration in conventional units of time. The created array allows to plot diagram of event frequency to obtain the similarity coefficients stability interval of user pairs $N(n)$ as shown in Figure 4.

The constructed frequency diagram of the stability intervals from their length in Figure 5 makes it possible to obtain the probability function of the specified interval existence length n using the normalization at that operation $p(n) = N(n) / \sum_i N(i)$ is carried out. Initially, before constructing the chart, the data were smoothed by the moving average. After that, regressions were plotted, that match popular declining distributions. The best approximation was given by the exponential regression $N(n) \approx 80e^{-0.17n}$ with the standard deviation

$S \approx 19$. At the same time, assuming the Pareto distribution, having an approximation $N(n) \approx 79n^{-0.93}$ with the standard deviation $S \approx 24$. The obtained data contribute to the choice of the exponential distribution since its use allowed to obtain the smaller standard deviation of the approximation result from the

experimental data. Unfortunately, the difference between the deviations of the best approximations is negligible against the background of random deviations of the plot, so the statement of the exponential distribution should be understood only as a working hypothesis.

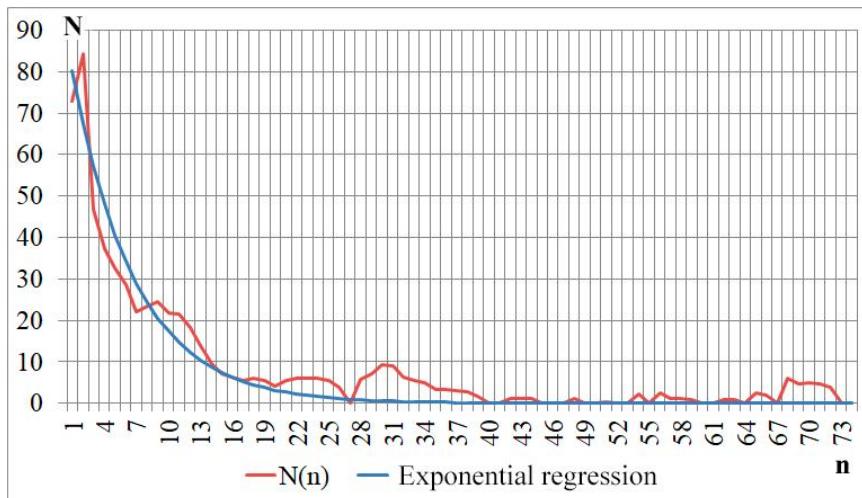


Fig. 4. Diagram of the stability intervals frequency from their length, where: n the length of the stability time interval of user similarity coefficient; N the number of the stability time intervals of user similarity coefficients with length n

Also, to model the process of changing the similarity coefficients, applying the assumption that each similarity coefficients changes at a random time and independently of each other, because such a process has the exponential distribution, analogous to radioactive decay. Then can proceed to determine the

time during that user pairs will change the similarity coefficient with the 0.5 probability.

The invariance probability determination of the similarity coefficients (within d) as a time function is possible by presenting the data from Figure 4 as follows in Fig. 5.

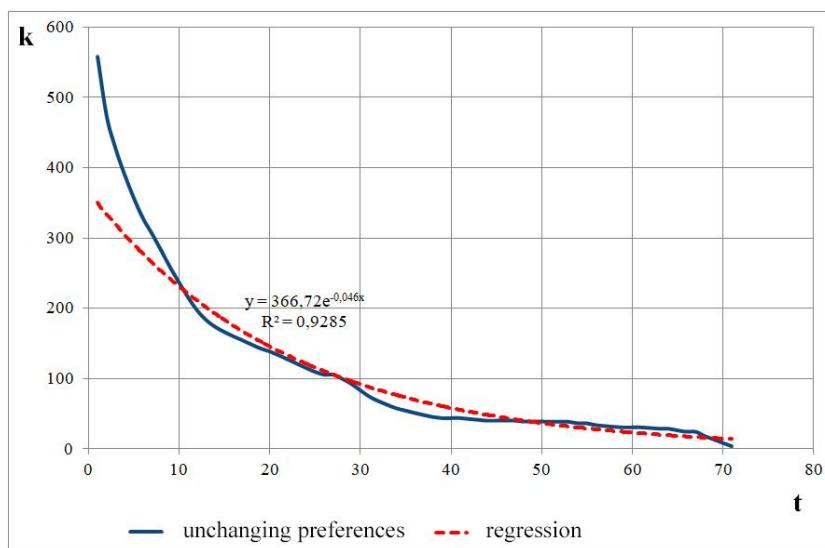


Fig. 5. The dependence of the user pair quantity, who have not changed their similarity coefficient, on time; where: t conditional time; k the user pair quantity who have not changed their similarity coefficients at a given time t

The plot from Figure 5 was obtained as follows: At the beginning time, the total number of monitored users was noted.

Further, at each time interval, the user pair quantity, who has not changed their similarity coefficient, was marked, which was defined as the difference from the previous value at the appropriate

time on this plot and the corresponding value at the appropriate time on the plot from Fig. 4. To confirm the assumption of the exponential law, the exponential regression was constructed, which showed a sufficiently small standard deviation.

According to the change distribution exponential law hypothesis of user similarity coefficients in time,

the laws of radioactive decay can be applied to this process, because of the coincidence of the accepted basic laws of distribution. The plot from Figure 5 was used to facilitate the search for a period when the given part similarity coefficients of users (for example, 50%) will be changed, by analogy with the radioactive decay law. Indeed.

Fig. 5 shows the plot of the user pairs quantity $N(t)$, that have not changed the similarity coefficients, this plot can be approximated by the exponential function [27]:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (4)$$

where N_0 the initial number of users, λ the sought regression coefficient, t conditional time.

For the statistical description of preference changes, it is sufficient to determine the coefficients N_0 and λ by exponential regression.

The regression is performed by logarithmic the left and right parts of the equation.

$$\ln(N(t_i)) = \ln(N_0) - \lambda t_i. \quad (5)$$

The regression is performed on experimental data, that are given in the following Table 2.

Table 2 – The data for exponential regression

t_i	1	2	3	...	$n-1$	n
$\ln(N(t_i))$	$\ln(N_1)$	$\ln(N_2)$	$\ln(N_3)$	...	$\ln(N_{n-1})$	$\ln(N_n)$

The regression error square is computed by the following formula:

$$\Delta_i^2 = (\ln(N(t_i)) - (\ln(N_0) - \lambda t_i))^2. \quad (6)$$

If open the parentheses, then the formula will take the form that can be used to find the standard deviation of R^2 :

$$\begin{aligned} \Delta_i^2 &= \ln^2(N(t_i)) - 2 \ln(N(t_i)) \ln(N_0) + \\ &+ 2\lambda t_i \ln(N(t_i)) + \ln^2(N_0) - \\ &- 2\lambda t_i \ln(N_0) + \lambda^2 t_i^2 \end{aligned}, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} R^2 &= \overline{\ln^2(N(t_i))} - 2 \overline{\ln(N_0)} \overline{\ln(N(t_i))} + \\ &+ 2\lambda \overline{t_i \ln(N(t_i))} + \ln^2(N_0) - \\ &- 2\lambda \overline{\ln(N_0)} \overline{t_i} + \lambda^2 \overline{t_i^2} \end{aligned}, \quad (8)$$

where the overline indicates the operation of computing the arithmetic mean of all regression data: $i = 1..n$.

To find the extremum of the standard deviation of the regression from the experimental data, which is the only minimum, we equate the derivatives by the sought coefficients to zero:

$$\left(R^2 \right)'_{\lambda} = 2\overline{t_i \ln(N(t_i))} - 2 \ln(N_0) \overline{t_i} + 2\lambda \overline{t_i^2}, \quad (9)$$

$$\left(R^2 \right)'_{\ln(N_0)} = -2\overline{\ln(N(t_i))} + 2 \ln(N_0) - 2\lambda \overline{t_i}, \quad (10)$$

that gives the following system of linear equations:

$$\begin{cases} \overline{t_i \ln(N(t_i))} - \ln(N_0) \overline{t_i} + \lambda \overline{t_i^2} = 0 \\ -\overline{\ln(N(t_i))} + \ln(N_0) - \lambda \overline{t_i} = 0 \end{cases}. \quad (11)$$

The solution the system of equations will give the following expressions to compute the sought coefficients:

$$\lambda = \frac{\overline{t_i} \cdot \overline{\ln(N(t_i))} - \overline{t_i \ln(N(t_i))}}{\overline{t_i^2} - \overline{t_i}}, \quad (12)$$

$$N_0 = \exp \left(\frac{\overline{t_i^2} \cdot \overline{\ln(N(t_i))} - \overline{t_i} \cdot \overline{t_i \ln(N(t_i))}}{\overline{t_i^2} - \overline{t_i}} \right). \quad (13)$$

After the computations, the curve really will be to reflect the exponential distribution $N(n) \approx 366.72e^{-0.046n}$. As a result, the indicator $\lambda = 0.046$ allows to determine the following values, as an analog of the decay patterns of radioactive isotopes [28]:

The average lifetime of preference $\tau = 1/\lambda$. In this example, the average stability time of the similarity coefficients of user pairs is $\tau = 21.7$ selected time intervals in the experiment.

Half-life: The time at that half of the user pairs will change their preferences: $T_{1/2} = \tau \ln 2$, $T_{1/2} \approx 15$ the selected time intervals in the experiment.

The probability of preference change at time t : $p(t) = 1 - e^{-\lambda t}$.

The probability of preference invariability at time t : $q(t) = e^{-\lambda t}$.

In the process of servicing recommendation systems, for us the most important criterion is the assurance that a user will do not change preferences during time t_{st} with probability p_{st} :

$$p_{st} = \exp(-\lambda t_{st}), \quad (14)$$

$$t_{st} = -\ln(p_{st}) / \lambda. \quad (15)$$

Also more useful maybe the formula that shows the time of user preferences change with probability q_{st} :

$$t_{st} = -\ln(1 - q_{st}) / \lambda. \quad (16)$$

So, if the recommendation system allows the error probability q_{st} , then similarity coefficients should recompute no more frequently than every time intervals t_{st} .

Time optimization model of similarity coefficients recomputing

Time optimization model of similarity coefficients recomputing:

$$T(T_{fr}, T_{ir}, n_{fr}, n_{ir}, n_0, t, \tau) \rightarrow \min, \quad (17)$$

where T_{fr} the time of complete recomputation, that including the recomputation of similarity coefficients and their transmission for further processing, as well as the value λ ; T_{ir} the time of transmission of the old similarity coefficients for further processing; n_{fr} part of the wrong decisions about the recomputation of the similarity coefficients (to obtain the prediction of

preferences with the given accuracy it was not necessary to recompute the similarity coefficients, it was possible to save system resources); n_{ir} part of the wrong decisions about not recomputing the similarity coefficients (to obtain the prediction of preferences with the given accuracy it was necessary to recompute the similarity coefficients); n_0 the part of the wrong recommendations; t the time since the last recomputation of preference statistics; τ the average period of user access to the system.

These values are subject to the following restrictions:

$T_{ir} < T_{fr}$ the technological constants that depend on the performance of a computing system and computation algorithms;

$n_{ir} \leq 1$ the part can be expressed from the empty set before all cases are included;

$0 \leq n_0 \leq n_{cr}$ the part of the false recommendations should not exceed value ;

$0 < t < \infty$ the time cannot be negative, the recomputation for zero intervals of time is not expedient, also the time is limited in value within reasonable limits;

$\tau < t$ system work time should be greater than the time between user visits.

The function of average customer service time T is built based on listed above values and the problem of minimizing this service time is solved. The system works as follows:

The point of time reference for an individual user is the moment when the last full recomputation of recommendations based on his activity history.

On subsequent hits, the system estimates the probability that the previous computations of the similarity coefficients will be erroneous for the user. If the error probability has exceeded the set critical value, then the similarity coefficients are completely recomputed.

Let's introduce the notation t_{cr} (cr : critical), as the time after which the probability of making wrong recommendation lists is higher than n_{cr} . The recommendation creation error consists of the basic probability of error for a recommendation system p_b and the probability of error due to the use of the old similarity coefficients without their recomputation

$$p(t) = 1 - e^{-\lambda t}.$$

As a result of computing the sum of probabilities, having the following result:

$$n_0(t) = p_b + (1 - p_b)(1 - e^{-\lambda t}), \quad (18)$$

where p_b the base error probability of a recommendation system (the error probability of filtering algorithms).

The resulting function is monotonically increasing, so the equation for search t_{cr} has only one positive solution under the condition :

$$\begin{aligned} n_{cr} &= p_b + (1 - p_b)(1 - e^{-\lambda t_{cr}})n_{cr} = \\ &= p_b + (1 - p_b)(1 - e^{-\lambda t_{cr}}), \end{aligned} \quad (19)$$

where:

$$0 < t_{cr} < -\frac{1}{\lambda} \ln \left(1 - \frac{n_{cr} - p_b}{1 - p_b} \right). \quad (20)$$

Specifically, if for a user the recomputation of the similarity coefficients took place no later than t_{cr} , then the acceptance of past results would be a false decision with a probability less than n_{cr} . This allows estimating the average time of service of a user if during the time of the t_{cr} was making on average of t_{cr}/τ visits:

$$T(t_{cr}) = \frac{T_{fr}\tau + t_{cr}T_{ir}}{t_{cr} + \tau}. \quad (21)$$

The resulting dependence is the descending one from T_{fr} , at $t_{cr} = 0$, and monotonically falls to the limit T_{ir} . Therefore, to minimize service time $T(t_{cr})$, it is necessary to take the maximum permissible value t_{cr} . The system load coefficient will be:

$$K_{lc} = \frac{T(t_{cr})}{T_{fr}} \quad (22)$$

So, the optimal recomputation time of similarity coefficients t_{cr} was received, which will change the system load too K_{lc} .

The experiments to test the proposed model of similarity coefficients recomputing in recommendation systems were conducted. The experiment results showed the possibility increasing the application period of the predetermined similarity coefficients in further computations of the RSs, and accordingly reducing the formation time and recommendations issuance up to 2 times.

Conclusions

In this article, the model of user similarity coefficients computation for recommendation systems is proposed. The model differs from the known ones, in that the recomputation period indicator of the similarity coefficients, for an individual user, and the average recomputation period indicator of the similarity coefficients, for all users of the system, or a specific group of users is taken into account.

During the modeling, an analytical expression was proposed to determine the intervals at which it would be advisable to recompute the user similarity coefficients in the recommendation system.

It has been experimentally demonstrated that the use of the proposed solutions will provide an opportunity to increase the period of application of the previously computed user similarity coefficients for the prediction of user interests, without recomputing them every time and, accordingly, reduce the time of formation and issuance of recommendations up to 2 times.

REFERENCES

1. (2010), *Recommender Systems Handbook*, Editors Francesco Ricci, Lior Rokach, Bracha Shapira, Paul B. Kantor, 1st edition, New York, NY, USA: Springer-Verlag New York, Inc., 842 p., available at: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-85820-3>
2. Segaran, T. (2008), *Programming Collective Intelligence, Building Smart Web 2.0 Applications*, O'Reilly Media, 368 p.
3. Koren, Ye. (2009), "Collaborative filtering with temporal dynamics", *Proceeding KDD '09 Proceedings of the 15th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining*, P. 447-456.
4. Meleshko, Ye. (2018), "Research of methods of building advisory systemson the internet", *Control, Navigation and Communication Systems*, Issue 1 (47), pp. 131-136, DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2018.1.131> (in Ukrainian).
5. Meleshko, Ye. (2018), "Method of collaborative filtration based on associative networks of users similarity", *Advanced Information Systems*, Vol. 2, No. 4, pp. 55-59, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.4.09>
6. Cao, J., Hu, H., Luo, T., Wang, J., Huang, M., Wang K., Wu Z. and Zhang, X. (2015), "Distributed Design and Implementation of SVD++ Algorithm for E-commerce Personalized Recommender System", *Communications in Computer and Information Science*, Vol. 572, Springer Singapore, pp. 30-44, DOI: [10.1007/978-981-10-0421-6_4](https://doi.org/10.1007/978-981-10-0421-6_4)
7. Jia, Ya. (2014), "Users' brands preference based on SVD++ in recommender systems", *IEEE Workshop on Advanced Research and Technology in Industry Applications*, pp. 1175-1178, DOI: [10.1109/wartia.2014.6976489](https://doi.org/10.1109/wartia.2014.6976489)
8. Huba, Gaspar (2015), *The Cold Start Problem for Recommender Systems*, available at: <https://www.yuspify.com/blog/cold-start-problem-recommender-systems/>
9. Bernardi, L., Kamps, J., Kiseleva, J. and Mueller, M.J.I. (2015), *The Continuous Cold Start Problem in e-Commerce Recommender Systems*, available at: https://www.researchgate.net/publication/280773072_The_Continuous_Cold_Start_Problem_in_e-Commerce_Recommender_Systems
10. Meleshko, Ye. (2018), "Problems of modern recommendation systems and methods of their solution", *Control, Navigation and Communication Systems*, Issue 4 (50), pp. 120-124, available at: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2018.4.120>
11. Menshykova, N.V., Portnov, I.V. and Nikolayev, I.E. (2016), "The overview of recommender systems and the possibility of context accounting in the formation of individual recommendations", *ACADEMY*, Issue 6, pp. 20–22 (in Russian)
12. Kotkov, D., Konstan, J.A., Zhao, Q. and Veijalainen, J. (2018), *Investigating Serendipity in Recommender Systems Based on Real User Feedback*, available at: <https://www-users.cs.umn.edu/~zhaox331/papers/denis2018sac.pdf>
13. Castells, P., Vargas, S. and Wang, J. (2011), *Novelty and Diversity Metrics for Recommender Systems: Choice, Discovery and Relevance*, available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Novelty-and-Diversity-Metrics-for-Recommender-and-Castells-Vargas/4ec6bd672aaaa075b42a751099eb9317857e6e0>
14. Amelkin, S.A. (2012). "Evaluation of the effectiveness of recommender systems", *Digital Libraries: Advanced Methods and Technologies, Digital Collections - RCDL-2012*, Pereslavl-Zalesky, October 15-18, 2012, pp. 288-291. (in Russian)
15. Burke, R. (2002), *Hybrid Recommender Systems: Survey and Experiments. User Modeling and User-Adapted Interaction*, vol. 12, DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1021240730564>
16. Ozsoy, M.G. and Polat, F. (2013), "Trust based recommendation systems", *2013 IEEE/ACM International Conference on Advances in Social Networks Analysis and Mining*, pp. 1267-1274.
17. Mohammadi, V., Rahmani, A.M., Darwesh, A.M. and Sahafi, A. (2019), "Trust-based recommendation systems in Internet of Things: a systematic literature review", *Human-centric Computing and Information Sciences*, DOI: <https://doi.org/10.1186/s13673-019-0183-8>
18. Lin, Z. and Chen, H. (2019), *Recommendation over time: a probabilistic model of time-aware recommender systems*, *Sci. China Inf. Sci.* 62, 212105, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11432-018-9915-8>
19. Wei, S., Ye, N. and Zhang, Q. (2012), "Time-Aware Collaborative Filtering for Recommender Systems", Liu CL., Zhang C., Wang L. (eds) Pattern Recognition. CCPR 2012, *Communications in Computer and Information Science*, vol 321. Springer, Berlin, Heidelberg.
20. Campos, P.G., Díez, F. & Cantador I. (2014), "Time-aware recommender systems: a comprehensive survey and analysis of existing evaluation protocols", *User Model User-Adap Inter* 24, P. 67-119, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11257-012-9136-x>
21. Quan, Yuan, Gao, Cong, Zongyang, Ma, Aixin, Sun and Nadia, Magnenat-Thalmann (2013), "Time-aware point-of-interest recommendation", *Proceedings of the 36th international ACM SIGIR conference on Research and development in information retrieval (SIGIR '13)*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 363-372. DOI: <https://doi.org/10.1145/2484028.2484030>
22. Liu, N.N., Zhao, M., Xiang E.W. and Yang, Q. (2010), "Online evolutionary collaborative filtering", *Amatriain*, X., Torrens, M., Resnick, P., Zanker, M. (eds.) RecSys. pp. 95–102.
23. Ding, Y., Li X. (2005), "Time weight collaborative filtering", *Proceedings of the 14th ACM international conference on Information and knowledge management (CIKM '05)*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, P. 485-492, DOI: <https://doi.org/10.1145/1099554.1099689>
24. Semenov, S.G., Gavrylenko, S.Y. and Chelak, V.V. (2016), "Developing parametrical criterion for registering abnormal behavior in computer and telecommunication systems on the basis of economic tests", *Actual Problems of Economics*, Issue 4(178), pp. 451-459.
25. Semenov, S., Dorokhov, O. and Grynov, D. (2013), "The concept definition of mathematical modelling of the secured information-telecommunication system with regard to conditions of the posterior uncertainty", *Transport and Telecommunication*, Vol. 14, No 2, pp. 167-174.
26. 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>
27. Rukosuev, A., Bashlykov, V. and Baldin, K. (2011), *Fundamentals of Probability Theory and Mathematical Statistics*, Textbook, Flinta, Moscow, 980 p. (in Russian).
28. Klimov, A.N. (1985), *Nuclear Physics and Nuclear Reactors*, Energoatomizdat, Moscow, 352 p. (in Russian).

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>.

Дреев 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>.

Аль-Орайкат Анас Махмуд – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп’ютерних та інформаційних наук, Університет Унайза, Унайза, Саудівська Аравія;
Anas Mahmoud Al-Oraiqat – Candidate of Technical Sciences, a staff member at the Computer and Information Sciences Dept., Onaizah University, Onaizah, Kingdom of Saudi Arabia;
e-mail: nas_oraiqat@hotmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1071-6331>.

Вдосконалена модель обчислення коефіцієнтів подоби користувачів рекомендаційних систем

С. В. Мелешко, О. М. Дреев, А. М. Аль-Орайкат

Анотація. Предметом вивчення у статті є модель обчислення коефіцієнтів подоби користувачів рекомендаційних систем. Актуальність розробки визначається необхідністю підвищення якості рекомендаційних систем шляхом адаптації часових характеристик до можливих змін подоби користувачів. Метою є розробка методу визначення періоду стабільності вподобань користувачів рекомендаційної системи на основі перерахунку коефіцієнтів подоби між парами користувачів. Завдання: дослідити ймовірність зміни вподобань користувачів рекомендаційної системи за допомогою порівняння коефіцієнтів їх подоби у часі, дослідити за яким законом розподілу змінюються коефіцієнти подоби користувачів у часі. Методи дослідження: теорія графів, теорія ймовірності, теорія радіоактивності, теорія алгоритмів. Висновки. В ході досліджень вдосконалено модель обчислення коефіцієнтів подоби користувачів рекомендаційних систем. Модель відрізняється від відомих врахуванням показників періоду перерахунку коефіцієнтів подоби для окремого користувача та середнього періоду перерахунку коефіцієнтів подоби для усіх користувачів системи або певної групи користувачів. Розроблено програмне забезпечення, в рамках якого було проведено серію експериментів для перевірки ефективності розробленого методу. Проведені експерименти показали, що розроблений метод в цілому підвищує якість роботи рекомендаційної системи без істотних коливань точності роботи системи. Точність може несуттєво зменшуватись або збільшуватись, залежно від характеристик набору входних даних. Використання запропонованих рішень дозволить збільшити період застосування попередньо обчислених коефіцієнтів подоби користувачів для прогнозування вподобань без їх повторного перерахунку та, відповідно, зменшити час формування і видачі рекомендацій до 2 разів.

Ключові слова: рекомендаційні системи; коефіцієнти подоби; колаборативна фільтрація; аналіз даних; оптимізація.

Усовершенствованная модель вычисления коэффициентов подобия пользователей рекомендательных систем

Е. В. Мелешко, А. Н. Дреев, А. М. Аль-Орайкат

Аннотация. Предметом изучения в статье является модель вычисления коэффициентов подобия пользователей рекомендательных систем. Актуальность разработки определяется необходимостью повышения качества рекомендательных систем путем адаптации временных характеристик к возможным изменениям подобия пользователей. Целью является разработка метода определения периода стабильности предпочтений пользователей рекомендательной системы на основе пересчета коэффициентов подобия между парами пользователей. Задача: исследовать вероятность изменения предпочтений пользователей рекомендательной системы с помощью сравнения коэффициентов их подобия во времени, исследовать по какому закону распределения изменяются коэффициенты подобия пользователей во времени. Методы исследований: теория графов, теория вероятности, теория радиоактивности, теория алгоритмов. Выводы. В ходе исследований усовершенствована модель вычисления коэффициентов подобия пользователей рекомендательных систем. Модель отличается от известных учетом показателей периода пересчета коэффициентов подобия для отдельного пользователя и среднего периода пересчета коэффициентов подобия для всех пользователей системы или определенной группы пользователей. Разработано программное обеспечение, в рамках которого была проведена серия экспериментов для проверки эффективности разработанного метода. Проведенные эксперименты показали, что разработанный метод в целом повышает качество работы рекомендательной системы без существенных колебаний точности работы системы. Точность может незначительно уменьшаться или увеличиваться в зависимости от характеристик набора входных данных. Использование предложенных решений позволит увеличить период применения предварительно вычисленных коэффициентов подобия пользователей для прогнозирования предпочтений без их повторного пересчета и, соответственно, уменьшить время формирования и выдачи рекомендаций до 2 раз.

Ключевые слова: рекомендательные системы; коэффициенты подобия; колаборативная фильтрация; анализ данных; оптимизация.

Methods of information systems synthesis

UDC 621.395.721.5

doi: 10.20998/2522-9052.2020.3.07

Oleksandr Pliushch, Viktor Vyshnivskyi, Yuliia Berezovska

State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine

ROBUST TELECOMMUNICATION CHANNEL WITH PARAMETERS CHANGING ON A FRAME-BY-FRAME BASIS

Abstract. An approach is proposed to design of a robust data transfer channel for telecommunication networks that is based on the desired bits spectrum spreading and their additional scrambling by using two pseudo noise coding sequences derived from primitive polynomials of eighth and fifteenth degrees. Further information protection is offered to be achieved by deploying four 32768 chip-long pseudo noise coding sequences, instead of one, with 128 cyclic shifts each. It is proven that selection of a scrambling sequence and its cyclic shift according to a secret algorithm on a frame-by-frame basis helps substantially improve performance of the telecommunication channel in terms of protection against interception while preserving its useful properties. Research results permit to claim that the designed telecommunication channel could be used in noise immune and concealed telecommunication networks.

Keywords: telecommunication network; primitive polynomial; pseudo noise coding sequences; computer simulation; spectrum spreading; cyclic sequence shift.

Introduction

Problem statement. Telecommunication networks have always been a prime target for those rogue elements who want to prevent information transfer, intercept messages or even take control over the channel by sending spurious information instead of the legitimate one. The latter is especially widespread when it comes to control over unmanned aerial vehicles or drones. In general, it is widely accepted that susceptibility of the wireless networks is much higher than that of any other. That is why enhancing noise immunity, concealment properties as well as improving resistance to deciphering of the telecommunication channels sending data over air interface play a major role in their practical implementations.

Deployment of the wideband signals is one of the most effective ways of improving the features of telecommunication channel mentioned above. Formation of the wideband signals in telecommunications is often achieved with the help of different spreading techniques, which are usually performed by using spreading coding sequences.

According to this approach, every bit of information in telecommunication channel is processed by the spreading coding sequence, which consists of a certain number of chips. The bigger the number of chips, the better noise immunity, transmission concealment and resistance to deciphering the channel possess. Besides, it is a common practice to transmit data in telecommunication channels frame-by-frame, which creates a precondition to use a second coding sequence that not only marks the limits of the frame, but also performs additional scrambling of the data. This additional scrambling gives an extra layer of protection to the data being transmitted.

Auto- and inter- correlation parameters of the spreading coding sequences are a key to their practical utilization. It is well-known that very good correlation properties can be found in pseudo noise coding sequences that are derived from the primitive polynomials of the

certain degree. These coding sequences have proved their effectiveness in the third generation mobile networks [1], [2]. But in those networks the pseudo noise coding sequences are used only to organize multiple access to the system for many subscribers both within one cell and between cells. At the same time, utilization of the pseudo noise coding sequences to enhance noise immunity, concealment properties and improving resistance to deciphering have received insufficient attention in research.

Additionally, deployment of the two, even with the best properties, pseudo noise coding sequences with account of the current level of cyber rogue element's equipment is not near enough. That is why, this paper proposes to change the parameters of the pseudo noise spreading sequences on a frame-by-frame basis, namely using four (or even more) spreading sequences instead of the one marking the frame size, with each of them undergoing many cyclic shifts.

Thus, study of the practical realization of the noise immune, concealed, resistant to deciphering telecommunication channels with utilization of the pseudo noise coding sequences derived from primitive polynomials with different cyclic shifts and frame-by-frame-parameters hopping is important and some extra research is needed in this direction.

Recent literature review. Utilization of pseudo noise coding sequences in third generation mobile networks is reasonably well-treated in [1] and [2]. In [1], an area of application of these coding sequences is outlined, as well as certain their examples are provided, although it is done with particular stress on multiple access to the network. In addition, correlation properties are considered in respect to subscriber separation while noise immunity and transmission concealment are not entertained. In [2], it is paid a big attention to the practical component of pseudo noise coding sequences deployment and, besides, it presents a lot of explanations concerning theory and practice of how to generate these sequences, including those with different cyclic shifts

using primitive polynomials. That is being said, this work focuses totally on the pseudo noise coding sequences that are used in CDMA2000 technology, while others are treated superficially.

The authors in [3] try to present full and, yet, detailed account of the spectrum spreading coding sequences that, according to their parameters, can be used in telecommunication networks. Unfortunately, study of performance of certain spreading sequences in a practical implementation of the telecommunication channel is not done properly. Although this source outlines ways of forming pseudo noise coding sequences and the advantages that they bring, it serves as more of a theoretical effort and does not support the information with, for example, computer simulation.

An approach to practical use of pseudo noise coding sequences for design of control channels for unmanned aerial vehicles is studied in [4]. But it lacks an analysis of the channel's noise immunity while the cyclic shifts option is not addressed, which could enhance both this parameter and the transmission concealment in the telecommunication control channel.

There are good reviews of the technologies that are used in wireless telecommunication networks in [5] and [6]. Nevertheless, these sources claim that pseudo noise coding sequences are only one of the technologies amongst many and, as a result, practical verification of the coding sequences parameters is not done. With account of the deficiencies in the reviewed known literature, the purpose of this article is to study practical implementation of the noise immune telecommunication channels based on pseudo noise coding sequences as used on frame-by-frame basis with different cyclic shifts.

Main material

Design of the code and chip structure of the telecommunication channel. As mentioned above, information transmission in a telecommunication channel is performed by frames. Frame size is determined by the channel type, the area of its use and required data rates. In wideband applications, each transmitted bit is spectrally spread by the short pseudo noise coding sequence. In this case, spreading factor is determined on the one hand by required date rate, on the other – available frequency band.

Let us assume that required data rate in the telecommunication channel is 20 Kbit/sec, while available frequency band is 5 MHz. Thus, a possible spreading factor equals 256 units and, in this way, short pseudo noise coding sequence, which spreads bits, must comprise 256 chips.

According to the recent developments in the field, network developers are trying to use shorter frames because it simplifies retransmission techniques, deployed when there are too many errors. Let us assume that the frame is composed of 128 bits, and, then, it

includes 32768 chips, as does the long pseudo noise coding sequence determining frame size.

For the reasons given above, chip and frame structure, as well as algorithm of the telecommunication channel design, look as follows:

- Each frame with duration of 32768 chips contains 128 bits of data, every one of them comprising 256 chips;
- First pseudo noise coding sequence is formed that includes 256 chips and matches the duration of one bit;
- Second pseudo noise coding sequence is formed that includes 32768 chips and determines frame duration;
- All bits except for the first one are spread by short coding sequence with 256 chips;
- First bit always assumes value unity and is not spread by the short pseudo noise coding sequence with 256 chips, but is, rather, used for frame synchronization;
- All frame's bits are processed by the long coding sequences with duration 32768 chips;
- Frame synchronization is performed using first 256 chips of the long coding sequence with 32768 chips.

Let us not forget that we need at least four long pseudo noise coding sequences and they are used with different cyclic shifts. Hence, it is important to study how to generate them and check their auto- and inter correlation properties.

Synthesis of the long pseudo noise coding sequences and assessment of their properties. Good performance of the telecommunication channel can be secured only using coding sequences with required correlation properties. To obtain good auto- and inter correlation properties, it is highly recommended to utilize primitive polynomials of a certain degree.

Primitive polynomials of the required degree can be found in [2], as well as in many other places. We are interested in the primitive polynomials of the fifteenth degree. According to [2], there are 1800 of them available, but for the purpose of this article we need just four. These polynomial $F(x) = 1 + x^5 + x^6 + x^7 + x^8 + x^{10} + x^{15}$ is can be also deduced by polynomial division. Four primitive polynomials of the fifteenth degree that can be used to generate pseudo noise coding sequences comprising 32768 chips and selected by the authors are as follows:

$$\begin{aligned} F(x) &= 1 + x^5 + x^7 + x^8 + x^9 + x^{13} + x^{15}; \\ F(x) &= 1 + x^2 + x^6 + x^7 + x^8 + x^{10} + x^{15}; \\ F(x) &= 1 + x^3 + x^4 + x^5 + x^9 + x^{10} + x^{11} + x^{12} + x^{15}; \\ F(x) &= 1 + x + x^2 + x^6 + x^7 + x^{11} + x^{15}. \end{aligned} \quad (1)$$

Pseudo noise coding sequence derived from (1) can be synthesized using 15 element shift register presented in Fig. 1.

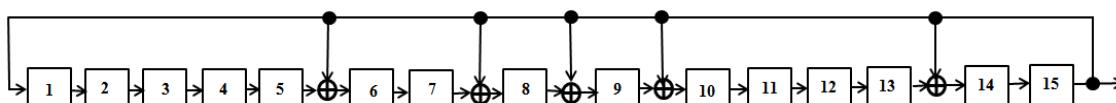


Fig. 1. Block diagram of pseudo noise coding sequence generator with 32768 chips from the primitive polynomial

In this picture, at the output of the fifth, seventh, eighth, ninth and thirteenth elements, the modulo 2 addition is performed. In principle, the diagram in Fig.1 is able to generate only 32767 chips because 15 zeros cannot exist in it. Therefore, one additional “0” is inserted to the run of 14 zeros without shifting the data along the register [2]. If initial loading vector is all zeros but last, then the fourteen zeros are the last ones in the sequence and the additional zero is added as number 32768. Similar diagrams can be drawn for other polynomials; they differ only in the way where the modulo 2 addition is performed. The similarity is

important because we can easily switch from one sequence to another, out of three left, using just one device with almost no equipment cost.

As mentioned above, each sequence of 32768 chips undergoes cyclic shifts with the step equaling any number of chips in the expression $n*256$, where n assumes integer values from 1 to 127.

To quickly perform the shifts, one can use 15 bit masks and those 15 bit long words should equal 127, which corresponds to the number of cyclic shifts. To perform this task, block diagram in Fig. 1 can be modified as is shown in Fig. 2.

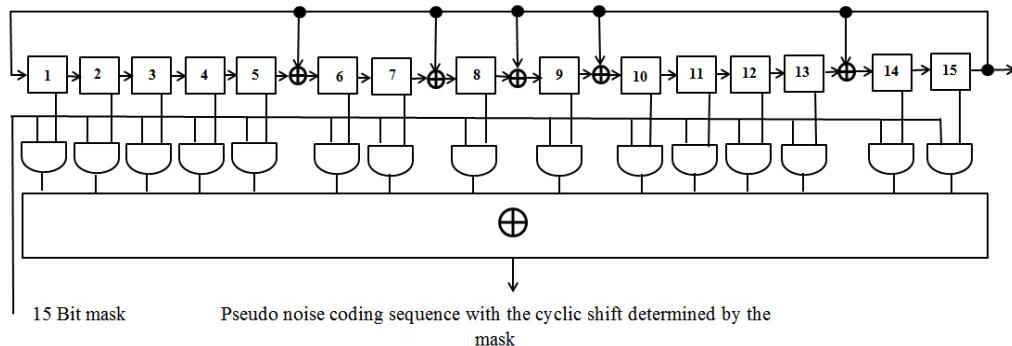


Fig. 2. Block diagram of pseudo noise coding sequence generator with 32768 chips and cyclic shifts determined by the mask

In Fig. 2, each of the fifteen bits of the certain cyclic shift mask is processed by logical “&” with the binary signal of the corresponding element of the shift register. After that, output sequence with the shift, corresponding to the mask, is formed by modulo 2 addition of all the signals from logical elements performing logical “&”.

Thus, the block diagram in Fig. 2 can easily switch from generating one sequence to another of the four pseudo noise coding sequences with 127 possible cyclic shifts each, on a frame-by-frame basis. This hopping can be performed according to a secret algorithm, while there are 512 possible options available to choose from.

Before proceeding to studying performance of the designed channel, it is important to assess the correlation properties of the pseudo noise coding sequences presented above.

Fig.3 illustrates autocorrelation properties of the first out of the four pseudo noise coding sequences comprising 32767 chips, which is without adding an extra chip and is generated according to (1). Autocorrelation functions for the second, third and fourth sequences are the same, as the one in Fig. 3.

It is evident from the figures that the polynomials used to derive the sequences are truly primitive, because once a single shift occurs, the correlation function assumes -1 value and it stays this way for the whole duration of the sequence. When there is no shift, the correlation function value is that of the number of chips in the sequences – 32767 (the figure does not reflect this because it is focused on verifying the -1 value).

It is interesting to see what happens to the autocorrelation functions when an extra chip is added to obtain the sequences with 32768 chips. The autocorrelation function for the pseudo noise coding sequence with an extra chip is presented in Fig.4.

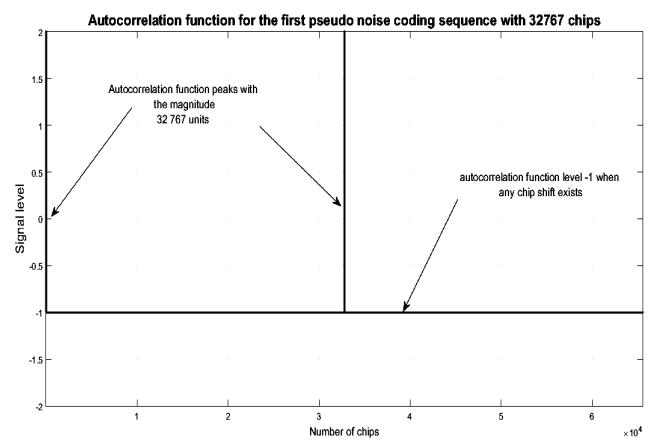


Fig. 3. Autocorrelation function for the first pseudo noise coding sequence with 32767 chips

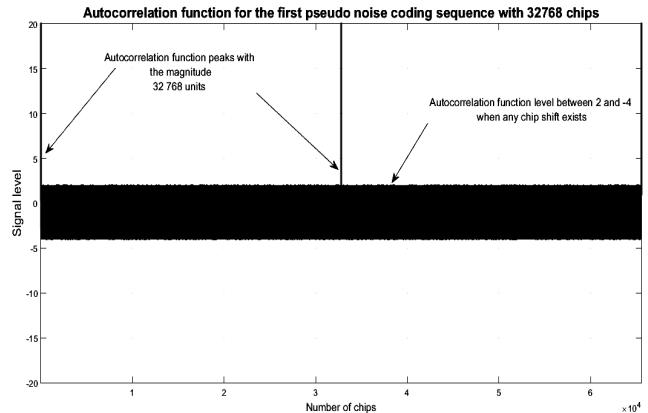


Fig. 4. Autocorrelation function for the first pseudo noise coding sequence with 32768 chips

As evidenced by the data in Fig. 4, an extra chip degrades the autocorrelation properties, but still they

remain very good. Autocorrelation functions for the second, third and fourth sequences with 32768 chips are the same, at least when it comes to signal levels, as that in Fig. 4. To assess the behavior of the correlation function in Fig. 4, 5 presents the same graph but on a bigger scale, just 1000 first chips. It is clear from this figure that, although the upper and low bounds stay the same, the function assumes three different values determined by the coding sequence structure.

Data in Fig. 3 and 4 illustrate correlation functions when the integration is carried out on the whole length of the sequence. In real installations, the integration is performed on a limited plot, and it obviously degrades the performance.

In the synthesized telecommunication channel, the sequence segment allocated for the integration is the first 256 chip section of any of the four 32768 chip long sequences with appropriate cyclic shift.

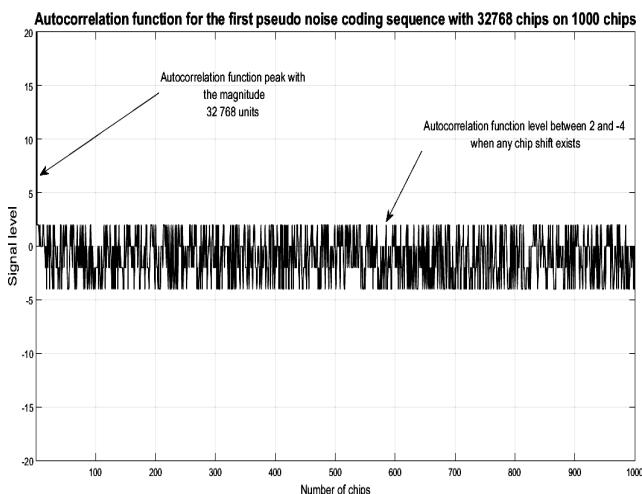


Fig. 5. Autocorrelation function for the first pseudo noise coding sequence with 32768 chips on the first 1000 chips

To study the correlational properties in this case of the limited integration segment, Fig. 6-10 show correlation function of the selected frame synchronization segment, or window function, and the four pseudo noise sequences of 32768 chip long.

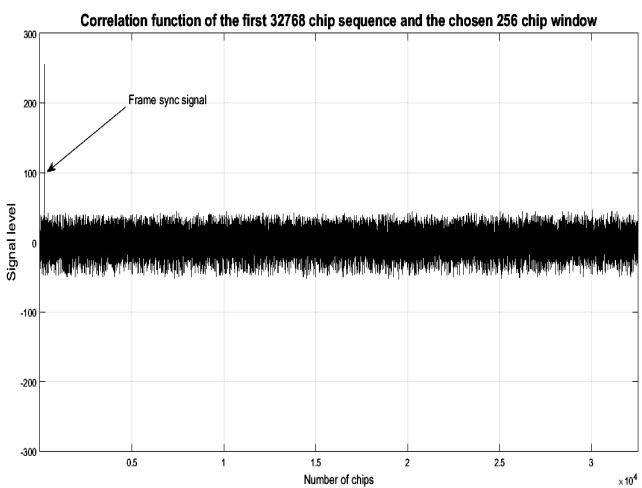


Fig. 6. Correlation function for the first pseudo noise coding sequence with 32768 chips and the chosen window function

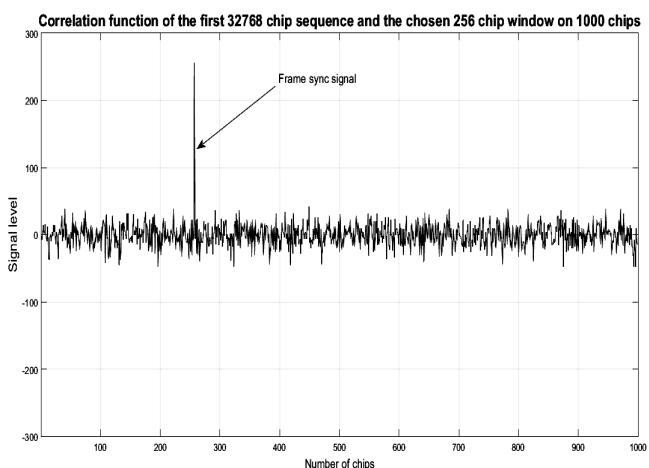


Fig. 7. Correlation function for the first pseudo noise coding sequence with 32768 chips and the chosen window function on the first 1000 chips

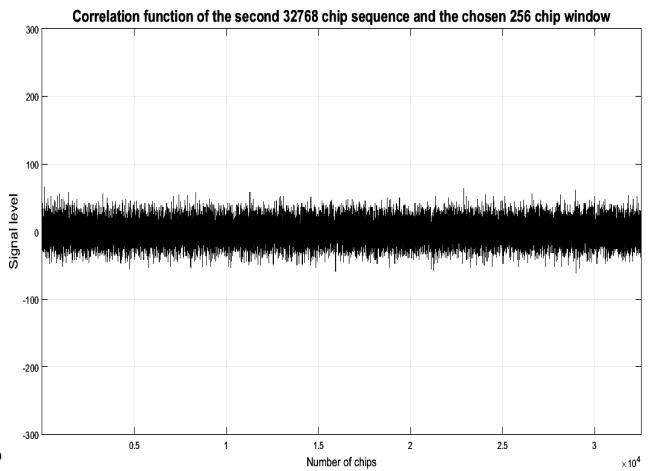


Fig. 8. Correlation function for the second pseudo noise coding sequence with 32768 chips and the chosen window function

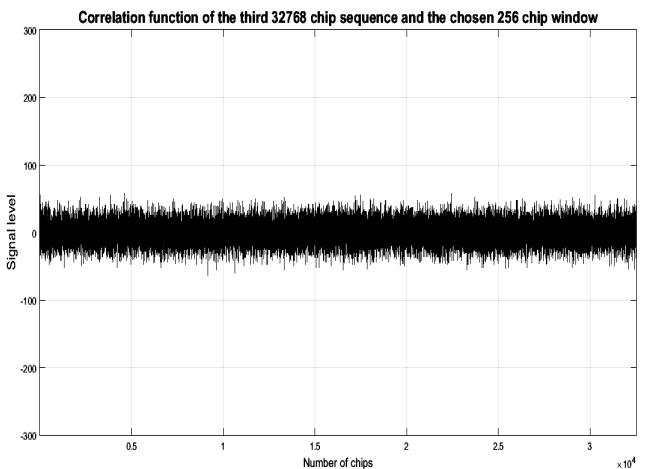


Fig. 9. Correlation function for the third pseudo noise coding sequence with 32768 chips and the chosen window function

Synthesis of the short pseudo noise coding sequence. As mentioned above, the telecommunication channel uses short pseudo noise coding sequence to spread bits of the useful information. Similarly to synthesis of the long pseudo noise coding sequences, a

primitive polynomial is required to obtain 256 chip long short pseudo noise coding sequence, but in this case that of the eighth degree. The one, chosen in this paper, can be presented as follows:

$$F(x) = 1 + x^2 + x^3 + x^4 + x^8. \quad (2)$$

As in the case with the primitive polynomial (1), (2) can be used to generate a pseudo noise coding sequence with the help of the shift register and addition of the 256th chip to 255 already formed.

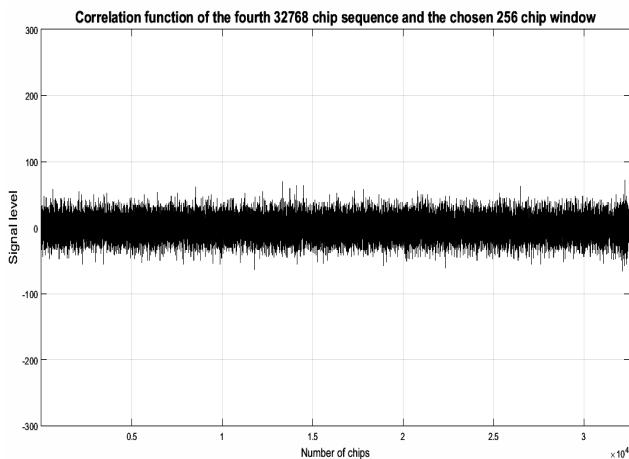


Fig. 10. Correlation function for the fourth pseudo noise coding sequence with 32768 chips and the chosen window function

Fig. 11 illustrates pseudo noise coding sequence with 256 chips synthesized according to (2).

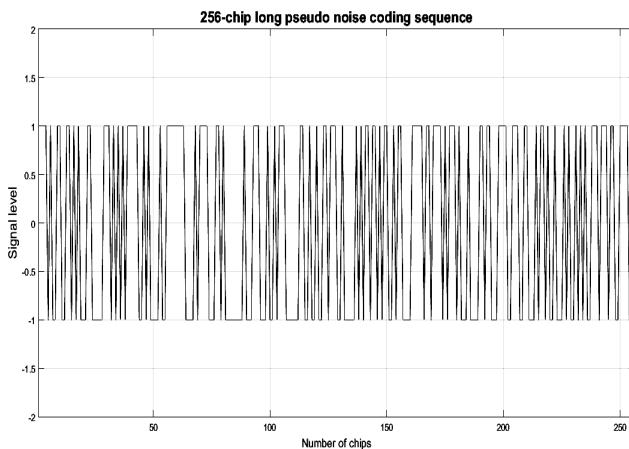


Fig. 11. 256-chip long pseudo noise coding sequence

Performance study of the designed telecommunication channel on the background of the internal noise and interfering signal. Having synthesized the pseudo noise coding sequences and studied their properties, let us proceed to assessing performance of the proposed telecommunication channel.

As was shown above, useful signal is presented as a binary modulation of a 128 bit sequence (bit frame), each of which is spectrally spread 256 times by the short pseudo noise coding sequence just described. In addition, each frame is scrambled by the 32768 chip

long pseudo noise coding sequence, which marks the frame limits. Internal noise is presented as normally distributed samples with one unite power level. Interfering signal has the same probability distribution and power as does the internal noise. Additive mixture of useful signal, internal noise and interfering signal over one frame is shown in Fig. 12. Here, the first 32768 chip long pseudo noise coding sequence is used with the cyclic shift of 256 chips.

Further research is directed at establishing whether it is possible to extract from the mixture in Fig. 12 frame structure of the information and the values of all bits of information.

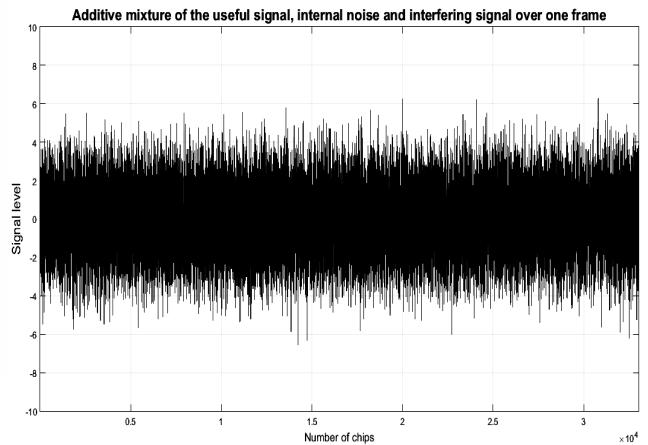


Fig. 12. Additive mixture of the useful signal, internal noise and interfering signal over one frame

Fig. 13 illustrates signal at the output of the matched filter for the selected frame signal when it processed the frame depicted in Fig. 12. Extracted frame sync pulse is clearly visible in Fig. 13 at the beginning of the frame.

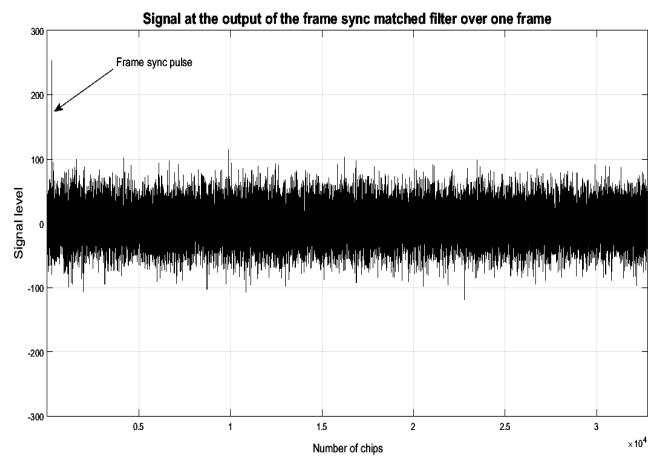


Fig. 13. Signal at the output of the frame sync matched filter over one frame

Fig. 14 shows the signal at the output of the spread bits matched filter over one frame after it processed signal mixture depicted in Fig. 12, preliminary descrambled by the long pseudo noise sequence.

Analysis of the data in Fig. 14 indicates that the bits are confidently extracted from the mixture on the background of the internal noise and interfering signal.

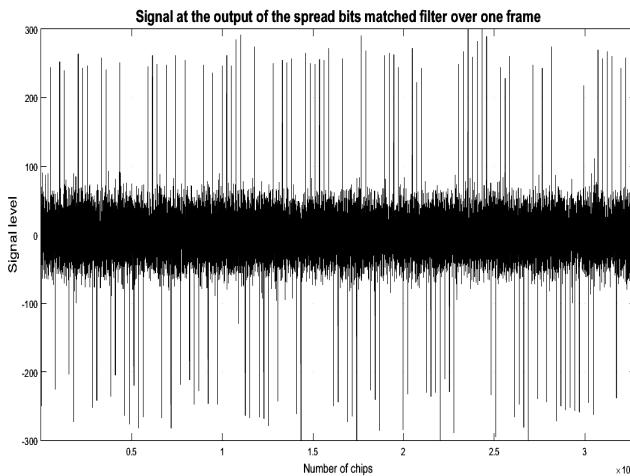


Fig. 14. Signal at the output of the spread bits matched filter over one frame

Performance study of the designed telecommunication channel with use of different long pseudo noise coding sequences and cyclic shifts. In some cases, deployment of the two pseudo noise coding sequences cannot secure complete protection of the information from the interception. This paper proposes to further enhance concealed information transfer by using not one but four 32768 chip long pseudo noise coding sequences, as well as their cyclic shifts. There are 128 cyclic shifts for each sequence and with account of 4 sequences one can number 512 possible options to choose from. In this case, any one of 512 options can be chosen according to preselected secrete algorithm, which frequently changes.

To test feasibility and effectiveness of the proposed method, the signal similar to that in Fig. 12 was formed, with only exception that the third 32 768 chip long pseudo noise coding sequence was deployed with the cyclic shift 1280 chips.

This signal is shown in Fig. 15.

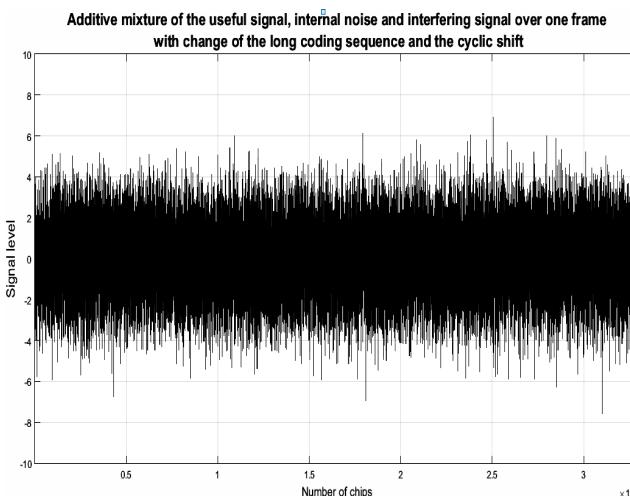


Fig. 15. Additive mixture of the useful signal, internal noise and interfering signal over one frame with change of the long coding sequence and the cyclic shift

Let us assume that the rogue elements somehow learnt about the structure of the short 256 chip long

pseudo noise coding sequence and the long 32768 chip long pseudo noise coding sequence. But they are ignorant of the possible change of the long sequence and its cyclic shift. In this case, while trying to intercept the message they will use known to them data about the sequences. As a result, the rogue elements will obtain the frame sync pulse and the bit sequence portrayed in Fig. 16 and 17 respectively.

As it seems from these figures, they will not be able to decode the fame structure and extract the bits of useful information.

Fig. 18 and 19 present the signals at the output of matched frame sync filter and bits matched filter, respectively, with the full knowledge about the selection of the long pseudo noise coding sequence and the cyclic shift.

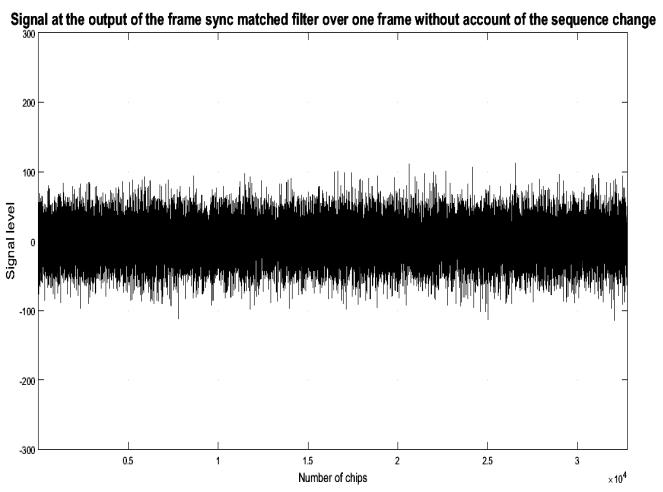


Fig. 16. Signal at the output of the frame sync matched filter over one frame without account of the sequence change and the cyclic shift

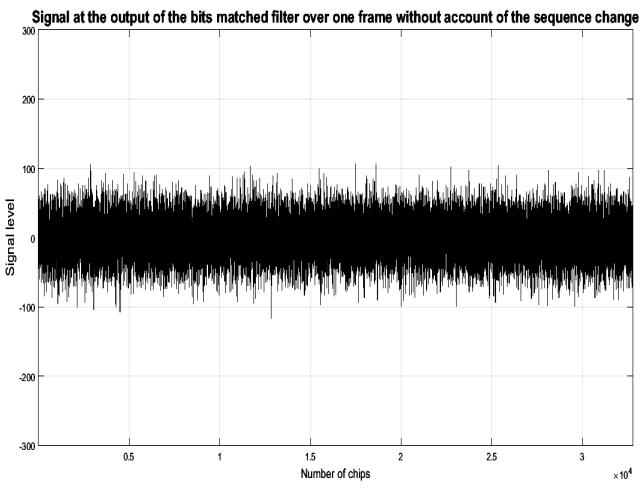


Fig. 17. Signal at the output of the bits matched filter over one frame without account of the sequence change and the cyclic shift

As data in Fig. 18 and 19 indicate, when the change of the long pseudo noise coding sequence, as well as the cyclic shift, are taken into account, respective processing in matched filters permits to effectively extract frame sync signal and bits of information.

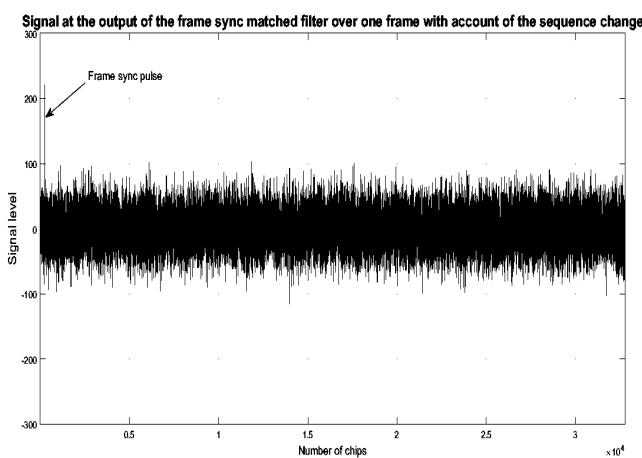


Fig. 18. Signal at the output of the frame sync matched filter over one frame with account of the sequence change and the cyclic shift

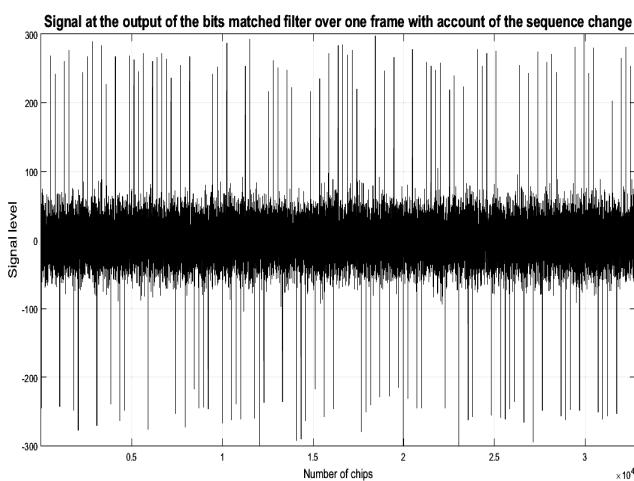


Fig. 19. Signal at the output of the bits matched filter over one frame with account of the sequence change and the cyclic shift

When shifts and sequences change almost randomly on a frame-by-frame basis, the adversary must follow all possible options, and there can be too many for him.

According to [2] there are 18000 primitive polynomials of the fifteenth degree and with account of the 128 possible shifts, it can become an insurmountable problem for the interceptors.

Conclusions

Data transfer telecommunication channels are among the important targets of the rogue cyber actors. There is a constant battle between those who protect information and those who try to intercept it. Thus, enhancing noise immunity of the information, its concealment and resistance to interception is a very important topic to research.

To improve these parameters, it is proposed to design a telecommunication channel with deployment of the two pseudo noise coding sequences: one is 265 chip long sequence for spectral spreading of the useful bits, while the other is 32768 chip long to mark the frame limits and provide additional scrambling of the information.

To further increase resistance to interception, use of four 32768 chip long sequences, instead of one, is considered with different cyclic shifts. It is proven that these pseudo noise coding sequences, derived from the primitive polynomials, possess good auto and inter correlational properties.

Performance study of the telecommunication channel was carried out with the help of computer simulation in Matlab software package.

Computer simulation helped to establish that proposed telecommunication channel permits to extract useful bits of information from the additive mixture of the internal noise and an interfering signal. Additionally, it was revealed that using four different 32768 chip long pseudo noise sequences with cyclic shifts changing on a frame-by-frame basis, according to a secret algorithm, can substantially improve resistance to interception while preserving all other useful characteristics of the channel.

In this case, cyber criminals have a very difficult task to intercept the useful information bits.

REFERENCES

1. Andreas, Springer and Robert, Weigel (2013), *UMTS: The Physical Layer of the Universal Mobile Telecommunications System*, Springer Science & Business Media, USA, 298 p.
2. Lee, Jhong S. and Miller, Leonard E. (1998), *CDMA systems engineering handbook*, Artech House, Boston, London, 1228 p.
3. Byeong, G. Lee and Seok, C. Kim (2012), *Scrambling Techniques for Digital Transmission*, Springer Science & Business Media, USA, 448 p.
4. Kamesh, Namuduri, Serge, Chaumette, Jae, H. Kim, James P.G., Sterbenz (2017), *UAV Networks and Communications*, Cambridge University Press, UK, 242 p.
5. Evgenii, Krouk and Sergei, Semenov (2011), *Modulation and Coding Techniques in Wireless Communications*, John Wiley & Sons, USA, 680 p.
6. Clint, Smith and Daniel, Collins (2013), *Wireless Networks*, McGraw Hill Professional, USA, 752 p.

Надійшла (received) 27.05.2020
Прийнята до друку (accepted for publication) 26.08.2020

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Плюш Олександр Григорович – кандидат технічних наук, професор кафедри мобільних та відеоінформаційних технологій, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна;
Oleksandr Pliusch – PhD, Professor Department of Mobile and Videoinformation Technologies, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine;
e-mail: opliusch@yahoo.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5310-0660>

Вишнівський Віктор Вікторович – доктор технічних наук, завідувач кафедри комп’ютерних наук, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна;
Viktor Vyshnivskyi – Doctor of Technical Sciences, Head of Department of Computer science, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine;
e-mail: vish_vv@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1923-4344>

Березовська Юлія Володимирівна – аспірант, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна;
Yuliia Berezovska – Postgraduate Student, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine;
e-mail: krasabereza@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9973-0497>

Стійкий телекомунікаційний канал зі зміною параметрів від кадру до кадру

О. Г. Плющ, В. В. Вишнівський, Ю. В. Березовська

Анотація. Зроблено висновок, що сучасні телекомуникаційні канали не є в достатній мірі захищеними від завад та перехоплення зловмисниками. Запропоновано підвищити ці показники в розробленому телекомуникаційному каналі за рахунок використання двох типів псевдовипадкових кодових послідовностей: короткої тривалістю 256 чипів, що використовується для розширення спектру бітів корисної інформації, та протяжної тривалістю 32768 чипів, що позначає розміри кадру та здійснює додаткове скремблювання інформації. Наголошується, що для задоволення вимог щодо протидії перехопленню зловмисниками необхідно використовувати не одну, а чотири псевдовипадкових кодових послідовностей тривалістю 32768 чипів з різними циклічними зсувами кратними 256 чипів. З урахуванням того, що таких зсувів налічується 128 на кожну з чотирьох послідовностей і пара послідовностей зсув змінюється від кадру до кадру, зроблено висновок, що це значним чином збільшує захист інформації в каналі від перехоплення. Досліджено взаємно і паралельно використання циклічного зсува відповідно до послідовності масок, які виявилися дуже гарними для цих послідовностей, що отримуються з примітивних поліномів певного порядку. За допомогою програмного середовища MathLab проведено імітаційне комп’ютерне моделювання запропонованого телекомуникаційного каналу на основі запропонованих кодових послідовностей, в процесі якого доведено, що незнання певної послідовності тривалістю 32768 чипів та відповідного циклічного зсува призводить до унеможливлення перехоплення інформації зловмисниками. Наголошується, що запропоновані псевдовипадкові кодові послідовності можуть бути легко практично реалізовані в зсувних реєстрах восьмого та п’ятнадцятого порядку, при цьому переход від одного циклічного зсува до іншого може легко робитися за рахунок відповідних масок, в той час як переход від послідовності до послідовності реалізується за рахунок активації або деактивації елементів додавання по модулю 2 на виходах відповідних елементів зсувних реєстрів. Отримані в роботі результати досліджень дозволяють припустити, що запропонований телекомуникаційний канал з використанням чотирьох різних псевдовипадкових послідовностей з різними циклічними зсувами за певним прихованим законом від кадру до кадру може успішно застосовуватися при реалізації завадозахищених, скритих телекомуникаційних мереж.

Ключові слова: телекомуникаційна мережа; примітивний поліном; псевдовипадкові кодові послідовності; комп’ютерне моделювання; розширення спектру; циклічний зсув послідовності.

Робастный телекоммуникационный канал со сменой параметров от кадра к кадру

А. Г. Плющ, В. В. Вишневский, Ю. В. Березовская

Аннотация. Сделан вывод, что современные телекоммуникационные каналы не в должной мере защищены от помех и перехвата злоумышленниками. Предложено повысить эти показатели в разработанном телекоммуникационном канале за счет использования двух типов псевдослучайных кодовых последовательностей: короткой длительностью 256 чипов, которая используется для расширения спектра бит полезной информации, и протяженной длительностью 32768 чипов, которая помечает размеры кадра и осуществляет дополнительное скремблирование информации. Подчеркивается, что для удовлетворения требований по противодействию перехвату информации злоумышленниками необходимо использовать не одну, а четыре псевдослучайные кодовые последовательности длительностью 32768 чипов с разными циклическими сдвигами кратными 256 чипам. С учетом того, что таких сдвигов насчитывается 128 на каждую из четырех последовательностей и пара последовательность-сдвиг изменяется от кадра до кадра, сделан вывод, что это существенным образом повышает защиту информации от перехвата. Исследованы взаимно и авто корреляционные свойства псевдослучайных кодовых последовательностей, которые оказались очень хорошими для тех последовательностей, которые получаются из примитивных полиномов соответствующего порядка. С помощью программной среды MathLab проведено имитационное компьютерное моделирование предложенного телекоммуникационного канала на основе предложенных кодовых последовательностей, в процессе которого доказано, что незнание определенной последовательности длительностью 32768 чипов и соответствующего циклического сдвига приводит к невозможности перехвата информации злоумышленниками. Подчеркивается, что предложенные псевдослучайные кодовые последовательности могут быть практически реализованы в сдвиговых регистрах восьмого и пятнадцатого порядка, при этом переход от одного циклического сдвига к другому может быть легко осуществлен за счет соответствующих масок, в то время как переход от последовательности к последовательности реализуется за счет активации или деактивации элементов суммирования по модулю 2 на выходах соответствующих элементов сдвиговых регистров. Полученные в работе результаты исследований позволяют предположить, что предложенный телекоммуникационный канал с использованием четырех разных псевдослучайных последовательностей с разными циклическими сдвигами по определенному скрытому закону от кадра к кадру может успешно использоваться при реализации помехоустойчивых, скрытых телекоммуникационных сетей.

Ключевые слова: телекоммуникационная сеть; примитивный полином; псевдослучайные кодовые последовательности; компьютерное моделирование; расширение спектра; циклический сдвиг последовательности.

Volodymyr Pustovarov

Kharkiv Representative Office of the General Customer – State Space Agency of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

CONSTRUCTION OF INFORMATION TECHNOLOGY FOR DEVELOPMENT OF KNOWLEDGE BASE ON IDENTIFICATION OF URBAN STRUCTURES ON DIGITAL SPACE AND AERIAL PHOTOGRAPHS IN THE URBAN ENVIRONMENT MONITORING

Abstract. The efficiency and quality of modern city management are directly linked to the relevant monitoring. Improving the efficiency and validity of the obtained data on the urban environment is possible due to the automation of the system of urban objects identification on digital space and aerial photographs, which involves determining their changes. Therefore, a knowledge base (data), which consists of a set of rules, facts, an inference mechanism that can be implemented through the use of deep neural network or hybrid (fuzzy neural network) models, is therefore needed. This academic paper proposes the technology of formal presentation of the information technology construction for the development of a knowledge base on the identification of urban structures on digital space and aerial photographs in automated monitoring of the urban environment. The developed technology identifies an interdependent set of phases, with the possibility of further parallelization of sub-stages, taking into account the peculiarities of knowledge representation (formalization) on the identification of urban structures on digital space and aerial photographs in automated monitoring of the urban environment.

Keywords: information technology; knowledge base; deep neural network; fuzzy set; automated monitoring; urban environment.

Introduction

Formulation of the problem. It is known that the implementation of effective management of the modern city requires timely receipt of data, which is ensured by appropriate monitoring [1-5]. One of the main requirements for such monitoring is the efficiency and reliability of the data obtained.

Improving the efficiency and reliability of the data obtained in monitoring the urban environment is closely related to the development of an automated system used for identifying urban objects in digital space and aerial photographs, determining the presence of their changes as an intelligent automated system.

The main element of automated systems for identifying urban objects can be a knowledge base (KB), which is a set of rules, facts, inference mechanisms, implemented through the use of a deep neural network or hybrid (fuzzy neural network) models.

Development of a knowledge base is one of the most time-consuming phases in the creation of intelligent systems. However, the issues of an integrated approach to the development of a knowledge base at the industrial level to present and accumulate knowledge on the processes of identifying urban structures on digital space and aerial photographs using deep neural networks and hybrid (fuzzy neural networks) models are insufficiently studied.

Thus, in the subject area there is a contradiction, which, on the one hand, consists in the need to develop a knowledge base (data) for automated systems of identifying urban structures on digital space and aerial photographs using deep neural networks and fuzzy logic, on the other hand the above contradiction consists in the limited capabilities of existing technologies used for the development of such a class of KB with a comprehensive presentation and acquisition of knowledge on the processes of identifying certain

objects on digital space and aerial photographs, and the processes of detecting changes in the urban environment as well as carrying out analysis of their causes.

Analysis of recent research and publications. Currently, there is a substantial body of scholarly work on the development of KB for various purposes [6-8]. Traditionally, the basic technology of KB creation is based on classical technologies of intelligent systems development.

In this case, the prototyping method, which is based on the implementation of a certain sequence of phases of KB development with an intermediate presentation, refinement and creation of a relevant prototype, is used as a basic approach [9]. However, the phases of classical technologies for the creation of intelligent systems are characterized by a fairly conditional, non-formalized, definition of the boundaries of the above stages development, as well as the transitions between them.

All this brings much complexity to the technology of creating a prototype KB for monitoring the urban environment from an industrial perspective, does not make it possible to minimize the required amount of work on the creation of a knowledge base, poses great challenges to the development management, complicates the formulation of tasks and functional responsibilities of developers.

The purpose of the article is to develop a formalized presentation of the construction of information technology for the development of KB on the identification of urban structures on digital space and aerial photographs in automated monitoring of the urban environment using deep neural networks and fuzzy logic.

Basic material

Formally, the information technology of KB development on the identification of urban structures on digital space and aerial photographs in automated

monitoring of the urban environment using deep neural networks and fuzzy logic is proposed to be presented in the form of a tuple [10-12]:

$$T^{KBF} = \left\langle P^{KBF}, \left\{ S_i^{KBF} \right\}, \left\{ C_j^{KBF} \right\}, \left\{ L_k^{KBF} \right\}, \left\{ M_n^{KBF} \right\}, \right\rangle \quad (1)$$

where P^{KBF} is setting the task of KB development on the identification of urban structures on digital space and aerial photographs;

$\left\{ S_i^{KBF} \right\}$ is a set of stages of the corresponding KB development, $i = \overline{1, I}$, I is the total number of development stages;

$\left\{ C_j^{KBF} \right\}$ is a set of connections between the stages from the set $\left\{ S_i^{KBF} \right\}$, $j = \overline{1, J}$, J is the total number of connections;

$\left\{ L_k^{KBF} \right\}$ is a plethora of languages for representation of knowledge on the identification of urban structures on digital space and aerial photographs, $k = \overline{1, K}$, K is the total plethora of knowledge representation languages;

$\left\{ M_n^{KBF} \right\}$ is a set of models of knowledge representation, $n = \overline{1, N}$, N is the total number of models.

The modified phases of classical intelligent systems development are considered as the basic phases from the set $\left\{ S_i^{KBF} \right\}$:

- the stage of knowledge identification $S_1^{KBF} \in \left\{ S_i^{KBF} \right\}$ on the identification of urban structures on digital space and aerial photographs;

- the phases of knowledge conceptualization $S_2^{KBF} \in \left\{ S_i^{KBF} \right\}$;

- the phases of knowledge formalization $S_3^{KBF} \in \left\{ S_i^{KBF} \right\}$;

- the phases of software implementation (prototyping) $S_4^{KBF} \in \left\{ S_i^{KBF} \right\}$;

- the phases of software verification of KB $S_5^{KBF} \in \left\{ S_i^{KBF} \right\}$ [13].

On the phase of knowledge identification S_1^{KBF} , the general statement of the problem of knowledge base development, which determines the necessary resources and sources of knowledge, is achieved.

On the phase of conceptualization S_2^{KBF} , the conceptual model (field of knowledge) of KB $M_1^{KBF} \in \left\{ M_n^{KBF} \right\}$ is formed subject to the following sub-stages:

- 1) based on the analysis of the subject area, the composition of basic knowledge is determined in the form of a verbal description (composition of the field of

knowledge) on the identification of urban structures on digital space and aerial photographs in automated monitoring of the urban environment – $S_2^{K(KBF)}$;

2) based on the knowledge composition, the field of knowledge (structure of the subject area) is directly formed using the appropriate language of the field of knowledge description (this technology uses the construction of conceptual models based on the language of object-oriented modeling UML $L_m^{KBF} \in \left\{ L_m^{KBF} \right\}$ [14]) – $S_2^{M_i(KBF)}$.

On the phase of (presentation) knowledge formalization S_3^{KBF} – a mathematical $M_2^{KBF} \in \left\{ M_n^{KBF} \right\}$ and logical $M_3^{KBF} \in \left\{ M_n^{KBF} \right\}$ model of KB is formed subject to the following sub-stages [15-18]:

- 1) the formalized composition of knowledge on the identification of urban structures on digital space and aerial photographs and the presence of changes in the urban environment are determined – $S_3^{KS(KBF)}$;

- 2) methods of knowledge representation and the choice (development) of methods of knowledge formalization are determined – $S_3^{KR(KBF)}$. In particular, to present knowledge on the identification of urban structures on digital space and aerial photographs and the presence of changes in the urban environment, it is proposed to apply the methods based on the use of interval fuzzy sets of the second type $L_2^{KBF} \in \left\{ L_k^{KBF} \right\}$, interval fuzzy logic systems of the second type $L_3^{KBF} \in \left\{ L_k^{KBF} \right\}$ and modified deep neural networks (convolutional neural network) based on pre-trained models, as well as the models for semantic segmentation $L_3^{KBF} \in \left\{ L_k^{KBF} \right\}$;

- 3) a directly formalized description of knowledge (formation of the mathematical model M_2^{KBF}) is performed using the selected methods of presentation as well as the developed methods of knowledge formalization – $S_3^{KD(KBF)}$;

- 4) for each formalized subtask (segmentation of urban structures on digital space and aerial photographs, detection of changes in the urban environment) a generalized algorithm for its solution is developed (within the mathematical model M_2^{KBF}), the formalized knowledge is taken into account and the trends in the process of KB construction and presentation of the results of solving subtasks are detected – $S_3^{AM(KBF)}$;

- 5) the elements of the mathematical model M_2^{KBF} which are considered as procedural knowledge, are transformed into a logical model of the KB M_3^{KBF} , described using the constructions of representation of

logical models of the language of object-oriented modeling UML $L_1^{KBF} - S_3^{LM(KBF)}$.

On the phase of software implementation (preliminary prototyping) of the KB S_4^{KBF} , a physical model of the KB $M_4^{KBF} \in \{M_n^{KBF}\}$ is constructed, and thus, the software prototype of the KB when performing the following sub-stages is likewise created:

1) the KB architecture, which determines the structure, functions and relationships of the components of the KB – $S_4^{BA(KBF)}$ is developed. In this case, the main elements of the KB are the membership functions of fuzzy sets, the training sample (implicit KB) and the synaptic maps of neural networks;

2) the implementation (prototyping) of the components of the KB – $S_4^{BP(KBF)}$ takes place. In this case, the implementation of the KB components includes the development of design options (model formation M_4^{KBF}) for software implementation of the KB using physical language models of the object-oriented modeling of UML and direct software implementation of the KB using a high-level programming language $L_6^{KBF} \in \{L_k^{KBF}\}$ and (or) the KB

(data) management system $L_7^{KBF} \in \{L_k^{KBF}\}$;

3) the process of populating the KB is based on the elements of the mathematical model M_2^{KBF} , which are considered as declarative knowledge – $S_4^{BP(KBF)}$. The populating of the KB is carried out both as a result of direct introduction of declarative knowledge into the database (for example, when introducing a new or expanding the existing training sample) and as a result of learning the elements of the KB (for example, synaptic maps are generated through neural networks training).

Knowledge can be represented in the form of synaptic maps, which are proposed to be determined by the results of construction and further training of neural networks using specialized simulation tools.

Testing (verification) of the KB $S_5^{KBF} \in \{S_i^{KBF}\}$ is performed directly either on the design solutions,

presented in the form of UML models, or on the program code that implements the prototype (or final version) of the KB on recognition.

In case of errors, the return can be made to any previous stage of KB development, depending on the type of error detected.

Therefore, the set of connections $\{C_j^{KBF}\}$ between the stages of the set $\{S_i^{KBF}\}$ is determined by the order of the above stages implementation (direct connections $C_1^{KBF} - C_4^{KBF}$) and the test results (feedback) $C_5^{KBF} - C_8^{KBF}$.

Thus, multiple phases of information technology T^{KBF} is set as follows:

$$\{S_i^{KBF}\} = \{S_1^{KBF}, S_2^{KBF}, S_3^{KBF}, S_4^{KBF}, S_5^{KBF}\}, \quad (2)$$

$$S_2^{KBF} = S_2^{K(KBF)} \bigcup S_2^{M(KBF)}, \quad (3)$$

$$S_3^{KBF} = S_3^{KS(KBF)} \bigcup S_3^{KR(KBF)} \bigcup S_3^{KD(KBF)} \bigcup \\ \bigcup S_3^{AM(KBF)} \bigcup S_3^{LM(KBF)}, \quad (4)$$

$$S_4^{KBF} = S_4^{BA(KBF)} \bigcup S_3^{BP(KBF)} \bigcup S_3^{BK(KBF)}. \quad (5)$$

Conclusions

Thus, the construction of information technology for the development of KB with regard to the identification of urban structures on digital space and aerial photographs in automated monitoring of the urban environment is proposed. Information technology makes it possible to implement the industrial development of KB on the identification of urban structures on digital space and aerial photographs using neural networks and fuzzy logic, with a clearly defined and interdependent set of phases. Whereby, it is possible to further parallelize the implementation of sub-phases, taking into account the peculiarities of knowledge representation (formalization) on the identification of urban structures on digital space and aerial photographs in automated monitoring of the urban environment. Prospects for further research in this area may be the development of proposals for the use of CAD-facilities to design KB in automated systems for urban environment monitoring.

REFERENCES

- Shikhov, A.N., Cherepanova, E.S. and Ponomarchuk, A.I. (2014), *Geoinformation systems: the use of GIS technologies in solving hydrological problems, a workshop, textbook. manual*, Perm, 91 p.
- De Mers and Michael, N. (1999), *Geographic information systems. Foundations*, Date+, Moscow, 506 p.
- Andriev, S. and Zhilin, V. (2020), "Methodology of creation of atlases of historical cartographic models from data of aerophotography with the use of reoінформаційних technologies", *Advanced Information Systems*, Vol. 4, No. 1, pp. 45-62, DOI: <http://dx.doi.org/10.20998/2522-9052.2020.1.08>
- Andriev, 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>
- Andreev, S. and Zhilin, V. (2019), "Application of aerophotic data with unmanned aircraft for developing 3D models of terrain", *Control, navigation and communication systems*, No. 1(53), Poltava NTU Yuri Kondratyuk, Poltava, pp. 3-16, DOI: <http://dx.doi.org/10.26906/SUNZ.2019.1.003>
- Dennis, A., Wixom, B. & Tegarden, D. (2015), *Systems analysis and design: An object-oriented approach with UML*, John Wiley & Sons, NY, 525 p.

7. Bonczek, R.H., Holsapple, C. and Whinston, A.B. (1981), *Foundations of Decision Support Systems*, Acad. Press, New York.
8. 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.
9. Immon, W.H. (1991), *Building the Data Warehouse*, John Wiley & Sons, New-York, 312 p.
10. Weizmann, V.M. (2002), *Design of economic information systems*, MUBiNT, Yaroslavl, 213 p.
11. Terelyansky, P.V. (2009), *Decision support systems. Experience of design*, Volga State Techn. University, Volgograd, 127 p.
12. Shannon, K. (1963), *Works on information theory and cybernetics*, IIL, Moscow, 829 p.
13. Spirley, E. (2001), *Corporate data warehouses. Planning, development, implementation*, Williams, Moscow, 400 p.
14. 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), pp. 75-81, DOI : <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2017.1.075>.
15. 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>.
16. Nechausov A., Mamusuć I., Kuchuk N. (2017), "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>.
17. 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>
18. Ronneberger, O., Fischer, P. & Brox, T. (2015), "U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation", *International Conference on Medical image computing and computer-assisted intervention*, Springer, pp. 234-241.

Надійшла (reviewed) 24.04.2020

Прийнята до друку (accepted for publication) 19.08.2020

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Пустоваров Володимир Володимирович – начальник групи харківського представництва генерального замовника – Державного космічного агентства України, Харків, Україна;
Volodymyr Pustovarov – chief of group of the Kharkov representative office of general customer – the State space agency of Ukraine, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: pustovarov78volodymyr@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3944-5771>.

Побудова інформаційної технології розробки бази знань про розпізнавання міських будов на цифрових космічних та аерофотознімках при автоматизованому моніторингу міського середовища

Б. В. Пустоваров

Анотація. Ефективність і якість управління сучасним містом безпосередньо пов'язані з веденням відповідного моніторингу. Підвищення оперативності і достовірності отриманої інформації про міське середовище можливе завдяки автоматизації системи розпізнавання міських об'єктів на цифрових космічних та аерофотознімках з визначенням їх змін. Отже, необхідна база знань (даних), яка складена із сукупності правил, фактів, механізмів виведення, що можуть бути реалізовані на основі використання глибоких нейромережевих або гібридних (нечітких нейромережевих) моделей. В статті запропоновано технологію формального представлення побудови інформаційної технології розробки бази знань про розпізнавання міських будов на цифрових космічних та аерофотознімках при автоматизованому моніторингу міського середовища. Розроблена технологія визначає взаємозалежну сукупність етапів, з можливістю подальшого розпаралелювання виконання підетапів, з урахуванням особливостей подання (формалізації) знань про розпізнавання міських будов на цифрових космічних та аерофотознімках при автоматизованому моніторингу міського середовища.

Ключові слова: інформаційна технологія; база знань; глибока нейронна мережа; нечітка множина; автоматизований моніторинг; міське середовище.

Построение информационной технологии разработки базы знаний о распознавании городских строений на цифровых космических и аэрофотоснимках при автоматизированном мониторинге городской среды

Б. В. Пустоваров

Аннотация. Эффективность и качество управления современным городом непосредственно связаны с ведением соответствующего мониторинга. Повышение оперативности и достоверности полученной информации о городской среде возможно благодаря автоматизации системы распознавания городских объектов на цифровых космических и аэрофотоснимках с определением их изменений. Следовательно, необходима база знаний (данных), которая составлена из совокупности правил, фактов, механизмов вывода, которые могут быть реализованы на основе использования глубоких нейросетевых или гибридных (нечетких нейросетевых) моделей. В статье предложена технология формального представления построения информационной технологии разработки базы знаний о распознавании городских строений на цифровых космических и аэрофотоснимках при автоматизированном мониторинге городской среды. Разработанная технология определяет взаимосвязанную совокупность этапов, с возможностью дальнейшего распараллеливания выполнения подэтапов, с учетом особенностей представления (формализации) знаний о распознавании городских строений на цифровых космических и аэрофотоснимках при автоматизированном мониторинге городской среды.

Ключевые слова: информационная технология; база знаний; глубокая нейронная сеть; нечеткое множество; автоматизированный мониторинг; городская среда.

Oleksandr Turovsky

State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine

CLARIFICATION OF THE ALGORITHM FOR ESTIMATING THE FREQUENCY OF THE SIGNAL RECEIVED BY THE SATELLITE COMMUNICATION SYSTEM IN A CONTINUOUS MODE UNDER THE INFLUENCE OF «NEIGHBORING CHANNELS»

Abstract. Satellite communication systems that use phase modulation of a signal designed to transmit useful information in a continuous mode face the problem of frequency uncertainty of the signal when used as intended. For demodulators of satellite modems of such systems operating with a continuous input signal, the most significant is the problem of synchronization in the frequency of carrier oscillations in the conditions of frequency uncertainty of the signal. This synchronization task is actually reduced to estimating the true parameters of the signal, namely the estimation of the carrier frequency. The complexity of the task of estimating the carrier frequency in a satellite channel with phase modulation is exacerbated by the presence of additional interfering actions of "neighboring channels" - signals with the same type of modulation and the same data rate. The paper specifies the algorithm for estimating the carrier frequency of the signal received by the satellite communication system in a continuous mode, taking into account the influence of "neighboring channels" of information transmission. This algorithm allows to estimate the carrier frequency according to the rule of maximum likelihood, taking into account the condition of uncertainty of all parameters of the signal received by the satellite communication system in continuous mode, taking into account the influence of "neighboring channels" of information with a minimum observation interval. It includes the steps of: calculating the readings of the amplitude spectrum of the received signal and counting the convolution of the obtained amplitude spectrum with frequency response UV; calculating the count of the derivative convolution and finding the initial estimate of the frequency; based on the obtained evaluation of the evaluation procedure based on the multiplication of the phase of the received signal and the calculation of the estimated carrier frequency of the received signal. In order to assess the effectiveness of this algorithm in the comparison of the effectiveness of the estimates provided by the proposed procedure and the estimates made on the basis of subtraction of the global maximum convolution of the amplitude spectrum of the received signal. The results of this assessment presented in the paper showed that the dependences of the normalized variance on practically do not differ. That confirms the efficiency and feasibility and practical value of the algorithm for estimating the carrier frequency given in the work, taking into account the influence of "neighboring channels" of useful signal transmission. A promising area for further study of the issues raised in the work is the adaptation of this algorithm to the carrier frequency estimation in combined phase synchronization systems that have the ability to increase the order of astigmatism, monitoring the carrier frequency (pilot signal), the phase of which is modulated by a deterministic Doppler signal.

Keywords: estimation of signal carrier frequency; minimum limiting variance of carrier frequency estimation; influence of "neighboring channels" of information transmission; fast Fourier transform function; signal frequency estimation algorithm.

Introduction

Satellite communication systems that use phase modulation of a signal designed to transmit useful information in a continuous mode face the problem of frequency uncertainty of the signal when used as intended. For demodulators of satellite modems of such systems operating with a continuous input signal, the most significant is the problem of synchronization in the frequency of carrier oscillations in the conditions of frequency uncertainty of the signal. This synchronization task is actually reduced to estimating the true parameters of the signal, namely the estimation of the carrier frequency. The complex signal envelope contains unknown values v , ϕ , τ . That is, the task of synchronization is actually reduced to the assessment of the true parameters of the received signal – v , ϕ , τ , knowledge of the parameters of which is necessary for demodulation of the signal [2].

The best results can be obtained by a joint assessment of unknown signal parameters. However, in practice, it is not possible to implement such an estimate in a channel with low energy and high frequency uncertainty of the received signal. Therefore, the estimation of the carrier frequency offset of the signal received relative to the nominal value is performed before other synchronization procedures are included, namely: phase synchronization and clock synchronization [3-5].

The complexity of the task of estimating the carrier frequency in the satellite channel is exacerbated by the presence of additional interfering actions of "neighboring channels" - signals with the same type of modulation and the same data rate [6,7].

Sufficiently effective results of carrier frequency estimation can be obtained by applying a two-stage algorithm for estimating the carrier frequency of a phase-modulated signal of a satellite communication system when transmitting data in a continuous mode, taking into account the uncertainty of all signal parameters. Achieving the minimum observation interval in the given carrier frequency estimation algorithm is ensured by using the fast Fourier transform function [8].

In practice, the signal of the "neighboring channel" can exceed the signal level in the main channel by 7 dB, the difference in frequency of the "neighboring channel" from the main is a value equal to $1/4T$ [6]. The algorithm presented in [8] does not take into account the influence of "neighboring channels". That is, an effective assessment of the carrier frequency in a satellite channel requires consideration of the influence of adjacent channels. Which, in turn, necessitates the improvement of appropriate estimation algorithms.

Analysis of recent research and publications. The issue of determining the estimate of the carrier frequency of the signal received by the communication system in a continuous mode and the development of the procedure for

conducting this assessment, taking into account the influence of various factors, a number of works.

The authors of [9] proposed an algorithm for joint estimation of carrier frequency, its synchronization and determination of carrier frequency shift in channels with additive white Gaussian noise. This algorithm uses a frequency filter followed by a selection of input pulses in order of importance, takes into account the previous distribution of evaluation parameters and includes recommendations for re-sampling to solve the degeneracy problem and fine-tune the estimated values of the input signal frequency. The issue of assessing the impact of "neighboring channels" in this work was not considered.

In [10] the method of sequence synchronization proposed by the authors is considered, which expands in the conditions of significant excess of the noise level over the level of the information signal. For synchronization the service channel which works on one frequency with information is used. Channel distribution is performed during the formation of signals of quadrature channels: in-phase channel is used to generate a phase-locked signal with spread spectrum, quadrature channel is used to transmit a clock signal. The synchronization algorithm proposed by the authors lacks data and procedures for calculating the impact of "neighboring channels", and does not take into account the evaluation interval.

In [11] a variant of technical implementation of high-speed carrier frequency recovery algorithm by direct phase adjustment method of reference generator with simultaneous elimination of phase ambiguity and allocation of frame synchronization using coordinated filters with Barker sequences is proposed. The use of this algorithm involves a preliminary assessment of the carrier frequency of the input signal, but without taking into account the interval of determination and evaluation of the impact of "neighboring channels".

The author of [12] proposes an approach to reduce the error of estimating the carrier and symbol frequency of signals with digital modulation by methods based on the analysis of the frequency characteristics of the signal. The approach is based on the calculation of the first derivative of the spectral density function and the search for zero by the iterative method of the erroneous position. This approach allows to ensure the relative accuracy of frequency estimation to 10^{-7} with a slight increase in the number of computational operations, but the issue of increasing system speed and directly taking into account the impact of "neighboring channels" against the background of reducing the estimation interval is not considered.

In [13], based on the relative correlation characteristics of the pseudo-noise sequence, an algorithm for estimating the carrier frequency was developed, using a preamble with the specified sequence. The evaluation results of this algorithm, presented in the work, showed its relative efficiency in terms of estimation accuracy, savings in system resources and stable in the unstable state of the communication channel. The question of the influence of the carrier assessment interval on the efficiency of the system and the question of the assessment of the influence of "neighboring channels" were not considered in the work.

In [14, 15] the issues of increasing the accuracy of estimating the carrier frequency of the received signal, increasing the speed of the carrier frequency estimation system, storage resource of the signal receiving system in the unstable state of the input signal receiving channel and low signal-to-noise ratio are considered. It is proposed to use a pseudo-noise sequence in the development of an algorithm for estimating and restoring the carrier frequency. The issues of assessment of the impact of "neighboring channels" and reduction of the assessment interval in these works are not considered.

Certain results of the assessment of the impact of neighboring channels are presented in [16]. But in this work there is no consideration during the evaluation of all signal parameters, and the lack of an algorithm to reduce the evaluation interval, which generally affects the quality of the results.

Analysis of the impact of "neighboring channels"

The influence of "neighboring channels" on the efficiency of estimating the carrier frequency of the FM signal will be estimated by the method of mathematical modeling. During the simulation, the samples of the complex envelope of the received signal were generated, which are presented in the following form [2, 8, 17]:

$$z_n = \exp(j(2\pi\nu \cdot n/F_d)) \cdot \sum_k (n/F_d - kT - \tau) + 2,24 \cdot (z_n^+ + z_n^-) + w_n, \quad (1)$$

where $z_n^+ = \exp(j(2\pi(\nu + 1.4 \cdot T) \cdot n/F_d + \phi^+)) \times \sum_k d_k^+ h \cdot (n/F_d - kT - \tau^+);$

$$z_n^- = \exp(j(2\pi(\nu - 1.4 \cdot T) \cdot n/F_d + \phi^-)) \times \sum_k d_k^- h \cdot (n/F_d - kT - \tau^-);$$

The influence of "neighboring channels" on the complex envelope of the signal was taken into account during the simulation in expression (1) through the value of 2.24. The value of which means the fact that the levels of adjacent channels exceed the level of the main channel by 7 dB ($20\lg(2.24) = 7$) [4]. As before, assume that the values of ϕ , ϕ^+ , ϕ^- are independent and evenly distributed in the range $[0, 2\pi]$. Values τ , τ^+ , τ^- independent, evenly distributed in the range $[0, T]$ of random variables. The transmitted data d_k , d_k^+ , d_k^- were generated from three independent random number sensors.

As an example in Fig. 1 shows a fragment of the normalized amplitude spectrum of one of the received signal implementations obtained during the simulation [16]. In this Fig. 1 i the abscissa reflects the sequence number of the amplitude of the spectrum obtained by FFT length 2048. In Fig. 2 shows the result of calculating the convolution of the amplitude spectrum of the signal with the amplitude-frequency characteristic of the matched filter (AFCh MF) [16]. In this case, the maximum convolution of the amplitude spectrum of the signal received from the AFCh MF is far enough from the actual frequency of the carrier oscillation of the signal of the main channel.

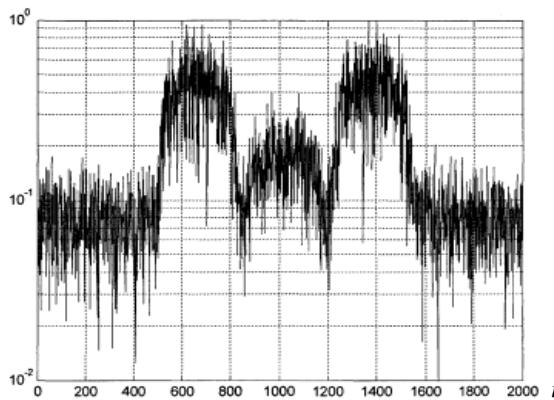


Fig. 1. Normalized amplitude spectrum of the received signal.
 $N_f = 2048$, type of modulation FM-2, $E_b/N_0 = 0 \text{ dB}$, $v = 0$

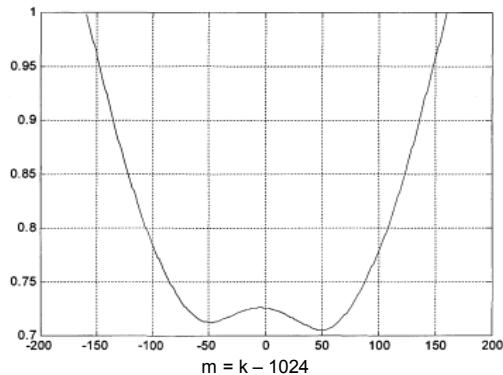


Fig. 2. Normalized convolution of the amplitude spectrum of the signal received from the AFCh MF, taking into account the influence of "neighboring channels"

The identified case differs significantly from that presented in [8] in the absence of "neighboring channels" (Fig. 3). In this case, the implementation of the procedure of the first stage of the estimation algorithm based on finding the abscissa of the global maximum convolution of the amplitude spectrum of the signal received from AFCh MF gives an erroneous estimate of the carrier frequency of the main channel signal.

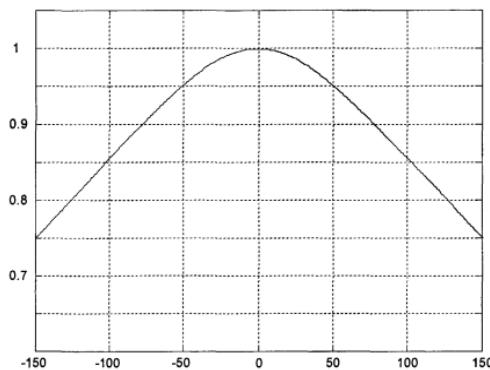


Fig. 3. Normalized convolution of the amplitude spectrum of the signal received from the AFCh MF

But on the dependence presented in Fig. 2, there is a point maximum, at which the first derivative turns into 0 (around $m = 0$). In fact, in the neighborhood $m = 0$, we observe the maximum point of some function, which determines the dependence of the convolution value SW_m on the number of the spectral component m .

Thus, the problem is to find the value of the abscissa of the considered maximum.

The proposed evaluation procedure differs from the above in that the evaluation of the first stage is not sought on the abscissa of the considered convolution maximum, but on the abscissa of the maximum of the considered function, in which the first derivative is converted to 0. The canonical solution of the problem of finding the extrema of a function is reduced to the numerical differentiation of the dependence SW_m as a function of the quantity m .

It is known that the implementation of the operation of numerical differentiation gives significant noise emissions. Therefore, thinning was used to perform this procedure to smooth out noise emissions. Numerical differentiation of dependence SW_m with thinning is realized as follows:

$$SW_m^1 = df_0 \left(SW_{m-m_0} - SW_{m+m_0} \right) + \\ + df_1 \left(SW_{m+m_0/2} - SW_{m-m_0/2} \right),$$

where SW_m^1 – the first derivative of the convolution; $m = -N_{\max} + m_0, -N_{\max} + 2m_0, \dots, N_{\max} - m_0$, m_0 – even positive number; $N_{\max} = \lceil (v_{\max}/F_d) \cdot N_f \rceil$, df_0 , df_1 – positive constants.

As a result of calculations of the first derivative convolution there is a point K_{loc} which is defined as a point of change of a sign of a derivative from a plus to a minus. Since differentiation was performed with thinning, the value K_{loc} did not directly determine the extremum point.

To find the latter, you need to return to the dependence SW_m and find the corresponding point of the local convolution maximum M_{loc} as follows:

$$M_{loc} = \arg \{ \text{Max} \{ SW_m \} / (m_0 (K_{loc} - 1)) \}.$$

The value M_{loc} actually determines the amount of offset of the carrier frequency of the main channel. Accordingly, the assessment is rewritten as:

$$\bar{v} = M_{loc} \cdot (F_d / N_f). \quad (2)$$

Based on the assessment of the formulas (2), in turn, an evaluation procedure based on the multiplied phases of the received signal is performed. As a result:

$$\bar{v} = \bar{v}_0^1 + (1/M_{\phi}) \cdot f_{M_1}. \quad (3)$$

It should be noted that the increase m_0 leads to the smoothing of noise emissions of the first derivative, but on the other hand leads to a deterioration in the accuracy of the estimate at the calculation stage K_{loc} . It was experimentally established that in the considered conditions for realization of procedure of differentiation it is necessary to stop on $m_0 = 16$. For $m_0 = 16$, $df_0 = 2/3$, $df_1 = 1/12$. The simulation results showed that even under the worst conditions (adjacent channels have the

maximum allowable level and is characterized by the minimum allowable frequency offset) in the considered convolution there is a maximum point at which the first derivative is converted to 0.

As an illustration, the result of numerical differentiation of the dependence presented in Fig. 2 for $m_0 = 16$, presented in Fig. 4 [16].

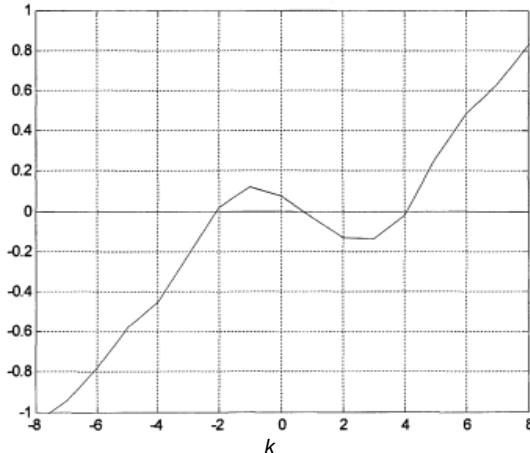


Fig. 4. The results of the calculation of the first derivative convolution

When calculating the derivative k varies from

$$-[N_{\max}/m_0]-1 \text{ to } [N_{\max}/m_0]+1.$$

Thus, the algorithm for estimating the frequency of the carrier oscillation of the FM signal is as follows.

1. Calculate the samples of the amplitude spectrum of the signal received in accordance with (4) and the samples of the convolution of the obtained amplitude spectrum with AFCh MF in accordance with (5) [8]:

$$SR_k = \begin{cases} G_{k+\frac{N_f}{2}}, & k = 0, 1, \dots, N_f/2-1 \\ G_{k+N_f/2}, & k = N_f/2, N_f/2+1, \dots, N_f-1 \end{cases}, \quad (4)$$

$$SW_m = SR_{m+N_f/2} + \sum_{k=1}^{M_1-1} H_k [SR_{m+N_f/2+k} + SR_{m+N_f/2-k}] \quad (5)$$

2. Calculate the derivative of the derivative convolution and find the initial estimate of the frequency in accordance with rule (2);

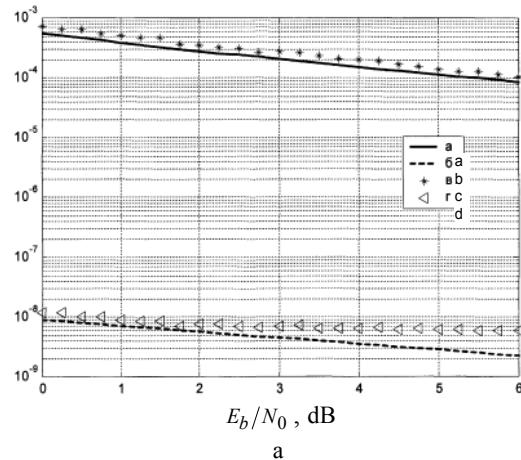
3. On the basis of the received estimation the estimation procedure based on multiplication of a phase of the received signal is carried out and the estimation of a carrier frequency of the signal received according to expression (3) is calculated.

To analyze the effectiveness of the evaluations provided by the proposed evaluation algorithm, computer simulation of the described procedure was performed. Consider the simulation results for FM-2 in the case of the presence of two «neighboring channels». The simulation conditions are set out above.

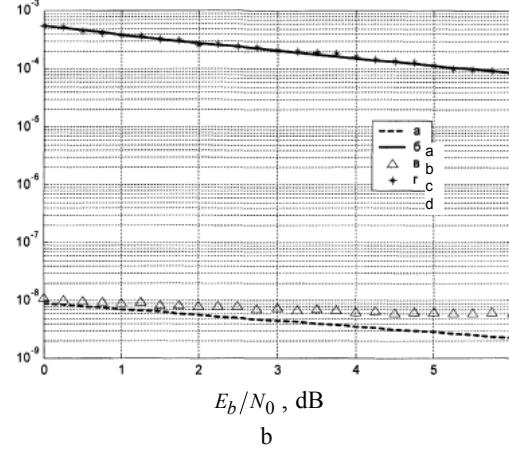
Fig. 5, a shows the dependences of the normalized variances of estimates $\bar{\sigma}_C^2 * T^2$; $g - \bar{\sigma}_v^2 * T^2$ from the

ratio E_b/N_0 for FM-2 and $K = 256$. Fig. 5, a also shows the normalized boundaries $\sigma_v^2 * T^2$; $b - \sigma_C^2 * T^2$.

Of particular interest is the comparison of the efficiency of the estimates provided by the evaluation procedure proposed in this section and the evaluation procedure based on the calculation of the global maximum convolution of the amplitude spectrum of the signal received from the AFCh MF. To compare the effectiveness of the obtained estimates, we compare the dependences given in Fig. 5. Note that the dependence of the normalized variance of the estimate $\bar{\sigma}_C^2 * T^2$ on the ratio E_b/N_0 in Fig. 5, a is almost no different from the corresponding dependence presented in Fig. 5, b.



a



b

Fig. 5. Type of modulation FM-2. $K = 256$; normalized minimum limiting variance: a – $\bar{\sigma}_v^2 * T^2$; b – $\bar{\sigma}_C^2 * T^2$; normalized variances of carrier frequency estimates:

$$c - \bar{\sigma}_C^2 * T^2; d - \bar{\sigma}_v^2 * T^2$$

The refined algorithm proposed in the work allows the pain to accurately estimate the carrier frequency of the received signal and, therefore, in general, significantly improve the operation of the synchronization system. In turn, a promising area for further improvement of this system is the use of combined phase synchronization systems, which have the ability to increase the order of astatism, while monitoring the carrier frequency (pilot signal), the phase of which is modulated by a deterministic Doppler signal [18]. In turn, the further adaptation of

the proposed algorithm to estimate the carrier frequency relative to the combined synchronization systems in both continuous and packet modes of signal reception, is a development of the proposed direction to improve the quality of the synchronization system [19].

Conclusions

The paper specifies the algorithm for estimating the carrier frequency of a signal received by a satellite communication system in a continuous mode, taking into account the influence of "neighboring channels" of information transmission. This algorithm allows to estimate the carrier frequency according to the rule of maximum likelihood, taking into account the condition of uncertainty of all parameters of the signal received by the satellite communication system in continuous mode, taking into account the influence of "neighboring channels" of information with a minimum observation interval.

Achieving the minimum observation interval in the given carrier frequency estimation algorithm is ensured by using the fast Fourier transform function and estimation steps:

- calculating the readings of the amplitude spectrum of the signal received in and the reading of the convolution of the obtained amplitude spectrum with AFCh MF;

- calculation of the reference of the derivative convolution and finding the initial estimate of the frequency;

- based on the obtained evaluation of the evaluation procedure based on the multiplication of the phase of the received signal and the calculation of the estimated carrier frequency of the received signal.

The paper compares the efficiency of the estimates provided by the proposed procedure and the estimates made on the basis of subtraction of the global maximum convolution of the amplitude spectrum of the received signal. A promising direction for further study of the issues raised in the work is the adaptation of this algorithm to the carrier frequency estimation in combined phase synchronization systems that have the ability to increase the order of astigmatism, monitoring the carrier frequency (pilot signal), the phase of which is modulated by a deterministic Doppler signal.

REFERENCES

1. Horbatyy, I.V (2011), *Systems of remote sensing of the Earth from space*: monograph, SPOLOM, Lviv, 612 p.
2. Lyons, R.G. (2010), *Understanding Digital Signal Processing*, Prentice Hall, Boston, 992 p.
3. Boyko, Y.M. (2011), "Analysis of digital methods of modulation / demodulation in communication and information transmission systems", *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*, Khmelnytskyi, No. 1, pp. 103-110.
4. Brusin, E.A. (2007), "The use of FFT for estimating the carrier frequency of FM signals in demodulators of satellite communication systems", *Tsifrovaya obrabotka signalov*, St. Petersburg, No 2, pp.14–18.
5. Pavlenko, M.P. (2012), "Implementation of Viterbi decoder on FPGA for satellite communication systems", *Visnyk Natsionalnoho tehnichnogo universytetu Ukrayiny "KPI"*. 75 Seriya: Radiotekhnika, Kyiv, No. 49. pp. 71–75.
6. Dovgopoly, A.S., Ponomarenko, S.O., Ponomarenko, V.O., Tverdokhlibov, V.V. and Biloborodov O.O., (2018), "Improvement of satellite navigation systems of armaments and military equipment under the influence of intentional interference", *Ozbrojenya ta viyskova tekhnika*, Kyiv, No. 1 (17), pp. 67-71.
7. Puzyrev P.I. (2012), "Investigation of the influence of interference on the adjacent channel on the probability of error in receiving a frequency-manipulated signal", *Omskiy nauchnyy vestnik*, Omsk, No 3 (112), pp.344-348.
8. Turovsky, O.L. (2020), "Analysis of the efficiency of application of a two-stage algorithm for estimating the carrier frequency of a phase-modulated signal of a satellite communication system during data transmission in a continuous mode", *Zvyazok*, Kyiv, No 3 (143), pp. 22–31.
9. Nasir, A.A. (2012), "Particle filters for joint timing and carrier estimation: Improved resampling guidelines and weighted bayesian cramer–rao bounds", *IEEE Trans. Commun.*, No 60(5), pp.1407–1419.
10. Tikhomirov, A.V. (2019), "Synchronization in systems with direct spectrum expansion", *Inzhenernyy vestnik Dona*, Rostov on Don, No 9 (60), pp. 69-70.
11. Sadchenko, A.V., Kushnirenko, O.A., Koshelev, E.K. and Bondar, V.I., (2018), "Fast-acting algorithm for carrier frequency recovery and phase synchronization in modems with QPSK modulation", *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, Moscow, No 1, pp.28-36.
12. Nagorniyuk, O.A. (2013), "Improving the accuracy of estimating the carrier and symbol frequency of signals with digital modulation", *Problemy stvorennya, zastosuvannya ta ekspluatatsiyi skladnykh informatsiynykh system*: Vol. 8, pp. 62–70.
13. Dzhing, K., Zhong U., Lu Y. and Yan K. (2013), "Investigation of the algorithm for estimating the carrier frequency offset using the preamble with a pseudo-noise sequence", *Radioelektronika*, Vol. 56, No 1, pp. 34-42, DOI: <https://doi.org/10.20535/S0021347013010032>
14. Juan, A.M. and Cecilia, G.G.(2011), "Block synchronization algorithms for UWB–OFDM systems", *Digital Signal Processing*, Vol. 21(2), pp. 187–295, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2010.06.011>
15. Weizhi, Z., Yuping, L. and Xiaoju, Y. (2013), "Research on carrier frequency offset estimation algorithm based on PN sequence preamble in OFDM system", *Radioelectronics and Communications Systems*, Kyiv, Vol. 56, pp. 29–35.
16. Brusin, E. A. (2007), "Estimation of the carrier frequency of FM signals in the demodulators of satellite communication systems", *Elektrosvyaz'*, St. Petersburg, No 5, pp. 12–13.
17. Salim O.H. (2014), "Channel, phase noise, and frequency offset in OFDM systems: Joint estimation, data detection, and hybrid cramer-rao lower bound", *IEEE Trans. on Comm.*, No. 62(9), pp. 3311–3325, DOI: <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2014.2345056>
18. Turovsky O., Khlaponin Y. and Muhi-Aldin H. M. (2020), "Combined system of phase synchronization with increased order of astigmatism in frequency monitoring mode", *CEUR Workshop Proceedings*, Vol. 2616, Session 1, pp. 53–62.
19. Turovsky, O., Drobyk, O., Makarenko, A. and Khokhlyuk, O. (2020), "Estimates of the carrier frequency of the signal received by the satellite communication system in package mode", *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, Vol 9, No. 3, pp. 3223–3228, DOI: <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2020/115932020>.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Туровський Олександр Леонідович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач відділу, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

Oleksandr Turovsky – candidate of Engineering Sciences, associate professor, head of the department, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine;
e-mail: s19641011@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4961-0876>.

**Уточнення алгоритму оцінки частоти сигналу, що приймається системою супутникового зв'язку
в безперервному режимі при умові впливу «сусідніх каналів»**

О. Л. Туровський

Анотація. Супутникові системи зв'язку, які використовують фазову модуляцію сигналу, що призначений для передачі корисної інформації в безперебірному режимі, при застосуванні за призначенням стикаються з проблемою частотної невизначеності сигналу. Для демодуляторів супутникових modemів таких систем, що працюють з безперервним входним сигналом, найбільш значущою є проблема синхронізації по частоті несучого коливання в умовах частотної невизначеності сигналу. Вказане завдання синхронізації фактично зводиться до оцінки істинних параметрів сигналу, а саме оцінки несучої частоти. Складність завдання оцінки несучої частоти в супутниковому каналі з фазовою модуляцією усувається наявністю додаткових заважаючих дій «сусідніх каналів» – сигналів з тим же самим типом модуляції і тією ж швидкістю передачі інформації. В роботі уточнено алгоритм оцінки несучої частоти сигналу, що приймається супутниковою системою зв'язку в безперервному режимі з урахуванням впливу «сусідніх каналів» передачі інформації. Вказаний алгоритм дає зможу здійснити оцінку несучої частоти по правилу максимальної правдоподібності з врахуванням умови невизначеності всіх параметрів сигналу, що приймається супутниковою системою зв'язку в безперервному режимі з урахуванням впливу «сусідніх каналів» передачі інформації при мінімальному інтервалі спостереження. Він включає етапи: обчислення відліку амплітудного спектру сигналу, що приймається і відліку згортки отриманого амплітудного спектру з АЧХ УФ; обчислення відліку похідної згортки і знаходження первинної оцінки частоти; на основі отриманої оцінки проведення процедури оцінки, основаної на множенні фазі сигналу, що приймається і обчислення оцінки несучої частоти сигналу, що приймається. З метою оцінки ефективності вказаного алгоритму в роботі проведено порівняння ефективності оцінок, забезпечених запропонованою процедурою і оцінок, здійснених на основі одрахування глобального максимуму згортки амплітудного спектру сигналу, що приймається. Подані в роботі результати вказаної оцінки показали, залежності нормованої дисперсії від практично не відрізняються. Що підтверджує ефективність та реалізуемість та практичну цінність поданого в роботі алгоритму оцінки несучої частоти з урахуванням впливу «сусідніх каналів» передачі корисного сигналу. Перспективним напрямком подальшого дослідження порушених в роботі питань є адаптація вказаного алгоритму до оцінки несучої частоти в комбінованих системах фазової синхронізації, що мають можливість до підвищення порядку астатизму, при стеженні за несучою частотою (пілот - сигналом), фаза якої модульована детермінованим допплерівським сигналом.

Ключові слова: оцінка несучої частоти сигналу; мінімально гранична дисперсія оцінки несучої частоти; вплив «сусідніх каналів» передачі інформації; функція швидкого перетворення Фур'є; алгоритм оцінки частоти сигналу.

**Уточнение алгоритма оценки частоты сигнала системой спутниковой связи в непрерывном режиме
при условии влияния «соседних каналов»**

А. Л. Туровский

Аннотация. Спутниковые системы связи, использующие фазовую модуляцию сигнала, который предназначен для передачи полезной информации в безперебивном режиме, при применении по назначению сталкиваются с проблемой частотной неопределенности сигнала. Для демодуляторов спутниковых модемов таких систем, работающих с непрерывным входным сигналом, наиболее значимой является проблема синхронизации по частоте несущего колебания в условиях частотной неопределенности сигнала. Указанное задание синхронизации фактически сводится к оценке истинных параметров сигнала, а именно оценки несущей частоты. Сложность задачи оценки несущей частоты в спутниковом канале с фазовой модуляцией усугубляется наличием дополнительных мешающих действий «соседних каналов» - сигналов с тем же типом модуляции и той же скоростью передачи информации. В работе уточнен алгоритм оценки несущей частоты сигнала спутниковой системой связи в непрерывном режиме с учетом влияния «соседних каналов» передачи информации. Указанный алгоритм позволяет осуществить оценку несущей частоты по правилу максимального правдоподобия при условии неопределенности всех параметров сигнала спутниковой системой связи в непрерывном режиме с учетом влияния «соседних каналов» передачи информации при минимальном интервале наблюдения. Он включает этапы: вычисление отсчета амплитудного спектра сигнала и отсчета свертки полученного амплитудного спектра с АЧХ УФ; вычисления отсчета производной свертки и нахождения первичной оценки частоты; на основе полученной оценки проведения процедуры оценки, основанной на умножение фазе сигнала и вычисления оценки несущей частоты сигнала. С целью оценки эффективности указанного алгоритма в работе проведено сравнение эффективности оценок, обеспеченных предложенной процедурой и оценок, сделанных на основе расчетов глобального максимума свертки амплитудного спектра сигнала. Представленные в работе результаты указанной оценки показали, зависимости нормированной дисперсии от практически не отличаются. Что подтверждает эффективность и реализуемость и практическую ценность представленного в работе алгоритма оценки несущей частоты с учетом влияния «соседних каналов» передачи полезного сигнала. Перспективным направлением дальнейшего исследования затронутых в работе вопросов является адаптация указанного алгоритма к оценке несущей частоты в комбинированных системах фазовой синхронизации, имеют возможность к повышению порядка астатизма, при сложке за несущей частотой (пилот - сигналом), фаза которой модулирована детерминированным допплеровским сигналом.

Ключевые слова: оценка несущей частоты сигнала; минимально предельная дисперсия оценки несущей частоты; влияние «соседних каналов» передачи информации; функция быстрого преобразования Фурье; алгоритм оценки частоты сигнала.

Information systems research

UDC 621.396

doi: 10.20998/2522-9052.2020.3.10

Volodymyr Vasylyshyn

Kharkiv National University of Air Forces, Kharkiv, Ukraine

DOA ESTIMATION BASED ON PROXIMITY OF THE ROOTS OF SEVERAL POLYNOMIALS OF SUPERRESOLUTION METHODS

Abstract. Subject of study is the performance of methods of the spectral analysis in the presence of outliers. The purpose of this paper is to increase the efficiency of spectral analysis (i.e. to reduce the root mean square error (RMSE) of direction-of-arrival (DOA) estimation based on root similarity approach initially proposed by A. Gershman. The used methods are: spectral analysis methods, pattern recognition methods, digital statistical modeling methods. The following results were obtained. The root classification approach is used in the case of joint application of two types of data covariance matrix (standard covariance matrix (CM) and estimate of CM with Toeplitz structure). This approach removes the outliers (outlying roots) from preliminary DOA estimates (roots corresponding to the preliminary DOAs). The modification of initial root classification approach is proposed. It consists of avoiding averaging of DOA estimates obtained by estimator for the different CM at high signal-to-noise ratios (SNRs). This step for considered case allows to improve the performance of DOA estimation using the root classification approach. Simulation results are presented confirming the performance of proposed approach. Conclusions. The performance improvement of the subspace-based methods of spectral analysis can be attained by removing the outliers from the initial DOA estimates. The simultaneous application of classical second-order CM and estimate of structured CM gives two sets of DOA estimates (roots of polynomials). Root classification approach processes these sets and improves the performance of DOA estimation. The modification proposed in the paper gives the additional advantage at high SNR. The considered approach is also can be used together with other polynomial rooting methods of DOA estimation.

Keywords: Direction-of-arrival estimation; Karhunen-Loève transformation; spectral decomposition of correlation matrix; spectral analysis methods; pattern recognition.

Introduction

Problem formulation in general form. The theory of superresolution has the fundamental results and many practical applications in the radiotechnical and information systems [1-3]. The methods and principles of the superresolution are widely used in the problems of direction-of-arrival (frequency) estimation, time of arrival estimation, delay estimation, multipath parameter estimation, signal separation and localization, signal (pattern) recognition in radar and communication, image processing, passive millimeter-wave imaging, frequency multiplexing, channel estimation, precoding in communication, collision resolution in packet radio networks, directional medium-access-control (MAC) protocol for mobile ad hoc networks (MANET), physical-layer secrecy in wireless systems with MIMO (multiple input–multiple output) [4]. This list can be extended by many applications arising in many areas. Furthermore, the resolution problem can be considered as consisting from the detection-resolution problem, measurement-detection-resolution. In the information systems the problem of resolution can be considered as information extraction from the set of nonorthogonal signals.

The traditional results are refined and extended based on results obtained in nonlinear dynamics, functional analysis, graph spectral theory, random matrix theory, properties of communication signals, sparse representation of signals and so on [4].

Modern methods of superresolution (so called subspace-based or eigenstructure methods) are related with Karhunen-Loève transforms and elements of the functional analysis, principal component analysis. Karhunen-Loève transformation is also widely used for

dimension reduction in signal processing, pattern recognition [1-6].

The performance degradation of the subspace-based methods can be explained by appearance of outliers in the parameter estimates in the practically important situations with small sample, signal-to-noise ratios and so on [1, 2, 4-10].

Performance of the parameter estimation by subspace-based methods can be improved by application of the group of the subspace-based methods with different characteristics (so called joint estimation strategy), subspace-based method with second-order and higher-order CM, resampling approaches (bootstrap, pseudo noise resampling, surrogate data technology), singular spectrum analysis (SSA) [4, 6-10]. The different levels of implementation of the concept of the outlier removing are known [6-10]. The process of elimination can be realized on the level of estimators (i.e. elimination of the estimators that gave parameter estimates with outliers) and on the level of roots of polynomial rooting methods [7].

The aim of the paper is improving the performance of DOA estimation by removing the outliers from the estimation process based on the elimination of the outlying roots from the underlying DOA estimators and using features characterizing the signal roots.

The analysis of the previous investigations and publications. The problem of the outlier reduction in DOA estimation was mentioned in the several works [1, 7-10]. In the general case the source angular sectors were used. This approach was used in the case of estimator bank formed using pseudorandom weighting of eigenvectors, pseudonoise resampling [7-10]. It can

be used in the case of traditional methods related with spatial spectrum (MUSIC, Min-Norm) and with parallel search methods (Root-MUSIC, ESPRIT). As an alternative way the substitution of the preliminary DOA estimates into the likelihood (ML) function is possible [1].

The approach with angular sector requires the information which is known a priori or these sectors must be estimated. In the first and second case (case with ML function) the performance is dependent on quality of CM estimate. Therefore, it is of interest to consider the using the root classification scheme [7] that can be applied to polynomial rooting methods (Root-MUSIC, Root-Min-Norm and so on).

The scheme was used in the context of joint application of two types of CM. The traditional second order and fourth order (cumulant) CMs with Root-MUSIC were considered in [7]. However, the possibility of application of the root classification approach for the case of combined application of the traditional matrix and estimate of Toeplitz matrix was not mentioned.

Approach from [7] consists of test of root similarity and proximity to the unit circle. The part of the approach was considered in [9] and named as distance detection strategy.

The motivation for using distance functions as a classification tool follows from the pattern recognition theory [5]. In turn, the most obvious way of determination of the similarity measure between pattern vectors is in estimation of their proximity.

It should be noted that problem of final root selection arises also for the case of DOA estimation in the case with interpolated arrays [10].

Joint application of the traditional CM and Toeplitz CM was considered in [4]. Source angular sectors were used in that work. However, the problem was the difference in the performance of proposed approach from one of the estimator with Toeplitz CM at low and medium SNRs. Therefore, it is of interest to find the ways of minimizing the mentioned drawback. This can be performed by using results of [7].

Signal model and proposed approach

Assume the uniform linear array of M elements receiving $V < M$ narrowband signals from far-field sources located at unknown DOAs $\theta_1, \dots, \theta_V$. The number of sources is estimated by one of the known methods such as AIC, MDL [1]. The output of ULA can be modeled as

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{Ax}(t) + \mathbf{n}(t). \quad (1)$$

The problem is estimation of DOAs of the sources $\mathbf{u} = [\theta_1, \dots, \theta_V]^T$ based on observations (1). Here $\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1), \dots, \mathbf{a}(\theta_V)]$ is the array direction matrix, $\mathbf{x}(t)$ is the vector of source waveforms, $\mathbf{n}(t)$ is the vector of white Gaussian noise, $(\cdot)^T$ denotes the transpose. Using the made assumptions the CM of array output can be written

$$\mathbf{R}_y = E[\mathbf{y}(t)\mathbf{y}^H(t)] = \mathbf{AR}_s\mathbf{A}^H + \sigma^2\mathbf{I}, \quad (2)$$

where $\mathbf{R}_s = E[\mathbf{s}(t)\mathbf{s}^H(t)]$ is the $V \times V$ signal CM, \mathbf{I} is the identity matrix, σ^2 is the noise variance, $E[\cdot]$ denotes the statistical expectation. Furthermore, $(\cdot)^H$ stands for the Hermitian transpose operator.

In practice instead of exact CM the sample CM is used [1]

$$\hat{\mathbf{R}} = (1/N) \sum_{t=1}^N \mathbf{y}(t)\mathbf{y}^H(t). \quad (3)$$

Here N is the number of snapshots.

Computation of the modern spectral analysis (SA) methods is related with spectral decomposition of $\hat{\mathbf{R}}$

$$\hat{\mathbf{R}} = \hat{\mathbf{E}}_s \hat{\Lambda}_s \hat{\mathbf{E}}_s^H + \hat{\mathbf{E}}_n \hat{\Lambda}_n \hat{\mathbf{E}}_n^H, \quad (4)$$

Here $M \times \hat{V}$ matrix $\hat{\mathbf{E}}$ and $M \times (M - \hat{V})$ matrix $\hat{\mathbf{E}}_n$ are formed from the eigenvectors of $\hat{\mathbf{R}}$ corresponding to signal-subspace eigenvalues from $\hat{V} \times \hat{V}$ matrix $\hat{\Lambda}_s$ and noise-subspace eigenvalues from $\hat{\Lambda}_n$, respectively, \hat{V} is the estimate of the number of sources.

The Root-MUSIC method is based on ULA structure [1, 7, 8]. Root-MUSIC DOA estimates is obtained based on the \hat{V} roots of polynomial

$$P_{rm}(z) = \mathbf{a}^T(z^{-1}) \mathbf{P}^\perp \mathbf{a}(z), \quad (5)$$

where $\mathbf{a}(z) = [1, z, \dots, z^{M-1}]^T$, $z = \exp(j\omega)$, $\omega = 2\pi d \times \sin(\theta)/\lambda$, d is the distance between the elements, λ is the wave length. Moreover, $\mathbf{P}^\perp = (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{E}}_s \hat{\mathbf{E}}_s^H)$ is the projector on the noise subspace.

The \hat{V} roots of polynomial named as signal roots are selected base on their closeness to the unit circle. The order of polynomial is $2M - 2$ and roots are in conjugate reciprocal pairs. Only half of these roots (i.e. $M - 1$) is used usually for DOA estimation.

For the high SNR the roots corresponding to the signals lie exactly on the unit circle. However, for the medium and low SNRs these roots appear in conjugate reciprocal pairs. The roots lying inside the unit circle and closest to it are taken for the estimation process.

DOA estimates can be obtained from the corresponding signal roots $z_v, v = 1, \dots, V$

$$\hat{\theta}_v = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2\pi d}\arg(z_v)\right). \quad (6)$$

The Toeplitz CM approximation [1, 4] is used to obtain the estimate of Toeplitz CM $\hat{\mathbf{R}}_{TA}$. The polynomial of the Root-MUSIC for such CM is

$$P_{rm}(z) = \mathbf{a}^T(z^{-1}) (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{U}}_s \hat{\mathbf{U}}_s^H) \mathbf{a}(z), \quad (7)$$

where $\hat{\mathbf{U}}_s$ is the matrix formed from the signal subspace eigenvectors of the $\hat{\mathbf{R}}_{TA}$.

The idea of [7] is to eliminate the outlying roots from the DOA estimation process based on root similarity and proximity to the unit circle. Root

similarity can be tested using the following criterion, checking whether two arbitrary roots of the estimators (5) and (7) correspond to the same DOA:

$$\left| \tilde{\theta}_g^{(1)} - \tilde{\theta}_f^{(2)} \right| \leq \Delta_{sim}. \quad (8)$$

Here $\tilde{\theta}_v^{(i)} = \text{sort}\{\tilde{\theta}(\tilde{z}_v^{(i)})\}$ is the estimate of the v th DOA, $1 \leq v \leq V$, Δ_{sim} is the similarity parameter, $| |$ denotes the absolute value. The index i corresponds to DOA estimation method. Symbol $\text{sort}\{ \}$ is the sorting operator in the ascending order. Furthermore, $\tilde{z}_v^{(i)}, v=1,\dots,V$ are the signal roots which are the closest to unit circle in the complex plane.

Such approach is in some sense close to the known approach named as k-nearest neighbors (or nearest neighbor). The neighbors are used also in the attractor trajectory surrogates [6].

The example of signal roots is indicated in Fig. 1. The scenario with two equipower sources with $\theta_1 = 8^\circ$, $\theta_2 = 12^\circ$, ULA of $M = 9$, $N = 100$ and signal-to-noise ratio SNR=6 dB was used for this case. SNR was defined as $10\log(\sigma_s^2 / \sigma_n^2)$, where σ_s^2 is the power of sources.

The $M - 1$ roots in the unit circle (only the half of the $2M - 2$ roots) are indicated. Signal roots are also marked by arrows.

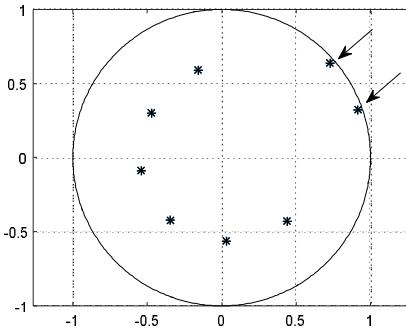


Fig. 1. Complex roots of Root-MUSIC polynomial inside of unit circle

In the mentioned approach the signal roots are sorted based on their proximity to the unit circle [7]

$$0 \leq 1 - |z_1^{(i)}| \leq 1 - |z_2^{(i)}| \leq \dots \leq 1 - |z_V^{(i)}|. \quad (9)$$

However, instead of the distance $1 - |z_v^{(i)}|$ the distance $|z_v^{(i)}| - 1$ can be used giving the same result.

In order to explain the principle of similarity and obtain the second group of the roots the pseudonoise resampling was performed as in [8]. Two clusters corresponding to the sources are marked by dashed and dotted circles are shown in the Fig. 2.

It should be noted that traditional measures of similarity in pattern recognition and initial data processing in statistics are Euclidean distance between two patterns, Mahalanobis distance, Kolmogorov distance, Tanimoto coefficient distance measure, correlation distance, chi-square and so on [5].

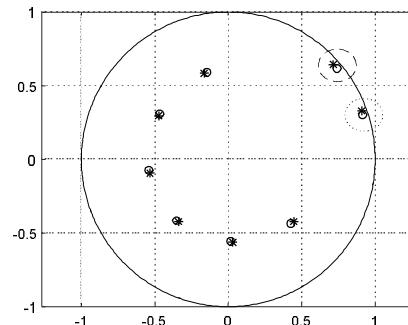


Fig. 2. Complex roots of traditional Root-MUSIC polynomial and one with pseudo-noise resampling

The approach from [7] (named in the paper as combined) adapted for the considered case of application of the traditional CM and estimate of Toeplitz CM can be described by the following sequence of steps:

Step 1. Define the initial value of the Δ_{sim} .

Step 2. Test V^2 possible pairs of signal roots $\{z_g^{(1)}, z_f^{(2)}\}$, $g, f = 1, \dots, V$ using (8). If more than V root pairs satisfy the proximity measure (8) then reduce Δ_{sim} . Process of reduction is performed successively until $l \leq V$ root pairs satisfy it.

Step 3. If V signal root pairs $\{\tilde{z}_1^{(1)}, \tilde{z}_1^{(2)}\}, \dots, \{\tilde{z}_V^{(1)}, \tilde{z}_V^{(2)}\}$ satisfy the root similarity condition (8) the signal DOAs can be estimated as

$$\hat{\theta}_v = (\tilde{\theta}_v^{(1)} + \tilde{\theta}_v^{(2)}) / 2, v = 1, \dots, V, \quad (10)$$

where $\tilde{\theta}_v^{(i)} = \tilde{\theta}(\tilde{z}_v^{(i)})$.

Step 4. If only $0 \leq l < V$ signal root pairs $\{\tilde{z}_1^{(1)}, \tilde{z}_1^{(2)}\}, \dots, \{\tilde{z}_l^{(1)}, \tilde{z}_l^{(2)}\}$ satisfy the condition (8) the l signal DOAs are estimated as

$$\hat{\theta}_v = (\tilde{\theta}_v^{(1)} + \tilde{\theta}_v^{(2)}) / 2, v = 1, \dots, l. \quad (11)$$

The residuary $V - l$ DOAs are obtained based on remaining $V - l$ signal roots of the estimator which has the smallest distance $1 - |z_V^{(i)}|$.

Step 5 End.

It should be noted that for the case when the distance between sources and Δ_{sim} are small we can have the situations when DOA estimates of estimators corresponding to different sources can satisfy the condition (8). However, the averaging of the DOA estimates of estimators should be performed for the same sources.

The simulation results of comparison of the traditional Root-MUSIC (with standard CM), Root-MUSIC with estimate of Toeplitz CM (Toeplitz CM approximation (TA)), combined approach based on root classification are presented in Fig. 3. The name combined is selected due to two methods (polynomials) are calculated simultaneously.

Two equipower sources with $\theta_1 = 10^\circ$, $\theta_2 = 14^\circ$ were taken, $N = 50$. The ULA of $M = 7$ antenna elements and

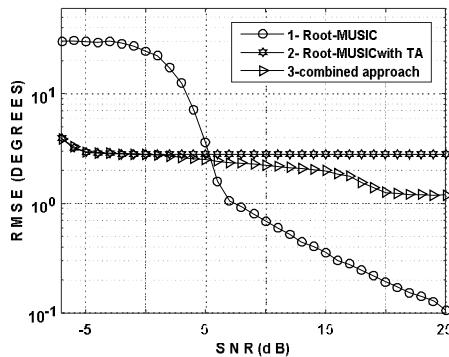


Fig. 3. RMSE's of DOA estimation vs. SNR

1000 simulation runs were used. Parameter $\Delta_{sim} = 2.5^\circ$ was used. RMSE was calculated as in [1].

Here we can see that using Toeplitz CM caused the saturation of RMSE of DOA estimation. Furthermore, performance of combined approach consisting in application of root comparison (similarity) approach is comparable with one of the Root-MUSIC using estimate of Toeplitz CM at medium SNR's and it is better at high SNR's. However, possibility of using the advantages of two estimates of CM is not used at full.

The proposed approach consists in changing the Step 3. The idea of proposed modification is avoiding the averaging of DOA estimates for the situations with high SNR. In such cases the performance of DOA estimation when using the standard CM is better than one with Toeplitz CM. Therefore, at high SNR we also define the distance of the roots of two polynomials to the unit circle. The roots of polynomial with smaller distance are used for DOA estimation.

Simulation results for the scenario which is the same as for the Fig. 3 are presented in the Fig. 4.

It can be seen that the performance of proposed approach improves as compared to initial approach after SNR=15dB. Here we can see the second threshold SNR=22 dB.

It is necessary to say that for such SNR the distances of roots of two polynomials (defined by equations 5 and 7) to the unit circle are approximately the same. Furthermore, the performance of proposed approach at medium and high SNRs is better as compared to Root-MUSIC with approximation of Toeplitz CM. However, such as the value of RMSE for combined approach is not the same as one of Root-

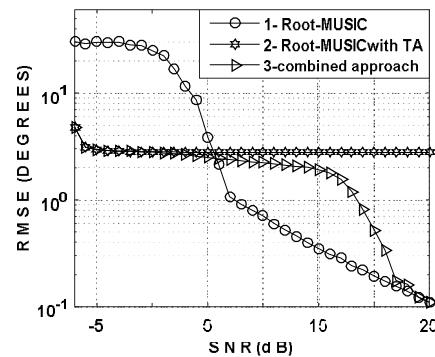


Fig. 4. Comparison of RMSE's of DOA estimation vs. SNR for proposed variant of combined approach

MUSIC it is possible to say that at high SNRs the additional features for defining of appropriate roots can be used.

Conclusions and directions of future investigation

In the paper the idea of outlier reduction based on roots classification and proximity of the roots of polynomial rooting methods is used for the case of joint application of two types of CM (traditional and Toeplitz CM). Furthermore, the modification of approach [7] is proposed. It is based on the fact that in the considered case at the high SNR instead of averaging of DOA estimates corresponding to the similar roots (roots with small distance between them) it is preferable to use the roots based on their closeness to the unit circle.

The proposed approach can be extended to the case of Root-Min-Norm, Root-MUSIC (Root-Min-Norm) with pseudorandom weighting of eigenvectors, Root-MUSIC (Root-Min-Norm) with pseudonoise resampling and so on. Furthermore, it can be used for the case of interpolated array. The analysis of influence of different methods of distance calculation on the performance of the considered approach should be performed.

It is of interest to generalize the proposed approach also for the communication signals (BPSK, QAM and so on) using the properties of communication signals.

The ways of performance improvement of the Root-MUSIC when using several types of CM in the situations with low SNRs should be investigated.

The fast algorithms can be used for the computation of the roots of polynomial. Tricks allowing avoiding the spectral decomposition of CM or fast subspace decomposition should be considered.

REFERENCES

1. Stoica, P. and Moses, R. (1997), *Introduction to Spectral Analysis*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
2. Slyusar, V. (1999), "Super-Rayleigh delay lag resolution of narrow-band pulses", *Izvestiya VUZ: Radioelektronika*, vol. 42, is. 3, pp. 55-62.
3. Bondarenko, B., Bondarchuk, G. and Timchuk,V. (2000), "Synthesis of optimal and quasi-optimal algorithms of superresolution for information systems with antenna arrays", *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Radioelektronika* vol. 43 (5-6), pp. 66-72.
4. Vasylshyn, V. (2020), "Combined Application of structured and standard covariance matrices for DOA estimation", *Proc. of IEEE Ukrainian Microwave Week*, Kharkiv.
5. Beyerer, J., Richter, M. and Nagel, M. (2018), *Pattern Recognition. Introduction, Features, Classifiers and Principles*, Walter de Gruyter GmbH, Berlin, 307 p.
6. Kostenko, P.Y. and Vasylshyn, V.I. (2014), "Signal processing correction in spectral analysis using the surrogate autocovariance observation functions obtained by the ATS-algorithm", *Radioelectronics and Communications Systems*, vol. 57(6), pp. 235-243.

7. Gershman, A. and Messer, H. (1998), "Mixed-order root-MUSIC algorithms with improved robustness", *Proc. of IEEE SP Workshop on SSAP*, Portland, pp. 33 – 36.
8. Vasylshyn, V. (2011), "Improving the performance of Root-MUSIC via pseudo-noise resampling and conventional beamformer", *Proc. of The Third Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium*, Kyiv, Ukraine, pp. 246–249.
9. Qian C., Huang L. and So H.C. (2014), "Improved unitary Root-MUSIC for DOA estimation based on pseudo-noise resampling", *IEEE SP Letters*, vol. 21, no. 2, pp. 140-144.
10. Friedlander, B. and Weiss, A. J. (1992), "Direction finding using spatial smoothing with interpolated arrays", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 574-587

Received (Надійшла) 11.07.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.09.2020

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 Vasylshyn – 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>.

Оцінювання напрямків надходження радіохвиль, основане на близькості коренів декількох поліномів методів надрозділення

В. І. Василишин

Анотація. Предметом дослідження є ефективність методів спектрального аналізу при наявності аномальних оцінок (викидів). Метою даної статті є підвищення ефективності спектрального аналізу (зменшення середньоквадратичної похибки (СКП) оцінювання напрямків надходження (НН) радіохвиль) на основі підходу подібності коренів поліномів, запропонованого А. Гершманом. Методи, що використовуються: методи спектрального аналізу, методи розпізнавання образів, методи цифрового статистичного моделювання. Були отримані наступні **результати**. Підхід по класифікації коренів поліномів використовується у випадку спільногого застосування двох типів коваріаційної матриці (КМ) даних (стандартної та оцінки КМ з теплицевою структурою). Цей підхід усуває викиди (корені поліному, що відповідають викидам) з початкових оцінок НН радіохвиль (коренів поліному, що відповідають аномальним оцінкам). Запропонована модифікація початкового підходу класифікації коренів поліному. Вона полягає в усуненні усереднення оцінок НН, отриманих методом оцінювання для різних КМ при високих відношеннях сигнал/шум (ВСШ). Цей крок дозволяє для розглянутого випадку підвищити ефективність оцінювання НН при використанні методу класифікації коренів. Представлені результати моделювання, що підтверджують ефективність запропонованого підходу. **Висновки.** Покращення ефективності методів спектрального аналізу, основаних на використанні підпросторів власних векторів КМ даних може бути досягнуто шляхом видалення викидів з початкових оцінок НН радіохвиль. Одночасне застосування класичної КМ другого порядку та оцінки КМ з заданою структурою дає два набори оцінок НН радіохвиль (коренів полінома). Підхід по класифікації коренів здійснює обробку цих наборів і підвищує ефективність оцінювання НН. Запропонована в статті модифікація дає додаткову перевагу при високому ВСШ. Розглянутий підхід також може бути використаний разом з іншими методами оцінювання НН, основаними на пошуку коренів поліному.

Ключові слова: оцінювання напрямків надходження радіохвиль; теорема Карунена-Лоєва; спектральне розкладення кореляційної матриці; методи спектрального аналізу; розпізнавання образів.

Оценивание направлений прихода радиоволн, основанное на близости корней нескольких полиномов методов сверхразрешения

В. И. Василишин

Аннотация. Предметом исследования является эффективность методов спектрального анализа при наличии аномальных оценок (выбросов). Целью данной статьи есть повышение эффективности спектрального анализа (уменьшение среднеквадратичной ошибки (СКО) оценивания направлений прихода радиоволн (НП)) на основе подхода сходства корней полиномов, предложенного А. Гершманом. **Используемые методы:** методы спектрального анализа, методы распознавания образов, методы цифрового статистического моделирования. Были получены следующие **результаты**. Подход по классификации корней полиномов используется в случае применения двух типов ковариационной матрицы (КМ) данных (стандартной и оценки КМ с тепличевой структурой). Этот подход удаляет выбросы (корни полинома, которые отвечают выбросам) из предварительных оценок НП радиоволн (корней полинома, соответствующих аномальным оценкам). Предложена модификация начального подхода классификации корней. Она заключается в устранении усреднения оценок НП, полученных методом оценивания для разных КМ при высоких отношениях сигнал/шум (ОСШ). Этот шаг для рассмотренного случая позволяет повысить эффективность оценивания НП при использовании метода классификации корней. Представленные результаты моделирования, которые подтверждают эффективность предложенного подхода. **Выводы.** Улучшение эффективности методов спектрального анализа, основанных на использовании подпространств собственных векторов КМ данных, может быть достигнуто путем удаления выбросов из начальных оценок НП радиоволн. Одновременное применение классической КМ второго порядка и оценки КМ с заданной структурой дает два набора оценок НП радиоволн (корней полинома). Подход по классификации корней осуществляет обработку этих наборов и повышает эффективность оценивания НП. Предложенная в статье модификация дает дополнительное преимущество при высоком ОСШ. Рассмотренный подход также может быть использован совместно с другими методами оценивания НП, основанными на поиске корней полинома.

Ключевые слова: оценивание направлений поступления радиоволн; теорема Карунена-Лоева; спектральное разложение корреляционной матрицы; методы спектрального анализа; распознавание образов.

Serhii Indyk, Volodymyr Lysechko

Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine

THE STUDY OF ENSEMBLE PROPERTIES OF COMPLEX SIGNALS OBTAINED BY TIME INTERVAL PERMUTATION

Abstract. The results of statistical analysis of cross-correlation properties of complex signals' ensembles, were obtained due to time interval permutations are presented in this paper. The essence of the method is to apply the division of short videopulse sequences at the level of intervals with low interaction in the time domain with different numbers of pulses. By applying the cross-correlation analysis, the maximum emission values of the side lobes of the cross-correlation functions are calculated and its total average value is determined. Based on the obtained values, a series is formed in which the first position is occupied by a time interval in which the value of the maximum emissions of the side lobes of the cross-correlation function has an average value. The determination of the following time intervals is based on the analysis of the rating series and the arrangement of values is carried out in accordance with the selected total average value. Thus, a new average range of the maximum emission values of the side lobes of the cross-correlation function is formed. The average range increases the number of ensembles with satisfactory cross-correlation properties for use in radio communication systems with code division multiplexing, and minimal interaction between signals in the time domain reduces multiple access interference.

Keywords: multiple access interference; videopulse; signal base; signal spectrum width; signal duration; crest factor; duty cycle; impulse duration; cross-correlation function.

Introduction

Problem statement. In multiple access systems with code division duplexing the subscriber signals are overlapped randomly in time and transmitted in a common frequency band, resulting in multiple access interference (intrasytem interference). Such interferences are characteristic, for example, of cognitive radio systems and are embedded in the very principles of their construction.

Current trends in the development of wireless systems require a further increase in the number of subscribers and the quality of service in wireless multiple access networks.

Assessment of the cross-correlation function (CCF) allows determining the cross-correlation properties of complex signal ensembles obtained by permutation of time intervals, due to which a significant increase in the number of ensembles of such signals and a decrease in the maximum emissions of side lobes, due to which the level of multiple access interference remains relatively low.

The received signals should be used in radio communication systems with code division multiplexing, and increasing the number of ensembles allows increasing the number of subscribers in them.

Therefore, the study of ensemble properties of complex signals obtained by permutations of time intervals on the basis of the rating series is an urgent task.

Literature analysis. Assessments of the CCF for the communication systems with code division multiplexing are widely considered in the literature for phase-manipulated, amplitude-manipulated, discrete and other signals based on linear and nonlinear sequences [1-5], but the correlation properties of complex signal ensembles obtained by permutation of time intervals based on rating series with the arranged values in accordance with the selected common average value have not been performed and thus require further study.

The basic material

Signals in code division multiple access systems should provide the lowest possible level of multiple access interference, which is mainly determined by the allowable level of maximum peaks of CCF [6].

$$R_{\max} = \frac{\alpha}{\sqrt{B}}, \quad (1)$$

where α – crest factor of CCF, in the general case depend on the signal base B .

$$B = \Delta F \cdot T, \quad (2)$$

where ΔF – the signal spectrum width, T – the signal duration.

The larger the value of the crest factor, the better the correlation properties of the signal.

For the synthesis of complex signal ensembles, a sample of short video pulses sequences was chosen, which are divided into four equal intervals with the equal pulse durations

$$\tau_i = \tau_j,$$

the periods of pulse duration are selected approximately equal:

$$T_i \approx T_j,$$

with signal duty cycle

$$Q_i \approx Q_j \gg 1,$$

in so doing, the number of impulses entering each segment may differ

$$n_i \neq n_j.$$

The examples of the output sequence and the first two intervals after division are presented in Fig. 1 (a, b, c).

According to the results of dividing the output sequences into intervals and further calculation of their CCF, new ensembles of complex signal sequences with a low level of cross-correlation were obtained. An example of such a signal with the number of symbols $n = 173$ is shown in Fig. 2.

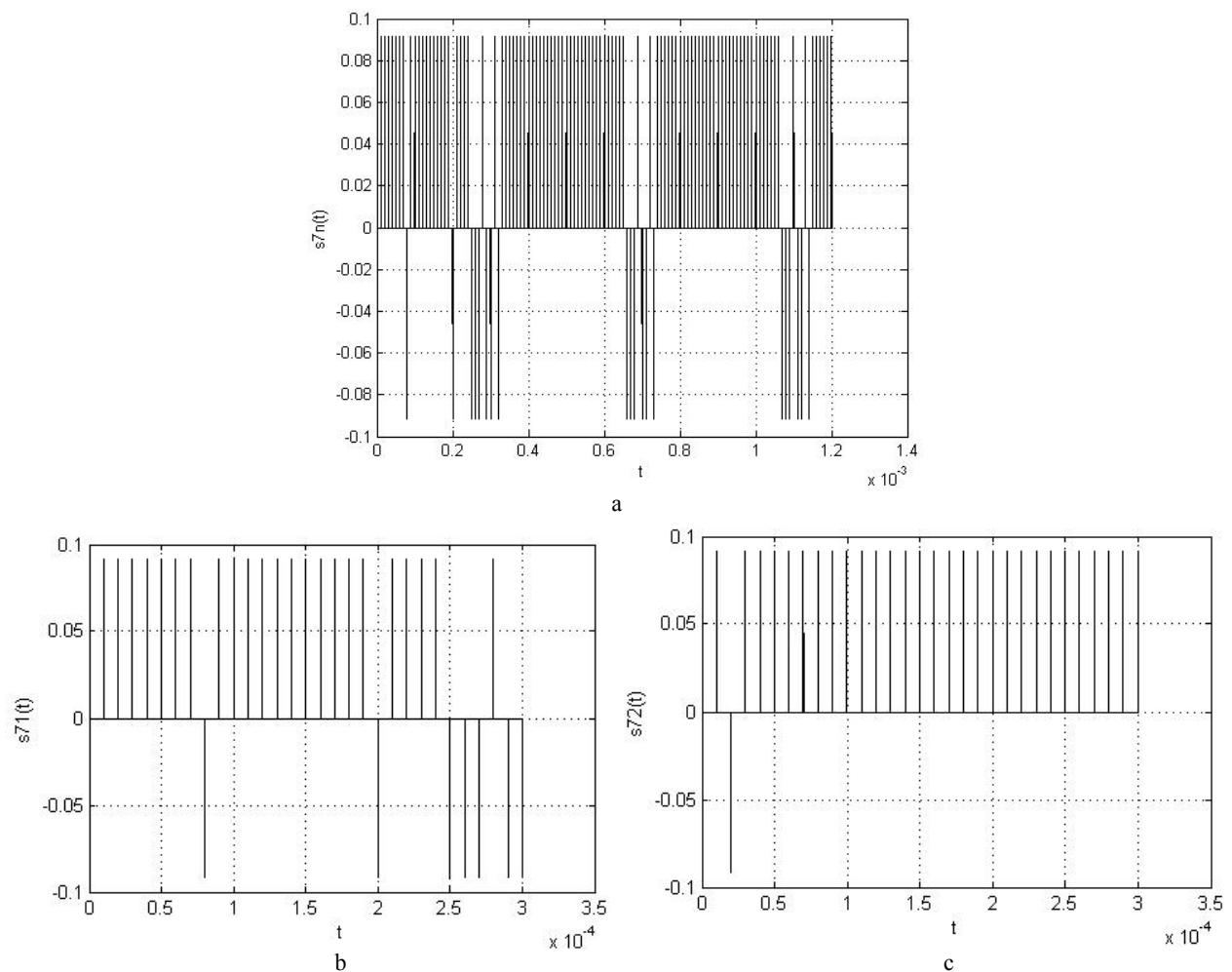


Fig. 1: a – an example of the output sequence;
b – an example of the first interval of the sequence division; c – an example of the second interval of the sequence division

Fig. 2 shows that as a result of the time interval permutations, the sequences with minimal interaction in time and low correlation were received, which

allows forming on their basis complex signal ensembles with a larger volume, relative to the original sequences.

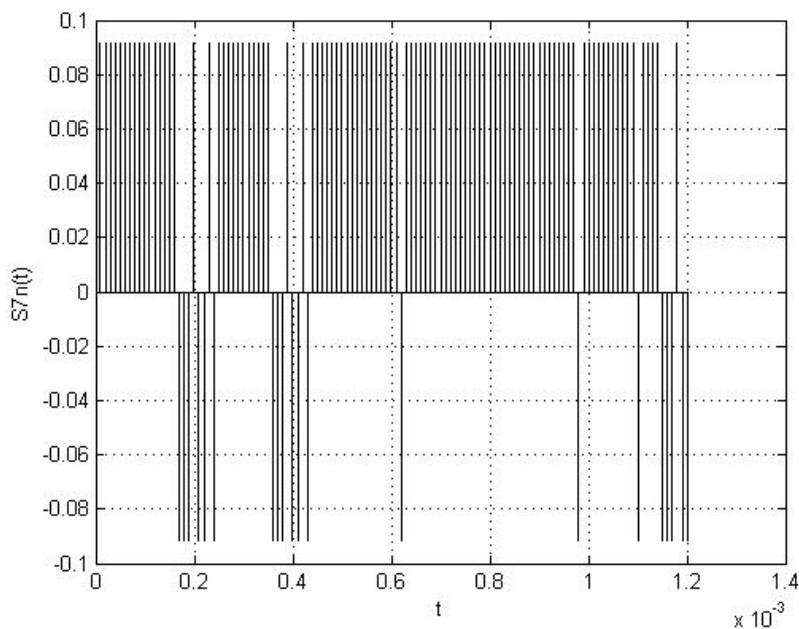


Fig. 2. An example of complex signal sequence from the resulting ensemble with a low level of cross-correlation

To calculate the maximum emissions values of the side lobes of the CCF, obtained as a result of the sequences permutations, use the expression [7]:

$$R_{ij} = 1/\sqrt{n_i n_j} . \quad (3)$$

Due to the different number of pulses in the sequences, the signal energies will be different.

Therefore, for assessment of the CCF by expression (3) it is necessary to normalize the signals energy values [1]:

$$S_{ihopm}(t) = S_i(t)/\sqrt{E_i} . \quad (4)$$

The calculated maximum values of the CCF sequences are shown in Table 1.

Table 1 – The result of calculating the maximum values of the CCF

	maxR1	maxR2	maxR3	maxR4	maxR5	maxR6	maxR7	maxR8	maxR9	maxR10
maxR1	1	0,0204	0,0097	0,0093	0,0095	0,0093	0,0093	0,0093	0,0093	0,0093
maxR2	0,0204	1	0,0095	0,0091	0,0091	0,0093	0,0091	0,0091	0,0091	0,0091
maxR3	0,0097	0,0095	1	0,0087	0,0089	0,0087	0,0087	0,0087	0,0087	0,0087
maxR4	0,0093	0,0091	0,0087	1	0,0085	0,6917	0,525	0,8	0,8	0,75
maxR5	0,0095	0,0091	0,0089	0,0085	1	0,0085	0,0085	0,0085	0,0085	0,0085
maxR6	0,0093	0,0093	0,0087	0,6917	0,0085	1	0,7167	0,5833	0,5333	0,5333
maxR7	0,0093	0,0091	0,0087	0,525	0,0085	0,7167	1	0,5250	0,4833	0,5350
maxR8	0,0093	0,0091	0,0087	0,8	0,0085	0,5833	0,5250	1	0,8	0,75
maxR9	0,0093	0,0091	0,0087	0,8	0,0085	0,5333	0,4833	0,8	1	0,95
maxR10	0,0093	0,0091	0,0087	0,75	0,0085	0,5333	0,5350	0,75	0,95	1

Fig. 3 shows the visualization of the CCF calculation result and the points of maximum emissions

of the side lobes of the CCF for the obtained sequences with minimal energy interaction.

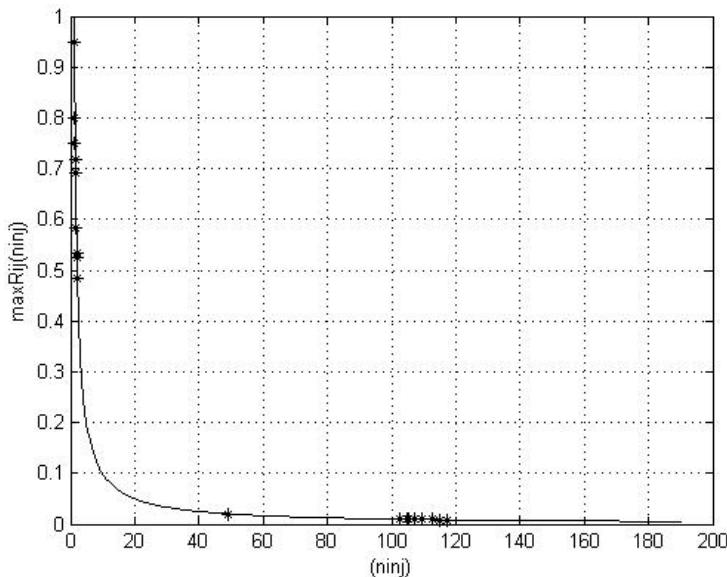


Fig. 3. The result of calculating the CCF maxima and the points of maximum emissions of the side lobes of the CCF

Table 1 and Fig. 3 show that the calculated values of the CCF maxima with the minimum energy interaction of the new sequences are compared with the maximum emissions values of the side lobes of the signals CCF involved in the permutations. As a result, we see that the obtained sequences provide the condition of minimal similarity (1).

Conclusion

Application of time permutations on the basis of a rating series with the arrangement of values according to the chosen general average value for the volume

increase in complex signals ensembles allow receiving complex signals sequences with quite a low level of cross-correlation, thus the interaction between signals in time domain remains at a low level, which has a positive effect on the level of multiple access interference.

At the same time, the cross-correlation properties will be slightly worsened, as the maximum emissions values of the side lobes of the CCF signals depend on the number of splitting intervals, but, nevertheless, it becomes possible to use them in modern multiple access radio systems.

REFERENCES

1. Ipatov, V.P. (2007), *Spread Spectrum and CDMA. Principles and Applications*, Technosphere, Moscow, 488 p., ISBN 978-5-94836-128-4.
2. Semenikhin, V.S. and Pishkin, I.M. (1990), *Land mobile radio*, Radio and communications, Moscow, 432 p.
3. Borisov, V.I. (2003), *Interference Protection of radio communication systems*, Radio and communications, Moscow, 640 p.
4. Bernard, Sklar (2003), *Communications: Fundamentals and Applications*, Publishing house "Williams", Moscow, 1104 p.
5. Maksimov, M.V. (1999), *Protection from radio interference*, Soviet radio, Moscow, 496 p.
6. Varakin, L.E. (1985), *Communication systems with noise-like signals*, Radio and communication, Moscow, 384 p.
7. Stepanenko, Y.G. and Lysechko, V.P. (2009), "Method for determining the period of short video pulses in code sequences based on the Heaviside function approximation", *Weapons systems and military equipment*, Vol. 4(20), pp. 170-173.

Received (Надійшла) 10.07.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.09.2020

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

- Індик Сергій Володимирович** – старший викладач кафедри транспортного зв’язку, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна;
Serhii Indyk – Senior Lecturer of Transport Communications Department, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: sergiy.indyk@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-3124-8722>.
- Лисечко Володимир Петрович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортного зв’язку, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна;
Volodymyr Lysechko – PhD (Technical), Associate Professor, Associate Professor of Transport Communications Department, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: lysechkov@ukr.net; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-1520-9515>.

**Дослідження властивостей ансамблів складних сигналів,
отриманих шляхом перестановок часових інтервалів**

С. В. Індик, В. П. Лисечко

Анотація. У статті наведено результати статистичного аналізу взаємокореляційних властивостей ансамблів складних сигналів, які були отримані за рахунок перестановок часових інтервалів. Суть методу полягає у застосуванні розбиття послідовностей коротких відеоімпульсів на рівні інтервали з низькою взаємодією у часовій області з різною кількістю імпульсів. Шляхом застосування взаємокореляційного аналізу здійснюють розрахунок значень максимальних викидів бічних пелюсток функцій взаємної кореляції та визначають їх загальне середнє значення. На основі отриманих значень складають ряд, в якому першу позицію займає часовий інтервал, у якому величина максимальних викидів бокових пелюсток функцій взаємної кореляції має середнє значення. Визначення наступних часових інтервалів відбувається на основі аналізу рейтингового ряду і розстановка значень проводиться у відповідності до обраного загального середнього значення. Таким чином формують новий усереднений ряд значень максимальних викидів бокових пелюсток функцій взаємної кореляції, завдяки якому збільшується кількість ансамблів із задовільними взаємокореляційними властивостями для використання в системах радіозв’язку з кодовим розділенням каналів, а мінімальна взаємодія між сигналами у часовій області призводить до зменшення завад множинного доступу.

Ключові слова: завада множинного доступу; відеоімпульс; база сигналу; ширина спектру сигналу; тривалість сигналу; ширина спектру сигналу; пік – фактор; шпаруватість; тривалість імпульсу; функція взаємної кореляції.

**Исследование свойств ансамблей сложных сигналов,
полученных путем перестановок временных интервалов**

С. В. Индик, В. П. Лысечко

Аннотация. В статье приведены результаты статистического анализа взаимокорреляционных свойств ансамблей сложных сигналов, полученных за счет перестановок временных интервалов. Суть метода заключается в применении разбиения последовательностей коротких видеоимпульсов на равные промежутки с низким взаимодействием во временной области с разным количеством импульсов. Путем применения взаимокорреляционного анализа осуществляют расчет значений максимальных выбросов боковых лепестков функции взаимной корреляции и определяют их общее среднее значение. На основе полученных значений составляют ряд, в котором первую позицию занимает временной интервал, величина максимальных выбросов боковых лепестков функции взаимной корреляции которого имеет среднее значение. Определение следующих временных интервалов происходит на основе анализа рейтингового ряда, и расстановка значений проводится в соответствии с выбранным общим средним значением. Таким образом формируют новый усредненный ряд значений максимальных выбросов боковых лепестков функции взаимной корреляции, благодаря которому увеличивается количество ансамблей с удовлетворительными взаимокорреляционными свойствами для использования в системах радиосвязи с кодовым разделением каналов, а минимальное взаимодействие между сигналами во временной области приводит к уменьшению помех множественного доступа.

Ключевые слова: помеха множественного доступа; видеоимпульс; база сигнала; ширина спектра сигнала; длительность сигнала; пик – фактор; скважность; длительность импульса; функция взаимной корреляции.

Д. М. Крючков, Є. С. Рощупкін, В. В. Джус, Р. В. Титаренко

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

УДОСКОНАЛЕННЯ ПІДГОТОВКИ ПЕРСОНАЛУ ДЛЯ ОБСЛУГОВУВАННЯ РАДІОТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ПОВІТРЯНОГО ПРОСТОРУ ШЛЯХОМ УРАХУВАННЯ ПИТАНЬ ТЕХНІЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ В ТРЕНАЖНИХ ІМІТАЦІЙНИХ КОМПЛЕКСАХ

Анотація. Предметом дослідження є підготовка персоналу, що обслуговує радіотехнічні засоби контролю повітряного простору. Об'єктом дослідження є тренажні імітаційні комплекси радіотехнічних засобів контролю повітряного простору, що використовуються для підготовки обслуговуючого персоналу. Метою роботи є обґрунтування структури тренажних імітаційних комплексів підготовки фахівців з експлуатації радіотехнічних засобів контролю повітряного простору. **Висновки.** Визначена типова структура існуючих тренажних імітаційних комплексів, які використовуються для підготовки персоналу, що обслуговує радіотехнічні засоби контролю повітряного простору. За результатами аналізу недоліків, що мають існуючі тренажні імітаційні комплекси, обґрунтовано: необхідність внесення до їх складу модуля, що забезпечує вивчення питань технічної експлуатації радіотехнічних засобів, та його структуру. Наведено, що крім навчання (тренувань) обслуговуючого персоналу, запропоноване програмне забезпечення дозволить при технічній експлуатації радіотехнічних засобів здійснювати зберігання та обробку результатів вимірювання значень параметрів, отриманих при перевірках, та може бути застосовано для підтримки прийняття рішення про його технічний стан.

Ключові слова: радіотехнічні засоби; тренажні імітаційні комплекси; технічне обслуговування; технічний стан; технічна експлуатація.

Вступ

Постановка задачі. В сучасному світі в багатьох сферах діяльності людини використовуються складні радіотехнічні засоби (РТЗ). Найбільш широке застосування РТЗ знайшли в сфері контролю за повітряним простором (КПП), системах навігації та посадки літаків тощо. Експлуатація РТЗ вимагає від персоналу, який їх обслуговує, високого рівня знань, вміння чітко та швидко діяти в різних умовах. У зв'язку зі складністю РТЗ підготовка обслуговуючого персоналу є важливою частиною. Основою підготовки на всіх етапах є тренування. Тренування дозволяє не тільки набути певних навичок у використанні РТЗ, а й в подальшому їх удосконалювати, що в свою чергу призводить до «тренованості» персоналу. Під «тренованістю» можна розуміти наявність сформованих навичок і вмінь сприйняття, відбору та переробки інформації, координованих і своєчасних дій з управління системами РТЗ, оцінкою обстановки, прийняттям рішень та корегуванням їх в процесі виконання завдань за призначенням.

Для тренування фахівців з експлуатації РТЗ найчастіше використовуються штатні засоби. В сучасних умовах для забезпечення завдань підготовки та зменшення витрат залишкового ресурсу РТЗ знаходять розповсюдження тренажні імітаційні комплекси (ТІК) з використанням інформаційних технологій. Використання відомих ТІК для підготовки обслуговуючого персоналу передбачає навчання (тренування) безпосередньо операцій використання РТЗ за призначенням [1-3].

Разом з цим експлуатація може бути представлена двома самостійними, взаємообумовленими напрямами: використанням за призначенням та всім комплексом робіт, призначених для підтримання РТЗ в установленах технічному стані, переведенню його з одного стану в інший (підготовка до безпосередньо-

го використання за призначенням у заданих умовах на будь-якому відрізку часу від початку експлуатації до виробітку призначеного ресурсу (міжремонтного ресурсу, терміну збережуваності), спрямування на заводський ремонт чи списання). Другий напрям експлуатації визначається терміном «технічна експлуатація». В відомих авторам ТІК вивчення питань технічної експлуатації та врахування технічного стану РТЗ при імітації його роботи не передбачено.

Мета роботи – обґрунтування структури тренажних імітаційних комплексів підготовки фахівців з експлуатації радіотехнічних засобів контролю повітряного простору.

Обґрунтування необхідності внесення до складу існуючих ТІК підготовки фахівців з експлуатації РТЗ КПП модуля з вивчення питань технічної експлуатації

Аналізуючи останні дослідження та публікації з цієї теми [1-3], можна зробити висновок, що ТІК може використовуватись у всіх галузях застосування РТЗ. Вони виконують такі функції:

- зберігання, обробки і відображення параметрів, що відповідають функціональним характеристикам системи;

- розширяють та покращують можливість навчання (тренування) персоналу, що безпосередньо впливатиме на використання РТЗ в реальних умовах.

Як приклад розглянемо ТІК, що використовується для підготовки фахівців у сфері КПП [1-3]. Їх узагальнена схема може бути представлена у вигляді, наведеному на рис. 1.

За результатами аналізу, існуючі ТІК умовно можна поділити на такі складові.

1. Блок формування повітряно-перешкодової обстановки (ФППО).

2. Блок формування сигналної складової внутрішньостанційної інформації (ФСС ВСІ).

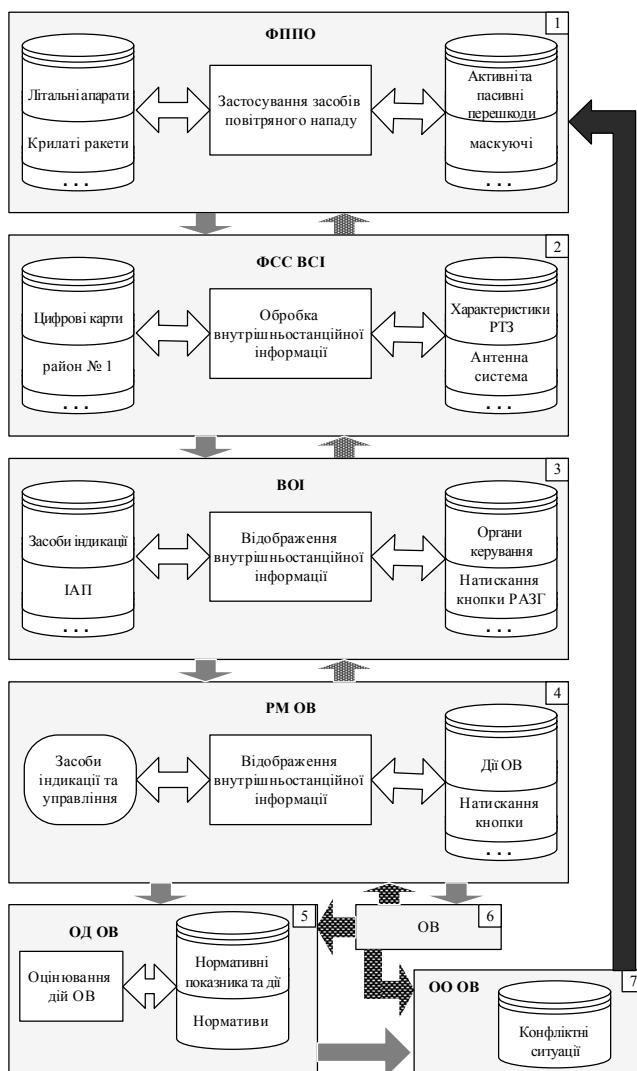


Рис. 1. Типова схема ТІК підготовки персоналу з питань використання за призначенням РТЗ КПП

3. Блок візуалізації отриманої інформації (ВОІ).
4. Робоче місці оператора виробу (РМ ОВ).
5. Блок оцінювання дій оператора виробу (ОД ОВ).
6. Оператор виробу (ОВ).
7. Особа, що оцінює оператора виробу (ОО ОВ).

Блоки складаються з наборів взаємопов'язаних баз знань, що включають в себе визначені функціональні зв'язки між входними та вихідними вплива-ми, та баз даних, до складу яких входять фіксовані значення, що характеризують відповідні події. Бази даних та знань є динамічними, що дозволяє вносити зміни та доповнення.

Таким чином, існуючи типові ТІК можуть бути використані виключно для підготовки з питань використання за призначенням РТЗ КПП.

Наведену схему можна описати наступною сукупністю взаємопов'язаних елементів, кожен з яких відповідає за виконання окремих функцій:

$$S_{tic} = (A, X, Y), \quad (1)$$

де A – програмне забезпечення тренажно-імітаційної апаратури, що забезпечує відпрацювання питань

використання за призначенням РТЗ КПП; X – оператор виробу; Y – особа, що оцінює оператора виробу. Програмне забезпечення тренажно-імітаційної апаратури можна представити у вигляді набору елементів:

$$A = (A_1, A_2, A_3, A_4, A_5), \quad (2)$$

де A_1 – програмне забезпечення ФППО; A_2 – програмне забезпечення ФСС ВСІ; A_3 – програмне забезпечення ВОІ; A_4 – програмне забезпечення РМ ОВ; A_5 – програмне забезпечення ОД ОВ.

Принцип тренування фахівців з питань використання за призначенням РТЗ КПП на існуючих ТІК полягає в наступному [3-8]. В процесі навчання (тренування) імітується відповідна повітряно-перешкодова обстановка, яка може бути задана як безпосередньо за допомогою сервера, так і за допомогою особи, що оцінює дії оператора виробу. Інформація, яка імітується, з урахуванням особливостей роботи виробу, переводиться в сигнальну складову внутрішньостанційної інформації. Оператор за допомогою індикаторів та органів управління відпрацьовує введену імітовану інформацію. Всі дії оператора фіксуються для подальшої оцінки. Оцінювання здійснюється контролюючою особою шляхом порівняння зафіксованих дій оператора з нормативними показниками. В ході тренування можуть виникати конфліктні ситуації, які не передбачені нормативною документацією. Вони фіксуються та аналізуються у відповідній базі даних для внесення змін у відповідні імітаційні програми або нормативні документи.

З урахуванням вимог до підготовки фахівців з експлуатації РТЗ, можна зробити висновок, що існуючі ТІК мають ряд недоліків:

- при навчанні (тренуванні) відпрацьовуються тільки навички по використанню РТЗ за призначенням;
- відсутня можливість врахування технічного стану РТЗ під час імітації їх роботи;
- неможливе імітаційне введення несправності, що унеможливлює відпрацювання питань з відновленням технічного стану (ТС);
- навчання персоналу з питань проведення технічного обслуговування (ТО) відсутнє.

Обґрунтування структури модуля з питань вивчення технічної експлуатації РТЗ

Враховуючі наведені вище недоліки, виникає потреба в доповненні складу існуючих та перспективних ТІК додатковим модулем. Типова схема ТІК підготовки фахівців з експлуатації РТЗ КПП повинна мати вигляд, наведений на рис. 2.

Модуль, що запропоновано, обов'язково повинен мати у своєму складі такі складові [9-11].

1. Блок імітації станів виробу, який повинен мати: блок імітації несправностей (видів ТО), бази даних типових несправностей та видів ТО, бази знань формування виду ТС виробу та функціонування виробу в різних видах ТС, бази даних сформованих значень параметрів. Залежно від дій ОО ОВ (інформації, що вноситься за допомогою блоку імі-

тації несправностей (видів ТО)) результати бази знань функціонування виробу в різних видах ТС подаються на блок ФСС ВСІ для імітації роботи РТЗ відповідно до його ТС (ТО).



Рис. 2. Типова схема ТІК з підготовки фахівців з експлуатації РТЗ КПП

2. Блок нормативних даних, до складу якого входять бази даних: тестових та вимірювальних сигналів, нормативних значень параметрів, нормативних дій оператора в процесі ТЕ.

3. Блок засобів вимірювання, які можуть бути фізичними або віртуальними.

4. Блок дій оператора по усуненню несправностей (перевірці ТС).

5. База даних фіксації дій оператора виробу по усуненню несправностей (перевірці ТС).

6. База знань оцінки дій оператора при відновленні ТС та проведенні операцій ТО.

7. База даних результатів вимірювання.

Бази даних та знань повинні бути динамічними.

В загальному вигляді запропонований модуль можна описати наступними елементами:

$$B = (B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6, B_7), \quad (3)$$

де B_1 – програмне забезпечення імітації станів виробу; B_2 – програмне забезпечення нормативної складової; B_3 – програмне забезпечення засобів вимірювання; B_4 – дії оператора по усуненню несправностей (перевірці ТС); B_5 – фіксація дій оператора виробу по усуненню несправностей (перевірці ТС); B_6 – оцінка дій оператора при відновленні ТС та проведенні операцій ТО; B_7 – зберігання результатів вимірювання.

Запропонований модуль, що забезпечує вивчення питань технічної експлуатації РТЗ, є складовою ТІК. В загальному вигляді запропонована структура ТІК підготовки фахівців з експлуатації РТЗ КПП (як використання за призначенням, так і технічної експлуатації), на відміну від існуючої (1), повинна мати вигляд:

$$S_{tict} = (A, B, X, Y), \quad (4)$$

де враховані як елементи існуючих ТІК, так і запропонований модуль.

Схема модуля з питань вивчення технічної експлуатації РТЗ КПП представлена на рис. 3.

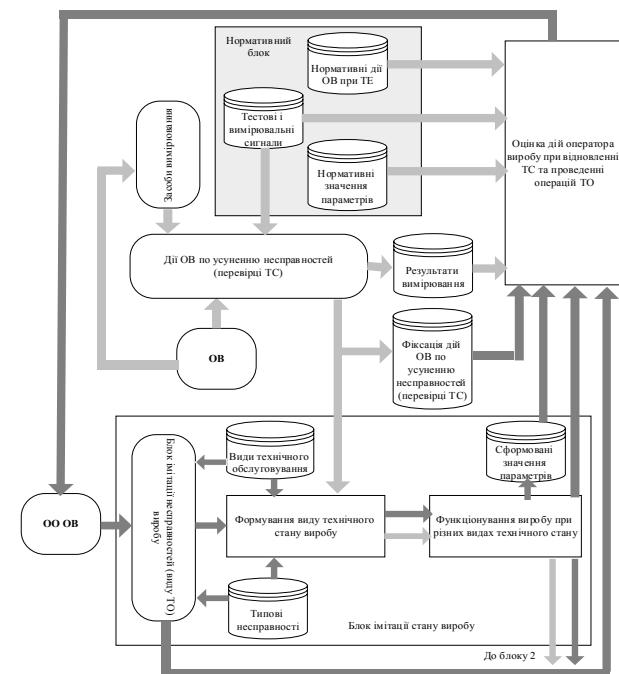


Рис. 3. Схема модуля з питань вивчення технічної експлуатації РТЗ КПП

Принцип дії запропонованого модуля, що забезпечить вивчення питань ТЕ у складі ТІК, полягає в наступному. При використанні модуля особа, яка оцінює дії оператора, вводить відповідні несправності або задає вид ТО, що підлягає відпрацюванню. Ці дії враховуються програмним забезпеченням. Несправності та ТС виробу, що їм відповідають, враховуються при моделюванні роботи зразка РТЗ (блок ФСС ВСІ). Оператор під час відпрацювання питань використання виробу за призначенням або проведення операцій ТЕ виявляє та усуває введені несправності. Операції з вимірювання значень та параметрів проводяться оператором за допомогою віртуальних або фізичних засобів вимірювання. При моделюванні роботи виробу враховуються несправності та ТС виробу, що їм відповідають. Послідовність дій оператора та результати фіксуються. Недоліки, які усувались операторами, результати вимірювань параметрів РТЗ вносяться до бази даних результатів вимірювань. Рішення про правильність дій оператора при ТЕ виробу приймається на базі порівняння послідовності дій оператора з нормативними діями.

Запропонована структура модуля з питань вивчення технічної експлуатації РТЗ КПП має в своєму складі елементи (наприклад, база даних результатів вимірювання), що дозволяють її застосування не тільки при проведенні тренувань, а й здійснювати зберігання та обробку результатів вимірювання значень параметрів, отриманих при перевірках, та може бути застосовано для підтримки прийняття рішення про його технічний стан.

Висновки

Визначена типова структура існуючих тренажерів імітаційних комплексів, які використовуються для підготовки персоналу, що обслуговує РТЗ КПП.

За результатами аналізу недоліків, що мають існуючи тренажні імітаційні комплекси, обґрунтовано: необхідність внесення до їх складу модуля, що забезпечує вивчення питань технічної експлуатації радіотехнічних засобів, та його структуру. Наведено, що крім навчання (тренування) обслуговуючого

персоналу, запропоноване програмне забезпечення дозволить при технічній експлуатації РТЗ КПП здійснювати зберігання та обробку результатів вимірювання значень параметрів, отриманих при перевірках, та може бути застосовано для підтримки прийняття рішення про його технічний стан.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Лискин В. М. Разработка и производство учебно-тренировочных средств для боевых расчетов, эксплуатирующих вооружение и военную технику ПВО / В. М. Лискин. М.: НО «Ассоциация «Лига содействия оборонным предприятиям». – 2011. – 504 с.
- Бюшгенс А. Г. Современные тренажерные технологии в России / А. Г. Бюшгенс // Аэрокосмический курьер. – 2010. – № 5. – С. 10 – 14.
- Тренажні імітаційні комплекси зенітного ракетного озброєння – досвід використання, проблемні питання та пропозиції щодо їх розв'язання / Б. В. Гайдадулов, Д. М. Крючков, Є. С. Рошупкін, В. В. Джус, Ю.В. Коробков // Міжнародна науково-практична конференція “Спільні дії військових формувань і правоохоронних органів держави: проблеми та перспективи”. – Військова академія (м. Одеса), 12-13 вересня 2019 року: тези доповіді. – 2019. – С. 340.
- Herasimov S. Characteristics of radiolocation scattering of the SU-25T attack aircraft model at different wavelength ranges / S. Herasimov, Y. Belevshchuk, I. Ryapolov, O. Tymochko, M. Pavlenko, O. Dmitriev, M. Zhyyvitskyi, N. Goncharenko // Information and controlling systems. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 6/9 (96). – 2018. – P. 22-29. – DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.152740>.
- Kukobko S. V. Radiation field calculation of an antenna array with a dielectric nose radome / S. V. Kukobko, S. V. Nechitaylo, A. Z. Sazonov // Telecommunications and Radio Engineering. – Vol. 4, No. 16-20. – P. 1845-1857. – DOI: <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v65.i20.20>.
- Development Of Scenario Modeling Of Conflict Tools In A Security System Based On Formal Grammars / O. Milov, S. Yevseiev, A. Vlasov, S. Herasimov, O. Dmitriev, M. Kasianenko, H. Pievtsov, Y. Peleshok, Y. Tkach, S. Faraon // Information and Controlling System. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 6/9 (102). – 2019. – P. 53-64. – DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.184274>.
- Pavlenko M.A. Hybrid model of knowledge for situation recognition in airspace / A.I. Timochko, N.A. Korolyuk, M.Y. Gusak // Automatic Control and Computer Sciences. – № 48. – 2014. – pp. 257–263. – DOI: <https://doi.org/10.3103/S0146411614050083>.
- Herasimov S. Statistical analysis of harmonic signals for testing of Electronic Devices / S. Herasimov, E. Roshchupkin, V. Kutsenko, S. Riazantsev, Yu. Nastishin // International Journal of Emerging Trends in Engineering Research. – Vol. 8, No. 7. – July 2020. – P. 3791-3798. – DOI: <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/143872020>.
- Борисенко М. В. Визначення оптимального переліку засобів вимірювальної техніки в складі контрольно-перевірочної апаратури зенітного ракетного озброєння / М. В. Борисенко, А. П. Волобуєв, Е. С. Рошупкін // Системи озброєння і військова техніка. – Х., 2011. – № 2 (26). – С. 114-117.
- Gerasimov S. Method of synthesis of the automatic control system adjustment circuit parameters / A. Mozhayev, A. Nakonechnyi, A. Podorozhniak // Nauka i studia. – Przemysl, 2015. – No 12 (143). – P. 61-67.
- Герасимов С. В. Теоретические основы оценки ошибок значений сигналов с гармонически меняющимися параметрами / С. В. Герасимов, Е. С. Рошупкін // Озброєння та військова техніка. – 2018. – № 2. – С. 43-49. – DOI: [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2018.2\(18\)43-49](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2018.2(18)43-49).

REFERENCES

- Lyskyn, V.M. (2011), *Development and production of training aids for combat calculations, operating weapons and military air defense equipment*, NO «Assocycacyja «Lygha sodejstvya oboronnym predpryatyjam», Moscow, 504 p.
- Bjushghens, A.G., (2010), “Modern training technologies in Russia”, *Aerokosmicheskyj kur'jer*, № 5, pp. 10 – 14.
- Haybadulov, B.V., Kriuchkov, D.M., Djus, V.V. and Roshchupkin, E.S. (2019), “Simulation anti-aircraft missile weapons training systems - experience of use, problematic issues and proposals for their solution”, *Spilni diji vijsjkovykh formuvanj i pravookhoronnykh orghaniv derzhavy: problemy ta perspektivy*, Vijsjkova akademija (Odesa), Odesa, p. 340.
- Herasimov, S., Belevshchuk, Y., Ryapolov, I., Tymochko, O., Pavlenko, M., Dmitriev, O., Zhyyvitskyi, M. and Goncharenko, N. (2018), “Characteristics of radiolocation scattering of the SU-25T attack aircraft model at different wavelength ranges”, *Information and controlling systems. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol 6, No. 9 (96), pp. 22-29, DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.152740>.
- Kukobko, S.V., Nechitaylo, S.V., Sazonov A.Z. (2006), “Radiation field calculation of an antenna array with a dielectric nose radome”, *Telecommunications and Radio Engineering* Vol. 4, No. 16-20, pp. 1845-1857 – DOI: <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v65.i20.20>.
- Milov, O., Yevseiev, S., Vlasov, A., Herasimov, S., Dmitriev, O., Kasianenko, M., Pievtsov, H., Peleshok, Y., Tkach, Y. and Faraon, S. (2019), “Development of Scenario Modeling of Conflict Tools in A Security System Based On Formal Grammars”, *Information and Controlling System. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 6, No 9, pp. 53-64, DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.184274>.
- Pavlenko, M.A., Timochko, A.I., Korolyuk, N.A. and Gusak, M.Y. (2014), “Hybrid model of knowledge for situation recognition in airspace”, *Automatic Control and Computer Sciences*, No. 48, pp. 257–263, DOI: <https://doi.org/10.3103/S0146411614050083>.
- Herasimov, S., Roshchupkin, E., Kutsenko, V., Riazantsev, S. and Nastishin, Yu. (2020), “Statistical analysis of harmonic signals for testing of Electronic Devices”, *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, Vol. 8, No. 7, pp. 3791-3798, DOI: <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/143872020>.

9. Borysenko, M.V., Volobujev, A.P. and Roshchupkin, E.S., (2011), "Determination of the optimal list of measuring equipment as part of the control and testing equipment of anti-aircraft missile weapons", *Systemy ozbrojenija i vijskova tekhnika*, KHUPS, Kharkiv, pp. 114-117.
10. Gerasimov, S., Mozhayev, A., Nakonechnyi, A. and Podorozhniak A. (2015), "Method of synthesis of the automatic control system adjustment circuit parameters", *Nauka i studia*, Przemysl, No 12 (143), pp. 61-67.
11. Herasimov, S.V. and Roshchupkin, E.S. (2018), "Theoretical bases for error estimation of signal values with harmonically changing parameters", *Ozbrojenija ta vijskova tekhnika*, No. 2, pp. 43-49, DOI: [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2018.2\(18\).43-49](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2018.2(18).43-49).

Received (Надійшла) 04.05.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 24.06.2020

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Крючков Дмитро Миколайович – викладач кафедри озброєння зенітних ракетних військ, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;

Dmytro Kriuchkov – lecturer of Anti-aircraft Missile Weapons Department, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: dnkriuchkov@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4377-3156>

Рошупкін Євген Сергійович – кандидат технічних наук, ст. наук. співробітник, старший викладач кафедри озброєння зенітних ракетних військ, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна;

Evgeniy Roshchupkin – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, senior lecturer of Anti-aircraft Missile Weapons Department, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: reszz76@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1089-9681>

Джус Володимир Всеолодович – кандидат технічних наук, доцент кафедри озброєння зенітних ракетних військ, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;

Volodymyr Djus – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Anti-aircraft Missile Weapons Department, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: vdjus@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1762-1543>

Титаренко Роман Володимирович – викладач кафедри озброєння зенітних ракетних військ, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;

Roman Tytarenko – lecturer of Anti-aircraft Missile Weapons Department, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: rideek@outlook.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7159-2934>

Усовершенствование подготовки персонала для обслуживания радиотехнических средств контроля воздушного пространства путем учета вопросов технической эксплуатации в тренажных имитационных комплексах

Д. Н. Крючков, Е. С. Рошупкин, В. В. Джус, Р. В. Титаренко

Аннотация. Предметом исследования является подготовка персонала, обслуживающего радиотехнические средства контроля воздушного пространства. **Объектом исследования** являются тренажерные имитационные комплексы радиотехнических средств контроля воздушного пространства, используемые для подготовки обслуживающего персонала. **Целью работы** является обоснование структуры тренажерных имитационных комплексов подготовки специалистов по эксплуатации радиотехнических средств контроля воздушного пространства. **Выводы.** Определена типовая структура существующих тренажерных имитационных комплексов, используемых для подготовки персонала, обслуживающего радиотехнические средства контроля воздушного пространства. По результатам анализа недостатков существующих тренажерных имитационных комплексов обосновано: необходимость внесения в их состав модуля, обеспечивающего изучение вопросов технической эксплуатации радиотехнических средств, и его структуру. Показано, что кроме обучения (тренировок) обслуживающего персонала, предложенное программное обеспечение позволит при технической эксплуатации радиотехнических средств осуществлять хранение и обработку результатов измерения значений параметров, полученных при проверках, и может быть применено для поддержки принятия решения о его техническом состоянии.

Ключевые слова: радиотехнические средства; тренажерные имитационные комплексы; техническое обслуживание; техническое состояние; техническая эксплуатация.

Personnel improvement preparations for air space radiotechnical facilities maintenance by the technical exploitation questions account in trainer imitation complexes

Dmytro Kriuchkov, Evgeniy Roshchupkin, Volodymyr Djus, Roman Tytarenko

Abstract. The subject of the study is preparation of auxiliary personnel air space radiotechnical facilities. The subject of the study is the trainer imitation complexes of air space radiotechnical facilities, used for auxiliary personnel preparation. The purpose of the work is a ground of trainer imitation complexes structure of specialists' preparation based on air space radiotechnical facilities exploitation. **Conclusions.** The model structure of the existent trainer imitation complexes, used for personnel preparation attendant air space radiotechnical facilities, is certain. Existential trainer imitation complexes lacks analysis results justified: the need to include in their composition a module that provides the radio equipment technical operation issues study, and its structure. It is shown that except educating (training) of auxiliary personnel, an offer software will allow during radiotechnical facilities technical exploitation to store and process the measurement results of parameter values obtained during checks, and can be used to support decision-making on its technical condition.

Keywords: radiotechnical facilities; trainer imitation complexes; technical service; technical state; technical exploitation.

Serhii Olizarenko¹, Vladimir Argunov²

¹ Kharkiv National University of Radio Electronics University, Kharkiv, Ukraine

² HIPSTO, Kharkiv, Ukraine

RESEARCH ON THE SPECIFIC FEATURES OF DETERMINING THE SEMANTIC SIMILARITY OF ARBITRARY-LENGTH TEXT CONTENT USING MULTILINGUAL TRANSFORMER-BASED MODELS

Abstract. The possibilities of determining the semantic similarity of multilingual arbitrary-length text content have been investigated using their vector representations obtained within different multilingual models based on Transformer architecture. A comparative analysis of the Transformers has been performed to select the most advantageous model for this class of problems. Also, two new unique approaches to determining the semantic similarity of a multilingual text content have been developed to be used in the HIPSTO Open AI Information Discovery Platform, the challenge being to allow arbitrary text length. Experimental and research evidence is offered to support the new approaches as a solution to the semantic similarity problem.

Keywords: Natural Language Processing; BERT; semantic similarities; news content; Deep Learning; multilingual text content; vector representation; Transformers; fine-tuning.

Introduction

The determination of the semantic similarity of texts (sentences) is one of the fundamentally important problems in the field of Natural Language Processing (NLP). In particular, the issue of semantic similarity is of paramount importance in systems of automatic search, retrieval and analysis of multilingual contents available on various news sites. In this case, the solution to the problem lies in a numerical assessment of the similarity of sequences corresponding to the multilingual text content.

The problem of determining the semantic similarity in the process of searching and analyzing a multilingual text content can be solved efficiently by using pre-trained multilingual Transformer-based models adapted through fine-tuning within the Deep Learning methodology [1].

Below the following models supporting multiple languages and based on Transformer architecture are analyzed:

- The multilingual BERT (Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding) supporting 104 languages [2];
- The multilingual DistilBERT (104 languages), which is a simplified BERT version operating 60% faster and retaining over 95% of the BERT characteristics measured in the GLUE (General Language Understanding Evaluation) test [3];
- The multilingual XLM model for 100 languages [4];

The comparative analysis of the above Transformers (see below), ranks these models as highly efficient tools for solving the problem of determining the semantic similarity. All of them, however, suffer a severe limitation on the length of an incoming tokenized text sequence – they can recognize no more than 512 tokens. The main techniques used to solve the problem are based on:

- 1) the cutting-off methods based on choosing the first or the final fragments of the sequence or combining the first and the final fragments of the sequence, in both

cases the length of the resulting sequence being no more than 512 tokens;

- 2) the hierarchical methods (e.g. combining the hidden states of all fragments of the sequence) [5].

However, these methods can lead to a loss of the contextual dependence of the most important words (hence, phrases and sentences) in the text sequences, which can in turn significantly affect the quality of determination of the semantic similarity of the texts being analyzed. So, there is a problem with applying the above Transformers to texts longer than 512 tokens and saving the utmost contextual dependence of the most significant words in text sequences, which is necessary for efficient determination of the semantic similarity of an arbitrary-length text content.

To meet this challenge, two new approaches to determining the semantic similarity of an arbitrary-length text content have been proposed to be used within HIPSTO Open AI Information Discovery Platform setup:

- 1) preliminary machine learning-based generalization (automatic summarization) of arbitrary-length texts under comparison and the subsequent, direct determination of the semantic text similarity by solving the problem of classification of pairs of text sequences within the pre-trained and fine-tuned multilingual Transformer-based model;

- 2) using, on step 1, the contextualized vector representations of arbitrary-length texts obtained by sliding window method according to the “medium core” rule as an input for the pre-trained multilingual Transformer (without fine-tuning, as feature extraction problem), and on step 2 followed by determining the degree of the similarity of the content through measuring the distance between their vector representations using the selected similarity metric (for example, cosine similarity).

Related Investigations. It is appropriate to mention here some investigations containing data on Transformer-based solutions to the problems of semantic text similarity. The possibility of determining the semantic similarity of a text content within the

HIPSTO AI technology setup on the basis of sentence embeddings and the use of the first problem of the pre-trained multilingual BERT model (the problem of word masking) is described in [1]. In particular, it is found out that without fine-tuning, the best results can be obtained through the formation of word embeddings by concatenating the last 4 layers and then forming sentence embeddings using a special integrating layer.

The universal multilingual sentence encoder for semantic retrieval for 16 languages using the family of sentence embedding models of the universal sentence encoder (USE) was performed in [6, 7]. Those models appear to be implementations of CNN (Kim, 2014) and Transformers (Vaswani et al., 2017) architectures [8, 9].

A technique of multilingual similarity discovery based on bidirectional LSTM encoder using a LASER (Language-Agnostic Sentence Representations) preparation is proposed by Lee in Ref. [10, 11].

The experimental results obtained by different methods of fine-tuning of BERT model for text classification problems, including determining the semantic similarity of the text are reported by Chi Sun et al., 2019 [5]. The Sentence-BERT (SBERT) model which is a modification of the pre-trained BERT and uses Siamese and triplet neural network structures to obtain semantically sensible vector representations comparable by cosine similarity, is described by Nils Reimers et al. (2019) [12]. A semantics-oriented search system that uses BERT embeddings and additional neural networks for estimating similarity and subsequent arrangement of documents in the ascending – descending order of their importance is proposed by Manish Patel (2019) [13].

A search system using BERT embeddings and the cosine similarity to estimate a search query and document similarity is proposed in (X.Han, 2019) [14].

It is noteworthy that none of the above studies considers the problem of efficient processing of texts over 512 tokens long.

Generalized study design. The generalized research scheme of solving the problem of determining the semantic similarity of multilingual arbitrary-length text contents consists in performing the following main steps:

- 1) The problem is considered as a task of classifying pairs of text sequences using Transformer-based models (Strategy 1) or;

- 2) The problem is treated as a task of determining an arbitrary-length vector representation applying the sliding window principle and Transformer-based models with the subsequent formation and determination of the degree of similarity of the sentence embeddings (Strategy 2);

- 3) Conclusions are drawn through a generalized assessment of the results obtained and the formulation of further directions of the research.

The solution to the problem of determining the semantic similarity of a multilingual arbitrary-length text content. Strategy 1

Within strategy 1, the problem of determining the semantic similarity of a multilingual arbitrary-length

text content is considered as a classification of pairs of text sequences. The applied research scheme includes the following main stages:

- 1) Specifying the architecture of the software module for determining the semantic similarity of multilingual arbitrary-length text contents (strategy 1);

- 2) Analysis of the possibilities of various types of multilingual Transformer-based models (BERT, DistilBERT and XLM) to determine the semantic similarity of multilingual text contents;

- 3) Evaluation of hyperparameters for fine-tuning of the model. Automatic tuning of the training rate for multilingual models taking into account the model type and the training data set;

- 4) Fine-tuning of multilingual Transformer-based models (BERT, DistilBERT, XLM) for solving the problem of classifying pairs of text sequences as well as the subsequent analysis of the fine-tuning results and selection of the most appropriate Transformer-based model for solving the problem of determining the semantic similarity of multilingual arbitrary-length text content within strategy 1;

- 5) Selection of the basic method of summarization of a text sequence over 512 tokens long to solve the problem of determining the semantic similarity of a multilingual arbitrary-length text content.

The program module for determining the semantic similarity of multilingual arbitrary-length text content within strategy 1 is shown schematically in Fig. 1. The software module consists of two main blocks:

- A block of summarization of a text sequence to no more than 254 tokens (for the BERT, DistilBERT and XLM models);

- A fine-tuned multilingual Transformer-based model for classification of pairs of sequences.

Three multilingual Transformer-based models (BERT, DistilBERT, and XLM) available in the Hugging Face library for TensorFlow [15] have been considered for determining the semantic similarity of a multilingual text content. The multilingual BERT (177,854,978 trainable params) in 104 languages is a bidirectional transformer pre-trained through combining a modeling target using a masked language (MLM) and the next sentence prediction (NSP) [2]. On training NSPs in BERT, a specialized token [CLS] was used as a sequence for evaluating the forecast results. In this study, this token (the first token in the sequence) is used to solve the problem of classifying pairs of text sequences in all Transformers. The multilingual DistilBERT model (135,326,210 trainable params) covering 104 languages is an enlightened version of BERT that operates 60% faster and retains more than 95% of the BERT characteristics measured in the GLUE (General Language Understanding Evaluation) test [3]. The multilingual XLM model (571,499,522 trainable params) in 100 languages is a pre-trained transformer aimed at the following objectives [4]: 1) Causal language modeling (CLM) (next token prediction); 2) Masked language modeling (MLM) (BERT-like); 3) Translation Language Modeling (TLM) an object (extension of BERT's MLM to multiple language inputs).

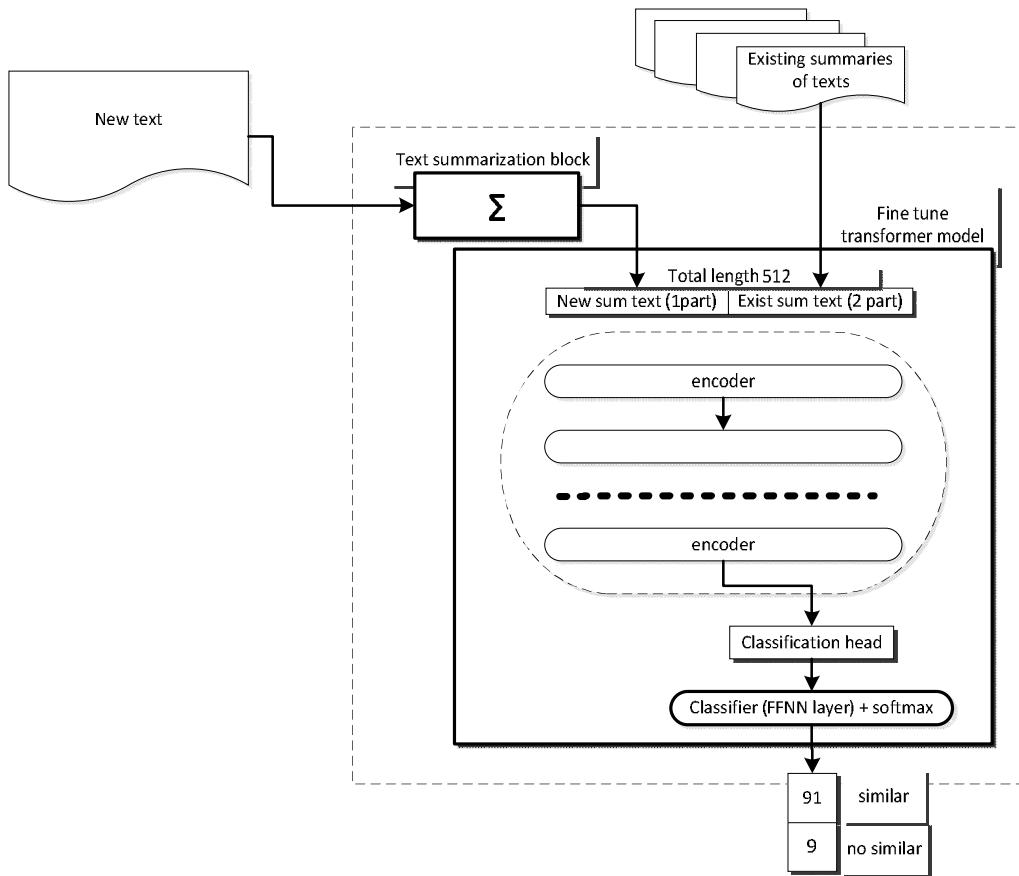


Fig. 1. Overall design of the module for determining the semantic similarity of multilingual arbitrary-length text content (strategy 1)

Thus, unlike BERT and DistilBERT, XLM is not trained specially for NSP. And yet, the input data format of the XLM model, as in BERT, affords encoding of two different sequences in the same input identifiers (token type ids). However, the input data format in DistilBERT does not have the token type ids and hence, does not indicate which token belongs to which segment of the text sequence. To solve this problem within DistilBERT, segments are simply separated using a special [SEP] token (as in BERT).

Neural networks contain a number of hyperparameters that must be set before training can be started. In practice, many of them have reasonable, by default, values, but some of them must be configured before training. The training rate is one of the most critical parameters since it determines the degree of adjusting the weights during training. In this study, we used the method of preliminary automatic tuning and adjustment of the learning rate to minimize more efficiently the losses in training [16]. The learning speed of a model was tuned automatically taking into account the type of multilingual model and the training data set. The training was carried out using Microsoft Research Paraphrase Corpus (MRPC) kit containing 5800 pairs of sentences [17]. The choice of this dataset is explained later in this paper when fine-tuning of the Transformer-based models is described.

The results of the automatic tuning of the learning rate of Transformers are presented in Fig. 2, 3. The learning rate values were chosen so that they correlate

to still falling losses (before the losses diverge). The learning rates based on the analysis of the graphs in Fig. 4 are as follows:

- 1) learning_rate = 5e-5 for BERT;
- 2) learning_rate = 8e-5 for DistilBERT;
- 3) learning_rate = 5e-6 for XLM.

In this research, for the task of classifying pairs of text sequences, multilingual Transformer-based models take the final hidden state s . As a function of activation of a fully connected classifier layer, softmax is used to predict the probability p for class label l [18]:

$$p(l \vee s) = \text{softmax}(W_S), \quad (1)$$

where W_S is the resulting tensor of the hidden state s .

Fine-tuning of multilingual Transformers (BERT, DistilBERT, XLM) aimed at solving the problem of classifying pairs of text sequences, was performed using the MRPC dataset. Detection of rephrasing is a task of examining two text objects and determining whether they have the same meaning. In the general case, to attain high accuracy in performing this task, thorough syntactic and semantic analyses of two text objects are required.

According to the style of rephrasing, paraphrases can be subdivided into five types [17]:

- 1) Trivial change of words in a phrase (sequence);
- 2) Replacement of a phrase;
- 3) Changing the order of phrases;
- 4) Separation and/or combination of phrases;
- 5) Complex paraphrase.

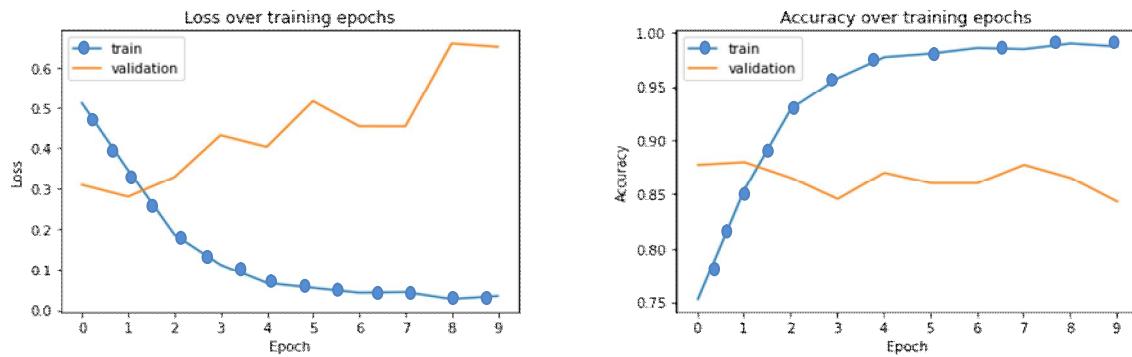


Fig. 2. Plots of error and accuracy of training for BERT

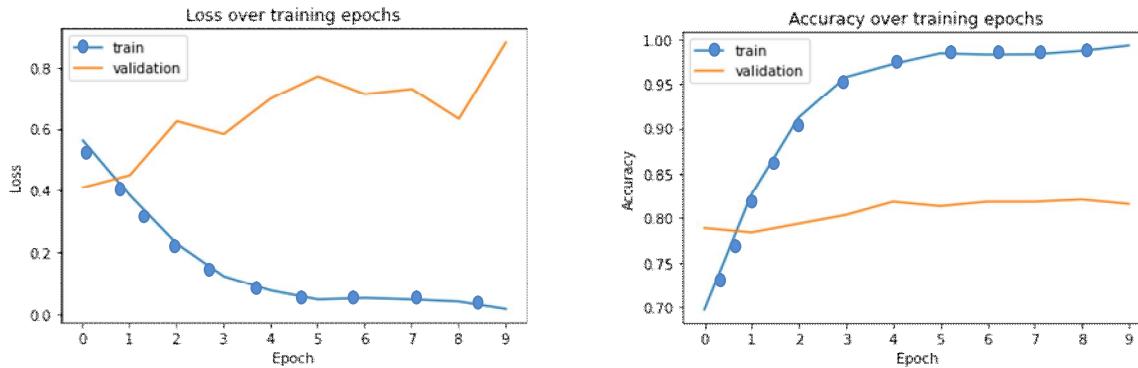


Fig. 3. Plots of error and accuracy of training for the DistilBERT model

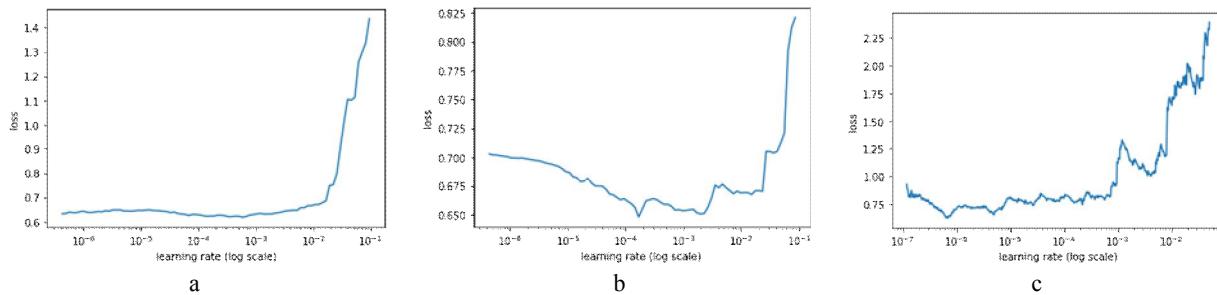


Fig. 4. The results of automatic tuning of the training rate for: 1 - BERT, 2 - for DistilBERT, 3 - for XLM

In this study, using type #5 of “paraphrase” is of particular importance in determining the semantic similarity of the multilingual text content: on the one hand, the MRPC data set implements the corresponding type of paraphrases and, on the other hand, it allows checking the effectiveness of the results of fine-tuning the Transformers (BERT, DistilBERT, XLM), taking into account the NLP data available in literature [2 - 4].

The results of the fine-tuning of the multilingual Transformers (BERT, DistilBERT, XLM) are presented in Fig. 5–7 and Table 1. The analysis of the graphs in Fig. 3–5 shows that the values of loss validation and accuracy validation start moving apart even in the third epoch of training, which suggests that two epochs of training on an appropriate data set is quite sufficient for these models. The data in Table 1 also show that the multilingual BERT retrained on the MRPC dataset, exhibits the highest measures of accuracy among all multilingual Transformers fine-tuned to solve the problem of classifying pairs of text sequences of accuracy. At the same time, the accuracy measures for the DistilBERT and XLM models are very close even though the XLM model has four times more trained

parameters than DistilBERT. Thus, with no limitation on hardware, the multilingual BERT is most efficient to solve the problem of determining the semantic similarity of multilingual arbitrary-length text content within strategy 1. If there are any restrictions in place, the multilingual DistilBERT is the best choice. The XLM model did not prove to be effective within strategy 1 as it was never pre-trained for a NSP task.

Generalization is a task of reducing the text to a shorter version, reducing the size of the source text and at the same time preserving the key information elements and the meaning of the content. In this study, the main task of summarization was to generalize a text sequence to one no longer than 254 tokens (for the BERT, DistilBERT, and XLM models) and use it then as one of the sequences of the input pair for the multilingual model of choice. On having analyzed several models of summarizers: LSA, KLS, LexRankS and TextRank were short-listed. The models were assessed on English texts, and their performance was compared using their ROUGE points. Based on the results, it was decided to use and further research the model of hidden semantic analysis (LSA) [19].

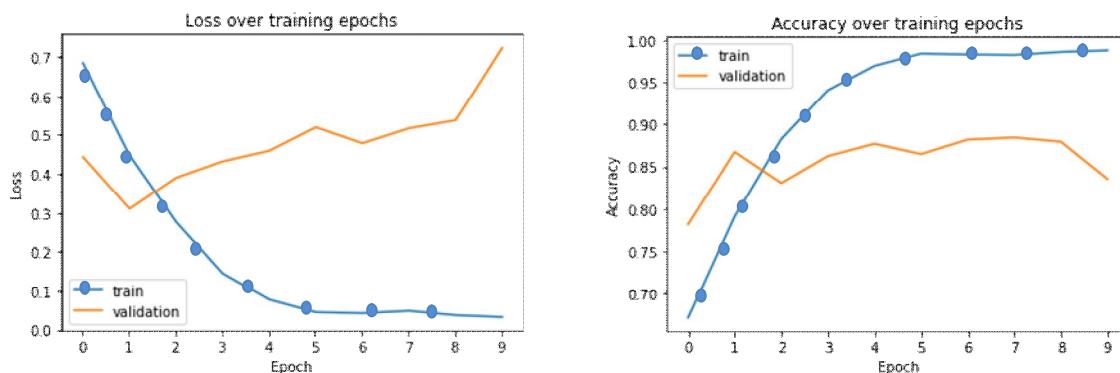


Fig. 5. Plots of error and accuracy of training for the XLM model

Table 1 – Values of the accuracy of fine-tuned multilingual Transformer-based models

Model		Precision	Recall	F1-score
BERT	no similar	0,78	0,86	0,82
	similar	0,94	0,89	0,92
	accuracy			0,88
DistilBERT	no similar	0,82	0,67	0,74
	similar	0,87	0,94	0,90
	accuracy			0,86
XLM	no similar	0,84	0,69	0,76
	similar	0,87	0,94	0,91
	accuracy			0,86

Solution to the problem of determining the semantic similarity of multilingual arbitrary-length text content. Strategy 2

The problem of determining the semantic similarity of multilingual arbitrary-length text content within strategy 2 is considered as a flow of: determining the representation vector of the text content (contextual word embeddings) using a sliding window approach by the "medium core" rule and a model based on Transformer architecture; calculating the degree of similarity of sentence embeddings using the selected metric (e.g., similarity cosine). In accordance with the tasks formulated, the research scheme of strategy 2 includes the following main steps:

1) Defining the architecture of the software module for determining the semantic similarity of multilingual arbitrary-length text content within strategy 2;

2) An analysis of the possibilities of various types of multilingual Transformer-based models (BERT, DistilBERT and XLM) to determine the semantic similarity of multilingual text content;

3) Suggesting a method of determining the vector representation of an arbitrary-length text content (contextual word embeddings) using the procedure of a sliding window by the "medium core" rule and the subsequent formation of sentence embeddings;

4) An analysis of the results delivered by the software module within strategy 2 as well as the selection of the most appropriate Transformer for solving the problem of determining the semantic similarity of multilingual arbitrary-length text content in the course of strategy 2.

The software module for determining the semantic similarity of multilingual arbitrary-length text contents

within strategy 2 is presented schematically in Fig. 6. It includes four major blocks:

1) block 1 is intended to receive intersecting fragments of tokenized sequences of texts over 512 tokens long complying with "the medium core" rule;

2) block 2 forms contextual word embeddings for each fragment obtained at the previous stage, using the multilingual Transformers;

3) block 3 forms resulting sentence embeddings based on the word embeddings obtained for the entire sequence using the averaging or maximization operations;

4) block 4 implements the process of determining the degree of similarity of content by measuring the distances between their sentence embeddings.

All the multilingual Transformer-based models (BERT, DistilBERT, and XLM) reviewed in this paper were pre-trained through combining a modeling target using a masked language (MLM), which in turn determines their efficiency in feature extraction in the context of determining the semantic similarity of multilingual arbitrary-length text content in strategy 2.

The method of determining the vector representation of an arbitrary-length text content is based on the sliding window technique following "the medium core" rule, and it is accomplished through the following steps (blocks 1-3) (Fig. 7):

1. Block 1

1.1. After tokenization, a list of main fragments of 510 tokens long is formed with the remaining fragment of arbitrary length $ABF = \{BF_i\}, i = \underline{1, k}$ (the special ending and beginning characters are added for each sequence). Then the whole sequence can be presented as

$$WST = \sum_{i=1}^k BF_i.$$

1.2. A list is made up, which includes the medium fragments of token sequences (the "medium core")

$AMF = \{MF_j\}, j = \underline{1, k-1}$ formed at the joint of the left and right main fragments. The medium core is made of a half of right fragment and a tail of left fragment having the length same as those of the part of the right one used, the two additional special characters being added to mark the end and the beginning of each sequence. The length of the middle fragment is, as a result, equal to the length of the right main fragment

$$\text{length}(MF_j) = \frac{\text{length}(BF_{i+1})}{2}.$$

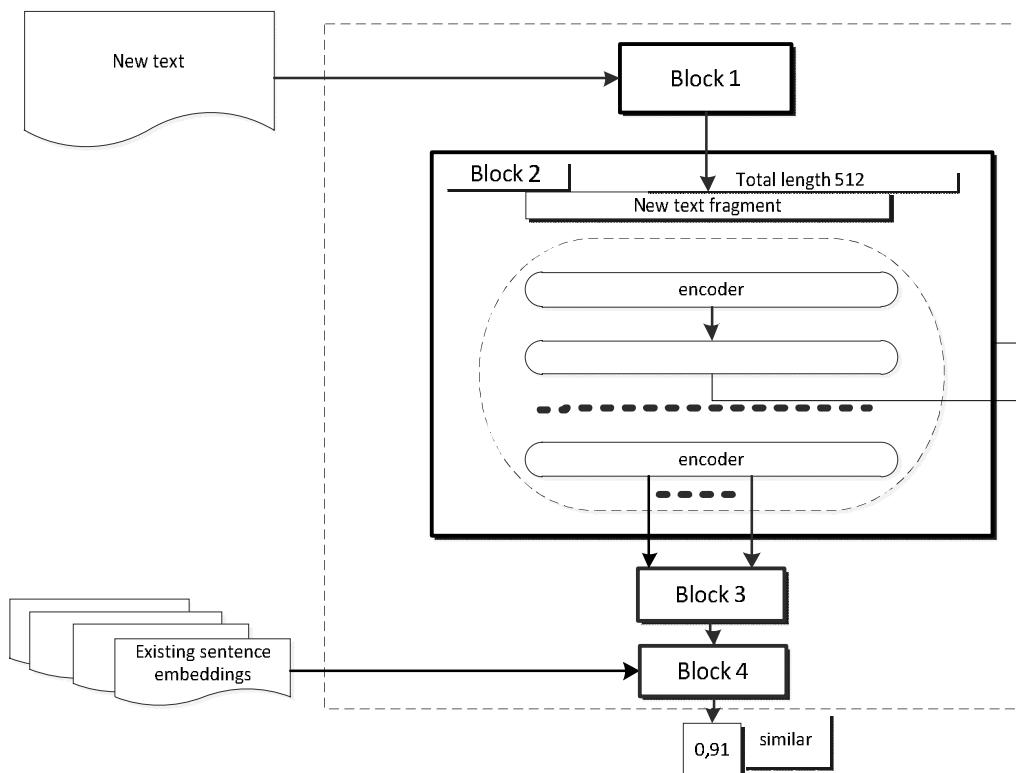


Fig. 6. Overall design of the module for determining the semantic similarity of multilingual arbitrary-length text content within Strategy 2

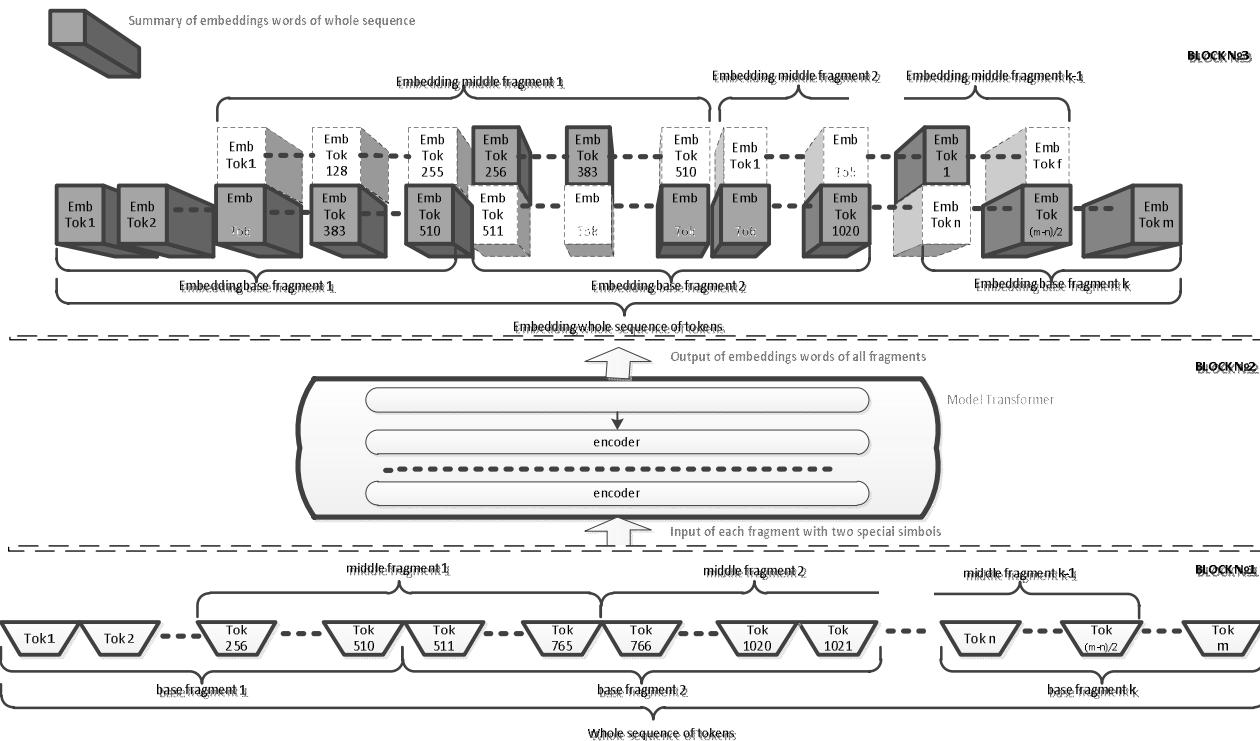


Fig. 7. High-level presentation of the method for determining the vector representation of text content of arbitrary length based on a sliding window according to the "medium core" rule

2. Block 2

2.1. The contextual word embeddings of the main and medium fragments are formed from the output of the multilingual Transformer-based model.

Corresponding lists are made up which can be formalized as follows:

$$AEBF = \{EBF_i\} \rightarrow \{BF_i\}, i = \underline{I}, k, \quad (2)$$

$$AEMF = \{EMF_j\} \rightarrow \{MF_j\}, j = \underline{I}, k - 1. \quad (3)$$

3. Block 3

3.1. The contextual word embeddings of the main fragments are joined together, and the basic word

embeddings of the entire sequence are formed as

$$WES = \sum_{i=1}^k EBF_i .$$

3.2. Word embeddings of medium fragments are half-truncated from the left and the right sides (to maximize the preservation of contextual dependence within the main sequence ("truncated medium core")) and the corresponding fragments in the main sequence are replaced with the resulting word embeddings

$$(EBF_i + EBF_{i+1}) = (EMF_j / 2),$$

$$i = \underline{1, k}, \quad j = \underline{1, k - 1}.$$

3.3. The resulting sentence embeddings are formed according to the word embeddings of the entire sequence using the averaging or maximization strategy. In this research, Cosine Similarity was used as the main metric for determining the degree of similarity to determine the similarity of sentence embeddings of two text content items, after which the results of determining Cosine Similarity were converted into angular distance [20]

$$(u, v) = (1 - \arccos(uv/(u+v))/p), \quad (4)$$

where u, v are sentence embeddings obtained from the results of the multilingual Transformers model.

Moreover, in accordance with the recommendations given in [1, 14], a relative, rather than an absolute assessment of the results of Cosine Similarity determination is performed

$$IF (u, v) > (u, c) THEN u is more v THAN c . \quad (5)$$

The experiment was carried out using pre-trained multilingual BERT, DistilBERT and XLM. When determining the sentence vector, the average value was used (operation MEAN). The experiments have shown that using the MAX operation greatly raises the lower bound of the estimate. The extreme values of the estimate for the cosine similarity (expression (4)) and the Manhattan distance (considered as an additional metric for determining the degree of similarity) practically coincided; In this case, the relative similarity score (5) was taken into account.

Table 2 shows the average results of using the sliding window method according to the "medium core" rule in comparison with the truncation method (selecting the first 512 token fragments of a sequence) and the hierarchical method (combining word embeddings of all sequence fragments) with the following comparison using the cosine similarity (expression (4)) and Manhattan distance.

At the same time, the results of using mean pooling and max pooling were also analyzed for each of the methods for forming embedding of the entire sequence longer than 512 tokens.

As the experiment condition, a sequence of 512 tokens was used as a reference, and sequences of different lengths no more than 50% of the tokens from the reference were used as fragments.

The analysis of the averaged results (Table 2) proves the effectiveness of the method described in Section 3.2 in comparison with both the truncation and

hierarchical methods. Also, it shows that an increase in the fragment length gives an increase in the accuracy of the sliding "medium core" window method. Therefore, these results can be extrapolated to processing sequences longer than 512 tokens.

In future, it is necessary to conduct additional research to determine the optimal size of truncated word embeddings of medium fragments for more efficient use of the sliding window method according to the "medium core" rule for processing sequences longer than 512 tokens.

Table 2 – The results of using word processing methods for the input sequence longer than the maximum allowed for BERT

Processing Method	Cosine similarity		Manhattan distance	
	mean pooling	max pooling	mean pooling	max pooling
Sliding window method with the "medium core" rule	87,77	97,96	108,73	193,61
Hierarchical method	87,4	97,91	109,01	194,09
Truncation method	84,45	97,14	124,62	251,59

Moreover, with the maximum sequence length being just slightly over the maximum allowed for the Transformer-based model, the results of using the sliding window method and the hierarchical method for sequences up to 1024 tokens in length are almost the same. While the longer the sequence (e.g. more than twice the maximum input sequence of the model), the more effective the sliding window method compared to the hierarchical one.

Diagrams 1 and 2 of Fig. 8 show the results of Cosine Similarity for evaluating BERT outputs when solving problems of determining cross-language semantic similarity using the sliding window method according to the "medium core" rule and the hierarchical method respectively (formation of embedding sequences using the maximization method). The data set included pairs of two semantically similar sequences, but in different languages (English, Dutch, Hindi). The maximum length was 895 tokens for the sequence in Hindi, the minimum - 550 tokens in English.

In Fig. 9–12 there are the examples of scatter diagrams and dimension values of vector elements in solving problems of determining cross-language semantic similarity for semantically equivalent pairs of sentences ("English" - "English", "English" - "Dutch") for the sliding window method (Fig. 9, 10) and the hierarchical method (Fig. 11, 12).

An analysis of the experimental results showed that in the absence of hardware limitations to solve the problem of determining the semantic similarity of multilingual text content of arbitrary length using the second approach, the most effective is the use of "heavy" multilingual models such as XLM, as well as BERT.

If there are restrictions, the use of the multilanguage DistilBERT model will be most optimal.

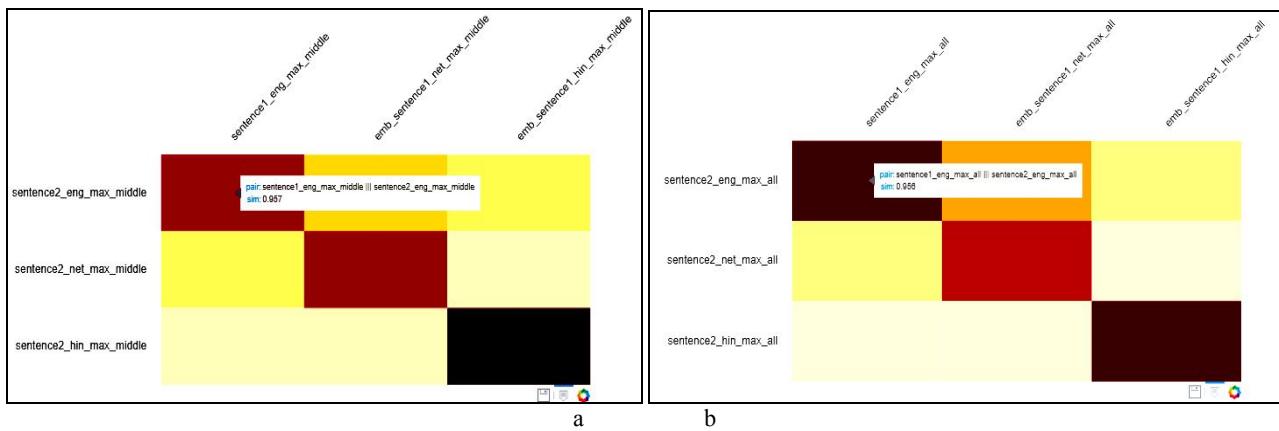


Fig. 8. The results of the Cosine Similarity

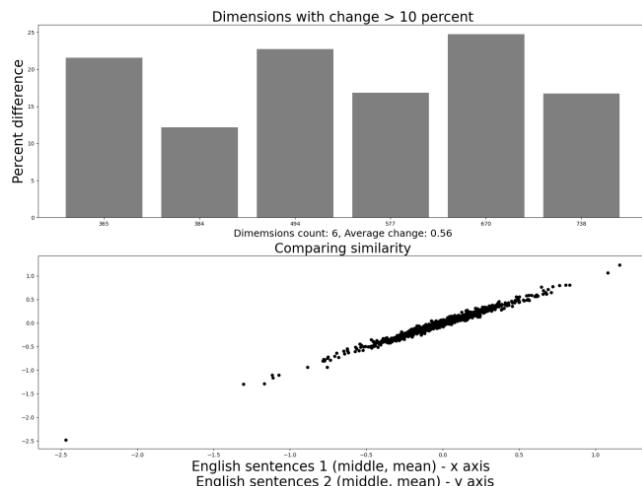


Fig. 9. Scatter diagrams and dimension values for equivalent pairs of sentences "English" - "English" for the sliding window method

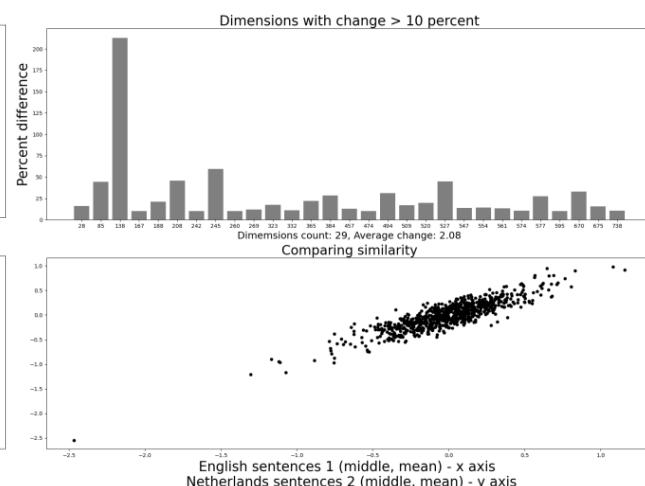


Fig. 10. Scatter diagrams and dimension values or equivalent pairs of sentences "English" - "Dutch" for the sliding window method

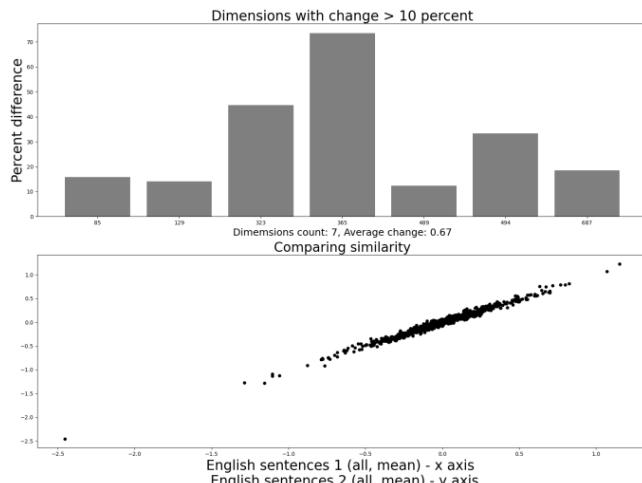


Fig. 11. Scatter diagrams and dimension values for equivalent pairs of sentences "English" - "English" for the hierarchical method

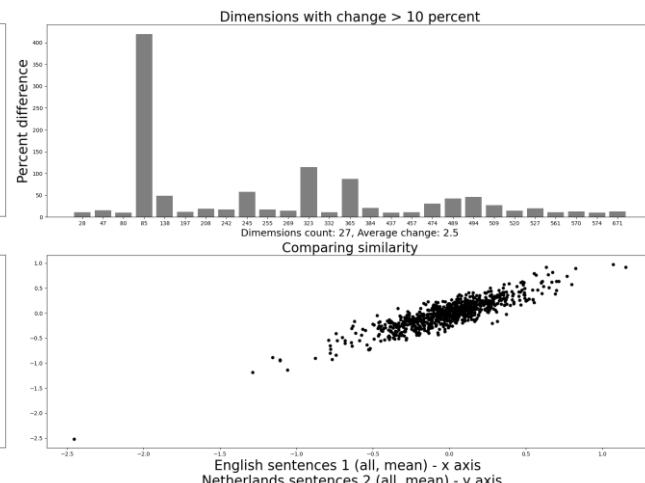


Fig. 12. Scatter diagrams and dimension values for equivalent pairs of sentences "English" - "Dutch" for the hierarchical method

Conclusions

This research has been carried out as a part of the HIPSTO Open AI Information Discovery Platform. The research shows the ways of using multilingual models based on Transformer architecture (BERT, DistilBERT,

XLM) to determine the semantic similarity of text content of variable length.

There are two new approaches proposed to overcome the limitation on 512 input tokens for the considered Transformer-based models: strategy 1 is based on attacking the problem of determining the semantic

similarity of multilingual text content of variable length as a task of classification of pairs of text sequences using Transformer-based models (currently being validated in the HIPSTO AI technology setup); strategy 2 solves the problem as the task of getting a vector representation of variable length based on a sliding window using models based on Transformer architecture and followed by the determination of the degree of similarity of sentence embeddings (currently implemented within the HIPSTO AI technology setup).

The key point of strategy 1 implementation is the preliminary processing of text content longer than 512 tokens using an intelligent summarization and the subsequent application of the fine-tuned multilingual Transformer-based model for classifying pairs of text sequences.

Our research has demonstrated that BERT is the best option to use for this approach in case there are no strict computation power limitations. However, if the limitations are in place, the use of the multilanguage DistilBERT will be most optimal and acceptable in terms of effectiveness.

The main advantage of strategy 1 is the ability to overcome the restrictions on the length of the input sequence when determining the semantic similarity of text content in combination with all the advantages of the fine-tuned Transformer-based model pre-trained for Next Sentence Prediction (NSP).

The key feature of strategy 2 implementation is the initial processing of text content longer than 512 tokens with a sliding window based on the middle core rule which ensures the maximum preservation of the contextual dependence of the elements of the entire sequence. This step is followed by pushing the sliding window output through the Transformer-based multilingual model to form sentence embeddings.

The experiments have shown that both XLM and BERT are good options to use for this approach. However, if the limitations are in place, the multilanguage DistilBERT will still work as an acceptably effective substitution.

The advantage of strategy 2 is the ability to overcome the restrictions on the input sequence length in combination with all the advantages of the most powerful Transformer-based models in the generation of contextual word embeddings and the corresponding sentence embeddings (for example, such as the XLM model).

The continuation of our research is planned in:

1) an analysis of the possibilities of using PAWS (Paraphrase Adversaries from Word Scrambling) dataset in English and its extension PAWS-X (up to six typologically different types of languages: French, Spanish, Russian, Chinese, Japanese and Korean) for fine-tuning the multilingual BERT to determine the semantic similarity of text content in the course of strategy 1;

2) an analysis of the possibilities of using more complex extractive and abstract models of generalization and summarization of texts, including those based on deep neural networks.

Thus, this paper presents the results of the research of two effective and unique strategies of determining the semantic similarity of text content of arbitrary length using multilingual Transformer-based models. Strategy 2, which is based on the use of the Transformer-based base model and a sliding window according to the “medium core” rule, is currently implemented in the HIPSTO AI technology setup. Strategy 1, which is based on pre-summarization of text and the use of a fine-tuned Transformer-based model, seems more promising for further research and use. However, it is more resource “expensive” in terms of implementation, as it requires more extensive datasets for Transformer fine-tuning.

The HIPSTO AI technology setup is growing its dataset organically using the implementation of strategy 2 in production. In addition, the research and development of a neural network-based summarizer (which can also be trained with the datasets already collected by HIPSTO) should improve the accuracy and quality of strategy 1 implementation outcome.

REFERENCES

1. Olizarenko, S. and Argunov, V. (2019), *Research into the possibilities of the multilingual BERT model for determining semantic similarities of text content*, available at: <https://hipsto.global/BERT-Application-Research-for-HIPSTO-Related-News-Detection.pdf>
2. Devlin, J., Ming-Wei Chang, Lee, K. and Toutanova, K. (2019), *BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding*, arXiv:1810.04805v2 [cs.CL] 24 May 2019.
3. Sanh, V., Debut, L., Chaumond, J. and Wolf, T. (2020), *DistilBERT, a distilled version of BERT: smaller, faster, cheaper and lighter*, arXiv:1910.01108v4 [cs.CL] 1 Mar 2020.
4. Guillaume, Lample and Alexis, Conneau (2019), *Cross-lingual Language Model Pretraining*, arXiv:1901.07291v1 [cs.CL] 22 Jan 2019.
5. Sun, C., Qiu, X., Xu, Y. and Huang X. (2020), *How to Fine-Tune BERT for Text Classification*, arXiv:1905.05583v3 [cs.CL] 5 Feb 2020.
6. Yang, Y., Cer, D., Ahmad, A., Guo, M., Law, J., Constant, N., Abrego, G.H., Yuan, S., Tar, C., Sung, Y., Strope, B. and Kurzweil R. (2019), *Multilingual Universal Sentence Encoder for Semantic Retrieval*, arXiv:1907.04307v1 [cs.CL] 9 Jul 2019.
7. Cer, D., Yang, Y., Kong, S., Hua, N., Limtiaco, N., John, R.St., Constant, N., Guajardo-Cespedes, M., Yuan, S., Tar, C., Strope, B. and Kurzweil, R. (2018), “Universal sentence encoder for English”, *Proceedings of the 2018 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing: System Demonstrations*, pp. 169–174.
8. Yoon, Kim (2014), “Convolutional neural networks for sentence classification”, *Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP)*, pp. 1746–1751.
9. Ashish, Vaswani, Noam, Shazeer, Niki, Parmar, Jakob, Uszkoreit, Llion, Jones, Aidan, Gomez, Łukasz, Kaiser, and Illia, Polosukhin (2017), “Attention is all you need”, *Proceedings of NIPS*, pp. 6000–6010.

10. (2020), *Multilingual Similarity Search Using Pretrained Bidirectional LSTM Encoder. Evaluating LASER (Language-Agnostic SEntence Representations)*, available at: <https://medium.com/the-artificial-impostor/multilingual-similarity-search-using-pretrained-bidirectional-lstm-encoder-e34fac5958b0>.
11. (2019), *Zero-shot transfer across 93 languages: Open-sourcing enhanced LASER library*, POSTED ON JAN 22, 2019 TO AI RESEARCH, available at: <https://engineering.fb.com/ai-research/laser-multilingual-sentence-embeddings>.
12. Reimers, N. and Gurevych, I. (2019), *Sentence-BERT: Sentence Embeddings using Siamese BERT-Networks*, arXiv:1908.10084v1 [cs.CL] 27 Aug 2019.
13. Patel, M. (2019), *TinySearch - Semantics-based Search Engine using Bert Embeddings*, available at: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1908/1908.02451.pdf>.
14. Han, X. (2020), *Bert-as-service*, available at: <https://github.com/hanxiao/bert-as-service>.
15. (2020), *State of the art Natural Language Processing for Pytorch and TensorFlow 2.0*, available at: <https://huggingface.co/transformers/index.html>.
16. Arun, S. Maiya (2020), *Krain: A Low-Code Library for Augmented Machine Learning*, available at: <https://arxiv.org/pdf/2004.10703v2.pdf>.
17. Dolan, B. and Brockett, C. (2005), “Automatically Constructing a Corpus of Sentential Paraphrases”, *Proceedings of the 3rd International Workshop on Paraphrasing* (IWP 2005), Jeju Island, pp. 9–16.
18. Goodfellow, I., Bengio, Y. and Courville, A. (2018), *Softmax Units for Multinoulli Output Distributions*. *Deep Learning*, MIT Press. pp. 180–184, ISBN 978-0-26203561-3.
19. Markovsky, I. (2012), *Low-Rank Approximation: Algorithms, Implementation, Applications*, Springer, ISBN 978-1-4471-2226-5.
20. Daniel, Cer, Yinfei, Yang, Sheng-yi, Kong, Nan Hua, Nicole, Limtiaco, Rhomni, St. John, Noah, Constant, Mario, Guajardo-Cespedes, Steve, Yuan, Chris, Tar, Brian, Strope, and Ray, Kurzweil (2018), “Universal sentence encoder for English”, *Proc. of the 2018 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing: System Demonstrations*, pp. 169–174.

Received (надійшла) 12.05.2020

Accepted for publication (прийнята до друку) 24.06.2020

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Олізаренко Сергій Анатолійович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;
Serhii Olizarenko – Doctor of Technical Sciences, senior researcher, professor of the electronic computers department, Kharkiv National University of Radio Electronics University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: sergejolizarenko5@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7762-6541>.

Аргунов Володимир Володимирович – керівник відділу досліджень штучного інтелекту, HIPSTO, Харків, Україна;
Vladimir Argunov – Head of AI Research, HIPSTO, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: warg.silencer@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2505-1969>.

Дослідження особливостей визначення семантичної подібності текстового контенту довільної довжини з використанням багатомовних моделей на основі Transformer

С. А. Олізаренко, В. В. Аргунов

Анотація. В роботі досліджені можливості визначення семантичної подібності багатомовного текстового контенту довільної довжини на основі їх векторних уявлень, отриманих з використанням різних багатомовних моделей на основі архітектури Transformer. Проведено порівняльний аналіз моделей Transformer для вибору найбільш ефективної моделі для вирішення даного класу задач. Запропоновано два нових унікальних підходи до визначення семантичної подібності багатомовного текстового контенту для використання в платформі HIPSTO Open AI Information Discovery з подоланням проблеми використання тексту довільної довжини. Аналізуються експериментальні дані, отримані при реалізації нових підходів для вирішення завдання семантичного подібності текстового контенту довільної довжини.

Ключові слова: обробка природної мови; BERT; семантична подібність; новинний конвент; глибоке навчання; багатомовний текстовий конвент; векторне подання; трансформери; тонке налаштування.

Исследование особенностей определения семантического сходства текстового контента произвольной длины с использованием многоязычных моделей на основе Transformer

С. А. Олізаренко, В. В. Аргунов

Аннотация. В работе исследованы возможности определения семантического сходства многоязычного текстового контента произвольной длины на основе их векторных представлений, полученных с использованием различных многоязычных моделей на основе архитектуры Transformer. Проведен сравнительный анализ моделей Transformer для выбора наиболее эффективной модели для решения данного класса задач. Предложены два новых уникальных подхода к определению семантического сходства многоязычного текстового контента для использования в платформе HIPSTO Open AI Information Discovery с преодолением проблемы использования текста произвольной длины. Анализируются экспериментальные данные, полученные при реализации новых подходов для решения задачи семантического сходства текстового контента произвольной длины.

Ключевые слова: обработка естественного языка; BERT; семантическое сходство; новостной контент; глубокое обучение; многоязычный текстовый контент; векторная подача, трансформеры; тонкая настройка.

Oleksandr Orlovskyi, Sergey Ostapov

Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine

ANALYSIS OF THE TEXT PREPROCESSING METHODS INFLUENCE ON THE DESTRUCTIVE MESSAGES CLASSIFIER

Abstract. **Problem.** Social networks are increasingly becoming an environment for threats, insults, profanity and other destructive manifestations of human communication. Today, a huge number of people are involved in online platforms, and the amount of content created and reactions to it is constantly breaking records. Therefore, there is a need to automate the detection and counteraction of antisocial influences. One of the important areas of such activities is the detection of toxic comments that contain threats, insults, profanity, contempt for others and more. To perform this task, researchers usually build a classifier based on neural networks. And for their training they use a collected or publicly available set of data. The article investigates how different methods of pre-processing of input data affect the final accuracy of the classifier. Previous studies in this direction have confirmed the presence of an impact on the result, but did not allow to draw definitive conclusions about the effectiveness. **Goal.** Research of preliminary processing of text data methods influence on the destructive messages classifier. **Results.** It has been shown that the effect of a particular method can be quite dependent on the content in the data set. In addition, it is noted that sometimes the impact may be insignificant, and in some cases may even lead to a worsening of the result. It is also justified the need to pre-check the data set for the percentage of elements that fall under the impact of a particular method. **Originality.** The methods of data processing are evaluated on the basis of English and Russian data sets. **Practical significance.** The obtained results allow to make better decisions about the usage of certain pre-processing methods to improve the accuracy of the destructive messages classifier.

Keywords: data preprocessing; destructive text data detection; neural networks; data mining; data set; data processing; classifier.

Introduction

Nowadays, especially in quarantine conditions, people increasingly prefer to communicate in online environments. Based on data from the Statista portal, we can say that in July 2020, three of the most popular social networks broke the bar of 2 billion active users, while three more hit 1 billion. Also in the same place we can mention other top growth rate online platforms like TikTok [1]. Accordingly, the amount of content and reactions to it is also growing rapidly. Among this large-scale volume of information, users encounter both cognitive, entertaining, developmental content, and various negative manifestations of human communication. These include cyberbullying, threats, obscene language and any messages created to offend the feelings and dignity of the interlocutors.

According to the need for timely response by the communication platforms to the above destructive manifestations, the task of automating the detection of such negative factors for a healthy atmosphere on the platform is extremely important. In addition, having detected such a manifestation, it is necessary to quickly neutralize it. Due to the size of the platforms and according to the number of interaction points between users, we note that even an army of moderators will not be able to cope with the flow of information as quickly as automated solutions can. Therefore, the study of factors influencing the accuracy and speed of their work is an urgent task.

Previous research analysis. A variety of approaches are used to automatically detect destructive messages, from simple statistical analysis of textual data to complex neural network-based approaches with complex architectures, reinforced with large amounts of data. The study [2] presents a manual selection of

features of destructive messages and the use of context to improve accuracy. It is also noted that taking into account features that are based on uppercase and lowercase letters, emoji does not lead to a significant increase in the accuracy of the final result.

Research [3] demonstrates a wide range of destructive messages categories, to identify each of which you can choose an individual approach. This paper also emphasizes the importance of understanding the nature of the origin of each of the categories. Moreover, authors show some possibilities to experiment with the architecture of neural networks for accuracy improving.

From [4] we can learn the basic methods of statistical analysis applied to text for solving problems in our chosen topic. In addition, the paper pays great attention to the influence of syntactic connections in the sentence on the quality of the final classification result.

From the study [5] we can better understand the role of context in solving the domain problems. At [6] authors analyze a wide range of classifiers in the context of our problem, and at [7] it is demonstrated how to reverse different classification methods errors in favor.

In the context of our study, the paper [8] requires the most attention. Authors studied 35 preprocessing methods applied on English-based dataset and showed that the usage of most of them is a rather ambiguous solution. Based on the above study, we have the opportunity to investigate the effectiveness of using some of the described methods on the Russian- and English- language based data sets.

The aim of this paper is to study the impact of some text pre-processing methods on improving the accuracy of destructive message detectors.

To solve the selected problem, we train a classifier based on an artificial neural network and compare the

results of toxic comments identification after applying each of the methods with the initial result of identification. We will also consider the option of combining these methods with each other.

Data samples

The experiments were performed using two data sets. The first – "Toxic Comment Classification Challenge" [9] has the following characteristics, presented in Table 1.

Table 1 – "Toxic Comment Classification Challenge" data set characteristics

Parameter	Value
Language	English
Size (MB)	~ 52 MB
Number of records	~ 128.000
Number of classification categories	6 (toxic, severe toxic, obscene, threat, insult, identity hate)

The second is "Russian Language Toxic Comments. Small dataset with labeled comments from 2ch.hk and pikabu.ru" [10] has the following characteristics presented in Table 2.

Table 2 – "Russian Language Toxic Comments. Small dataset with labeled comments from 2ch.hk and pikabu.ru" data set characteristics

Parameter	Value
Language	Russian
Size (MB)	4.45 MB
Number of records	~ 11.500
Number of classification categories	1 (toxic)

The following data distribution principle, shown in Fig. 1, was applied to each of the datasets in the experiment.

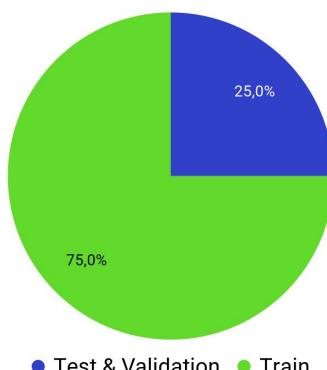


Fig. 1. Distribution of data in datasets

Classifier architecture

In our experiments, we rely on the neural network architecture presented in [11] and in Fig. 2.

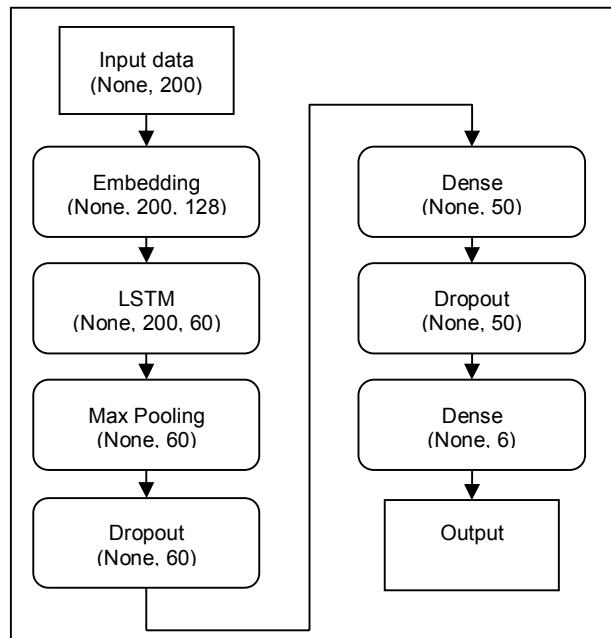


Fig. 2. Classifier architecture

As can be seen from the figure, our classifier contains seven layers. The Embedding layer is responsible for representing words in the coordinate space. LSTM preserves the connection between words in a sentence. Max Pooling helps to reduce the dimensionality of data for further processing. Subsequent block of duplicate Dropout-Dense layer combinations prevents network overfitting and helps with further dimensional reduction and, consequently, helps to speed up classifier training.

Consider the architecture in a more detailed view. The input data in the presented classifier, based on the neural network, is a list of English and Russian sentences (depending on the data set) of different lengths. As for training of a network we cannot use words in their usual state, we carry out over a data set the following manipulations:

1. Tokenization. For example: we transform every object that looks like "Good evening, gentlemen! - Good!" on an array of unique words ["good", "evening", "gentlemen"] without punctuation.

2. Indexing. We form from the received array of all unique words in a data set the dictionary which looks as follows: {1: "good", 2: "evening", 3: "gentlemen", ...}.

3. Representation of indices. For each of the objects in the data set, we form an array in which the words involved in the object are represented as indexes from our dictionary. For example: [1, 2, 3, 1].

The next problem we face is the problem of different sized objects among our data. And the training process of our network requires elements of the same dimension. This is solved by using the padding technique: set the maximum number of words, such as 200, and fill the remaining spaces in each object with

zeros. If the object contains more words than the selected maximum value – each subsequent word after the maximum is being cut off. Although in the data sets we have chosen, the size of most sentences does not exceed the value of 50 words, nevertheless, the dimension with a value of 200 is chosen to capture atypical cases, if any.

The next step is the Embedding layer, which projects words into a specific vector space using the well-known WordToVec algorithm [12]. This allows us to significantly reduce the size of the model. As a result of this layer work we receive the list of coordinates of words in vector space. In this case, we can use the distance between these coordinates to identify relevance and context.

The resulting tensor with coordinates is fed to the LSTM layer. We used recursive LSTM to preserve the coherence of words in the object.

After that, before transferring the original data to the next layer, we need to reformat the 3D tensor to 2D. To achieve this goal, we use the Global Max Pooling layer, which helps reduce the dimension of the tensor as follows: we review each sample of data and take the maximum values. This process helps to create a new set of data already reduced in size, which we will use.

After receiving the 2D tensor, we pass it to the Dropout layer, which randomly eliminates a certain percentage of nodes, the number of which we set, replacing them with a value of zero. This is necessary so that nodes at the next level are forced to process the representation of missing data. In this way we achieve the whole network has a better level of generalization – we avoid the overfitting effect, according to which the network can show good results on a familiar data set and far from the desired results on an unfamiliar set. In our experiments, we set the value of the drop rate as 10%. Of course, this value can be tuned empirically.

After the first Dropout layer, we transfer the data to the Dense layer and the output goes through the RELU activation function. After re-applying the Dropout-Dense layers, the result goes through the sigmoidal activation function, where classification is performed for each of the labels and we get a value between 0 and 1.

It should be noted that the model uses Adam optimizer to work with the loss function (loss). We selected "binary crossentropy", as we have just a binary classification between the values: this object belongs to a set to one of the categories or not.

Of course, the chosen architecture can be customized. However, research on this topic is beyond the scope of this article.

Research results

Initially, the classifier was trained in the "basic mode" – using the pre-processing methods described in the previous section, which are critical to its operation. Next, we conducted an iterative experiment consisting of the following steps:

1. In addition to the "basic mode" methods, we use another method of data processing or a combination of several methods.

2. We train the classifier on the selected data set without changing the parameters described in the previous section.

3. Test and validate the accuracy of the classification.

For the English-based data set [9], the accuracy in the basic mode reached 98.28% of successful classification cases. And the results of the application of additional used pre-processing algorithms and their combinations are shown in Table 3.

Table 3 – Classifier accuracy results after applying text preprocessing methods on a data set [9]

Method	% covering	Accuracy
to_lower (1)	~ 96.1	0.9825
remove_whitespaces (2)	~ 59.2	0.9829
remove_ip (3)	~ 6.3	0.9827
remove_username (4)	~ 0.3	0.9824
methods 1-4 in combination	~ 97.2	0.9821

For the Russian-based data set [10], the accuracy in the basic mode reached 86.12%, and the results of additional pre-processing methods and their combinations application are shown in Table 4.

Table 4 – Classifier accuracy results after applying text preprocessing methods on a data set [10]

Method	% covering	Accuracy
to_lower (1)	~ 91.4	0.8699
remove_whitespaces (2)	~ 93.3	0.8612
remove_ip (3)	~ 0.01	0.8729
remove_username (4)	~ 0.01	0.8638
methods 1-4 in combination	~ 98.9	0.8552

Consider more details about functionality of the methods used:

- 1) to_lower – lowercase all words;
- 2) remove_whitespaces – removal of extra spaces and service characters of carriage transfer;
- 3) remove_ip – delete all elements that fall under the next predicate described by a regular expression:

`\d{1,3}\.\d{1,3}\.\d{1,3}\.\d{1,3},`

with which you can find IP addresses;

- 4) remove_username – delete all elements described by the regular expression:

`\[*\],`

with which you can find nicknames.

The “% coverage” column in Tables 3 and 4 shows the percentage of the data set processed by this method. As you can see, given the content of a particular data set, it is extremely important to check this indicator. After all, in one case, the method affects almost the entire dataset, such as method 1 in table 3, and in another case – the method affects less than one hundredth of a percent of the data in the set, such as methods 3 and 4 in table 4.

According to the results described in tables 3 and 4, we note that often the increase of accuracy is relatively small. And sometimes there is even a deterioration of the result compared to the baseline result, as in the case of using a combination of methods, as described in table 4.

It is also obvious that the impact of the methods used on the English-language data set is much smaller than that for the Russian-language set. Indeed, in the first case, the deviation of the classification accuracy is maximum when using all four methods, and is only 0.07%.

As for the Russian-language set, again the maximum effect was shown by a combination of all methods, with differences of 0.4%, which is 5.7 times more than in English.

A possible explanation for this fact, in our opinion, is the relatively small size of the Cyrillic dataset, which led to less accurate classification, as well as a greater impact of pre-processing.

Another reason may be the presence of only one category of classification (in English there are six such categories). This can also significantly affect the accuracy of the classification.

However, in both cases, the use of this type of pre-processing leads to a slight decrease in the accuracy of the classifier. And although this reduction is quite small, but on huge amounts of data, for the processing of which are mostly used such classifiers, the effect can lead to significant negative consequences.

Conclusions

Data preprocessing is an extremely important step in preparing data for neural network training. At the same time, it is necessary to carefully choose the processing methods, pre-analyzing the data set and estimating what percentage of data from this set is affected by the method.

Based on the results of previous researchers, this paper investigates the impact of some methods of pre-processing of text data and their combination on the accuracy of the destructive messages classifier.

It has been shown that some methods have almost no effect on the accuracy of the work in the described experiment, such as removing extra spaces or IP addresses. However, caution should be exercised with the use of combinations of different preprocessing methods, which may have a small but significant effect on the accuracy of the classification on large data sets.

Similar conclusions were reached by the author of [8], who identified 15 appropriate methods of preprocessing, some of which and their combinations we studied.

Subsequent research should be aimed at finding or self-generating a relatively large Cyrillic data set (at least commensurate with the English), it is better if it is a Ukrainian-based dataset. In the case of self-formation it is necessary to design a crawler capable of collecting text data from certain resources. Further study of this data set and comparison with the results in English will allow us to draw deeper conclusions about the feasibility of different methods of pre-processing of data for automatic detection of toxic messages on the Internet.

It is also necessary to consider the use of additional methods and their combination with the selected ones and to take into account data sets with a significant occurrence of instances that fall under the action of a particular method.

REFERENCES

1. (2020), *Social Network Ranking*, available at: <https://www.statista.com/statistics/272014/global-social-networksranked-by-number-of-users/>.
2. Dadvar, M., Trieschnigg, D., Ordelman, R. and de Jong, F. (2013), “Improving Cyberbullying Detection with User Context”, Serdyukov P. et al. (eds), *Advances in Information Retrieval. ECIR 2013*, Lecture Notes in Computer Science, vol 7814. Springer, Berlin, Heidelberg.
3. Salminen, J., Almerekhi, H., Milenkovic, M., Jung, S., An, J., Kwak, H., & Jansen, B.J. (2017), “Anatomy of Online Hate: Developing a Taxonomy and Machine Learning Models for Identifying and Classifying Hate”, *Online News Media. ICWSM*.
4. Shtovba, S. D., Shtovba, O. V., Yakhymovych, O. V. and Petrychko, M. V. (2019), “Vplyv syntaksichnykh zviazkiv u recheniakh na yakist identyfikatsii toksychnykh komentariiv v sotsialniu merezhi”, *Informatsiini tekhnolohii ta kompiuterna tekhnika*, VNTU, Vinnytsia, No. 4, DOI: <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2019-4-35-42>.
5. Pavlopoulos, J., Sorensen, J., Dixon, L., Thain, N., & Androulopoulos, I. (2020), “Toxicity Detection: Does Context Really Matter?”, *arXiv preprint*, arXiv: 2006.00998.
6. Noever, D. (2018), “Machine learning suites for online toxicity detection”, *arXiv preprint*, arXiv:1810.01869.
7. van Aken, B., Risch, J., Krestel, R., & Löser, A. (2018), “Challenges for toxic comment classification: An in-depth error analysis”, *arXiv preprint*, arXiv:1809.07572.
8. Mohammad, Fahim (2018), “Is preprocessing of text really worth your time for toxic comment classification?”, *Proceedings on the International Conference on Artificial Intelligence (ICAI)*, The Steering Committee of The World Congress in Computer Science, Computer Engineering and Applied Computing (WorldComp), pp. 447-453.
9. (2020), *Toxic Comment Classification Challenge*, available at: <https://www.kaggle.com/c/jigsaw-toxic-comment-classification-challenge/data>.
10. (2020), *Russian Language Toxic Comments. Small dataset with labeled comments from 2ch.hk and pikabu.ru*, available at: <https://www.kaggle.com/blackmoon/russian-language-toxic-comments>.
11. (2020), *Tackling Toxic Using Keras*, available at: <https://www.kaggle.com/sbongo/for-beginners-tackling-toxic-using-keras>.

12. (2020), *An Intuitive Understanding of Word Embeddings: From Count Vectors to Word2Vec*, available at:
<https://www.analyticsvidhya.com/blog/2017/06/word-embeddings-count-word2vec/>.

Received (надійшла) 12.06.2020
Accepted for publication (прийнята до друку) 19.08.2020

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Орловський Олександр Валер'янович – аспірант кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці, Україна;
Oleksandr Orlovskyi – graduate student Department of Software Engineering, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine;
e-mail: orlovskyi.alex@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4782-566X>.

Остапов Сергій Едуардович – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці, Україна;
Sergey Ostapov – Doctor of physical and mathematical sciences, Professor Department of Software Engineering, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine;
e-mail: sergey.ostapov@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4139-4152>.

Аналіз впливу методів попередньої обробки тексту на роботу класифікатора деструктивних повідомлень

О. В. Орловський, С. Е. Остапов

Анотація. **Проблема.** Соціальні мережі все частіше стають середовищем для погроз, образ, ненормативної лексики та інших деструктивних проявів людського спілкування. В онлайнових платформах сьогодні задіяна величезна кількість людей, а об'єм створеного контенту та реакцій на нього постійно б'є рекордні показники. Тому виникає потреба в автоматизації діяльності із детектування та протидії антисоціальним впливам. Одним із важливих напрямків такої діяльності є виявлення токсичних коментарів, що містять погрози, образи, ненормативну лексику, зневагу до оточуючих тощо. Для виконання такої задачі зазвичай будують класифікатор, заснований на нейронних мережах. А для їх навчання використовують зібраний власно або публічно доступний набір даних. В статті досліджується, як різні методи попередньої обробки вхідних даних впливають на кінцеву точність роботи класифікатора. Попередні дослідження в цьому напрямку підтвердили присутність впливу на результат, але не дозволили зробити остаточних висновків про ефективність. **Мета.** Дослідження впливу методів попередньої обробки текстових даних на результат роботи класифікатора деструктивних повідомлень. **Результати.** Продемонстровано, що вплив конкретного методу може досить сильно залежати від контенту в наборі даних. Крім цього, відзначено, що інколи вплив може бути незначним, а в деяких випадках може призводити навіть до погіршення результату. Також обґрунтовано необхідність попередньої перевірки набору даних на відсорток елементів, що підпадають під дію конкретного методу. **Оригінальність.** Проведено оцінку методів попередньої обробки даних на прикладі англомовного та російськомовного наборів даних. **Практична значущість.** Отримані результати дозволяють якісніше приймати рішення про використання тих чи інших методів попередньої обробки для підвищення точності прогнозів класифікатора деструктивних повідомлень.

Ключові слова: препроцесинг даних; виявлення деструктивних текстових даних; нейронні мережі; інтелектуальний аналіз даних; набір даних; обробка даних; класифікатор.

Анализ влияния методов предварительной обработки текста на работу классификатора деструктивных сообщений

О. В. Орловский, С. Э. Остапов

Аннотация. **Проблема.** Социальные сети все чаще становятся средой для угроз, оскорблений, ненормативной лексики и других деструктивных проявлений человеческого общения. В онлайновых платформах сегодня задействовано огромное количество людей, а объем созданного контента и реакций на него постоянно бьет рекордные показатели. Поэтому возникает потребность в автоматизации деятельности по детектированию и противодействию антисоциальным действиям. Одним из важных направлений такой деятельности является выявление токсичных комментариев, содержащих угрозы, оскорблений, ненормативную лексику, пренебрежение к окружающим и тому подобное. Для выполнения такой задачи обычно строят классификатор, основанный на нейронных сетях. А для их обучения используют собранный собственно или публично доступный набор данных. В статье исследуется как различные методы предварительной обработки входных данных влияют на конечную точность работы классификатора. Предыдущие исследования в этом направлении подтвердили присутствие влияния на результат, но не позволили сделать окончательные выводы об эффективности. **Цель.** Исследование влияния методов предварительной обработки текстовых данных на результат работы классификатора деструктивных сообщений. **Результаты.** Продемонстрировано, что влияние конкретного метода может достаточно сильно зависеть от контента в наборе данных. Кроме этого, отмечено, что иногда влияние может быть незначительным, а в некоторых случаях может приводить даже к ухудшению результата. Также обоснована необходимость предварительной проверки набора данных на процент элементов, подпадающих под действие конкретного метода. **Оригинальность.** Проведена оценка методов предварительной обработки данных на примере англоязычного и русскоязычного наборов данных. **Практическая значимость.** Полученные результаты позволяют качественно принимать решения об использовании тех или иных методов предварительной обработки для повышения точности прогнозов классификатора деструктивных сообщений.

Ключевые слова: препроцессинг данных; выявление деструктивных текстовых данных; нейронные сети; интеллектуальный анализ данных; набор данных; обработка данных; классификатор.

Andrii Protsenko, Valerii Ivanov

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

COMPARATIVE ANALYSIS OF RRT-BASED METHODS FOR PATHFINDING IN UNDERGROUND ENVIRONMENT

Abstract. The importance of finding a path for autonomous moving robots is indispensable, because the successful achievement of the target location depends on the solution of this problem. There are a large number of different methods of finding the way, which differ in the accuracy of work, speed, the need for additional equipment. Underground environments, such as mines and tunnels, differ from other structures and open space, and therefore, require different approach when performing pathfinding, as narrow, curved passages and heterogeneous structure could render some of the pathfinding methods ineffective. However, methods based on rapidly exploring random trees (RRT) maintain their effectiveness because they are unaffected by the complexity of the environment. In this article presented a comparison of the three RRT-based methods: RRT, RRT-connect and RRT*.

Keywords: robot; pathfinding; autonomy; RRT.

Introduction

Performing tasks in underground spaces always carries certain risks for the workers and engineers on site. The use of robots for performing remote work helps to reduce, prevent or mitigate these risks. To successfully perform assigned tasks, robot must be able to reach the designated location by solving the pathfinding problem. There are many methods for pathfinding, however, due to complexity and heterogeneity of environment usage of sampling methods carries more advantages over the others. Sampling methods are unique in that planning is done by randomly sampling the configuration space. Sampling methods do not guarantee finding a solution, if any exists, that is, they do not provide completeness. Instead, they provide a lesser idea of completeness - probabilistic completeness. The solution will be given, if any, with sufficient algorithm execution time (infinite runtime in some cases). That's could cause problems in some cases, however it grants independence from the complexity of the surrounding obstacles.

In our previous work [1] we noted how RRT-based search algorithms differ from others in their simplicity and compactness. They could provide solution fast and without the usage of a lot of computing power. Usability of RRT-based solutions for long-term autonomy problems in complex environments is shown in [2]. In [3] authors used RRT* for local path planning during mine exploration. Those examples show the practicality of the RRT-based algorithms. However, those algorithms differ in speed and complexity, and some of them are more situational than the others.

The purpose of the work is to analyze speed and efficiency of the RRT-Based algorithms (RRT, RRT-Connect, RRT*).

Rapidly-Exploring Random Trees

RRT is an efficient data structure and sampling scheme for quick, large-scale space searches. Developed by LaValle [4], this approach had the key of shifting the search toward unexplored areas of space. For the first configuration q_{init} tree with K vertices build in $K-1$ steps, on each of which random configuration q_{rand} is selected. After selection of q_{rand} the algorithm looks for the vertex closest to it q_{near} , and creates an edge between these two

vertices, then the next one is selected q_{rand} . RRT algorithm is shown on Fig. 1.

BUILD_RRT(q_{init})

```

1   T.init( $q_{init}$ );
2   for  $k = 1$  to  $K$  do
3        $q_{rand} \leftarrow$  RANDOM_CONFIG();
4       EXTEND( $T, q_{rand}$ );
5   Return  $T$ 
```

EXTEND(T, q)

```

1    $q_{near} \leftarrow$  NEAREST_NEIGHBOR( $q, T$ );
2   If NEW_CONFIG( $q, q_{near}, q_{new}$ ) then
3       T.add_vertex( $q_{new}$ );
4       T.add_edge( $q_{near}, q_{new}$ );
5   If  $q_{new} = q$  then
6       Return Reached;
7   else
8       Return Advanced;
9   Return Trapped;
```

Fig. 1. The RRT algorithm

The RRT-Connect planner is designed specifically for path planning problems that involve no differential constraints [5]. In this case, the need for incremental motions is less important. It differentiates from basic RRT by usage of two trees instead of one, and swaps between them until they are connected. RRT-Connect uses CONNECT heuristic instead of the EXTEND function from basic RRT. Instead of attempting to extend a RRT by a single step, the CONNECT heuristic iterates the EXTEND step until q or an obstacle is reached. RRT-Connect algorithm is shown on Fig. 2.

The RRT* [6] algorithm differs from the basic RRT only in the way that it handles the EXTEND procedure. However, it connects the new vertex, q_{new} , to the vertex that incurs the minimum accumulated cost up until q_{new} and lies within the set q_{near} of vertices returned by the NEAREST_NEIGHBOR procedure. This way it can return the shortest solution out of possibly achievable with the current number of maximum nodes. RRT-Connect algorithm is shown on Fig. 3.

```

CONNECT( $T, q$ )
1   repeat
2      $S \leftarrow \text{EXTEND}(T, q)$ ;
3   until not ( $S = \text{Advanced}$ )
4   Return  $S$ ;

```

```

RRT_CONNECT_PLANNER( $q_{init}, q_{goal}$ )
1    $T_a.\text{init}(q_{init}); T_b.\text{init}(q_{goal})$ ;
2   for  $k = 1$  to  $K$  do
3      $q_{rand} \leftarrow \text{RANDOM\_CONFIG}()$ ;
4     if not ( $\text{EXTEND}(T_a, q_{rand}) = \text{Trapped}$ ) then
5       If ( $\text{CONNECT}(T_b, q_{new}) = \text{Reached}$ ) then
6         Return PATH( $T_a, T_b$ );
7       SWAP( $T_a, T_b$ )
8   Return Failure

```

```

RRT_STAR_PLANNER( $q_{init}, q_{goal}$ )
1    $T.\text{init}(q_{init}, q_{goal})$ ;
2   for  $k = 1$  to  $K$  do
3      $q_{rand} \leftarrow \text{RANDOM\_CONFIG}()$ ;
4     COST( $q_{rand}$ )  $\leftarrow \text{DIST}(q_{rand}, q_{near})$ 
5      $q_{best}, q_{neighbors} \leftarrow \text{FIND\_NEIGHBORS}(T, q_{rand})$ 
6     for  $q'$  in  $q_{neighbors}$ 
7       if COST( $q_{rand}$ ) + DISTANCE( $q_{rand}, q'$ ) < COST( $q'$ )
8         COST( $q'$ ) = COST( $q_{rand}$ ) + DISTANCE( $q_{rand}, q'$ )
9     EXTEND( $T, q'$ )
10  Return  $T$ 

```

Fig. 2. The RRT-connect algorithm

Fig. 3. The RRT* algorithm

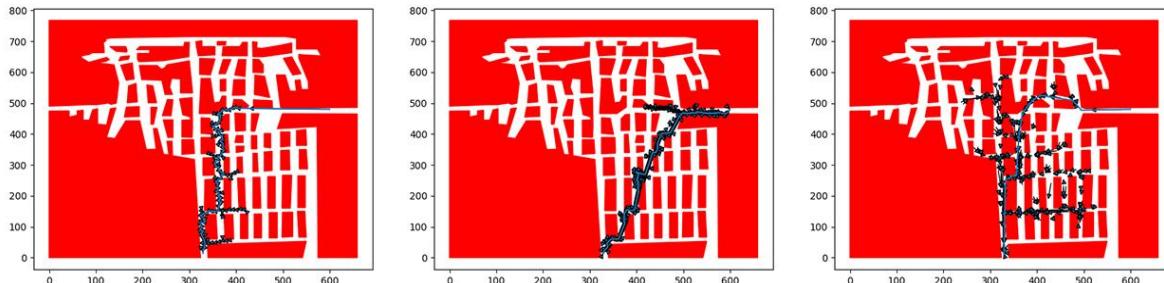
Experiments

For the experiments was used map of the Ivsilikat mine, located in Republic of Tatarstan, Russia. The map is shown on Fig. 4.

**Fig. 4.** Ivsilikat mine map

This map offers a vast, heterogeneous structure with a lot of small openings and long passages, so it is optimal for the purpose testing performance of path-finding algorithms.

Due to random and somewhat unpredictable behaviors of RRT-based algorithms, number of iteration for each part of the experiments was set to 1000. Six experiments were conducted in total, with different amounts of maximum nodes (1024 and 2048) for each algorithm. Behavior of different algorithms is shown on the Fig. 5. As can be observed, their behavior varies differently from each other.

**Fig. 5.** Behavior of RRT-Based algorithms, from left to right: RRT, RRT-Connect, RRT*

Results of simulation (time/shortest path) with maximum number of nodes set to 1024 for the RRT, RRT-Connect, RRT* are shown on Fig. 6, 7 and 8 respectively. For the RRT with 1024 nodes, average time in which path was found is, 2.3 seconds, with average length of the path 776.3. Shortest path, achieved in 2.996 seconds is 694.8, shortest time, for the path 768.9, is 0.973 seconds. Algorithm failed to find the path 253 times (25.3% of total number).

For the RRT-Connect with 1024 nodes, average time in which path was found is, 3.3 seconds, with average length of the path 709.3. Shortest path, achieved in 3.06 seconds is 668, shortest time, for the path 702, is 2.561 seconds. Algorithm failed to find the path 901 times (90.1% of total number).

For the RRT* with 1024 nodes, average time in which path was found is, 29.3 seconds, with average length of the path 693.3. Shortest path, achieved in 59.724 seconds is 616.7, shortest time, for the path 726, is 7.137 seconds. Algorithm failed to find the path 241 times (24.1% of total number).

Results of simulation (time/shortest path) with maximum number of nodes set to 2048 for the RRT, RRT-Connect, RRT* are shown on Fig. 9, 10 and 11 respectively. For the RRT with 2048 nodes, average time in which path was found is, 3.3 seconds, with average length of the path 780.3. Shortest path, achieved in 1.503 seconds is 688.6, shortest time, for the path 778, is 0.878 seconds. Algorithm failed to find the path 120 times (12.0% of total number).

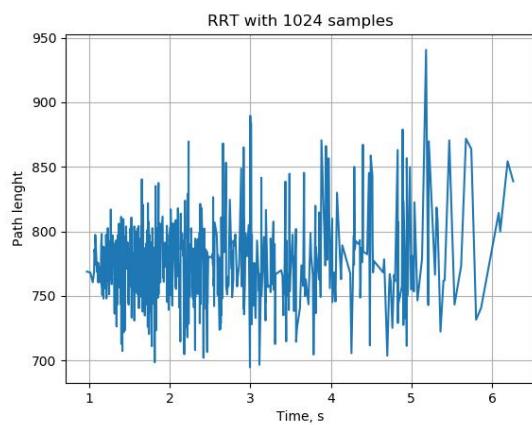


Fig. 6. Results of the simulation for the RRT with 1024 nodes

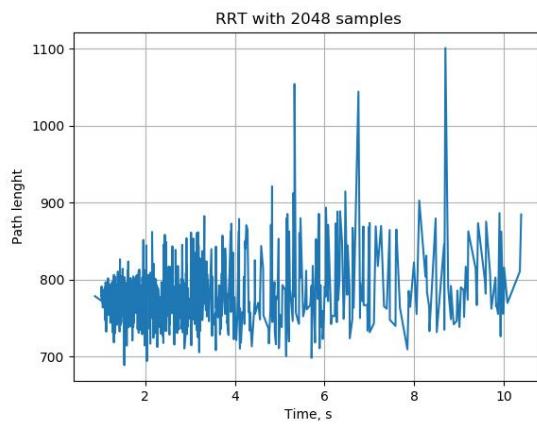


Fig. 9. Results of the simulation for the RRT with 2048 nodes

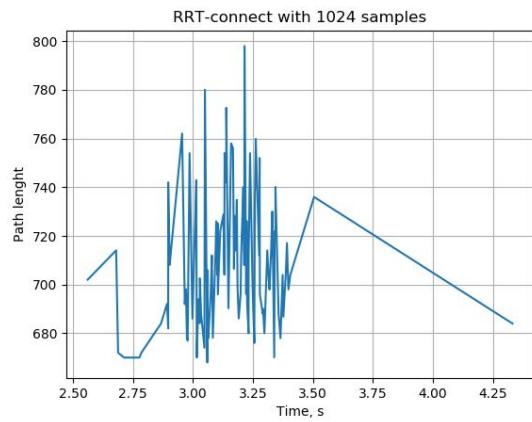


Fig. 7. Results of the simulation for the RRT-Connect with 1024 nodes

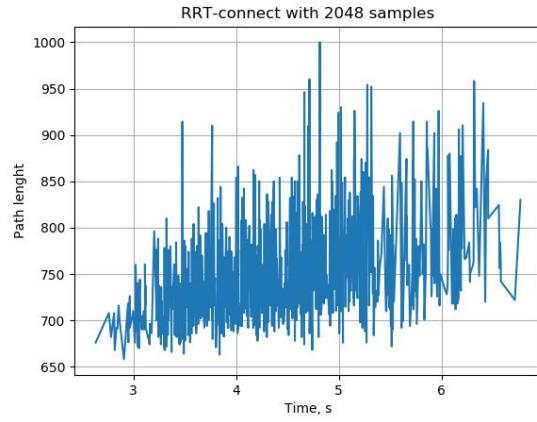


Fig. 10. Results of the simulation for the RRT-Connect with 2048 nodes

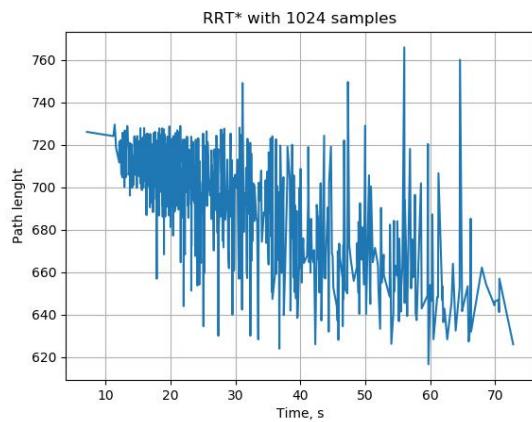


Fig. 8. Results of the simulation for the RRT-Star with 1024 nodes

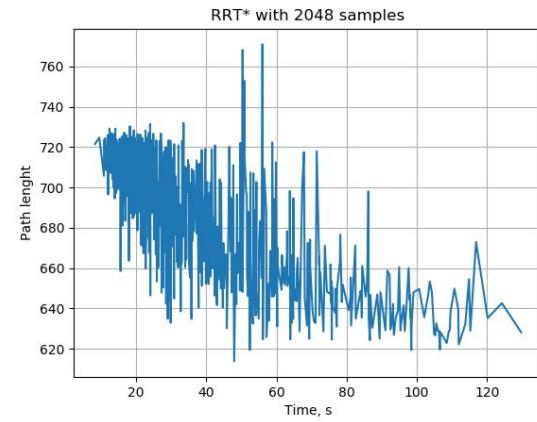


Fig. 11. Results of the simulation for the RRT-Star with 2048 nodes

For the RRT-Connect with 2048 nodes, average time in which path was found is, 4.3 seconds, with average length of the path 749.3. Shortest path, achieved in 2.908 seconds is 658, shortest time, for the path 676, is 2.632 seconds. Algorithm failed to find the path 50 times (5.0% of total number). For the RRT* with 2048 nodes, average time in which path was found is, 37.3 seconds, with average length of the path 687.3. Shortest path, achieved in 47.972 seconds is 613.8, shortest time, for the path 721.5, is 8.321 seconds. Algorithm failed to find the path 132 times (13.2% of total number). Average time and path for the RRT with 2048 nodes increased compared to the one with 1048, in a trade for decrease of failure rate.

Due to basic RRT algorithm being first of it's kind, the average results of RRT 1024 experiment are used as example to compare the results of other experiments. Comparison table for all six experiments is shown on Fig. 12. As seen in the 1024 experiment, RRT-Connect showed better average time and average path than RRT, however it's success rate is tremendously low. As can be seen from the Fig. 12, the it is most dependable on the number of nodes. While other methods decreased failure rate in about a half, failure rate for RRT-Connect with 1024 nodes is 86.1% higher than the RRT-Connect with 2048 nodes. RRT*, on the other hand, has higher success

Conclusions

rate and shorter path than RRT, but takes 12.3 times more seconds to complete. As seen in the 2048 experiment, RRT-Connect has increased time and path compared to 1024 nodes experiment due to increased number of nodes on each tree, however it trades it for the best success rate in this series of experiments. RRT*, on the other hand, has the shortest path out of all the methods, but it's time further increased.

In conclusion, the choice of the pathfinding method should be made based on the computing power and time available for the task. For the getting optimal path, RRT* offer the best solution. For fast and simple pathfinding RRT-Connect seems like a better choice.

Name	Max. Nodes	Average time, s	Average path	Failure rate, %
RRT	1024	2.3	776.3	25.3
RRT-Connect	1024	3.3	709.3	90.1
RRT*	1024	29.3	693.3	24.1
RRT	2048	3.3	780.3	12
RRT-Connect	2048	4.3	749.3	5
RRT*	2048	37.3	687.3	13.2

Fig. 12. Algorithm effectiveness comparison table

REFERENCES

1. Protsenko, A. & Ivanov V. (2019), "Classical methods of path planning for mobile robots", *Control, navigation and communication systems*, Vol. 3 (55), pp. 143-151, DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2019.3.143>.
2. Barfoot, T. D., Stenning, B., Furgale, P., & McManus, C. (2012), "Exploiting Reusable Paths in Mobile Robotics: Benefits and Challenges for Long-term Autonomy", *Ninth Conf. on Comp. and Robot Vision*, DOI: <https://doi.org/10.1109/crv.2012.58>.
3. Dang, T., Khattak, S., Mascalich, F., & Alexis, K. (2019), "Explore Locally, Plan Globally: A Path Planning Framework for Autonomous Robotic Exploration in Subterranean Environments", *19th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*. DOI: <https://doi.org/10.1109/icar46387.2019.8981594>.
4. LaValle, S.M. (1998), "Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning", DOI: <https://doi.org/10.1.1.35.1853>.
5. Kuffner, J.J., & LaValle, S.M. (2000), "RRT-connect: An efficient approach to single-query path planning", *IEEE Int. Conf. on Rob. and Aut. Symp. Proc. (Cat. No. 00CH37065)*, Vol. 2, pp. 995-1001, DOI: <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2000.844730>.
6. Karaman, S. & Frazzoli, E. (2011), "Sampling-based algorithms for optimal motion planning", *The Int. Journal of Robotics Research*, 30(7), pp. 846-894, DOI: <https://doi.org/10.1177/0278364911406761>.

Received (надійшла) 12.06.2020

Accepted for publication (прийнята до друку) 19.08.2020

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Проценко Андрій Андрійович – аспірант кафедри комп’ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Andrii Protsenko – PhD student of Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Mechatronics, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: andrii.protsenko@nure.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8754-7444>.

Іванов Валерій Геннадійович – кандидат технічних наук, професор кафедри системотехніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Valerii Ivanov – PhD (C) of Technical Sciences, Professor of Department of Systems Engineering (SysEng), Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: avaleriy.ivanov@nure.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-6419-3759>.

Порівняльний аналіз методів, що базуються на RRT для пошуку шляху у підземних структурах

А. А. Проценко, В. Г. Іванов

Анотація. Важливість пошуку шляху для автономних рухомих роботів незмінна, адже від вирішення цієї проблеми залежить успішне досягнення цільового розташування. Є велика кількість різних методів пошуку шляху, які відрізняються точністю роботи, швидкістю, необхідністю в додатковому устаткуванні. Підземні середовища, такі як шахти та тунелі, відрізняються від інших споруд та відкритого простору, а отже, вимагають іншого підходу при здійсненні пошуку маршруту, оскільки вузькі вигнуті проходи та гетерогенна структура можуть зробити деякі методи проходження маршруту неефективними. Однак методи, засновані на швидкому досліджені випадкових дерев (RRT), зберігають свою ефективність, оскільки на них не впливає складність навколошнього середовища. У цій статті представлено порівняння трьох методів на основі RRT: RRT, RRT-connect та RRT*.

Ключові слова: робот; пошук маршрутів; автономія; RRT.

Сравнительный анализ методов, основанных на RRT для поиска пути в подземных структурах

А. А. Проценко, В. Г. Иванов

Аннотация. Важность поиска пути для автономных подвижных роботов неизменна, ведь от решения этой проблемы зависит успешное достижение целевого расположения. Есть большое количество различных методов поиска пути, которые отличаются точностью работы, скоростью, необходимостью в дополнительном оборудовании. Подземные среды, такие как шахты и тоннели, отличаются от других сооружений и открытого пространства, а следовательно, требуют иного подхода при осуществлении поиска маршрута, поскольку узкие изогнутые проходы и гетерогенная структура могут сделать некоторые методы прохождения маршрута неэффективными. Однако методы, основанные на быстром исследовании случайных деревьев (RRT), сохраняют свою эффективность, поскольку на них не влияет сложность окружающей среды. В этой статье представлено сравнение трех методов на основе RRT: RRT, RRT-connect и RRT*.

Ключевые слова: робот; поиск маршрутов; автономия; RRT.

Intelligent information systems

UDC 004. 891.3

doi: 10.20998/2522-9052.2020.3.16

Serhii Chalyi, Volodymyr Leshchynskyi

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

TEMPORAL REPRESENTATION OF CAUSALITY IN THE CONSTRUCTION OF EXPLANATIONS IN INTELLIGENT SYSTEMS

Abstract. The **subject** matter of the article are the processes of constructing explanations in intelligent systems. **Objectives.** The goal is to develop a temporal representation of causality in order to provide a description of the process of the intelligent system as part of the explanation, taking into account the temporal aspect. As a result, it provides an opportunity to increase user confidence in the results of the intelligent system. **Tasks:** structuring of causal dependences taking into account the decision-making process in the intellectual system and its state; development of a temporal model of causality for explanations in the intellectual system. **The approaches used** are: approaches to the description of causality between the elements of the system on the basis of causal relationships, on the basis of probabilistic dependencies, as well as on the basis of the physical interaction of its elements. The following **results** were obtained. The structuring of causal dependences for construction of explanations with allocation of causal, probabilistic communications, and also dependences between a condition of intellectual system and the recommendations received in this system is executed. A model of causal dependences in an intelligent system is proposed to construct explanations for the recommendations of this system. **Conclusions.** The scientific novelty of the results is as follows. The model of causal dependences which are intended for construction of the explanation in intellectual system is offered. This explanation consists of a chain of causal relationships that reflect the sequence of decision-making over time. The model covers the limitations and conditions of the formation of the result of the intelligent system. Constraints are represented by causal relationships between key performance actions. Restrictions must be true for all explanations where they are used. Conditions determine the probable relationships between such actions in the intellectual system. The model takes into account the influence of key parameters of the state of the intelligent system on the achievement of the result. The presented model provides an explanation with varying degrees of detail based on the definition of the temporal sequence of actions, as well as taking into account changes in the states of the intelligent system.

Keywords: intellectual system; explanations; explanations formation process; causal dependence; temporal dependence.

Introduction

The effectiveness of intelligent systems usage largely depends on users' trust in the results of their work. Increasing confidence is achieved through the transparent operation of the intelligent system or by explaining the reasons for the results proposed by the intelligent system [1].

In the first case, the "white box" approach is implemented [2]. According to this approach, during the intelligent system's decisions generating, its transparency for the user is taken into account, which involves taking into account the context of decision-making. Context-oriented solutions, according to this approach, should explain themselves. This approach assumes that the solutions of the intelligent system can be interpreted directly as they are formed. For example, a sequence of rules within the logical inference of an expert system can be interpreted as a justification for the decision obtained for the user because it contains a chain of causal relationships.

In the second case, it is assumed that the intelligent system is presented in a black box [3]. That is, the algorithms of its operation are not known to the user. Therefore, each decision of such a system needs a separate explanation. For example, the recommendation system can generate for the user a personal list of goods and services of interest to him using matrix factoring. However, the factorization procedure itself is not clear to the user. Accordingly, to increase the user's confidence in the received recommendation, it is

necessary to provide an explanation that justifies the accepted recommendation in a user-friendly form [4].

Modern intelligent systems solve critical problems, in particular in the transport sector, in the implementation of autonomous vehicle management, in the military sphere in the management of weapons systems, in medicine in the operational diagnosis of patients [5]. The cost of error in the decisions of such systems is too high. For such solutions to be used by the user, he must trust the results obtained.

Complexes of sophisticated algorithms, including neural networks and deep learning, are used in solving these problems. Therefore, modern intelligent systems, as a rule, have the form of a black box for the user [6]. Thus, the latest intelligent systems are characterized by a contradiction between the importance of the tasks of critical nature to be solved and the possibility of a user-friendly description of the decision-making process. This contradiction indicates the importance of the problem of constructing explanations for the results of the intelligent system. This explanation increases user confidence and facilitates the implementation of the solution proposed by the intelligent system.

Explanation in the intelligent system is considered a detail of the results or their reasons, making it possible to make the process of functioning of the intelligent system transparent and understandable to the user [7].

The existing directions of construction of explanations are focused on determining the reasons for the recommendations of the intelligent system by simplifying and ensuring the transparency of the algorithms of its work [7]. Simplifying the decision-

making process in the intelligent system makes it possible to explain the system's results in a user-friendly form, for example, in the form of generalized causal relationships between input data and the results obtained. The form of representation of the explanation can be both textual and visual [8].

However, the existing approaches to the formation of explanations take into account only certain aspects of causality and do not take into account the temporal dynamics of causal relationships. Further generalization and formalization of causal dependencies in the explanation make it possible to describe an intelligent system's operation with varying degrees of detail and build explanations according to the knowledge and needs of a particular user. This indicates the relevance of the subject of this work.

The aim of the article is the development of a temporal representation of causality describes the operation of the intelligent system as part of the explanation, taking into account the temporal aspect.

As a result, it provides an opportunity to increase user confidence in the intelligent system's results. To achieve this goal, the following tasks are solved:

- structuring of causal dependencies taking into account the differences of the decision-making process in the intellectual system and its state;
- development of a temporal model of causality for explanations in the intellectual system.

Structuring causal dependencies

When simplifying the model of the intelligent system's process within the problem of forming an explanation, two groups of approaches are used:

- selection of key dependencies that make it possible to generalize the process of obtaining results in the intelligent system;
- decomposition of the process of obtaining the result [8].

The first group of approaches aims to construct such a representation of the decision-making process in an intelligent system containing:

- the relationship between key variables and the result obtained; this connection determines the influence of key parameters on the obtained solution in a user-friendly form;
- the causal link between key actions of the decision-making process.

Decomposition makes it possible to identify the links between the procedures for processing input data and obtain and present the result. This approach determines the causal links between these procedures. These links are the basis for explaining the decision-making process in the intelligent system, which simplifies perception and increases confidence in this process.

Thus, the first group of approaches implements the black box principle and involves the construction of a separate explanation after obtaining the result in the intelligent system.

The second direction of explanations is related to the transparency of the algorithms used. That is, the principle of the white box is implemented within this direction. Each transparent algorithm specifies the

causal relationships that led to the corresponding solution of the intelligent system. The transparent algorithm itself serves as an explanation. Such results are interpreted directly in the process of obtaining them.

A comparative analysis of the basic approaches to the construction of explanations makes it possible to conclude that descriptions should contain causal relationships that most likely reflect the decision-making sequence in the intelligent system. Such dependencies determine both the sequence of decision-making over time and the direct influence of this process's parameters on the obtained result, taking into account the either explicit or implicit representation of time. Accordingly, the temporal representation of causal dependencies should take into account:

- binary and probabilistic relationships between decision actions;
- the direct influence of the values of the parameters characterizing a condition of the intelligent system, on the received result.

The structuring of the generalized causal relationship that meets the above requirements is presented in table 1.

Table 1 – Elements of generalized causal dependence

Element	The resulting value	Key differences
The direct causal relationship between actions to obtain results in the intellectual system	{true, false}	The dependence in the explanation must be true
Probabilistic relationship between actions to obtain the result	Probabilistic	The inclusion of dependence in the explanation increases the probability of the truth of this explanation
The relationship between the state of the intelligent system and the result	{true, false}	Dependence in the explanation determines the parameters of the intelligent system's state, which have a significant impact on the outcome of its work

This scheme adapts the known approaches to the description of causality: interventionist [9]; probabilistic [10]; transference [11].

Temporal model of causality for explanation in the intellectual system

The integration of the elements listed in Table 1 based on temporal approaches [12-14], involves consideration of causality in three aspects:

- as a causal relationship between successive events;
- as a probabilistic connection between events, states, actions that occurred at different points in time;
- as a reflection of the information connection between the intelligent system's elements, which leads to a change in its states; such a connection is implemented through the information transfer between these elements.

The first component of causality $r_{i,j}^{(1)}$ is as follows:

$$r_{i,j}^{(1)} : f_i \rightarrow f_j | t_j > t_i, \quad (1)$$

where f_i, f_j – the facts between which a causal link is established, t_i, t_j – moments of time of facts occurrence f_i, f_j accordingly. The facts f_i, f_j for causal dependence (1) are binary:

$$f_j = \text{true} \vee \text{false}, \quad (2)$$

The causal relationship for the first component is determined based on the description of causality considered in [11]:

$$\begin{aligned} \forall f_j \exists f_i : f_j = \text{true} &\Leftarrow f_i = \text{true} \\ |\forall f_k \neq f_i f_j = \text{false} &\Leftarrow f_k = \text{true}. \end{aligned} \quad (3)$$

That is, there is a cause-and-effect relationship between facts f_i, f_j only at the occurrence f_i leads to the occurrence f_j . The truth of other facts f_k does not affect the appearance of the fact f_j . An additional condition of causal dependence is that the facts f_i, f_j must be ordered in time. Accordingly, the dependence $r_{i,j}^{(1)}$ is true in the case of the truth of the facts f_i, f_j and the temporal sequence of these facts according to (1):

$$r_{i,j}^{(1)} = \begin{cases} \text{true, iff } (f_j = \text{true} \wedge f_i = \text{true}) \wedge t_j > t_i, \\ \text{false, otherwise.} \end{cases} \quad (4)$$

A key feature of the form (1) dependencies is that they determine the restrictions on possible explanations. That is, causal dependencies $r_{i,j}^{(1)}$ must be satisfied for all possible explanations in the intelligent system.

The second component of causality:

$$r_{i,j}^{(2)} : f_i G f_j | t_j > t_i, \quad (5)$$

where G – is the type of relationship between the facts f_i, f_j . Probabilistic dependence $r_{i,j}^{(2)}$ has two key differences from dependence (1): sets different types of communication of facts, taking into account the temporal aspect; has a probabilistic nature. The type of connection G can determine the time, sequence, and conditions of the truth of the fact f_j after the true fact f_i :

$$G \in \{T, O, U\}, \quad (6)$$

where T – is the set of temporal dependencies using absolute time values; O – sets of temporal dependencies based on a priori given order of facts in time; U – a set of temporal dependencies using conditions to determine the order of facts over time.

In the first case, the absolute value of the time or time interval when the fact f_j becomes true after the fact f_i is set. This connection makes it possible to explain the temporal properties of the processes in the subject area and, for example, taking into account technological limitations on the time of resource use, service interval, etc.

In the second case, time is given by the relative order of occurrence of the facts. For example, a fact f_j may become true immediately after the fact f_i , or

through several intermediate facts. If the fact f_j is true immediately after the fact f_i this connection describes a detailed chain of causal relationships between the intellectual system's actions. If it is necessary to identify only the key dependencies that led to the result, it will not take into account intermediate facts.

Thus, the connection $r_{i,j}^{(2)}$ makes it possible to build a simplified and accessible as an explanation of the description of the recommendations in the intelligent system. It should be noted that $r_{i,j}^{(2)}$ determines the causal relationship only for a subset of the intelligent system's results. Therefore, such a link provides a plausible explanation for the recommendations and conclusions obtained. The agreed weight reflects the probabilistic nature of the connection in this dependence:

$$r_{i,j}^{(2)} = \begin{cases} w_{i,j}^{(2)}, \text{if } (f_j = \text{true} \wedge f_i = \text{true}) \wedge t_j G t_i, \\ 0, \text{otherwise.} \end{cases}, \quad (7)$$

The possibility of matching scales determines the need to use them instead of the value of the probability of using dependence $r_{i,j}^{(2)}$. The agreement is to determine such scales that make it possible to obtain the correct explanations for the intelligent system's known results. The same dependence can belong to several explanations. Therefore, the relative total weight of the rules should correspond to the probability of using each explanation E_n for the intelligent system's known results:

$$\sum_{E_n} w_{i,j}^{(2)} / \sum_E w_{i,j}^{(2)} \rightarrow P(E_n), \quad (8)$$

where $E = \{E_n\}$ – a set of explanations that were used to describe the results in the intelligent system.

According to expression (8), the procedure for determining the weights of the rules is a teaching procedure with a teacher. The training result should be such weights of rules that set the known probability of using each explanation E_n . The third component of the representation of causality $r_j^{(3)}$ determines the conditions under which a fact f_j becomes true. The properties $f_{k,j}$ of this fact are determined, which had a significant impact on the solution obtained in the intelligent system. Each property $f_{k,j}$ becomes true in the case of acquisition k – a parameter of a given value. In this case, for the truth of the causal relationship, the truth of a certain subset of properties is sufficient:

$$r_j^{(3)} = \begin{cases} \text{true, if } \forall f_{k,j} \in K f_{k,j} = \text{true}, \\ \text{false, otherwise,} \end{cases} \quad (9)$$

where K – a set of properties that have a key impact on the occurrence of the fact $f_{k,j}$.

Thus, the dependencies $r_{i,j}^{(1)}$ and $r_{i,j}^{(2)}$ are designed to explain the sequence of actions to obtain results by the intelligent system. The dependence $r_j^{(3)}$ reflects the significant influence of the parameters of the state of the

intelligent system on the obtained result. Causality in the explanation is comprehensively represented by dependences (4), (7), and (9). That is, the explanation can be represented as an ordered sequence of dependences:

$$E_n = \left\langle r_{1,2}^{(m)}, r_{1,j}^{(m)}, \dots, r_{i,|E_n|}^{(m)} \right\rangle, \quad (10)$$

where $m \in \{1, 2, 3\}$ – is the index of causal dependence.

Dependencies $r_{i,j}^{(1)}$ set limits on the sequence of occurrence of facts f_i, f_j over time. According to expression (8), they have the following weight, which provides a unit probability of the corresponding explanation $P(E_n)$:

$$P(E_n) = 1 | \exists r_{i,j}^{(1)} \in E_n. \quad (11)$$

Dependencies $r_j^{(3)}$, in fact, determine the truth of facts f_j based on the values of a subset of variables that characterize these facts. Thus, the combination of relations $r_{i,j}^{(2)}$ and $r_j^{(3)}$ depending on the value of the weights $w_{i,j}^{(2)}$ sets both probabilistic and traditional causal relationships, taking into account the sequence of actions and the state of the intelligent system. The integration condition of these dependencies is to take into account the time or order of occurrence of the facts f_i, f_j .

Temporal representation of causality based on a combination of dependencies $r_{i,j}^{(1)}$ and $r_{i,j}^{(2)}$ has the form:

$$r_{i,j}^{(4)} = \begin{cases} 1, \text{iff } P(E_n) = 1, \\ w_{i,j}^{(2)}, 0 < w_{i,j}^{(2)} < 1 \text{ if } P(E_n) < 1. \end{cases} \quad (12)$$

The generalized temporal representation of causality has the form:

$$r_{i,j} = \begin{cases} r_{i,j}^{(4)}, \text{if } r_j^{(3)} = \text{false}, \\ 1, \text{if } r_j^{(3)} = \text{true}, \\ 0, \text{otherwise}. \end{cases} \quad (13)$$

In the first case, expression (13) takes into account the sequence of actions to achieve the result. In the second case, the state of the intelligent system is taken into account. The binary values of the rules are converted to numerical to calculate the probability of realization of the explanation.

Conclusions

A model of causal dependencies for constructing an explanation in an intelligent system is proposed. The model contains the limitations and conditions for forming the result (the solution of such a system). Constraints are represented by traditional causal relationships between actions to achieve results in the intellectual system. Conditions determine the probable connections between these actions. The model also considers the parameters' influence of the intelligent system state on the achievement of the result.

In the practical aspect, the presented model provides an explanation in the form of a sequence of causal relationships with varying degrees of detail based on the definition of the temporal sequence of actions. In the absence of information about individual actions, the explanation can be formed considering changes in the state of the intelligent system over time.

REFERENCES

- Miller, T. (2019), "Explanation in artificial intelligence: Insights from the social sciences", *Artificial Intelligence*, vol. 267, pp. 1-38, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.artint.2018.07.007>.
- Chalyi, S., Leshchynskyi, V. and Leshchynska, I. (2019), "The concept of designing explanations in the recommender systems based on the white box", *Control, navigation and communication systems*, Vol. 3 (55). pp. 156-160. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2019.3.156>.
- Chalyi, S., Leshchynskyi, V. and Leshchynska, I. (2019), "Designing explanations in the recommender systems based on the principle of a black box", *Advanced information systems*, Vol. 3, No 2, pp. 47-51, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.2.08>.
- Goodman, B. and Flaxman, S. (2017), "European Union regulations on algorithmic decision making and a "Right to explanation", *AI Magazine*, Vol. 38 (3), pp. 50-57.
- Tjøa, E. and Guan, C. (2019), "A survey on explainable artificial intelligence (XAI): Towards medical XAI", *Explainable Artificial Intelligence*, pp. 1-22.
- Castelvecchi, D. (2016), "Can we open the black box of AI?", *Nature*, Vol. 538 (7623), pp. 20-23.
- Arrieta, B., Rodriguez, N. and Del Ser, J. (2020), "Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, Taxonomies, Opportunities and Challenges toward Responsible AI", *Information Fusion*, Vol. 58, pp. 82-115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2019.12.012>.
- Lou, Y., Caruana, R. and Gehrke, J. (2012), "Intelligible models for classification and regression", *Proc. of the 18th ACM SIGKDD int. conf. on Knowledge discovery and data mining*, pp. 150–158. DOI: <https://doi.org/10.1145/2339530.2339556>.
- Halpern, J.Y. and Pearl, J. (2005), "Causes and explanations: A structural-model approach. Part I: Causes", *The British Journal for the Philosophy of Science*, Vol. 56 (4), pp. 843-887.
- Menzies, P. and Price, H. (1993), "Causation as a secondary quality", *The British Journal for the Philosophy of Science*, Vol. 44 (2), pp. 187-203.
- Fair, D. (1979), "Causation and the flow of energy", *Erkenntnis*, Vol. 14, pp. 219–250. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00174894>.
- Chalyi, S., Leshchynskyi, V. and Leshchynska, I. (2019), "Modeling explanations for the recommended list of items based on the temporal dimension of user choice", *Control, navigation and communication systems*, Vol. 6 (58), pp. 97-101. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2019.6.097>.
- Levykin, V. and Chala, O. (2018), "Development of a method for the probabilistic inference of sequences of a business process activities to support the business process management", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 5/3(95), pp. 16-24. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.142664>.

14. Chalyi, S. and Pribylnova, I. (2019), "The method of constructing recommendations online on the temporal dynamics of user interests using multilayer graph", *EUREKA: Physics and Engineering*, 2019, Vol. 3, pp. 13-19.

Надійшла (received) 22.07.2020
Прийнята до друку (accepted for publication) 23.09.2020

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Чалий Сергій Федорович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних управлюючих систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Serhii Chalyi – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Professor of Information Control Systems Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: serhii.chalyi@nure.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-9982-9091>.

Лещинський Володимир Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Volodymyr Leshchynskyi – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Software Engineering Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: volodymyr.leshchynskyi@nure.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8690-5702>.

Темпоральне представлення каузальності при конструуванні пояснень в інтелектуальних системах

С. Ф. Чалый, В. А. Лещинский

Анотація. Предметом вивчення в статті є процеси побудови пояснень в інтелектуальних системах. Метою є розробка темпорального представлення каузальності для того, щоб забезпечити побудову опису процесу роботи інтелектуальної системи у складі пояснення з урахуванням темпорального аспекту. Як наслідок, це дає можливість підвищити довіру користувачів до результатів роботи інтелектуальної системи. Завдання: структуризація каузальних залежностей з урахуванням відмінностей процесу прийняття рішень в інтелектуальній системі та її стану; розробка темпоральної моделі каузальності для пояснень в інтелектуальній системі. Використовуваними підходами є: підходи до опису каузальності між елементами системи на основі причинно-наслідкових зв'язків, на основі імовірнісних залежностей, а також на основі фізичної взаємодії її елементів. Отримані наступні результати. Виконано структуризацію каузальних залежностей для побудови пояснень з виділенням причинно-наслідкових, імовірнісних зв'язків, а також залежностей між станом інтелектуальної системи та отриманими в цій системі рекомендаціями. Запропоновано модель каузальних залежностей в інтелектуальній системі для побудови пояснень щодо пропозицій цієї системи. Висновки. Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному. Запропоновано модель каузальних залежностей, що призначені для побудови пояснення в інтелектуальній системі. Таке пояснення складається з ланцюжка каузальних залежностей, що відображають послідовність прийняття рішення у часі. Модель охоплює обмеження та умови формування результату інтелектуальної системи. Обмеження представлені причинно-наслідковими залежностями між ключовими діями з досягненням результату. Обмеження мають бути істинними для всіх пояснень, де вони використовуються. Умови визначають ймовірні залежності між такими діями в інтелектуальній системі. У моделі враховується вплив ключових параметрів стану інтелектуальної системи на досягнення результату. Представлена модель забезпечує побудову пояснення з різним ступенем деталізації на основі визначення темпоральної послідовності дій, а також з врахуванням зміни станів інтелектуальної системи.

Ключові слова: інтелектуальна система; пояснення; процес формування пояснень; каузальна залежність; темпоральна залежність.

Темпоральное представления каузальности при конструировании объяснений в интеллектуальных системах

С. Ф. Чалый, В. А. Лещинский

Аннотация. Предметом изучения в статье являются процессы построения объяснений в интеллектуальных системах. Целью является разработка темпорального представления каузальности для того, чтобы обеспечить построение описания процесса работы интеллектуальной системы в составе объяснения с учетом темпорального аспекта. Как следствие, это дает возможность повысить доверие пользователей к результатам работы интеллектуальной системы. Задачи: структуризация каузальных зависимостей с учетом особенностей процесса принятия решений в интеллектуальной системе и ее состояния; разработка темпоральной модели каузальности для объяснений в интеллектуальной системе. Используемыми подходами являются: подходы к описанию каузальности между элементами системы на основе причинно-следственных связей, на основе вероятностных зависимостей, а также на основе физического взаимодействия ее элементов. Получены следующие результаты. Выполнена структуризация каузальных зависимостей для построения объяснений с выделением причинно-следственных, вероятностных связей, а также зависимостей между состоянием интеллектуальной системы и полученными в этой системе рекомендациями. Предложена модель каузальных зависимостей в интеллектуальной системе для построения объяснений относительно предложений этой системы. Выводы. Научная новизна полученных результатов заключается в следующем. Предложена модель каузальных зависимостей, предназначенных для построения объяснения в интеллектуальной системе. Такое объяснение состоит из цепочки каузальных зависимостей, отражающих последовательность принятия решения во времени. Модель охватывает ограничения и условия формирования результата интеллектуальной системы. Ограничения представлены причинно-следственными зависимостями между ключевыми действиями по достижению результата. Ограничения должны быть истинными для всех объяснений, где они используются. Условия определяют возможные зависимости между такими действиями в интеллектуальной системе. В модели учитывается влияние ключевых параметров состояния интеллектуальной системы на получение результирующих предложений. Представленная модель обеспечивает построение объяснения с разной степенью детализации на основе определения темпоральной последовательности действий, а также с учетом изменения состояний интеллектуальной системы.

Ключевые слова: интеллектуальная система; объяснения; процесс формирования объяснений; каузальная зависимость; темпоральная зависимость.

Methods of information systems protection

УДК 004.056

doi: 10.20998/2522-9052.2020.3.17

Р. В. Киричок, Г. В. Шуклін, О. В. Барабаш, Г. І. Гайдур

Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна

МОДЕЛОВАННЯ МЕХАНІЗМУ ВАЛІДАЦІЇ ВРАЗЛИВОСТЕЙ ПРИ АКТИВНОМУ АНАЛІЗІ ЗАХИЩЕНОСТІ КОРПОРАТИВНИХ МЕРЕЖ ЗА ДОПОМОГОЮ ПОЛІНОМІВ БЕРНШТЕЙНА

Анотація. Предметом вивчення у статті є модель процесу активного аналізу захищеності інформаційних систем та мереж, зокрема одного з її ключових компонентів, а саме механізму валідації вразливостей. **Метою дослідження** є розробка математичної моделі аналізу кількості успішної та негативної валідації за час раціонального циклу валідації виявленіх вразливостей під час автоматизованого активного аналізу захищеності корпоративної мережі. **Результати:** на основі проведених в роботі спостережень та досліджень функціонування засобів експлуатації виявленіх вразливостей було прийнято рішення щодо опису динаміки процесів валідації саме за допомогою поліномів Бернштейна, які успішно апроксимують аналітичні залежності для кількісних характеристик процесу валідації вразливостей. При цьому, на основі порівняння емпіричних та розрахункових значень даних характеристик встановлено, що відхилення є допустимими. **Висновки:** розроблена математична модель забезпечує отримання аналітичних залежностей для кількості успішно валідованих, невалідованих вразливостей та кількості випадків валідації вразливостей, що привели до критичних помилок за час раціонального циклу валідації виявленіх вразливостей.

Ключові слова: активний аналіз захищеності; валідація вразливостей; корпоративна мережа; поліноми Бернштейна.

Вступ

За останні роки, разом зі зростанням поширеності корпоративних мереж та ефективності їх використання для створення єдиної гнучкої інформаційної системи будь-якої великої організації, питання забезпечення інформаційної безпеки (ІБ) таких мереж набуває надзвичайно великого значення.

При цьому, одним із актуальних напрямків забезпечення ІБ корпоративних мереж є впровадження не лише детектуючих механізмів кіберзахисту, які несуть завідомо запізнілій характер реагування, але й превентивних методів та засобів забезпечення ІБ. Серед числа останніх, найперспективнішими залишаються системи активного аналізу захищеності (САЗ), які дозволяють не лише виявляти вразливості, але й валідувати їх, тобто підтверджувати можливість реалізації конкретних вразливостей за рахунок їх експлуатації, тим самим встановлюючи фактичний стан захищеності інформаційних систем та мереж, а також формувати рекомендації щодо усунення підтвердженіх вразливостей.

Постановка проблеми. Існуючі САЗ базуються на практичному аудиті інформаційної безпеки, включаючи пасивні та активні методи виявлення і підтвердження вразливостей інформаційних систем (зокрема, методи проведення тестування на проникнення). При цьому, провідні дослідження та розробки передбачають використання механізмів штучного інтелекту, таких як, класичні алгоритми машинного навчання, нейронні мережі, марківські процеси прийняття рішень в частково спостережуваному середовищі та інші, для прогнозування, планування та генерування успішного вектора атаки, автоматизації процесу пошуку та експлуатації вразливостей. Однак, слід зазначити, що при розробці подібних методів мало приділяється уваги дослі-

дженню одного з ключових компонентів будь-якої САЗ, а саме механізму валідації вразливостей, зокрема його аналізу та моделюванню.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що існує ряд моделей та алгоритмів, які дозволяють з різним ступенем деталізації описати процес активного аналізу захищеності, зокрема через моделювання мережевих атак. Дані моделі використовують різну математичну базу, однак більшість з них засновані на кінцевих автоматах і представляють процес аналізу захищеності або атаку в якості послідовності станів автомата.

Основним недоліком використання моделей графів атак в аналізі захищеності є можливість їхнього застосування лише для сценаріїв проведення аналізу захищеності в невеликих мережах, через проблему швидкого зростання станів. Для вирішення цієї проблеми, у роботі [1] було трансформовано сценарій проникнення в подання PDDL (Planning Domain Definition Language) та використано класичний алгоритм планування для пошуку шляхів атак. Окрім цього, для врахування невизначеності в сценарії тестування на проникнення комп'ютерної мережі, в [2] проблема планування атак була змодельована в термінах частково спостережуваних марківських процесів прийняття рішень (POMDP).

Однак, оскільки підходи, засновані на POMDP, не дозволяють масштабувати модель до прийнятних розмірів, в роботі [3], автори моделюють тестування на проникнення як частково спостережувану умовну проблему, допускаючи часткову спостережуваність та недетерміновані ефекти дії.

Також, слід відзначити роботу [4], в якій було обговорено розроблення експертної системи на основі POMDP та запропоновано поліпшення її ефективності за рахунок використання методології авто-

матизованого планування та процесу прийняття рішень Маркова.

З точки зору обмеження ресурсів та обчислювальної складності алгоритмів планування атак, яка може виникнути через складність планування графів атак, необхідно відмітити роботи [5-7]. Зокрема в [5] було запропоновано автоматичний алгоритм генерування графа атак при тестуванні на проникнення, який скорочує надлишкову інформацію шляхом оптимізації топології мережі перед створенням самого графа атак.

Таким чином, з короткого літературного огляду можна зазначити, що при моделюванні процесу активного аналізу захищеності, зокрема тестування на проникнення, зовсім не розглядається питання якості процесу такого аналізу.

Метою статті є розробка математичної моделі аналізу кількості успішної та негативної валідації за час раціонального циклу валідації виявленіх вразливостей під час автоматизованого активного аналізу захищеності корпоративної мережі.

Виклад основного матеріалу

Як вже зазначалося раніше, існуючі системи активного аналізу захищеності інформаційних систем та мереж включають два типи засобів: пасивні – засоби виявлення потенційних вразливостей цільових систем (так звані сканери безпеки, серед яких слід виділити NeXpose, Nessus vulnerability scanner, OpenVAS Vulnerability Scanner) та активні – засоби експлуатації виявленіх вразливостей, або як їх ще називають – засоби проведення тестування на проникнення (Metasploit Framework, Core Impact, SAINT Security Suite та ін.).

Загалом, необхідність в перевірці можливості реалізації виявленіх вразливостей, тобто їх валідації, виникає через те, що сканери безпеки дозволяють виявляти лише потенційні вразливості цільових систем, при цьому допускаючи хибність таких спрощувань, яка полягає в неможливості фактичної реалізації виявленої вразливості з боку зловмисника.

І тому в роботі було проведено ряд спостережень функціонування саме засобів експлуатації виявленіх вразливостей на основі яких встановлено, що якість валідації вразливостей хостів цільової корпоративної мережі визначається вектором (q_s, q_f, q_c) трьохвимірного векторного простору, де q_s – абсциса, яка визначає кількість успішно валідованих вразливостей, q_f – ордината, яка визначає кількість невалідованих вразливостей та q_c – апліката, яка визначає кількість випадків валідації вразливостей, що привели до критичних помилок на цільовому хості та подальшої втрати з ним зв'язку.

Кожна з вказаних координат з однієї сторони неперервно змінюється в часі (час раціонального циклу), протягом якого проводиться активний аналіз захищеності окремого цільового хоста та корпоративної мережі в цілому, а з іншої, всі три координати пов'язані між собою деякою функціональною залежністю.

Однак, на відміну від детермінованих динамічних систем, які можна описати системами диференціальних рівнянь, що будуються на основі природи системи, завдання виявлення валідації вразливостей не є однозначним. Тому, варто розв'язувати дане завдання, створюючи аналітичні залежності, які в свою чергу є розв'язками деякої системи диференціальних рівнянь.

Для цього, спершу було проведено дослідження роботи одного з відомих засобів автоматизації процесу активного аналізу захищеності – Armitage [8]. Даний засіб є безкоштовним графічним інструментом управління кібератаками з відкритим кодом, фактично графічною оболонкою для раніше згадуваного засобу експлуатації вразливостей Metasploit framework, яка спрощує та в певній мірі автоматизує роботу з фреймворком.

Дослідження відбувалося за рахунок симуляції процесу валідації вразливостей окремих хостів потенційної цільової корпоративної мережі на спеціально створеному тестовому стенді, результати наведені в табл. 1 (де J – загальна кількість спроб експлуатації виявленіх вразливостей окремого хоста цільової корпоративної мережі; t – загальний час проведення валідації виявленіх вразливостей окремого хоста цільової корпоративної мережі, виражений в секундах).

При цьому, список хостів було сформовано виходячи з статистичних даних щодо розповсюдженості використання конкретних операційних систем в світі [9] та зокрема в Україні [10].

Таблиця 1 – Результати проведення валідації вразливостей за допомогою armitage

Платформа (ОС)	J	q_s	q_f	q_c	t
Windows XP SP2	312	3	306	3	345
Windows XP SP3	98	3	93	2	86
Windows 7	85	2	80	3	65
Windows 8.1	83	1	81	1	58
Windows 10	84	0	83	1	154
Windows Server 2008 R2	96	2	92	2	82
Windows Server 2016	39	0	39	0	71
Mac OS X 10.13	63	1	61	1	115
Mac OS X 10.14	46	1	45	0	83
Metasploitable 2	765	3	762	0	293
Metasploitable 3	780	3	777	0	330

З даних таблиці видно, що час раціонального циклу проведення валідації вразливостей, в даному випадку, складає 345 секунд. Здійснивши нормування відрізка часу $[0;345]$, отримуємо нормований час на відрізку $[0;1]$, який представлено в табл. 2. Тоді значення змінних $q_s(t_h)$, $q_f(t_h)$, $q_c(t_h)$, як функції від часу нормування, представлені в табл. 3.

Таблиця 2 – Нормування часу раціонального циклу

t – реальний час	0	58	65	71	82	83	86	115	154	293	330	345	0
t_h – нормований час	0	0,168	0,188	0,206	0,238	0,241	0,249	0,333	0,446	0,849	0,957	1	0

Таблиця 3 – Значення кількості успішно валідованих $q_s(t_h)$, невалідованих вразливостей та випадків валідації $q_f(t_h)$, що призвели до критичних помилок $q_c(t_h)$

t_h – нормований час	0	0,168	0,188	0,206	0,238	0,241	0,249	0,333	0,446	0,849	0,957	1	0
$q_s(t_h)$	0	1	2	0	2	1	3	1	0	3	3	3	0
$q_f(t_h)$	0	81	80	39	92	45	93	61	83	762	777	306	0
$q_c(t_h)$	0	1	3	0	2	0	2	1	1	0	0	3	0

Використовуючи теорему Бернштейна [11], сутність якої полягає в тому, що довільну неперервну функцію $f(t)$, яка визначена і неперервно-диференційована на відрізку $[0;1]$, можна представити у вигляді поліному

$$f(t_h) = \sum_{k=0}^n f\left(\frac{k}{n}\right) b_{k,n}(t_h), \quad (1)$$

де $b_{k,n}(t_h) = C_n^k t_h^k (1-t_h)^{n-k}$.

Використовуючи дані з табл. 3 і представлення (1) були отримані початкові аналітичні залежності для кількості успішно валідованих вразливостей $q_s = q_s(t_h)$

$$\begin{aligned} q_s(t_h) = & q_s(0)b_{0,11}(t_h) + q_s(0,168)b_{1,11}(t_h) + \\ & + q_s(0,188)b_{2,11}(t_h) + q_s(0,206)b_{3,11}(t_h) + \\ & + q_s(0,238)b_{4,11}(t_h) + q_s(0,241)b_{5,11}(t_h) + \\ & + q_s(0,249)b_{6,11}(t_h) + q_s(0,333)b_{7,11}(t_h) + \\ & + q_s(0,446)b_{8,11}(t_h) + q_s(0,849)b_{9,11}(t_h) + \\ & + q_s(0,957)b_{10,11}(t_h) + q_s(1)b_{11,11}(t_h). \end{aligned}$$

Після підстановки відповідних значень з табл. 3:

$$\begin{aligned} q_s(t_h) = & b_{1,11}(t_h) + 2b_{2,11}(t_h) + 2b_{4,11}(t_h) + \\ & + b_{5,11}(t_h) + 3b_{6,11}(t_h) + b_{7,11}(t_h) + \\ & + 3b_{9,11}(t_h) + 3b_{10,11}(t_h) + 3b_{11,11}(t_h). \end{aligned} \quad (2)$$

В табл. 4 представлени значення $b_{k,11}(t_h)$ для $k = \overline{0...11}$. В табл. 5 представлени порівняльні значення результатів обчислення і даних з табл. 3 ((t_h – нормований час, $q_s^e(t_h)$, $q_s^p(t_h)$ – емпіричні та розрахункові значення відповідно; $\theta = |q_s^e(t_h) - q_s^p(t_h)|$ – відхилення). Як видно з табл. 5, відхилення між емпіричними даними і розрахунковими допустимі, а при збільшенні кількості значень, ці відхилення стають все менші і менші.

Таблиця 4 – Значення поліномів $b_{k,11}(t_h)$

k	$b_{k,11}(t_h)$	k	$b_{k,11}(t_h)$	k	$b_{k,11}(t_h)$	k	$b_{k,11}(t_h)$	k	$b_{k,11}(t_h)$	k	$b_{k,11}(t_h)$
0	$(1-t)^{11}$	3	$165t^3(1-t)^8$	4	$330t^4(1-t)^7$	6	$462t^6(1-t)^5$	8	$165t^8(1-t)^3$	10	$11t^{10}(1-t)$
1	$11t(1-t)^{10}$	2	$55t^2(1-t)^9$	5	$462t^5(1-t)^6$	7	$330t^7(1-t)^4$	9	$55t^9(1-t)^2$	11	t^{11}

Однак, для подальших досліджень, пов'язаних з хибними спробами валідації вразливостей та з випадками валідації, які призвели до критичних помилок, ця різниця не суттєва.

Графік залежності (2) представлено на рис. 1. З графіка видно, що функція $q_s = q_s(t_h)$ успішної валідації вразливостей задовольняє умові Ліпшица [11], тобто, для довільних $t_h^{(1)}, t_h^{(2)} \in [0;1]$ існує $K > 0$, що виконується нерівність

$$|q_s(t_h^{(1)}) - q_s(t_h^{(2)})| \leq K |t_h^{(1)} - t_h^{(2)}|. \quad (3)$$

З умови (3) випливає, що існує прямокутна область, за межі якої графік функції $q_s = q_s(t_h)$ не виходить. Це дає можливість в подальшому будувати закони розподілу ймовірностей кількості успішно валідованих вразливостей, що приведе до методики розрахунку ризиків втрат від невалідованих вразливостей, які призводять до критичних помилок. Крім того, як було показано в [11], при виконанні умови (3), справедлива оцінка

$$|B_n(q_s, t_h) - q_s(t_h)| \leq K \sqrt{t_h(1-t_h)/n}. \quad (4)$$

З графіка видно, що функція $q_s = q_s(t_h)$ успішної валідації вразливостей задовольняє умові Ліпшица [11], тобто, для довільних $t_h^{(1)}, t_h^{(2)} \in [0;1]$ існує $K > 0$, що виконується нерівність

$$|q_s(t_h^{(1)}) - q_s(t_h^{(2)})| \leq K |t_h^{(1)} - t_h^{(2)}|. \quad (3)$$

З умови (3) випливає, що існує прямокутна область, за межі якої графік функції $q_s = q_s(t_h)$ не виходить.

Це дає можливість в подальшому будувати закони розподілу ймовірностей кількості успішно валідованих вразливостей, що приведе до методики розрахунку ризиків втрат від невалідованих вразливостей, які призводять до критичних помилок.

Таблиця 5 – Порівняльні значення для $q_s(t_h)$

t_h	$q_s^e(t_h)$	$q_s^p(t_h)$	θ	t_h	$q_s^e(t_h)$	$q_s^p(t_h)$	θ
0	0	0	0	0,249	3	1,181262	1,818738
0,168	1	1,065446	0,065446	0,333	1	1,309026	0,309026
0,188	2	1,100162	0,899838	0,446	0	1,494756	1,494756
0,206	0	1,126111	1,126111	0,849	3	2,425641	0,574359
0,238	2	1,167208	0,832792	0,957	3	2,970647	0,029353
0,241	1	1,171013	0,171013	1	3	3	0

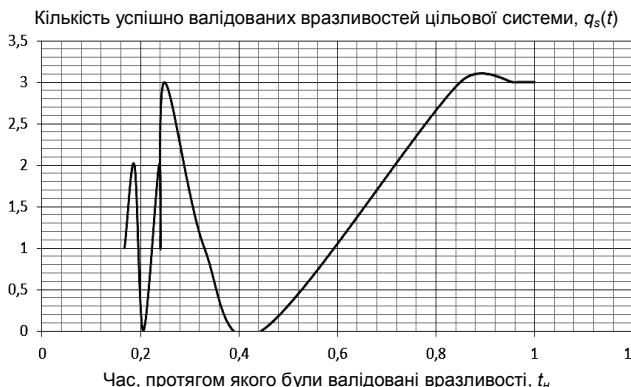


Рис. 1. Залежність кількості успішно валідованих вразливостей цільової системи від часу раціонального циклу

Крім того, як було показано в [11], при виконанні умови (3), справедлива оцінка

$$|B_n(q_s, t_h) - q_s(t_h)| \leq K \sqrt{t_h(1-t_h)/n}. \quad (4)$$

З нерівності (4) випливає, що існує таке додатне число K , при якому

$$\theta = |q_s^e(t_h) - q_s^p(t_h)| = K \sqrt{t_h(1-t_h)/n}. \quad (5)$$

Залежність (5) дає можливість задавати відповідну точність для визначення степені n полінома Бернштейна. Використовуючи дані з табл. 5 та залежність (5) було отримано максимальне значення K для $q_s = q_s(t_h)$: $\max(K_i) = 13,949121$, де $i \in [1;11]$.

Аналогічно, використовуючи представлення (1) та дані з табл. 3, отримуємо початкові аналітичні залежності для кількості невалідованих вразливостей $q_f = q_f(t_h)$ (залежність (6), рис. 2) і кількості випадків валідації вразливостей, що привели до критичних помилок $q_c = q_c(t_h)$ (залежність (7), рис. 3).

$$\begin{aligned} q_f(t_h) = & 81b_{1.11}(t_h) + 80b_{2.11}(t_h) + 39b_{3.11}(t_h) + \\ & + 92b_{4.11}(t_h) + 45b_{5.11}(t_h) + 93b_{6.11}(t_h) + \\ & + 61b_{7.11}(t_h) + 83b_{8.11}(t_h) + 762b_{9.11}(t_h) + \\ & + 777b_{10.11}(t_h) + 306b_{11.11}(t_h). \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} q_c(t_h) = & b_{1.11}(t_h) + 3b_{2.11}(t_h) + 2b_{4.11}(t_h) + \\ & + 2b_{6.11}(t_h) + b_{7.11}(t_h) + b_{8.11}(t_h) + 3b_{11.11}(t_h). \end{aligned} \quad (7)$$

В табл. 6 ($q_f^e(t_h)$, $q_f^p(t_h)$ – емпіричні та розрахункові значення відповідно; $\theta = |q_f^e(t_h) - q_f^p(t_h)|$ –

відхилення) та табл. 7 ($\theta = |q_c^e(t_h) - q_c^p(t_h)|$ – відхилення; $q_c^e(t_h)$, $q_c^p(t_h)$ – емпіричні та розрахункові значення відповідно) представлена відповідні порівняльні значення результатів обчислення і даних з табл. 3. Також, слід відзначити, з рис. 2 та 3 видно, що функції $q_f = q_f(t_h)$ і $q_c = q_c(t_h)$ також задовільняють умові Ліпшица.

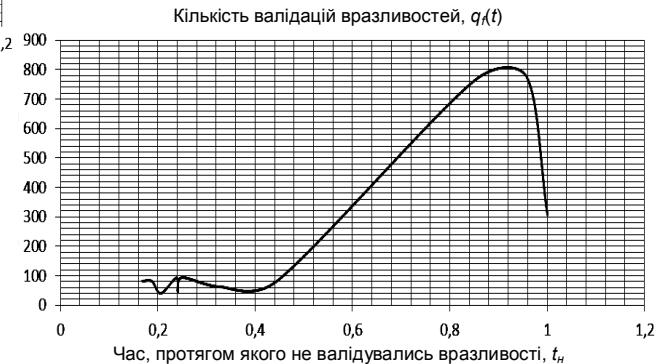


Рис. 2. Залежність кількості невалідованих вразливостей цільової системи від часу раціонального циклу

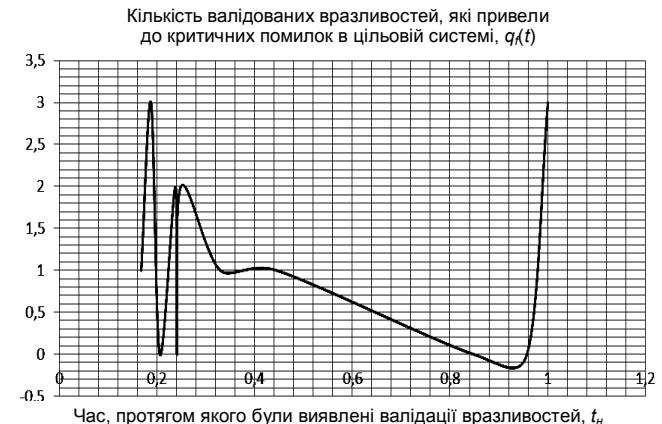


Рис. 3. Залежність кількості валідацій вразливостей, які привели до критичних помилок в цільовій системі від часу раціонального циклу

Окрім цього, використовуючи дані з табл. 6 і 7 та залежність (5), отримуємо максимальні значення K ($i \in [1;11]$):

$$\text{для } q_f = q_f(t_h) : \max(K_i) = 4880,359905 ;$$

$$\text{для } q_c = q_c(t_h) : \max(K_i) = 30,411511 .$$

Таблиця 6 – Порівняльні значення для $q_f(t_h)$

t_h	$q^e_f(t_h)$	$q^p_f(t_h)$	$\Theta = |q^e_f(t_h) - q^p_f(t_h)|$	t_h	$q^e_f(t_h)$	$q^p_f(t_h)$	$\Theta = |q^e_f(t_h) - q^p_f(t_h)|$
0	0	0	0	0,249	93	65,743882	27,256118
0,168	81	62,547827	18,45217	0,333	61	67,844585	6,844585
0,188	80	63,809242	16,19076	0,446	83	78,745219	4,254781
0,206	39	64,596778	25,596778	0,849	762	538,115125	223,884875
0,238	92	65,508850	26,49115	0,957	777	478,499059	298,500941
0,241	45	65,575300	20,5753	1	306	306	0

Таблиця 7 – Порівняльні значення для $q_c(t_n)$

t_n	$q^e_c(t_n)$	$q^p_c(t_n)$	$\Theta = |q^e_c(t_n) - q^p_c(t_n)|$	t_n	$q^e_c(t_n)$	$q^p_c(t_n)$	$\Theta = |q^e_c(t_n) - q^p_c(t_n)|$
0	0	0	0	0,249	2	1,335418	0,664582
0,168	1	1,337389	0,337389	0,333	1	1,221982	0,221982
0,188	3	1,360285	1,639715	0,446	1	1,125939	0,125939
0,206	0	1,364959	1,364959	0,849	0	0,731249	0,731249
0,238	2	1,346917	0,653083	0,957	0	1,860081	1,860081
0,241	0	1,343984	1,343984	1	3	3	0

Висновки

Таким чином, в роботі було розроблено математичну модель аналізу кількості успішної та негативної валідацій за час раціонального циклу валідації виявленіх вразливостей під час автоматизованого активного аналізу захищеності корпоративної мережі. Слід відзначити, що через неможливість використан-

ня диференційних рівнянь було використано поліноми Бернштейна, які успішно апроксимують аналітичні залежності для кількості успішно валідованих вразливостей, невалідованих вразливостей та кількості випадків валідації вразливостей, що призвели до критичних помилок. При цьому виникає певне відхилення через те, що в ході дослідження було взято невелику кількість доданків, однак це є допустимим.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Obes J., Richarte G., Sarraute C. Attack planning in the real world. arXiv 2013, arXiv:1306.4044. URL: <https://arxiv.org/abs/1306.4044>
2. Sarraute C.; Buffet O.; Hoffmann J. Penetration testing = POMDP solving? arXiv 2013, arXiv:1306.4714. URL: <https://arxiv.org/abs/1306.4714>
3. Shmaryahu D. Partially observable contingent planning for penetration testing / D. Shmaryahu, G. Shani, J. Hoffmann // 2017 1st Int Workshop on Artificial Intelligence in Security. – 2017. – P.33-40. URL: https://cyber.bgu.ac.il/wp-content/uploads/2017/10/IWAISe-17_paper_8-ds.pdf
4. Stefinko Ya.Ya., Piskozub, A.Z. Theory of modern penetration testing expert system. *Information Processing Systems*. 2017. Vol. 2(148). P. 129-133. DOI: <https://doi.org/10.30748/soi.2017.148.25>.
5. Qiu X., Wang S., Jia Q., Xia C., Lv L. Automatic generation algorithm of penetration graph in penetration testing. *Proc.of the 2014 Ninth International Conference on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing*. IEEE. 2014. P. 531-537.
6. Steinmetz M. Critical constrained planning and an application to network penetration testing. *26th Int Conf on Automated Planning and Scheduling*. 2016. P. 141-144.
7. Hoffman J. Simulated Penetration Testing: From “Dijkstra” to “Turing Test++”. *ICAPS 2015 Proceedings*. Published by The AAAI Press. Palo Alto, CA. 2015.
8. Armitage. URL: <https://www.offensive-security.com/metasploit-unleashed/armitage/>
9. Browser Market Share. URL: <https://netmarketshare.com/>
10. Operating System Market Share Ukraine. URL: <https://gs.statcounter.com/os-market-share/all/ukraine>
11. Малоземов В. Н. О многочленах Бернштейна. Семинар «CNSA & NDO». Избранные доклады. 17.09.2019. 8с.

REFERENCES

1. Obes, J., Richarte, G. and Sarraute, C. (2013), “Attack planning in the real world”, arXiv, arXiv:1306.4044, available at: <https://arxiv.org/abs/1306.4044>
2. Sarraute, C., Buffet, O. and Hoffmann, J. (2013), “Penetration testing = POMDP solving?”, arXiv, arXiv:1306.4714, available at: <https://arxiv.org/abs/1306.4714>
3. Shmaryahu, D. Shani, G. and Hoffmann J. (2017), “Partially observable contingent planning for penetration testing”, 2017 1st Int Workshop on Artificial Intelligence in Security, pp. 33-40, available at: https://cyber.bgu.ac.il/wp-content/uploads/2017/10/IWAISe-17_paper_8-ds.pdf
4. Stefinko, Ya.Ya. and Piskozub, A.Z. (2017), “Theory of modern penetration testing expert system”, *Information Processing Systems*, Vol. 2(148), pp. 129-133, DOI: <https://doi.org/10.30748/soi.2017.148.25>.
5. Qiu, X., Wang, S., Jia, Q., Xia, C., and Lv, L. (2014), “Automatic generation algorithm of penetration graph in penetration testing”, Proc.of the 2014 Ninth Int. Conf. on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing, IEEE, P. 531-537.
6. Steinmetz, M. (2016), “Critical constrained planning and an application to network penetration testing”, 26th Int Conf on Automated Planning and Scheduling, pp. 141-144.

7. Hoffman, J. (2015), "Simulated Penetration Testing: From "Dijkstra" to "Turing Test++", *ICAPS 2015 Proceedings. Published by The AAAI Press, Palo Alto, CA.*
8. (2020), Armitage, available at: <https://www.offensive-security.com/metasploit-unleashed/armitage/>
9. (2020), Browser Market Share, available at: <https://netmarketshare.com/>
10. (2020), Operating System Market Share Ukraine, available at: <https://gs.statcounter.com/os-market-share/all/ukraine>
11. Maloziyomov, V.N. (2019), *On Bernstein Polynomials*, Seminar "CNSA & NDO". Selected papers, 8 p.

Надійшла (received) 14.07.2020
Прийнята до друку (accepted for publication) 09.09.2020

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Киричок Роман Васильович – аспірант, асистент кафедри інформаційної та кібернетичної безпеки, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна;

Roman Kyrychok – postgraduate student, assistant of information and cybersecurity department, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine;
e-mail: kyrychokr@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-9919-9691>.

Шуклін Герман Вікторович – кандидат технічних наук, завідувач кафедри систем інформаційного та кібернетичного захисту, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна;

Herman Shuklin – Candidate of Technical Sciences, Head of Information and cyber defense systems Department, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine;
e-mail: mathacadem-kiev@ukr.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-2507-384X>.

Барабаш Олег Володимирович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри вищої математики, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна;

Oleg Barabash – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Mathematics Department, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine;
e-mail: bar64@ukr.net; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-1715-0761>.

Гайдур Галина Іванівна – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційної та кібернетичної безпеки, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна;

Galyna Gaidur – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of information and cybersecurity, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine;
e-mail: gaydurg@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0591-3290>.

Modeling the vulnerabilities validation mechanism in the active analysis of the security of corporate networks using Bernstein polynomials

Roman Kyrychok, Herman Shuklin, Oleg Barabash, Galyna Gaidur

Abstract. The subject of the article is the models of the process of active analysis of the security of information systems and networks, in particular, one of its key components, namely the vulnerability validation mechanism. The purpose of the article is to develop a mathematical model for analysing the number of successful and negative validations over a rational cycle of validation of identified vulnerabilities during an automated active analysis of the security of the corporate network. **Results:** Based on the observations and studies of the exploitation tools of the identified vulnerabilities, it was decided to describe the dynamic of the validation processes using Bernstein polynomials, which successfully approximate the analytical dependencies for the quantitative characteristics of the vulnerability validation process. Also based on a comparison of the empirical and calculated values of these characteristics, it was established that deviations are permissible. **Conclusions:** The developed mathematical model provides with analytical dependencies for the number of successfully validated, invalidated vulnerabilities and the number of vulnerability validation cases that led to critical errors over the rational cycle of validation of identified vulnerabilities.

Keywords: active analysis of the security; vulnerability validation; corporate network; Bernstein polynomial.

Моделирование механизма валидации уязвимостей при активном анализе защищенности корпоративных сетей с помощью полиномов Бернштейна

Р. В. Киричок, Г. В. Шуклин, О. В. Барабаш, Г. И. Гайдур

Аннотация. Предметом изучения статьи есть модели процесса активного анализа защищенности информационных систем и сетей, в частности одного из его ключевых компонентов, а именно механизма валидации уязвимостей. Целью исследования является разработка математической модели анализа количества успешной и негативной валидаций за время рационального цикла валидации выявленных уязвимостей во время автоматизированного активного анализа защищенности корпоративной сети. **Результаты:** на основе проведенных в работе наблюдений и исследований функционирования средств эксплуатации выявленных уязвимостей было принято решение об описания динамики процессов валидации именно с помощью полиномов Бернштейна, которые успешно аппроксимируют аналитические зависимости для количественных характеристик процесса валидации уязвимостей. При этом, на основе сравнения эмпирических и расчетных значений данных характеристик установлено, что отклонения допустимы. **Выводы:** разработана математическая модель обеспечивает получение аналитических зависимостей для количества успешно валидированных, невалидованных уязвимостей и количества случаев валидации уязвимостей, которые привели к критическим ошибкам за время рационального цикла валидации выявленных уязвимостей.

Ключевые слова: активный анализ защищенности; валидация уязвимостей; корпоративная сеть; полиномы Бернштейна.

Mykhailo Mozhaiev¹, Viacheslav Davydov², Zhang Liqiang³

¹ Prof. M.S. Bokarius Kharkiv Research Institute of Forensic Examinations, Kharkiv, Ukraine

² National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

³ Neijiang Normal University, Neijiang, China

ANALYSIS AND COMPARATIVE RESEARCHES OF METHODS FOR IMPROVING THE SOFTWARE

Abstract. The results analysis of main methods for identifying software vulnerabilities presents in the article. The results of authors' research, synthesizing and regulating knowledge about systems for detecting software vulnerabilities, are presented. The software analysis methods used during certification tests are considered. It is shown that the methods and techniques existing for software security analysis use do not ensure the result accuracy under fuzzy input data conditions. This drawback is aggravated by strict requirements for the test scenarios implementation speed. This is largely due to the fact that experts, in order to a decision make, have to conflicting information large amounts analyzed. Consequently, it is necessary to develop a system for identifying vulnerabilities, the main task of which will be to the conflicting information amount minimize used by an expert when making a decision. The most promising direction the existing identifying vulnerabilities systems efficiency increasing is seen in reducing the burden on an expert by methods for identifying vulnerabilities and implementing a decision support system improving. This will significantly reduce the time spent on a decision making on software security, and, as a result, will the software security testing procedure accessible to a developer's wide range make more.

Keywords: computer systems; Software; security risks; security threats.

The requirements and security risks analysis of computer systems software

The modern information space is a complex, heterogeneous structure that performs society various functions and needs. At the same time, a significant part of the automation and intellectualization functions is assumed by computer systems (CS). Malicious impacts on the CS during their operation are carried out with purposes various malicious of security services violation (deterioration). The tasks solution related to the prevention of unauthorized influences on the CS and the information that is processed and stored in them is carried out as part of comprehensive programs to improve security. At the same time, the safety CS improving problem is high relevance.

A generalized CS security model can be represented as Fig. 1, which is based on the following objects: security improving methods and means – security software increasing models, methods and means; user's interaction computerized system – hardware and software, computing, information, linguistic, communication and other resources for

interacting with users, as well as the users themselves; software – is one of the most important and vulnerable computer systems components; security increasing mechanisms and means – information protecting mechanisms and means; security threats – a potential event, action, process or phenomenon that could damage the user's interaction computerized system; security risks – the potential possibility exploiting vulnerabilities CS of a specific threat to cause damage.

An existing computer systems integral component is software. And, in many respects, the operation CS quality depends on the operating software quality. As noted in the explanations, one of the most vulnerable, from the view of security point, components the CS is software. Moreover, the task of increasing (ensuring) software security the complexity is compounded by the need to take into account security risk factors throughout the entire software development life cycle.

An international standards number of analysis and regulatory documents [10, 11, 12, 14] has shown a significant increase in software quality requirements recently. This only confirms the fact the expert community increase attention to the software operation issues and tasks. The conducted studies allowed classifying software requirements and presenting them in the diagram form Fig. 2. This scheme clearly illustrates the fact that now, in addition to the ensuring tasks completeness and use ease, accessibility, reliability and other characteristics, the requirements for software security are becoming increasingly important among operators. As the developing and operating secure software importance evidence, we can

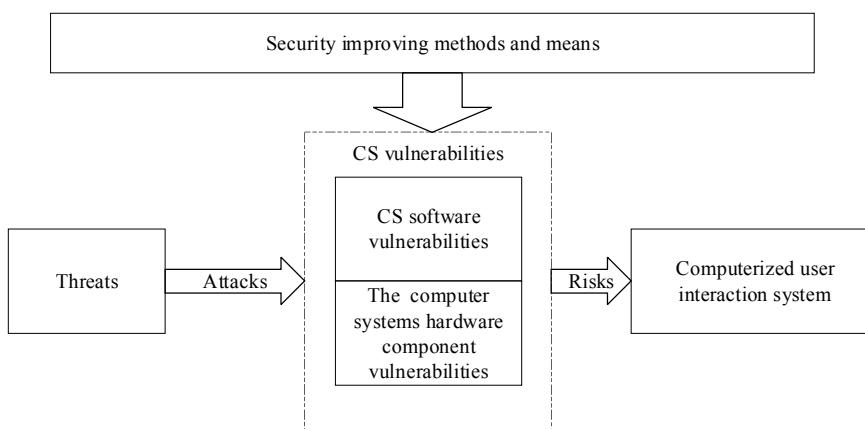


Fig. 1. Generalized computer system security model

note the annual growth its vulnerabilities identified. So, in Fig. 3, statistics are presented for only one software type – Web applications with risk varying degrees vulnerabilities, noted by IBM over the past two years.

Open sources information research [1, 8, 16] made it possible to present the most common vulnerabilities types. The software security threats classification is presented in Fig. 4.

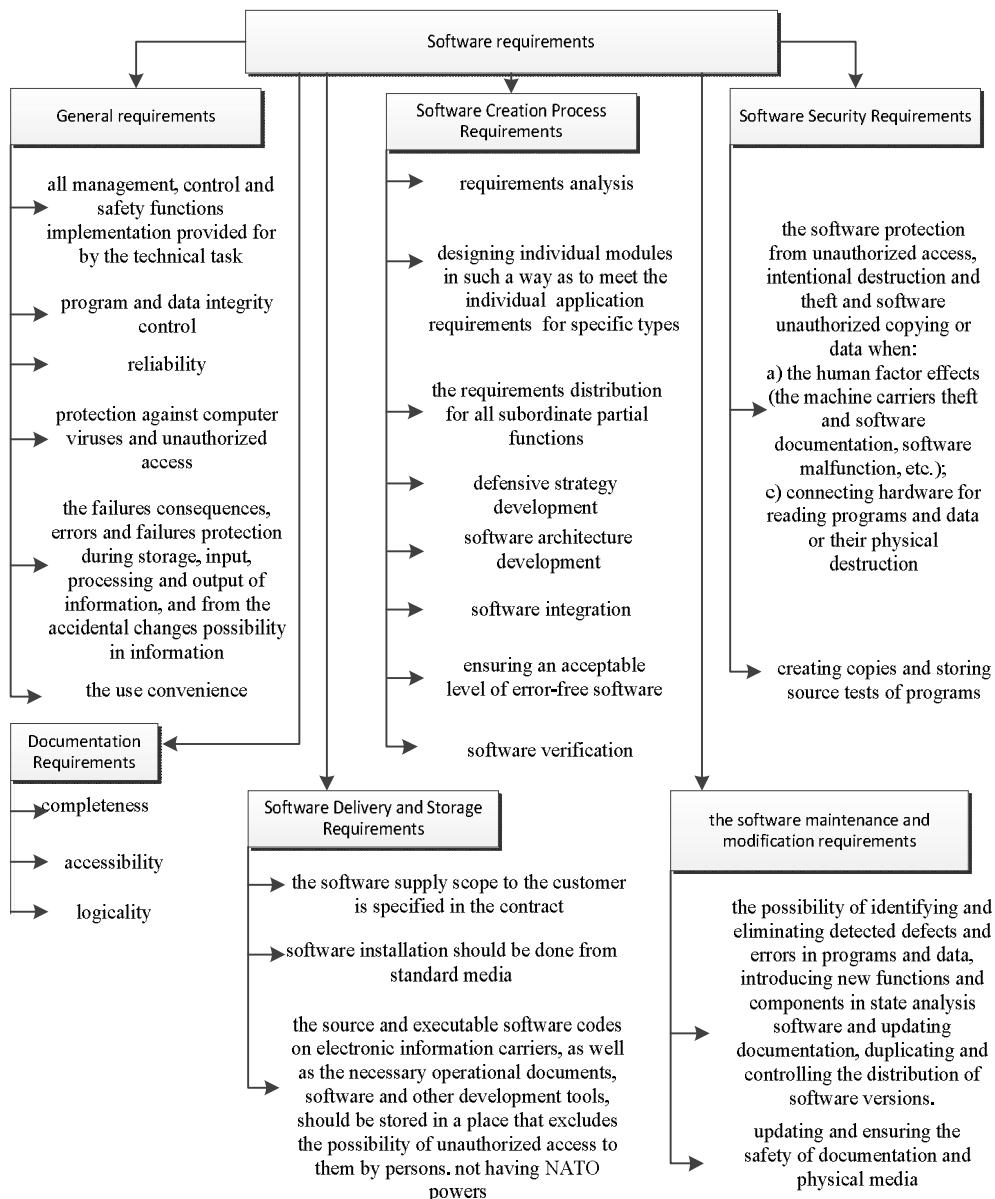


Fig. 2. Software requirements classification

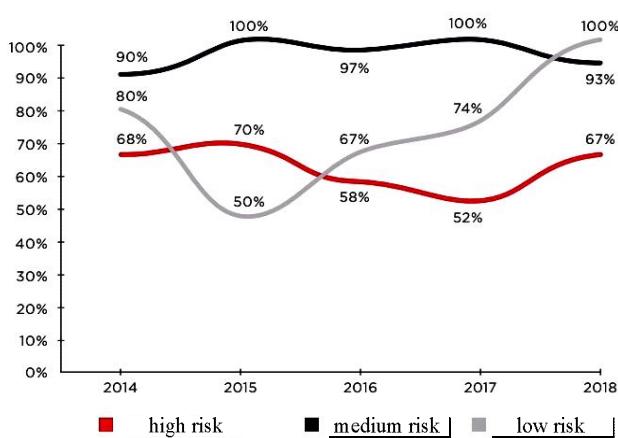


Fig. 3. The Web applications percentage with vulnerability varying degrees

The presented classification is based on an international standards number of software development issues fixing. At first, these are the standards: ISO 10007-2007 "Organization management. Guidelines for configuration management", ISO / IEC 12207-2010 "Information technology. System and software engineering. Software life cycle processes", German Information Security Agency. IT Baseline Protection Manual – Standard security safeguards (Guide to the information technology basic protection level), GOST 58412-2019 "Secure software development", etc.

As can be seen from the presented classification, at present there is a wide information range security threats during software development. In addition, in recent years there has been a significant increase in the cyberattacks intensity, and hence an even greater these

threats spectrum expansion. Such a variety very often leads to ambiguity in assessing the software security level among experts and those responsible for information security issues. Taking into account an

increasing number of factors and threats leads to the uncertainty factors introduction, complicating decision-making processes and reducing the results accuracy.

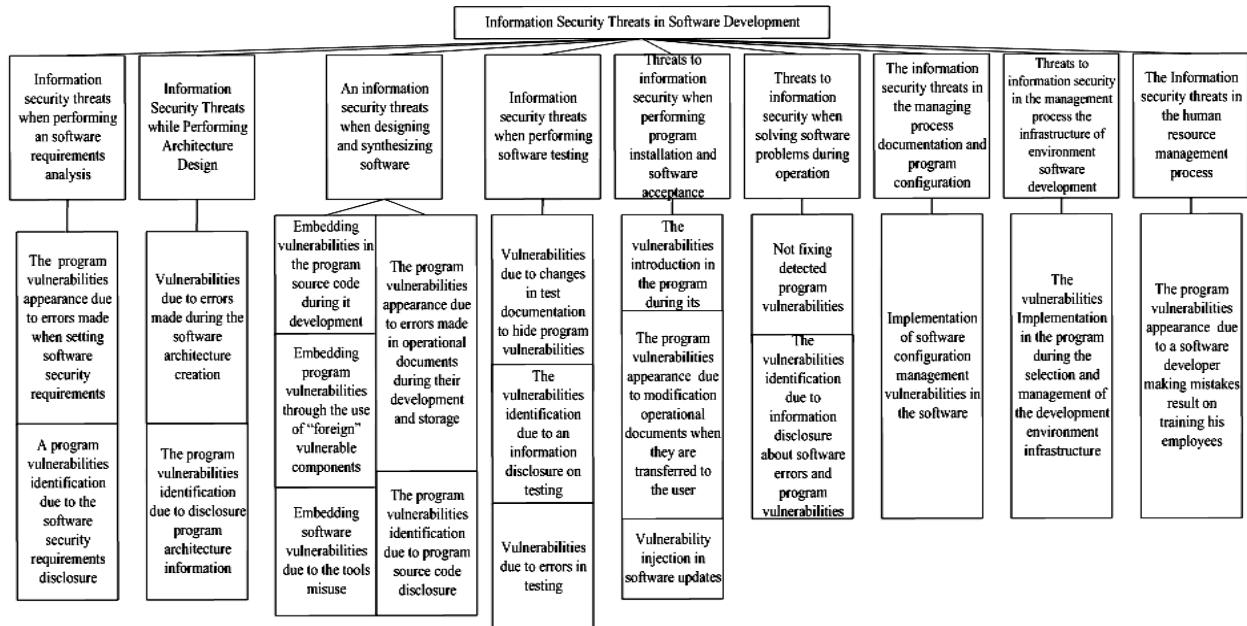


Fig. 4. The software security threats classification

Therefore, it becomes important to develop and implement models and methods for improving software security, taking into account uncertainties.

The software vulnerability detection methods analysis

The literature [1, 3] comparative review showed that software traditional methods analysis are somehow connected with the defects absence proof. Moreover, these methods can be divided into two main categories: inspection-testing and logical-linguistic.

It is known from [1] that such a classification is based on their focus on the action object. So inspection-testing methods are aimed at fixing the software security violation fact, and logical-linguistic methods are aimed at the software under study identifying deviations from indicators declared in the technical documentation.

Research has shown that there are currently many different options for classifying methods for identifying software vulnerabilities. At the same time, noting their wide range and variety, one can also indicate their action direction and identify target and auxiliary methods.

Let us present the methods classification for identifying software vulnerabilities in the form of Fig. 5.

As can be seen from this figure, most of the methods can be synthesized according to the expert; dynamic, static and combined analyzes principles. At the same time, about 45% of the methods are targeted. Let us present the comparative characteristics of the proposed methods.

Since the greatest effect in the software security testing process is provided by target methods, we will focus on these methods, evaluate them and highlight their use limitations. To highlight these methods quality

characteristics using, we use the CWE (Common Weakness Enumeration) database developed and recommended by MITRE (mitre.org) Corporation and the US Department of Homeland Security (DHS) Cyber-security and Infrastructure Security Agency (CISA) [6].

We will select the characteristics recommended by MITRE from the specified base: the input / output user data processing errors (CWE - 78, 79, 89, 119, 134, 189, 352, 434); security functions errors (CWE - 21, 200, 255, 264, 287, 310); synchronization errors (CWE - 162, 399, 829, 834); the use software interfaces errors (CWE - 583, 684); environment errors (CWE - 16, 733); the error handling disadvantages (CWE - 703); encapsulation errors (CWE - 653); low code quality (CWE - 477).

The targeted methods applicability pie diagrams for identifying software vulnerabilities, as applied to the most common security threats analysis, are shown in Fig. 6.

The critical software vulnerabilities statistics analysis, in accordance with MITRE 2019 CWE Top, OWASP Top 10–2019, WASC (Web Application Security Statistics Project), made it possible to present the most dangerous software errors brief description (vulnerabilities) in Table 1.

As can be seen from the diagrams Fig. 6, the listed and researched targeted methods for identifying vulnerabilities cover most of the error spectrum. However, the problem of identifying the vulnerabilities most, at this stage, using existing methods has not been completely resolved. In addition, it should be borne in mind that most, even targeted, methods for identifying vulnerabilities do not fully solve the assigned tasks. However, some of them are applicable for detecting a limited errors number.

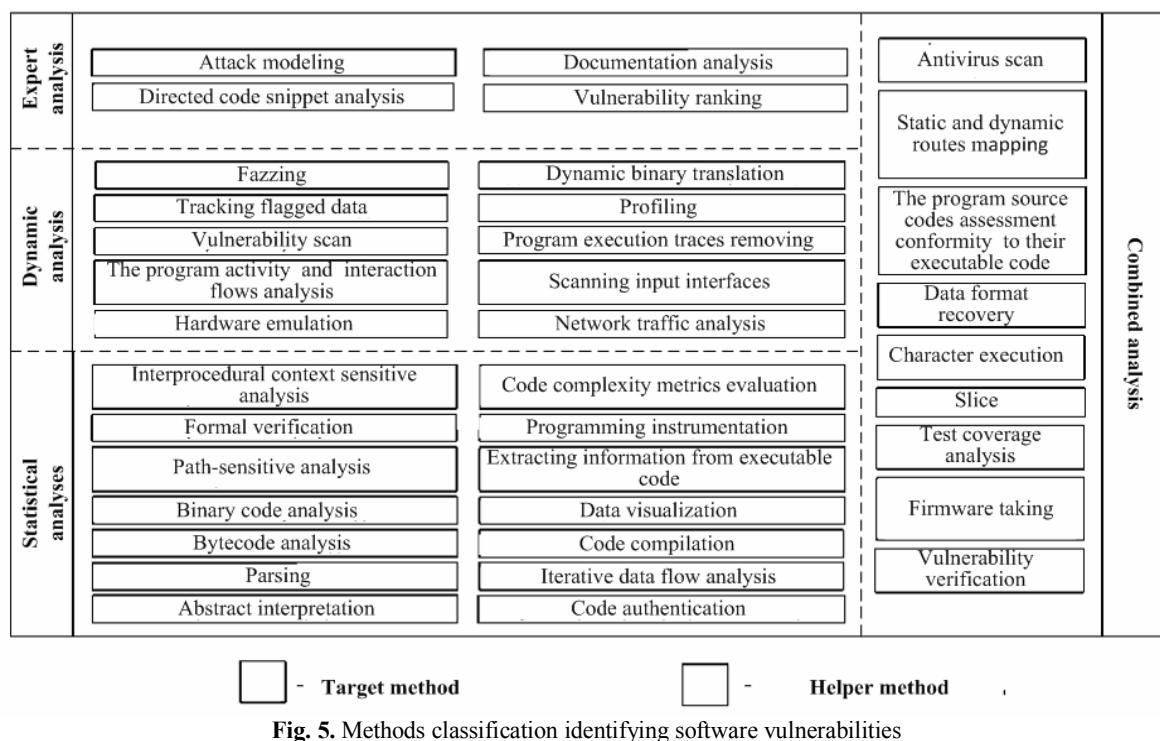


Fig. 5. Methods classification identifying software vulnerabilities

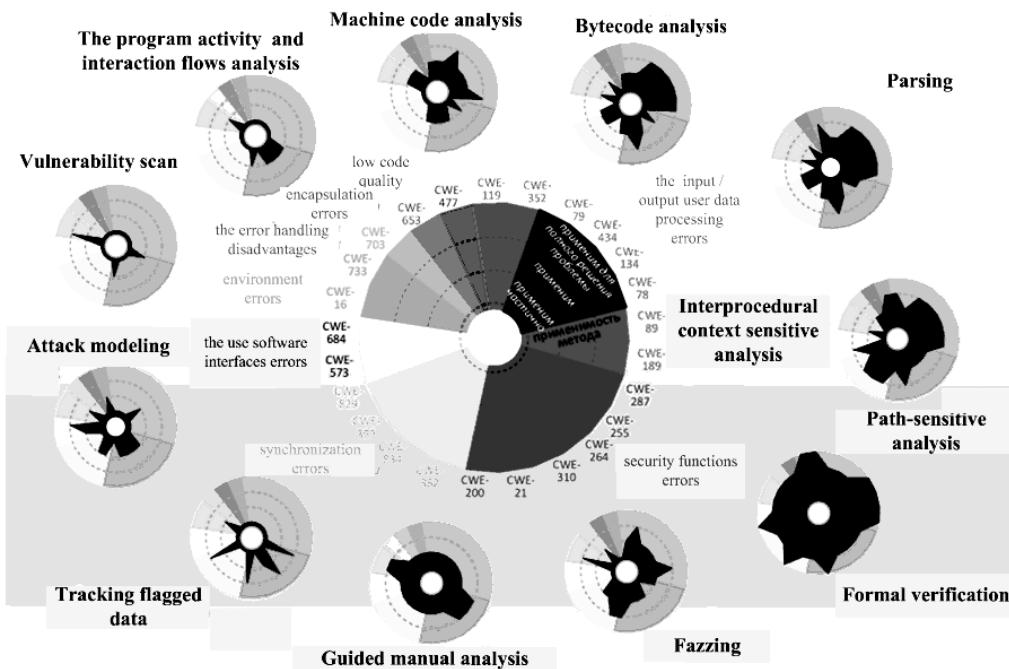


Fig. 6. The targeted methods applicability pie charts for identifying software vulnerabilities

Consequently, experts (developers) need to take into account the fact that it is advisable to use the entire possible the proposed methods spectrum. It is only necessary to determine the methodology for their most effective use in the security testing process.

This hypothesis is confirmed by the availability methods with a sufficiently high applicability degree. For example, formal verification is applicable to identify more than 70% of errors, and interprocedural context-sensitive analysis covers about 40% of software vulnerabilities.

It should be noted that very the three-dimensional scale introduction for assessing the presented methods

applicability introduces a fuzziness element in the decision-making process about possible software vulnerability. This is especially true when different methods of identifying vulnerabilities show opposite, conflicting results. The advertised software errors variety, their occurring at all software development stages possibility, the ambiguity of understanding the rules and specifications by software developers (for example, CWE-684), as well as other factors, reduce the error detection accuracy, introduce ambiguity in the conditions for identifying software vulnerabilities, complicate by experts the adoption process software security solutions.

Table 1 – The most dangerous software errors (vulnerabilities) brief description

Nº	Index	Characteristics description	Software vulnerability brief description
1	CWE-119	Improper Restriction of Operations within the Bounds of a Memory Buffer	The software performs operations on a memory buffer, but it can read from or write to a memory location that is outside of the intended boundary of the buffer.
2	CWE-79	Improper Neutralization of Input During Web Page Generation	The software does not neutralize or incorrectly neutralizes user-controllable input before it is placed in output that is used as a web page that is served to other users.
3	CWE-78	Improper Neutralization of Special Elements used in an OS Command ('OS Command Injection')	The software constructs all or part of an OS command using externally-influenced input from an upstream component, but it does not neutralize or incorrectly neutralizes special elements that could modify the intended OS command when it is sent to a downstream component.
4	CWE-200	Exposure of Sensitive Information to an Unauthorized Actor	The product exposes sensitive information to an actor that is not explicitly authorized to have access to that information.
5	CWE-162	Improper Neutralization of Trailing Special Elements	The software receives input from an upstream component, but it does not neutralize or incorrectly neutralizes trailing special elements that could be interpreted in unexpected ways when they are sent to a downstream component.
6	CWE-684	Incorrect Provision of Specified Functionality	The code does not function according to its published specifications, potentially leading to incorrect usage.
7	CWE-733	Compiler Optimization Removal or Modification of Security-critical Code	The developer builds a security-critical protection mechanism into the software, but the compiler optimizes the program such that the mechanism is removed or modified.
8	CWE-703	Improper Check or Handling of Exceptional Conditions	The software does not properly anticipate or handle exceptional conditions that rarely occur during normal operation of the software.
9	CWE-653	Insufficient Compartmentalization	The product does not sufficiently compartmentalize functionality or processes that require different privilege levels, rights, or permissions.
10	CWE - 477	Use of Obsolete Function	The code uses deprecated or obsolete functions, which suggests that the code has not been actively reviewed or maintained.

There is a need to synthesize knowledge about software vulnerabilities and develop appropriate models and methods to support decision-making about software security, taking into account a fuzzy input data factors.

The models and methods analysis for software security decision support

The literature analysis [4, 5, 7] and research conducted have shown the approaches, models, methods and decision support systems (DSS) wide range.

Based on the generally accepted classification systems, three main the decision making theory approaches can be distinguished, divided according to the conditions for making decisions:

- in certainty conditions taken;
- in risk conditions taken;
- in uncertainty conditions taken.

At the same time, the conducted research has shown the alternatives priority to the DSS models and methods occurring under a risk and uncertainty conditions. It should be noted that most often, in practice, in order to improve the DSS systems quality and accuracy results, it becomes necessary to synthesize knowledge in a risks and uncertainties reducing for solving problems.

Research have shown that in the DSS systems development, taking into account the reducing risks tasks is reduced to minimizing the first and second kind errors probability that arise when making decisions.

It is known from [4] that it is customary to refer the first kind mistakes as a wrong solutions making in the current conditions, to the second kind errors - not to accept the right one. Quantitatively, these errors ratio consequences are estimated by the risk formula:

$$R = C_{12}(1 - P(H_{12})) + C_{21}P(H_{12}) \rightarrow \min, \quad (1)$$

where C_{12} – the expected "useful value" in the actions taken result; $P(H_{12})$ – the probability that the actions strategy is chosen correctly and the event will be completed with a positive result; C_{21} – losses arising as a breakdown result or unreasonable decision to act; $P(H_{21})$ – the probability of wrong choice strategy, leading to a negative result.

In the works [7, 13] the risk reduction approach when testing the computer systems security was considered. The ROC-analysis apparatus was taken as the basis for solving the problem. Using the data and research results, the authors carried out a comparative analysis of the developed methods for identifying anomalies and abuses of critical computer systems. The hypothesis was confirmed that the methods for identifying anomalies, which were based on the fuzzy mathematics theory rules (fuzzy discriminant and cluster analysis and a fuzzy expert system based on the Bayesian classifier), satisfy the established quality criteria. At the same time, the computer systems software component architectures and semantics development rapid pace requires an increase in the using efficiency this well-known mathematical apparatus.

It should be noted that the certain methods possibility risk reduction is determined by the fact that their occurrence nature is in the same area in which the information uncertainty arises. Risks are determined both by making decisions based on incomplete initial data and by the confrontational systems actions algorithms ignorance. Accordingly, the risk reduction calculation methods can be considered from a reducing uncertainty methods set. The DSS systems synthesizing

task in this situation is reduced to the specific methods choice for reducing uncertainty, their combination or integrated use. The reducing uncertainties methods classification is shown in Fig. 7. As you can see from the figure, the uncertainties reducing methods can be conditionally divided into two large groups: based on

the starter data modifying methods and algorithmic. The conducted research has shown that the initial data modifying methods choice is implemented taking into account the requirements for the data processing quality (for example, taking into account the requirements for the problem solving promptness).

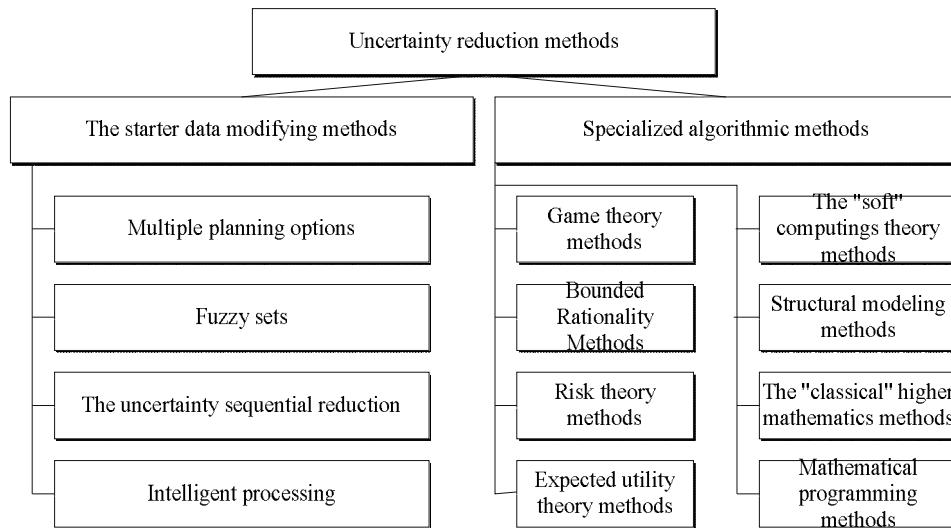


Fig. 7. The reducing uncertainties methods classification

For example, multivariate planning methods are very popular in the financial and economic sector. And some works in this industry [5] emphasize their use appropriateness in solving optimization problems of allocating resources and forces. However, the significant time spent on their implementation, as well as the taking impossibility into account the possible alternatives entire range, reduce their capabilities when solving problems in increasing software security. However, the significant time spent on their implementation, as well as the taking impossibility into account the possible alternatives entire range, reduce their capabilities when solving problems in increasing software security.

The uncertainty successive reduction methods have a similar disadvantage, although such the methods accuracy, as seen from the sources [18], is quite high.

The intellectual processing methods, despite their diversity and positive reviews [15, 18], ultimately most often come down to separate structural subtasks of the overall task consistently reducing uncertainty. Based on this, we can conclude about the relatively these methods low efficiency.

At the same time, the fuzzy sets theory at this stage has significant prospects for its development. So in the works [4, 7] high obtaining accuracy and efficiency the resulting data processed using the fuzzy sets theory the methods is noted.

With an algorithmic approach to reducing uncertainty, the methods choice is most often limited to the decision theory functionality. Each of these methods has a advantages and disadvantages set.

So in the works [9, 15], it is noted on the one hand the solving multi-alternative problems possibility of the game theory mathematical apparatus (namely, in this problem formulation we most often encounter when

modeling the software security testing process), and on the other hand, the uncertainty in the indicators and optimization criteria. Also, high computational complexity significantly limits the implementing practical this modeling mechanism possibilities.

And, for example, in the works [2] devoted to the expected utility theory, it is noted that this theory main provisions application to reduce the uncertainty, the source of which is the information asymmetry, contributed to the agency relations normative theory formation. But it is this, according to the authors that often become a factor in reducing the resulting data accuracy. A shift in the research vector only towards empirical knowledge reduces other theoretical approaches value, which ultimately leads to a decrease in the modeling results quality.

Largely, the bounded rationality methods [4] have similar disadvantages, which recommend minimizing the expected result, based on the person's (expert's) socio-psychological characteristics making the decision.

The literature review conducted [4, 15, 17] led to the works conclusion about a large number devoted to the mathematical programming methods. So, to the mathematical programming problems solve, more than two dozen mathematical methods are used: from the simplest "northwest corner" to computationally complex gradient methods for finding an extremum. Taking this into account, the DSS systems efficiency improving problem using this mathematical apparatus is not in the new mathematical programming methods development, but rather in the complexity of formalizing the solution conditions and choosing methods for them that most adequately describe the controlled system functioning.

Research have shown that the structural modeling methodology, "classical" higher mathematics, the "soft" computing's theory for a classes of problems and

models wide range solving are described in sufficient detail in the scientists works. So, for example, it is described in the works devoted to the DSS systems software creation [7, 8], the calculations general mathematical methods development in the decision support interests [4], and mathematical modeling interests [17, 18]. Despite the rather long history and these methods variety, their improvement and use will allow one to fulfill a particular scientific tasks number of increasing software security. So, for example, structural modeling methods will allow formalizing the DSS process, and the methods of the "soft" computing theory and "classical" higher mathematics will be the basis of the developed method become for software security increasing.

Thus, the forming alternatives problem in DSS systems about software safety in a priori uncertainty conditions and the resulting risks can be solved by improving mathematical methods [7, 15, 17, 18].

Research problem statement

The research conducted on existing systems for identifying software vulnerabilities have shown that they have a disadvantages number associated with the complexity of processing a input data large amount with a high contradiction degree. In addition, the lack of improved decision support mechanisms reduces the expert group effectiveness. Confirming this hypothesis, we present a generalized model for identifying vulnerabilities in Fig. 8.

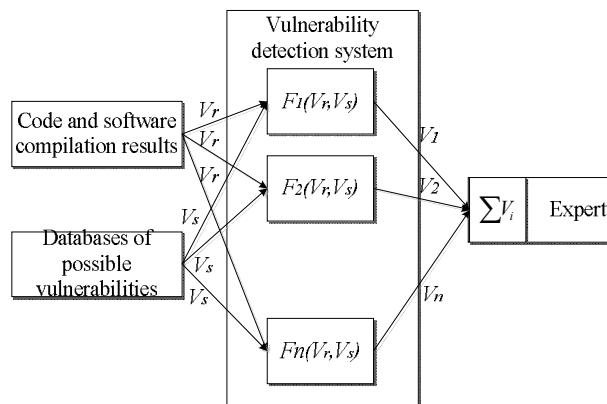


Fig. 8. Generalized vulnerability identification model

As can be seen from the figure, the information amount obtained during software testing V_{Σ} the expert's decision-making process significantly complicated makes, the time for implementing test scenarios increases, and the software security procedures effectiveness reduces. V_{Σ} is defined as the software security tests results sum carried out by various methods.

$$V_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n V_i, \quad (2)$$

where i – the method number; n – the test cases number.

The value V_i depends on the source code volume and software compilation results V_r , the possible

vulnerabilities database volume V_s , as well as the algorithm that implements the check $V_i = F_i(V_r, V_s)$.

The time t_{test} required to implement test scenarios for analyzing software for vulnerabilities is determined similarly to the value V_i . The value t_{test} depends on the vulnerability detection system operating time t_{cay} , as well as the time t_3 required for an expert to make a decision.

The time t_{cay} is determined by the maximum time values spent on searching for vulnerabilities, by each of the methods implemented in the system for identifying vulnerabilities.

Assuming that software security tests start running at the same time t_{de3} , the total time to determine software security is:

$$t_{de3} = \max(f_1(V_r, V_s) \dots f_n(V_r, V_s)) + t_3. \quad (3)$$

The values V_i , based on the problem formulation, should be free from uncertainty signs. However, the resulting data that determine software security decisions due to the data possible polarization may again become fuzzy.

Proceeding from this, increasing the software security testing procedures efficiency, as well as the making decisions efficiency about security, lies in the optimization problem plane solving of minimizing the fuzzy sets fuzziness index.

The fuzzy sets fuzziness index, on the one hand, directly depends on the fuzzy set power, that is, the analyzed data volume V_{Σ} , and on the other hand, it depends on the conflicting data set power $V_{\Sigma}^{(np)}$. Accordingly, a particular optimization problem can be transformed into the result:

$$V_{\Sigma}^{(np)} \rightarrow \min, \quad (4)$$

when limited $R \leq R_{don}$.

To reduce the importance there is proposed to improve the method for identifying vulnerabilities in the work, as well as DSS methods as the system integral part for identifying vulnerabilities use. These methods implementation will allow you to achieve the required result by removing from V_{Σ} the data that do not affect decision making, automate the data processing process and focus on important information for decision making. It is proposed to use these methods as the vulnerability detection system modules components. In this case, the generalized model for identifying vulnerabilities is transformed into Fig. 9.

In the presented figure, it is not possible to display the detecting software security promptness factors account. However, the efficiency characteristic significantly affects the software quality and its security. For the optimization problem representation completeness, we introduce the software safety indicator, and denote it as the software secure factor $K_{de3}^{(PIO)}$.

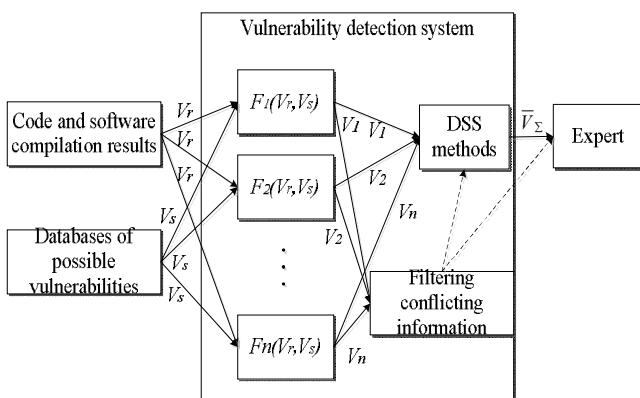


Fig. 9. Improved generalized vulnerability identification model

Based on this, we present the software security increasing task in the mathematical expression form:

$$K_{\delta e 3}^{(PIO)} = \arg \left\{ t_{\delta e 3} \left(f \left(V_{\Sigma}^{(np)} \right) \right) \rightarrow \min / R \leq R_{don} \right\}.$$

Thus, in order to a scientific problem solve and this goal achieve, it is necessary to the following research tasks solve:

- to conduct an existing methods analysis comparative and research for identifying vulnerabilities and making decisions on software compliance with security requirements;
- to improve the model and method for identifying software vulnerability;
- no develop a method for making a decision on software security;
- to evaluate the developed methods effectiveness and the research results obtained reliability;
- to develop practical recommendations for the software security increasing developed methods using.

Conclusions

The results analysis of main methods for identifying software vulnerabilities presents in the article. The results of author's research, synthesizing and regulating knowledge about systems for detecting software vulnerabilities, are presented. The software analysis methods used during certification tests are considered.

It is shown that the methods and techniques existing for software security analysis use do not ensure the result accuracy under fuzzy input data conditions. This drawback is aggravated by strict requirements for the test scenarios implementation speed. This is largely due to the fact that experts, in order to make a decision, have to large conflicting information amounts analyze. Consequently, it is necessary to develop a system for identifying vulnerabilities, the main task of which will be to the conflicting information amount minimize used by an expert when making a decision.

The most promising direction the existing identifying vulnerabilities systems efficiency increasing is seen in reducing the burden on an expert by methods for identifying vulnerabilities and implementing a decision support system improving. This will significantly reduce the time spent on a decision making on software security, and, as a result, will the software security testing procedure accessible to a developer's wide range make more.

Also, the software security testing procedures availability increasing have to the both developers and information systems users interest increase to the security problem, which, in turn, will give a new impetus to the methods and systems for identifying vulnerabilities development and verifying software compliance with security requirements.

REFERENCES

1. Kazarin, O. V. (2003), *Security of computer systems software*, MGUL, Moscow, 212 p.
2. Podshivalov, G.K., Ternovskov, V.B., Demidov, L.N. and Tarasov B.A. (2016), "Economic security in the face of uncertainty", *Economics: yesterday, today, tomorrow*, No. 2, pp. 242-257.
3. Savin, R. (2007), *Testing Dot Com or A Manual on Bug Abuse in Internet Startups*, Delo, Moscow, 312 p.
4. Tikhanychev, O. V. (2018), *Theory and practice of decision support automation*, Editus, Moscow, 76 p.
5. Yuzvovich, L.I. and Yudina, E.A. (2014), "An integrated approach to the study of the essence, principles and methods of financial planning at enterprises in the economic system", *Fundamental research*, No. 9, pp. 1596-1601.
6. (2020), *CWE List Version 4.1*, available at: <https://cwe.mitre.org/data/>.
7. Gavrylenko, S., Chelak, V., Hornostal, O. and Vassilev, V. (2020), "Development of a method for identifying the state of a computer system using fuzzy cluster analysis", *Advanced Information Systems*, Vol. 4, No. 2, pp. 8-11, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.2.02>.
8. Imtiaz, N., Murphy, B. and Williams L. (2019), "How Do Developers Act on Static Analysis Alerts? An Empirical Study of Coverity Usage", *2019 IEEE 30th International Symposium on Software Reliability Engineering (ISSRE)*, Berlin, Germany, pp. 323-333, DOI: <https://doi.org/10.1109/ISSRE.2019.00040>.
9. Ishizaka, Alessio and Philippe, Nemery (2013), *Multi-criteria Decision Analysis: Methods and Software*, SAP Labs – China, Shanghai, PRC 2013, 310 p.
10. (2020), *ISO/IEC 27034-1:2011 Information technology – Security techniques – Application security*, available at: <https://www.iso.org/standard/44378.html>.
11. (2020), *ISO/IEC 15408-1:2009 Information technology — Security techniques — Evaluation criteria for IT security*, available at: <https://www.iso.org/standard/50341.html>.
12. (2020), *New ISA/IEC 62443 standard specifies security capabilities for control system components*, available at: <https://www.isa.org/intech/201810standards/>.
13. O'Connell, and James, L.M. (2013), "SzalmaRoc-Estimator Software and Roc Analysis", *Proceedings the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Vol. 57 is. 1, pp. 1432-1434.
14. Sanjab, Anibal and Walid, Saad (2016), "On bounded rationality in cyber-physical systems security: Game-theoretic analysis with application to smart grid protection", *Computer Science, Mathematics, 2016 Joint Workshop on Cyber-Physical Security and Resilience in Smart Grids (CPSR-SG)*, Vienna, 2016, pp. 1-6, DOI: <https://doi.org/10.1109/CPSRSG.2016.7684101>.

15. (2020), *OWASP Proactive Controls*, available at: <https://owasp.org/www-project-proactive-controls/>.
16. Semenova, Z.V., Danilova, O.T. and Kovshar, I.R. (2019), "The analysis of security of a stack of technologies for development of web-resources", *Dynamics of systems, mechanisms and machines*, Vol. 7, No. 4, pp. 98-105.
17. Sinha, S.M. (2006), *Mathematical Programming. Theory and Methods*. Elsevier Science, 572 p.
18. Zhang, Yuchen and Liu, Jing (2019), "Optimal Decision-Making Approach for Cyber Security Defense Using Game Theory and Intelligent Learning", *Security and Communication Networks Volume*, Article ID 3038586, 16 p., DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/3038586>.

Надійшла (received) 25.06.2020

Прийнята до друку (accepted for publication) 02.09.2020

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Можаєв Михайло Олександрович – кандидат технічних наук, завідувач сектором комп'ютерно-технічних, телекомуникаційних досліджень та досліджень відео-, звукозапису Харківського науково-дослідного інституту судових експертіз ім. засл. проф. М. С. Бокаріуса, Харків, Україна;

Mykhailo Mozhaiev – Candidate of Technical Sciences, Head of Department of Computer Engineering, Telecommunications, Video- and Audio-recording Research, Hon. Prof. M.S. Bokarius Kharkiv Research Institute of Forensic Examinations, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: mikhail.mozhaev@hniise.gov.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-1566-9260>.

Давидов Вячеслав Вадимович – кандидат технічних наук, доцент кафедри "Обчислювальна техніка та програмування", Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;

Viacheslav Davydov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Computer Engineering and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: vyacheslav.v.davydov@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2976-8422>.

Ліцзян Джан – викладач коледжу комп'ютерних наук, Типовий університет Нейцзяна, Нейцзян, Кітай;

Zhang Liqiang – teacher, College of Computer Science, Neijiang Normal University, Neijiang, China.
e-mail: zhangiq@njtc.edu.cn; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1278-2209>.

Аналіз та порівняльні дослідження методів підвищення рівня безпеки програмного забезпечення

М. О. Можаев, В. В. Давидов, Джан Ліцзян

Анотація. У статті представлені результати аналізу основних методів виявлення вразливостей програмного забезпечення. Представлені результати досліджень ряду авторів, синтезуючих та регламентуючих знань про системи виявлення вразливостей програмного забезпечення. Розглянуті методи аналізу програмного забезпечення, що використовуються при проведенні сертифікаційних випробувань. Показано, що використання існуючих методів та методик аналізу безпеки програмного забезпечення не забезпечує точність результатів на умовах нечисельних входних даних. Цей недолік ускладнює жорсткі вимоги до оперативності реалізації тестових сценаріїв. Отже, необхідне розроблення системи виявлення вразливих користувачів, основною задачею якої буде мінімізація кількості противрічної інформації, що використовується експертом при прийнятті рішень. Найкраще перспективне створення підвищення ефективності існуючих систем виявлення вразливостей полягає у зменшенні навантажень експертів за рахунок випробувань методів виявлення вразливостей, що впроваджені до систем підтримки прийняття рішень. Це дозволить істотно знизити затримки часу при прийнятті рішень щодо безпеки програмного забезпечення, а також, як наслідок, зробить процедуру тестування безпеки програмного забезпечення більш доступною широкому колу розробників. Підвищення доступності процедур тестування безпеки програмного забезпечення повинно підкреслювати інтерес як розробників, так і користувачів інформаційних систем до проблем безпеки, що, в свою чергу, даст новий імпульс розвитку методів та систем виявлення вразливостей і перевірки відповідності програмним вимогам безпеки.

Ключові слова: комп'ютерна система; програмне забезпечення; ризики безпеки; загрози безпеки.

Анализ и сравнительные исследования методов повышения безопасности программного обеспечения

М. А. Можаев, В. В. Давыдов, Джан Лицзян

Аннотация. В статье представлены результаты анализа основных методов выявления уязвимостей Software. Приведены результаты исследований ряда авторов, синтезирующие и регламентирующие знания о системах выявления уязвимостей Software. Рассмотрены методы анализа Software, используемые при проведении сертификационных испытаний. Показано, что использование существующих методов и методик анализа безопасности Software не обеспечивает точности результата в условиях нечетких входных данных. Этот недостаток усиливается жесткими требованиями к оперативности реализации тестовых сценариев. Следовательно, необходимо разработать систему выявления уязвимостей, основной задачей которой будет минимизация количества противоречивой информации, используемой экспертом при принятии решения. Наиболее перспективным направлением повышения эффективности существующих систем выявления уязвимостей видится снижение нагрузки на эксперта за счет усовершенствования методов выявления уязвимостей и внедрения системы поддержки принятия решения. Это позволит существенно снизить затраты времени на принятие решения о безопасности Software, и, как следствие, сделает процедуру тестирования безопасности Software более доступной широкому кругу разработчиков. Повышение доступности процедур тестирования безопасности Software должно повысить интерес как разработчиков, так и пользователей информационных систем к проблеме безопасности, что, в свою очередь, даст новый импульс развитию методов и систем выявления уязвимостей и верификации соответствия Software требованиям безопасности.

Ключевые слова: компьютерная система; программное обеспечение; риски безопасности; угрозы безопасности.

Serhii Semenov¹, Cao Weilin²

¹National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

²Neijiang Normal University, Neijiang, China

TESTING PROCESS FOR PENETRATION INTO COMPUTER SYSTEMS MATHEMATICAL MODEL MODIFICATION

Abstract. Testing process for penetration into computer systems mathematical model was developed in the article. The proposed model differs from the known by computer systems specialized information platforms security testing capabilities, which made it possible to estimate the penetration test algorithm execution time falling within a given interval probability. The proposed testing process for penetration into computer systems mathematical model was further developed (modified). Modified model distinctive feature is the Erlang distribution as the main one in the state transition processes mathematical formalization. This made it possible on the one hand to unify the mathematical model and present the testing process at a higher level of the testing hierarchy, on the other hand to simplify it 1.7 times. A security testing mathematical model was developed in order to estimate the simulation results accuracy, based on the known GERT-networks simplification and modification approach. Testing algorithms execution time value mathematical expectation values are obtained and estimated. Comparative modeling results investigations have shown the study values comparability for all three approaches of security testing process mathematical formalization. This confirmed the hypothesis that it is advisable to use a unified mathematical formalization approach, which was implemented in a penetration testing process modified mathematical model.

Keywords: computer systems; Software; testing; mathematical model.

Introduction

Ensuring the security of computer systems used in conditions of increased intensity of cyberattacks is associated with the need to conduct test control of the software security level. This process is carried out through appropriate methodologies, methods and testing tools. These practical implementations are based on different models for identifying vulnerabilities. Analysis of the literature has shown that at present there are various approaches to mathematical formalization and modeling of software security testing processes. These models are presented in works [1-9, 13-15].

Thus, in [1], a model for identifying vulnerabilities is proposed. The authors of the article based the model on the logic of microprogram machines. This development, along with the advantages (efficiency, permissible accuracy and reliability), has obvious disadvantages caused by the choice of the main technology for solving the problem: low adaptability of models to real changes in the behavior of systems; significant complication of implementation algorithms in the event of a possible insignificant change in the behavior of at least one site (agent).

The works [9, 10] present individual test stages (including security) mathematical models. In them, mathematical formalization approaches (GERT-networks, probabilistic approaches) are reasonably chosen, taking into account possible risks and errors. However, the lack of argumentation when choosing a method for specifying the probabilistic distribution to describe individual stages (GERT-networks), as well as unreasonable simplifications and limitations (probabilistic approaches), reduce the simulation results accuracy. A number of works [6, 10] present not only cybersecurity systems mathematical and implemented simulation models. On the one hand, this significantly increases the the proposed mathematical models' practical application argumentation level. However, on the other hand, the

shortcomings associated with restrictions on their use in these works could not be eliminated.

Recently, penetration testing services have become increasingly popular in the IT-industry. A number of popular articles [1, 2] set out in some detail the possible approaches and steps that accompany these services. However, these works vast majority consider this cybersecurity assessment type from a view practical point, based on the expertise in various computer and information infrastructures experience. This, in turn, leads to spectrum and increased run time either unreasonable expansion, without ensuring the appropriate assessment quality, or possible vulnerabilities and security risks insufficient consideration. The mathematical models' development and research governing penetration testing procedures can optimize these processes (increase their efficiency and IT-infrastructures security).

Summing up the analysis, we can conclude that it is relevant to testing process for penetration into computer systems mathematical model modification.

GERT-network analysis

In the work [14] the GERT-network interpreting the generalized penetration test algorithm is shown in Fig. 1.

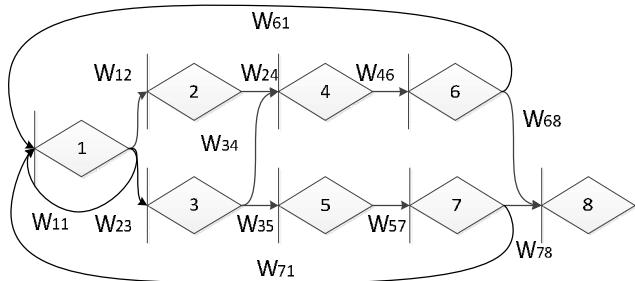


Fig. 1. GERT-network interpreting the generalized testing algorithm diagram

In this figure, state 1 can be described as initial. The transition from state 1 to state 2 is initiated by developed tests for objects such as sites, web applications, mobile tools and their applications and characterizes the collecting information about system and system hardware components process. State 2 corresponds to the "Information Gathering Step Passed" status.

The transition from state 1 to state 3 is initialized for "SCADA and IoT" objects that have a number of features for collecting information about security test objects (for example, mandatory port scanning). State 3 is interpreted by the status "Information collection stage passed" of tests for "SCADA and IoT" objects.

Transition 1-1 is interpreted by insufficient information collected about the system under test and return for additional collection and necessary information evaluation. Transition 2-4 should formalize the authentication procedures for web applications, mobile tools and their applications users. At the same time, the fate is necessary that recently these content software developers are increasingly focusing on biometric authentication mechanisms. Transition 3-4 is similar to transition 2-4, but describes the biometric authentication procedures for "SCADA and IoT" objects. Transition 3-5 describes the evaluating process the passwords reliability in "password" authentication systems. States 4 and 5 are interpreted by the "Authentication Step Passed" status. The transition from state 4 to state 6 formalizes the testing process the network stability sessions and the network equipment security. State 6 is the final procedural state characterizing the computer system security. Transition 6-8 formalizes the final part – the received information log creation. Transition 6-1 can characterize a return to the initial state in unsatisfactory test evaluation cases, the need to conduct additional penetration tests, change customer requirements or make changes to the system configuration during testing, etc. Transitioning from state 5 to state 7 formalizes the data warehouses and their access security rules (including tests for the administrator privileges and compliance with security policy rules adequacy) assessment processes.

As with transition 6-8, transition 7-8 formalizes the final part – received information log creation, and transition 7-1 returns to the initial state with fixing results and providing recommendations for improving the individual component computer systems or the test object as a whole security.

We will modify the presented model.

The developed mathematical model modification is carried out in order to formalize a higher hierarchy level, in which it is possible to generalize a testing processes number (for example, initialization, information collection, authentication) for various computer and software tools (web applications, mobile tools and their applications, "SCADA and IoT" objects), combining these processes in one state.

Using these assumptions, we present the GERT-network modified scheme in the Fig. 2. form. The computer system penetration test process modified GERT-model corresponding branches characteristics are shown in Table 1.

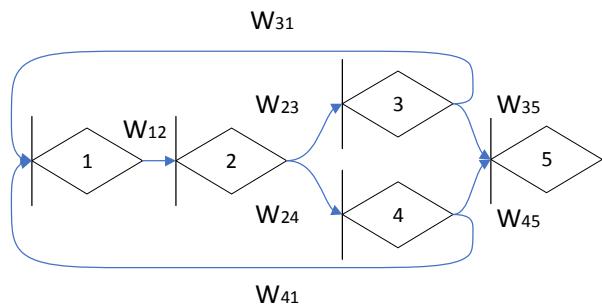


Fig. 2. Modified GERT-network scheme interpreting a generalized testing algorithm

Table 1 – Modified GERT-model branch characteristics

No.	Branch	W-function	Probability	Moment-generating function
1	(1,2)	W_{12}	$p1$	$\xi_1 = (1 - Q_1 t)^{-k_1}$
2	(2,3)	W_{23}	$p2$	$\xi_2 = (1 - Q_2 t)^{-k_2}$
3	(2,4)	W_{24}	$q1 = 1 - p2$	$\xi_3 = (1 - Q_3 t)^{-k_3}$
4	(3,5)	W_{35}	$p3$	$\xi_4 = (1 - Q_4 t)^{-k_4}$
5	(4,5)	W_{45}	$p4$	$\xi_5 = (1 - Q_5 t)^{-k_5}$
6	(3,1)	W_{31}	$q2 = 1 - p3$	$\xi_5 = (1 - Q_5 t)^{-k_5}$
7	(4,1)	W_{41}	$q3 = 1 - p4$	$\xi_5 = (1 - Q_5 t)^{-k_5}$

In this case, the algorithms and testing procedures for penetration into computer systems execution time equivalent W-function is:

$$W_E(s) = \frac{W_{12}W_{23}W_{35} + W_{12}W_{24}W_{45}}{1 - (W_{12}W_{23}W_{31} + W_{12}W_{24}W_{41})} = \frac{p_1\xi_1(p_2p_3\xi_2\xi_4 + q_1p_4\xi_3\xi_5)}{1 - p_1\xi_1\xi_5(p_2q_2\xi_2 + q_1q_3\xi_3)}, \quad (1)$$

We will conduct GERT-model studies (Fig. 2). Penetration testing algorithms implementation time probability distribution density curves graphs at different values $p1-p4$ for conditions given in the work [14], are illustrated in Fig. 3, a (Graph 1: $p1 = 0.5$, $p2 = 0.6$, $p3 = p4 = 0.9$, $Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = 0.5$, $Q_5 = 0.55$, $k = 3$; Graph 2: $p1 = 0.5$, $p2 = 0.6$, $p3 = 0.9$, $p4 = 0.5$, $Q_1 = 0.5$, $Q_2 = 0.7$, $Q_3 = Q_4 = Q_5 = 0.55$, $k = 3$). Penetration testing algorithms implementation probability distribution function graphs for conditions given in the work [14] are given in Fig. 3, b.

The values $W_E(s)$ for the same conditions obtained as a testing process for penetration into computer systems mathematical modeling result, as well as a generalized model are presented in Table 2.

Using the mathematical package MathCad, we find the random test time t mathematical expectation. For condition 1 in accordance with scheme 1, this value is equal to $t \approx 7$ c.u. In accordance with scheme 2 (Fig. 2) under condition 1, this value is approximately equal to $t \approx 6$ c.u. For condition 2 in accordance with scheme 1, this value is equal to $t \approx 7$ c.u.

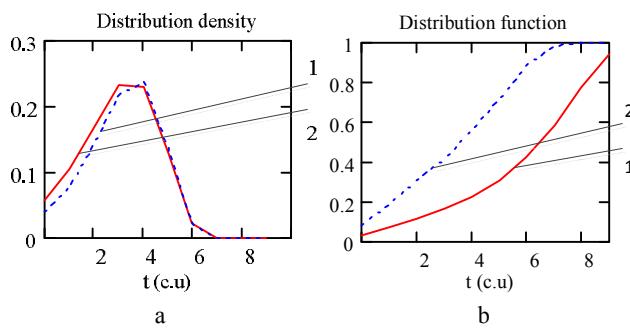


Fig. 3. Penetration testing algorithms implementation time probability distribution density graphs obtained using a modified GERT-model

Table 2 – Values $W_E(S)$ obtained as a testing process for penetration into computer systems mathematical simulation result for diagrams of Fig. 1, 2

No.	$W_E(S)$ (condition 1) for the scheme Fig. 1.	$W_E(S)$ (condition 2) for the scheme Fig. 1.	$W_E(S)$ (condition 1) for the modi- fied scheme Fig. 2.	$W_E(S)$ (condition 2) for the modi- fied scheme Fig. 2.
1	0.914	1.338	0.684	0.559
2	1.249	1.89	0.963	0.808
3	1.52	2.36	1.383	1.197
4	1.762	2.83	2.035	1.823
5	2.028	3.428	3.071	2.861
6	2.369	4.318	4.775	4.639
7	2.846	5.789	7.675	7.761
8	3.559	8.504	12.809	13.25
9	4.71	14.332	22.287	22.281
10	6.766	30.171	40.503	34.105

In accordance with scheme 2 (Fig. 2) under condition 1, this value is approximately equal to $t \approx 6$ c.u.

As can be seen from the above results, the difference between the random test time t mathematical expectation values obtained in the first GERT-model and the generalized model is insignificant. And this despite some differences in the values $W_E(s)$ for the examples given.

It should be noted that the author intentionally did not change values p_i and Q_i , thereby studying the models in the "worst" conditions. If we change the values p_i and Q_i as recommended by expert practitioners, we can get values $W_E(s)$ close to the original. This confirms the Erlang distribution feasibility hypothesis as the main one in the state transition processes mathematical formalization.

We will test the possibility of such a security testing process mathematical formalization simplified approach.

Testing process for penetration into computer systems modified mathematical model comparative studies

For the testing computer systems for penetration process mathematical formalization proposed approach comparative study, as well as testing the GERT-network simplified modification possibility hypothesis as a

reference, we will use the algorithm for simplifying GERT-networks described in [3]. To solve this problem, we will modify the presented in Fig. 1 GERT-networks according to this algorithm, and thus formalize a mathematical model higher hierarchy level.

As shown in [3], the modification algorithm primarily depends on the GERT-network serial and parallel arcs converting methods, as well as first-order branches and loops connecting the node output and input.

Series arches. If the GERT-network series-connected arcs have W -functions W_1 and W_2 , then their equivalent W -function $W_{E1,2}$ is: $W_{E1,2} = W_1 W_2$. Moving to characteristic functions χ_1 , χ_2 , and denoting through $\operatorname{Re}\chi_1$ and $\operatorname{Re}\chi_2$ real, and through $\operatorname{Im}\chi_1$ and $\operatorname{Im}\chi_2$ – first and second arcs characteristic functions imaginary parts, respectively, we get: $\chi_1 = \operatorname{Re}\chi_1 + i\operatorname{Im}\chi_1$ and $\chi_2 = \operatorname{Re}\chi_2 + i\operatorname{Im}\chi_2$. The equivalent arc $X_{E1,2}$ has a characteristic function:

$$X_{E1,2} = \operatorname{Re}\chi_1 \operatorname{Re}\chi_2 - \operatorname{Im}\chi_1 \operatorname{Im}\chi_2 + \\ + i(\operatorname{Re}\chi_1 \operatorname{Im}\chi_2 + \operatorname{Im}\chi_1 \operatorname{Re}\chi_2). \quad (2)$$

Parallel arches. For GERT-network with selection probabilities parallel arcs respectively p_1 and p_2 , we have: $W_{E1,2} = p_1 W_1 + p_2 W_2$.

The equivalent arc $X_{E1,2}$ in this case has a characteristic function:

$$X_{E1,2} = p_1 \operatorname{Re}\chi_1 + p_2 \operatorname{Re}\chi_2 + \\ + i(p_1 \operatorname{Im}\chi_1 + p_2 \operatorname{Im}\chi_2). \quad (3)$$

A first-order arc and loop connecting the node output and input. If $W_1 = p_1 M_1$ is a first-order loop connecting the node output and input W -function and having a selection probability p_1 , and $W_2 = p_2 M_2$ is a node output arc W -function and having a selection probability p_2 , then the equivalent this fragment W -function is:

$$W_{E1,2} = W_2 / (1 - W_1). \quad (4)$$

The arc $W_{E1,2}$ selection probability $p_{E1,2}$ is $p_{E1,2} = W_{E1,2}(0) = p_2 / (1 - p_1)$ if the number of node output arcs is more than one. Going to characteristic functions, we get:

$$X_{E1,2} = p_2 \times \\ \times \frac{(\operatorname{Re}\chi_2 - p_1 \operatorname{Re}\chi_1 \operatorname{Re}\chi_2 - p_1 \operatorname{Im}\chi_1 \operatorname{Im}\chi_2)}{(1 - p_1 \operatorname{Re}\chi_1)^2 + p_1^2 (\operatorname{Re}\chi_1)^2} + \\ + \frac{i p_2 (\operatorname{Im}\chi_2 (1 - p_1 \operatorname{Re}\chi_1) + p_1 \operatorname{Im}\chi_1 \operatorname{Im}\chi_2)}{(1 - p_1 \operatorname{Re}\chi_1)^2 + p_1^2 (\operatorname{Im}\chi_1)^2}. \quad (5)$$

Using the branch transmittance concepts described in [9] as a product

$$t_{ij} = X_{ij} = p_{ij} f_{ij}(\xi),$$

where p_{ij} – the branch execution probability, $f_{ij}(\xi)$ – the arc characteristic function [2], we present the GERT-network modified branches characteristics in Table 3.

Table 3 –Characteristics of the modified branches

No.	Branch	Characteristic function
1	(1,2)	$\xi_1 = (1 - Q_1 it)^{-k_1}$
2	(2,3)	$\xi_2 = (1 - Q_2 it)^{-k_2}$
3	(2,4)	$\xi_3 = (1 - Q_3 it)^{-k_3}$
4	(3,5)	$\xi_4 = (1 - Q_4 it)^{-k_4}$
5	(4,5)	$\xi_5 = (1 - Q_5 it)^{-k_5}$
6	(3,1)	$\xi_6 = (1 - Q_5 it)^{-k_5}$
7	(4,1)	$\xi_7 = (1 - Q_7 it)^{-k_5}$

Based on the above rules, we will find equivalent new branches W_q -functions.

Simple mathematical actions made it possible to distinguish equivalent $W_{qi,i+1}$ -functions, where i is the state number. Let us present them in Table 4.

Table 4 –Modified branches characteristics

No.	Branch	Characteristic function
1	(1,2)	$W_{q1,2} = \frac{(p_1\xi_1)^2 + 2p_1^2\xi_1\xi_2 + (p_1\xi_2)^2}{1 - q_1\xi_8}$
2	(2,3)	$W_{q2,3} = p_2\xi_3 + p_3\xi_4$
3	(2,4)	$W_{q2,4} = W_{4,5}$
4	(3,5)	$W_{q3,5} = p_4\xi_6 + p_5\xi_7$
5	(4,5)	$W_{q4,5} = p_3\xi_6 + p_5\xi_7$
6	(3,1)	$W_{q3,1} = W_{6,1}$
7	(4,1)	$W_{q4,1} = W_{7,1}$

Then we formalize the proposed in Fig. 1 GERT-scheme, adapting the input data and Erlang distribution measures to a new generalized structure:

$$\begin{aligned}
 W_{qE}(s) &= \frac{W_{q12}W_{q23}W_{q35} + W_{q12}W_{q24}W_{q45}}{1 - (W_{q12}W_{q23}W_{q31} + W_{q12}W_{q24}W_{q41})} = \frac{p_1^2(\xi_1^2 + 2\xi_1\xi_2 + \xi_2^2)}{1 - q_1\xi_8} \times \\
 &\times \frac{((p_2\xi_3 + p_3\xi_4)(p_4\xi_6 + p_5\xi_7) + p_4\xi_5(p_3\xi_6 + p_5\xi_7))}{1 - ((p_1\xi_1)^2 + 2p_1^2\xi_1\xi_2 + (p_1\xi_2)^2)/(1 - q_1\xi_8)(q_2\xi_8)((p_2\xi_3 + p_3\xi_4) + p_4\xi_5)} = \\
 &= \frac{(p_1^2(\xi_1^2 + 2\xi_1\xi_2 + \xi_2^2))((p_2\xi_3 + p_3\xi_4)(p_4\xi_6 + p_5\xi_7) + p_4\xi_5(p_3\xi_6 + p_5\xi_7))}{(1 - q_1\xi_8) - ((p_1\xi_1)^2 + 2p_1^2\xi_1\xi_2 + (p_1\xi_2)^2)q_2\xi_8((p_2\xi_3 + p_3\xi_4) + p_4\xi_5)}, \tag{6}
 \end{aligned}$$

We will conduct studies of the GERT-model presented as expression 6.

Penetration test algorithms implementation time probability distribution density curves graphs at different values p_1-p_5 , q_1, q_2 , are illustrated in Fig. 4. In this case, curve 1 illustrates the test algorithms random implementation time behavior for the modified scheme of Fig. 2 case and the equivalent W-function represented by the expression 1.

Curve 2 illustrates the penetration test algorithms implementation time synthesized using model 6 probability distribution density results.

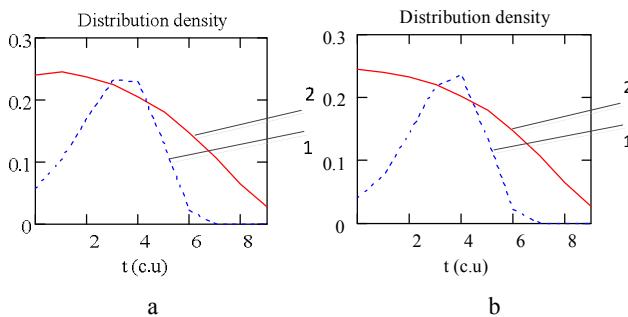


Fig. 4. Penetration test algorithms implementation time obtained using the modified GERT-model for conditions 1 (a) and 2 (b) probability distribution density graphs

Penetration test algorithms implementation time for similar conditions probability distribution function diagrams are given in Fig. 5.

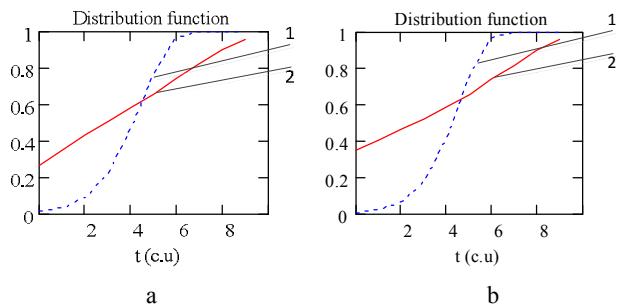


Fig. 5. Penetration test algorithms implementation time obtained using the modified GERT-model for conditions 1 (a) and 2 (b) probability distribution function graphs

The values $W_{qE}(s)$ for the same conditions obtained as a testing processes for penetration into computer systems mathematical simulation result are presented in Table 5.

As we can see from the graphs for both conditions, the test algorithms run time mathematical expectation is close to the value $t \approx 6 \text{ c.u.}$

It is easy to note that the GERT-network transformation using simplified rules requires certain

time and computational costs, which amount depends on the GERT-network complexity and equivalent transformations number.

Table 5 – Values $W_{qe}(S)$ obtained as a testing process for penetration into computer systems mathematical simulation result

No.	$W_{qe}(S)$ (condition 1)	$W_{qe}(S)$ (condition 2)
1	2.197	1.819
2	2.547	2.02
3	2.879	2.213
4	3.206	2.412
5	3.55	2.634
6	3.945	2.898
7	4.435	3.232
8	5.086	3.679
9	6.01	4.313
10	7.415	5.298

In the above example of such transformations, it was necessary to make 5 for 12 initial characteristics.

This represents 41% of the initial operations number.

Therefore, it can be argued that the implementing a unified mathematical model complexity under given conditions is less than 40%. This result confirms the hypothesis that it is advisable to use a testing process for penetration into computer systems modified mathematical model.

Conclusions

The article indicates that penetration testing services are increasingly popular in the IT-industry. At the same time, the scientific papers vast majority consider this cybersecurity assessment type from a practical view point, based on the expertise in various computer and information infrastructures experience. The theoretically reasonable conditions and limitations

reduces the work effectiveness absence is carried out and can lead to an increase in testing errors.

To eliminate this contradiction, in article was developed a generalized testing algorithm, as well as a set of testing process for penetration into computer systems mathematical models. At the same time, the GERT-network modeling approach was taken as the basis for mathematical formalization. This made it possible to simplify the penetration testing scheme, take into account possible changes in procedures (including the new procedures and services addition) to evaluate the probability-time characteristics and the it's scale possibility with an increase in the volume and tasks complexity being solved.

Testing process for penetration into computer systems mathematical model was developed in the article. The proposed model differs from the known by computer systems specialized information platforms security testing capabilities, which made it possible to estimate the penetration test algorithm execution time falling within a given interval probability.

The proposed testing process for penetration into computer systems mathematical model was further developed (modified). Modified model distinctive feature is the Erlang distribution as the main one in the state transition processes mathematical formalization. This made it possible on the one hand to unify the mathematical model and present the testing process at a higher level of the testing hierarchy, on the other hand to simplify it 1.7 times.

A security testing mathematical model was developed in order to estimate the simulation results accuracy, based on the known GERT-networks simplification and modification approach.

Testing algorithms execution time value mathematical expectation values are obtained and estimated. Comparative modeling results investigations have shown the study values comparability for all three approaches of security testing process mathematical formalization. This confirmed the hypothesis that it is advisable to use a unified mathematical formalization approach, which was implemented in a penetration testing process modified mathematical model.

REFERENCES

1. Minaev, V.A., Korolev, I.D., Mazin, A.V. and Konovalenko S.A. (2018), "Model for identifying vulnerabilities in unstable network interactions with an automated system", *Electronics, Radio industry: Central Research Institute of Economics, Control Systems and Information*, No. 2, pp: 48-57.
2. Mikhalev, O.I., Demchenko, V.I. and Korsun D.A. (2007), "Assessment of the throughput capacity of GERT-fences with characteristic functions", *Adaptive systems for automatic control*, No. 11, pp. 25-35.
3. Semenov S. (2012), "Methods of mathematical modeling of secure ITS based on a multilayer GERT network", *Bulletin of the National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute". Series: Informatics and Modeling*, NTU "KhPI", Kharkiv, No. 62 (968), pp. 185-193.
4. Atoum, Issa and Ahmed, Otoom (2017), "A Classification Scheme for Cybersecurity Models", *International Journal of Security and Its Application*, Vol.11, No.1, pp.109-120.
5. Dingyu, Yan (2001), *A Systems Thinking for Cybersecurity Modeling*, arXiv, arXiv:2001.05734.
6. Engebretson, Patrick (2011), *The basics of hacking and penetration testing: ethical hacking and penetration testing made easy*, Elsevier, 159 p.
7. Felderer, Michael, Matthias, Büchler, Martin, Johns, Achim D., Brucker, Ruth, Breu and Alexander, Pretschner (2016), "Security Testing: A Survey", *Advances in Computers*, Vol. 101, pp. 1-51.
8. Garg, Vishal (2020), *Approaches, tools and techniques for security testing*, available at: <https://www.3pillarglobal.com/insights/approaches-tools-techniques-for-security-testing>
9. Goela Jai, Narayan and Mehtreb, B.M. (2015), "Vulnerability Assessment & Penetration Testing as a Cyber Defence Technology", *3rd International Conference on Recent Trends in Computing 2015 (ICRTC-2015)*, pp. 710-715.

10. (2020), ISO/IEC 27001 INFORMATION SECURITY MANAGEMENT, available at: <https://www.iso.org/isoiec-27001-information-security.html>
11. Kim, Peter (2018), *The Hacker Playbook 2: Practical Guide To Penetration Testing*, Secure Planet LLC, 337 p.
12. (2020), *Penetration Testing Methodologies - OWASP Foundation*, available at: https://owasp.org/www-project-web-security-testing-guide/latest/3-The_OWASP_Testing_Framework/1-Penetration_Testing_Methodologies
13. Semenov, S., Sira, O., Kuchuk, N. (2018), "Development of graphicanalytical models for the software security testing algorithm", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 2, No. 4 (92), pp. 39-46, DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.127210>
14. Serhii, Semenov, Viacheslav, Davydov, Oksana, Lipchanska and Maksym, Lipchanskyi (2020), "Development of unified mathematical model of programming modules obfuscation process based on graphic evaluation and review method", *Eastern-european journal of enterprise technologies*, Vol. 3/2(105), pp. 6-16.
15. Sommestad, Teodor, Mathias, Ekstedt and Hannes, Holm (2013), "The Cyber Security Modeling Language: A Tool for Assessing the Vulnerability of Enterprise System Architectures", *IEEE Systems Journal*, vol. 7, no. 3, pp. 363-373, DOI: <https://doi.org/10.1109/JST.2012.2221853>.

Надійшла (received) 25.06.2020
Прийнята до друку (accepted for publication) 02.09.2020

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Семенов Сергій Геннадійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри "Обчислювальна техніка та програмування", Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;
Serhii Semenov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Computer Engineering and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: s_semenov@ukr.net; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-4472-9234>.

Цао Вейлін – викладач інформаційного центру ІТ, Типовий університет Нейцзяна, Нейцзян, Кітай;
Cao Weilin – teacher, Department of IT information Centre, Neijiang Normal University, Neijiang, China.
e-mail: caowl@njtc.edu.cn; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8230-5235>.

Модифікація математичної моделі процесу тестування на проникнення в комп'ютерні системи

С. Г. Семенов, Цао Вейлін

Анотація. Розроблено математичну модель процесу тестування на проникнення в комп'ютерні системи, що відрізняється від відомих урахуванням можливостей тестування безпеки спеціалізованих інформаційних платформ комп'ютерних систем, що дозволило оцінити ймовірність попадання часу виконання алгоритму тестування на проникнення в заданий інтервал. Запропонована математична модель процесу тестування на проникнення в комп'ютерні системи отримала подальший розвиток (модифікована). Відмінною особливістю даної моделі є використання розподілу Ерланга в якості основного при математичної формалізації процесів переходу зі стану в стан. Це дозволило з одного боку уніфікувати математичну модель і уявити процес тестування на більш високому рівні ієрархії тестування, з іншого боку спростити її в 1,7 рази. Для оцінки точності результатів моделювання, на основі відомого підходу спрощення та модифікації GERT-мереж, розроблено математичну модель тестування безпеки. Отримано і оцінені значення математичного очікування величини часу виконання алгоритмів тестування. Порівняльні дослідження результатів моделювання показали порівнянність значень досліджуваних величин для всіх трьох підходів математичної формалізації процесу тестування безпеки. Це підтвердило гіпотезу про доцільність використання уніфікованого підходу математичної формалізації, який отримав реалізацію в модифікованій математичній моделі процесу тестування на проникнення.

Ключові слова: комп'ютерна система; програмне забезпечення; тестування; математична модель.

Модификация математической модели процесса тестирования на проникновение в компьютерные системы

С. Г. Семенов, Цао Вейлин

Аннотация. Разработана математическая модель процесса тестирования на проникновение в компьютерные системы, отличающаяся от известных учетом возможностей тестирования безопасности специализированных информационных платформ компьютерных систем, что позволило оценить вероятность попадания времени выполнения алгоритма тестирования на проникновение в заданный интервал. Предложенная математическая модель процесса тестирования на проникновение в компьютерные системы получила дальнейшее развитие (модифицирована). Отличительной особенностью данной модели является использование распределения Эрланга в качестве основного при математической формализации процессов перехода из состояния в состояние. Это позволило с одной стороны унифицировать математическую модель и представить процесс тестирования на более высоком уровне иерархии тестирования, с другой стороны упростить ее в 1,7 раза. Для оценки точности результатов моделирования, на основе известного подхода упрощения и модификации GERT-сетей, разработана математическая модель тестирования безопасности. Получены и оценены значения математического ожидания величины времени выполнения алгоритмов тестирования. Сравнительные исследования результатов моделирования показали сопоставимость значений исследуемых величин для всех трех подходов математической формализации процесса тестирования безопасности. Это подтвердило гипотезу о целесообразности использования унифицированного подхода математической формализации, получившего реализацию в модифицированной математической модели процесса тестирования на проникновение.

Ключевые слова: компьютерная система; программное обеспечение; тестирование; математическая модель.

Applied problems of information systems operation

UDC 621.396

doi: 10.20998/2522-9052.2020.3.20

Oksana Biesova¹, Vladimir Karlov¹, Olena Lukashuk¹, Valentin Petrushenko²¹ Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine² Military unit A2183, Ukraine

SIGNAL RELAY TIME MEASURER REFLECTED FROM A SMALL PURPOSE AT ITS LOCATION OVER THE SEA

Abstract. In the article possibility of account of phase fluctuations of signals reflected is examined from littlepitch aims location, during optimization of process of measuring of time of delay of signal. The process of optimization of measuring of distance to the aim on conditions of superrefraction is examined in supposition, that fluctuations of the signals reflected from лоцируемых aims up-diffused on a normal law, and the cross-correlation function of these fluctuations has an arbitrary kind. Within the limits of suppositions got correlation for the optimal estimation of time of delay of the reflected signals. Using the obtained ratios to determine the delay time and the variance of the group delay estimation, the target distance meter was synthesized under the radar of the target above the sea beyond the line of sight for the case when the correlation function of phase fluctuations is described by an exponential function. The proposed optimal estimation algorithm and rangefinder can be used to construct promising radar locations for low altitude targets. The use of such a meter can improve the accuracy of measuring the target range from 2 to 2,5 times.

Keywords: rangefinder; phase fluctuations; cross-correlation function; dispersion.

Introduction

Formulation of the problem. Usually, when working, developing and designing radar stations (RS), airspace intelligence engineers try to reduce the impact of additive interference (generator noise, active interference etc.) on the tactical and technical characteristics of the radar stations. The impact of multiplicative interference caused by the change in the refractive properties of the medium of propagation of radio waves on the operation of RS is not taken into account. This fact does not allow to fully realize the capabilities of RS for the detection and maintenance of air targets with a given accuracy. Analysis of the work [1, 2] showed that to improve the quality of radar at the location of the low altitude target, it would be advisable to conduct rapid diagnosis of propagation conditions in the inspection area RS.

It is known that a change in the type of refraction can cause both a decrease and an increase in the detection range of radar facilities. The reason for this phenomenon is the presence of inhomogeneities of the troposphere on the route. The presence of tropospheric inhomogeneities on the track of propagation of radio waves can in some cases increase the range of radio equipment [3, 4, 5]. However, the location of targets beyond the line of sight increases the errors of determining spatial coordinates. According to experimental data [6-11], in determining the target range beyond the line of sight for every kilometer of the distance to the object fluctuating measurement error range can reach ten meters, which does not allow to fully realize the capabilities of anti-aircraft missile systems for the destruction of low altitudes goals.

Analysis of recent research and publications. Analysis of recent publications has shown that when locating a low altitude target beyond the line of sight,

using the phasometric distance measurement method, errors in measuring the range of that target increase. As shown in [8-11], this is due to the appearance together with the uncorrelated and correlated components of the phase fluctuations of the signals reflected from low-altitude targets, which are in the troposphere beyond the line of sight.

A number of papers [8-13] have become the theoretical basis for optimizing the signal delay measurement process. In these works, the process of optimizing the measurement of the distance to the target under the conditions of superrefraction is considered on the assumption that the fluctuations of the signals reflected from the low altitude targets are distributed according to the normal law, and the correlation function of these fluctuations has an arbitrary appearance. Within the assumptions, the ratios were obtained to optimally estimate the delay time of the reflected signals.

In order to be able to improve the accuracy of the determination of the range of aerial objects in a particular radar sample, it is necessary, first of all, to have adequate structural diagrams of the rangefinders. In the known literature [6], circuits of range meters for the case where the fluctuations of the phase of the signals reflected from the targets are distributed according to normal law are considered, and the correlation function of these fluctuations has an arbitrary appearance.

In this paper, we propose an optimal estimation algorithm and a device that implements this algorithm for the case where the correlation function of phase fluctuations is exponential.

The purpose of the article is to construct a structural diagram of the device of the delay time signal of the reflected from the low altitude target, provided that the fluctuations of the phase of the reflected signals

are distributed by normal law, and the correlation function of the phase fluctuations is exponential.

Main part

As was established in [7-11], the phase fluctuations of the frequency components of the signal reflected from the low altitude target at its location above the sea are distributed according to normal law. This allowed us to optimize the process of measuring the range by the criterion of maximum logarithm of the likelihood ratio. According to this criterion, [12, 13] obtained the relations for measuring the delay time and the variance of the estimation of the group delay using the correlation function of phase fluctuations, which is given in the general form.

As shown in [12-14], the Optimal Delay Time Estimation is as follows:

$$\hat{t}_3 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} y(\Omega) R(\Omega) d\Omega}{\int_{-\infty}^{\infty} \Omega \text{rect}(\Omega/\Delta\Omega) R(\Omega) d\Omega}; \quad (1)$$

where $y(\Omega) = x(\Omega) + n(\omega_0 + \Omega)$ – the input signal having the form of the sum of the expected signal, $x(\Omega)$ and phase noise $n(\omega_0 + \Omega)$; $\Delta\Omega$ – the width of the probe signal spectrum; ω_0 – carrier frequency; $R(\Omega)$ – a weight function.

According to [12-14], the ratio for the variance of the estimation of the group delay time is written as follows:

$$\sigma_t^2 = \frac{144}{\Delta\Omega^6} \int_{-0,5\Delta\Omega}^{0,5\Delta\Omega} \int \Omega \Omega_1 \Phi(\Omega, \Omega_1) d\Omega d\Omega_1; \quad (2)$$

where $\Phi(\Omega, \Omega_1)$ – the correlation function of the phase fluctuations of the frequency components of the signal.

Since, when the signal is propagated to and from the target, the effect of the medium is on its frequency components, the equation with the weight function will, in this case, be:

$$\int_{-0,5\Delta\Omega}^{0,5\Delta\Omega} \Phi(\Omega, \Omega_1) \text{rect}\left(\frac{\Omega}{\Delta\Omega}\right) R(\Omega_1, t_3) = x(\Omega). \quad (3)$$

If the phase fluctuations of the frequency components of the signal are described by an exponential correlation function:

$$\Phi(\Omega, \Omega_1) = \sigma_\varphi^2 \exp\left\{-\frac{1}{\rho} |\Omega - \Omega_1|\right\}, \quad (4)$$

then the integral equation for finding the weight function will be:

$$\int_{-0,5\Delta\Omega}^{0,5\Delta\Omega} \exp\{-|\Omega - \Omega_1|/\rho\} R(\Omega_1, t_3) \times \sigma_\varphi^2 \text{rect}(\Omega/\Delta\Omega) = \Omega t_3 \text{rect}(\Omega/\Delta\Omega). \quad (5)$$

To solve it, we differentiate twice the left and right parts, give similar and, given that $R(\Omega, t_3) = t_3 R(\Omega)$, we get:

$$R(\Omega) = \frac{\rho}{2\sigma_\varphi^2} \left\{ \begin{array}{l} \frac{\Omega}{\rho^2} \text{rect}\left(\frac{\Omega}{\Delta\Omega}\right) - \left(\frac{\Delta\Omega}{2\rho} + 1\right) \times \\ \times [\delta(\Omega + \Delta\Omega/2) - \delta(\Omega - \Delta\Omega/2)] \end{array} \right\}, \quad (6)$$

where $\delta(\Omega \pm \Delta\Omega/2)$ – delta function.

Determine the variance of estimation of the optimal measurement of group delay in this case. Substituting (5) into (2), we obtain:

$$\sigma_{t \text{ onm}}^2 = \frac{\sigma_\varphi^2}{\Delta\Omega^2} \cdot \frac{12c}{1 + 3c + 3c^2}. \quad (7)$$

We get an expression for an algorithm for optimal measurement of group delay (range to target). Using the relation (5), respectively, we obtain the finite relation:

$$\hat{t}_3 = K_1 \cdot \int_{-0,5\Delta\Omega}^{0,5\Delta\Omega} \Omega y(\Omega) d\Omega + K_2 [y(\Delta\Omega/2) - y(-\Delta\Omega/2)], \quad (8)$$

where K_1 and K_2 – weighting factors.

The weights are as follows:

$$K_1 = 12 \left[\Delta\Omega^3 (1 + 3c + 3c^2) \right]^{-1}; \quad (9)$$

$$K_2 = (3c + 3c^2) \left[\Delta\Omega (1 + 3c + 3c^2) \right]^{-1}; \quad (10)$$

The scheme of the device that implements the obtained algorithm (8) is shown in Fig. 1.

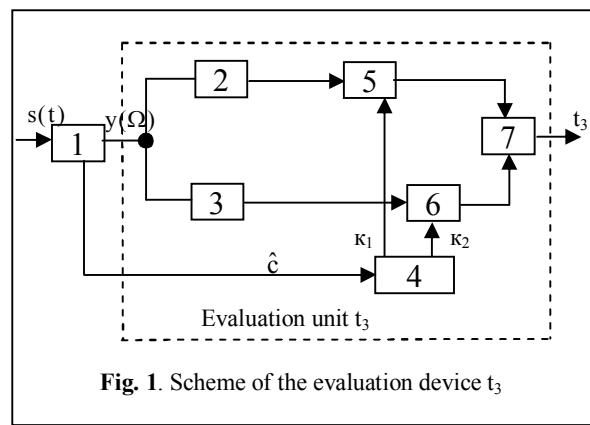


Fig. 1. Scheme of the evaluation device t_3

The operation of the device is as follows. The implementation of the radar signal is accepted

$$S(t) = (1/(2\pi)) \cdot \exp(j\omega_0 [t - \varphi_0(\omega_0)/\omega_0]) \times \int_{-\infty}^{\infty} G(\Omega) \exp(j[\Omega [t - \varphi(\omega_0)] - n(\omega + \Omega)]) d\Omega$$

enters the block of formation of linear phase induction of frequency components of signal 1 (block of formation $y(\Omega)$ and relative interval of correlation of phase fluctuations \hat{c}).

From the output of block 1, the implementation of the phase in $y(\Omega)$ enters the block estimation delay. In this block, according to algorithm (8), an optimal estimate t_3 is formed. In this case, in block 2, the

integral is calculated $\int_{-0,5\Delta\Omega}^{0,5\Delta\Omega} Qy(\Omega)d\Omega$ and in block 3, the ratio is calculated $[y(\Delta\Omega/2) - y(-\Delta\Omega/2)]$ in accordance with algorithm (8).

The output of block 2 is connected to the input of one of the blocks 5, the other input of which receives a voltage proportional to the coefficient k_1 formed in block 4. The output of block 5 is connected to one of the inputs of block 7, the other input of which is connected to the output of block 6, one of the inputs of which is connected to the output of block 3, and the other with the output of the block 4 on which the voltage is generated, proportional to the coefficient k_2 . The weights k_1 and k_2 correspond to the coefficients of the additives of formula (8) and are determined in the block of formation of weights 4, which receives the estimated value of the relative correlation interval of phase fluctuations $\hat{c} = 2\hat{\rho}\Delta\Omega^{-1}$ from block 1. In blocks 5 and 6, multiplication is carried out, and in block 7 - summation of the voltage supplied to their inputs.

We compare the variance of the optimal measurement of the group delay of the algorithm (8) with the variance of the measurement error according to t_3 , to the algorithm, which does not take into account the correlation of phase fluctuations. According to (2), for the variance of the measurement error according to an algorithm optimal for uncorrelated phase fluctuations, we obtain the relation:

$$\sigma_t^2 = 12\sigma_\phi^2/\Delta\Omega^2 \times \left\{ c - \frac{3}{2}c^2(1+c)[e^{-2/c} + 1 + c(e^{-2/c} - 1)] \right\}. \quad (11)$$

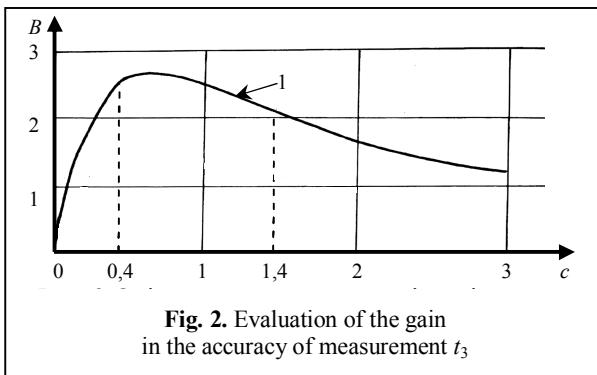
Using relation (11), we estimate the gain (B) in the accuracy of measurement t_3 , which is ensured by using the proposed optimal algorithm, using the expression:

$$B = \sigma_t^2 / \sigma_{t_{onm}}^2. \quad (12)$$

REFERENCES

1. Hitney, G.V., Richter, Yu.H., Pappert, R.A., Anderson, C.D., Baumgarter, J.B. (1985), "Propagation of radio waves in the troposphere, *TIIER*, V. 73, No. 2, pp. 106–128.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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 reflected from a target located outside the horizon above the sea", *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, No. 1 (14), pp. 115-117.
6. 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.
7. 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 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.
8. Donets V., Kuchuk N., Shmatkov S. (2018), "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>.
9. Kuchuk G., Nechausov S., Kharchenko, V. (2015), "Two-stage optimization of resource allocation for hybrid cloud data store", *Int. Conf. on Inf. and Digital Technologies*, P. 266-271. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/DT.2015.7222982>

The results of calculation B are shown in Fig. 2.



From the data shown in Fig. 2, it is clear that in the range of values of $c = 0,4 - 1,4$ the accuracy gain is from 2 to 2,5 times.

Conclusions

Therefore, the feature of measuring the distance to the low-altitude target framed at a distance, the greater the line of sight, is to take into account, together with the uncorrelated and correlated frequency components of phase fluctuations reflected from the target signal in the frequency domain. In this case, the estimated delay time of the reflected signal assuming a normal law of distribution of phase fluctuations in the frequency domain will be unchanged.

Using the obtained ratios to determine the delay time and the variance of the group delay estimation, the target distance meter was synthesized under the radar of the target above the sea beyond the line of sight for the case when the correlation function of phase fluctuations is described by an exponential function.

The proposed optimal estimation algorithm and rangefinder can be used to construct promising radar locations for low altitude targets. The use of such a meter can improve the accuracy of measuring the target range from 2 to 2,5 times.

10. Nechausov A., Mamusuć I., Kuchuk N. (2017), "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>
11. Kuchuk G., Kovalenko A., Komari I.E., Svyrydov A., 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
12. Svyrydov, A., Kuchuk, H., Tsiaipa, O. (2018), "Improving efficiency 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>
13. 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>
14. 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.
15. Shifrin, Ya.S. (1970), *Statistical antenna theory issues*, Sov. radio, Moscow, 383 p.

Received (надійшла) 10.06.2020

Accepted for publication (прийнята до друку) 12.08.2020

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Бесова Оксана Василівна – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник наукового центру Повітряних Сил, Харківський національний університет Повітряних Сил, Харків, Україна;

Oksana Biesova – Candidate of Technical Sciences, Senior Research of the Air Force Scientific Center, Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: bytko75@ukr.net; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-7744-1339>.

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>.

Лукашук Олена Вячеславівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри фізики та радіоелектроніки, Харківський національний університет Повітряних Сил, Харків, Україна;

Olena Lukashuk – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Physics and Radio Electronics Department, Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: dlvavac@ukr.net; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8721-2433>.

Петрушенко Валентин Миколайович – командир в/ч А2183, Україна;

Valentin Petrushenko – commander of military unit A2183, Ukraine;

e-mail: petrusenkovalentin27@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5829-5433>.

Вимірювач часу затримки сигналу, відбитого від маловисотної цілі при її локації над морем

О. В. Бесова, В. Д. Карлов, О. В. Лукашук, В. М. Петрушенко

Анотація. В статті запропоновано алгоритм оптимального оцінювання часу затримки сигналу при радіолокації маловисотних цілей. Алгоритм враховує наявність фазових флюктуацій відбитих від маловисотних цілей сигналів, які обумовлені середовищем поширення радіохвиль. В роботі представлена структурна схема пристрою, який реалізує запропонований алгоритм оцінювання часу затримки. При цьому кореляційна функція фазових флюктуацій описується експоненційною функцією. Розрахунки, які наведені в статті, свідчать про те, що використання запропонованого вимірювача дальності дозволяє підвищити точність оцінювання дальності від 2 до 2,5 разів. Використовуючи отримані співвідношення для визначення часу затримки і дисперсії оцінки групової затримки, був синтезований далекомір до мети під РЛС мети над морем за межами прямої видимості для випадку, коли кореляційна функція фазових флюктуацій описується експоненційною функцією. Запропонований алгоритм оптимального оцінювання та далекомір можуть бути використані для побудови перспективних радіолокаційних локацій для маловисотних цілей. Використання такого вимірювача дозволяє підвищити точність вимірювання дальності до цілі від 2 до 2,5 разів.

Ключові слова: вимірювач дальності; фазові флюктуації; кореляційна функція; дисперсія.

Измеритель времени запаздывания сигнала, отраженного от маловысотной цели при ее локации над морем

О. В. Бесова, В. Д. Карлов, Е. В. Лукашук, В. Н. Петрушенко

Аннотация. В статье предложен алгоритм оптимального оценивания времени запаздывания сигнала при радиолокации маловысотных целей. Алгоритм учитывает наличие фазовых флюктуаций отраженных от маловысотных целей сигналов, которые обусловлены средой распространения радиоволн. В работе представлена структурная схема устройства, реализующего предложенный алгоритм оценивания времени задержки. При этом корреляционная функция фазовых флюктуаций описывается экспоненциальной функцией. Расчеты, представленные в статье, свидетельствуют о том, что использование предложенного измерителя дальности позволяет повысить точность оценивания дальности от 2 до 2,5 раз. Используя полученные соотношения для определения времени задержки и дисперсии оценки групповой задержки, был синтезирован дальномер до цели под РЛС цели над морем за пределами прямой видимости для случая, когда корреляционная функция фазовых флюктуаций описывается экспоненциальной функцией. Предложенный алгоритм оптимального оценивания и дальномер могут быть использованы для построения перспективных радиолокаций для маловысотных целей. Использование такого измерителя позволяет повысить точность измерения дальности до цели от 2 до 2,5 раз.

Ключевые слова: измеритель дальности; фазовые флюктуации; корреляционная функция; дисперсия.

Ihor Hryhorenko, Svitlana Hryhorenko, Mykola Ovcharenko

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine

SUBSTANTIATION OF THE CHOICE OF METHODS OF NON-DESTRUCTIVE TESTING OF ELEMENTS OF ENERGY EQUIPMENT USING A FUZZY LOGIC APPARATUS

Abstract. The paper illustrates the solution of the problem of choosing methods of quality control of manufacturing parts and assemblies of power equipment using a fuzzy logic device. The main methods of non-destructive testing for the detection of surface and internal defects are considered, as well as the main indicators of quality of metal products. The types of metal defects and welded joints are inspected. The description of the equipment and means of control for detection of defects is executed. The sequence and methods of quality control by ultrasonic, capillary and magnetic powder methods of control are described in detail. The results of quality control of parts during production and during their operation are obtained. The analysis of the revealed defects is carried out. An example of using an integrated approach to control is given. The obtained results of control of the percentage of coincidence of detection of defects on the product are analyzed. Comprehensive quality control was performed by visual, ultrasonic, capillary and magnetic powder methods of non-destructive testing to determine the percentage of coincidences of defects. By creating a heuristic analyzer based on the interface of the fuzzy logic system Fuzzy Logic Toolbox of the Matlab program, an example of determining a combination of non-destructive testing methods for quality control of a steam turbine bearing liner is considered. Computer simulation according to the Mamdani algorithm is carried out, which consists of fuzzification with determination of ranges of change of input values for each example, task of distribution functions for each input parameter; calculation of rules based on the adequacy of the model; defuzzification with the transition from linguistic terms to quantitative assessment and graphical construction of the response surface. The simulation made it possible to determine the optimal combination of non-destructive testing methods, which provides the highest quality of defect detection in the steam turbine bearing liner.

Keywords: control object; defect; non-destructive testing; fuzzy logic; heuristic analyzer; fuzzification; defuzzification; quality control.

Introduction

The development of modern energy, machine-building and metallurgical production is inextricably linked with the creation and improvement of methods and means of non-destructive testing (NDT), allowing to ensure high reliability and safety. Improving the quality and reliability of industrial products is possible under the condition of continuous improvement of production technology and continuous quality control of products. Control of product parameters in the industry is characterized by sufficient complexity and high cost, so the task of introducing mass control of product parameters without increasing their cost is timely and relevant. To assess the technical condition of critical facilities and units of power equipment at various stages of production and operation in many industries, the methods of NDT are widely used. Among a large number of methods and means of NDT objects and units of power equipment, a special place is occupied by ultrasonic, color (luminescent) and magnetic powder methods.

For the implementation of modern flaw detection use a wide range of serial devices and non-destructive testing, but in each case, there is a specificity (structure and properties of the object of control, its shape and design, etc.), which necessitates additional research and development of specialized controls. This is especially evident during flaw detection of products with a complex surface. An important problem is the display of the shape and size of the detected defects in the products, which are both in operation and during their manufacture.

Very often the use of one control method is not enough to check the quality of the product in accordance with the technical documentation for the

product. In such cases, a set of NDT methods is used. In some cases, in practice, there may be problems for which the use of known methods (or techniques) of NDT is not effective. In these cases, research institutes and plants are developing new special methods, tools and techniques of non-destructive testing. Therefore, the substantiation of the use of the necessary methods of NDT and the means that implement and ensure the identification and determination of the characteristics of defects of parts and components of power equipment, is an urgent scientific and practical task.

Analysis of basic research and publications. One of the main priorities in the production of most products is the quality of the final product. The struggle to improve the quality of manufactured products is synonymous with the struggle for the consumer in a free market [1 – 5]. This statement is especially important in the manufacture and operation of critical products and structures. Obviously, a defective unit used in a particular mechanism or structure is much less, and failure in the best case will cause the mechanism to stop, at worst – can lead to disaster. Thus, quality control is a prerequisite for metal products, which are components and parts of the responsible objects.

For qualitative assessment of such objects, the methods of NDT are widely used [1, 2].

According to the current standard [4 – 5] in non-destructive testing it is accepted to classify 9 types of NDT, which unite on the basis of the used physical phenomena and the nature of probing fields.

It is necessary to allocate the most widespread in technique methods of NDT for the comparative analysis and revealing of their advantages and lacks for the decision of problems of flaw detection.

Objects of control differ in a wide variety of forms, properties of materials, and also the list of defects characteristic of them. This necessitates the analysis of the main problems in the control of various methods. This is especially true of metal products, which occupy a leading position in terms of output. One of the main indicators of the quality of metal objects is the presence of defects.

Defects can impair physical and mechanical properties of metals, such as strength, ductility, density, electrical conductivity, magnetic permeability, etc. They are often divided into overt and covert. The first is detected by a visual method of control or by means of tools and methods that are given in the regulatory documentation. If the defects are most likely detected by appropriate instrumental methods of NDT, but are not detected visually, they are also classified as obvious. The latent defect cannot be detected by the intended method and equipment. Defects are also divided into critical, the presence of which makes the use of products for their intended purpose impossible or dangerous; significant – significantly affect the performance of the product or its durability; insignificant, which do not have such an impact, as well as insurmountable and surmountable.

By origin, defects are divided into production-technological and operational. The first include metallurgical defects that occur during casting and rolling; technological, arising during the manufacture of products and their repair, and before the operational – defects that occur after some operation of the products due to fatigue of the metal, their elements, corrosion, wear, as well as improper maintenance and operation.

According to the number and nature of distribution in the products, the defects can also be single, local (cracks, shells, etc.), distributed in limited areas, such as areas of corrosion, distributed throughout the product, for example, the heterogeneity of chemical composition; external (surface and subsurface) and internal (deep).

By the nature of geometric parameters, defects can be point, linear, planar and three-dimensional.

Depending on the size of metal defects are divided into sub microdefects, microdefects and macro defects.

Macro defects can be small or large. Usually, for the classification and identification of macro defects, their morphological and genetic characteristics are used.

Analysis of works [1 – 3] shows that the most common and dangerous defects are cracks of different origin. Under the influence of residual and operating stresses, cracks can propagate at high speeds. Therefore, the micro- destruction caused by them often occurs almost instantly and poses a high risk. Moreover, in comparison with extended cracks of all kinds, round defects are less dangerous and more static in their development.

Thus, the assessment of the nature of the defect (whether it is long or rounded) is important information in diagnosing and predicting the residual life of the test object.

The aim of the study. When choosing a method or a set of NDT methods for specific parts or assemblies, it is necessary to take into account the following main factors: the nature (type) of the defect

and its location, the sensitivity of the control method, the working conditions of the parts and technical specifications for the product, the part material, the condition and roughness of the surface, the shape and size of the part , condition and roughness of the surface, shape and size of the part, control zones, accessibility of the part and the control zone, control conditions [1 – 3].

The study used three main methods of non-destructive testing that are used at enterprises and plants in the manufacture of parts and assemblies of power equipment, namely: capillary (color flaw detection), magnetic particle and ultrasonic testing. They were not chosen in vain, since they have a number of advantages and features in use (ease of control, speed, sensitivity, information content). It is the integrated control that makes it possible to assess the quality of the product as a whole.

Main part

Ultrasonic Testing method of product quality control. Let us consider ultrasonic testing using the example of welded joints of the rotor frame of the SGK 538 / 160-70UHL4 hydrogenator, which was operated at one of the Ukrainian hydroelectric power plants (Fig. 1). The method of control and adjustment of the flaw detector was carried out according to DSTU, drawings and other normative and technical documentation. To complete the task, the surface of the test object was prepared in accordance with the methodological instructions, in our case it is a fragment of the butt welded joint of the hydrogenator rotor rim discs to each other (Fig. 2) and setting up the flaw detector for operation.



Fig. 1. The skeleton of the rotor of the hydrogenator



Fig. 2. Fragment of the butt welded joint of the rotor rim disks

The control was carried out with a UD4-TM flaw detector and a SWB 45-2 converter, which was initially set up according to the control method on a standard sample V2 (setting the depth gauge, vibration velocity in the material and other auxiliary values of the transducer) and built an electronic ADD diagram (amplitude-distance-defect) for a fixation level of a defect equal to 2 mm. Next, we gradually move on to control. During the inspection, it was revealed that on the fragment of the butt welded joint, which had to be inspected, with the section length $L = 400$ mm, single load-bearing integrity was revealed that did not exceed the fixation level, as well as lack of penetration of the root of the seam, which is unacceptable for all types of welded joints.

The results obtained indicate that the detected lack of penetration must be corrected. Modern standards for assessing the quality of products do not allow the use of products with these types of defects.

Penetrant Testing method of product quality control. Let us consider the Penetrant Testing method (color defectoscopy) using the example of the bearing shell of a steam turbine bearing (Fig. 3), which are intended for operation at a thermal power plant in Ukraine.



Fig. 3. Steam turbine bearing insertion

Fulfillment of the task for carrying out the Penetrant Testing method (color defectoscopy) on the example of the bearing shell of a steam turbine bearing. Surface preparation was carried out according to the guidelines. The ambient temperature was $+14^{\circ}\text{C}$, which is favorable for the control. During the control, aerosol cans were used, namely: penetrant – MR68C, cleaner – MR70, developer – MR88. The lighting in the room was combined. The task was to carry out a color defectoscopy of the fit of the babbitt fill to the steel base of the insert.

During defectoscopy, the part was cleaned of dirt and dust and a penetrant was applied. After 5 minutes of exposure, the penetrant was reapplied to improve the permeability of the active substance. After 15 minutes of exposure, the part was cleaned according to the control procedure and the developer was applied. After the developer had dried, linear indications were found on the verge of babbitt pouring and the steel base of the steam turbine bearing shell. Linear indication detected is unacceptable when babbitt casting is in contact with steel base. This indicates that mistakes were made in the

technological process, in the manufacture of the product. In order to accept this part into work, it must be corrected by re-pouring and checking. Modern standards for assessing the quality of products do not allow the use of products with these types of defects. This type of defect can lead to an accident during the operation of the product.

Magnetic particle Testing method of product quality control. Let us consider the Magnetic particle Testing method using the example of a workpiece (forging) for the manufacture of tie rods with M160 thread. Testing methods and flaw detection materials according to GOST, drawings and other normative and technical documentation.

To complete the task, the surface of the test object was prepared, in our case it is a blank (forging) for the manufacture of tie rods with M160 thread. After cleaning the surface, a $20\text{ }\mu\text{m}$ layer of contrasting white paint is applied to it, as the magnetic suspension in black MR76S will be used. In our case, we use a magnetizing device (yoke) AC-42 V, operating on alternating current using the applied field method. The magnetic field strength on the controlled area of the object surface is $H = 2.2\text{ kA/m}$. We slowly magnetize the workpiece and apply a magnetic suspension. After holding on the surface of the test object, a linear indication with a length of $L = 42\text{ mm}$ appeared, which is located at the point of thread cutting.

Having analyzed the width of the display opening and its length, one can declare the inadmissibility of defects of this type. The blank is not suitable for further stud production. This type of defect can lead to an accident during the operation of the product.

Comprehensive non-destructive testing of products quality control. On the above-described products of units and parts of power equipment, a comprehensive quality control was carried out by the following main NDT methods, such as visual, ultrasonic, magnetic particle and penetrant testing, which made it possible to determine the percentage of coincidences in the detection of defects, the results of which are shown in Table 1.

After analyzing the results obtained, we can conclude that it is necessary to use comprehensive quality control of products, since it is impossible to highlight the importance of one of the main methods. Only an integrated approach makes it possible to judge the presence and nature of the identified defects, taking into account all the advantages and features of using NDT methods. Using the example of a common test object (a bearing shell of a steam turbine bearing), we will consider the expediency of using a complex NDT.

Assessment of the quality of control using a fuzzy logic apparatus. In practice, when evaluating metal products by NDT methods and tools, it becomes necessary to find a balance between the reliability of the results and the cost of testing. The economic feasibility of NDT is one of the main indicators of competitiveness in the market for such control services. So, there is a need to determine a combination of such NDT methods, allowing to obtain the greatest reliability of control results while minimizing the cost of its implementation.

Table 1 – The percentage of coincidences in the detection of defects

Product name	NDT methods				Percentage of coincidences in detecting defects, %
	Visual Testing	Ultrasonic Testing	Magnetic particle Testing	Penetrant Testing	
Fragment of the butt-welded section of the rotor rim disks	-	+	-	-	25
Steam turbine bearing support shell	+	+	+	+	100
Tie rod (workpiece)	-	-	+	+	50

The solution to this problem is possible due to the use of a fuzzy logic apparatus, is widely used in solving control problems, evaluations in decision-making systems under fuzzy, blurry conditions. The subject of fuzzy logic is the study of judgments in conditions of fuzzy. Calculations and construction of fuzzy logic diagrams can be performed using the MatLab computer program in the fuzzy logic application.

Let us consider using an example of determining a combination of NDT methods for quality control of a steam turbine bearing support shell, how a fuzzy logic system works.

Quality control of the manufacturing of the steam turbine bearing support shell can be carried out using the radiation monitoring method.

This control method gives the most reliable results (in this case) and can be taken as exemplary (100% quality).

However, this method is the most expensive and most dangerous compared to other methods. Not every enterprise has the ability to use radiation monitoring due to its complexity, danger, and the need for qualified specialists. In such cases, production workers are trying to replace radiation control with other methods. No doubt, the combined control gives the most reliable results, but how to determine the appropriate combination of methods to use?

Currently, there are many fuzzy logic algorithms. Most often everyone uses the following methods: Mamdani, Tsukamoto, Sugeno, Larsen. The main analytical relations describing the functioning of the Mamdani algorithm, presented in [6]. In works [7 – 9] the possibilities of using the Mamdani algorithm are presented. The paper [10] presents a solution to the problem of classifying defects in metal pipes of oil and gas pipelines using the Mamdani fuzzy inference algorithm and the Sugeno fuzzy knowledge base. In [11], a method was proposed to improve the accuracy of detecting defects in metal products, the possibility of using the apparatus of the theory of fuzzy sets to determine such parameters of the transducer that would give the opportunity to minimize the error in determining a defect was proved. In [12], the solution to the problem of controlling the accuracy of the parameters of the technological process of producing kefir and improving its quality by creating a heuristic analyzer is considered.

To build a heuristic analyzer, we first use the Mamdani fuzzy inference algorithm. Since the

enterprise considers the possibility of using three control methods (visual control is input and is not taken into account), the model should have three inputs and one output. Select the Penetrant Testing (PT) as the first input.

The second input is the Ultrasonic Testing (UT). The third entry is the Magnetic Particle Testing (MT). We select the quality of control (Quality) as the initial value (Fig. 4).

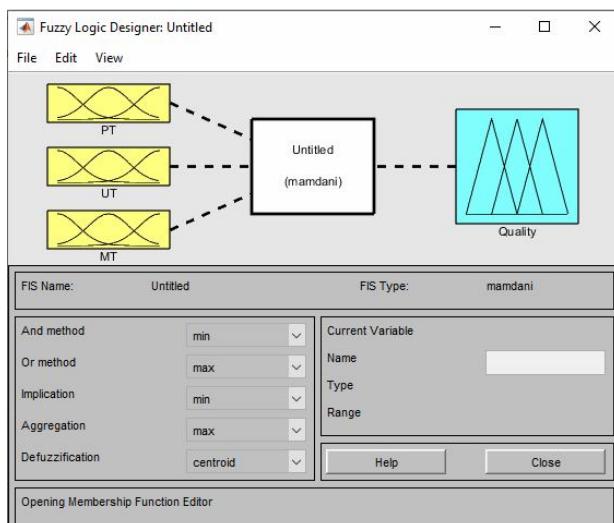


Fig. 4. Window of the task of input and output parameters when monitoring the quality of the state of the bearing shell of a steam turbine bearing

We define membership functions for the selected input variable – the Penetrant Testing (PT). In the Range item, set the range in which the function changes (from 10% to 40%) of defects. We set the type of the membership function in the Type column: for three membership functions, namely the minimum (min), average (middle) and maximum (max), we choose the Gaussian distribution.

Similarly, we set the membership functions for the selected input variable – the Ultrasonic Testing (UT). In the Range item, set the range in which the function changes (from 25% to 80%).

We set membership functions for the selected input variable – the Magnetic Particle Testing (MT). In the Range item, set the range in which the function changes (from 35% to 70%).

We set membership functions for the selected initial variable – quality control. In the Range item, set the range in which the function changes (from 0% to

100%). We set the type of the membership function in the Type column: for three membership functions, namely the minimum quality, average quality and high quality, we choose the distribution (trimf) a triangular distribution law. We set the rules according to which the model will operate. The rules are based on the model:

the rule 1: $IF [x \in A_1] AND [y \in B_1] TO [z \in C_1]$;

the rule 2: $IF [x \in A_2] AND [y \in B_2] TO [z \in C_2]$;

the rule 3: $IF [x \in A_3] AND [y \in B_3] TO [z \in C_3]$,

where $x, y, z \dots$ – nominal output (input) linguistic variables, $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3, C_1, C_2, C_3 \dots$ – are some fuzzy sets, described by their membership functions.

In the "rules" window, we will compose rules that characterize how the quality of control changes depending on the selected combination of control methods (Fig. 5).

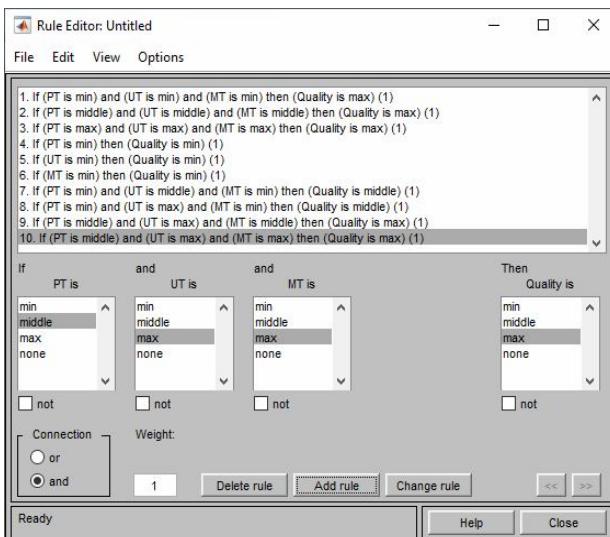


Fig. 5. Window for setting rules



a



b

Fig. 6. Window of variable values window:
a – at 50% compliance with the input parameters;
b – at 100% compliance with the input parameters

In Fig. 6. the windows of the values of the variables are presented:

a – at 50% compliance with the input parameters;

b – at 100% compliance with the input parameters.

The response surfaces for a combination of control methods are shown in Fig. 7.

Conclusions

1. The study examined three main methods of non-destructive testing quality of power equipment products: ultrasonic, capillary and magnetic particle NDT methods.

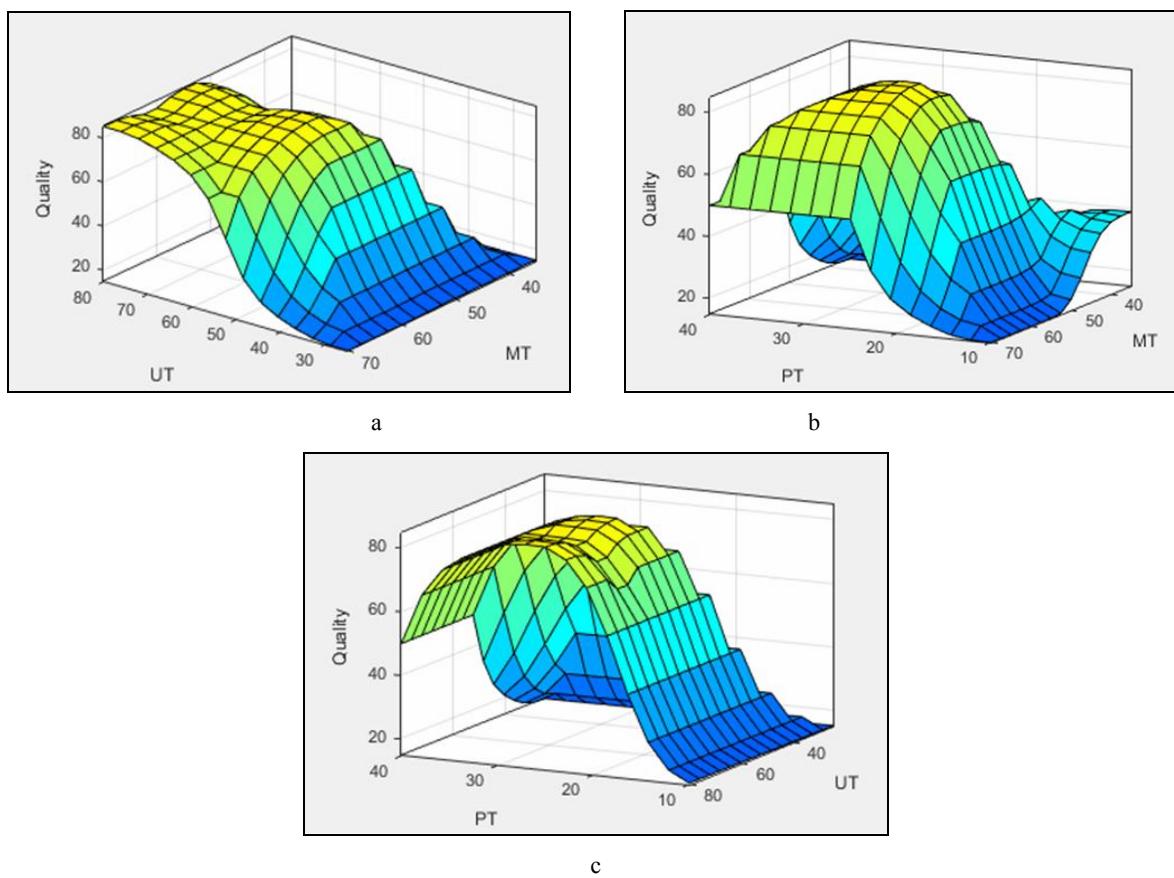
The results of quality control of parts at various stages of production and operation are analyzed in detail, as well as a reasonably comprehensive approach to performing non-destructive testing.

The revealed defects only indicate the need to implement the use of a complex of NDT methods at all stages of production and operation of products. This can save not only the funds of enterprises, but also human lives.

2. By means of the graphical user interface, it was possible to build a fuzzy logic system that solves the problem of finding the necessary combination of NDT methods to ensure high quality control of used products.

3. The proposed heuristic analyzer plays the role of an advisor for the defectoscopist-engineer in choosing the necessary combination of methods for carrying out a comprehensive non-destructive quality control of products.

4. From the obtained results of computer simulation, the following conclusion can be drawn: when monitoring the quality of the state of the bearing shell of a steam turbine bearing, it is advisable to use a combination of two methods of non-destructive testing (ultrasonic and magnetic particle), because they give the maximum quality of control at the level of 87%.

**Fig. 7.** Window of variable values window:

- a – the dependence of the quality of control with the combined use of the ultrasonic method and magnetic particle;
 b – the dependence of the quality of control with the combined use of the capillary method and magnetic particle;
 c – the dependence of the quality of control with the combined use of the capillary method of ultrasonic

REFERENCES

1. Efimov, V.V. (2007), *Means and methods of quality management*, Knorus, Moscow, 232 p.
2. Ogvozdin, V.Yu. (2009), *Quality management. Fundamentals of theory and practice*, Textbook, Business and Service, Sixth Moscow, 288 p.
3. Kruglov, M.G. and Shishkov M. (2007), *Quality management as it is*, Eksmo, Moscow, 544 p.
4. (2009), DSTU ISO 9001: 2009, *Quality management systems. Requirements*, available at: http://www.plitka.kharkov.ua/certs/433_iso9001.pdf
5. (2001), DSTU ISO 9004: 2001, *Quality management systems. Performance Improvement Guide*, available at: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=45956
6. Hrihorenko, I. Drozdova T., Hrihorenko S. and Tverynykova E. (2019), “Application of user interface Fuz'zy Logic Toolbox for quality control of products and services”, *Advanced information system*, Vol. 3, No. 4, pp. 118–125, DOI: <http://dx.doi.org/10.20998/2522-9052.2019.4.18>
7. Mochammad, Iswan, Andre Hasudungan, Lubis, Imelda Sri, Dumayanti, Raheliya Br., Ginting and AndysahPutera Utama, Siahaan (2017), “Implementation of Fuzzy Tsukamoto Algorithm in Determining Work Feasibility”, *Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE)*, Vol. 19, Issue 4, Ver. IV, pp. 52–55, DOI: <http://dx.doi.org/10.9790/0661-1904045255>
8. Yu, Zhang, Jun, Chen, Chris, Bingham and Mahdi, Mahfouf (2014), “A new adaptive Mamdani-type fuzzy modeling strategy for industrial gas turbines”, *IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, 6–11 July 2014, Milan, Italy. available at: <http://bwbooks.net/index.php?id1=4&category=comp-lit&author=leolenkov-av&book=2005>
9. Sankar, Ganesh S., Bhargav, Reddy N. and ArulmozhiVarman, P. (2017), “Forecasting air quality index based on Mamdani fuzzy inference system”, *2017 International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICETI)*, 11–12 May 2017, Tirunelveli, India, DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICOETI.2017.8300944>
10. Hryhorenko, I.V., Hryhorenko, S.M. and Gavrylenko, S.Yu. (2017), “Investigation of the possibilities of using the fuzzy-logic apparatus in measuring and classifying defects in metal tubes”, *Ukrainian Metrological Journal*, 2017, vol. 2, pp. 42–49, DOI: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.2.2017.109757>
11. Hryhorenko, I.V. and Hryhorenko, S.M. (2017), “Investigation of the influence of external and internal factors on the error in detecting defects in metal products thanks to the fuzzy-logic apparatus”, *Metrologiya ta priladi*, 2017, vol. 3 (65), pp. 44–48.
12. Hryhorenko, I.V., Hryhorenko, S.M. and Bezborkodij Ye.A. (2018), “Using fuzzy logic to control accuracy and improve product quality”, *Metrologiya ta priladi*, 2018, vol. 3 (71), pp. 52–57.

Received (надійшла) 15.07.2020
 Accepted for publication (прийнята до друку) 23.09.2020

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Григоренко Ігор Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;
Ihor Hryhorenko – PhD, Associate Professor Department of Information and Measuring Technologies and Systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
e-mail: grigmaestro@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4905-3053>.

Григоренко Світлана Миколаївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю і діагностики, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Svitlana Hryhorenko – PhD, Associate Professor Department of Computer and Radio-Electronic Control Systems and Diagnostics, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
e-mail: sngloba@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5375-9534>.

Овчаренко Микола Михайлович – аспірант кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю і діагностики, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Mykola Ovcharenko – graduate student, Department of Computer and Radio-Electronic Control Systems and Diagnostics, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
e-mail: nikolya.etm@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3545-3558>.

Обґрунтування вибору методів неруйнівного контролю елементів енергетичного обладнання за допомогою апарату нечіткої логіки

І. В. Григоренко, С. М. Григоренко, М. М. Овчаренко

Анотація. В роботі проілюстровано рішення задачі вибору методів контролю якості виготовлення деталей та узлів енергетичного обладнання за допомогою апарату нечіткої логіки. Розглянуто основні методи неруйнівного контролю для виявлення поверхневих та внутрішніх дефектів, а також висвітлено основні показники якості металовиробів. Проведено огляд видів дефектів металу та зварних з'єднань. Виконано опис обладнання та засобів контролю для виявлення дефектів. Детально описано послідовність та методика контролю якості ультразвуковим, капілярним та магнітопорошковим методами контролю. Отримано результати контролю якості деталей при виробництві та в процесі їх експлуатації. Проведено аналіз виявленых дефектів. Приведено приклад використання комплексного підходу до виконання контролю. Проаналізовано отримані результати контролю відсотку збігу виявлення дефектів на виробі. Проведено комплексний контроль якості візуальним, ультразвуковим, капілярним та магнітопорошковим методами неруйнівного контролю для визначення відсотку збігів виявлення дефектів. За допомогою створення евристичного аналізатора на базі інтерфейсу системи нечіткої логіки Fuzzy Logic Toolbox програми Matlab розглянуто приклад визначення комбінації методів неруйнівного контролю для контролю якості вкладиші підшипника парової турбіни. Проведено комп'ютерне моделювання за алгоритмом Mamdani, який складається з фазифікації з визначенням діапазонів зміні вхідних величин для кожного прикладу, завданням функцій розподілу для кожного вхідного параметра; обчислення правил, виходячи з адекватності моделі; дефазифікації з переходом від лінгвістичних термів до кількісної оцінки та графічної побудови поверхні відгуку. Моделювання дало змогу визначити оптимальну комбінацію методів неруйнівного контролю, що забезпечує найвищу якість виявлення дефектів у вкладиші підшипника парової турбіни.

Ключові слова: об'єкт контролю; дефект; неруйнівний контроль; нечітка логіка; евристичний аналізатор; фазифікація; дефазифікація; контроль якості.

Обоснование выбора методов неразрушающего контроля элементов энергетического оборудования с помощью аппарата нечеткой логики

И. В. Григоренко, С. Н. Григоренко, Н. М. Овчаренко

Аннотация. В работе проиллюстрировано решения задачи выбора методов контроля качества изготовления деталей и узлов энергетического оборудования с помощью аппарата нечеткой логики. Рассмотрены основные методы неразрушающего контроля для выявления поверхностных и внутренних дефектов, а также освещены основные показатели качества металлоизделий. Проведен обзор видов дефектов металла и сварных соединений. Выполнено описание оборудования и средств контроля для выявления дефектов. Подробно описано последовательность и методика контроля качества ультразвуковым, капиллярным и магнитопорошковым методами контроля. Получены результаты контроля качества деталей при производстве и в процессе их эксплуатации. Проведен анализ выявленных дефектов. Приведены пример использования комплексного подхода к выполнению контроля. Проанализированы полученные результаты контроля процента совпадения выявления дефектов на изделии. Проведен комплексный контроль качества визуальным, ультразвуковым, капиллярным и магнитопорошковым методами неразрушающего контроля для определения процента совпадений выявления дефектов. Посредством создания эвристического анализатора на базе интерфейса системы нечеткой логики Fuzzy Logic Toolbox программы Matlab рассмотрен пример определения комбинации методов неразрушающего контроля для контроля качества вкладыша подшипника паровой турбины. Проведено компьютерное моделирование по методу Mamdani, который состоит из фазификации с определением диапазонов изменения входных величин для каждого примера, задачей функций распределения для каждого входного параметра; вычисления правил, исходя из адекватности модели; дефазификации с переходом от лингвистических термов к количественной оценке и графического построения поверхности отклика. Моделирование позволило определить оптимальную комбинацию методов неразрушающего контроля, которая обеспечивает высокое качество обнаружения дефектов вкладыша подшипника паровой турбины.

Ключевые слова: объект контроля; дефект; неразрушающий контроль; нечеткая логика; эвристический анализатор; фазификация; дефазификация; контроль качества.

Valentyn Kozlov¹, Yury Kozlov², Alexander Shcherbina², Olena Novykova¹, Alexander Iokhov¹

¹National Academy of the National Guard of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

²Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

MULTIFUNCTIONAL ANTENNA DEVICE FOR PROTECTION OF RADIO COMMUNICATION CHANNELS OF UNITS OF LAW ENFORCEMENT FORCES

Abstract. Safe conduct of mass events requires from law enforcement forces to protect the units' radio communication channels, detection and suppression of counterparty control radio channel. It also requires finding and destroying single-use interference transmitters, the presence of which is a manifestation of the aggressive intentions of the crowd. This requires means using antennas with directional properties, frequency ranges of which are determined by the established standard and mass radio communications. In general, the antenna parameters of radio systems, radio intelligence, radio monitoring, suppression are different requirements. Therefore, it is difficult to implement a universal antenna for many applications and conditions. Ideal for operating an antenna can be considered one that could predictably change the properties when adding (replacing) elements (modules), the parameters of which are known and consistent with the basic (basic) design. But serial antenna of radio electronic means is finished devices and are not always amenable to improvement. So the article discusses the possibility of using improvised antennas that have adequate models, as confirmed by numerous experiments, with the main parameters whose values can be purposefully changed: frequency range, width and shape of the directionality chart, its reflector properties, etc. An addition, software for such antennas is publicly available. Considering the functional requirements, we have analyzed the designs of antennae "Radiator over a cylindrical surface", angular antennas and antennas "Radiator over a plane", characteristics of which at the same sizes are approximately the same and are calculated by the same formulas. The possibilities of angular antennas of the "open-book" type with different angles between reflectors have been investigated. To do this, analytical simulations of technical solutions suitable for use in radio communications of units of law enforcement forces were conducted. The efficiency of the proposed constructs was checked and their characteristics were determined. Thus, the proposed technical solutions for angular antenna devices are able to protect the radio communication channels of law enforcement units during mass events.

Keywords: law enforcement; radio communication; angular antenna; opening angle.

Introduction

When performing assigned tasks of law enforcement units (LEU) of Ukraine (especially during mass events), there is a need to protect the information of their own radio channels, detection and suppression of counterparty control radio channels and search and destruction of installed transmitter of single-use interference, the presence of which is a manifestation of the aggressive intentions of the crowd.

These tasks require radio communications using antennas with directional properties, frequency ranges of which are determined by the regular and mass radio communications that are being used. The following requirements are imposed on such antennas: small size, design and operational simplicity, masking ability, embedding into special devices or equipment, the ability to use regular radios and/or interference generators as sources of interference etc [1]. Currently, such means in LEU are practically absent. Additional restrictions also impose a special features of the conditions of units' radio communication use: LEU usually work in campus – a limited area of constant composition and locations (student or military town, city squares, etc.); there is an urgent need to ensure the mobility and stealthiness of the use of radio communications; the use of standard directional antenna devices available in the Armed Forces is not possible in direct contact with the of counterparties.

We emphasize that the antenna parameters of radio systems, radio intelligence, radio monitoring, suppression have different requirements, so it is difficult to implement a universal antenna for many applications and conditions. In addition, during the operation of

radio electronic means (REM), the requirements for the properties and values of their parameters may change (increase), but the REM serial antennas are complete devices and are not always upgradable [2, 3].

In general, the ideal antenna for operation can be considered one that could predictably change the properties when adding (replacement) elements (modules), the parameters of which are known and consistent with the basic (basic) design. Natural is also a requirement to minimize the number of elements the basic design and allowable geometric sizes. Additionally, should take into account the need for installation (mounting) antennas on vehicles or protective equipment, and low sensitivity to variations of geometrical sizes of the design and the possibility of its implementation in terms of maintenance, etc. [4]. The above determines the relevance and purpose of the publication – to consider building a multifunctional antenna VHF/UHF ranges, to offer recommendations on design elements and to propose measures to increase the efficiency of use when performing assigned tasks of LEU.

Analysis of recent studies and publications. Within annotated purpose appropriate to consider improvised antennas – construction (products) that meet the following functional requirements:

- the antenna has an adequate model, confirmed by numerous experiments, the software for which is in the public domain;

- basic design is simple, supplemented with variable elements to achieve the required properties and predicted values of characteristics;

- the main parameters which values can be purposefully changed are frequency range, width and

shape (single-beam and multipath) of the directionality chart (DC) and its reflector properties, etc.

From the point of functional requirements view, we will analyze the designs of antennas of type "Radiator over a cylindrical surface", angular antennas and antennas of type "Radiator over a plane", which can be considered as a limited case of an angular antenna with an opening angle of 180° , identified by patent search H01Q19/13, H01Q19/17, H01Q19/19 (the list of which is commensurate with the volume of this publication) and from literature [2, 3, 5]. In addition, the characteristics of these types of antennas of approximately the same sizes are calculated using the same formulas [2, P. 279].

In Fig. 1, a and 1, b show the appearance of the basic designs of antenna devices in accordance with a cylindrical reflector (CR) and an angular antenna (AA) [5]; marked with: 1 – reflector, 2 – radiator.

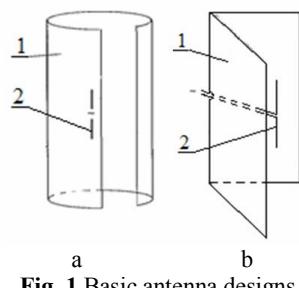


Fig. 1 Basic antenna designs

In Fig. 2 shows the appearance of constructs with CR, which are different from the base design (BD); marked with: 3 – separating screen, 4 – additional reflectors. In the table 1 gives a brief description of the constructs and the technical results obtained with the changes.

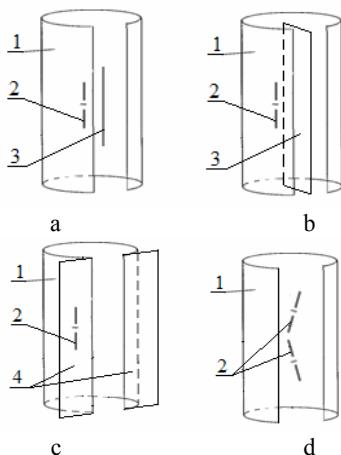


Fig. 2 Variants of antenna constructions with CR

The possibility of using radiators of different designs in the BD, which improves the frequency characteristics of antennas and broadens their scope of application, was considered in [8]. Also considered are technical solutions based on the reflector as clippings from a cylinder formed by one [9] or several [10] metal shields of the "Форт-ЩП" type. In Fig. 3 shows the appearance of AA constructs that have differences from the base structure; notations similar to those shown in Fig. 1. In the table 2 gives a brief

description of the constructs and the technical results obtained with the changes.

Table 1 – Description of constructions of antenna devices with cylindrical reflector

Construct	Difference from BD Variable element and/or parameter	The technical result
Fig. 2-a [3]	Reflector height (2-4) λ Slit width (0,3-0,7) λ	Width DC _H = 60-180°; Width DC _E = 20°; simple power system
Fig. 2-b [3]	Separating screen Slit width (0,6-1,4) λ	Width DC _E ≈ 20°; Width DC _H = 30-60°; reduction of lateral petals
Fig. 2-c [3]	Additional 2 reflectors Sizes of additional reflectors	Increasing directional coefficient on 1-4 dB
Fig. 2-d [3]	The second radiator Radiators at an angle to the vertical	Reducing antenna transverse size by up to 30%
Fig. 1-a [6]	The radiator is asymmetric about the plane of symmetry; location radiator, slit width (0,6-1,4) λ	Frequency-angle dependence of the DC without complicating the antenna design

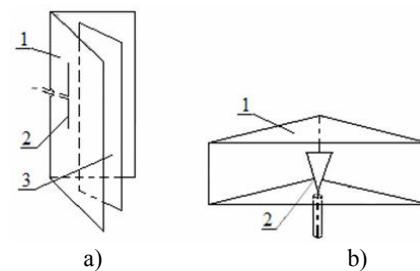


Fig. 3 Angular antenna constructs variants

Table 2 – Description of the constructions of angular antennas

Construct	Difference from BD Variable element and/or parameter	The technical result
Fig. 3-a [3]	Separating screen	Reducing width DC _E by up to 25°
Fig. 3-a [7]	The corner antenna is three-dimensional; Opening angle, reflector height and radiator shape	Essential sizes reduction

Obviously, listed in table 2 constructs have not exhausted the basic design, which makes the relevance of the annotated construction of a multifunctional antenna device to protect the radio communication channels of the law enforcement units.

Highlighting previously unsolved parts of a common problem. The goal of the work

The purpose of the study is to provide technical solutions for angular antenna devices capable of protecting the radio channels of law enforcement units during mass events.

The objectives of the study are as follows: to conduct analytical modeling of variants of VHF / UHF angular antennas technical solutions suitable for use in law enforcement units' radio communication systems; -

to check the performance of the proposed constructs and determine their characteristics.

Materials and methods

Ideal for use is an antenna that can change parameters depending on the operating conditions, meet the requirements of manufacturability of the basic design, minimize the number of components and so on.

From this point of view, the possibilities of angular antennas of the "open-book" type with different angles between reflectors were investigated.

Study results of the antennas of "open book" type. Table 3 shows the results of the authors' simulations of the antenna "Radiator over a plane" (opening angle 180°) for reflectors with proportional to the wavelength λ by sizes.

Table 3 – Characteristics of antenna type "Radiator over a plane" variants

Distance S to the reflector	Length of the radiator	Width of the main petal (E), °	Directionality chart shape
0,2 λ	0,46 λ	77	1 petal
0,25 λ	0,46 λ	82	1 petal
0,3 λ	0,46 λ	90	1 petal
0,4 λ	0,48 λ	105	1 petal
0,5 λ	0,48 λ	-	2 petals
0,6 λ	0,48 λ	-	main + 2 lateral
0,7 λ	0,47 λ	-	main + 2 lateral

In Fig. 4 in the azimuth plane shows a diagram of one of the antenna's variant and the directionality chart as a result of a machine experiment. Marked with: α_1 , α_2 , α_3 – the corresponding angles between the reflectors; F1, F2, F3 – DC for different conditions of radiators location (marked with black dots on bisectors of corresponding angles).

The calculations are made for the opening angle of the central sector $\alpha_2 = 90^\circ$. At a distance S of the radiator from the top of the angle by $0,25\lambda$ width of the DC F1 the width at the zero level is about 90° . It can be reduced by increasing S by up to $0,75\lambda$, which reduces the width of the main petal F2 of the directionality chart by almost half. At a value of $S = \lambda$, a zero dip (F3) is formed in the DC.

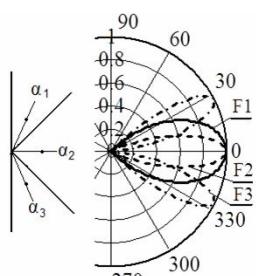


Fig. 4 DC for $\alpha_2 = 90^\circ$

Similar calculation experiments were performed for the values of angles $\alpha_2 = 60^\circ$ and $\alpha_2 = 45^\circ$. Their results are shown in Fig. 5 and 6 (similar to those shown in Fig. 4).

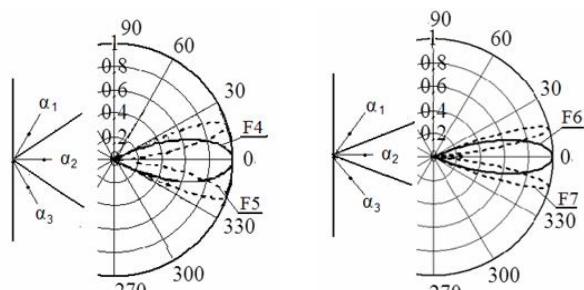


Fig. 5 DC for $\alpha_2 = 60^\circ$

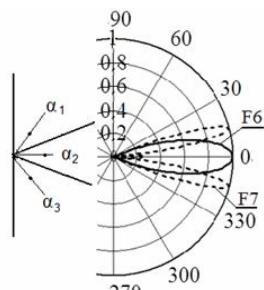


Fig. 6 DC for $\alpha_2 = 45^\circ$

For the variant of the opening angle of the central sector at 60° (see Fig. 2) calculable width of the antenna' directionality chart F4 at the zero level is about 60° and practically does not change at distance of the radiator from the top of the angle α_3 on distances from $0,25\lambda$ to $0,5\lambda$. The shape of the directionality chart can be substantially altered to form a dip along the optical axis by increasing S to magnitude λ (F5).

If the opening angle of the central sector is equal 45° (see Fig. 3), calculable width of the antenna' directionality chart F6 at the zero level is about 45° and practically does not change at the distance of the radiator from the top of the angle α_3 at a distance from $0,25\lambda$ to $1,0\lambda$. The shape of the directionality chart can be substantially altered to form a dip along the optical axis by increasing S to magnitude, which is approximately $1,2\lambda$ (F7).

Thus, changing the opening angle of the antenna together with the change of radiator location allows to vary widely the DC shape of the single antenna.

Field study results of the antennas "open book" type. The theoretical and practical experience of the authors allow us to consider different variants of multifunctional antenna device "open book" type, which is based on the idea of constructing an angular antenna. Fig. 7 shows the appearance of a device designed to investigate the directional properties of layout such an antenna; marked with: 1 – reflector of two metal plates, 2 – ruler, 3 – slider-hinged knot, 4 – radiator, 5 – optical sight. When changing the opening angle, the ruler always remains in the bisector of the angle due to the design of the slider-hinged knot – the equilateral hinged connection of the slider with the reflector plates (Fig. 8).

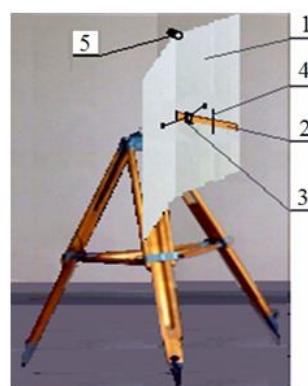


Fig. 7 Antenna layout

Selected reflector sizes: length $L = (1-1,5)\lambda_{\max}$, height $H = 1,2\lambda_{\max}$, where λ – wavelength in a certain

range VHF/UHF. As the radiator used antennas regular radios Kenwood and Motorola.

The use of angular antennas with different opening angles between common adjacent screens makes it possible to create combined antennas for different functional purposes. Examples of such antennas can be an antenna made in one half plane, with three antennas having opening angles $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 60^\circ$ (see Fig. 9) or $\alpha_1 = \alpha_3 = 45^\circ$, $\alpha_2 = 90^\circ$, or with four antennas having equal angles of 45° , or other variants of the structure.

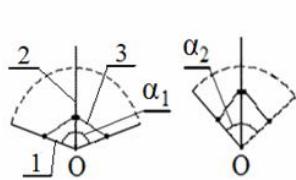


Fig. 8 Example of changing the reflector opening angle

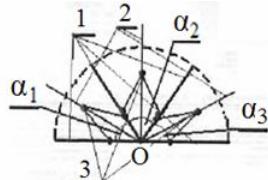


Fig. 9 Antenna device with equal opening angles

Practical application of antenna device. Studies have shown that the "open book" type antenna can operate at different frequencies or in the receiving (to determine the azimuthal angle of the direction of the signal source or radio interference) or/and in the transmitting (for radio communication or radio counteraction) modes.

In the mode of determining the azimuthal angle, two angular antennas with equal angles of aperture α_1 and α_3 work in the direction of the radiation source. Their symmetrical directionality charts are summed up, forming a dip in the direction of the bisector of the angle α_2 . Thus, the minimum of the received signal level determines the direction of the radiation source. The same effect can be achieved by changing the position of the radiator of the central antenna until point of dip in its DC.

In radio counteraction mode, a central antenna radiator is connected to the generator, the maximum of the directionality chart of which, by geometrical symmetry, is directed to a certain azimuth of the radiation source, which is set, for example, by means of an optical sight.

As the results of the experiments show, the level of the side petals of the DC of such antennas can be reduced by installing metal rectangular or circular jumpers on the reflector in certain positions.

Comparative analysis of technical solutions. To compare constructs based on known technical solutions, an information model of the antenna device (AD) was developed. It contains a list of characteristics (attributes) to be measured by instruments and expert method of expert method of attributing balls, as well as economic indicators that measure on an absolute scale. The economic indicators include the cost of components, the labor costs of different skill levels specialists and the associated cost of AD manufacturing.

The qualimetric task of determining the quality of the developed constructs was to calculate the integral index for each of the above-mentioned ADs and to compile their ranking ranked list. There are two methods to form this list.

The first involves the comparison of a certain characteristic of the AD – the object of comparison (OC) – with the corresponding feature of the established sample and the subsequent calculation of the modified coefficient of concordance [11] as an integral quality index.

The second is implemented as follows:

- measure (evaluate) the values of all features for all OCs;

- for each of the characteristics determine the feature-sample (the largest or smallest measurement result) – there is an analogy with the calibration scheme in the field of metrology for multimeters, when the calibration is performed separately for each of the measured parameters, the method of verification – direct verification [12];

- calculate the rating coefficient as the ratio of the measurement result of a particular trait to the numerical value of the feature-sample;

- determine the maximum total rating (adding all rating coefficients) from the calculated;

- calculate the coefficient of conformity K_B as the ratio of the total OC rating to the maximum overall rating;

- rank the OP in the order of reducing the K_B .

For example, the AD is compared on several features, some of which have a positive effect on the rating (antenna amplification coefficient, geometric sizes, communication range), and others (the width of the main DC, the size of the DC' lateral petals, the cost of manufacture AD) – negative.

For the first group of features, the rating is defined as follows:

- the maximum value is chosen from the measured values of the i-th feature B_i as an sample ($B_{\max} = \max \{B_i\}$);

- calculate the value $K_i = B_i / B_{\max}$.

The rating coefficient of the second group of features is defined as:

- from the measured values of the j-th feature D_j choose the maximum $D_{\max} = \max \{D_j\}$ and the minimum value $D_{\min} = \min \{D_j\}$ – this is a sample;

- calculate the value $K_j = (D_{\max} + D_{\min} - D_j) / D_{\max}$.

The total rating of the k-th AD $R_{\Sigma k}$ is calculated as the addition of all K_i and K_j .

Choose $R_{\Sigma \max} = \max \{R_{\Sigma k}\}$, which is taken as the sample.

The coefficient $K_{Bk} = R_{\Sigma k} / R_{\Sigma \max}$ is calculated.

The ranked list, which determines the place of the k-th AD in the list in the order of reduction of K_{Bk} , is submitted to the decision-maker.

The described sample ranking method [13] is implemented as a software product in the Microsoft Excel application environment, which has been tested and can be used to support decision-making regarding the choice of OC in any subject area.

The application of the described method to compare the constructs discussed in the article showed the acceptability of constructing a multifunctional antenna device to protect the radio communication channels of law enforcement units based on angular antennas.

Conclusions

The advantages of these antennas are as follows.

1. Multifunctionality: antenna designed to determine and suppress communication, informative, navigational channels and drones' control channels in the UHF, GSM, GPS, GLONASS, Galileo ranges. Work in the frequency ranges is provided by broadband radiators. The height of the antenna allows the placement of several radiators without the effect of dimming. Changing the shape of the directionality chart also possible by deviating the radiator from the bisector of the opening angle.

2. Equipping the antenna device with an optical sight provides simple mechanical aiming, including airborne. The combination of several ways to detect a target – visual, radio frequency, Wi-Fi – increases the probability of finding it and minimizes the number of activations for non-profile targets.

3. Important additional features are opened when all antennas work together or by switching them. With the proper choice of angles between the antenna plates and the distance from the radiators to the top of these angles, it is possible to provide a favorable addition of the fields of waves reflected from the reflector plates,

with the fields of waves created directly by the radiators. But this problem requires separate research.

4. The simplicity of design of the antenna device enables its manufacture even in the conditions of repair shops.

The disadvantage is the insufficient number of practical applications in different variants of simultaneous placement of several radiators in the aperture of one or more angular antennas that make up the antenna device.

The proposed variants of construction and use of the multifunctional antenna device ensure the implementation of electronic warfare measures – directing the source of interference, accurate directionality chart of the main reflector in the direction of the target (object of observation), suppression of the radiation source (interference), which can be placed on the air or surface.

This guarantees the ability to adapt to any situation in the radio communication system and to protect the local radio communication system.

The authors dedicate this publication to the bright memory of their colleagues and co-authors, Yuri Pavlovich Belokursky and Igor Viktorovich Ruzhentsev.

REFERENCES

- Ang, P., Eleftheriades, G. V. (2018), "Active Surface Cloaking with Patch Antennas", *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, pp. 911 – 912.
- Kocherzhevskij, G.I. (1989), "Antenna feeder devices", Radio i Svyaz, Moscow, 352 p.
- Nechajev, Yu.B., Nikolajev, V.I. and Rjakhovskij, A.S. (2008), "Prospective antenna device communication systems of general and professional use", *Theory and technique of radio communication*, No. 2, pp. 20-28.
- Belokurskij, Yu.P., Iokhov, A.Yu., Kozlov, V.Ye. and Shcherbina, O.O. (2014), "Organization of protection of radio communication channels of law enforcement units of Ukraine", *Zb. nauk. pracj Nac. akad. NG Ukrayiny*, No. 1(23), pp. 46-49.
- Ajzenberg, G.Z., Yampolskij, V.G. and Terezin, A.N. (1977), "VHF Antennas", part 2, Svyazj, Moscow, 381 p.
- (2009), "[Antenna device with an angle-frequency dependent of directionality chart]", Patent RU 2352035, available at: <http://freepatent.ru/patents/2352035>.
- (2000), "UHF antenna (options)", Patent RU 2160948, available at: <http://freepatent.ru/patents/2160948>.
- Belokurskij, Yu.P., Ghorbov, A.N., Iokhov, A.Yu., Kozlov, V.Ye. and Shcherbina, O.O. (2014), "Ways to improve the characteristics of impovized antennas in the communications channels of law enforcement units", *Zb. nauk. pracj Nac. akad. NG Ukrayiny*, No. 2(24), pp. 15-17.
- (2014), "Antenna device", Patent of Ukraine №95314 for utility model. Published 25.12.2014, bulletin №24.
- (2015), "Antenna device", Patent of Ukraine №96899 for utility model. – Published 25.02.2015, bulletin №4.
- Dubrovina, V.V., Kozlov, V.Ye., Kozlov, Yu.V. and Novykova O.O. (2014), "Establishment consistency of results when solving peer review tasks", *Zb. nauk. pracj Nac. akad. NG Ukrayiny*, No. 2(24), pp. 92-94.
- Shabalin, S.A. (1990), "Applied metrology in questions and answers", available at: <http://padaread.com/?book=23281>.
- Kozlov, Yu.V. (2019), "Method of range of objects of comparison", *Mizhnar. nauk. internet-konf. "Informacije suspiljstvo: tehnologichni, ekonomichni ta tekhnichni aspeky stanovlennja"*. No. 41, Ternopil, pp. 49-50, available at: <http://www.konferenciaonline.org.ua/arxiv-konferenciy/arxiv-konferenciy13-09-2019>.

Received (надійшла) 17.06.2020

Accepted for publication (прийнята до друку) 09.09.2020

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Козлов Валентин Євгенович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри військового зв’язку та інформатизації, Національна академія Національної гвардії України, Харків, Україна;

Valentyn Kozlov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Military Communication and Informatization, National Academy of the National Guard of Ukraine, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: kozlov1945ve@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4452-3009>.

Козлов Юрій Валентинович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри метрології та технічної експертизи, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Yury Kozlov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Metrology and Technical Expertise, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: kozlov83@yandex.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6165-4978>.

Щербина Олександр Олексійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри основ радіотехніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;
Alexander Shcherbina – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Radio Engineering Fundamentals, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: jul-46@i.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5931-8994>.

Новикова Олена Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри військового зв'язку та інформатизації, Національна академія Національної гвардії України, Харків, Україна;
Olena Novykova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Military Communication and Informatization, National Academy of the National Guard of Ukraine, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: nangu.nea@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3557-5210>.

Іохов Олександр Юрійович – доктор технічних наук, доцент, начальник кафедри військового зв'язку та інформатизації, Національна академія Національної гвардії України, Харків, Україна;
Alexander Iokhov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Military Communication and Informatization, National Academy of the National Guard of Ukraine, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: iohov@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1718-0138>.

Багатофункціональний антенної пристрій для захисту каналів радіозв'язку підрозділів сил охорони правопорядку

В. С. Козлов, Ю. В. Козлов, О. О. Щербина, О. О. Новикова, О. Ю. Іохов

Анотація. Безпечне проведення масових заходів потребує від сил охорони правопорядку захисту каналів радіозв'язку підрозділів, виявлення і придушення радіоканалів управління противоборствуючою стороною, пошуку і знищенння передавачів завад разової дії, наявність яких є проявом агресивних намірів натовпу. Для цього необхідні засоби, що використовують антени зі спрямованими властивостями, діапазони частот яких визначаються застосуваними штатними і масовими засобами радіозв'язку. Загалом, до параметрів антен систем радіозв'язку, радіорозвідки, радіомоніторингу, придушення висуваються різні вимоги, тому універсальну антенну для безлічі застосувань і умов реалізувати важко. Ідеальною для експлуатації антеною можна вважати таку, яка могла б прогнозовано змінювати властивості при додаванні (заміні) елементів (модулів), параметри яких відомі і узгоджені з базовою (основною) конструкцією. А серійні антени радіоелектронних засобів є закінченими пристроями і не завжди піддаються удосконаленню, тому розглянуто можливості застосування імпровізованих антен, які мають адекватні моделі, підтвердженні чисельними експериментами, програмне забезпечення для яких є в загальному доступі, з основними параметрами, значення яких можуть цілеспрямовано змінюватися: діапазон частот, ширина і форма діаграми спрямованості, її опромінюючі властивості тощо. З огляду на функціональні вимоги проведено аналіз конструкцій антен типу "Опромінювач над циліндричною поверхнею", кутикових антен та антен типу "Опромінювач над площею", характеристики яких при однакових розмірах приблизно однакові й розраховуються за одними і тими ж формулами. Виконано дослідження можливостей кутикових антен типу "розкрита книга" з різними кутами між відбивачами, для чого проведено аналітичне моделювання варіантів технічних рішень, придатних для застосування в системах радіозв'язку підрозділів сил охорони правопорядку. Перевірено працевздатність запропонованих конструктивів та визначені їх характеристики. Таким чином, запропоновані варіанти технічних рішень кутикових антених пристрій здатні забезпечити захист каналів радіозв'язку підрозділів сил охорони правопорядку при проведенні масових заходів.

Ключові слова: охорона правопорядку; радіозв'язок; куткова антена; кут розкриву.

Многофункциональное антенное устройство для защиты каналов радиосвязи подразделений сил охраны правопорядка

В. Е. Козлов, Ю. В. Козлов, А. А. Щербина, Е. А. Новикова, А. Ю. Иохов

Аннотация. Безопасное проведение массовых мероприятий требует от сил охраны правопорядка защиты каналов радиосвязи подразделений, выявления и подавления радиоканалов управления противоборствующей стороны, поиска и уничтожения передатчиков помех разового действия, наличие которых является проявлением агрессивных намерений толпы. Для этого необходимы средства, использующие антенны с направленными свойствами, диапазоны частот которых определяются применяемыми штатными и массовыми средствами радиосвязи. В общем, к параметрам антенн систем радиосвязи, радиоразведки, радиомониторинга, подавления предъявляются различные требования, поэтому универсальную антенну для множества приложений и условий создать трудно. Идеальной для эксплуатации антенной можно считать такую, которая могла бы прогнозировать изменять свойства при добавлении (замене) элементов (модулей), параметры которых известны и согласованы с базовой (основной) конструкцией. А серийные антены радиоэлектронных средств являются законченными устройствами и не всегда поддаются модернизации. Поэтому рассмотрены возможности применения импровизированных антенн, имеющих адекватные модели, подтвержденные многочисленными экспериментами, программное обеспечение для которых есть в общем доступе, с основными параметрами, значения которых могут целенаправленно изменяться: диапазон частот, ширина и форма диаграммы направленности, ее излучательные свойства и тому подобное. С учетом функциональных требований проведен анализ конструкций антенн типа "Облучатель над цилиндрической поверхностью", угловых антенн и антенн типа "Облучатель над плоскостью", характеристики которых при одинаковых размерах примерно одинаковы и рассчитываются по одним и тем же формулам. Выполнены исследования возможностей угловых антенн типа "раскрытая книга" с различными углами между отражателями, для чего проведено аналитическое моделирование вариантов технических решений, пригодных для применения в системах радиосвязи подразделений сил охраны правопорядка. Проверена работоспособность предложенных конструктивов и определены их характеристики. Таким образом, предложенные варианты технических решений угловых антенных устройств способны обеспечить защиту каналов радиосвязи подразделений сил охраны правопорядка при проведении массовых мероприятий связи.

Ключевые слова: охрана правопорядка; радиосвязь; угловая антenna; угол раскрытия.

Yevhen Sydorenko¹, Helen Makogon², Mykyta Korda², Oleksandr Isakov², Yuri Babkin², Igor Kalinin²

¹Central Armored Department of the Logistics Forces Armament Command of the AF of Ukraine, Kyiv

²Military Institute of Tank Troops of National Technical University "KhPI", Kharkiv, Ukraine

APPLICATION PROBABILISTIC ECONOMIC MATHEMATICAL MODELS FOR OPTIMIZATION PLANNING OF AN IRREDUCIBLE STOCK AND IMPROVING THE EFFICIENCY OF LOGISTICS SUPPLY MANAGEMENT OF THE STATE DEFENCE FORCES WITHOUT REDUSING THE LEVEL OF RELIABILITY

Abstract. The subject matter of the article is the logistical support of the state defence forces. The goal of the study is the development of a probabilistic economic and mathematical model of logistics supply management for planning a non-reducing stock of the state defence forces logistics supply. The tasks to be solved are: to formulate the task of determining the irreducible (reserve) of logistics supply stock size, to provide that the maximum possible value of its probability exhaustion within a certain period will not exceed the limiting value in terms of Wilson economic and mathematical model; by statistical processing of the state defence forces actions observation performing their assigned tasks to present the task of determining the optimal non-reducing stock by type of logistics cost without to reducing the level of reliability as a task to test multi-alternative statistical hypotheses; on the basis of solving the problem of continuous linear programming to determine the optimal non-reducible stock according to the nature of expenditures in order to improve the logistics supply management of the state defence forces. General scientific and special methods of scientific knowledge are used. The following results were obtained: Loses of the logistics supply stocks the defense state forces performing their assigned tasks within a certain period of time as a normally distributed random variable with a mathematical expectation and standard deviation calculated from the results of statistical data processing. The problem of determining the optimal irreducible stock by types of loses of the logistics supply without reducing the level of reliability is formulated as a problem of multi-alternative statistical hypotheses testing and solved as a problem of continuous linear programming. **Conclusions.** It was determined the size of the non-reducing (reserve) stock of logistics supply of state defense units when performing their assigned tasks, provided that the maximum possible value of the probability of its exhaustion during a certain period does not exceed the limit value should be formulated in terms of Wilson economic-mathematical model. The assumption that the expenditure of the logistics supply stocks means when performing the assigned tasks by the state defense forces is a random variable subject to the normal distribution law make it possible to use the well-known theory of probability apparatus and many-alternative statistical hypotheses testing and make calculations based on the existing statistical sampling data. Statistical processing of data obtained during state defense forces preforming assigned tasks allows you to obtain initial data and calculate the predicted optimal probabilities of the logistics supply loses distribution in accordance with current, average, overhaul and irrecoverable losses.

Keywords: logistics support; irreducible stocks; Wilson model; economic and mathematical models; multi-alternative statistical hypotheses; continuous linear programming.

Introduction

Formulation of the problem and research tasks. The experience of modern armed conflicts encourages the search for new approaches to the formation of prospects for the development of armaments and equipment and areas for improving the equipment of the state defense forces (SDF). The development of new economic and mathematical models will make it possible to provide a comprehensive reflection of the basic parameters and characteristics of the logistics system and improve effective ways to manage the equipment of SDF. At the organization of drugs of divisions of forces of SDF there is a necessity to define a non-reducing stock of logistical support (LS). Usually, the need for LS is probabilistic, and the procedure of their restoration is complicated by the specifics of the SDF tasks on purpose.

In this regard, the authors consider it relevant to study and search for new methods for determining the non-reducing stock of LS in order to improve the stockpile management of SDF equipment.

Analysis of recent research and publications of recent research and publications on the above issues shows that the features of the SDF tasks on purpose outline the main problems and areas of development of

the theory of justification of decisions on forecasting the cost of LS. To date, there are quite affordable, economical and quite effective methods for determining the magnitude of the projected losses of weapons based on analytical models of combat use of troops. To one degree or another, they take into account the impact on the magnitude of losses of a number of operational-tactical and physical-geographical factors of important factors, in particular, the degree of cover of troops, the degree of enemy fire, operational damage to weapons and more. However, the connection with the deduction of the non-reducing stock of LS by the authors [1-4] is not fully investigated.

A common understanding of the processes of the logistical approach to the evaluation and adoption of sound and concretely formulated decisions on inventory management has proven its effectiveness in the field of economics and business [5,6]. Nevertheless, the application can provide tools to optimize the planning of the minimum stock and increase the efficiency of the state defense forces logistics.

The goal of the study is the is the development of a probabilistic economic and mathematical model of logistics supply management for planning a non-reducing stock of the state defence forces logistics supply. This goal defined the following research tasks:

– to formulate the task of determining the irreducible (reserve) stock of logistics supply size, to provide that the maximum possible value of its probability exhaustion within a certain period will not exceed the limiting value in terms of Wilson economic and mathematical model;

– by statistical processing of the state defence forces actions observation performing their assigned tasks to present the task of determining the optimal non-reducing stock by type of logistics cost without reducing the level of reliability as a task to test multi-alternative statistical hypotheses; on the basis of solving the problem of continuous linear programming to determine the optimal non-reducible stock according to the nature of losses in order to improve the logistics supply management of the state defence forces.

General scientific and special **methods** of scientific knowledge are used.

Main material

1. Using Wilson economic-mathematical model to determine the non-reducing stock of LS. Let's assume the daily requirement x of some LS resources (fuel, units of equipment, etc.) by the SDF unit performs the assigned tasks for a certain period of time, is a normally distributed random variable with mathematical expectation m and standard deviation σ , i.e. random variable has a distribution $N(m, \sigma)$.

The values of m and σ can be calculated by statistical data processing. Note that the values m of σ can vary from minimum to maximum depending on the nature of the SDF actions.

It is natural to assume that to replenish LS stocks it takes some time L , not more than the time to perform the assigned tasks.

The magnitude of demand during the lead-up period is usually described by a probability density per unit of time (for example, a day or a week) from which the distribution of demand over a period can be determined.

In particular, if the demand per unit of time is a normally distributed quantity with an average value m and a standard deviation, then the total demand for the period of order execution L , will have a distribution $N(m_L, \sigma_L)$ such that the average demand value during the period L with the mathematical expectation m_L calculated by the expression

$$m_L = D \cdot L, \quad (1)$$

where m – is the mathematical expectation of the random value of the daily requirement of LS stocks.

Similarly,

$$\sigma_L = \sqrt{L} \sigma, \quad (2)$$

σ – standard deviation of the random value of daily requirement of LS stocks.

That is, the needs x_L of some LS resources of the SDF unit is a random variable subject to the normal distribution law $N(m_L, \sigma_L)$.

The task is to determine the size of the irreducible (reserve) stock B , provided that the maximum possible

value of the probability of its exhaustion during the period L does not exceed the value of α_{set} .

In terms of an economic and mathematical model, the problem is formulated as follows [7]:

to determine the size of the safety stock that satisfies the probabilistic condition

$$P\{x_L - m_L \geq B\} \leq \alpha_{set}, \quad (3)$$

although the random variable x_L is distributed according to the normal law $N(m_L, \sigma_L)$.

Dividing the inequality by the value, we obtain

$$\frac{x_L - m_L}{\sigma_L} \geq \frac{B}{\sigma_L}. \quad (4)$$

Let's introduce a random variable

$$Z = \frac{x_L - m_L}{\sigma_L}. \quad (5)$$

Obviously, this value will have a normal distribution law. Let's determine its mathematical expectation and standard deviation:

$$M(Z) = M; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{x_L - m_L}{\sigma_L} \right) &= \frac{1}{\sigma_L} M(x_L - m_L) = \\ &= \frac{1}{\sigma_L} (M(x_L) - M(m_L)) = \frac{1}{\sigma_L} (m_L - m_L) = 0; \end{aligned} \quad (7)$$

$$D(Z) = D; \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{x_L - m_L}{\sigma_L} \right)^2 &= \frac{1}{\sigma_L^2} D(x_L - m_L) = \\ &= \frac{1}{\sigma_L^2} (D(x_L) - D(m_L)) = \frac{1}{\sigma_L^2} D(x_L) = 1; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\sigma(Z) = \sigma; \quad (10)$$

$$\sigma(Z) = \sigma \left(\frac{x_L - m_L}{\sigma_L} \right) = \sqrt{D \left(\frac{x_L - m_L}{\sigma_L} \right)} = 1. \quad (11)$$

Thus, from expressions (6) - (11) it follows that the random variable Z is normalized value with the law of distribution $N(0,1)$.

From the properties of the normal distribution law one can obtain the value of the probability that equality takes place $P\{Z \geq B/\sigma_L\} = \alpha_{set}$:

$$\begin{aligned} P\left\{Z \geq \frac{B}{\sigma_L}\right\} &= P\left\{\frac{B}{\sigma_L} \leq Z \leq \infty\right\} = \\ &= \frac{1}{2}(1 - F(t)) = \alpha_{set}, \end{aligned} \quad (11)$$

where $F(t)$ – is the Laplace distribution [10].

Expression (11) allows to find t_α .

Insofar as

$$t_\alpha = B/\sigma_L, \quad (12)$$

then

$$B = t_\alpha \cdot \sigma_L \quad (13)$$

Therefore, the size of the reserve stock must satisfy the inequalities

$$B \geq t_\alpha \cdot \sigma_L. \quad (14)$$

2. Improving the efficiency of logistics supply of the state defense forces based on the use of mathematical apparatus for testing multi-alternative statistical hypotheses. By the nature of their activities, SDF can perform tasks in which the costs of LS losses (e.g., equipment) can be restored by current (CR), average repairs (AR) with their own funds, by overhaul (O) at a state enterprise (SE), or be irreversible (I). The probabilistic nature of LS losses complicates the process of managing the FDF LS to determine the optimal non-reducing stock by type of LS losses without reducing the level of reliability.

The assumption that the LS losses performing SDF assigned tasks is a random variable subject to the normal distribution law will allow us to use the known apparatus of probability theory and test many alternative statistical hypotheses and make calculations based on existing statistical sampling.

According to the classical theory of testing statistical hypotheses, we accept:

H_0 - hypothesis, which is that the daily requirement LS stocks can be restored by CR;

H_1 - hypothesis, which is that the daily requirement of LS stocks can be restored by AR;

H_2 - hypothesis, which is that the daily requirement of LS stocks can be restored by SE;

H_3 - hypothesis, which is that the SDF unit irreversible LS losses

It should be mentioned that the choice of the main hypothesis was made for reasons of the inevitability of the implementation of PR in the operation of LS during the SDF assigned tasks.

Then, the daily LS expenditure $x \in \Omega$ is a random variable with a distribution density $f(x/H_0)$ if hypothesis H_0 is correct, and $f(x/H_1)$, $f(x/H_2)$, $f(x/H_3)$ when alternative hypotheses H_1 , H_2 or H_3 are correct, respectively. A priori probabilities of realization of the corresponding hypotheses $P(H_i)$, $i=0,1,2,3$ are considered known. The task is to find a rule according to which according to the results of the analysis of the statistics of LS losses to accept this or that hypothesis and on its basis to determine the required LS stock.

The decision is made using a critical function

$$0 \leq A(x) \leq 1, \quad (15)$$

which has sense of the probability of accepting a particular hypothesis.

Acceptance or rejection of hypotheses is accompanied by the possibility of errors. According to the classical theory of statistical hypothesis testing [8,9], the probability of rejecting hypothesis H_0 , when it is true, is called the level of significance or error of the first kind α_0 . On the other hand, if the hypothesis H_0 is accepted in a situation when the hypothesis No is true, and $i=0,1,2,3$, then this is the i -th error of the second kind β_i (Fig. 1).

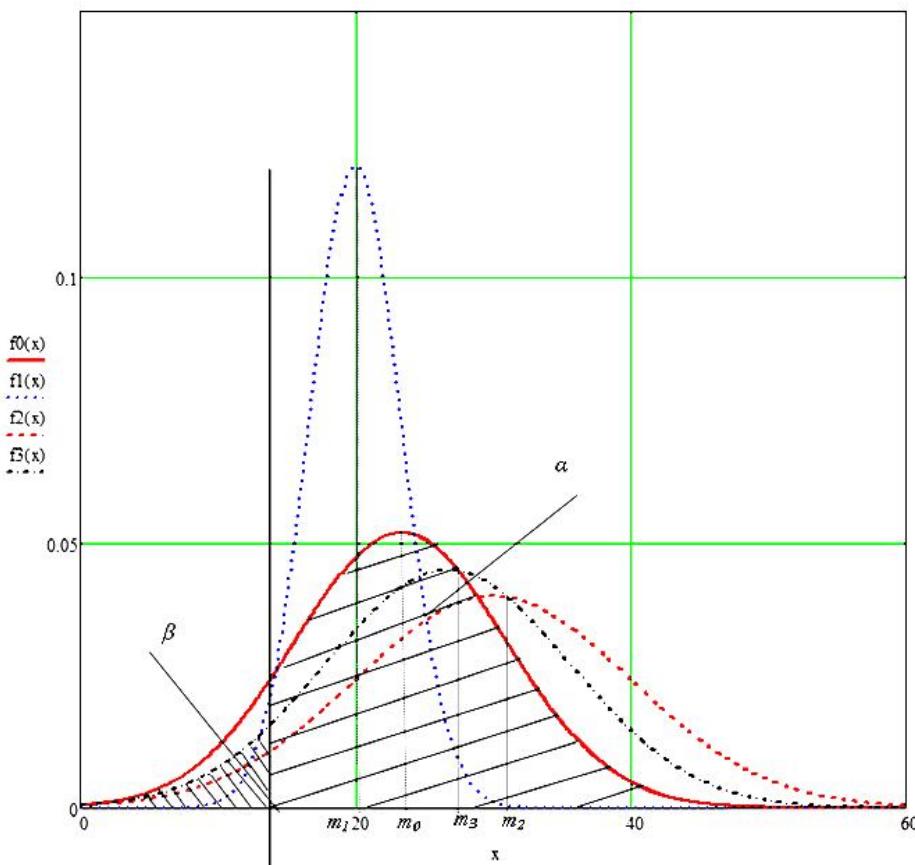


Fig. 1. Testing of multi-alternative statistical hypotheses to increase the efficiency of SDL LS management

To ensure the required level of combat capability of equipment, it is advisable to accept the condition $\alpha_0 = \alpha_{set}$, and the search for a critical function to carry out the criterion of minimum errors of the second kind β_i .

$$\begin{aligned}\beta_i &= \int_{\Omega} f(x / H_i)(1 - A(x))dx = \\ &= 1 - \int_{\Omega} f(x / H_i)A(x)dx, \quad i = \overline{0, 3};\end{aligned}\quad (16)$$

$$\begin{aligned}\beta &= \int_{\Omega} \sum_{i=1}^3 P(H_i)f(x / H_i)(1 - A(x))dx = \\ &= 1 - P(H_0) - \int_{\Omega} \sum_{i=1}^3 P(H_i)f(x / H_i)A(x)dx \Rightarrow \min;\end{aligned}\quad (17)$$

$$P(H_0) \int_{\Omega} f(x / H_0)A(x)dx = \alpha_{set} \quad (18)$$

$$0 \leq A(x) \leq 1, \quad x \in \Omega. \quad (19)$$

From expression (18) we determine the power of the criterion, which is subject to maximization:

$$\int_{\Omega} \sum_{i=1}^3 P(H_i)f(x / H_i)A(x)dx \Rightarrow \max \quad (20)$$

Thus, the task of testing hypotheses will be formulated as follows:

To find a function $A^*(x)$ that maximizes the functional (20) and satisfies conditions (17) - (19).

By sampling in n steps ($j = \overline{1, n}$) this problem can be reduced to the problem of linear programming:

To find a set

$$A^* = \{a_0^*, a_1^*, a_2^*, a_3^*\}, \quad (21)$$

such that maximizes functionality

$$\sum_{i=0}^3 \sum_{j=1}^n P(H_i)f(x_j / H_i)a_i(x)dx \Rightarrow \max \quad (22)$$

and satisfies the constraints

$$\sum_{i=0}^3 a_i = 1, \quad i = \overline{0, 3}, \quad (23)$$

$$a_i \geq 0, \quad i = \overline{0, 3} \quad (24)$$

$$P(H_0) \sum_{j=1}^n f(x_j / H_0)a_0 = \alpha_{set} \quad (25)$$

Problem (21) - (25) is a classical problem of linear programming and can be solved by known methods using a computer algebra environment [10-12].

3. Interpretation of the results of calculations to improve the LS management of SDF. Improving the efficiency of SDF LS management is possible under the condition of determining the optimal non-reducing stock according to the nature of losses.

Statistical processing of data obtained during the performance of SDF assigned tasks allows to obtain the initial data and calculate the predicted optimal probabilities (19) of the distribution of LS loses in accordance with CR, AR, O and I losses.

Since the value of the optimal set has the meaning of the conditional probability, i.e. the mass fraction in the total amount, in the final form, condition (14) will be defined as

$$B_i^* \geq t_{ai} \cdot \sigma_{ai} a_i^*, \quad i = \overline{0, 3}, \quad (26)$$

where $B_i^* \quad i = \overline{0, 3}$ – is the optimal non-reducing LS stock at the costs that are restored at CR, AR, O and I losses, respectively.

Conclusions

It was determined the size of the non-reducing (reserve) stock of logistics supply of state defense units when performing their assigned tasks, provided that the maximum possible value of the probability of its exhaustion during a certain period does not exceed the limit value should be formulated in terms of Wilson economic-mathematical model.

The assumption that the expenditure of the logistics supply stocks means when performing the assigned tasks by the state defense forces is a random variable subject to the normal distribution law make it possible to use the well-known theory of probability apparatus and many-alternative statistical hypotheses testing and make calculations based on the existing statistical sampling data.

Statistical processing of data obtained during state defense forces preforming assigned tasks allows you to obtain initial data and calculate the predicted optimal probabilities of the logistics supply loses distribution in accordance with current, average, overhaul and irrecoverable losses.

REFERENCES

1. Pavlovsky, O.V. (2015), "Forecasting the amount of losses of weapons and military equipment during operations (combat operations)", *Systemy ozbrojenya i viys'kova tekhnika*, no. 4(44), pp. 116-118.
2. Moskovchenko, V.M. (2001), *Ekonomiceskoye obosnovaniye sozdaniya yedinoj sistemy material'nogo obespecheniya silovykh struktur gosudarstva na osnove logisticheskogo podkhoda*: monografiya [Economic substantiation of the creation of a unified system of material support for the power structures of the state on the basis of a logistic approach: monograph], Publishing house of St. Petersburg State University of Economics, St. Petersburg, RU.
3. Biletov, V.I. (2010), "The problem of building a unified system of logistical support of military formations of Ukraine", *Trudy Nat. University of Defense of Ukraine*, vol. 4(91), pp. 81-89.
4. Sysoev, V.V (2015), "The concept of modeling the logistics management of the supply of forces of the security and defense sector of the state", *Problems of the economy*, vol. 3, pp. 342-251, available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pekon_2015_3_47.

5. Pastukhova, V.V. (2008), *Stratehichne upravlinnya pidpryyemstvom: filosofiya, polityka, efektyvnist'* [Strategic management of the enterprise: philosophy, policy, efficiency], KNEU, Kyiv, UA.
6. Bondarenko, O.S. (2009), "Modern models of inventory management", *Economy and state*, no 3, pp. 16-22.
7. Sterligova, A.N. and Semyonova, I.V. (2005), "Optimal Order Size or Wilson's Mysterious Formula", *Logistic & system*, No. 2, 3, pp. 64-69, 62-71.
8. Venttsel, Ye.S. (1969), *Probability Theory*, A Textbook, Nauka, Fizmatgiz, Moscow, SU.
9. Venttsel, Ye.S. (1972), *Operations Research*, Sov. Radio, Moscow, SU.
10. Raskin, L.G. and Kirichenko, I.O. (1987), *Mathematical Foundations of Operations Research and Analysis of Complex Air Defense Weapon Systems*, VERTA, Kharkiv, UA.
11. Kirichenko, I. O. and Makogon, Ye.A. (1999), "The problem of testing statistical hypotheses as a linear programming problem", *Trudy akademiyi, NAOU*, Kyiv, UA.
12. Shvachych, H.H. (2000), *Liniyna alhebra v rozrakhunkakh seredovishcha Mathcad*: Pidruchnyk [Linear algebra in Mathcad calculations: Textbook], DAUBP, Dnipropetrov'sk, UA.

Received (надійшла) 25.06.2020

Accepted for publication (прийнята до друку) 23.09.2020

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Сидоренко Євген Анатолійович – Заступник начальника Центрального бронетанкового управління Озброєння Командування Сил логістики Збройних Сил України, Центральне бронетанкове управління Озброєння Командування Сил логістики Збройних Сил України, Кий, Україна;

Yevhen Sydorenko – Deputy Chief of the Central Armored Armament Department of the Logistics Forces Command of the Armed Forces of Ukraine; Central Armored Department of the Logistics Forces Armament Command of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine;

e-mail: sidorenkoe49@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6190-5151>

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>

Корда Микита Володимирович – курсант за профілем кафедри бронетанкового озброєння та військової техніки, Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету "ХПІ", Харків, Україна;

Mykyta Korda – cadet of the Armored weapons and military equipment Department, Military Institute of Tank Troops of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: kordanikita1@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0630-4948>

Ісаков Олександр Володимирович – старший викладач кафедри бронетанкового озброєння та військової техніки, Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету "ХПІ", Харків, Україна;

Oleksandr Isakov – Senior Lecture of the Armored vehicles and military equipment Department, Military Institute of Tank Troops of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: alexalex999@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0801-790X>

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>

Калінін Ігор Вікторович – викладач кафедри бронетанкового озброєння та військової техніки, Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;

Igor Kalinin – 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: kolina7164@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3912-8285>

Застосування імовірнісних економіко-математичних моделей для оптимізації планування незнижувального запасу та підвищення ефективності логістичного забезпечення сил оборони держави без зниження рівня надійності

Є. А. Сидоренко, О. А. Макогон, М. В. Корда, Ю. В. Бабкін, О. В. Ісаков, І. В. Калінін

Анотація. Предметом вивчення в статті є логістичне забезпечення сил оборони держави. Метою дослідження є розробка ймовірнісної економіко-математичної моделі управління запасами для планування незнижувального запасу засобів матеріально-технічного забезпечення сил оборони держави. Завдання дослідження: сформулювати задачу визначення розміру незнижувального (резервного) запасу матеріально-технічних засобів за умови, що максимальне можливе значення ймовірності його вичерпання протягом визначеного періоду не перевищить граничного значення у термінах економіко-математичної моделі Уілсона; шляхом статистичної обробки даних спостережень дій сил оборони держави при виконанні ними завдань за призначенням представити задачу визначення оптимального незнижувального запасу за видами витрат засобів матеріально-технічного забезпечення без

зниження рівня надійності як задачу перевірки багатоальтернативних статистичних гіпотез; на підставі розв'язання задачі континуального лінійного програмування визначити оптимальний незнижувального запасу відповідно характеру витрат з метою підвищення ефективності управління логістичним забезпеченням сил оборони держави засобами матеріально-технічного забезпечення. Методологічною основою дослідження стали загальнонаукові та спеціальні методи наукового пізнання. **Отримані такі результати.** Витрати запасів матеріально-технічних засобів при виконанні силами оборони держави завдань за призначенням протягом певного періоду часу є нормально розподіленою випадковою величиною з математичним очікуванням та середнєквадратичним відхиленням, обрахованими за результатами статистичної обробки даних. Задача визначення оптимального незнижувального запасу за видами витрат матеріально-технічних засобів без зниження рівня надійності сформульована як задача перевірки багатоальтернативних статистичних гіпотез та розв'язана як задача континуального лінійного програмування. **Висновки.** Визначення розміру незнижувального (резервного) запасу матеріально-технічних засобів підрозділів сил оборони держави при виконанні ними завдань за призначенням за умови, що максимально можливе значення ймовірності його вичерпання протягом визначеного періоду не перевищить граничного значення доцільно сформулювати у термінах економіко-математичної моделі Уїлсона. Припущення про те, що витрати запасів матеріально-технічних засобів при виконанні силами оборони держави при виконанні завдань за призначенням, є випадковою величиною, підкореною нормальному закону розподілу, дозволить скористатися відомим апаратом теорії ймовірності та перевірки багатоальтернативних статистичних гіпотез та робити розрахунки за даними існуючої статистичної вибірки. Статистична обробка даних, отриманих при виконанні силами оборони держави завдань за призначенням дає змогу отримати вихідні дані та обрахувати прогнозовані оптимальні ймовірності розподілу витрат матеріально-технічних засобів відповідно до поточного, середнього, капітального ремонту та безповоротних втрат.

Ключові слова: логістичне забезпечення; незнижувальний запас матеріально-технічних засобів; модель Уїлсона; економіко-математичні моделі; багатоальтернативні статистичні гіпотези; континуальне лінійне програмування.

**Применение вероятностных экономико-математических моделей для оптимизации планирования
неснижаемого запаса и повышения эффективности логистического обеспечения
сил обороны государства без снижения уровня надежности**

Е. А. Сидоренко, Е. А. Макогон, Н. В. Корда, Ю. В. Бабкин, А. В. Исаков, И. В. Калинин

Аннотация. Предметом изучения в статье является логистическое обеспечение сил обороны государства. Целью исследования является разработка вероятностной экономико-математической модели управления запасами для планирования неснижаемого запаса средств материально-технического обеспечения сил обороны государства. Задачи исследования: сформулировать задачу определения размера неснижаемого (резервного) запаса материально-технических средств при условии, что максимально возможное значение вероятности его исчерпания течение определенного периода не превысит предельного значения в терминах экономико-математической модели Уилсона; путем статистической обработки данных наблюдений действий сил обороны государства при выполнении ими задач по назначению представить задачу определения оптимального неснижаемого запаса по видам затрат средств материально-технического обеспечения без снижения уровня надежности как задачу проверки многоальтернативного статистических гипотез; на основании решения задачи континуального линейного программирования определить оптимальный неснижаемого запаса соответственно характеру расходов с целью повышения эффективности управления логистическим обеспечением сил обороны государства средствами материально-технического обеспечения. Методологической основой исследования стали общенаучные и специальные методы научного познания. Получены следующие результаты. Расходы запасов материально-технических средств при выполнении силами обороны государства задач по назначению в течение определенного периода времени нормально распределенной случайной величиной с математическим ожиданием и среднеквадратического отклонением, рассчитанными по результатам статистической обработки данных. Задача определения оптимального неснижаемого запаса по видам затрат материально-технических средств без снижения уровня надежности сформулирована как задача проверки многоальтернативного статистических гипотез и решена как задача континуального линейного программирования. **Выводы.** Определение размера неснижаемого (резервного) запаса материально-технических средств подразделений сил обороны государства при выполнении ими задач по назначению при условии, что максимально возможное значение вероятности его исчерпания течение определенного периода не превысит предельного значения целесообразно сформулировать в терминах экономико-математической модели Уилсона. Предположение о том, что расходы запасов материально-технических средств при выполнении силами обороны государства при выполнении задач по назначению, является случайной величиной, подчиненной нормальному закону распределения, позволит воспользоваться известным аппаратом теории вероятности и проверки многоальтернативных статистических гипотез и производить расчеты по данным существующей статистической выборки. Статистическая обработка данных, полученных при выполнении силами обороны государства задач по назначению позволяет получить исходные данные и рассчитать прогнозируемые оптимальные вероятности распределения расходов материально-технических средств в соответствии с текущим, среднего, капитального ремонта и безвозвратных потерь.

Ключевые слова: логистическое обеспечение; неснижаемый запас материально-технических средств; модель Уилсона; экономико-математические модели; многоальтернативного статистические гипотезы; континуальное линейное программирование.

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Аль-Орайкат А. М. (Anas Mahmoud Al-Oraiqat)	52
Андреєв С. М. (Sergey Andrieiev)	22
Аргунов В. Б. (Vladimir Argunov)	94
Бабкін Ю. В. (Yuri Babkin)	156
Барабаш О. В. (Oleg Barabash)	118
Березовська Ю. В. (Yuliia Berezovska)	62
Бєсова О. В. (Oksana Biesova)	139
Василишин В. І. (Volodymyr Vasylyshyn)	80
Вишнівський В. В. (Viktor Vyshnivskyi)	62
Гавриленко С. Ю. (Svitlana Gavrylenko)	5
Гайдур Г. І. (Galyna Gaidur)	118
Григоренко І. В. (Ihor Hryhorenko)	143
Григоренко С. М. (Svitlana Hryhorenko)	143
Гуменюк І. В. (Igor Humeniuk)	11
Давидов В. В. (Viacheslav Davydov)	124
Джус В. В. (Volodymyr Djus)	89
Дрєєв О. М. (Oleksandr Drieiev)	52
Жилін В. А. (Volodymyr Zhilin)	22
Іванов В. Г. (Valerii Ivanov)	109
Іванюк О. І. (Oleksandr Ivaniuk)	41
Індик С. В. (Serhii Indyk)	85
Іохов О .Ю. (Alexander lokhov)	150
Ісаков О. В. (Oleksandr Isakov)	156
Казарінов М. (Michael Kazarinov)	5
Калінін І. В. (Igor Kalinin)	156
Каргін А. О. (Anatolii Kargin)	41
Карлов В. Д. (Vladimir Karlov)	139
Киричок Р. В. (Roman Kyrychok)	118
Козлов В. Є. (Valentyn Kozlov)	150
Козлов Ю. В. (Yury Kozlov)	150
Корда М. В. (Mykyta Korda)	156
Крючков Д. М. (Dmytro Kriuchkov)	89
Лещинський В. О. (Volodymyr Leshchynskyi)	113
Лисечко В. П. (Volodymyr Lysechko)	85
Лукашук О. В. (Olena Lukashuk)	139
Макогон О. А. (Helen Makogon)	156
Мелешко Є. В. (Yelyzaveta Meleshko)	52
Можаєв М. О. (Mykhailo Mozhaiev)	124
Нагорний Є. І. (Yevhen Nagornyi)	11
Новикова О. О. (Olena Novykova)	150
Овчаренко М. М. (Mukola Ovcharenko)	143
Олізаренко С. А. (Serhii Olibarenko)	94
Орловський О. В. (Oleksandr Orlovskyi)	104
Остапов С. Е. (Sergey Ostapov)	104
Петрушенко В. М. (Valentin Petrushenko)	139
Плющ О. Г. (Oleksandr Pliushch)	62
Проценко А. А. (Andrii Protsenko)	109
Пустоваров В. В. (Volodymyr Pustovarov)	70
Рошупкін Є. С. (Evgeniy Roshchupkin)	89
Семенов С. Г. (Serhii Semenov)	133
Сидоренко Є. А. (Yevhen Sydorenko)	156
Сметанін К. В. (Kirill Smetanin)	11
Титаренко Р. В. (Roman Tytarenko)	89
Триснюк В. М. (Vasyl Trysnyuk)	11
Туровський О. Л. (Oleksandr Turovsky)	74
Уварова Т. В. (Tetyana Uvarova)	11
Хорошун Г. М. (Ganna Khoroshun)	17
Цао Вейлін (Cao Weilin)	133
Чалий С. Ф. (Serhii Chalyi)	113
Чжан Ліцян (Zhang Liqiang)	124
Шевердін І. В. (Illia Sheverdin)	5
Шуклін Г. В. (Herman Shuklin)	118
Щербина О. О. (Alexander Shcherbina)	150

Наукове видання

Сучасні інформаційні системи

Advanced Information Systems

Науковий журнал
Том 4, № 3

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 03.10.2020 Формат 60×84/8. Ум.-друк. арк. 20,25. Тираж 120 прим. Зам. 1003-20

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 № 2480000000106167 від 08.01.2009.

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