

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
Радіотехнічний факультет

***РТПСАС***                      **2024**                      ***RTPSAS***

ХІІІ Міжнародна науково-технічна конференція

**РАДІОТЕХНІЧНІ ПРОБЛЕМИ, СИГНАЛИ, АПАРАТИ ТА СИСТЕМИ**

Матеріали конференції  
27 – 28 листопада 2024  
Київ, Україна

International  
Scientific and Technical Conference

**RADIOENGINEERING PROBLEMS, SIGNALS, DEVICES AND SYSTEMS**

Conference Proceeding  
November 27 – 28, 2024  
Kyiv, Ukraine

Київ — 2024

УДК 621

ISSN 2311-4169

**ХІІІ Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні проблеми, сигнали, апарати та системи». Київ, 27 – 28 листопада 2024 р.: матеріали конференції — Київ, 2024. — 116 с.**

До збірника матеріалів конференції включено тези представлених доповідей, в яких наведені результати досліджень в радіотехнічній та суміжних галузях, за тематикою напрямків роботи секцій: Радіотехнічні системи та мікрохвильова техніка, Інформаційні технології та телекомунікаційні системи, Електроніка, нанотехнології, біомедичні системи, радіовимірювання.

Збірник призначений для науковців та спеціалістів, працюючих в галузі теоретичних досліджень та практичного використання методів і засобів радіотехніки. Збірник буде корисним викладачам, аспірантам та студентам радіотехнічних, телекомунікаційних, радіоелектронних, радіофізичних факультетів вищих навчальних закладів.

### **Програмний комітет конференції**

**Антипенко Р. В.**

к.т.н., доц., КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна — голова програмного комітету;

### **Члени програмного комітету**

**Адріан Клік**

PhD, dr hab. inż., доц., Познанський технологічний ун-т, Республіка Польща

**Вадим Ісаков**

проф., Брауншвейзький техн. ун-т, Німеччина

**Іван Цвеліх**

к.т.н., Infineon Technologies AG, Федеративна Республіка Німеччина

**Олег Фетісов**

PhD, Чеський техн. ун-т у Празі, Чеська Республіка

**Роман Дубровка**

PhD, Лондонський ун-т королеви Мері, Сполучене Королівство

**Франциско Гарсія Лагос**

PhD, Університет Малаги, Королівство Іспанія

**Дубровка Ф. Ф.**

д.т.н., проф., КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна

**Жук С. Я.**

д.т.н., проф., КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна

**Зіньковський Ю. Ф.**

д.т.н., проф., КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна

**Карташов В. М.**

д.т.н., проф., ХНУРЕ, Україна

**Манойлов В. П.**

д.т.н., проф., Держ. ун-т «Житомирська політехніка», Україна

**Найденко В. І.**

д.ф.-м.н., проф., КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна

**Нелін Є. А.**

д.т.н., проф., КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна

**Прокопенко І. Г.**

д.т.н., проф., Держ. ун-т "Київський авіаційний інститут", Україна

**Прудіус І. Н.**

д.т.н., проф., Нац. ун-т «Львівська політехніка», Україна

**Трубчанінова К. А.**

д.т.н., проф., УкрДУЗТ, Україна

**Шайко-Шайковський О. Г.**

д.т.н., проф., ННІФТКН ЧНУ ім. Юрія Федьковича, Україна

**Лащевська Н. О.**

к.т.н., доц., ДУІКТ, Україна

**Літвінцев С. М.**

к.т.н., доц., КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна

**Мовчанюк А. В.**

к.т.н., доц., КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна

**Чухов В. В.**

к.т.н., доц., Держ. ун-т "Житомирська політехніка", Україна

### **Організаційний комітет конференції**

**Мартинюк С. Є.** — голова організаційного комітету.

### **Члени організаційного комітету:**

Головня В. М., Захарченко О.С., Зінгер Я. Л., Приходько І. О.

### **Розроблення та супроводження сайту конференції: Захарченко О. С.**

**Адреса оргкомітету:** Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2100, радіотехнічний факультет, корп. 17, кім. 317, пр-т Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна. **Тел.** (+38097) 429-24-22. **e-mail:** rtpsas.rtf@gmail.com  
**Сайт:** <https://rtf.kpi.ua/rtpsas/>

Рекомендовано до друку рішенням програмного комітету конференції та вченої ради радіотехнічного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 10/2024 від 25 листопада 2024 р.)

UDK 621  
ISSN 2311-4169

**XIII-th International scientific and technical conference «Radioengineering Problems, Signals, Devices and Systems». Kyiv, November, 27 – 28, 2024: conference proceedings — Kyiv: 2024. — 116 p.**

Collection of the conference materials include theses of reports in which the results of research in: Radio Engineering Systems and Microwave Technique; IT and Telecommunication Systems; Electronics, Nanotechnologies, Biomedical Electronic Systems, Radio Measurements.

Collection of is designed for a wide range of scientists and specialists, working in the field of theoretical research and practical application of methods and means of radioengineering. The collection will be useful to teachers, graduate students and students of radioengineering, telecommunication, electronic, radio-physical faculties of higher educational institutions.

**Conference Program Committee:**

**Antypenko R. V.** Cand. Of Sci (Techn.), prof., Igor Sikorsky KPI, Ukraine — Chairman of Program Committee

**Program Committee Members:**

**Adrian Klix** PhD, dr hab. inż., Assoc. Prof., Poznan University of Technology, Republic of Poland

**Vadym Issakov** prof., Braunschweig University of Technology, Federal Republic of Germany

**Ivan Tsvelyh** PhD, Infineon Technologies AG, Munich, Germany

**Oleg Fetisov** PhD, Czech Technical University in Prague, Czech Republic

**Roman Dubrovka** PhD, Queen Mary University of London, London, Great Britain

**Francisco Garcia Lagos** PhD, University of Malaga, Kingdom of Spain

**Dubrovka F. F.** Doc. Of Sci (Techn.), prof., Igor Sikorsky KPI, Ukraine

**Zhuk S. Y.** Doc. Of Sci (Techn.), prof., Igor Sikorsky KPI, Ukraine

**Zinkovsky Yu. F.** Doc. Of Sci (Techn.), prof., Igor Sikorsky KPI, Ukraine

**Kartashov V. M.** Doc. Of Sci (Techn.), prof., Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine

**Manoylov V. P.** Doc. Of Sci (Techn.), prof., Zhytomyr Polytechnic State University, Ukraine

**Naidenko V. I.** Doc. Of Sci (Physics-Math.), prof., Igor Sikorsky KPI, Ukraine

**Nelin Ye. A.** Doc. Of Sci (Techn.), prof., Igor Sikorsky KPI, Ukraine

**Prokopenko I. H.** Doc. Of Sci (Techn.), prof., National Aviation University, Ukraine

**Prudius I. N.** Doc. Of Sci (Techn.), prof., Lviv Polytechnic National University, Ukraine

**Trubchaninova K. A.** Doc. Of Sci (Techn.), prof., UkrSURT, Ukraine

**Shaiko-Shaikovskiy O. H.** Doc. Of Sci (Techn.), prof., Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Ukraine

**Lashchevska N. O.** Cand. Of Sci (Techn.), Assoc. prof. State University of Information and Communication Technologies, Ukraine

**Litvintsev S. M.** Cand. Of Sci (Techn.), Assoc. prof., Igor Sikorsky KPI, Ukraine

**Movchaniuk A. V.** Cand. Of Sci (Techn.), Assoc. prof., Igor Sikorsky KPI, Ukraine

**Chukhov V. V.** Cand. Of Sci (Techn.), Assoc. prof., Zhytomyr Polytechnic State University, Ukraine

**Organize Committee conference:**

**Martyniuk S.** — Chairman of the Organizing Committee;

**Organize Committee Members:**

Holovnia V., Prykhodko I., Zakharchenko O., Zinger Y.

**Produce and technical support of the conference site: Zakharchenko O.**

**Organize Committee address:** 2100, radioengineering department. National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Beresteyskiy Ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

**Tel.** (+38097) 429-24-22. **E-mail:** [rtpsas.rtf@gmail.com](mailto:rtpsas.rtf@gmail.com) **Site:** <https://rtf.kpi.ua/rtpsas/>

It is recommended to seal by the decision of the programme committee and Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute Radioengineering Department Scientific Council (Record № 10/2024 of 25.11.2024).

Розміщені у збірнику тези є науковим твором, підготовленим за результатами авторських досліджень. Організаційний комітет конференції забезпечив технічну обробку авторських текстів і підготовку до друку. Матеріали друкують у авторській редакції.

Відповідальність за отримані наукові результати та дотримання принципів академічно доброчесності покладаються на авторів, згідно Закону України «Про авторське право і суміжні права».

Автори творів, включених до збірника тез, зберігають виключні права і обов'язки на використання своїх наукових творів незалежно від видання в цілому, якщо інше не передбачено авторським договором (ЗУ Про авторське право і суміжні права» Ст. 19).

These theses included in the collection are scientific works based on the author's research results. The conference organizing committee provides technical processing and preparation for publication of the author's texts. Materials are published in the author's edition.

The authors are responsible for the obtained scientific results and compliance with the principles of academic integrity, in accordance with the Law of Ukraine "On Copyright and Related Rights."

Authors of theses included in the collection retain exclusive rights and obligations to use their scientific works regardless of the publication, unless otherwise provided for by the author's agreement (Law of Ukraine "On Copyright and Related Rights" Art. 19).

---

## ЗМІСТ

### *СЕКЦІЯ 1. РАДІОТЕХНІЧНІ СИСТЕМИ ТА МІКРОХВИЛЬОВА ТЕХНІКА*

Demchyna Y. O.; Dubrovka F. F. Unmanned aerial vehicle simulator for radio surveillance applications.....	9
Борисенко А. О. Параметрична оптимізація з використанням методів ШІ для дизайну антен та мікрохвильових пристроїв.....	13
Гергіль Є. Є.; Сушко О. Ю. Вплив геометричних параметрів антенної решітки на її електродинамічні характеристики.....	17
Гончаров О. А.; Шпилька О. О. Пошук груп послідовностей перестановки сегментів ЛЧМ-імпульсу із заданим рівнем максимальної взаємної кореляції.....	20
Горбачов Б. О.; Василенко Д. О. Компактна антена ультракороткого діапазону частот на основі метаматеріалів.....	23
Задорожний Г. С.; Василенко Д. О. Особливості вимірювання коефіцієнта відбиття розумної реконфігурованої поверхні.....	26
Коваленко І. Л.; Мовчанюк А. В. Розробка непараметричного амплітудного методу виявлення сигналів з псевдовипадковим перелаштування робочої частоти з низькими обчислювальними витратами.....	29
Ляуданський Д. Д.; Приходько І. О. Розробка програмного забезпечення з використанням графічного процесору (GPU) адаптивної обробки сигналів на основі алгоритму FDAF.....	32
Мельник Т. Й.; Сушко О. Ю. Вплив розподілу вихідних фаз лінзи Ротмана на характеристики антенної решітки.....	35
Парфило І. О.; Богомолів М. Ф. Застосування патч-антени для моніторингу рівня глюкози в крові.....	39
Парфьонов Г. В.; Антипенко Р. В. Проблеми радіообміну в сузір'ях пікосупутників.....	42
Політанський Р. Л.; Площик А. С. Ширококутові антенні пристрої на основі щілинних антен.....	45
Соколов К. А.; Жук С. Я. Система визначення просторових координат об'єктів з використанням PTZ камери та лазерного далекоміра.....	49
Терещенко Д. В.; Антипенко Р. В. Мікродоплерівський радар для використання космічними апаратами.....	52
Цибровський О. М.; Мирончук О. Ю. Адаптивне оцінювання параметрів каналів зв'язку.....	55

---

## **СЕКЦІЯ 2. ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ СИСТЕМИ**

Dudarek G. O.; Martyniuk S. Yev. Specaugment for radio frequency spectrogram classification.....	59
Kundelskyi P. V.; Nikitchuk A. V. Encryption-based protection of UAV communication channels.....	62
Melnyk V. V.; Nikitchuk A. V. Data streams management in personal bluetooth networks.....	65
Броварник С. А.; Зінгер Я. Л. Застосування багатосенсорних систем для підвищення точності навігації малорозмірних БПЛА.....	68
Євдокімов Д. О.; Зінгер Я. Л. Застосування гауссового розбрикування в адаптивних системах оптичної навігації на основі комп'ютерного зору.....	71
Катеринчук І. С.; Чесановський І. І.; Табенський С. М. Оптимізація процесу аналого-цифрового перетворення сигналів в кіберфізичних системах.....	74
Лащевська Н. О.; Коротков С. С.; Приходько І. О.; Борова Ю. О. Інтелектуальна модель для фонемного розпізнавання на основі LSTM-архітектури.....	77
Маленчик Т. В.; Жук С. Я. Виявлення зриву супроводження траєкторії цілі за критерієм 3/4 з використанням вирішальної статистики найсильнішої відмітки.....	80
Набок Е. Р.; Неуймін О. С. Аналіз математичних моделей руху маневруючих об'єктів у просторі.....	83
Назаров І. С.; Чмельов В. О. Підходи до удосконалення методів виявлення сигналів дронів на фоні адитивних шумів.....	87
Пащук І. В.; Домбровський М. З. Використання тональних багаточастотних сигналів для кодування даних в радіо каналах.....	90
Юрченко О. А.; Жук С. Я. Аналіз методів реалізації планування руху рійних дронів на базі штучного інтелекту.....	93

---

### **СЕКЦІЯ 3. ЕЛЕКТРОНІКА, НАНОТЕХНОЛОГІЇ, БІОМЕДИЧНІ СИСТЕМИ, РАДІОВИМІРЮВАННЯ**

Nikitchuk A. V. Multi-objective optimization with constraints in the process of electronics design.....	96
Божок Д. О.; Степанов М. М. Автоматизація керування процесом завантаження млина МШЦ.....	99
Головня В. М.; Головня Є. С.; Зінковський Ю. Ф. Визначення розміру частинок за допомогою індикатриси розсіювання.....	102
Коваленко І. Л.; Мовчанюк А. В. Використання хмарних обчислень та алгоритмів штучного інтелекту у первинній діагностиці здоров'я за допомогою портативних медичних пристроїв.....	104
Пархоменко Б. О.; Мовчанюк А. В. Розробка методу виявлення кроків за допомогою MEMS акселерометра для систем охорони периметру.....	107
Педченко Н. М.; Боряк Б. Р.; Лактіонов О. І.; Янко А. С. Створення універсальної наземної роботизованої платформи для бойових дій та розвідки.....	110
Пономарьов І. В.; Антипенко Р. В. Особливості обробки капнограм....	112
<b>АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК АВТОРІВ.....</b>	<b>115</b>

**Секція 1. Радіотехнічні системи та мікрохвильова  
техніка.**

*Мікрохвильова технологія, НВЧ та ТГц електроніка,  
антени, системи радіорозвідки, системи радіоелектрон-  
ної боротьби, космічні радіосистеми.*

**Керівник секції:** Сергій Мартинюк

**Секретар секції:** Оксана Захарченко



## UNMANNED AERIAL VEHICLE SIMULATOR FOR RADIO SURVEILLANCE APPLICATIONS

*Demchyna Y. O.; Dubrovka F. F., DSc., Professor*

*Department of Radio Engineering, National Technical University of Ukraine  
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” Kyiv, Ukraine*

### Introduction

The design of effective radio surveillance systems requires accurate modeling and testing of methods for detecting and locating electromagnetic signals. Combining radio surveillance with unmanned aerial vehicles introduces the challenge of achieving real-time simulation with minimal latency, which is crucial for the rapid testing of previously developed techniques, such as those used for multiple emitter location and signal parameter estimation [1] and angle or arrival estimation [2].

Existing CAD tools for RF simulation such as MATLAB/Simulink, CST Studio Suite, ANSYS HFSS, are tailored towards accurate and precise RF simulation and modeling of complex systems, are computationally intensive or include features unnecessary for simplified models. For mechanical simulation, Gazebo, PX4 SITL and MATLAB/Simulink Aerospace Toolbox provide advanced modeling capabilities for full UAV systems and may require extensive effort to add electromagnetic simulation and communicate with the electromagnetic simulation model.

Alternatively, Python-based simulations of electromagnetic waves in the far-field and UAV kinematics offer a customized approach, enabling the emulation of simplified UAV control while providing a sufficient electromagnetic model. This enables real-time testing of locating transmitters, simulating signal propagation and integrating simplified kinematics for short range applications.

### 1. Simulator overview

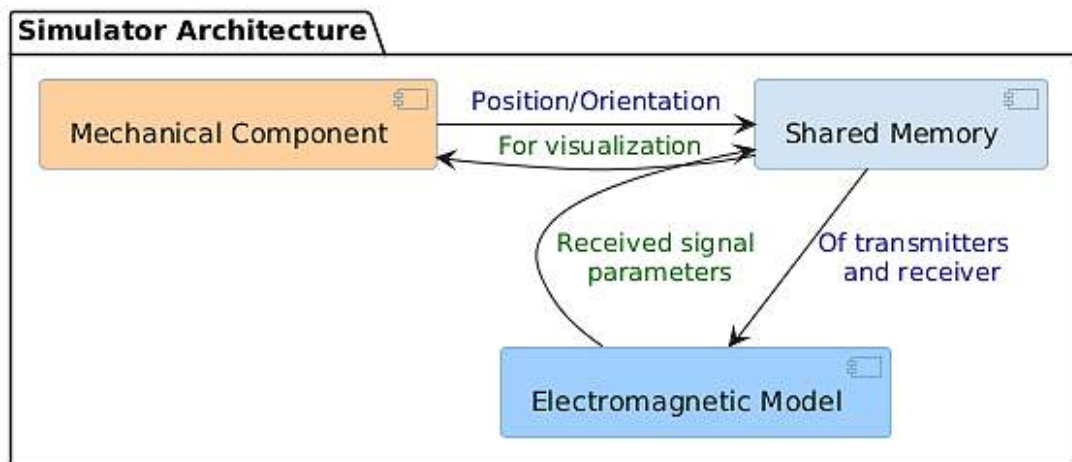


Figure 1. Design of the Simulator for Radio Surveillance in UAV Applications  
The design of the proposed simulator is shown in Figure 1. This diagram

visually demonstrates how the simulator components interact to model and evaluate electromagnetic waves propagation and UAV kinematics in real-time. The simulator utilizes Python-based libraries such as NumPy and Matplotlib for efficient data handling and visualization [3, 4]. The shared memory module provides a rapid communication which ensures data consistency and real-time performance. The electromagnetic model and the mechanical component of the simulator are detailed in the following chapters.

## 2. Mechanical component

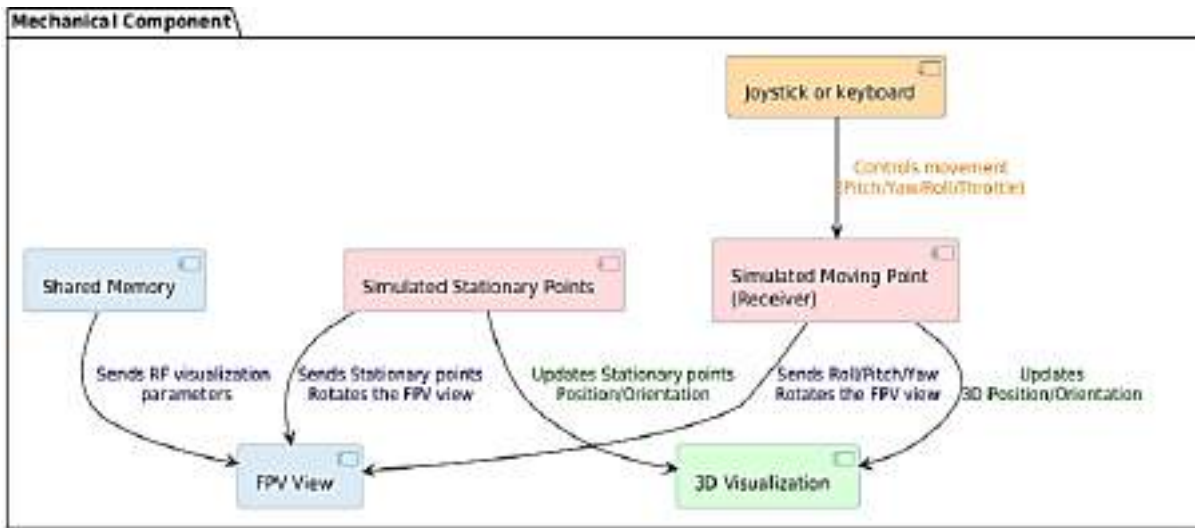


Figure 2. Design of the Mechanical Component of the Simulator

The mechanical component of the simulator is responsible for providing the kinematic information required by the electromagnetic model. This includes the position and orientation of both the receiver (a moving point) and the stationary transmitters, represented in Cartesian coordinates. The component ensures real-time updates of this data, enabling dynamic simulations and seamless integration with the electromagnetic model.

**Matplotlib** is utilized for creating the 3D visualization component in this initial implementation. However, due to its limitations in performance [4] and existing advanced 3D capabilities, it has been employed as a proof of concept, with plans to adopt a more powerful library for future updates which will be described in chapter 4.

**NumPy** provides efficient computation compared to almost every Python library that does scientific or numerical computation [3]. This library handles Cartesian coordinate calculations to maintain precision and speed.

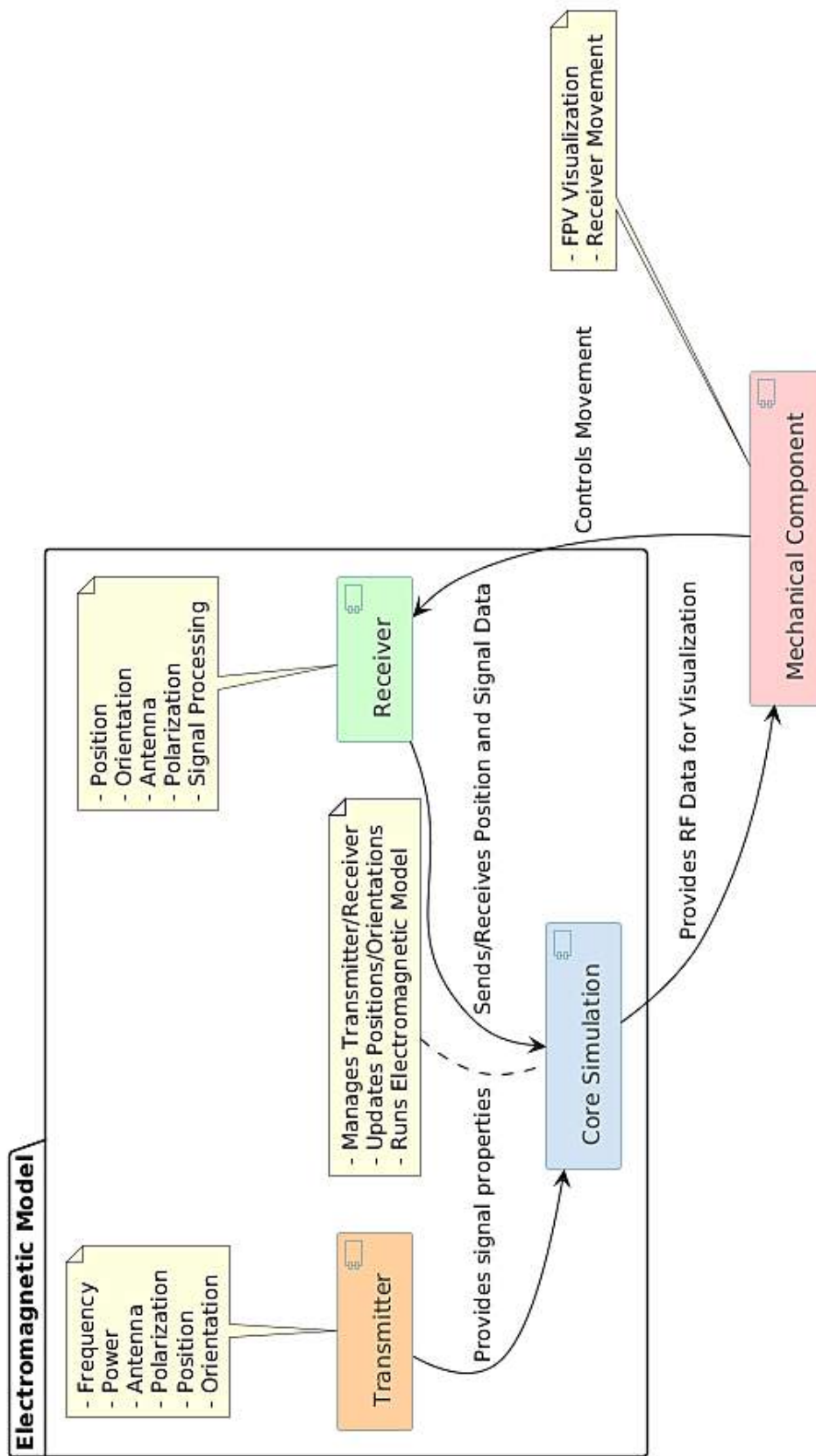


Figure 3. Design of the Electromagnetic Model of the Simulator

### **3. Electromagnetic model**

The electromagnetic model is a crucial component of the simulator, simulating the behavior of multiple transmitters and a receiver to model real-world electromagnetic environments. It is designed to provide sufficient accuracy while prioritizing performance and maintaining flexibility for rapid testing and evaluation of various methods for detecting and locating electromagnetic transmission sources. The electromagnetic model, illustrated in Figure 3, currently provides basic RSSI measurements based on the Friis Transmission Equation in a logarithmic scale using simplified antennas and without polarization considerations.

### **4. Future enhancements of the Simulator**

Future enhancements include, but are not limited to, upgrading the visualization library to enable more advanced visualization capabilities, developing a more sophisticated receiver model with real antenna radiation patterns and polarization considerations, and implementing methods such as multiple emitter location and signal parameter estimation [1] and angle of arrival estimation [2], as described in the introduction.

#### **References**

1. R. O. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 34, no. 3, pp. 276-280, Mar. 1986.
2. A. Badawy, T. Khattab, D. Trincherio, T. ElFouly, and A. Mohamed, "A Simple Angle of Arrival Estimation Scheme," presented at Politecnico di Torino, DET - iXem Lab, Qatar University, Electrical and Computer Engineering Dept., 2016.
3. Harris, C. R., et al. (2020). "Array Programming with NumPy." *Nature*, 585, 357-362.
4. Hunter, J. D. (2007). "Matplotlib: A 2D Graphics Environment." *Computing in Science & Engineering*, 9(3), 90-95.

#### **Abstract**

A simulator is presented for modeling an electromagnetic environment using multiple transmitters and a moving receiver, simulating UAV movement to evaluate methods for detecting and locating radiation sources.

**Keywords:** electromagnetic environment, simulator, emitter location, angle or arrival estimation, UAV.

#### **Анотація**

Представлено симулятор для моделювання електромагнітного середовища з використанням декількох передавачів і приймача, що рухається, імітуючи рух БПЛА для оцінки методів виявлення та локації джерел випромінювання.

**Ключові слова:** симулятор електромагнітного середовища, виявлення та локація джерел електромагнітного випромінювання, БПЛА.

## **ПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ ШІ ДЛЯ ДИЗАЙНУ АНТЕН ТА МІКРОХВИЛЬОВИХ ПРИСТРОЇВ**

*Борисенко А. О. , к.т.н  
A&E Partnership, Belchertown, MA, USA*

### **Проблеми практичного дизайну**

Використання методів комп'ютерного моделювання реалізованих в full-wave open-source/free та комерційних симуляторах суттєво розширює можливості інженерів та дослідників однак може потребувати значних обчислювальних ресурсів. Наприклад, одна симуляція антенної решітки навіть з помірною кількістю елементів може тривати годинами. Параметрична оптимізація вимагає багаторазового повторювання подібних обчислень при зміні вхідних параметрів для пошуку бажаних вихідних характеристик. При цьому використовуються різні алгоритми оптимізації які керують пошуком глобальних та оптимальних «вхід-вихід» реалізацій.

Залежності «вхід-вихід» є в більшості випадків складні нелінійні математичні функції. Методи пошуку, що базуються на обчисленнях градієнтів функцій, при цьому не спрацьовують. Такі функції це є фактично «чорна скринькою» при наявності дуже обмеженої кількості реалізацій «вхід-вихід» де «коштовна» симуляція була виконана. Визначення властивостей таких функцій, навіть при невеликих розмірностях математичних просторів «вхід» та «вихід», призводить до ситуації відомої як «прокляття великих розмірностей». Часто вихідні параметри взаємно конфліктують і тому вимагають пошуку Парето оптимальних рішень. Для цього застосовуються методи багатоцільової оптимізації, наприклад, еволюційні методи як генетичний алгоритм та подібні. Однак вони вимагають тисячі прогонів симулятора для отримання задовільного результату що робить такі методи практично непридатними якщо викорисувувати їх безпосередньо з наявними симуляторами.

В більшості комерційних симуляторів також використовується "скалярізація" багато-цільових функцій коли формується одна цільова функція як сума всіх зважених цілей. Однак, такий підхід не гарантує отримання кращих рішень бо відсутнє математичне чи евристичне обґрунтування того як саме треба обирати ті вагові коефіцієнти щоб знайти і не втратити оптимальні рішення. Окрім цілей в процесі оптимізації треба також розглядати і обмеження, що діють як на вхідні параметри, так і на вихідні характеристики. Використання потужних комп'ютерних кластерів з паралелізацією для прискорення обчислень частково вирішує проблему, але є коштовним і недосяжним для широкого загалу фахівців.

### **Методи ШІ для параметричної оптимізації**

Раціональним підходом була б така організація процесу оптимізації при якій число «коштовних» прогонів симулятора було б мінімальним та, водночас, були б певні гарантії того, що потрібні вихідні характеристики досягнуті. Відповідні ШІ методи надають потенційно такі певні можливості. Більшість публікацій про ШІ в оптимізації на цей момент пов'язані головним чином виключно з обчисленнями так званих сурогатних функцій що моделюють математичної залежності «вхід-вихід» при наявності дуже обмеженого числа таких обчислених реалізацій (див. крок два нижче). Процес обчислень та загалом оптимізація побудована наступним чином.

1. На початку визначається обмежене число, наприклад 20, комбінацій вхідних параметрів що практично визначається числом параметрів. Для цього використовуються типово Latine Hyper-Cube Sampling (LHC) з рівномірно розподіленням в параметричному просторі «вхід». Для таких початкових даних в симуляторі обчислюються всі необхідні цільові функції та обмеження. ШІ також може бути задіяним для визначення статистично значущих параметрів та виключення тих, що мало впливають щоб мінімізувати марнотратні обчислення.

2. Методами ШІ, що відносять до категорії «керованого навчання» чи «навчання з вчителем» («supervised machine learning») будуються приблизні/еквівалентні математичні апроксимації, так звані сурогати для цільових функцій та обмежень. При цьому найбільш корисними є такі методи, коли одночасно надається оцінки середнього а також і похибки, наприклад, як це реалізується для регресії Гауссівського процесу.

3. Використовуючи сурогатні функції можна визначити один чи декілька наступних наборів вхідних параметрів де треба буде виконати «витратні» обчислення в симуляторі. При цьому є дві головні стратегії вибору: (i) експлуатація – сурогатні функції, які обчислюються миттєво, можуть тепер бути використані в еволюційному оптимізаторі для пошуку початкових приблизних рішень; (ii) дослідження - нові данізначаються в областях простору «вхід» де поточні помилки сурогатів є найбільші бо ті області поки ще недостатньо досліджені і там потенційно можуть знаходитися кращі рішення. На цьому етапі відповідні методи ШІ можуть бути також задіяні щоб адаптивно визначати доречні стратегії вибору з вищою гарантією на успіх з одночасною мінімізацією «коштовних» обчислень в симуляторах.

4. Обчисленні нові комбінації «вхід-вихід» використовуються для постійного оновлення сурогатних моделей цілей та обмежень. Поступово повторючі в циклі кроки (2-4) покращує точність сурогатних моделей. На певному етапі може буде досягнуто сходження числових вимірів параметрів і цільових функцій і тоді процес оптимізації може бути зупинено. Цей етап також може бути підсилений використанням ШІ з адаптивним підлаштуванням цілей та обмежень поряд з використанням оптимальних стратегій

прийняття рішень.

Загалом, використання ШІ методів на кроках 1-му, 3-му та 4-му не є ще загальнозживаним і має в більшості випадків експериментальний характер, що потребує ще багато додаткових досліджень.

### **Як це застосовувати практично**

При практичній реалізації таких методів оптимізації критичним є мінімувати час та зусилля необхідні для програмування додаткового коду для «склеювання до купи» всіх «шматків» алгоритму так щоб це не забрало непропорційно багато часу. Цьому допомагає максимальне використання існуючих та перевірених бібліотек кодів. Зокрема більшість симулятори мають інтерфейси користувача написані на розповсюджених мовах програмування Бейсик, Матлаб та Пітон. Це дозволяє через скрипти повністю керувати процесом симуляції щоб змінювати параметри моделей та обчислювати функції цілей та обмежень.

Можливо найбільш швидким та корисним для певного практичного спектру задач, а також і для процесу навчання було б використання Матлабу з необхідним набором додатків. Зокрема, електродинамічне моделювання методом моментів виконується для пасивних мікросмужкових друкованих пристроїв в RF PCB Toolbox так само як і певних типів антенн в Antenna Toolbox. Обидва додатки також підтримують генерування файлів для виробництва відповідних друкованих плат що суттєво прискорює виготовлення макетів приладів та їх експериментальну перевірку. Відповідно методи оптимізації з еволюційним пошуком включно підтримуються в Global Optimization Toolbox, а певний клас ШІ методів є наявним в Machine Learning Toolbox. Загалом Матлаб з додатками є зручним полігоном для відпрацювання використання методів ШІ з кроками 1-4 включно. Для ілюстрації нижче показані результати поточних досліджень з використанням ШІ методів для оптимізації що було виконано водночас для розробки дизайнів антенних та мікрохвильових друкованих пристроїв.

#### *Приклад 1 - Лого-періодична друкована антена*

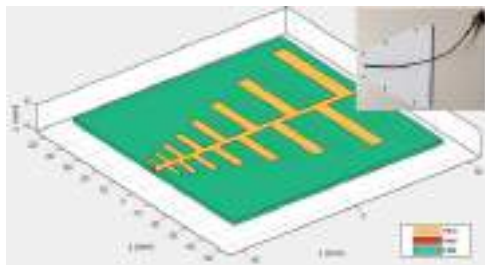


Рисунок 1. Оптимізована лого-періодична антена та її виготовлений прототип з UFL конектором, праворуч зверху

Дизайн лого-періодичної антени на смузі (1,5-6) ГГц проілюстровано на рис. 1 та рис. 2. Зокрема оптимізацію було виконано з високими вимогами по узгодженню (КСХ), відношення підсилення вперед - назад, а також з обмеженнями на форму діаграм спрямованості та загальні мінімальні фізичні розміри з виконанням прототипу на економічній FR4 підложці. Зокрема, загальна кількість прогонів симулятора не перевищувала 25 шт. Прототип антени був виготовлений та його характеристики були підтвержені експериментально.

Широкосмуговий прилад на рис. 3 виконано на RO4350 підложці на смугу (4,5-6,5) ГГц.

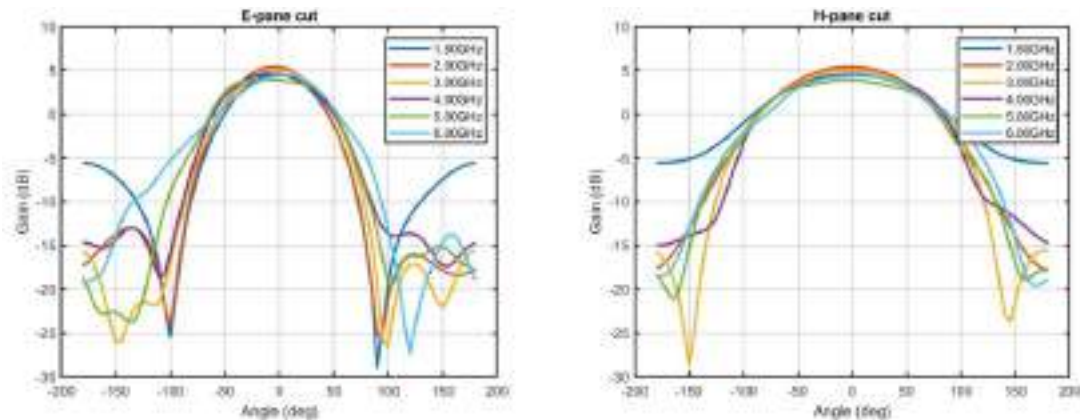


Рисунок 2. Обчислені розгини діаграм спрямованості в двох площинах

*Приклад 2 – мікросмушковий квадратурний поділювач*

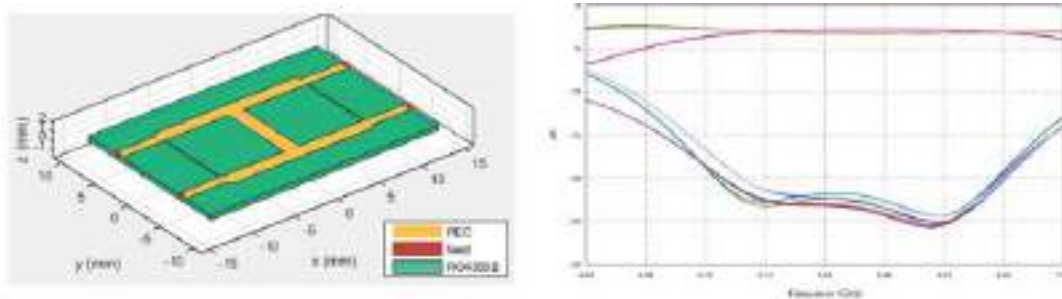


Рисунок 3. Широкосмуговий квадратурний поділювач, ліворуч, та розрахована матриця розсіювання, праворуч

При оптимізації використовувалось чотири цільові функції для імпедансного узгодження, розв'язки, а також необхідного балансу вихідних амплітуд та фаз поряд з рядом обмежень накладених на цільові функції та геометрію пристрою з урахуванням технологічних вимог.

**Перелік посилань**

1. Matlab RF PCB Toolbox, <https://www.mathworks.com/products/rf-pcb.html>.
2. Matlab Antenna Toolbox, <https://www.mathworks.com/products/antenna.html>
3. A.I.J., Forrester, at all, Design via Surrogate Modeling, Wiley, 2008.

**Анотація**

Представлено методологія використання методів ШІ для параметричної оптимізації з використанням симуляторів що вимагають значних обчислювальних ресурсів. Подані приклади з використанням в Матлабі для оптимізації антени та мікрохвильових друкованих поділювачів при мінімальній кількості прогонів симуляторів.

**Ключові слова:** електродинамічний симулятор, параметрична оптимізація, штучний інтелект (ШІ).

**Abstract**

A methodology of AI-assisted parametric optimization is presented while employing full-wave simulation, which requires a high demand on computational resources. For example, we optimize some printed microwave antennas and circuits using Matlab while minimizing the number of full-wave simulations.

**Keywords:** full-wave simulation, parametric optimization, artificial intelligence (AI).



## ВПЛИВ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ НА ЇЇ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Гергіль Є. Є.; Сушко О. Ю., PhD, доц.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

Антенні решітки з електричною зміною діаграми спрямованості (ДС) широко застосовуються у сучасних радарних системах та системах зв'язку [1]. Завдяки своїм унікальним характеристикам вони є також ключовим елементом адаптивних систем різного призначення.

Однак, такі антенні решітки мають ряд недоліків, які обмежують їх використання. Серед цих недоліків є складність конструкції та вартість виготовлення, які непропорційно швидко зростають зі збільшенням апертури антени. Складність конструкції обумовлена підводом живлення до кожного окремого елемента решітки. Зростання вартості пов'язане зі збільшенням кількості елементів керування, які є значною частиною ціни всієї системи. В якості компромісу може розглядатись варіант, в якому реалізоване керування не кожним одиничним елементом решітки, а групою елементів одночасно. Перевагою такого рішення є збереження розмірів апертури, при чому не зменшується коефіцієнт підсилення. Такий підхід дозволяє спростити конструкцію та зменшити число елементів керування. Недоліком такого підходу є зменшення діапазону кутів сканування антенної решітки, відсутність гнучкого контролю над розподілом фаз і амплітуд елементів решітки, що в свою чергу обмежує гнучкість в реалізації певних діаграм спрямованості.

В даній роботі пропонується дослідити вплив відстані між одиничними елементами решітки на її характеристики, а також порівняти її з класичними рішеннями, де здійснюється керування кожним елементом решітки.

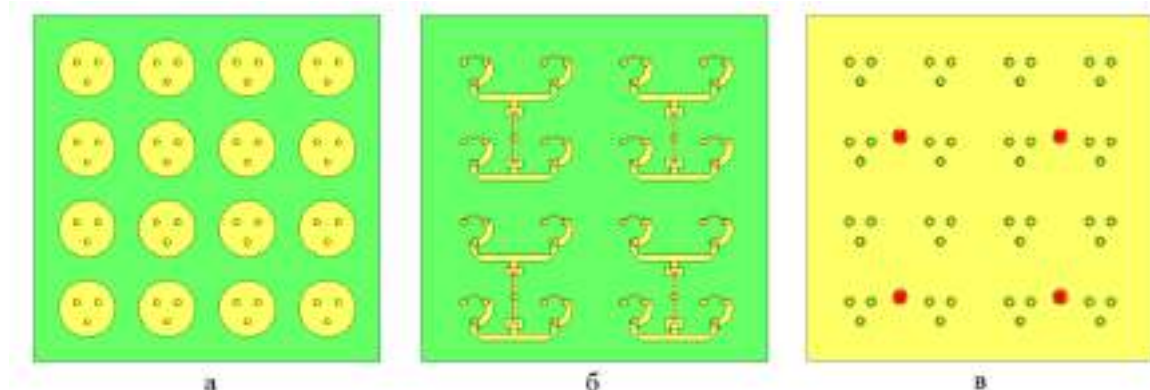


Рисунок 1. Конструкція мікросмушкової антенної решітки;  
а – верхня друкована плата (вигляд зверху); б – нижня друкована плата (вигляд зверху);  
в – нижня друкована плата (вигляд знизу)

Відстань між елементами антенної решітки (АР) обрана рівною 12 мм, що відповідає половині довжини хвилі на частоті 12,5 ГГц, що є серединою робочого діапазону частот антени. Також дана відстань є мінімально допустимою, оскільки вона обмежена конструкцією антени.

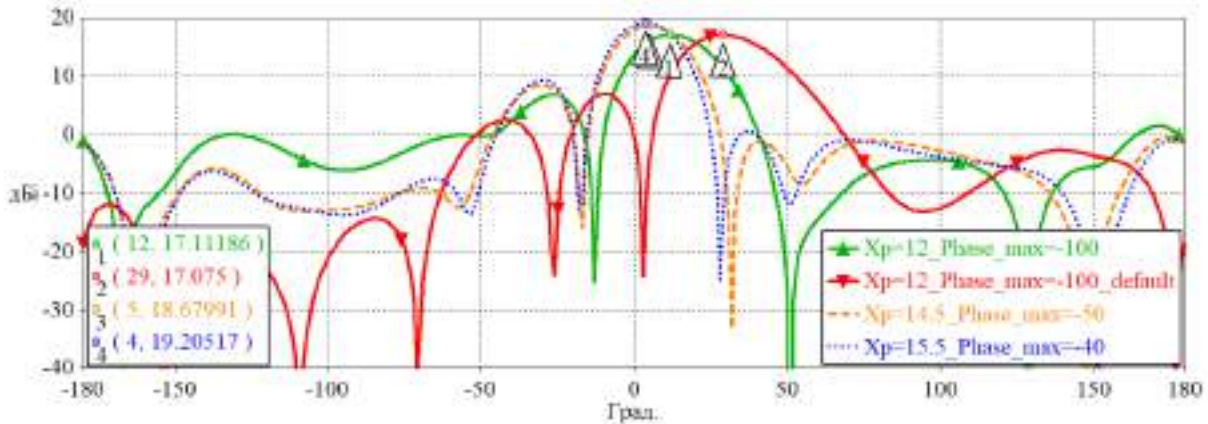


Рисунок 2. Діаграма спрямованості в площині  $uOz$ ; червоний графік – відстань між одиничними елементами 12 мм, керування кожним елементом; зелений графік – відстань між одиничними елементами 12 мм, керування групою елементів; помаранчевий графік – відстань між одиничними елементами 14,5 мм, керування групою елементів; синій графік – відстань між одиничними елементами 15,5 мм, керування групою елементів

Було проведене моделювання АР з різною відстанню між одиничними елементами, і виявлені наступні залежності. Порівнюючи кут максимального відхилення головної пелюстки (ГП), при допустимому погіршенні рівня бічних пелюсток (БП) (-10 дБ), видно що при керуванні кожним елементом АР, досягаються значні кути відхилення ГП (29°). При такій самій відстані між одиничними елементами (12 мм), але керуванні підрешітками досягаються менші кути відхилення ГП (12°).

При збільшенні відстані між одиничними елементами (14,5 мм та 15,5 мм) в підрешітках, збільшується підсилення у напрямку головного випромінювання, але суттєво звужується діапазон кутів сканування головної пелюстки (5° та 4° відповідно).

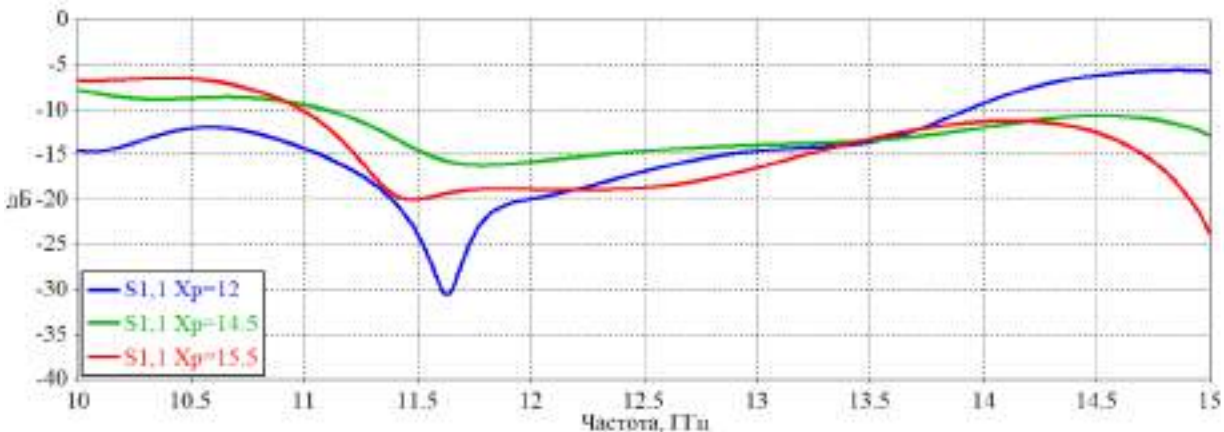


Рисунок 3 —Частотні залежності коефіцієнту відбиття  $S_{11}$  для різних відстаней між одиничними елементами

На рис. 3 зображена залежність коефіцієнту відбиття від частоти при різних відстанях між одиничними елементами. Видно, що при варіюванні відстані, відбувається суттєва зміна в коефіцієнті відбиття, тому при зміні відстані між одиничними елементами необхідно модифікувати схему живлення.

### **Висновки**

Отже проведено дослідження впливу відстані між одиничними елементами антенної решітки на її характеристики, продемонстровано деградацію діапазону кутів відхилення ГП зі збільшенням відстані між елементами решітки.

Також, запропоновано компромісне рішення для керування ДС, перевага якого полягає у зменшенні кількості елементів керування. Недоліком цього рішення є звуження діапазону кутів сканування, до (-12...+12) градусів, проте таке рішення є прийнятним у системах, які не вимагають широких кутів сканування.

### **Перелік посилань**

1. MOON, Cheon-Bong, et al. Design and analysis of a thinned phased array antenna for 5G wireless applications. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2021, 2021.1: 3039183.
2. BETANCOURT, Diego; DEL RÍO BOCIO, Carlos. A novel methodology to feed phased array antennas. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 2007, 55.9: 2489-2494.

### **Анотація**

В даній роботі досліджено вплив відстані між одиничними елементами на характеристики фазованої антенної решітки. А також наведено порівняння характеристик антенної решітки з керуванням кожним елементом решітки та керування групою елементів одночасно. При керуванні групою елементів, були досягнуті кути сканування -12...+12 градусів на частоті 12.5 ГГц.

**Ключові слова:** антенна решітка, кути сканування антенної решітки, Ku-діапазон.

### **Abstract**

This paper investigates the effect of the distance between individual elements on the characteristics of a phased array antenna. The characteristics of the antenna array with control of each element of the array and control of a group of elements simultaneously is compared. In case of controlling a group of elements, scanning angles of -12...+12 degrees were achieved at 12.5 GHz.

**Keywords:** antenna array, antenna array scanning angles, Ku-band.

## **ПОШУК ГРУП ПОСЛІДОВНОСТЕЙ ПЕРЕСТАНОВКИ СЕГМЕНТІВ ЛЧМ-ІМПУЛЬСУ ІЗ ЗАДАНИМ РІВНЕМ МАКСИМАЛЬНОЇ ВЗАЄМНОЇ КОРЕЛЯЦІЇ**

*Гончаров О. А.; Шпилька О. О., к.т.н., доц.  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна*

Одним з методів підвищення завадостійкості радіозв'язку є використання сигналів з розширеним спектром. Розширення спектру за допомогою сигналів з лінійною частотною модуляцією (англ. Chirp Spread Spectrum, скор. CSS) має ряд переваг у порівнянні з розширенням спектру сигналом з фазовою маніпуляцією. ЛЧМ-сигнали мають постійну огинаючу сигналу, кращу стійкість до негативного впливу ефекту Доплера і багатопроменевого поширення.

У 2014 році Компанія Cusleo запатентувала технологію радіозв'язку LoRa, яка зараз є найвідомішим прикладним застосуванням методу CSS. Метод модуляції сигналу, який використовує технологія LoRa, в англомовній літературі отримав назву FSCM (Frequency Shift Chirp Modulation) [1], тобто модуляція ЛЧМ-сигналу зсувом по частоті. Метод FSCM використовує в якості базового сигналу один ЛЧМ-імпульс. Кодування інформації здійснюється шляхом циклічного зсуву базового сигналу в часі на  $\frac{mT_s}{2^f}$ ,  $m \in [0, 2^f - 1]$ , де  $T_s$  — тривалість базового ЛЧМ-імпульсу,  $f$  — розширюючий фактор,  $m$  — ціле число. Для ЛЧМ-імпульсу це еквівалентно циклічному зсуву по частоті на  $\frac{mB_s}{2^f}$  де  $B_s$  — смуга частот базового ЛЧМ-імпульсу, тобто інформаційні символи відрізняються лише початковим значенням частоти ЛЧМ-імпульсу. Таким чином, кожен FSCM-символ містить  $f$  бітів даних.

Одним з методів збільшення спектральної ефективності системи зв'язку є використання більшої кількості базових сигналів для кодування додаткових даних. Обираючи для кожного символу один базовий сигнал з  $2^r$  доступних сигналів, ми збільшуємо інформаційну ємність символу на  $r$  додаткових бітів. Важливо зазначити, що базові сигнали повинні мати мінімальну взаємну кореляцію.

Можливо збільшити кількість базових сигналів FSCM-системи, якщо утворити додаткові базові сигнали з основного ЛЧМ-імпульсу шляхом розбиття його на  $k = 2^n$ ,  $n \geq 2$  однакових сегментів і перестановки сегментів місцями [2]. Ця модифікація FSCM-модуляції отримала назву ICS-LoRa (англ. Interleaved Chirp Spreading LoRa), але ми будемо використовувати назву IC-FSCM (англ. Interleaved Chirp - Frequency Shift Chirp Modulation), як більш загальну.

З  $k$  сегментів можна створити  $k!$  комбінацій перестановки з яких  $(k-1)!$  є унікальними відносно зсуву по частоті. Для випадку  $k=4$  всі шість унікальних послідовностей перестановки входять в одну групу з максимальною взаємною кореляцією  $c_{max} = 0,5$ . Для випадку  $k=8$  у публікації [3] було наведено групу з шести послідовностей перестановки з максимальним рівнем взаємної кореляції  $c_{max} = 0,25$  і групу з 24-ьох послідовностей перестановки з  $c_{max} = 0,375$ .

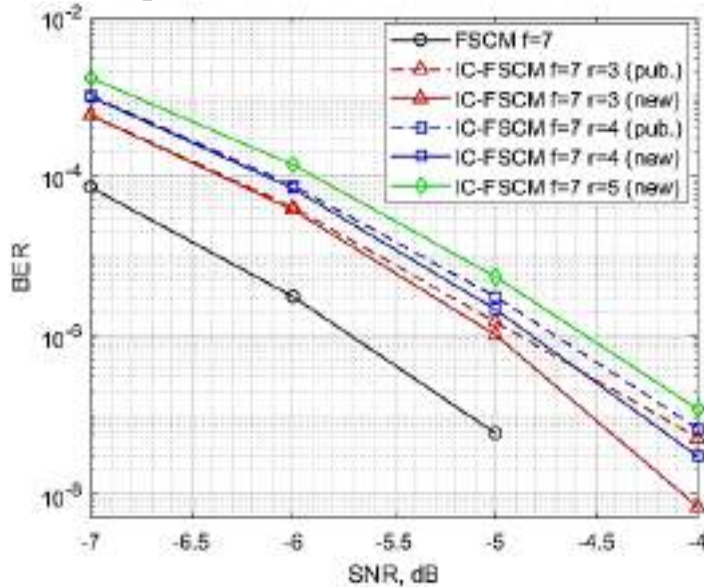


Рисунок 1. Залежність ймовірності помилки від співвідношення сигнал/шум,  $f=7$

Розроблено метод, який дозволяє знаходити групи послідовностей перестановки максимального розміру із заданим рівнем максимальної взаємної кореляції:

1) Для кожної можливої пари послідовностей перестановки  $a, b \in [1, (k-1)!], a \neq b$  формуємо базові сигнали  $(x_a, x_b)$  і знаходимо максимальне значення

взаємної кореляції цих сигналів  $c_{max}^{a,b}$  з врахуванням усіх можливих комбінацій початкових частот базових символів  $(m_a, m_b)$ .

2) Побудуємо квадратну матрицю розміром  $(k-1)! \times (k-1)!$ , де значення елемента з координатами  $(a, b)$  дорівнює значенню  $c_{max}^{a,b}$ .

3) Перетворимо побудовану матрицю на булеву матрицю, де значення чарунков дорівнюють 1 якщо виконується умова  $c_{max}^{a,b} \leq c_{max}$  (де  $c_{max}$  — заданий максимальний рівень взаємної кореляції), і дорівнюють 0, якщо умова не виконується.

4) Розглянемо булеву матрицю як матричне представлення графа, де ненульове значення чарунки вказує на наявність зв'язку між вершинами графа  $a$  і  $b$ . Тоді група послідовностей перестановки, для будь-якої пари з якої виконується нерівність  $c_{max}^{a,b} \leq c_{max}$  є повним підграфом (клікою) цього графу. Виконаємо пошук клік максимального розміру, використовуюючи алгоритм Брона-Кербоша [4].

Метод було застосовано для пошуку груп послідовностей з восьми сегментів для двох значень максимальної кореляції:  $c_{max} = 0,25$  і  $c_{max} = 0,375$ . Пошук було зупинено після знаходження групи з розміром 25-ть для  $c_{max} = 0,25$  і групи розміром 39-ть для  $c_{max} = 0,375$ .

Виконано математичне моделювання систем зв'язку з розширюючим фактором  $f = 7$  з FSCM-сигналами без додаткових бітів (один базовий сигнал) і для IC-FSCM-системи з трьома та чотирма додатковими бітами для послідовностей з  $c_{max} = 0,375$  з публікації [3] (позначені «pub.» на рис. 1), а також з трьома та чотирма додатковими бітами з  $c_{max} = 0,25$  і п'ятьма додатковими бітами з  $c_{max} = 0,375$  для знайдених послідовностей (позначені «new» на рис. 1).

Розроблено метод, який дозволяє знаходити групи послідовностей перестановки максимального розміру із заданим рівнем максимальної взаємної кореляції.

#### Перелік посилань

1. Vangelista L. Frequency shift chirp modulation: The LoRa modulation [Electronic resource] / L. Vangelista // IEEE Signal Processing Letters. — 2017. — Vol. 24, no. 12. — P. 1818–1821. Mode of access: <https://doi.org/10.1109/LSP.2017.2762960> (date of access: 14.01.2024). — Title from screen.
2. Elshabrawy T. Interleaved chirp spreading LoRa-based modulation [Electronic resource] / T. Elshabrawy, J. Robert // IEEE Internet of Things Journal. — 2019. — Vol. 6, no. 2. — P. 3855–3863. Mode of access: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2892294> (date of access: 14.01.2024). — Title from screen.
3. Edward P. Further LoRa Capacity Enhancement through Interleaved Chirp Spreading LoRa Expansion [Electronic resource] / P. Edward, E. Tarek, M. El-Aasser, M. Ashour, T. Elshabrawy // International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications. — 2019. Mode of access: <https://doi.org/10.1109/WiMOB.2019.8923337> (date of access: 21.01.2024). — Title from screen.
4. Bron C., Algorithm 457: finding all cliques of an undirected graph [Electronic resource] / C. Bron, J. Kerbosch // Communications of the ACM. — 1973. — Vol. 16, no. 9. — P. 575–577. Mode of access: <https://doi.org/10.1145/362342.362367> (date of access: 13.02.2024). — Title from screen.

#### Анотація

Представлений метод для пошуку груп послідовностей перестановки сегментів ЛЧМ-імпульсу із заданим рівнем максимальної взаємної кореляції. Метод полягає у розгляді матриці взаємних кореляції між послідовностями як графа з наступним пошуком повних підграфів. Наведені результати застосування методу.

**Ключові слова:** розширення спектру, спектральна ефективність, CSS, LoRa, FSCM, IC-FSCM.

#### Abstract

A method is presented for finding groups of interleaving patterns of the LFM pulse with a given level of maximum cross-correlation. The method consists of presenting the matrix of cross-correlation values between sequences in a graph form and then searching for complete subgraphs. Method application results are presented.

**Keywords:** spread spectrum, spectral efficiency, CSS, LoRa, FSCM, IC-FSCM.

## **КОМПАКТНА АНТЕНА УЛЬТРАКОРОТКОГО ДІАПАЗОНУ ЧАСТОТ НА ОСНОВІ МЕТАМАТЕРІАЛІВ**

*Горбачов Б. О.; Василенко Д. О., к.т.н., доц.*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна*

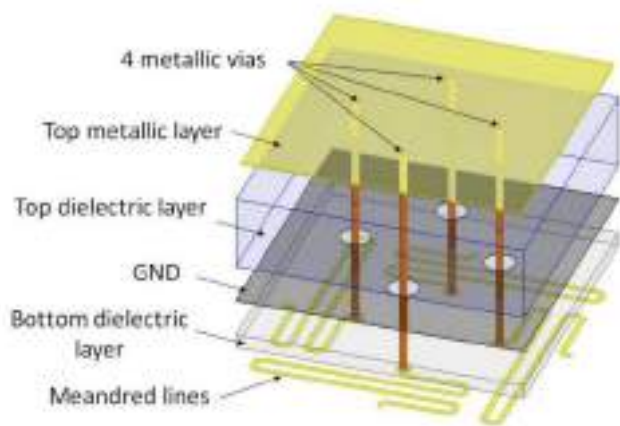
Металеві елементи пристрою, такі як корпус, плата і радіатори, працюють як ідеальні електричні провідники PEC (Perfect Electric Conductor) і суттєво впливають на характеристики антени, якщо вона розташована занадто близько. Щоб мінімізувати цей вплив, відстань має становити чверть довжини хвилі. При зменшенні відстані для мініатюризації відбита від металу хвиля стає майже протифазною, що погіршує підсилення антени. Теоретично це можна вирішити за допомогою ідеального магнітного провідника PMC (Perfect Magnetic Conductor), який не змінює фазу хвилі при відбитті, але його фізичний аналог у природі відсутній. В таких випадках використовують штучний магнітний провідник AMC (Artificial Magnetic Conductor), який, при певних умовах, має властивості PMC, його відносять до метаматеріалів. Як правило, AMC реалізується в обмеженому діапазоні частот, який характеризується фазою коефіцієнта відбиття, яка знаходиться в діапазоні від  $-90^\circ$  до  $+90^\circ$  відносно падаючої електромагнітної хвилі на резонансній частоті. Цей діапазон зсуву фаз і визначає корисну смугу частот.

Існує велике різномаяття структур метаповерхонь. Так, у статті [1] (рис. 1, а) використовується квадратний патч на дешевому діелектрику. Елементарна комірка складається з двох підкладок та чотирьох металевих отворів, які проходять крізь структуру без контакту з опорною земляною площиною. Це додає параметри для модифікації, як-от відстань між , довжина меандру та кут його повороту, що розширює можливості адаптації УС, але вони ускладнюють конструкцію і збільшують вартість виробництва. Товщина комірки 5,9 мм не відповідає вимогам компактності, на потрібній частоті вона буде ще більшою. Комірка статті [2] (рис. 1, б) має найбільшу смугу, близько 106% на частоті 0,915 ГГц, але в неї нижня сторона комірки не є суцільною землею, що є дуже великим мінусом при вирішенні задачі компактності, адже в такому випадку не можна розмістити метаповерхню на одній платі з іншими електронними компонентами. В [3] структура є симетричним квадратом, кожне плече якого має розмір 0,028 в довжинах хвиль на частоті 0,4 ГГц за рахунок використання конденсаторів між УС (рис. 1, в), але вони ускладнюють конструкцію. Така AMC має смугу 4,7 %, але є товстою, 6,4 мм, або 0,009 в довжинах хвиль.

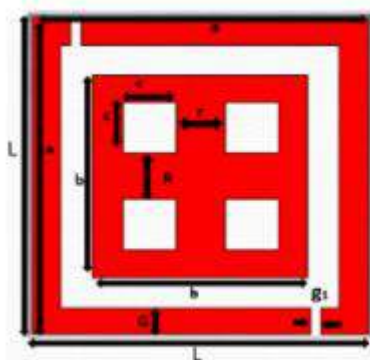
Для побудови AMC для суб-гігагерцового діапазону обрано структуру із статті [4] (рис. 1, г), оскільки вона є найтоншою з усіх розглянутих структур, а саме 0,003 в довжинах хвиль, або 0,5 мм, на частоті 2,4 ГГц та за-

безпечує смугу 1,27%, яку можна розширити за рахунок оптимізації великої кількості розмірів топології та отримати рішення в діапазоні LoRa.

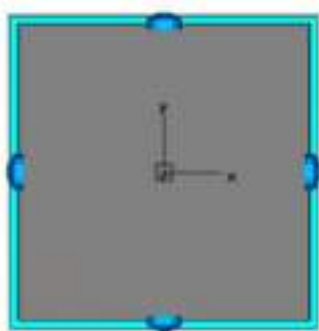
Вигляд структур показано на рисунку 1.



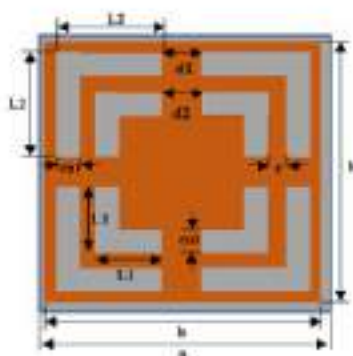
(a)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 1. Вигляд УС:

а – стаття [1], б – [2], в – [3], г – [4]

2,5 рази для перенесення її в суб-гігагерцовий діапазон. За допомогою зміни розмірів вирізів та їх положення відносно центру АМС було отримано

Комірку метаповерхні з [4] спроектовано на RO3003, який є дуже дорогим діелектриком, тому додатковою ціллю було зменшити ціну виготовлення АМС за рахунок дешевшої підкладки. FR408 від Isola є чудовою заміною, адже забезпечує зменшення ціни виготовлення приблизно в, приблизно, (3–5) разів, адже ціна RO3003 знаходиться в межах 400 \$ –500 \$ за квадратний метр, а FR408 – 50 \$ –200 \$. Також він дає змогу досягти поставленої задачі, використовуючи товщину 2 мм, або 0,006 в довжинах хвиль на частоті 0,915 ГГц, що є допустимою товщиною плати.

В програмному середовищі CST Studio Suite було досліджено вплив всіх можливих розмірів щоб знайти ті, від яких суттєво залежить робоча смуга. Ними виявились зазор між комірками, товщина і довжина вирізів та, особливо, товщина діелектрика, яку потім зафіксували на рівні 2 мм. Обрану структуру було збільшено, приблизно в



комірку (80x80) мм<sup>2</sup>, яка забезпечила робочу смугу (0,902–0,928) ГГц. Її вигляд (а) та фаза коефіцієнта відбиття (б) показано на рис.2.

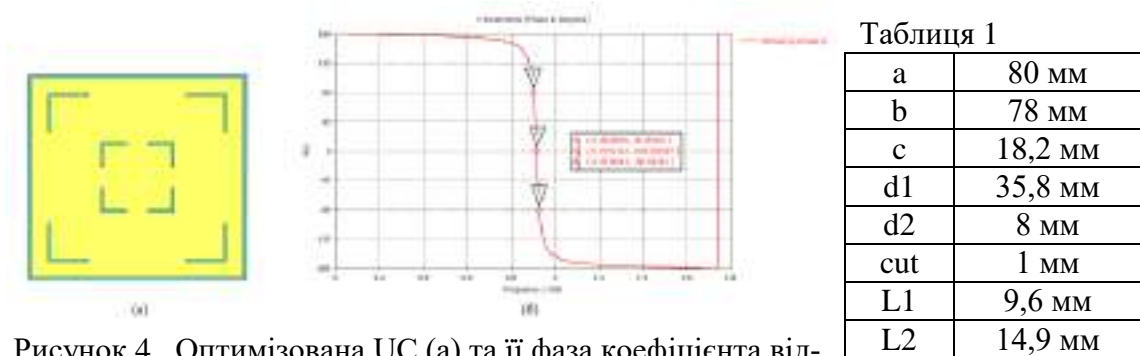


Рисунок 4. Оптимізована УС (а) та її фаза коефіцієнта відбиття (б)

Розміри оптимізованої комірки, відповідно до параметрів структури рис. 1 (г), наведено в табл. 1.

Можна досягти результату з товщиною 1 мм, або 0,003 в довжинах хвиль, з RO3003, але це не виправдано з точки зору ціни.

Створивши масив 3x3 та розмістивши над нею антену можна покращити її підсилення та значно знизити рівень задніх пелюсток. Відстань при цьому є значно менше чверті довжини хвилі.

**Перелік посилань**

1. Design and Characterization of a Compact Artificial Magnetic Conductor in the UHF Band / Nebil KRISTOU, Jean-François PINTOS, Serge BORIES, Kouros MAHDJOUBI // 2017 International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas, Innovative Structures, and Applications (iWAT)
2. A Metamaterial Inspired AMC Backed Dual Band Antenna for ISM and RFID Applications / Md. Najumunnisa, Ambadapudi Srinivasa Chandrasekhara Sastry, Boddapati Taraka Phani Madhav, Sudipta Das, Niamat Hussain, Syed Samsar Ali and Muhammad Aslam // Sensors 2022, 22, 8065
3. Small Antenna Over AMC Surface with/out Vias / Shaozhen Zhu, Kenneth Lee Ford, Alan Tennant and Richard J. Langley // 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)
4. Characterization of Slotted Square Rings AMC Reflector Using Printed Dipole Antenna / Dwiki Haryanto, Levy Olivia Nur, Achmad Munir // 2020 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications

**Анотація**

В роботі представлено штучний магнітний провідник (Artificial Magnetic Conductor, AMC), який використовується для мініатюризації антени ультракороткого діапазону частот. AMC створено на основі Isola FR408. Робочий діапазон метаповерхні складає 0,902–0,928 ГГц для фази коефіцієнта відбиття, що знаходиться в межах від -90 до +90 градусів.

**Ключові слова:** AMC, антена, фаза коефіцієнта відбиття, метаматеріал.

**Abstract**

The paper presents an artificial magnetic conductor (AMC) used for miniaturisation of an UHF antenna. The AMC is based on Isola FR408. The operating range of the metasurface is 0.902–0.928 GHz for a reflection coefficient phase ranging from -90 to +90 degrees.

**Keywords:** AMC, antenna, reflection coefficient phase, metamaterial.

## ОСОБЛИВОСТІ ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВІДБИТТЯ РОЗУМНОЇ РЕКОНФІГУРОВАНОЇ ПОВЕРХНІ

*Задорожний Г. С.; Василенко Д. О., к.т.н., доц.*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна*

Принцип роботи Розумної Реконфігурованої Поверхні (RIS Reconfigurable Intelligent Surface) базується на можливості зміни фази відбитої хвилі у кожній з елементарних резонансних ячеек окремо. Вимірювання коефіцієнта відбиття елементарної комірки є невід’ємною складовою характеристикою RIS. Найбільш розповсюдженим методом вимірювання характеристик елементарної ячейки є вимірювання відгуку всієї поверхні налаштованої синфазно. Очікується, що макроскопічний відгук поверхні відповідає відгуку елементарної комірки [1]. Зміну коефіцієнта відбиття  $R$  можна розрахувати за допомогою формули (1) із роботи [3], в яку входять три вимірювання: вільного простору  $S_{\text{Free\_Space}}$ , металеві пластина (екрану)  $S_{\text{Metal\_Plate}}$  або  $S_{\text{Screen}}$ , та зразка  $S_{\text{RIS}}$  або  $S_{\text{Sample}}$ . Тобто, зміну фази та амплітуди коефіцієнта відбиття  $R$  можна спостерігати на фоні фази та амплітуди відбиття від металеві пластина того самого розміру що RIS, оскільки вона на будь-якій частоті відбиває хвилю протифазно та без втрат.

$$R = \frac{S_{\text{Sample}} - S_{\text{Free\_Space}}}{S_{\text{Screen}} - S_{\text{Free\_Space}}} = \frac{S_{\text{RIS}} - S_{\text{Free\_Space}}}{S_{\text{Metal\_Plate}} - S_{\text{Free\_Space}}} \quad (1)$$

Вимірювання можна проводити за допомогою як однопортової [1] системи, так і двопортової [2]. У першому випадку зміна коефіцієнта відбиття буде знаходитися у параметрі  $S_{11}$ , у той час як для двопортової системи у параметрі  $S_{21}$ . При синфазному налаштуванні усіх ячеек RIS, двопортова система є взаємною  $S_{21} = S_{12}$ . У двопортовій системі антени можна розмістити горизонтально або вертикально. Для поліпшення результатів вимірювання деякі автори [2] використовують частотний аналіз (time domain analysis) із застосуванням фільтрації (time gating) відгуку об’єкта.

Дана методологія вимірювання та обрахунку коефіцієнта відбиття RIS була застосована для зразка, який виготовлений по теоретичним напрацюванням у роботі [4]. Для вимірювань використовувались коаксіально-хвильоводні переходи із рупорними антенами (Рис. 1,2). Через використання прямокутного хвильоводу WR-90 ми маємо обмеження по частоті з 7 ГГц до 13 ГГц, що зменшує роздільну здатність у часовому аналізі. Аби обійти це обмеження, зразок (RIS або металеві пластина) був розміщений на достатній відстані в 360 мм.



Рисунок 1. Горизонтальне розміщення вимірювальних антен двопортової системи



Рисунок 2. Розміщення вимірювального стенду в безеховій камері

Вимірювання було проведено для двох граничних напруг зворотного зміщення варактора 0,01 В та 19,8 В. Дане зміщення обмежене можливостями блоку керування RIS. Відгук від вільного простору, металеві пластина та синфазної RIS (Рис. 3) можна чітко спостерігати у часовому проміжку від 1 нс до 6 нс. Застосовуючи часову фільтрацію для цього проміжку було отримано відфільтрований відгук поверхні, зображений на Рис. 4.

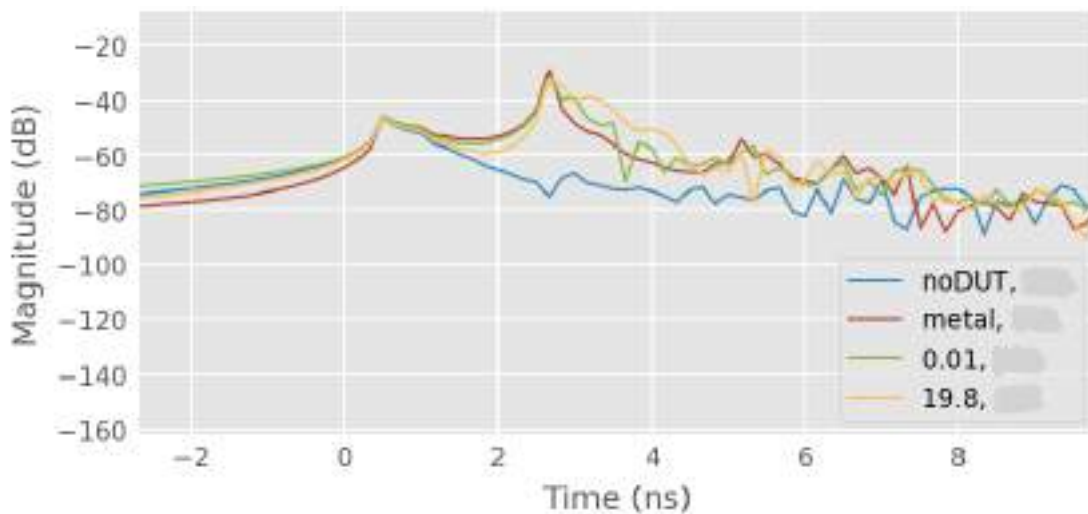


Рисунок 3. Часовий аналіз виміряного S21 для вільного простору (noDUT), металеві пластина (metal), синфазної RIS із напругою зміщення 0,01 В та 19,8 В

Для напруги зміщення варактора 0,01 В результати трьох кривих (Рис. 4, виміряної “R meas”, виміряної фільтрованої “R meas gated” та симульованої “R sim UC” фази коефіцієнта відбиття) майже збігаються. Видно, що фільтрація у часовому аналізі наближує характер кривої вимірювання до кривої симуляції.

Для напруги зворотного зміщення 19,8 В видно, що фільтрація у часовому аналізі дозволяє отримати розкриття фази (Рис. 4, “R meas gated”) по частоті який схожий на теоретичний (Рис. 4, “R sim UC”). Тобто, для нефільтрованої фази коефіцієнта відбиття (Рис. 4, “R meas”) важко оцінити де є резонанс RIS, і наскільки він відрізняється від теоретичного.

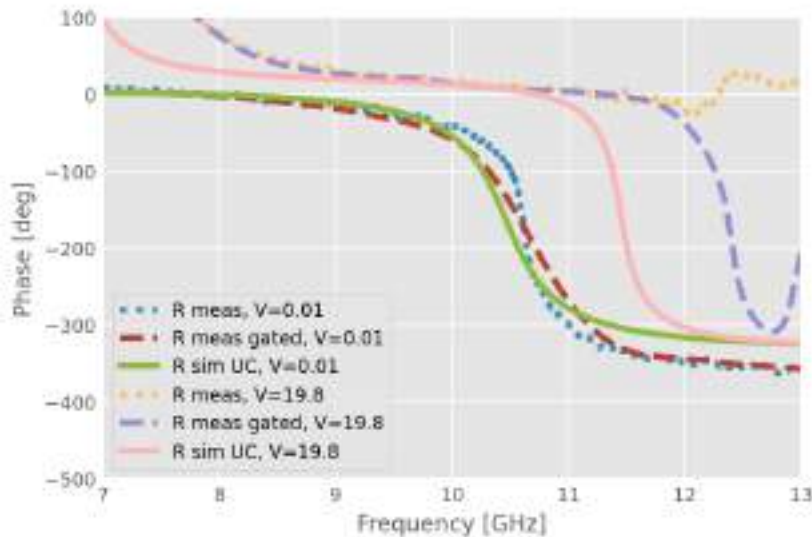


Рисунок 4. Фаза коефіцієнта відбиття: виміряна “R meas”, вириміряна фільтрована “R gated” та симульована одиничної ячейки “R sim UC” для двох граничних напруг 0,01 В та 19,8 В

Таким чином, фільтрація S-параметрів у часовому аналізі дозволяє виділити фазу коефіцієнта відбиття RIS.

#### Перелік посилань

1. Araghi, Ali & Khalily, Mohsen & Safaei, Mahmood & Bagheri, Amirmasood & Singh, Vikrant & Wang, Fan & Tafazolli, Rahim. (2022). Reconfigurable Intelligent Surface (RIS) in the Sub-6 GHz Band: Design, Implementation, and Real-World Demonstration. IEEE Access. PP. 1-1. 10.1109/ACCESS.2022.3140278.
2. N. Kristou, J. -F. Pintos, S. Bories and K. Mahdjoubi, "Design and characterization of a compact Artificial Magnetic Conductor in the UHF band," 2017 International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas, Innovative Structures, and Applications (iWAT), Athens, Greece, 2017, pp. 68-71, doi: 10.1109/IWAT.2017.7915319.
3. J. Shabanpour and C. R. Simovski, "Angular and Polarization Stability of Broadband Reconfigurable Intelligent Surfaces of Binary Type," in IEEE Access, vol. 10, pp. 126253-126268, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3226264.
4. Zadorozhnyi, H., Stapelfeldt, FN., Vasylenko, D. et al. Varactor Controlled X-Band Passive RIS Optimization. Radioelectron.Commun.Syst. 66, 563–587 (2023). <https://doi.org/10.3103/S0735272722110012>

#### Анотація

У даній роботі розглянуто вимірювання коефіцієнта відбиття RIS. Вимірювання проведені для двопортової системи де антени розміщені горизонтально. Для кращої обробки фази коефіцієнта відбиття застосована часова фільтрація у часовому аналізі.

**Ключові слова:** Розумна реконфігурована поверхня, коефіцієнт відбиття, часовий аналіз, часова фільтрація.

#### Abstract

This paper considers the measurement of the RIS reflection coefficient. The measurements were performed for a two-port system where the antennas are placed horizontally. For better processing of the reflection coefficient phase, time gating was applied in the time domain analysis.

**Keywords:** Reconfigurable intelligent surface, reflection coefficient, time domain analysis, time gating.

## **РОЗРОБКА НЕПАРАМЕТРИЧНОГО АМПЛІТУДНОГО МЕТОДУ ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ З ПСЕВДОВИПАДКОВИМ ПЕРЕЛАШТУВАННЯ РОБОЧОЇ ЧАСТОТИ З НИЗЬКИМИ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИМИ ВИТРАТАМИ**

*Коваленко І. Л.; Мовчанюк А. В., к.т.н., доц.*

*Радіотехнічний факультет КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна*

Широкосмугові сигнали з псевдовипадковим перелаштуванням робочої частоти (ППРЧ) широко застосовуються у сучасних системах зв'язку, зокрема у безпілотних літальних апаратах, завдяки їхній високій завадостійкості та можливості уникнення інтерференцій. Проте виявлення таких сигналів залишається складним завданням через часті зміни частоти-носія, що знижує ефективність традиційних амплітудних методів. Враховуючи зростаючі потреби у швидкому визначенні напрямку на джерело сигналу, особливо на платформі з обмеженими обчислювальними ресурсами, актуальним є розробка нових методів детектування ППРЧ-сигналів та визначення напрямку їх приходу.

Метою дослідження є розробка алгоритму амплітудного виявлення сигналів із псевдовипадковим перелаштуванням частоти-носія, що має низькі обчислювальні витрати і здатен функціонувати на платформах з обмеженими ресурсами.

Завданням дослідження є створення непараметричного алгоритму, що використовує прості математичні перетворення, та оцінка його ефективності у виявленні широкосмугових сигналів на фоні шуму. Критерієм оцінки рівня обчислювальних витрат є забезпечення можливості виконання даного алгоритму в режимі реального часу на малогабаритних комп'ютеризованих платформах малої та середньої потужності, без залучення додаткового коштовного обладнання.

### **Методологія**

Алгоритм розроблено у середовищі GNU Radio Companion, де реалізовано моделювання двох каналів ППРЧ-сигналів з додаванням білого Гаусового шуму для оцінки стійкості до завад та перевірки селективних властивостей розробленого алгоритму. Алгоритм використовує послідовність простих математичних перетворень у спектральній області для визначення частоти-носія сигналу, що передається, та здійснює селекцію по амплітудному критерію. Обробка вхідного сигналу здійснюється в розробленому блоці, засобами мови Python.

В розробленій системі вхідний сигнал оцифровується засобами SDR, накопичується у паралельний вектор, переводиться у спектральну область за допомогою швидкого перетворення Фур'є, фільтрується і нормалізується-

ся засобами ЦОС та надходить на подальшу обробку розробленим алгоритмом. Алгоритм реалізує послідовність математичних операцій, серед яких конволюція з оптимізованим вікном, визначення та сортування локальних екстремумів та селекція сигналів за амплітудним критерієм.

Однією з переваг підходу є його здатність працювати з мінімальними обчислювальними витратами завдяки використанню оптимізованих операцій, таких як спрощене вікно конволюції, що дозволяє виконувати обробку у режимі реального часу.

### **Результати дослідження**

*1. Ефективність в умовах низького співвідношення сигнал/шум (SNR):* Проведені симуляції показали, що алгоритм здатен точно виявляти ППРЧ-сигнали при низьких рівнях SNR, зберігаючи точність на рівні, який перевищує показники класичного амплітудного методу.

Розроблений метод вже при рівні SNR на вході системи близько 0дБ має достатню ефективність, щоб забезпечити виконання критерію достовірності виявлення сигналу в 13 дБ. Використання класичного амплітудного методу для виявлення сигналу з ППРЧ модуляцією показало себе неефективним.

*2. Селективність і стійкість до перешкод:* Запропонований алгоритм продемонстрував високу здатність розрізняти одночасно присутні сигнали з різними частотами та амплітудами. Алгоритм стабільно виявляв корисний сигнал на фоні завад, що робить його ефективним у складних умовах радіоінтерференцій.

Якісною перевагою розробленого методу є можливість амплітудної селекції декількох сигналів, що принципово неможливо для класичного методу, оскільки широкопasmовий амплітудний детектор інтегрує всю енергію в смузі роботи і не розрізняє один потужний сигнал від суми декількох слабших.

*3. Порівняння з класичним амплітудним методом:* Алгоритм перевищує класичний підхід за параметрами точності та чутливості при низькому SNR. Показано, що запропонований метод забезпечує виявлення та розрізнення двох сигналів в одній смузі частот по амплітудному критерію, що принципово неможливо для класичного амплітудного методу.

*4. Обмеження методу:* Виявлено, що при значному перекритті смуг каналів двох ППРЧ сигналів можливі випадки неправильної інтерпретації або втрати сигналу, оскільки частоти-носії можуть накладатися одна на одну. Також метод оптимізований для роботи з сигналами без пауз між частотними перемиканнями, що може бути обмеженням у деяких застосуваннях.

### **Висновки**

Запропонований алгоритм показав значний потенціал у задачах виявлення ППРЧ-сигналів у складних умовах завад та обмежень за обчислювальними ресурсами. Його перевагами є завадостійкість, низькі обчислюва-

льні витрати і здатність до амплітудної селекції, що дозволяє застосовувати метод у різноманітних системах, включаючи портативні та малопотужні платформи.

Серед виявлених недоліків запропонованого методу – неможливість селекції двох сигналів при потраплянні частоти-носія одного в смугу каналу іншого та втрата синхронізації амплітудного відслідковування при відсутності сигналу в моменти між перемиканнями ППРЧ каналів.

Подальше вдосконалення алгоритму може включати розширення можливостей роботи з сигналами, що накладаються, адаптацію для використання у більш широкому спектрі умов радіозавад, а також введення додаткового блоку стеження на основі амплітудних гістограм, що дасть можливість алгоритму коректно опрацювати ППРЧ сигнали з паузами між перемиканням каналів.

#### **Перелік посилань**

1. U. Ahnström, J. Falk, P. Händel, M. Wikstrom. Detection and direction-finding of spread spectrum signals using correlation and narrowband interference rejection. Nordic Matlab Conference – 2003.
2. J. Magiera. Detection and Direction-of-Arrival Estimation of Weak Spread Spectrum Signals Received with Antenna Array. Electronics 2021, 10, 2566. <https://doi.org/10.3390/electronics10212566>.
3. B. Kaplan, Detection, Identification, and Direction of Arrival Estimation of Drone FHSS Signals With Uniform Linear Antenna Array, in IEEE Access, vol. 9, pp. 152057-152069, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3127199.
4. D. Mototolea, R. Youssef, E. Radoi, I. Nicolaescu. Non-Cooperative Low-Complexity Detection Approach for FHSS-GFSK Drone Control Signals, in IEEE Open Journal of the Communications Society, vol. 1, pp. 401-412, 2020, doi: 10.1109/OJCOMS.2020.2984312.

#### **Анотація**

Було реалізовано та оцінено алгоритм непараметричного амплітудного детектування ППРЧ сигналів. Проведене чисельне моделювання на основі двох ППРЧ сигналів, пошкоджених послідовностями Гаусового шуму, показало багатообіцяючі результати по рівню співвідношення енергій сигнал/шум на виході детектора. Показано гарні селективні можливості реалізованого алгоритму. Під час розробки алгоритму використаний підхід, що дозволяє стверджувати про низькі обчислювальні витрати при його роботі.

**Ключові слова:** виявлення радіосигналів, розширення спектру, ППРЧ, пеленгування.

#### **Abstract**

It was implemented and evaluated an algorithm for nonparametric amplitude detection of the FHSS signals. Numerical simulations based on two FHSS signals, damaged by Gaussian noise sequences showed promising results in terms of level of SNR at the detector output. The good selective capabilities of the implemented algorithm were shown. During the development of the algorithm, an approach was used that allows us to assert low computational costs in its operation.

**Keywords:** radio signal detection, spectrum expansion, FHSS, DoA.

## **РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ГРАФІЧНОГО ПРОЦЕСОРУ (GPU) АДАПТИВНОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ НА ОСНОВІ АЛГОРИТМУ FDAF**

*Ляуданський Д. Д.; Приходько І. О., к.т.н., доц.*

*Радіотехнічний факультет КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна*

### **Актуальність дослідження**

У сучасних системах обробки сигналів необхідні ефективні адаптивні фільтри, що швидко реагують на зміни умов середовища та характеристик вхідних сигналів. Frequency Domain Adaptive Filter (FDAF) оптимізує обчислення завдяки використанню швидкого перетворення Фур'є (FFT), забезпечуючи високу швидкість обробки та можливість виконання алгоритму в режимі реального часу. Це дозволяє FDAF ефективно працювати з великими обсягами даних та складними сигналами, які часто зустрічаються у практичних застосуваннях. Паралельні обчислювальні платформи, такі як графічні процесори (GPU), значно підсилюють продуктивність FDAF, дозволяючи одночасно обробляти великі масиви даних і скорочуючи час виконання алгоритмів у кілька разів. Завдяки цим можливостям, FDAF на GPU знаходить широке застосування у різних сферах, таких як телекомунікації, де необхідно забезпечити швидку та надійну передачу даних в умовах високої завантаженості мережі; а також в автономних системах, наприклад, у дронах, де швидка обробка сенсорних даних є критичною для забезпечення безпеки та ефективності роботи. Це робить дослідження FDAF важливим напрямком для підвищення ефективності та надійності сучасних систем обробки сигналів, сприяючи розвитку, адаптивних та масштабованих рішень, здатних задовольнити зростаючі вимоги різноманітних галузей промисловості та науки.

### **Мета і завдання дослідження**

Метою даного дослідження є розробка та комплексна оптимізація алгоритмів Frequency Domain Adaptive Filter (FDAF) для забезпечення високоєфективної обробки широкосмугових сигналів з використанням графічних процесорів (GPU). Для досягнення цієї мети передбачається всебічний аналіз існуючих методів адаптивного фільтрування, що включає огляд сучасних підходів, їхніх переваг та обмежень у контексті обробки широкосмугових сигналів. Наступним етапом буде реалізація алгоритму FDAF як на центральних процесорах (CPU), так і на GPU, що дозволить детально оцінити відмінності в продуктивності та ефективності між цими двома обчислювальними платформами. Після первинної реалізації планується проведення оптимізації алгоритму з метою значного зменшення часу виконання без втрати, а навіть з підвищенням, точності фільтрації сигналів. Це включатиме застосування різних технік паралелізації, оптимізацію викори-



стання пам'яті, а також покращення обчислювальної ефективності через мінімізацію накладних витрат GPU. Важливою складовою цього етапу буде також налаштування параметрів алгоритму, таких як розмір FFT, коефіцієнт навчання та параметр регуляризації, для досягнення оптимальних результатів фільтрації у різних умовах обробки сигналів.

### **Методологія**

Методологія дослідження включає аналіз існуючих методів адаптивного фільтрування, розробку та впровадження алгоритму FDAF на CPU і GPU, а також оптимізацію обчислень для підвищення продуктивності та точності фільтрації. Ефективність реалізацій оцінюється експериментальними тестами з різними сигналами та метриками СКВ і часу виконання. Порівняльний аналіз результатів визначає оптимальні параметри адаптації, забезпечуючи високу точність і швидкість обробки на обох платформах.

### **Результати дослідження**

1. *Ефективність при різних складностях сигналів.* FDAF забезпечує точну фільтрацію для різних сигналів, включаючи синусоїди, мультитонові та АМ-сигнали, стабільно знижуючи шум навіть при низькому SNR.

2. *Швидкість виконання.* Завдяки GPU алгоритм працює десятки разів швидше за CPU, що дозволяє використовувати його в реальному часі, наприклад, для багатотональних сигналів. При однаковій СКВ досягнуто прискорення у три порядки, що показано на рисунку 1:

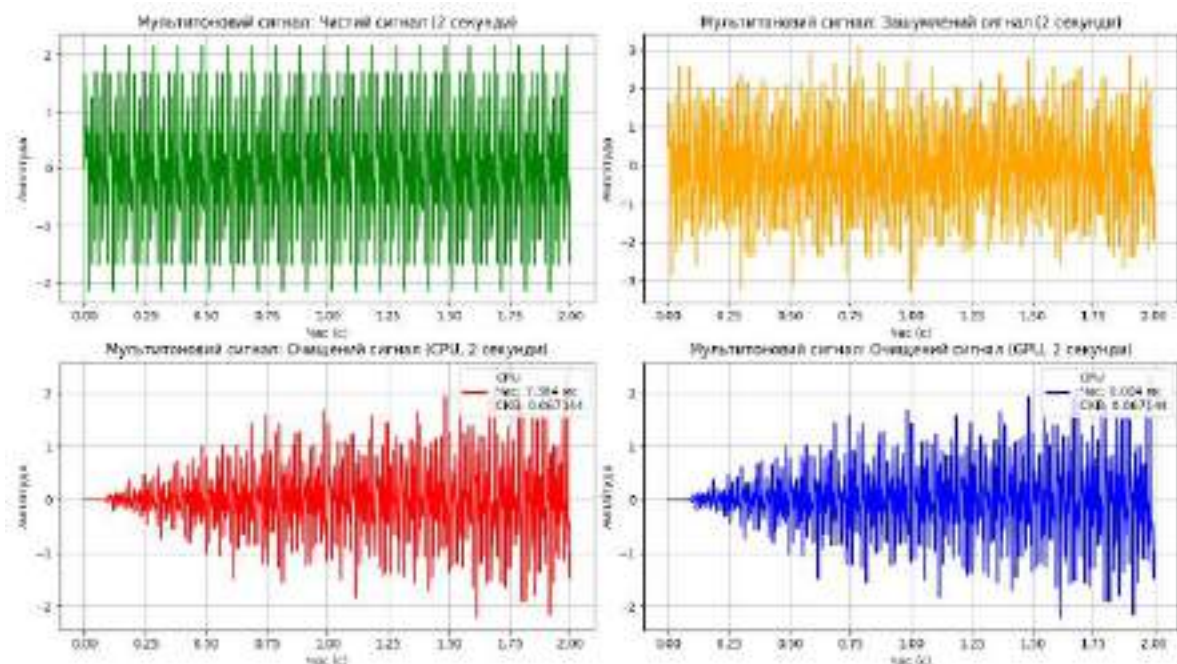


Рисунок 1. Порівняння отриманих результатів фільтрації методом FDAF при виконанні на CPU та GPU

3. *Точність алгоритму.* Алгоритм FDAF показав високу точність для всіх типів сигналів, зі СКВ. Виявлено, що точність на CPU та GPU повністю збігається, а фільтрації знижується зі збільшенням розміру FFT через більшу кількість блоків перекриття, що потребує подальшої оптимізації

для сигналів із складною структурою.

4. *Обмеження методу.* Алгоритм менш ефективний для високочастотних компонентів і складних сигналів. Використання GPU потребує додаткових досліджень щодо доцільності з економічної та енергетичної точок зору.

### **Висновки**

Застосування алгоритму FDAF (Frequency Domain Adaptive Filter) продемонструвало високу ефективність у фільтрації сигналів різної складності. У нашому дослідженні було показано, що алгоритм здатний знижувати середньоквадратичну похибку (СКВ) в окремих випадках до рівня 0,01, що свідчить про його здатність точно відновлювати чисті сигнали з зашумлених даних. Такий високий рівень точності робить FDAF перспективним інструментом для широкого спектра застосувань у сфері обробки сигналів, включаючи телекомунікації, медичну діагностику, аудіообробку та інші галузі, де необхідно забезпечити якісний відбір та відновлення сигналів з наявним шумом.

### **Перелік посилань**

1. H. A. Khawaja, N. E. Mastorakis, M. N. Mirza, Applications of GPUs for Signal Processing Algorithms: A Case Study on Design Choices for Cyber-Physical Systems, in ResearchGate, May 2021, doi: 10.13140/RG.2.2.18848.94727.

2. S. Li, Y. Zhang, "GPU-accelerated adaptive signal processing for high-speed applications," Applied Mathematical Modelling, vol. 120, 2024, doi: 10.1016/j.apm.2024.09.016.

3. H. Kim, J. Park, "Real-Time GPU-Based Adaptive Filtering for Signal Processing," in Proceedings of the IEEE International Conference on Signal Processing (ICSP), 2023, doi: 10.1109/ICSP.2023.10440053.

4. R. Kumar, V. Sharma, Adaptive Filtering Using GPU for High-Speed Signal Processing Applications, in IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 71, pp. 1234-1245, 2023, doi: 10.1109/TSP.2023.10440053.

### **Анотація**

Досліджено алгоритм Frequency Domain Adaptive Filter (FDAF) для обробки широкосмугових сигналів на CPU та GPU. Алгоритм демонструє високу точність фільтрації сигналів різної складності, включаючи мультитонові та АМ-сигнали, навіть за низького SNR. GPU-реалізація забезпечує значне прискорення, що робить метод придатним для задач реального часу. Виявлено необхідність оптимізації для роботи з високочастотними сигналами та оцінки доцільності застосування на GPU.

**Ключові слова:** DAF, адаптивне фільтрування, GPU, обробка сигналів, FFT.

### **Abstract**

The Frequency Domain Adaptive Filter (FDAF) algorithm was studied for broadband signal processing on CPU and GPU. The algorithm achieves high filtering accuracy for complex signals, including multitone and AM signals, even under low SNR. GPU implementation offers significant acceleration, enabling real-time applications. Further optimization is needed for high-frequency signals and feasibility assessment for GPU deployment.

**Keywords:** FDAF, adaptive filtering, GPU, signal processing, FFT.

## ВПЛИВ РОЗПОДІЛУ ВИХІДНИХ ФАЗ ЛІНЗИ РОТМАНА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ

Мельник Т. Й.; Сушко О. Ю., PhD, доц.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

У цій статті досліджено характеристики ширококугової антенної решітки при відхиленні головної пелюстки на  $40^\circ$  у діапазоні частот (8–16) ГГц. В якості мережі формування променя виступає мікросмужкова лінза Ротмана, а в якості випромінювачів – антени Вівальді.

У статті [1] розповідається про мікросмужкову лінзу Ротмана розраховану в діапазоні частот (8–12) ГГц із кутом сканування  $40^\circ$ . Для забезпечення покращення характеристик узгодження імпедансу по всій смузі частот між вхідними та вихідними портами лінзи розміщені фіктивні порти. За допомогою методу FDTD для узгодження лінії мікросмужки [2] узгоджено вхідні порти для забезпечення запобігання відбиттів. Зворотні втрати перехідної лінії вказують на дуже хороше узгодження між лінією живлення та областю лінзи, зі зворотними втратами, кращими за 35 дБ на частоті проектування 2,45 ГГц. У роботі [3] розроблено лінзу Ротмана для фазованих антенних решіток, що дозволяє досягти фазового зсуву (від  $-70^\circ$  до  $+70^\circ$ ) із змінним кроком в  $35^\circ$ . Крок сканування зменшується, якщо збільшується розмір лінзи.

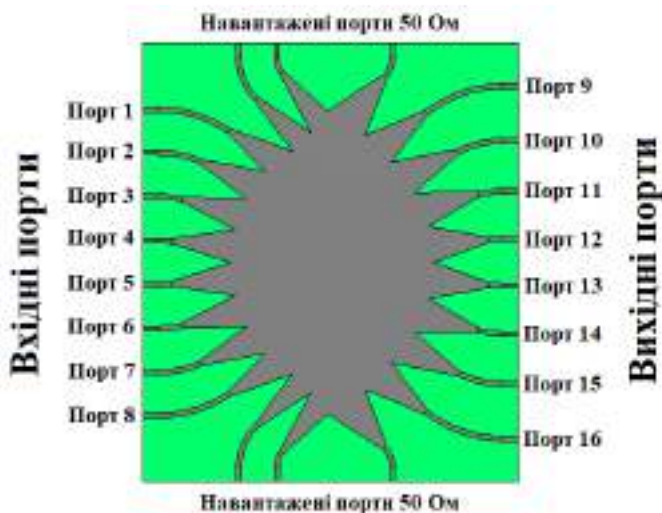


Рисунок 1. Лінза Ротмана

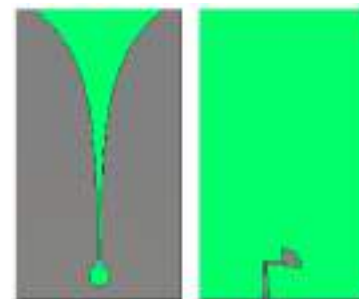


Рисунок 2. Антена Вівальді

Лінза Ротмана розміром  $8 \times 8$  (рис. 1) із відстанню між вихідними портами приблизно рівною половині довжини хвилі розрахована на центральній частоті 11,7 ГГц. Для антени Вівальді (рис. 2) використана діелектрична підкладка — текстоліт Rogers4350В товщиною 500 мкм із діелектричною проникністю 3,66. Моделювання проводилось в діапазоні частот (8–16) ГГц, тоді як робочий діапазон частот лінзи становить від 10,7 ГГц

до 12,75 ГГц. Узгодження краще за (-10 дБ) по зворотнім втратам досягнуто для всіх вхідних портів в діапазоні від 8,2 ГГц до 16,5 ГГц (рис. 3).

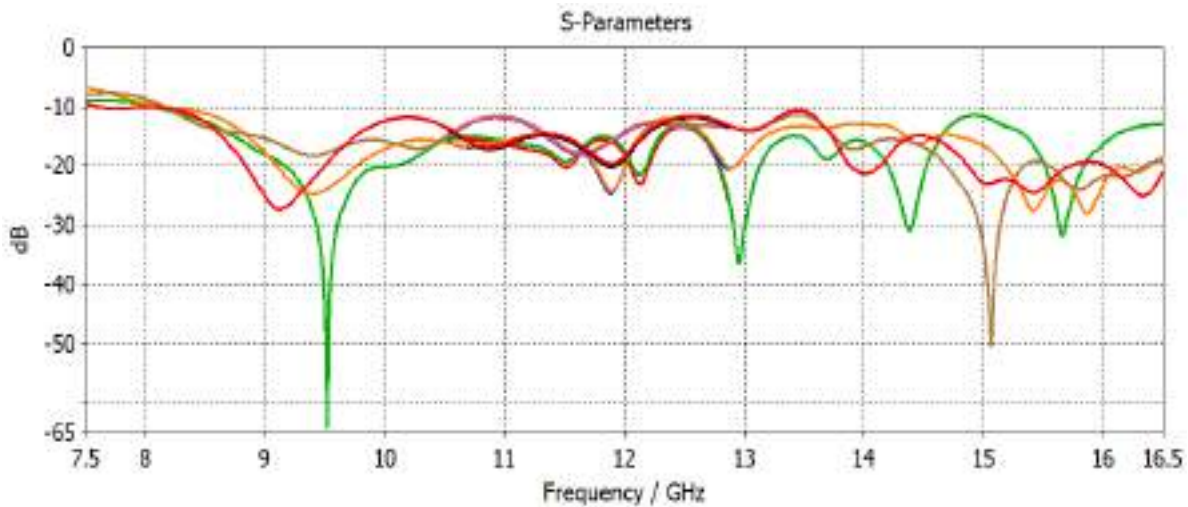


Рисунок 3. Характеристики антени Вівальді

Промодельовано структуру лінзи Ротмана із відхиленням головного пелюстка діаграми спрямованості (ДС) рівного  $40^\circ$  для аналізу впливу розподілу фаз на характеристики сканування. Варіація розподілу фаз відбувалась наступним чином: згенерована лінза Ротмана моделювалась та обчислювались її фазові зсуви між вихідними портами (на основі фаз коефіцієнтів передачі). Після цього розраховані значення різниць фаз між сусідніми вихідними портами змінили на  $22,5^\circ$ ,  $45^\circ$  та  $67,5^\circ$  (градусів). Цим самим змінюючи середньо-квадратичне відхилення (СКВ) розподілу фаз. Тобто до значень різниць фаз по чергово додавали і віднімали вибрані відхилення фаз. При цьому середнє значення різниць фаз залишалось сталим, щоб не змінювати напрямок головної пелюстки. Отримані фазові зсуви між сусідніми вихідними портами представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Збуджуючий вхідний порт, n	1	2	3	4
S9.n – S10.n	90,73	66,52	42,9	14,7
S10.n – S11.n	116,4	95,75	59	18,07
S11.n – S12.n	125,18	93,25	46,3	17
S12.n – S13.n	124,32	72,5	57,32	18,3
S13.n – S14.n	116,71	80,58	50,65	16,44
S14.n – S15.n	128,7	95,5	42,25	17,94
S15.n – S16.n	97,12	84,4	66,86	20,9

При варіації набігу фаз відбувається відповідна зміна СКВ, що впливає на ДС антенної решітки. Значення нормованого СКВ фаз для портів 1 – 4 записані в табл. 2.

Розглянуто також рівномірну зміну набігу фаз при якій СКВ рівне 0. Для ДС визначено як змінюється підсилення, рівень бічних пелюсток, відхилення антенної решітки та зроблено висновок чи потрібна оптимізація лінзи Ротмана відносно початкової геометрії.

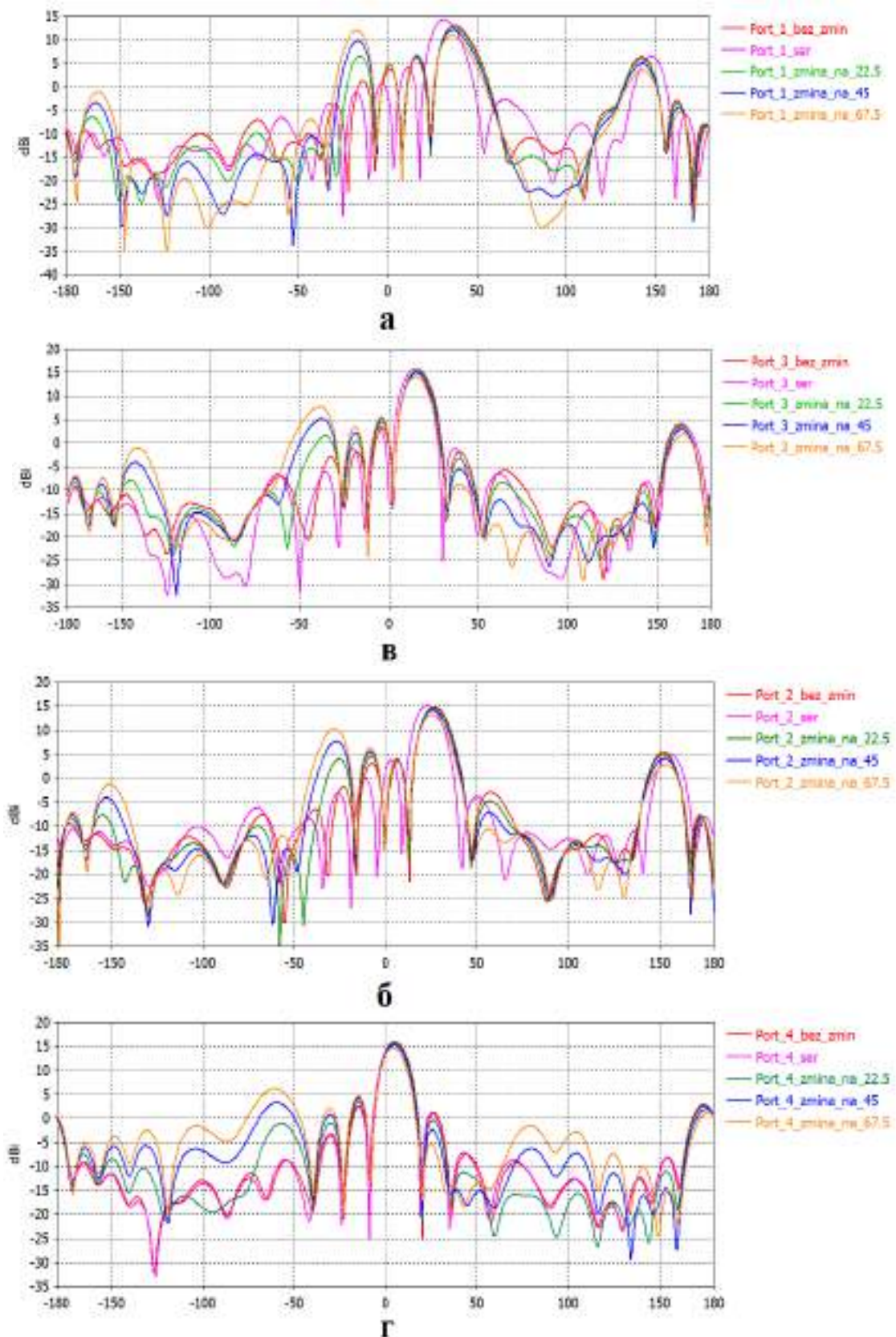


Рисунок 4. Діаграми спрямованості при збудженні із а – першого порта, б – другого порта, в – третього, г – четвертого

На рисунках 4 (а – г) проілюстровано діаграми спрямованості із почерговою зміною окремих фазових зсувів на 0; 22,5; 45; 67,5 (для збільшення СКВ) та рівномірного розподілу набігу фаз чотирьох вхідних портів.

Таблиця 2

Значення зміни фаз	Нормоване середньоквадратичне відхилення			
	Порт 1	Порт 2	Порт 3	Порт 4
Без змін фаз	23,99	13,1	5,24	0,56
22,5	25,22	14,28	6,727	1,99
45	32,62	20,86	11,826	4,048
67,5	43,12	29,425	17,64	6,128

Вибрано наступний критерій прийнятності ДС: бічні пелюстки не вище (–10 дБ), зменшення підсилення не більше ніж на 1 дБ у порівнянні із ідеалізованим рівномірним розподілом фаз. Відповідно проаналізовані ДС свідчать про те, що даний критерій задовольняється для нормалізованого СКВ не більше ніж 15.

#### Перелік посилань

1. Somayeh Adibifard Design of a wideband Rotman lens with dummy ports for wide-scan phased array applications / Somayeh Adibifard, Ammar Kouki // Electrical Engineering Department, Ecole de technologie superieure, Montreal, Canada. — 2016. — p. 1 — 2.  
Mohammed K. Al-Obaidi Microstrip Rotman lens fed array using multisection transition / Mohammed K. Al-Obaidi, Rasime Uyguuroğlu // Department of Electrical and Electronic Engineering, Eastern Mediterranean University Gazi Mağusa, Mersin 10, Turkey. — 2015. — p. 1 — 4.  
Wan Chen A design of Rotman lens for phase antenna array / Wan Chen, Jiahui fu, Qun Wu, . 2012. — p. 1 — 2.

#### Анотація

У цій статті проведено аналіз зміни в характеристиках сканування антенної решітки за рахунок змін у фазових зсувах лінзи Ротмана. Кут сканування променя діаграми спрямованості вибрано рівним 40°. В якості випромінювачів решітки використано смужкові антени Вівальді. Проведено аналіз змін ДС для лінзи Ротмана при різних середньо-квадратичних відхиленнях (СКВ) розподілу фаз на вихідних портах. Проаналізовані ДС свідчать про те, що даний критерій задовольняється для нормалізованого СКВ не більше ніж 15.

**Ключові слова:** лінза Ротмана, антена, імпеданс, діаграма спрямованості.

#### Abstract

In this paper, we analyze the changes in the scanning characteristics of the antenna array due to changes in the phase shifts of the Rothman lens. The beam scanning angle of the radiation pattern is chosen to be 40°. Vivaldi strip antennas were used as the radiators of the array. We analyze the changes in the DS for the Rothman lens at different root mean square deviations (RMSD) of the phase distribution at the output ports. The analyzed DSs indicate that this criterion is satisfied for a normalized RSWD of no more than 15.

**Keywords:** Rothman lens, antenna, impedance, radiation pattern.

## ЗАСТОСУВАННЯ ПАТЧ-АНТЕНИ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ РІВНЯ ГЛЮКОЗИ В КРОВІ

Парфило І. О.; Богомолов М. Ф., к.т н., доц.  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

Для своєчасного введення дози інсуліну хворі на діабет повинні постійно моніторити рівень глюкози за допомогою глюкометрів, які є переважно інвазивними. Часті проколи можуть призвести до занесення інфекцій, через що багато досліджень зараз зосереджено на пошуку альтернативи - безболісному малоінвазивному методу моніторингу глюкози [1].

Діелектрична проникність - це міра здатності матеріалу зберігати заряд. Було досліджено, що при зростанні концентрації глюкози діелектрична проникність і провідність крові людини зменшуються [2]. Даний ефект можливо спостерігати за допомогою патч-антени. Якщо палець людини розмістити на випромінюючому елементі антени, то її резонансна частота змінюється у відповідь на зміну діелектричної проникності крові [3].

У даному дослідженні була спроектована і змодельована за допомогою програмного забезпечення *ANSYS HFSS* патч-антена з резонасною частотою 2 ГГц та коефіцієнтом підсилення 3,10 dB. Було використано матеріал *FR<sub>4</sub>* в якості підкладки з діелектричною проникністю  $\epsilon_r = 4,4$  і товщиною  $h = 1,57$  мм. Ширина смужкової лінії *W<sub>t</sub>* розрахована на 50 Ом. Конструкція патч-антени зображена на рис. 1:

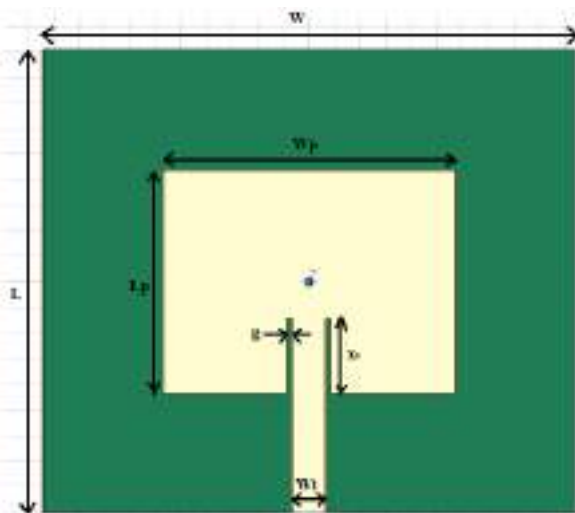


Рисунок 1. Конструкція мікросмужкової антени, створено в програмному середовищі *Ansys HFSS*

Таблиця 1 – Розраховані параметри патч-антени

Параметр	Значення
$W$	82,5 мм
$L$	72,3 мм
$W_p$	45,6 мм
$L_p$	35 мм
$g$	0,83 мм
$x_0$	11,8 мм
$W_t$	2,5 мм

Для того, щоб на резонансну частоту антени впливали діелектричні властивості крові, необхідна значна глибина проникнення. Глибина проникнення, у свою чергу, залежить від робочої частоти та форми випромінюючого елемента. Як правило, через властиву біологічним тканинам провід-

ність нижчі частоти досягають більшого проникнення в тканини, ніж вищі. Тому як резонансну частоту було вибрано 2 ГГц.

Розраховані параметри патч-антени наведено в табл. 1:

$S$ -параметр патч-антени з резонансною частотою 2 ГГц зображено на рис. 2:

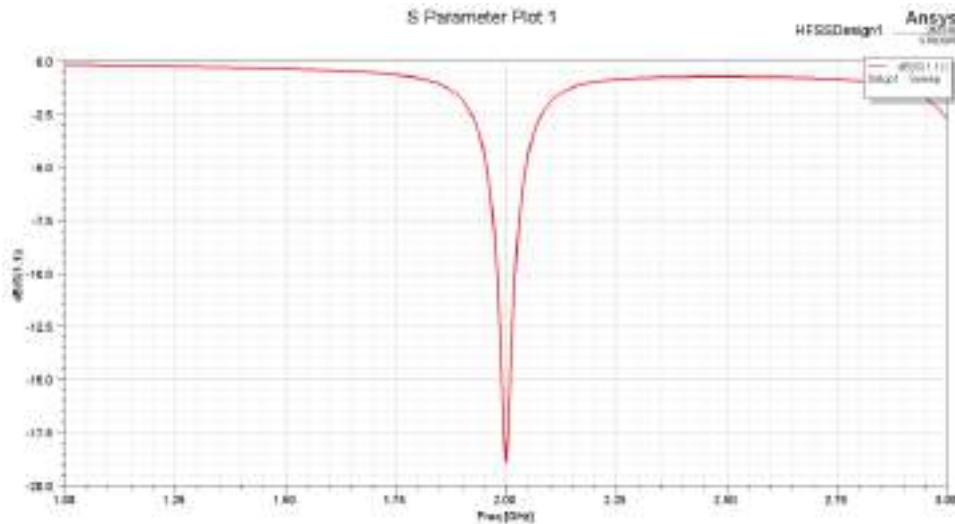


Рисунок 2.  $S$ -параметр патч-антени

Коефіцієнт підсилення антени (одиниця вимірювання  $dB$ ) з резонансною частотою 2 ГГц зображено на рис. 3:

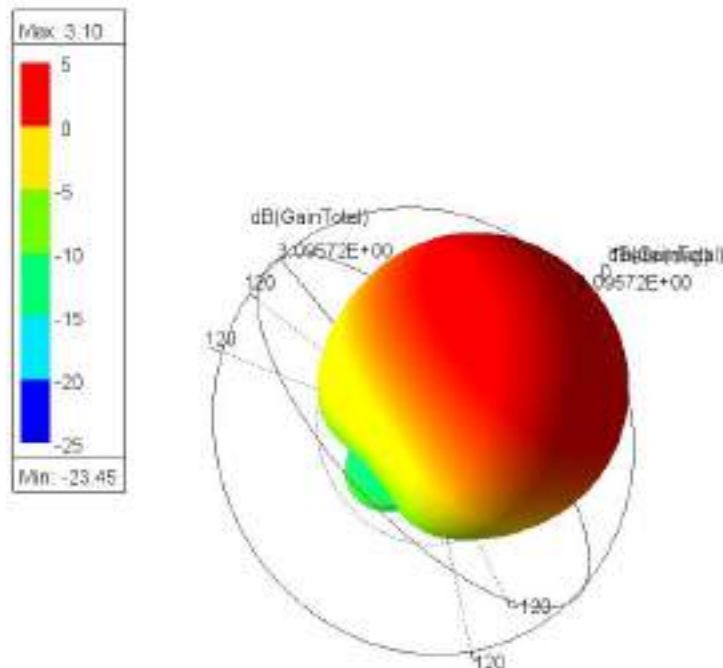


Рисунок 3. Коефіцієнт підсилення антени

$E$ -площина показує напрямок максимального випромінювання.  $H$ -площина містить вектор магнітного поля. На рис. 4 показані змодельовані діаграми спрямованості в  $E$ - і  $H$ -площинах на частоті 2 ГГц.



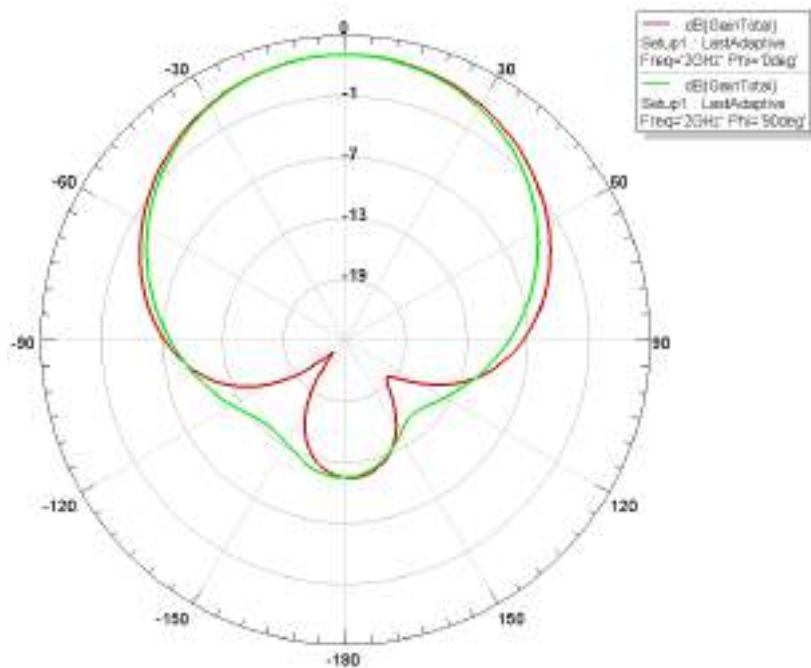


Рисунок 4. Діаграма спрямованості антени

Можна спостерігати, що антена має хороші характеристики спрямованості на частоті 2 ГГц, що є бажаним показником для вимірювання концентрації глюкози в крові людини.

#### Перелік посилань

1. Mhatre, Pratik J., and Manjusha Joshi. "Design and Verification of Noninvasive Wearable Continuous Blood Glucose Monitoring System for Smartwatches." *Progress In Electromagnetics Research M* 116 (2023): 155-164. [Electronic Resource]. – URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Design-and-Verification-of-Noninvasive-Wearable-for-Mhatre-Joshi/508b790911b2fccae1bc0697a161ecb82b65b9e> – (date of the application 17.11.2024) – Title from the screen.
2. Wu, Juncen, et al. "A new generation of sensors for non-invasive blood glucose monitoring." *American journal of translational research* 15.6 (2023): 3825. [Electronic Resource]. – URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10331674/> – (date of the application 17.11.2024) – Title from the screen.
3. Yilmaz, Tuba, Robert Foster, and Yang Hao. "Radio-frequency and microwave techniques for non-invasive measurement of blood glucose levels." *Diagnostics* 9.1 (2019): 6. [Electronic Resource]. – URL: <https://www.mdpi.com/2075-4418/9/1/6> – (date of the application 17.11.2024) – Title from the screen.

#### Анотація

Метою цього дослідження було запропонувати новий метод неінвазивного моніторингу рівня глюкози в крові, який використовує патч-антену у ролі датчика. Дана антена працює на частоті 2 ГГц і дозволяє проводити точні вимірювання з піковим коефіцієнтом підсилення 3,10 dB.

**Ключові слова:** патч-антена, глюкометр, вимірювання, глюкоза.

#### Abstract

The aim of this study was to propose a new method for non-invasive blood glucose monitoring that makes use of a patch antenna as a sensor. This antenna operates at a frequency of 2 GHz, and it allows for accurate measurements with a peak gain of 3,10 dB.

**Keywords:** patch antenna, glucometer, measurement, glucose.

## **ПРОБЛЕМИ РАДІООБМІНУ В СУЗІР'ЯХ ПІКОСУПУТНИКІВ**

*Парфьонов Г. В.; Антипенко Р. В. к.т.н., доц.*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна*

На сьогоднішній день, завдяки великому технологічному розвитку, чітко прослідковується тренд на зменшення розмірів радіоелектронних пристроїв, не виключенням стала і космічна сфера. Згідно зі статистикою, щороку зростає кількість місій із застосуванням малих супутників, і очікується, що цей тренд збережеться [0]. Даний факт обумовлений більш дешевим та швидким процесом запуску, оскільки не потрібна велика ракета-носій для доставки супутника на орбіту, а також за рахунок можливості запуску декількох супутників на одному носії. Малі супутники (до 1200 кг) становлять 93% запущених космічних апаратів у 2014 – 2023 роках та 41% від загальної маси 6300 МТ. У 2023 році вони становлять 97% від запущених космічних апаратів та 63% від загальної маси 1800 МТ. Піко- (до 1 кг) та наносупутники (до 10 кг) становлять 13 % від загальної кількості та лише 2% від загальної маси [0]. Перспективним є запуск одразу декількох таких супутників, таким чином утворюючи сузір'я, що значно підвищує надійність та можливість системи. Такі сузір'я набувають все більшої популярності завдяки їх компактності, низькій вартості та високій функціональності для різноманітних наукових задач. Прогнозується, що в найближчі десять років застосування пікосупутників стане ще більш популярним та доцільним, завдяки розвитку технологій та приватним космічним компаніям, які відкривають широкий доступ для комерційних і наукових місій.

Сузір'я пікосупутників вже зараз знаходять застосування в різних галузях. Наприклад, сузір'я з більше ніж 180 пікосупутників SpaceBee розміром 0,25U (1U має розміри (10 см x 10 см x 10 см) від компанії Swarm Technologies. Дана супутникова констеляція знаходиться на низькій навколосезній орбіті і призначена для зв'язку з пристроями Інтернету речей (IoT). Супутники SpaceBee обмінюються даними із наземними системами за допомогою плати Swarm, яку можна вбудувати в наземний пристрій, щоб він мав можливість підключити пристрої Інтернету речей до глобальної мережі зв'язку [0]. Іншими прикладами комерційних сузір'їв пікосупутників є місії Thybolt — 2 сателіта формату 0,5U та FossaSat-2 — 13 сателітів формату PocketQube 1p (5 см x 5 см x 5 см). Перша місія мала на меті випробувати нові технології з комунікацій в аматорському діапазоні [0]. Друга — забезпечення IoT-комунікацій на базі LoRa [0].

Також пікосупутники активно застосовуються для наукових та навчальних експериментів в умовах космосу, прикладами таких місій є ARCE — три сателіта формату 0,5U та BEESAT — вісім сателітів формату 0,25U.

Дані місії направлені на дослідження технологій міжсупутникового зв'язку за допомогою UWB (ultra-wideband) систем, а також різних видів модуляції [0-0]. У майбутньому такі сузір'я можуть використовуватися для глобального моніторингу кліматичних змін, а також для створення високодетальних карт поверхні Землі, що дасть змогу ефективно моніторити стан навколишнього середовища та відслідковувати зміни в екосистемах.

Однак, попри всі свої переваги, сузір'я пікосупутників також стикаються з проблемами, такими як:

1. Енергетична обмеженість, оскільки невеликий розмір пікосупутників дозволяє розмістити лише малопотужні сонячні панелі та акумулятори з малою ємністю. Це суттєво впливає на їх потужність та тривалість роботи на орбіті, особливо під час перебування у затінених ділянках. У зв'язку з цим пікосупутники часто мають обмежені можливості для використання енерговитратного корисного навантаження.

2. Компактні розміри супутника обмежують можливість установки стабілізаційних систем.

3. Ускладнений радіообмін даними між супутниками в сузір'ї.

Наразі перспективним є тип сузір'я, яке являє собою систему із головного супутника та розподілених навколо нього пікосупутників. Центральний апарат стабілізований та забезпечує обмін даними із наземною станцією керування. Пікосупутники — нестабілізовані і рухаються відносно головного по індивідуальним траєкторіям, кожний з різною частотою обертання. Вони збирають та передають інформацію до головного сателіта. Враховуючи дві крайні проблеми, з якими стикаються пікосупутники, перед нами постає завдання забезпечення радіозв'язку між головним супутником та пікосупутниками в таких типах сузір'їв.

Для вирішення проблеми радіообміну між пікосупутниками, які рухаються відносно головного супутника можливе використання ізотропної антени з наближеним до нуля коефіцієнтом підсилення. Однак, це призводить до значного зменшення відстані, на якій супутники зможуть взаємодіяти. Також, використання всенаправленої антени не є рентабельним, оскільки обмежений енергетичний бюджет не дозволить інтегрувати до них потужні підсилювачі високої частоти.

Використання направлених антен дозволить збільшити відстань для взаємодії між супутниками. Вони також демонструють вищу енергетичну ефективність, таким чином оптимізуючи енергетичний бюджет. Проте їх використання ускладнене тим, що космічний апарат обертається з невідомими параметрами. Тому пропонується використати синхронізацію сузір'я за допомогою пілот-тону — сигналу з апріорно відомими параметрами на приймальній стороні. Його випромінює головний супутник сузір'я. За допомогою даного сигналу кожен пікосупутник буде визначати своє положення у сузір'ї відносно головного, а також часові інтервали для встановлення радіозв'язку. Пілот-тон також буде передавати кодову послідовність

для синхронізації пікосупутників. Можливий варіант передачі декількох пілот-тонів з індивідуальними адресами супутників, або ж передача одного сигналу, який буде одночасно синхронізувати всі супутники. Для визначення оптимального варіанту необхідно буде провести відповідні дослідження, враховуючі всі вище перераховані проблемні фактори.

Отже, використання направлених антен та синхронізації радіообміну за допомогою пілот-тону, випромінюваного головним супутником, є перспективним підходом для забезпечення стабільного зв'язку в сузір'ї пікосупутників. Ця комбінація дозволить не лише збільшити ефективність енергетичного бюджету завдяки оптимальному використанню ресурсів, але й розв'яже проблему динамічної орієнтації апаратів у просторі. Таким чином стає можливим створення багатофункціонального сузір'я пікосупутників, здатних виконувати широкий спектр наукових досліджень.

#### **Перелік посилань**

1. SmallSats by the Numbers 2024 [Електронний ресурс] — Режим доступу до ресурсу: [https://brycetek.com/reports/report-documents/Bryce\\_SmallSats\\_2024.pdf](https://brycetek.com/reports/report-documents/Bryce_SmallSats_2024.pdf).
2. SpaceBEE [Електронний ресурс] — Режим доступу до ресурсу: [https://space.skyrocket.de/doc\\_sdat/spacebee.htm](https://space.skyrocket.de/doc_sdat/spacebee.htm).
3. Thybolt Mission [Електронний ресурс] — Режим доступу до ресурсу: <https://www.dhruvaspace.com/pslv-c54-thybolt-mission>.
4. FossaSat-2 [Електронний ресурс] — Режим доступу до ресурсу: <https://fossa.systems/2020/09/02/fossa-systems-and-momentus-announce-launch-of-nine-pocketqube-satellites/>.
5. ARCE 1A, 1B, 1C [Електронний ресурс] — Режим доступу до ресурсу: [https://space.skyrocket.de/doc\\_sdat/arce-1.htm](https://space.skyrocket.de/doc_sdat/arce-1.htm).
6. BEESAT-5/-6/-7/-8 [Електронний ресурс] — Режим доступу до ресурсу: <https://www.tu.berlin/raumfahrttechnik/forschung/aktuelle-projekte/beesat-5-6-7-8>.

#### **Анотація**

Розглянуто сучасні тренди в супутниковій сфері. Проаналізовано проблемні місця нано- та пікосупутників. Розглянуто успішно запуснені місії сузір'їв пікосупутників різних форматів, та цілі з якими вони були виведені на орбіту. Визначено перспективні сфери досліджень та розробок у даній сфері. Запропоновано варіант вирішення проблеми комунікації між нестабілізованими пікосупутниками у сузір'ї.

**Ключові слова:** пікосупутник, сузір'я.

#### **Abstract**

Modern trends in the satellite industry have been considered. Problematic areas of nano- and picosatellites have been analyzed. Successfully launched missions of picosatellite constellations of various formats and the objectives for which they were placed into orbit have been reviewed. Promising areas for research and development in this field have been identified. A solution to the problem of communication between unstabilized picosatellites in a constellation has been proposed.

**Keywords:** picosatellite, constellation.

## **ШИРОКОСМУГОВІ АНТЕННІ ПРИБРОЇ НА ОСНОВІ ЩІЛИННИХ АНТЕН**

*Політанський Р. Л.<sup>1</sup>, д.т.н., проф.; Площик А. С.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,  
Чернівці, Україна*

<sup>2</sup> *Національна академія Державної прикордонної служби України  
імені Богдана Хмельницького, Хмельницький, Україна*

Однією із актуальних задач, що постають перед розробниками, є дослідження, виготовлення і використання реконфігурованих антен, які можуть утворювати одночасно декілька каналів передачі інформації. Це обумовлено складною частотною та поляризаційною залежністю діаграми направленості та коефіцієнтів підсилення таких антен.

Досягнути заданих властивостей на сьогоднішній день можливо за умови використання цілої низки технологій: PIN-діоди, варактори, радіочастотні мікро-електромеханічні, польові транзистори, паразитні піксельні площини, виготовлені на основі метаматеріалів [1], фотопровідні елементи та рідкі кристали [2].

Ще одним напрямком є використання широкосмугових антенних пристроїв із протоколом передачі даних, який враховує особливості фізичного рівня. Прикладне застосування цієї технології приведене у роботі [3], де приводяться дослідження інтегрованих мікрохвильових і міліметрових антен та їх застосування у пристроях IoT, приєднаних до мереж 5G.

У [4] описується, яким чином технології метаматеріалів використовуються у звичайній монопольній антені, яка додатково взаємодіє із системою кільцевих резонаторів.

Прототипом розробленої антени є класична симетрична щілинна антена із однопортовим підведенням сигналу, схема і конструкція якої приводяться на рис.1. Розглянута антена має один канал, на частоті 1,1 ГГц, як це видно із її характеристики втрат сигналу, що приводиться на рис.3.

Подальші етапи роботи включають експериментальну перевірку та модернізацію даного прототипу антени. Для дослідження було здійснено ускладнення конструкції (рис. 2). Отриману антену ми назвали квадро-щілинною антеною. Отримана квадро-щілинна антена має фізичні розміри: 32 см x 24 см, розмір щілин рівний 0,8 см x 5 см. Схема та частотна характеристика втрат сигналу цієї антени зображені на рис. 2 та рис. 4 відповідно.

Отримані результати моделювання демонструють існування двох резонансних частот, значення яких визначаються параметрами антени. Для приведених на рисунку розмірів маємо два канали: на частотах 1,5 ГГц та 2,9 ГГц.

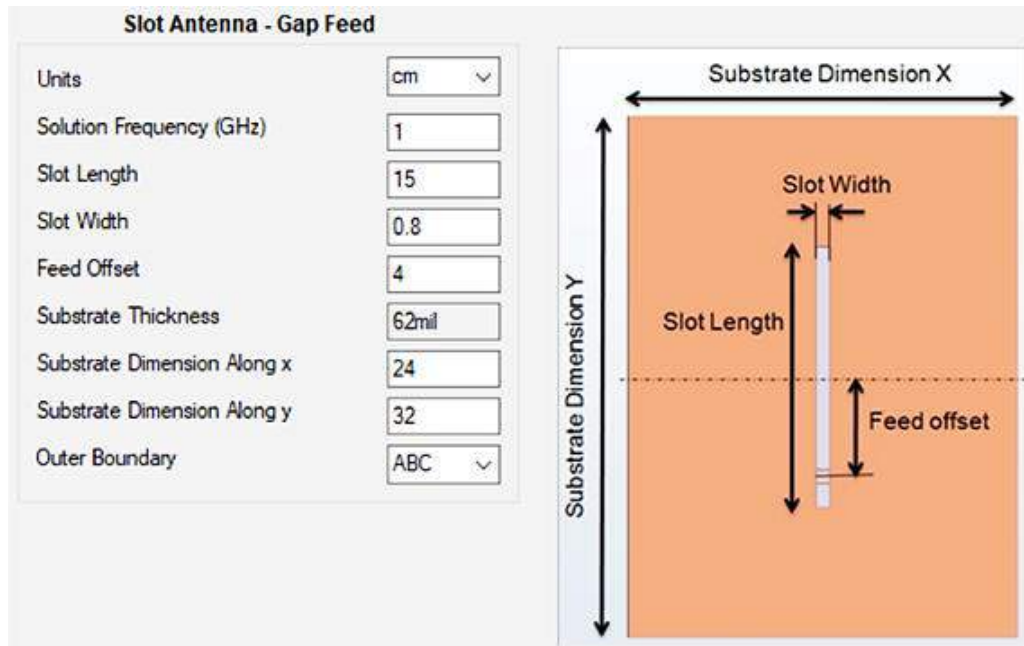


Рисунок 1. Схема однопортової щілинної симетричної антени

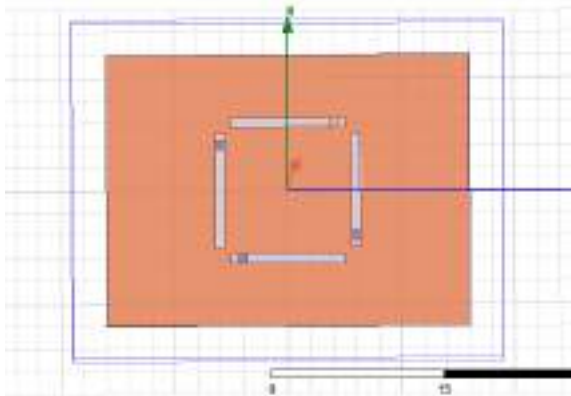


Рисунок 2. Схема квадрo-щілинної антени із 4-портовим підведенням високочастотного сигналу

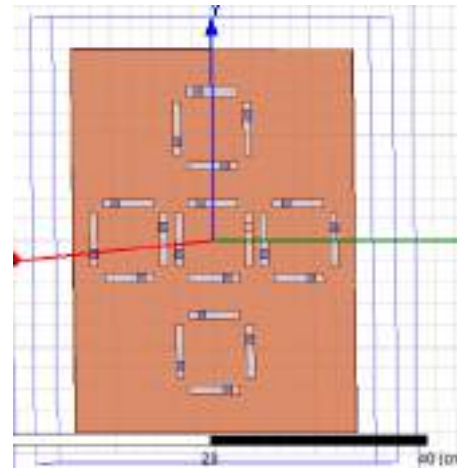


Рисунок 3. Схема багатощілинної антени

Квадро-щілинна антена може слугувати прототипом метаповерхні шляхом періодичного повторення квадрo-щілинної структури. Метаповерхня, що використовується у даному прототипі, складається з періодичної структури елементів, налаштованих на резонансну взаємодію з вхідним сигналом. Це дозволяє оптимізувати параметри антени для роботи у більш високому діапазоні частот. Конструкція антени із повторенням квадрo-щілинної структури зображена на рис. 3. Отримана антена має фізичні розміри 36 см x 28 см із розмірами щілини 5 см x 0,8 см. Збільшення кількості елементів призводить до зростання резонансних частот, а саме: 3,6 ГГц та 6,9 ГГц, а також до збільшення втрат сигналу.



Рисунок 4. Частотна характеристика втрат сигналу однощілинної симетричної антени



Рисунок 5. Частотна характеристика втрат сигналу квадро-щілинної антени із 4 - портовим підведенням височастотного сигналу

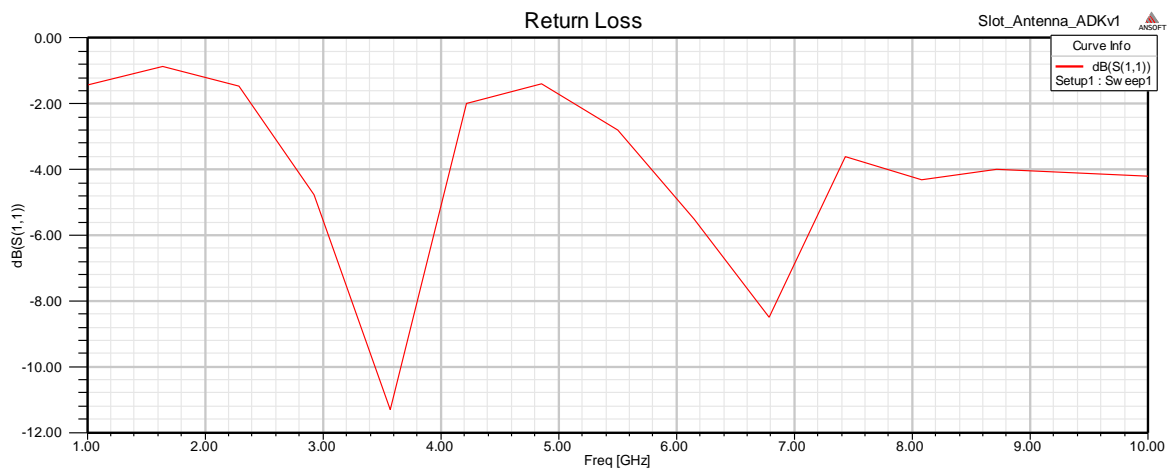


Рисунок.6. Частотна характеристика втрат сигналу багатощілинної антени

Розроблена квадро-щілинна антена дає можливість сформувати два частотних канали, а її конструкція є менш складною порівняно із закордонними аналогами [4].

Окрім того, оптимізація геометричних параметрів щілин і розташування додаткових структур дають змогу досягти підвищення коефіцієнту підсилення на резонансних частотах. Отримані результати доводять, що квадро-щілинна антена може бути застосована в багатофункціональних радіотехнічних системах, зокрема в телекомунікаціях, системах навігації та радіолокації. Дослідження метаповерхні на основі квадро-щілинної структури є перспективними з точки зору проектування елементів систем передачі інформації, які працюють на більш високих частотах.

#### **Перелік посилань**

1. You X., Fumeaux C., Withayachumnankul W. Tutorial on broadband transmissive metasurfaces for wavefront and polarization control of terahertz waves. *Journal of Applied Physics*. 2022. Vol. 131, no. 6. P. 061101. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0077652>
2. Chandra Mohanta H., Z. Kouzani A., K. Mandal S. Reconfigurable Antennas and Their Applications. *Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering*. 2019. Vol. 6, no. 4. P. 239–258. URL: <https://doi.org/10.13189/ujeee.2019.060406>
3. Hussain N., Kim N. Integrated Microwave and mm-Wave MIMO Antenna Module with 360° Pattern Diversity For 5G Internet-of-Things. *IEEE Internet of Things Journal*. 2022. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/jiot.2022.3194676>
3. Split ring resonators and composite FR4 substrate for analysis and design of tri-band monopole antenna / S. P. J. Christydass et al. *Applied Physics Letters*. 2024. Vol. 125, no. 18. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0237840>

#### **Анотація**

У роботі побудовані моделі антен, прототипом яких є звичайна щілинна антена із одним портом для подачі сигналу. Досліджені характеристики квадро-щілинної та багато-щілинної антени. Виявлено, що у квадрощілинній антені формуються два частотні канали, які забезпечують менші втрати підведеного сигналу. Також проведені дослідження метаповерхні, утвореної періодичним повторенням квадро-щілинної структури. Виявлено, що метаповерхня має значно більшу резонансну частоту (6,9 ГГц) на одному із двох частотних каналів, порівняно із початковою щілинною антеною, яка має порівнянні розміри із початковою щілинною антеною. Результати досліджень можна використати для досягнення більшої кількості якісних невзаємодіючих каналів.

**Ключові слова:** широкосмугова антена, широкосмугові сигнали, багатоканальна система передачі інформації, метаматеріали.

#### **Abstract**

Antenna models are built in the work, the prototype of which is a conventional slot antenna with one signal input port. The characteristics of the quad-slit and multi-slit antenna were studied. It was found that two frequency channels are formed in the quadro-slit antenna, which ensure lower losses of the input signal. Studies of the metasurface formed by the periodic repetition of the quadro-slit structure have also been conducted. The metasurface is found to have a significantly higher resonance frequency (6.9 GHz) in one of the two frequency channels compared to the original slot antenna, which has comparable dimensions to the original slot antenna. Research results can be used to achieve more quality non-interactive channels.

**Keywords:** broadband antenna, broadband signals, multichannel information transmission system, metamaterials



## СИСТЕМА ВИЗНАЧЕННЯ ПРОСТОРОВИХ КООРДИНАТ ОБ'ЄКТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ PTZ КАМЕРИ ТА ЛАЗЕРНОГО ДАЛЕКОМІРА

*Соколов К. А.; Жук С. Я., д.т.н., проф.  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна*

Задача визначення просторових координат об'єктів постає у багатьох сферах та обумовлена широким спектром галузевого застосування. Дана задача є актуальною для сфери охорони периметру приватної власності, у сферах топографії та будівництва тощо. Такі сфери потребують компактних та простих рішень для запровадження вимірів малої та середньої дальності на місцевості.

Запропонована система визначення координат може бути зібрана на основі трьох пристроїв з певними вимогами. Основна вимога для далекоміру — наявність вихідного інтерфейсу для надсилання даних, IP PTZ (Pan-Tilt-Zoom) камера [3, 4] має підтримувати протокол ONVIF (Open Network Video Interface Forum) [2]. Третім пристроєм є пристрій прийняття та обробки інформації з відповідними інтерфейсами (комп'ютер). Розглянемо приклад реалізації такої системи. На рис.1 подано лазерний далекомір ATN LaserBallistics 1500 [1] та камеру SD22204DB-GNY [8].



Рисунок 1. Далекмір (ліворуч) та камера (праворуч)

Камера надає нам інформацію щодо визначення кутових координат об'єкту, оскільки містить у собі механічні поворотні механізми, з електронним керуванням. Далекмір, відповідно, надає відстань до об'єкту у сферичній системі координат, за умови суміщення оптичних осей цих двох пристроїв. Дана

система може відпрацьовувати команди спрямування надані зовнішнім пристроєм керування, так і дозволяє оператору виконати необхідну корекцію при виставленні напрямку на об'єкт з подальшою передачею уточнених координат за принципом зворотного зв'язку до зовнішнього пристрою керування.

При використанні протоколу ONVIF для керування та передачі зображення [6] слід зазначити, що відеопотік передається з використанням Real Time Streaming Protocol (RTSP) протоколу [7]. Для отримання відеопотоку з PTZ камери (в нашому випадку DH-SD22404DB-GNY) необхідно коректно сформулювати RTSP посилання. Вираз для формування даного посилання наведено нижче (1).

$$S = 'rtsp://UN:PW@IP/cam/realmonitor?channel=CN&subtype=ST' \quad (1)$$

де: S — об'єкт відеопотоку, UN — ім'я користувача, PW — пароль,

IP — IP адреса камери, CN — номер каналу, ST — тип потоку, інша інформація є службовою, порт RTSP — 554.

Система координат яка використовується у протоколі ONVIF є нормованою, отже, для того щоб перейти до більш зрозумілої сферичної системи координат (СК) застосуємо вирази (2). Залежності при перерахунку координат лінійні, отже маємо можливість транслювати координати з однієї СК у іншу та навпаки. Додатково аналогічним чином обраховується коефіцієнт наближення (Zoom)

$$R = R_{\min} + \frac{(N - N_{\min})}{(N_{\max} - N_{\min})} \cdot (R_{\max} - R_{\min})$$

$$N = N_{\min} + \frac{(R - R_{\min})}{(R_{\max} - R_{\min})} \cdot (N_{\max} - N_{\min})$$
(2)

де: R — поточне значення у сферичній СК, N — поточне значення у нормованій СК,  $R_{\max}, R_{\min}, N_{\max}, N_{\min}$  — граничні значення повороту та нахилу камери у сферичній та нормованій СК відповідно

У таблиці 1 наведено дані взяті з документації ONVIF [5] та DH-SD22404DB-GNY [8] для розрахунку переходів між СК. Значення Pan та Tilt наведені в градусах, Zoom в разях. Мінімальні та максимальні значення вказані з врахуванням віддзеркалення сцени на по вертикалі.

Таблиця 1

Змінна	R		N	
	min	max	min	max
Pan	0	355	1	-1
Tilt	0	90	1	-1
Zoom	1	4	0,25	1

На рис. 2 подано результат відпрацювання зовнішніх команд PTZ камерою згенерованих псевдовипадковою послідовністю в заданих межах.

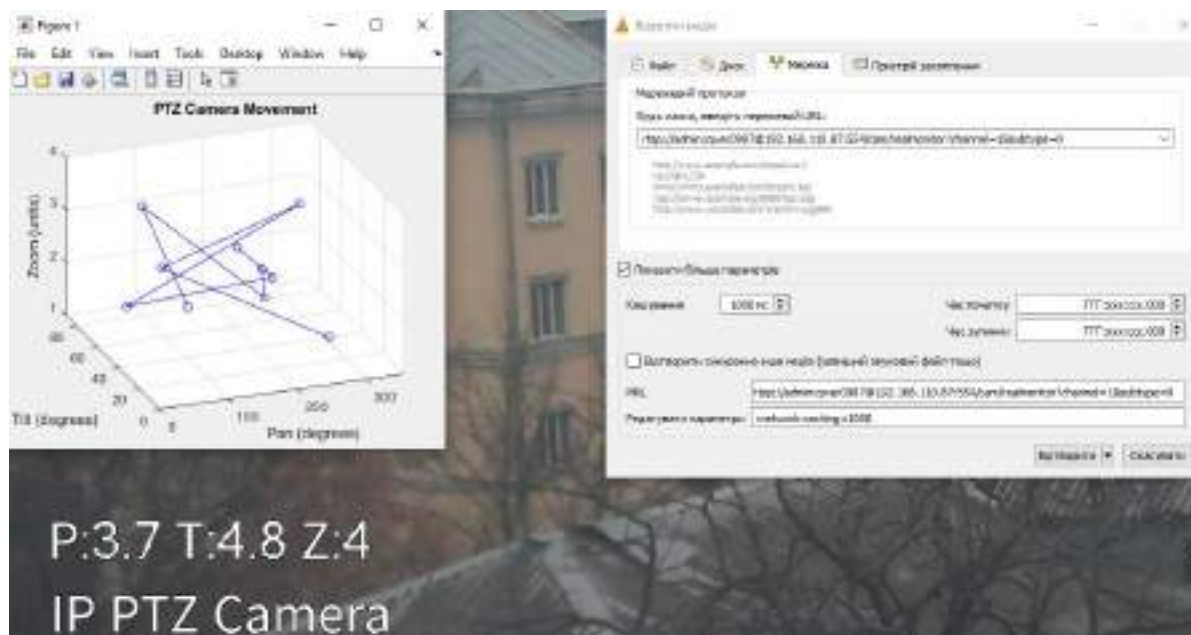


Рисунок 2. Відпрацювання зовнішніх команд PTZ камерою

Представлена реалізація системи визначення просторових координат об'єктів може бути еквівалента радару малого радіусу дії та має ряд переваг. Камера та далекомір можуть бути обрані з великого ряду готових сучасних виробів представлених на ринку, а також з модульних спеціалізованих розробок. Це дає змогу універсалізувати та уніфікувати систему. Керування такою системою можливе з використанням різноманітних новітніх алгоритмів, включаючи нейронні мережі.

#### Перелік посилань

1. ATN LaserBallistics 1500 - Hunting Laser Rangefinder 1500 yards - ATN Corp [Електронний ресурс] // Night Vision and Thermal Optic For Sale - ATN Optics UK | ATN Europe. – Режим доступу: <https://www.atneu.com/range-finder-laserballistics-1500>. – Назва з екрана.
2. Di H. W. Research and Application of ONVIF Protocol in IP Camera [Електронний ресурс] / Hong Wei Di, Cong You Luo, Xiao Chun Cai // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Т. 568-570. – С. 1399–1402. – Режим доступу: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.568-570.1399>. – Назва з екрана.
3. Kolekar M. H. Intelligent Video Surveillance Systems: An Algorithmic Approach / Maheshkumar H. Kolekar. – [Б. м.] : Taylor & Francis Group, 2018. – 180 с.
4. Nilsson F. Intelligent Network Video [Електронний ресурс] / Fredrik Nilsson, Fredrik Nilsson, Communications Axis. – New York : Routledge, 2017. : CRC Press, 2016. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1201/9781315399904>. – Назва з екрана.
5. Onvif specifications version 23.12 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.onvif.org/profiles/specifications/specification-history/december-2023>. – Назва з екрана.
6. Research on Video Monitoring System of Stage Surveillance Based on ONVIF Protocol [Електронний ресурс] / Zhen Li [та ін.] // 2015 International Conference on Electronic Science and Automation Control, Zhengzhou, China, 15–16 серп. 2015 р. – Paris, France, 2015. – Режим доступу: <https://doi.org/10.2991/esac-15.2015.43>. – Назва з екрана.
7. RFC 2326: Real Time Streaming Protocol (RTSP) [Електронний ресурс] // IETF Datatracker. – Режим доступу: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc2326>. – Назва з екрана.
8. SD22204DB-GNY - Dahua International [Електронний ресурс] // Dahua Technology. – Режим доступу: <https://www.dahuasecurity.com/products/All-Products/PTZ-Cameras/WizSense-Series/SD2/SD22204DB-GNY>. – Назва з екрана.

#### Анотація

Розглянуто варіант побудови системи визначення просторових координат об'єктів на базі поворотної IP камери та лазерного далекоміру. Наведено принципи формування відеопотоку та показані механізми перетворення координат. Продемонстровані результати моделювання відпрацювання команд керування поворотною камерою.

**Ключові слова:** PTZ камера, визначення координат, відеопотік, ONVIF, далекомір

#### Abstract

A system for determining the spatial coordinates of objects based on a PTZ IP camera and a laser rangefinder is considered. The principles of video stream formation and the mechanisms for coordinate transformation are presented. The results of simulating the execution of control commands for the PTZ camera are demonstrated.

**Keywords:** PTZ camera, coordinate determination, video stream, ONVIF, rangefinder

## **МІКРОДОПЛЕРІВСЬКИЙ РАДАР ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ КОСМІЧНИМИ АПАРАТАМИ**

*Терещенко Д. В.; Антипенко Р. В., к.т.н., доц.*

*Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна*

Із збільшенням кількості супутників, зростає попит на обслуговування, оскільки воно може подовжити строк експлуатації дороговартісних космічних апаратів. Оскільки попит зростає, все більше з'являється необхідність у багаторазових сервісних апаратах. Такі апарати не мають попередньо заданих параметрів космічного апарату, якому необхідно надати сервісні послуги, тому виникає необхідність у створенні системи для виявлення та визначення параметрів некооперованих об'єктів.

З'являється необхідність виявляти об'єкти, які не були закладені в місію на момент запуску сервісного апарату. Наразі системи автономного виявлення об'єктів використовують комбінацію із багатьох систем для виявлення некооперованих об'єктів. Зазвичай це космічне сміття, для переведення на орбіту захоронення якого необхідно знати лише його швидкість. Якщо космічному апарату необхідний інший сервіс, важливо визначити також його положення та швидкість обертання.

Ефект мікродоплера — це розширення класичного доплерівського ефекту, яке враховує мікрорухи об'єктів, такі як обертання, вібрації чи коливання окремих частин. Ці мікрорухи створюють унікальні зміни частоти у відбитому радарному сигналі, що дозволяє отримувати детальну інформацію про структуру та динаміку об'єкта.[1]

Зміни частоти у відбитому сигналі стали основою для створення мікродоплерівських радарів — пристроїв, які використовують принципи мікродоплерівського ефекту для аналізу мікрорухів об'єктів. Це дозволяє ідентифікувати об'єкти та вивчати їхню поведінку, наприклад, визначити обертання лопатей гелікоптера, коливання частин механізмів або особливості рухів людини.[2]

На рис. 1 показано схему роботи радару для використання сервісним космічним апаратом. Червоним кольором зображена траєкторія зближення сервісного апарату із об'єктом, блакитним – напрям розповсюдження випромінення мікродоплерівського радару для визначення характеристик супутника.

Радар має враховувати форму об'єкту, лінійну швидкість, кутову швидкість. Необхідна кількість точок буде досліджена в процесі моделювання.

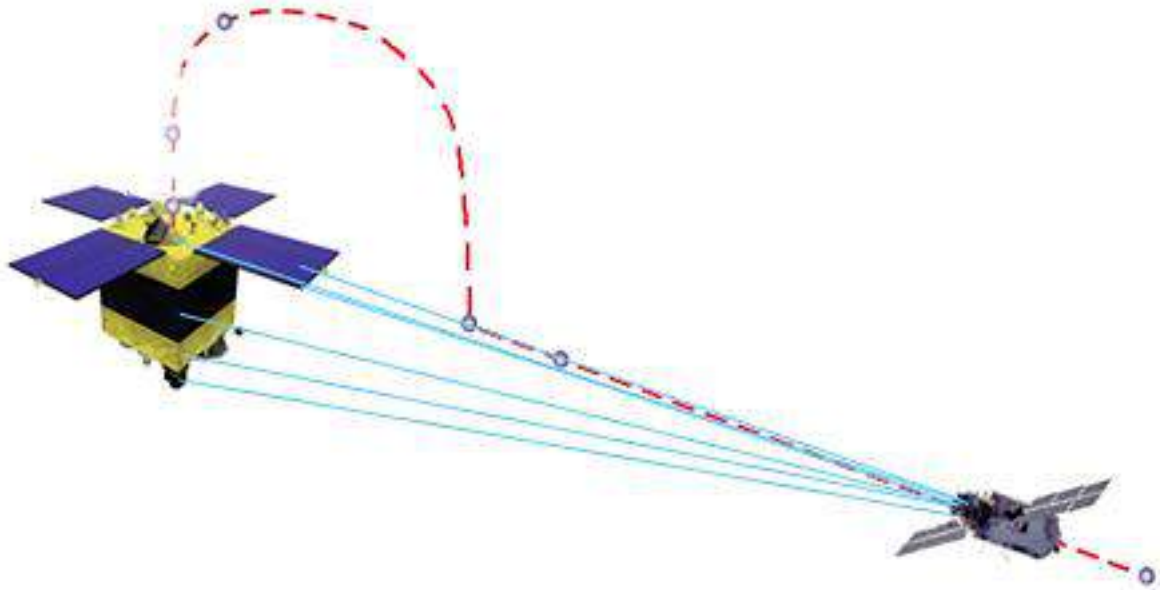


Рисунок 1. Схема роботи сервісного апарату

Для кожного елемента супутника, що відбиває сигнал радара, формується окрема мікродоплерівська компонента, яка визначається за формулою:

$$f_{D,i} = \frac{2v_{r,i}}{\lambda}$$

де  $f_{D,i}$  – це мікродоплерівська частота для кожної частини,  
 $v_{r,i}$  – радіальна швидкість елемента,  
 $\lambda$  – довжина хвилі радарного сигналу.

Якщо застосувати цю формулу для визначення складної сигнатури, як людина, взявши за сегменти окремі частини тіла людини, що рухається, можна отримати результат, зображений на рис. 2[3].

В даному випадку виокремлено саме рух руки людини, за циклами руху якої можна визначити напрям та швидкість руху самої людини.

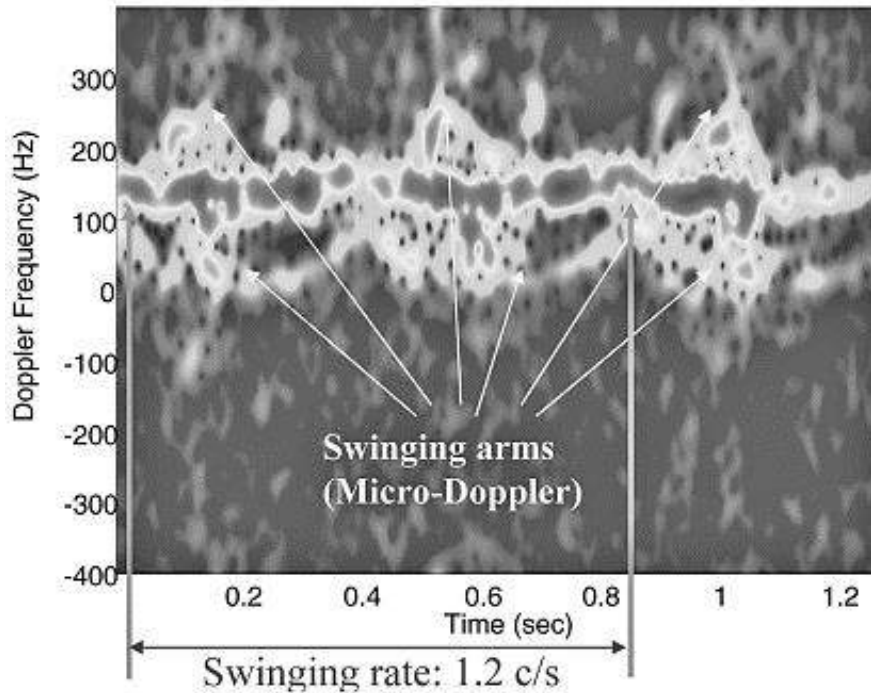


Рисунок 2. Мікродоплерівська складова людини, що йде, рухаючи рукою

Отже, мікродоплерівський радар є перспективною технологією для використання у космічній техніці, особливо для розвитку багаторазових сервісних апаратів, оскільки об'єднує переваги радіотехнічного машинного зору, при чому маючи досить велику точність визначення характеристик об'єкту.

#### Перелік посилань

1. Kwangyong Jung, Jae-In Lee, Nammoon Kim, Sunjin Oh, Dong-Wook Seo. Classification of Space Objects by Using Deep Learning with Micro-Doppler Signature Images. *Sensors* 2021. 2021. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/13/4365> (дата звернення: 10.10.2024)
2. J. Ender, L. Leushacke, A. Brenner, H. Wilden. Radar techniques for space situational awareness. *International Radar Symposium (IRS)*. 2011. P. 21-26
3. V.C. Chen, F. Li, H. Wechsler. Micro-Doppler Effect in Radar: Phenomenon, Model, and Simulation Study. *Aerospace and Electronic Systems*. 2006. P. 42. 2 - 21.

#### Анотація

Зростання кількості супутників збільшує попит на сервісні космічні апарати, які потребують системи зближення, які розраховані на некооперовані космічні апарати. Розглянуто наявні системи мікродоплерівських радарів для різних об'єктів. Запропоновано використання даної системи для зближення некооперованих космічних апаратів.

**Ключові слова:** РТПСАС, космічні апарати, мікродоплерівський радар.

#### Abstract

The increase in the number of satellites raises the demand for servicing spacecraft that require docking systems designed for uncooperative space objects. Existing micro-Doppler radar systems for various objects have been reviewed. The use of such systems for docking with uncooperative spacecraft is proposed.

**Keywords:** RTPSAS, spacecraft, Micro-Doppler radar.

## АДАПТИВНЕ ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ

Цибровський О. М.; Мирончук О. Ю., PhD

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

При проходженні через безпроводний канал зв'язку сигнал піддається впливу явища багатопроменевого поширення радіохвиль. В точці прийому прийнятий сигнал являє собою суму копій сигналу, які рухалися різними шляхами і прийшли в точку прийому з різними амплітудами і з різними затримками. Кожен із цих шляхів може розглядатися як самостійний канал із власними параметрами.

Під час роботи систем зв'язку параметри безпроводного каналу можуть змінюватися. Для достовірного прийому інформації необхідно визначити параметри каналу зв'язку і відслідковувати їх зміну в часі. Дана задача актуальна і для вузькосмугових і для широкосмугових систем зв'язку [1, 2]. Для вирішення цієї задачі застосовуються алгоритми адаптивного оцінювання, які в свою чергу поділяються на ті, що використовують тренувальну послідовність, яка являє собою сигнал відомий і передавачу і приймачу (навчання з вчителем), та ті, що не використовують її, але потребують знання інформації про структуру корисного сигналу (навчання без вчителя або сліпа адаптація).

Канал зв'язку може бути представлений у вигляді нерекурсивного цифрового фільтра [3]. Схема адаптивного оцінювання параметрів каналу зв'язку представлена на рис.1.

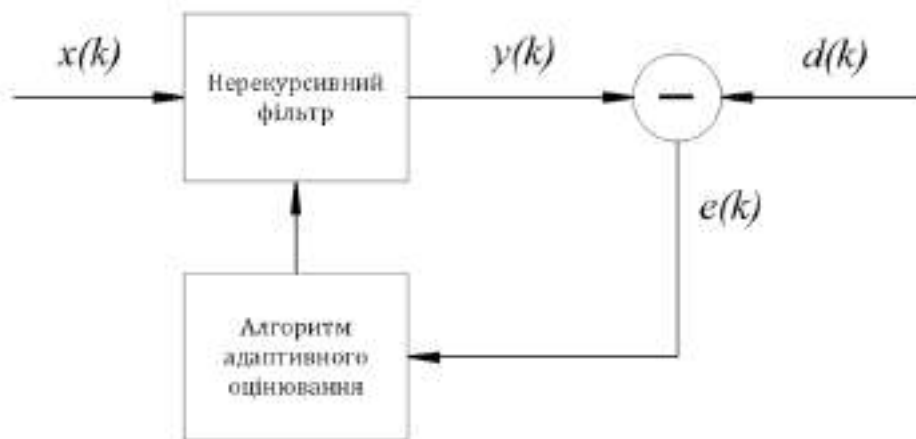


Рис. 1 Схема адаптивного оцінювання параметрів каналу

На вхід нерекурсивного цифрового фільтра порядку  $N$ , який є моделлю каналу зв'язку, поступає вхідний дискретний сигнал  $x(k)$ . Нехай коефіцієнти фільтра представлені вектором стовпцем  $\mathbf{w} = [w_0, w_1, \dots, w_{N-1}]^T$ .

Тоді сигнал на виході фільтра буде наступним (1).

$$y(k) = \mathbf{u}^T(k)\mathbf{w}, \quad (1)$$

де  $\mathbf{u}(k) = [x(k), x(k-1), \dots, x(k-N+1)]^T$  - місткість лінії затримки фільтра.

Також є зразковий сигнал  $d(k)$ . Алгоритм адаптивного оцінювання використовує похибку між зразковим сигналом і сигналом на виході фільтра, яка розраховується за наступним виразом

$$e(k) = d(k) - y(k) = d(k) - \mathbf{u}^T(k)\mathbf{w}. \quad (2)$$

Таким чином задача полягає в тому, щоб знайти такі коефіцієнти  $\mathbf{w}$ , які забезпечують мінімальне значення розрахованої похибки між зразковим сигналом і сигналом на виході фільтра. Критерієм якості оцінювання коефіцієнтів фільтра виступає мінімум середнього квадрату помилки

$$J = E[e^2(k)]. \quad (3)$$

### **Фільтр Вінера**

Квадрат помилки визначається за наступним виразом

$$J = d^2(k) - 2d(k)\mathbf{u}^T(k)\mathbf{w} + \mathbf{w}^T\mathbf{u}(k)\mathbf{u}^T(k)\mathbf{w}. \quad (4)$$

Після статистичних усереднень вираз (4) прийме наступний вигляд [4]

$$J = d^2(k) - 2\mathbf{p}^T\mathbf{w} + \mathbf{w}^T\mathbf{R}\mathbf{w}, \quad (5)$$

де  $\mathbf{p}$  - вектор взаємних кореляцій між  $k$ -м відліком зразкового сигналу і місткістю лінії затримки фільтра;  $\mathbf{R}$  - кореляційна матриця сигналу, яка має наступний вигляд

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_x(0) & R_x(1) & R_x(2) & \dots & R_x(N) \\ R_x(1) & R_x(0) & R_x(1) & \dots & R_x(N-1) \\ R_x(2) & R_x(1) & R_x(0) & \dots & R_x(N-2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_x(N) & R_x(N-1) & R_x(N-2) & \dots & R_x(0) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Для визначення мінімуму значення виразу (5) необхідно прирівняти гадієнт значення  $J$  до нуля

$$\mathbf{grad}(J) = -2\mathbf{p} + 2\mathbf{R}\mathbf{w} = 0. \quad (7)$$

Таким чином вираз для оптимальних коефіцієнтів фільтра наступний (8).

$$\mathbf{w} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{p}. \quad (8)$$



### Гرادієнтний метод

При використанні даного методу вектор коефіцієнтів фільтра повинен рекурсивно оновлюватися за формулою

$$\mathbf{w}(k) = \mathbf{w}(k-1) - \frac{\mu}{2} \mathbf{grad}(J), \quad (9)$$

де  $\mu$  - коефіцієнт, який визначає розмір кроку.

Кінцевий вираз для оцінювання коефіцієнтів фільтра за цим методом має наступний вигляд [5]

$$\mathbf{w}(k) = \mathbf{w}(k-1) + \mu e(k-1) \mathbf{u}(k-1). \quad (10)$$

Таким чином в роботі розглянуто модель представлення безпровідного каналу зв'язку у вигляді нерекурентного цифрового фільтра і методи адаптивного оцінювання параметрів каналу зв'язку. При оцінюванні параметрів каналу зв'язку фільтром Вінера необхідно розраховувати кореляційну матрицю сигналу. Оцінка градієнтним методом є ітеративною і вектор коефіцієнтів повинен рекурсивно оновлюватися.

### Перелік посилань

1. Tzi-Dar Chiueh, Pei-Yun Tsai, I-Wei Lai, Baseband Receiver Design for Wireless MIMO-OFDM Communications Second Edition, John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd. 2012.
2. Kotlyarov V., Myronchuk O. and Shpylka O. "Mathematical description and formalization types of distortion in a digital communication channel with OFDM-signals". Visnyk NTUU KPI Serii A - Radiotekhnika Radioaparaturbuduvannia, (66), pp. 10-18, 2016. doi: <https://doi.org/10.20535/RADAP.2016.66.10-18>
3. Шпилька, О. О. Порівняльний аналіз алгоритмів адаптивного оцінювання параметрів радіоканалів зв'язку / О. О. Шпилька, С. Я. Жук // Вісник НТУУ «КПІ». Радіотехніка, радіоапаратуробудування : збірник наукових праць. – 2008. – № 36. – С. 30–33
4. W. He, X. -L. Huang and P. Li, "The Wiener Filter-Based Adaptive Denoising for Pseudo Analogy Video Transmission," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 52760-52770, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3175511
5. Glentis G.O., Berberidis K., Theodoridis S. Efficient Least Squares Adaptive Algorithms for FIR Transversal Filtering // *IEEE Signal Processing Magazine*.— 1999.— V. 16.—N. 4.— P. 13–41

### Анотація

Розглянуто і проаналізовано методи адаптивного оцінювання параметрів каналів зв'язку.

**Ключові слова:** безпровідні канали зв'язку, оцінювання параметрів каналу зв'язку, цифрові системи зв'язку, фільтр Вінера, адаптивне оцінювання.

### Abstract

Methods for adaptive estimation of communication channel parameters are considered and analyzed.

**Keywords:** wireless communication channels, estimation of communication channel parameters, digital communication systems, Wiener filter, adaptive estimation.

## **Секція 2. Інформаційні технології та телекомунікаційні системи.**

*Хмарні технології, інтернет речей, вбудовані системи, смарт системи, телекомунікаційні системи та мережі, теоретичні основи обробки та передачі інформації в телекомунікаційних системах, радіолокація, кібербезпека та захист інформації, системи штучного інтелекту, нейронні мережі.*

**Керівник секції:** Сергій Жук

**Секретар секції:** Вячеслав Чмельов

## **SPECAUGMENT FOR RADIO FREQUENCY SPECTROGRAM CLASSIFICATION**

*Dudarek G. O.; Martyniuk S. Yev., C.Sc, Associate Professor  
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine*

In machine learning (ML), data augmentation (DA) is a technique of altering the existing data set to improve the robustness of the trained model for classifying data obtained in different conditions. In speech recognition, an efficient and popular data augmentation technique is Park's et al. (2019) SpecAugment — a method of time warping, time and frequency masking on the continuous spectrogram that lets researchers gain the state-of-the-art word error rate and helps with the model overfitting. As the radio frequency machine learning (RFML) also deals with spectrograms for classification tasks (Glüge et al., 2023) it's of our interest whether the simple augmentation technique SpecAugment could bring any benefits in the RFML field. At the time of writing, there is no obvious proof of the efficiency of this technique for RFML in scientific papers. While there is an online course by Parth Dhameliya (n.d.) it's not clear what effect the technique has on the learning and classification. To answer this question we conducted additional experiment using materials from the course.

### **Experiment**

Our data set consists of 4000 RF spectrogram images of four classes: Noise, Squiggle, Narrowbandr, and Narrowband. Each image is (64×128) pixels in size. The training and testing data are split into two separate files with 3200 and 800 images respectively.

For the data augmentation, we apply only the Time and Frequency masks of the SpecAugment algorithms.

For the classification, we use the EfficientNet-B0 (Tan and Lee 2019) with 15 training epochs with a batch size of 128. PyTorch's (Paszke et al. 2019) Adam optimizer and CrossEntropyLoss function were used for stochastic gradient descent optimization with a learning rate of 0.001.

Table 1. Experimental results for 10 train/test cycles

	Best validation loss		Best loss epoch		Accuracy	
	Average	Median	Average	Median	Average	Median
Non augmented	0.8660	0.8525	5.2	3.5	75.64%	75.63%
In-place augmented	<b>0.3899</b>	<b>0.3920</b>	5	5	75.25%	75.00%
Added augmented	0.4181	0.4183	3.4	2	75.28%	75.31%

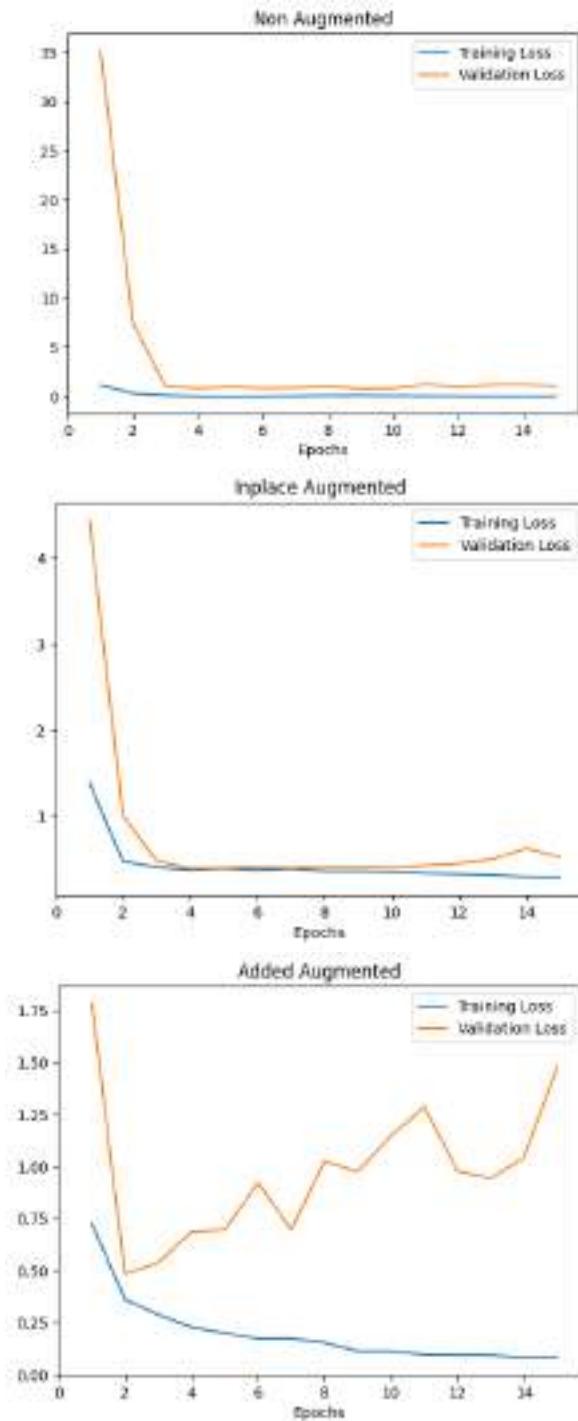


Figure 1. Train vs validation loss over epochs for non augmented, in-place augmented, and added augmented models

To analyze the impact of augmentation on model convergence we analyze the dynamic of training and validation loss (Goodfellow, Bengio and Courville 2016) presented on the Figure 1. As we can the best fit (the difference between training and validation loss) has the in-place-augmented model, the non augmented tends to under-fitting as validation loss is higher than the training loss, and the added augmented model overfits at 2nd epoch.

To measure the impact of augmentation we conducted 10 cycles of training and testing producing the 3 types of models:

- **Non augmented.** The data set was used as is without any modifications.

- **In-place augmented.** All data within the training data set was transformed with SpecAugment.

- **Added augmented.** The model was trained with an original data set plus the same data transformed with SpecAugment.

For measuring the training performance we captured the following parameters:

- **Best validation loss.** Minimal validation loss during the model training cycle.

- **Best loss epoch.** The training cycle in the range [0, epochs] where the best loss was achieved

- **Accuracy.** Measured as a mean of relationships of correct predictions to all predictions.

### Results

After conducting the aforementioned experiment we achieved the results presented in Table 1.

As we can see from Table 1 the training loss gets the smallest value of 0.39 for the in-place augmented model. The best loss epoch is the smallest for the added-augmented model, and the test accuracy looks similar for all models.

## Conclusion

As we can see from the result the in-place augmentation nearly twice decreases the validation loss compared to the non-augmented data set. That means that the model should provide fewer errors in predictions which is confirmed by the validation confusion matrixes. The results of added augmentation performance are interesting as well, while the validation loss is nearly the same as for the in-place augmentation, the model reaches it twice faster and gets overfit. With utilization of early stopping at minimal validation loss epoch, we can avoid the overfitting and reduce training time (Goodfellow, Bengio and etc. 2016). This can be considered and utilized when the model training speed is critical.

As our experiment gave positive results even when performed on a very limited data set, further research on larger and higher-quality data sets is needed. Different DL model architectures should be considered as well.

## References

1. Dhameiya, P. (n.d.). Classify Radio Signals with PyTorch. Coursera. <https://www.coursera.org/projects/classify-radio-signals-with-pytorch?>
2. Glüge, S., Nyfeler, M., Ramagnano, N., Horn, C., & Schüpbach, C. (2023). Robust drone detection and classification from radio frequency signals using convolutional neural networks. Proceedings of the 15th International Joint Conference on Computational Intelligence, 496-504. <https://doi.org/10.5220/0012176800003595>
3. Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). Deep Learning. MIT Press.
4. Park, D., Chan, W., Zhang, Y., Chiu, C., Zoph, B., Cubuk, E., ... & Le, Q. (2019). SpecAugment: a simple data augmentation method for automatic speech recognition.. <https://doi.org/10.21437/interspeech.2019-2680>
5. Paszke, A., Gross, S., Massa, F., Lerer, A., Bradbury, J., Chanan, G., ... Chintala, S. (2019). PyTorch: An Imperative Style, High-Performance Deep Learning Library. In Advances in Neural Information Processing Systems 32 (pp. 8024–8035). Curran Associates, Inc. Retrieved from <http://papers.neurips.cc/paper/9015-pytorch-an-imperative-style-high-performance-deep-learning-library.pdf>

## Анотація

Випробували SpecAugment техніку аугментації даних для розпізнавання мовлення у застосуванні до класифікації радіочастотних спектрограм за допомогою нейронної мережі EfficientNet-B0. Проведено порівняльний аналіз продуктивності мережі з аугментацією і без неї. Продемонстровано вплив аугментації на навчання та прогнозування. Надано висновок щодо застосовності та рекомендації щодо подальших досліджень алгоритму SpecAugment для радіочастотної класифікації.

**Ключові слова:** аугментація даних, глибинне навчання, радіочастоти, спектрограма

## Abstract

We tried and tested the SpecAugment speech recognition data augmentation technique, in application to the classification of radio frequency spectrograms using the EfficientNet-B0 convolutional neural network. The comparative analysis of the network performance with and without the augmentation is fulfilled. The impact of the augmentation on learning and prediction is demonstrated. The conclusion on applicability and recommendations on further research of SpecAugment algorithm for radio frequency classification are provided.

**Keywords:** data augmentation, deep learning, RF spectrogram, SpecAugment.

## **ENCRYPTION-BASED PROTECTION OF UAV COMMUNICATION CHANNELS**

*Kundelskyi P. V.; Nikitchuk A. V.*

*Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine*

Security of communication channels of unmanned aerial vehicles (UAVs) is a key component of their effective operation in military and special operations. Communication channels ensure the transmission of control commands, the receipt of intelligence data, and the synchronization of actions between the operators and the device. Insufficient protection of these channels poses a threat to the functioning of UAVs:

- The enemy can intercept data.
- Disrupt their integrity.
- Create interference or even seize control of the device.

To enhance the security of UAV communication channels, cryptographic methods of data encryption are crucial. Techniques such as frequency hopping spread spectrum (FHSS) and direct sequence spread spectrum (DSSS) increase resilience against jamming and eavesdropping. Implementing algorithms with sufficient resistance to hacking minimizes the risks of interception. Device authentication using digital certificates or PKI protocols ensures the legitimacy of communication participants. Additionally, deploying monitoring and analysis systems is essential for the timely detection of interference attempts.

The integration of these measures into a cohesive security framework requires careful consideration of the unique constraints of UAV systems, such as limited computational power, bandwidth, and battery life.

Determining the optimal encryption algorithm for protecting UAV communication channels requires exploring modern options [1]. The optimal algorithm should meet the following key requirements:

- High cryptographic strength – ensuring protection against cryptanalysis and other modern attacks.
- Computational efficiency – as UAVs have limited hardware resources, the algorithm should have low requirements for power consumption, processing power, and memory.
- Minimizing delays – for real-time operation, a quick response is always essential.
- Resilience to interruptions and communication losses – due to potential packet losses, support for mechanisms that allow correct data recovery even when part of the message is lost is necessary.
- Adaptability to constant changes in data transmission conditions.

One of the simple but outdated and not recommended (or prohibited) for modern applications is the RC4 algorithm and its modifications [2]. For its use in UAVs, the following advantages can be highlighted:

- Simplicity of implementation.
- High encryption speed.
- Low memory requirements.

The disadvantages include vulnerability to key stream analysis attacks and low resistance when using repeated keys.

For application in resource-constrained environments, more modern algorithms can be highlighted:

- ChaCha20 [3] – a stream cipher that offers high performance, low hardware requirements, and is used in TLS and DTLS protocols.
- AES [4] – AES in counter mode (CTR) works as a stream cipher while maintaining high speed. AES-GCM provides both confidentiality and data integrity.
- Lightweight Cryptography [5] (SPECK or SIMON by NIST) – algorithms of high efficiency and cryptographic strength for embedded systems.
- ECC [6] (for key agreement) – high security even when using shorter keys.

Among modern encryption algorithms, particular attention should be paid to AES (Advanced Encryption Standard) for symmetric encryption and ECC (Elliptic Curve Cryptography) for asymmetric operations. ECC has a significant advantage due to its high cryptographic strength while using a smaller key size, making it ideal for devices with limited resources. The use of hardware acceleration allows minimizing delays, providing real-time cryptographic protection.

To achieve an optimal balance, a hybrid approach can be used, involving the use of ECC for establishing a secure communication channel (key agreement) and AES for encrypting the main data stream (due to its speed and efficiency). Additionally, it is advisable to apply security protocols such as DTLS (Datagram Transport Layer Security). Looking ahead, it is worth considering the development of quantum computing by integrating quantum-resistant algorithms such as CRYSTALS-Kyber or Dilithium, which can ensure protection even in a post-quantum cryptography world.

The project is implemented using the Python programming language, which provides flexibility, high performance, and access to libraries necessary for working with cryptographic algorithms. The main goal of the program is to ensure the protection of information transmitted over potentially vulnerable communication channels without significantly increasing computational load.

The developed software solution should be integrated with existing UAV control systems and provide transparent yet reliable information processing for

the user. This approach will not only enhance the security of UAV communications but also ensure the efficiency and simplicity of implementing the algorithm in real-world operational conditions.

#### **References**

1. Analysis of methods for data confidentiality ensuring during transmitting from UAV / S. Gnatyuk et al. Cybersecurity: Education, Science, Technique. 2022. Vol. 1, no. 17. P. 167–186. URL: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2022.17.167186> (date of access: 21.11.2024).
2. Petruk M., Stavytskyi O. Сучасні методи шифрування за допомогою алгоритму RC4. Herald of Kiev Institute of Business and Technology. 2020. Vol. 45, no. 3. P. 72–79. URL: <https://doi.org/10.37203/10.37203/kibit.2020.45.10> (date of access: 21.11.2024).
3. Опірський І. Р., Совин Я. Р. Криптографічні алгоритми ChaCha20 та Poly1305 для високопродуктивних вбудованих IoT аплікацій. Стан та удосконалення безпеки інформаційно-телекомунікаційних систем (SITS'2018) : зб. тез наук. доп., м. Миколаїв, 21 черв. 2018 р. URL: [http://bit.nau.edu.ua/wp-content/uploads/2019/09/Zbirnyk\\_SITS\\_2018.pdf#page=67](http://bit.nau.edu.ua/wp-content/uploads/2019/09/Zbirnyk_SITS_2018.pdf#page=67) (дата звернення: 21.11.2024).
4. Бганцов Є. Шифрування даних. Опис та структура алгоритму симетричного шифрування AES. Methodical and practical methods of creating inventions : Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference, Sofia, 24 October 2023. URL: <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/220daed1-7572-4919-a92e-88d9416d80c0/content> (date of access: 21.11.2024).
5. Lightweight Cryptography | CSRC. NIST Computer Security Resource Center | CSRC. URL: <https://csrc.nist.gov/Projects/Lightweight-Cryptography> (date of access: 21.11.2024).
6. Bansal M., Gupta S., Mathur S. Comparison of ECC and RSA Algorithm with DNA Encoding for IoT Security. 2021 6th International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT), Coimbatore, India, 20–22 January 2021. 2021. URL: <https://doi.org/10.1109/iciict50816.2021.9358591> (date of access: 21.11.2024).

#### **Анотація**

Розглядаються підходи до підвищення безпеки каналів зв'язку безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Особлива увага приділяється методам шифрування та захисту ключів. Програмна частина реалізується на мові Python, забезпечуючи гнучкість та високу продуктивність.

**Ключові слова:** БПЛА, безпека, шифрування.

#### **Abstract**

Approaches to enhancing the security of communication channels for unmanned aerial vehicles (UAVs) are examined. Particular attention is given to encryption methods and key protection. The software part is implemented in Python, providing flexibility and high performance.

**Keywords:** UAVs, security, encryption.



## **DATA STREAMS MANAGEMENT IN PERSONAL BLUETOOTH NETWORKS**

*Melnyk V. V.; Nikitchuk A. V.*

*Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine*

Bluetooth technology, as a key component of personal area networks (PAN), plays an important role in the modern world. Due to its versatility and wide availability, it is actively used in the fields of multimedia technologies, smart homes, and the Internet of Things (IoT) [1]. This technology has gained particular popularity for transmitting audio streams between various wireless devices. With the increasing number of such Bluetooth devices, the issue of performance and efficiency of PAN becomes increasingly relevant [2].

One of the main issues with Bluetooth PAN is the limitation on the number of simultaneously connected devices and latency. In a piconet, which consists of a master and slave devices and is the primary topology of Bluetooth PAN, no more than seven active connections are supported [3]. Bluetooth uses the Time Division Duplex (TDD) protocol to organize communication between master and slave devices in a piconet. Each device is assigned its own time slot for transmission or reception. The features of TDD limit the ability to simultaneously service a large number of nodes, significantly impacting the quality of service (QoS) during the concurrent transmission of multiple audio streams [4]. For example, in highly loaded piconets, the allocation of time slots among multiple sources can lead to audio quality degradation or asynchrony between streams.

Traditional Bluetooth networks do not provide sufficient flexibility to aggregate data from multiple sources into a single stream. The development of a multiplexer, which collects data from multiple devices and forms a single audio stream, is a promising solution that allows efficient use of available piconet resources and improves the user experience. Additionally, intermediary nodes open up opportunities for creating more scalable multimedia systems. Piconets combined through intermediary nodes form a scatternet. The use of scatternets helps to avoid the strict limitations of piconets regarding the number of connected devices.

To multiplex audio streams, it is possible to divide all devices into two piconets (Fig. 1). The first includes all audio sources and a multiplexer, whose task is to collect audio data from all sources. In the second piconet, the multiplexer acts as the audio signal source (Bluetooth transmitter), while the receiver (e.g., TWS earphones or a speaker) serves as the audio sink. Bluetooth does not support direct communication between devices from different piconets (they do not "see" each other), so the multiplexer works as a bridge. Its task is to process and transfer data between networks, i.e., to transmit the single audio stream, formed from the data of the first piconet, to the receiver in the second network.

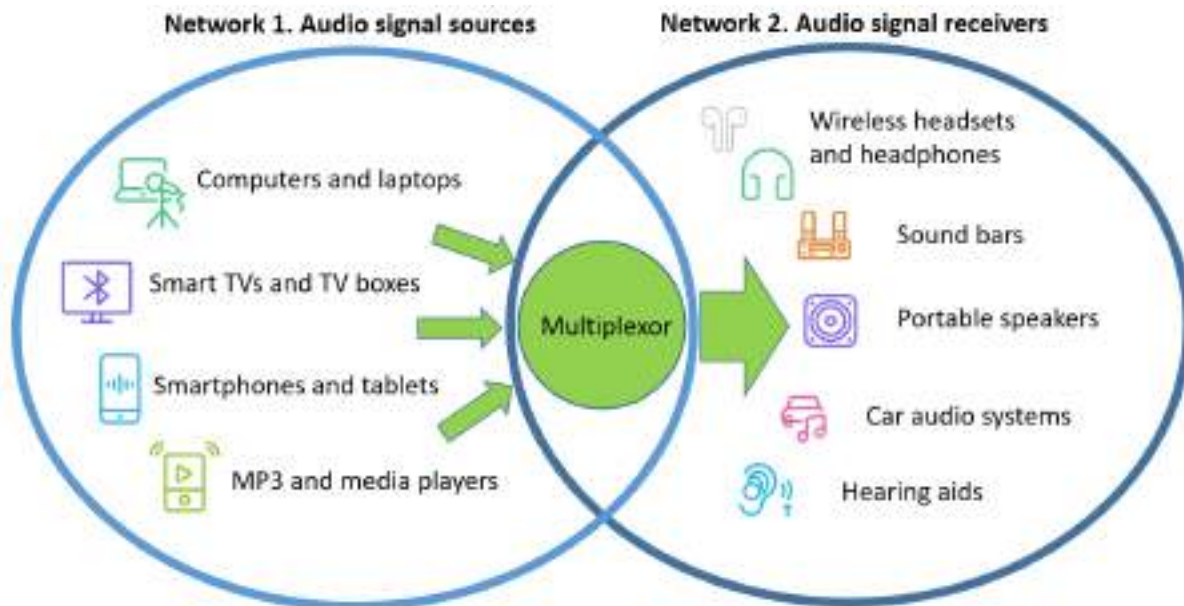


Figure 1. Bluetooth network with audio stream multiplexing

The main technical challenges in creating a multiplexer are the synchronization of audio streams with minimal latency, effective management of time slots in each piconet, and avoidance of data transmission conflicts. Solving these issues is key to the successful implementation of the proposed system.

An important stage of the research is the development of algorithms for forming scatternets that take into account the number of nodes, their roles (masters, slaves, participating nodes), and possible conflicts. The algorithm should also ensure a balance between the number of nodes and the overall bandwidth to maintain the stability of multiple concurrent audio streams [5].

Evaluating the bandwidth of each connection in the network and selecting the least loaded paths for data transmission can be achieved using the Load Metric (LM). This metric is based on assessing the available channel width between nodes and ensures the selection of optimal routes for transmitting audio streams. This helps avoid node overload, increases network stability, reduces latency, and ensures high-quality communication [6, 7].

To verify the effectiveness of the proposed methods, it is suggested to conduct simulations of multiplexed audio stream transmission. This will allow for evaluating network stability and bandwidth, identifying potential issues, and confirming the viability of the chosen data stream management approaches. Additionally, testing in real conditions using modern Bluetooth devices, such as wireless earphones, speakers, and smartphones, is necessary to assess key network parameters, including latency, connection stability, bandwidth, and quality of service (QoS). Special attention should be paid to studying energy consumption during audio stream multiplexing, which is important for battery-limited devices like earphones and smartwatches.

Implementing the proposed approaches will enhance the functionality and versatility of Bluetooth PAN, making it more user-friendly and suitable for a wide range of applications in modern systems.

#### References

1. Katila R. Analysis of mobility support approaches for edge-based IoT systems using high data rate Bluetooth Low Energy 5 [Electronic resource] / Risto Katila, Tuan Nguyen Gia, Tomi Westerlund // *Computer Networks*. – 2022. – Vol. 209. – P. 108925. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.108925> (date of access: 18.11.2024). – Title from screen.

2. Braeckel P. Chapter 4 - Feeling Bluetooth: From a Security Perspective [Electronic resource] / Paul Braeckel // *Advances in Computers*. – 2011. – No. 81. – P. 161–236. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385514-5.00004-5> (date of access: 18.11.2024). – Title from screen.

3. Bluetooth Core Specification [Electronic resource] // Bluetooth® Technology Website. – Mode of access: <https://www.bluetooth.com/wp-content/uploads/Files/Specification/HTML/Core-54/out/en/index-en.html> (date of access: 18.11.2024). – Title from screen.

4. Impact of Topology on Multi-hop Bluetooth Personal Area Network [Electronic resource] / Leping Huang [et al.] // *Embedded and Ubiquitous Computing, International Conference EUC 2004 : Lecture Notes in Computer Science 3207*, Aizu-Wakamatsu City, 25 August 2004. – [S. 1.]. – Mode of access: [https://doi.org/10.1007/978-3-540-30121-9\\_47](https://doi.org/10.1007/978-3-540-30121-9_47) (date of access: 18.11.2024). – Title from screen.

5. Kuphaldt T. R. Multiplexers and Demultiplexers [Electronic resource] / Tony R. Kuphaldt. – San Francisco, USA : [s. n.], 2023. – 77 p. – Mode of access: [https://ibiblio.org/kuphaldt/socratic/model/mod\\_mux.pdf](https://ibiblio.org/kuphaldt/socratic/model/mod_mux.pdf) (date of access: 18.11.2024). – Title from screen.

6. Technological basis of perspective telecommunication systems [Electronic resource] / I. I. Sliusar [et al.] // *Modern information system and technologies*. – 2018. – No. 8. – Mode of access: <https://journals.nupp.edu.ua/mist/article/view/1463> (date of access: 18.11.2024). – Title from screen.

7. Al-Jarrah O. Enhanced AODV routing protocol for Bluetooth scatternet [Electronic resource] / Omar Al-Jarrah, Omar Megdadi // *Computers & Electrical Engineering*. – 2009. – Vol. 35, no. 1. – P. 197–208. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2008.10.001> (date of access: 18.11.2024). – Title from screen.

#### Анотація

Розглянуто проблеми та перспективи використання Bluetooth PAN для передачі декількох аудіопотоків. Пропонується розробка мультиплексора для об'єднання даних з кількох джерел в один аудіопотік. Обговорюються технічні виклики та переваги використання скаттер-мереж для покращення якості обслуговування.

**Ключові слова:** Bluetooth, PAN, мультиплексор, аудіо, потоки, TWS, скаттер-мережа, якість обслуговування, QoS.

#### Abstract

The problems and prospects of using Bluetooth PAN for transmitting multiple audio streams are considered. The development of a multiplexer for aggregating data from multiple sources into a single audio stream is proposed. The technical challenges and advantages of using scatternets to improve the quality of service are discussed.

**Keywords:** Bluetooth, PAN, multiplexer, audio, stream, TWS, scatternet, QoS.

## **ЗАСТОСУВАННЯ БАГАТОСЕНСОРНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ НАВІГАЦІЇ МАЛОРОЗМІРНИХ БПЛА**

*Броварник С. А.; Зінгер Я. Л., к.т.н., доц.*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна*

Для забезпечення точного керування та навігації безпілотних літальних апаратів (БПЛА) широко використовуються багатосенсорні навігаційні системи [1], які інтегрують дані з різних типів давачів. Такі системи дозволяють компенсувати обмеження окремих давачів, забезпечуючи стабільність та високу точність навіть у складних умовах навігації, наприклад дії засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ).

Основою більшості сучасних навігаційних рішень для малорозмірних БПЛА є інерційні навігаційні системи (ІНС), які визначають положення, орієнтацію і швидкість руху об'єкта на основі даних від акселерометрів, гіроскопів, магнітометрів та барометрів. Однак ІНС мають певні обмеження через похибки, що виникають за рахунок електричних шумів, вібрацій, ударів та зовнішніх факторів. Похибка вимірювання при цьому накопичується з часом, що ускладнює використання ІНС окремо від інших навігаційних систем. Для компенсації навігаційної похибки ІНС багатосенсорні системи отримують дані з додаткових джерел, таких як супутникові системи навігації (Global Positioning System — GPS, Real Time Kinematic — RTK), оптичні сенсори, ультразвукові вимірювачі відстані або радіотехнічні системи. Такий підхід дозволяє об'єднувати переваги кожного типу давачів, мінімізуючи їх недоліки.

Об'єднання даних від різних давачів у багатосенсорній навігаційній системі зазвичай реалізується за допомогою алгоритмів обробки, наприклад фільтра Калмана [2]. Проте існуючі рішення мають низку обмежень, пов'язаних із різними характеристиками давачів, БПЛА та особливостями середовища та режимів експлуатації [3], а також є достатньо примітивними і зазвичай використовують лише систему GPS, та один набір давачів ІНС. Таке рішення хоч і є економічно вигідним, але не дозволяє забезпечити достатню ефективність навігаційної системи для можливості автономного польоту апарату в умовах відсутності сигналу від супутників.

Доцільно створити модель багатосенсорної системи, що об'єднувала б у собі ІНС з дублюванням давачів, систему GPS, а також Light Detection and Ranging (LiDAR). Така система дозволить компенсувати похибку давачів ІНС за рахунок усереднення отриманих вимірів, забезпечувати прив'язку до земних координат за допомогою системи GPS, а також збільшувати точність позиціонування та виконувати корекцію впливу вітру і похибки вимірювання давачів ІНС за допомогою системи LiDAR.

Структурна схема запропонованої моделі наведена на *рис. 1*.

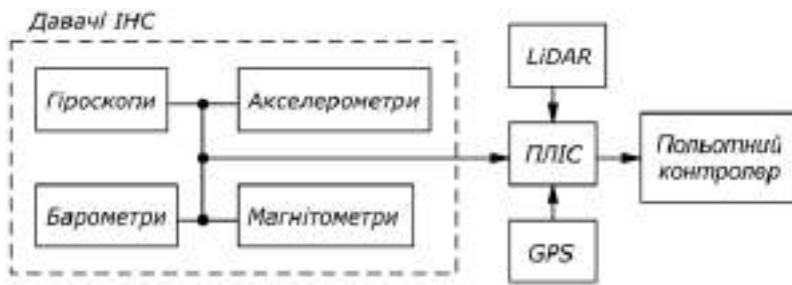


Рисунок 1 — Структурна схема багатосенсорної моделі навігаційної системи

Згідно структурної схеми (*рис. 1*) блок давачів ІНС з'єднаний з програмованою логічною інтегральною схемою (ПЛІС), яка оброблює дані від давачів, виконуючи попередню фільтрацію,

усереднення вимірів та компенсацію похибки вимірювання за рахунок як дублюючих давачів, так і систем GPS та LiDAR. Гіроскопи у блоці давачів ІНС необхідні для визначення кутової швидкості апарату у тривимірному просторі, за якою можна визначити орієнтацію апарату та його кутове прискорення. Акселерометри вимірюють лінійні прискорення апарату, що дозволяє визначити вектор його швидкості, напрямок руху та переміщення у просторі. Барометри необхідні для вимірювання атмосферного тиску і визначення висоти апарату відносно точки зльоту. За допомогою магнітометрів визначається орієнтація апарату відносно магнітного поля землі, що дозволяє збільшити точність визначення його напрямку руху. Система GPS також з'єднана з ПЛІС і дані від неї дозволяють виконати початкову прив'язку до земних координат, а також визначати положення апарату в реальному часі і виконувати корекцію вимірів ІНС за наявності сигналу від супутників GPS. У випадку відсутності сигналу або низької точності визначення положення за ним, навігаційна система для визначення положення спирається на блок ІНС та LiDAR, враховуючи останні достовірні дані від системи GPS. Система LiDAR дозволяє будувати тривимірну мапу простору поблизу апарату, що надає змогу коригувати похибки ІНС на основі прив'язки до опорних точок у просторі, відповідно вимірюючи зміщення апарату відносно них і порівняння з розрахованими переміщеннями за даними вимірів ІНС. Таким чином це дозволяє частково компенсувати вплив вітру та дрейф параметрів давачів ІНС, за відсутності доступу до координат від системи GPS.

В результаті вимірювання, фільтрації, компенсації та корекції даних від давачів ПЛІС отримує достовірні дані стосовно положення апарату у просторі, його переміщень і відповідних векторів швидкості та прискорень. На основі цих даних виконується керування контролером польоту апарату для руху за попередньо заданим маршрутом.

Використання ПЛІС зумовлене можливістю виконання паралельних обчислень даних від давачів з високою швидкістю, що дозволяє забезпечувати визначення положення у реальному часі. Для забезпечення синхронізації вимірів від різних давачів використовуватиметься Precision Time

Protocol (PTP), який дозволяє централізовано синхронізувати пристрої за часом. Корекція помилок та об'єднання даних виконуватиметься за допомогою фільтра Калмана [4], а також власних програмних алгоритмів для обробки даних у реальному часі та корекції даних записаних у пам'ять навігаційної системи. Навігаційна система використовуватиме принципи RTK та Post Processing Kinematic (PPK) [5], що дозволить як оцінювати положення в реальному часі, так і працювати з даними, що були збережені за час роботи системи без даних від системи GPS для внесення поправкових коефіцієнтів на основі похибок, що були накопичені в минулому.

Відповідно, така модель має збільшувати точність навігації та керування малорозмірних БПЛА без використання дорогих та великогабаритних систем ІНС чи завадозахищеної системи GPS.

#### **Перелік посилань**

1. Groves P. Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems. Artech House, 2013. ISBN: 978-1608070053.
2. Cai Q., et al. An Improved Calibration Method for the IMU Biases Utilizing KF-Based AdaGrad Algorithm. Sensors, 2021, 21(15), 5055. DOI: 10.3390/s21155055.
3. Shen C. Intelligent Information Processing for Inertial-Based Navigation Systems. [Електронний ресурс]. – Доступно за посиланням: <https://doi.org/10.1007/978-981-33-4516-4>. – Останній вхід 17.11.2024.
4. Kalman Filter. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <http://pzs.dstu.dp.ua/DataMining/kalman/bibl/Kordic.pdf>. Останній вхід 18.11.2024.
5. Dabove P., Di Pietra V. Towards High-Precision GNSS Positioning with Smartphones: RTK and PPK Solutions. Sensors. 2019, 19(18), 4302. [Електронний ресурс] Доступно за посиланням: [https://www.researchgate.net/publication/327224304\\_Towards\\_high\\_accuracy\\_GNSS\\_real-time\\_positioning\\_with\\_smartphones](https://www.researchgate.net/publication/327224304_Towards_high_accuracy_GNSS_real-time_positioning_with_smartphones). Останній вхід: 18.11.2024.

#### **Анотація**

Проаналізовано сучасні проблеми автономної навігації БПЛА. Запропоновано модель багатосенсорної навігаційної системи, що поєднує переваги ІНС, GPS і LiDAR та сучасних принципів просторової навігації з використанням паралельних обчислень для забезпечення ефективного керування польотом у реальному часі.

**Ключові слова:** БПЛА, ІНС, навігація, система, багатосенсорна.

#### **Abstract**

Modern problems of autonomous UAV navigation are analyzed. A model of a multi-sensor navigation system is proposed, combining the advantages of INS, GPS, and LiDAR and contemporary principles of spatial navigation using parallel computing to ensure effective flight control in real-time.

**Keywords:** UAV, INS, navigation, system, mutli-sensor.

## ЗАСТОСУВАННЯ ГАУССОВОГО РОЗБРИЗКУВАННЯ В АДАПТИВНИХ СИСТЕМАХ ОПТИЧНОЇ НАВІГАЦІЇ НА ОСНОВІ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ

Євдокімов Д. О.; Зінгер Я. Л., к.т.н., доц.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

Гауссове розбризкування це новий метод побудови та візуалізації просторових мап з високою деталізацією, що використовує тривимірні гауссиани (функції Гаусса) та маніпуляції над ними замість звичних полігональних сіток для представлення або реконструкції поверхонь зі складною геометрією маючи вхідний масив зображень статичної сцени, виражених у вигляді розрідженої хмари точок.

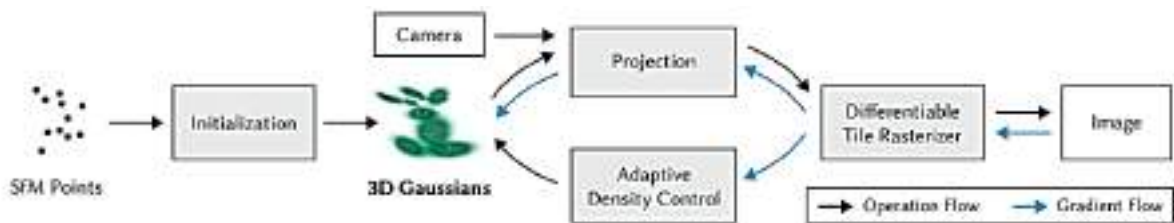


Рисунок 1. Функціональна схема процесу перетворення вхідного масиву точок (хмари точок) на зображення [1]

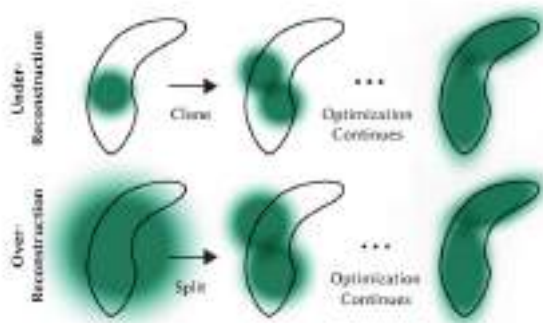


Рисунок 2. Спрощена візуалізація процесу адаптивного керування щільністю розподілу 3D гауссіан у процесі реконструкції віртуальної сцени [1]

Комп'ютерний зір це наукова область штучного інтелекту, яка являє собою технологію створення комп'ютерних систем, які здатні проводити автономне виявлення, відстежування та класифікацію реальних об'єктів і проводити їх аналіз, надаючи машинам здатність незалежного прийняття рішень на основі вхідних фото та відео даних. Комп'ютерний зір є однією з ключових технологій у розвитку сучасних безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Оптична навігація це метод просторової навігації, який використовує комп'ютерний зір і заснований на принципах виявлення візуальних ознак реальних об'єктів, їх збереженні та подальшому об'єднанні в єдину віртуальну мапу середовища. Оптичні навігаційні системи (ОНС) дозволяють одночасно здійснювати як глобальне, так і відносне позиціонування цільово-

го об'єкта в просторі по відношенню до інших об'єктів середовища, що збільшує гнучкість застосування на цінуєвих ділянках польоту порівняно з класичними методами навігації (супутникова, інерційна), а також дає стабільну можливість компенсації похибки інших навігаційних систем на основі потоку вхідних даних.

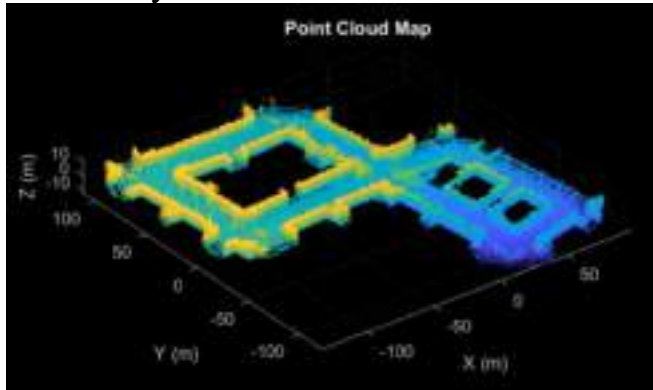


Рисунок 3. Приклад візуалізації мапи з хмари точок у середовищі MATLAB, яка була отримана з використанням методів ORB-SLAM3 [2] у віртуальному середовищі Unreal Engine

Основними технічними недоліками ОНС є висока залежність від якості наявних просторових мап середовища та ефективності алгоритмів співставлення потоку вхідних даних зі збереженими просторовими мапами у реальному часі, що є критичним для точності і безперервності процесу позиціювання.

Для перевірки ефективності подальшого застосування 3D Гауссового розбризкування (3D Gaussian Splatting, 3DGS) [1] було прийняте рішення провести моделювання його застосування на термінальній кінцевій ділянці навігації з точками інтересу, де система комп'ютерного зору має виявити цільовий об'єкт і здійснити його супровід.

Для порівняння було взято еталонні 3D-моделі об'єктів, 3D-моделі отримані методом 3D-реконструкції на основі NeRF [3] (Neural Radiance Fields) та 3D-моделі створенні за допомогою методу 3D-реконструкції на основі Гауссового розбризкування.

Для моделі комп'ютерного зору була обрана архітектура YOLOv9 [4].

Порівняння отриманих результатів виявлення віртуальних 3D-об'єктів отриманих різними методами 3D-реконструкції наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Метрика моделі комп'ютерного зору	Метод отримання 3D-моделей для тренування моделі машинного навчання		
	3D Еталон	NeRF	3DGS
Точність / Precision	81,2%	72,4%	78,3%
Повнота / Recall	84,1%	78,1%	82,5%
F1-міра / F1 Score	82,6%	76,9%	80,3%
Середня точність / mAP	72,4%	63,8%	70,0%
Перетин над об'єднанням / IoU	0,81	0,73	0,76
Хибні спрацювання / False Positives	10,3%	15,9%	12,4%
Пропущені об'єкти / False Negatives	8,9%	14,7%	10,9%
Час навчання (год)	8	12	9

Відповідно до отриманих результатів, модель комп'ютерного зору YOLOv9, що була натренована на наборі даних отриманого з використан-



ням 3D Гауссового розбризкування, має вищу точність виявлення об'єктів і нижчий відсоток хибних спрацювань порівняно з NeRF, що відповідно свідчить і про вищу якість даних і точність деталізації 3D-моделей отриманих за допомогою методу Гауссового розбризкування.

Подальші дослідження будуть проводитися в напрямку визначення напрямків застосування Гауссового розбризкування та пов'язаних методів комп'ютерного зору для покращення можливостей БПЛА проводити автономний аналіз об'єктів у тривимірній площині в реальному часі.

Використання методів комп'ютерного зору та Гауссового розбризкування для 3D реконструкції та аналізу цільових об'єктів у реальному часі відкриває можливість аналізу додаткових параметрів як от кут повороту та 3D-профіль об'єктів, які можуть бути використані для підвищення точності виявлення об'єктів та оптичної навігації.

#### **Перелік посилань**

1. 3D Gaussian Splatting for Real-Time Radiance Field Rendering [Електронний ресурс] / Bernhard Kerbl [та ін.] // arXiv.org. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2308.04079> (дата звернення: 20.11.2024).
2. ORB-SLAM3: An Accurate Open-Source Library for Visual, Visual-Inertial and Multi-Map SLAM [Електронний ресурс] / Carlos Campos [та ін.] // arXiv.org. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2007.11898> (дата звернення: 20.11.2024).
3. NeRF: Representing Scenes as Neural Radiance Fields for View Synthesis [Електронний ресурс] / Ben Mildenhall [та ін.] // arXiv.org. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2003.08934> (дата звернення: 20.11.2024).
4. Wang C.-Y. YOLOv9: Learning What You Want to Learn Using Programmable Gradient Information [Електронний ресурс] / Chien-Yao Wang, I-Hau Yeh, Hong-Yuan Mark Liao // arXiv.org. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2402.13616> (дата звернення: 20.11.2024).

#### **Анотація**

У даній роботі наведено результати застосування методу 3D-реконструкції середовища на основі Гауссового розбризкування для вирішення однієї з локальних задач оптичної навігації та його порівняння з методом 3D-реконструкції на основі NeRF. Визначено напрямок подальшого дослідження в застосуванні методу Гауссового розбризкування для задач 3D аналізу об'єктів у реальному часі, як складової частини у виявленні об'єктів та оптичних навігаційних системах.

**Ключові слова:** комп'ютерний зір, Гауссове розбризкування, оптична навігація, машинне навчання, нейронні мережі, 3D структура з руху, безпілотні літальні апарати.

#### **Abstract**

This paper presents the results of applying the Gaussian Splatting method of 3D reconstruction to solve one of the local optical navigation problems and compares it with the NeRF-based 3D reconstruction method. The paper also forms the direction for further research in the application of the Gaussian Splatting method to solve some wider problems in 3D analysis of target objects in real-time as part of both object detection systems and optical navigation systems.

**Keywords:** computer vision, Gaussian splatting, optical navigation, machine learning, neural networks, 3D structure from motion, unmanned aerial vehicles.

## ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ СИГНАЛІВ В КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМАХ

Катеринчук І. С., д. т. н., проф.; Чесановський І. І., к. т. н., доц.;  
Табенський С. М.

Національна академія Державної прикордонної служби України  
імені Богдана Хмельницького, Хмельницький, Україна

Основу фізичного рівня кіберфізичних систем (КФС) складають електронні сенсори, які взаємодіють із фізичним світом через перетворювачі, що генерують аналогові електричні сигнали. Щоб забезпечити необхідну якість та надійність передачі інформації на вищий рівень КФС в сенсорах фізичного рівня здійснюється первина обробка цих сигналів, основним етапом якої є аналого-цифрове перетворення. Враховуючи обмежені обчислювальні ресурси засобів і потенційно низьку пропускну здатність комунікаційної інфраструктури фізичного рівня ефективність АЦП має бути екстремальною як за точністю так і за ентропією [1]. Це означає, що аналого-цифрове перетворення сигналів має здійснюватися з мінімально допустимою частотою дискретизації і мінімально необхідною кількістю рівнів квантування. Для низькочастотних сигналів (рис. 1, а) ця задача є тривіальною і розв'язується на основі теореми відліків Найквіста-Шеннона [1]. Проте, для смугових сигналів (рис. 1, б) ця задача є значно складнішою і не завжди може мати однозначне рішення. Вибір частоти дискретизації може бути здійснено по різному для смугових сигналів в яких виконується умова [2]:

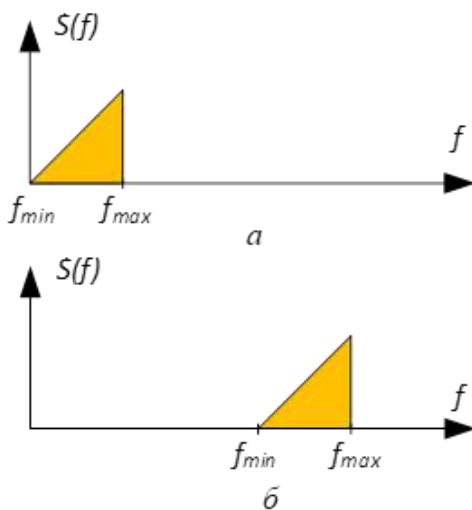


Рисунок 1. Амплітудно-частотний спектр: а — низькочастотного сигналу, б — смугового сигналу

де  $f_{\min}$  - мінімальна частота спектру сигналу;  $\Delta f$  - ширина спектру сигналу.

$$f_{\min} / \Delta f \gg 1, \quad (1)$$

де  $f_{\min}$  - мінімальна частота спектру сигналу;  $\Delta f$  - ширина спектру сигналу.

Враховуючи неоднозначність вибору частоти дискретизації для такого типу сигналів існують різні підходи, що орієнтовані на забезпечення максимального відношення сигнал/шум, або максимального усунення впливу нестабільності окремих елементів АЦП для деяких типових випадків ймовірнісних характеристик шумів. В загальному випадку, це не вичерпний перелік всіх факторів, що впливають на вибір частоти дискретизації, тому доречно окреслити основні критерії оптимальності процесу дискретизації відомі на даний час [2]:

Враховуючи неоднозначність вибору частоти дискретизації для такого типу сигналів існують різні підходи, що орієнтовані на забезпечення максимального відношення сигнал/шум, або максимального усунення впливу нестабільності окремих елементів АЦП для деяких типових випадків ймовірнісних характеристик шумів. В загальному випадку, це не вичерпний перелік всіх факторів, що впливають на вибір частоти дискретизації, тому доречно окреслити основні критерії оптимальності процесу дискретизації відомі на даний час [2]:

1. Частотний критерій, за яким інтервали між відліками вибираються виходячи з ширини спектра повідомлення, що дискретизується. Це основний критерій вибору частоти дискретизації для низькочастотних сигналів та часто застосовується для смугових сигналів при визначенні мінімальної частоти дискретизації.

2. Кореляційний критерій, за яким інтервал дискретизації вибирається по часу кореляції сигналу, що піддається дискретизації. Даний критерій застосовується тільки для стаціонарних сигналів як для низькочастотних, так і смугових.

3. Квантовий критерій, який часто застосовується для детермінованих сигналів. Частота дискретизації, в цьому випадку, обирається з урахуванням відношення кроку квантування до максимальної частоти сигналу, що піддається дискретизації. Даний критерій орієнтований на низькочастотні сигнали, проте, може бути ефективно застосований і для смугових сигналів при виборі частоти дискретизації в межах обраного діапазону.

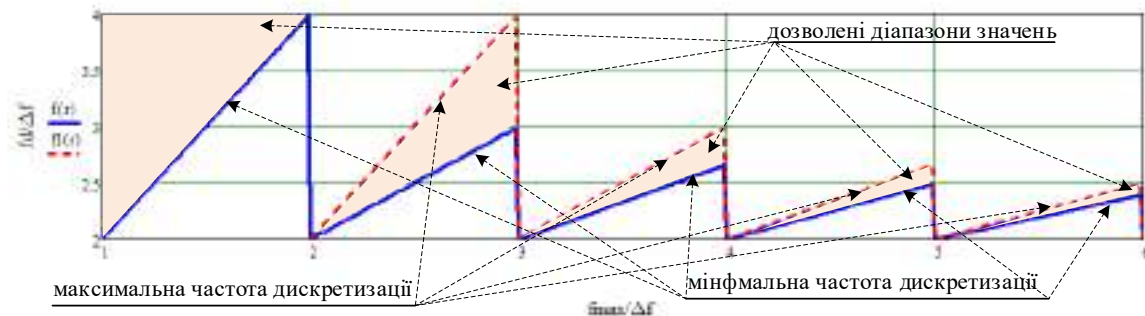


Рисунок 2. Діапазони дозволених значень частоти дискретизації

Методи смугової дискретизації (субдискретизації) дають змогу значно (в рази) знизити частоту дискретизації. Так при виконанні умови (1) для вибору частоти дискретизації існує  $\left( \frac{f_{\max}}{\Delta f} - 1 \right)$  дозволених діапазонів (рис. 2) частоти дискретизації  $f_{\delta}$ .



Рисунок 3. Обмеження вибору частоти дискретизації в межах одного діапазону

При цьому, використання більшої кратності субдискретизації окрім зменшення надмірності даних дає змогу отримати вигоду в відношенні сигнал/шум. На рис. 3 показано можливу варіацію частоти дискретизації в межах одного дозволеного діапазону. В наслідок різних масштабів впливу типових шкідливих чинників елементів АЦП (нелінійність частотних характеристик фільтрів, неточність опорних тактових генераторів, тощо) в кожному дозволеному частотному діапазоні існують більш вигідні значення. На рис. 4 приведено залежність

SNR від частоти дискретизації в дозволених діапазонах для різних значень  $l$  (порядок субдискретизації), з якого видно,

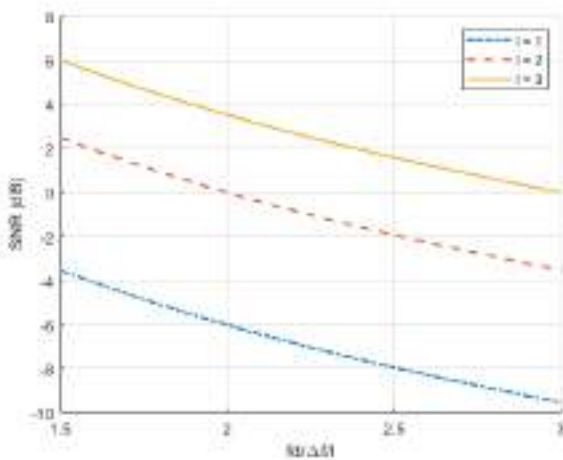


Рисунок 4. Залежність SNR при зміні частоти дискретизації в межах дозволеного діапазону

що зі збільшенням частоти дискретизації SNR знижується для кожного значення  $l$ . Це зниження більш виражене для більших значень  $l$ , оскільки зменшення інтервалу між вибірками збільшує вплив нелінійності частотної характеристики антиаліасингового фільтру, особливо на границі смуги частот. Також видно, що для нижчих значень  $l$  SNR вищий при тій самій частоті дискретизації, що відображає менший вплив аліасінгу та краще придушення шуму фільтром.

Таким чином, при пошуку оптимальної частоти дискретизації за дефіциту ресурсів, важливо враховувати всі можливі чинники: спектральні характеристики сигналу; специфіку вузлів АЦП; тощо. Застосування субдискретизації в сенсорах дає змогу не лише знизити об'єм дискретної вибірки а і покращити SNR при правильному виборі її параметрів.

#### Перелік посилань

1. Науково-прикладні питання забезпечення роздільної здатності і ефективності обробки сигналів у радіотехнічних та телекомунікаційних системах за наявності завад : монографія / Ю. М. Бойко, О. М. Шинкарук, Л. В. Карпова, І. І. Чесановський. – Хмельницький : ХНУ, 2019. – 218 с.
2. Richard G Lyons, Understanding Digital Signal Processing, 3rd Edition, Prentice Hall Publications Inc., New Jersey, November 11, 2010.

#### Анотація

Приведено один із підходів вирішення завдання оптимізації процесу дискретизації смугових сигналів. Показано, що застосування смугової дискретизації високого порядку дає змогу не лише знизити об'єм дискретної вибірки, а і покращити відношення сигнал/шум. Запропоновано критерії оптимальності та методикку вибору частоти дискретизації в межах дозволених діапазонів.

**Ключові слова:** дискретизація, квантування, субдискретизація, критерії оптимальності, смуговий сигнал, фільтрація.

#### Abstract

One of the approaches to solving the optimization problem of bandpass signal discretization is presented. It is shown that applying high-order bandpass discretization not only reduces the volume of discrete samples but also improves the signal-to-noise ratio. Criteria for optimality and a methodology for selecting the sampling frequency within permissible ranges are proposed.

**Keywords:** discretization, quantization, sub-sampling, optimality criteria, bandpass signal, filtering.

## ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ФОНЕМНОГО РОЗПІЗНАВАННЯ НА ОСНОВІ LSTM-АРХІТЕКТУРИ

*Лащевська Н. О.<sup>1</sup>, к.т.н., доц.; Коротков С. С.<sup>1</sup>, PhD;*

*Приходько І. О.<sup>2</sup>, к.т.н., доц.; Борова Ю. О.<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup> Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій,  
Київ, Україна <sup>2</sup>*

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна*

### Вступ

У сучасну епоху швидкого розвитку штучного інтелекту та обробки мовлення, автоматичне розпізнавання фонем відіграє ключову роль у таких задачах, як побудова систем голосового керування, автоматизовані перекладачі та інші мовні сервіси. Одним із найбільш перспективних підходів до моделювання послідовностей мовних сигналів є використання рекурентних нейронних мереж, зокрема LSTM (Long Short-Term Memory). Їхня здатність враховувати довготривалі залежності робить їх ефективними для розв'язання задач мовної сегментації.

Метою дослідження є розробка ефективної моделі LSTM для автоматичного розпізнавання фонем, яка забезпечить високу точність класифікації мовних сигналів та оптимізує обчислювальні ресурси. Для досягнення цієї мети були сформульовані наступні задачі:

- Розробка архітектури моделі LSTM, адаптованої для фонемного аналізу.
- Оптимізація параметрів моделі для досягнення балансу між точністю і швидкодією.
- Експериментальне порівняння розробленої моделі з існуючими підходами.

### Архітектура моделі та підхід до навчання

Розроблена модель включає кілька послідовних шарів LSTM, доповнених шаром нормалізації для покращення стабільності навчання. У якості вхідних даних використовуються спектрограми мовних сигналів, отримані шляхом перетворення Фур'є. Нехай  $x_t \in R^d$  — вектор ознак на  $t$ -му часовому кроці, отриманий з попередньої обробки сигналу (наприклад, спектрограми на основі перетворення Фур'є):

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_T\}, X \in R^{T \times d}, \quad (1)$$

де  $T$  — кількість часових кроків,  $d$  — розмірність ознак.

Кожен LSTM-шар обчислює приховані стани  $h_t$  основі поточного входу  $x_t$  та попереднього стану  $h_{t-1}$ :

$$h_t = LSTM(x_t, h_{t-1}; \Theta_{LSTM}) \quad (2)$$

де  $\Theta_{LSTM}$  — набір параметрів LSTM-мережі.

Для покращення збіжності та стабільності використовується нормалізація прихованих станів:

$$\tilde{h}_t = \frac{h_t - \mu}{\sigma}, \quad (3)$$

де  $\mu$  та  $\sigma$  — середнє значення та стандартне відхилення  $h_t$  у міні-батчі.

Вихідний шар реалізований у вигляді повнозв'язної нейронної мережі з функцією активації *softmax*, що забезпечує ймовірнісний розподіл серед класів фонем:

$$y_t = \text{softmax}(W\tilde{h}_t + b), \quad y_t \in R^C,$$

де  $C$  — кількість класів (фонем),  $W$  і  $b$  — параметри вихідного шару.

Для навчання використовувалися відкриті мовні корпуси (наприклад, ТІМІТ), що містять фонематичну транскрипцію. Функція втрат СТС (Connectionist Temporal Classification) забезпечує коректне відображення непослідовних сегментів мовлення на вихідні фонемі. СТС дозволяє моделі враховувати різну довжину входу та виходу. Ймовірність послідовності вихідних міток  $L$ :

$$P(L|X) = \sum_{\pi \in B^{-1}(L)} P(\pi|X),$$

де  $B^{-1}(L)$  — всі можливі вирівнювання між  $L$  та  $X$ . Втрата СТС визначається як негативний логарифм цієї ймовірності:

$$L_{СТС} = -\log P(L|X).$$

Навчання даної моделі нейронної мережі виконувалося з використанням адаптивного оптимізатора Adam з адаптивною швидкістю навчання. Для уникнення перенавчання була застосована техніка Dropout до прихованих станів, а квантування параметрів знизило обсяг пам'яті.

Структура схема моделі, яка відображає послідовність компонентів LSTM-архітектури для розпізнавання фонем включає: Вхід → LSTM-шари → Нормалізацію → Вихідний шар.

Порівняльний аналіз показав, що розроблена модель нейронної мережі для розпізнавання аудіо фонем на відміну від існуючих, таких як GMM-НММ, за показниками точності та швидкодії дає кращі результати. Для тестового набору ТІМІТ точність розпізнавання фонем досягла 89,5%, що на 7% перевищує результати стандартних LSTM-архітектур.

### Висновки

Запропонована модель LSTM є ефективним інструментом для автоматичного розпізнавання фонем. Її використання дозволяє покращити якість розпізнавання мовлення за рахунок врахування довготривалих залежностей та оптимізації архітектури. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на інтеграцію моделі з технологіями трансформерів для аналізу контексту в розширених мовних даних.

**Перелік посилань**

1. Wang, Z., et al. (2020). Transformer vs. LSTM: Comparative Analysis on Speech Recognition. Proceedings of the Annual Conference of the International Speech Communication Association (INTERSPEECH). DOI: 10.21437/Interspeech.2020-1503
2. Tymoshenko, K., Vysotska, V., Kovtun, O., Holoshchuk, R., Holoshchuk, S. (2021). Real-time Ukrainian text recognition and voicing. CEUR Workshop Proceedings, No. 2870, 357–387.
3. Кунанець, Н. Е., Лозицький, О. А., Пасічник, В. В. (2016). Інформаційні технології озвучування українською мовою математичних формул для осіб з вадами зору. Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. Вип. 843. С. 84–93.

**Анотація**

В тезах розглянуто розробку ефективної моделі нейронної мережі типу LSTM (Long Short-Term Memory) для автоматичного розпізнавання фонем у мовних сигналах. Запропонована архітектура базується на послідовному поєднанні кількох шарів LSTM, нормалізації для стабілізації процесу навчання, а також вихідного шару з функцією активації softmax для класифікації фонем. В якості вхідних даних використано спектрограми мовних сигналів, отримані шляхом перетворення Фур'є. Для навчання моделі застосовано функцію втрат CTC (Connectionist Temporal Classification), що дозволяє ефективно працювати із непослідовними даними, та адаптивний оптимізатор Adam. Особливу увагу приділено оптимізації моделі через використання технік Dropout, розрізнення ваг і квантування, що забезпечує зменшення обсягу пам'яті та підвищення продуктивності. Проведено навчання та тестування на відкритих мовних корпусах.

**Ключові слова:** LSTM, розпізнавання фонем, CTC, оптимізація, нейронні мережі.

**Abstract**

The development of an effective Long Short-Term Memory (LSTM) neural network model for automatic phoneme recognition in speech signals is discussed in this thesis. The proposed architecture is based on the sequential combination of multiple LSTM layers, normalization for stabilizing the training process, and a softmax activation output layer for phoneme classification. Spectrograms of speech signals obtained by Fourier transform are used as input data. The model is trained using the Connectionist Temporal Classification (CTC) loss function, enabling efficient processing of non-aligned data, and the Adam optimizer. Special attention is given to model optimization through techniques such as Dropout, weight sparsification, and quantization, which reduce memory usage and enhance performance. The model was trained and tested on open speech corpora.

**Keywords:** LSTM, phoneme recognition, CTC, optimization, neural networks.

## ВИЯВЛЕННЯ ЗРИВУ СУПРОВОДЖЕННЯ ТРАЄКТОРІЇ ЦІЛІ ЗА КРИТЕРІЄМ 3/4 З ВИКОРИСТАННЯМ ВИРІШАЛЬНОЇ СТАТИСТИКИ НАЙСИЛЬНІШОЇ ВІДМІТКИ

*Маленчик Т. В.; Жук С. Я., д.т.н., проф.  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна*

Виявлення зриву супроводження траєкторії цілі є одним з основних етапів вторинної обробки радіолокаційної інформації. Він забезпечує своєчасне скидання з супроводження хибної траєкторії. Особливо важливо виявляти зрив супроводження при малих відношеннях сигнал/шум, які характеризуються значним числом хибних відміток у секторі огляду.

На практиці для прийняття рішення щодо зриву супроводження широко використовується евристичний критерій  $l/n$  [1]. За цим критерієм рішення щодо зриву супроводження траєкторії приймається при відсутності відміток в  $l$  стробах супроводу (пропусків цілі) в не більше ніж  $n$  періодах огляду. Але за наявності в зоні огляду значної кількості хибних відміток, ефективність алгоритмів виявлення зриву за критерієм  $l/n$  значно знижується. Це обумовлено тим, що при відсутності цільової відмітки в стробі, на супроводження братимуться хибні відмітки, що призводить до втрати траєкторії цілі і супроводження хибної траси. В [2] для підвищення ефективності виявлення траєкторії цілі за критерієм  $l/n$  запропоновано використовувати достатні статистики найсильнішої відмітки в стробі супроводу.

Розроблено алгоритм виявлення зриву супроводження траєкторії цілі за критерієм 3/4 з використанням достатньої статистики найсильнішої відмітки. В процесі супроводження траєкторії здійснюється некогерентне міжоглядове накопичення достатньої статистики найсильніших відміток  $z_j$  на ковзному вікні за формулою

$$Z_{\Sigma} = \sum_{j=1}^4 z_j. \quad (1)$$

При зриві супроводження в стробі можуть з'являтися лише хибні відмітки, закон розподілу достатніх статистик яких є відомим. При наявності відміток в стробах на двох або трьох оглядах, перевіряється основна гіпотеза щодо закону розподілу накопиченої вирішальної статистики  $Z_{\Sigma}$  проти альтернативи із заданим рівнем значущості  $\kappa$  за правилом

$$Z_{\Sigma} \leq H_{\kappa, \mu}, \quad \mu = 2, 3. \quad (2)$$

Пороги  $H_{\kappa, 2}, H_{\kappa, 3}$  визначаються відповідно до заданого рівня значущості  $\kappa$ . При виконанні умови (2) приймається рішення щодо зриву супроводження.



Послідовність роботи алгоритму можна проілюструвати за допомогою графа з випадковими переходами рис. 1. Стан «1» є початковим і відповідає супроводженню траєкторії цілі. Стан «0» є поглинаючим. При його досягненні фіксується зрив супроводження траєкторії. Переходи в стани «2»-«14» відбувається за наявності (суцільна лінія) або відсутності (штрихова лінія) відміток в строби. Переходи із станів «8»-«14» в стани «1» або «0» можуть відбуватися як за наявності, так відсутності відміток в стробі на четвертому кроці і показані штрих-пунктирною лінією.

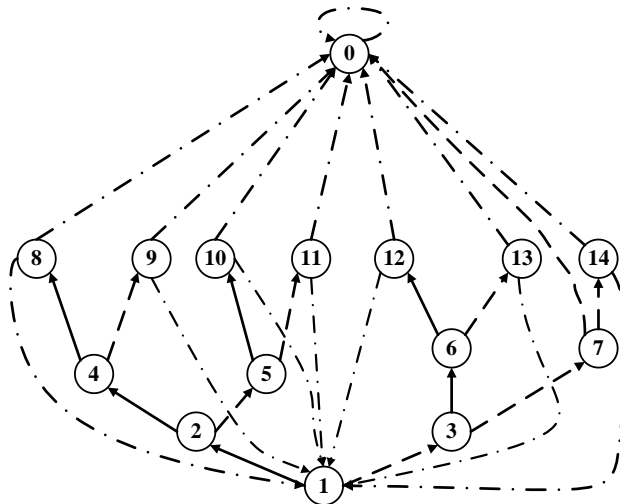


Рисунок 1. Граф алгоритму виявлення зриву траєкторії цілі за критерієм 3/4 з використанням вирішальної статистики найсильнішої відмітки

Ймовірності переходів між станами, описуються виразами:

$$\pi_{1,2} = \pi_{2,4} = \pi_{4,8} = \pi_{8,1} = \pi_{5,10} = \pi_{3,6} = \pi_{6,12} = \pi_{7,14} = (1 - p_0),$$

$$\pi_{1,3} = \pi_{3,7} = \pi_{7,0} = \pi_{4,9} = \pi_{2,5} = \pi_{5,11} = \pi_{6,13} = p_0,$$

$$\pi_{8,1} = (1 - p_0) + p_0(1 - F_3), \quad \pi_{8,0} = p_0 F_3,$$

$$\pi_{9,0} = \pi_{10,0} = \pi_{12,0} = (1 - p_0) F_3 + p_0 F_2,$$

$$\pi_{9,1} = \pi_{10,1} = \pi_{12,1} = (1 - p_0)(1 - F_3) + p_0(1 - F_2),$$

$$\pi_{11,0} = \pi_{13,0} = \pi_{14,0} = (1 - p_0) F_2 + p_0, \quad \pi_{11,1} = \pi_{13,1} = \pi_{14,1} = (1 - p_0)(1 - F_2),$$

де  $p_0$  - ймовірність відсутності хибних відміток в стробі;  $F_2$ ,  $F_3$  - ймовірності не перевищення сумами двох і трьох вирішальних статистик порогів  $H_{\kappa,2}$  і  $H_{\kappa,3}$  відповідно.

Оцінка ефективності розробленого алгоритму виявлення зриву була проведена шляхом статистичного моделювання супроводження цілі за дальністю. Для опису руху цілі по дальності використовувалась модель другого порядку [1, 2]. СКВ шуму збудження, що характеризує випадкове прискорення цілі, приймалося  $\sigma_a = 7\text{м/с}^2$ . Вимірювались координати дальності і радіальної швидкості, при цьому СКВ помилок вимірювання ста-

новлять  $\sigma_r = 1.3 \text{ м}^2$ ,  $\sigma_{\dot{r}} = 1.6 (\text{м/с})^2$ . Темп надходження даних покладался  $T = 1 \text{ с}$ . Для супроводження цілі застосовувався фільтр Калмана [1, 2].

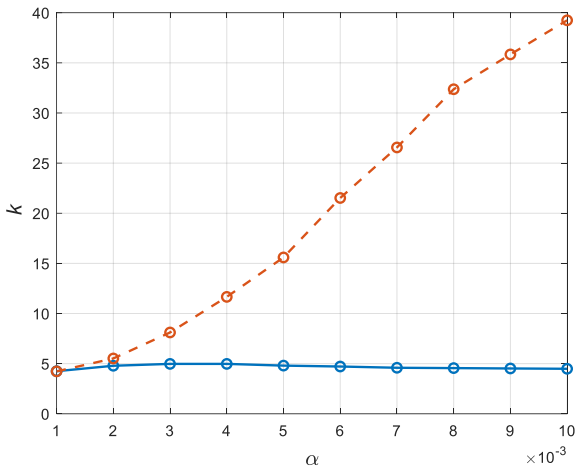


Рисунок 2. Середній час виявлення зриву супроводження траєкторії цілі

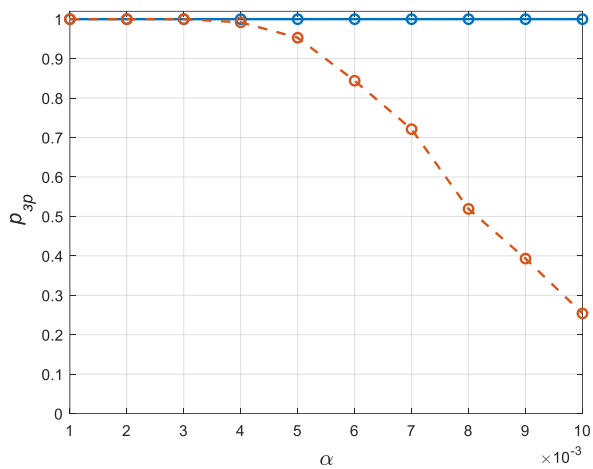


Рисунок 3. Ймовірність виявлення зриву супроводження траєкторії цілі

На рис.2 і рис.3 наведено відповідно отримані методом Монте-Карло залежності середнього часу і ймовірності виявлення зриву траєкторії цілі розробленим алгоритмом (суцільна лінія) і відомим алгоритмом (штрихова лінія) за критерієм 3/4 при різних значеннях ймовірності хибної тривоги  $\alpha$ . Розроблений алгоритм забезпечує виявлення зриву супроводження з ймовірністю одиниця, в середньому за 5 тактів в усьому діапазоні хибних тривог. При збільшенні хибної тривоги середній час виявлення зриву супроводження відомим алгоритмом збільшується в рази, при цьому ймовірність виявлення зриву зменшується.

#### Перелік посилань

- 1 Кузьмін С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С. З. Кузьмин. — Київ: КВіЦ, 2000. — 428 с.
2. Жук С.Я. Послідовне виявлення траєкторії цілі з використанням вирішальних статистик відміток : монографія / С.Я. Жук, О.С. Неуймін -Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2020, -172 с.

#### Анотація

Розроблено алгоритм виявлення зриву супроводження траєкторії цілі за критерієм 3/4 з використанням вирішальної статистики найсильнішої відмітки. Його аналіз і порівняння з відомим алгоритмом було проведено шляхом статистичного моделювання на ЕОМ.

**Ключові слова:** критерій  $l/n$ , хибна тривога, пропуск цілі, вирішальна статистика, некогерентне накопичення.

#### Abstract

An algorithm for detection of the tracking loss of target trajectory using the 3/4 criterion using decision Statistics of the strongest pip has been developed. Analysis and comparison of developed algorithm with the known algorithm were obtained by the statistical simulation on a computer.

**Keywords:** criterion  $l/n$ , false alarm, target miss, decision Statistics, non-coherent accumulation

## **АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ РУХУ МАНЕВРУЮЧИХ ОБ'ЄКТІВ У ПРОСТОРИ**

*Набок Е. Р.; Неуймін О. С., к.т.н.  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна*

Супроводження об'єктів є необхідним компонентом сучасних систем відеоспостереження, систем управління повітряним рухом, робототехніки, тощо [1].

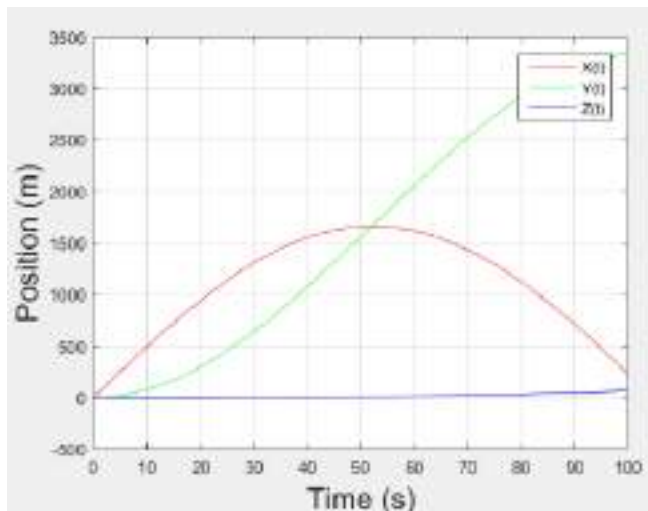
Розробка математичних моделей руху є важливим етапом у створенні ефективних систем супроводження, де вони дозволяють алгоритмам супроводження прогнозувати та оцінювати майбутні стани об'єктів, навіть за умов швидкого прискорення, уповільнення або зміни напрямку. Такі моделі руху дозволяють описувати траєкторії руху об'єктів у тривимірному просторі, що є критичним для задач супроводження, моніторингу та прогнозування.

В даній роботі проводиться аналіз Марківської моделі руху для поворотів [2], моделі Зінгера [2], моделі криволінійного руху [2]. Кожна з цих моделей адаптована для специфічних сценаріїв, таких як рух із постійним прискоренням, випадковими маневрами або регулярними коливаннями.

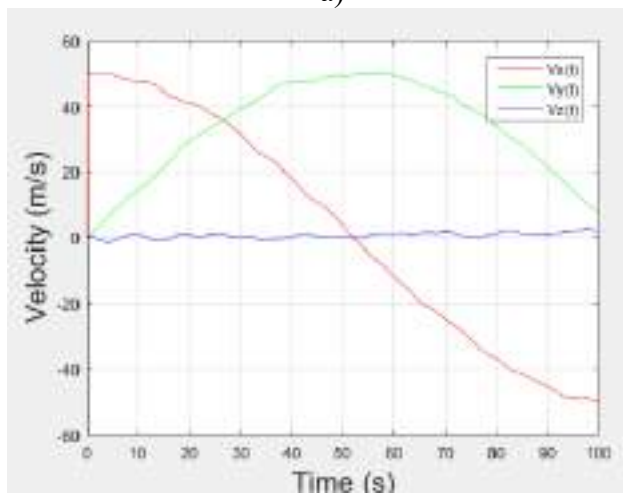
**Марківська модель руху для поворотів** описує траєкторію об'єкта, що рухається з постійною швидкістю та постійною кутковою швидкістю повороту. Вона дозволяє точно моделювати рівномірний круговий рух, що є базовим для опису маневрів рухомих об'єктів. Модель передбачає наявність випадкових змін у прискоренні цілі, що розподілені за марківським процесом, що дозволяє моделювати нестационарний рух під час маневрування.

**Модель руху Зінгера** базується на використанні нульового середнього прискорення як стаціонарного процесу Маркова першого порядку. Це модель опису маневрів цілі з корельованим прискоренням, що відповідає стаціонарній властивості реальних рухів об'єктів. Основна ідея полягає в тому, що прискорення об'єкта не є абсолютно випадковим, а має певну часову кореляцію.

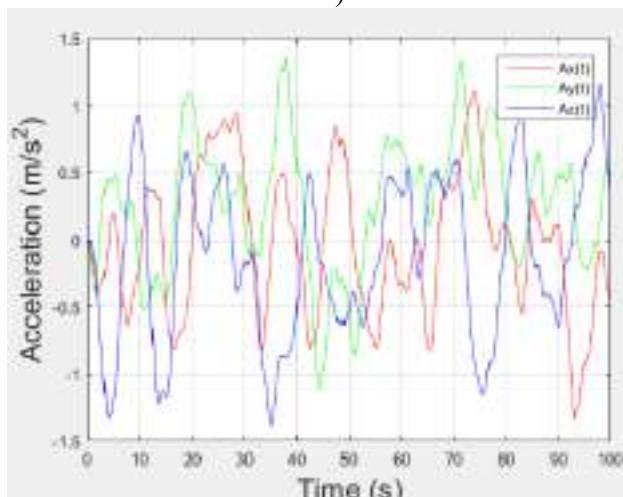
**Модель криволінійного руху** з урахуванням шуму описує рух об'єкта з одночасним урахуванням тангенціального прискорення і нормального прискорення. У даній реалізації використано спрощену версію цієї моделі, а саме матриця впливу керування. Окрім того, для забезпечення більш природного вигляду траєкторії в моделі враховано шум.



а)



б)



в)

Рисунок 1. Параметри руху об'єкта в залежності від часу в системі координат XYZ за моделлю руху Маркова:

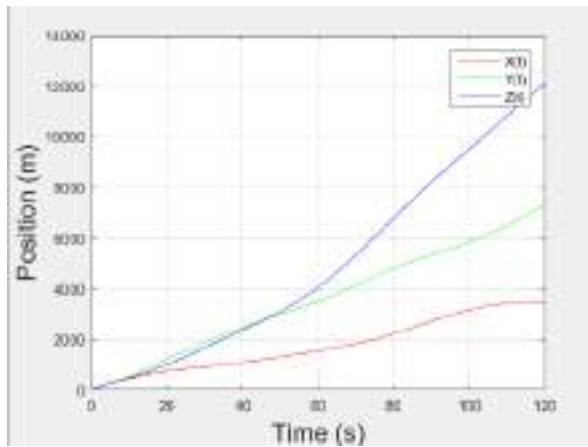
- а) положення, б) швидкість,  
в) прискорення

### Результати моделювання

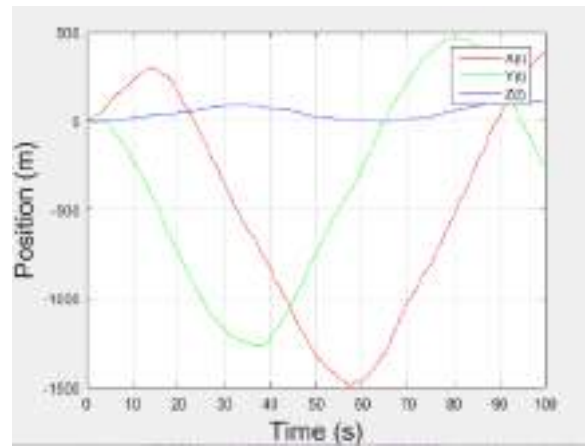
На рис. 1 зображено параметри руху об'єкта (положення, швидкість, прискорення) по кожній з координат  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  в залежності від часу, отримані з використанням моделі руху Маркова. Використовувалися наступні параметри моделі: початкова швидкість об'єкта  $V = 50$  м/с, крок часу  $dt = 0,1$  с, стала часу маневру  $\tau = 1$  с, коефіцієнт згасання  $\alpha = 1/\tau = 0,2$ , стандартне відхилення випадкового прискорення  $\sigma = 2$  м/с<sup>2</sup>.

На рис. 2 зображено параметри руху об'єкта (положення, швидкість, прискорення) по кожній з координат  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  в залежності від часу, отримані з використанням моделі руху Зінгера. Використовувалися наступні параметри моделі: часовий крок  $dt$ : 0.1 с, загальний час симуляції  $T$ : 100 с, постійна швидкість руху вперед  $V$ : 50 м/с, постійна швидкість повороту  $\omega$ : 0,03 рад/с, коефіцієнти моделі  $\alpha_1 = 0,5$ ,  $\alpha_2 = 0,3$ : визначають демпфування та затухання прискорення.

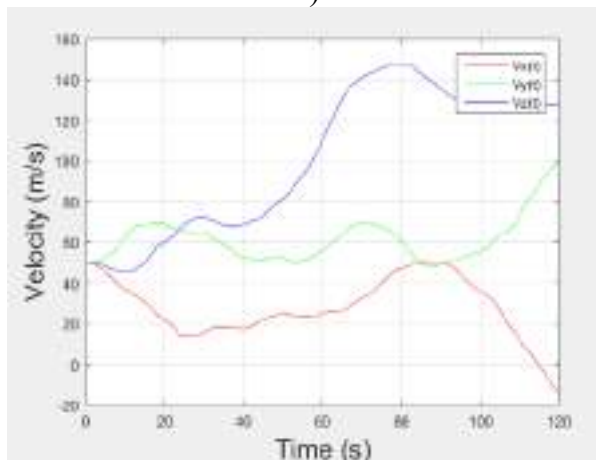
На рис. 3 зображено параметри руху об'єкта (положення, швидкість, прискорення) по кожній з координат  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  в залежності від часу, отримані з використанням криволінійної моделі руху.



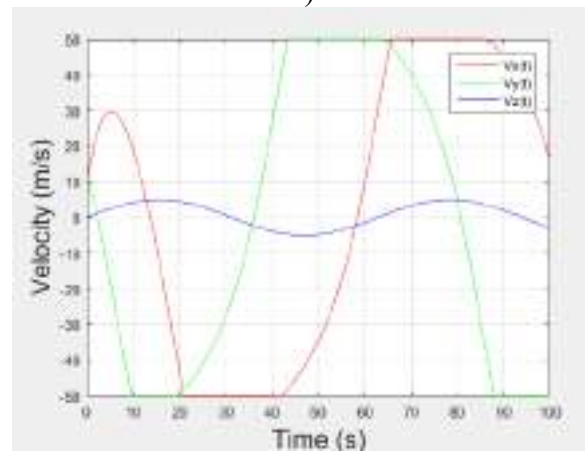
а)



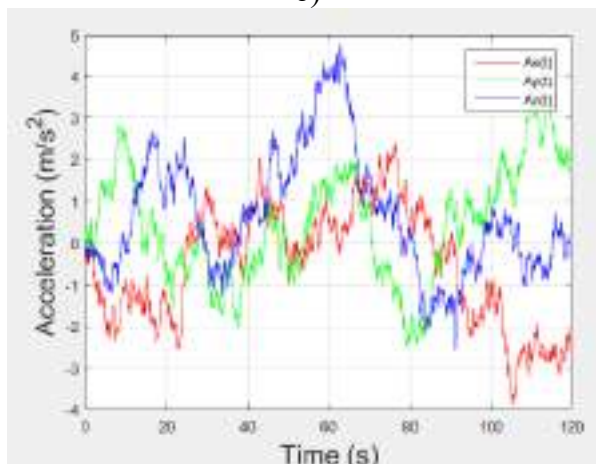
а)



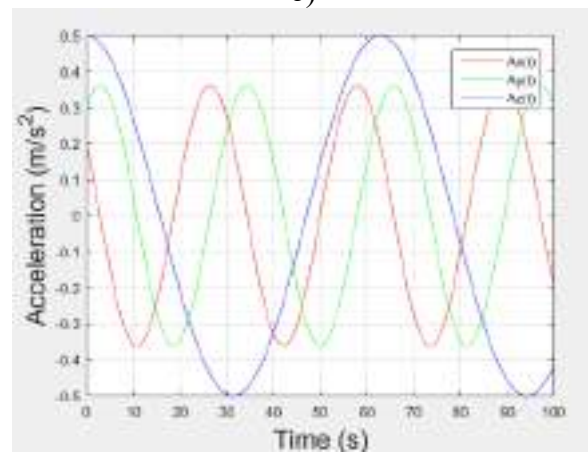
б)



б)



в)



в)

Рисунок 2. Параметри руху об'єкта в залежності від часу в системі координат XYZ за моделлю руху Зінгера:  
а) положення, б) швидкість,  
в) прискорення

Рисунок 3. Параметри руху об'єкта в залежності від часу в системі координат XYZ криволінійної моделі руху :  
а) положення, б) швидкість,  
в) прискорення

Використовувалися наступні параметри моделі: часовий крок  $dt$ : 0,1 с, загальний час симуляції  $T$ : 100 с, початкова швидкість  $V$ : 1 м/с, швидкість повороту  $\omega$ : 0,2 рад/с, тангенціальне прискорення  $a_t$ : 0,5 м/с<sup>2</sup>, нормальне прискорення  $a_n$ : 0,3 м/с<sup>2</sup>, стандартне відхилення білого шуму  $\sigma_\omega$ : 0,005 м/с<sup>2</sup> (по осях  $X$  і  $Y$ ), амплітуда коливань по  $Z$ : 5 м.

### **Висновок**

Марківська модель руху для поворотів забезпечує стабільний і передбачуваний рух з постійною швидкістю, що робить її ідеальною для моделювання об'єктів, що рухаються по круговій або дуговій траєкторії.

Модель руху Зінгера підходить для моделювання об'єктів із складними маневрами та випадковими змінами. Зміна параметрів руху свідчить про здатність моделі враховувати випадкові зміни, що характерно для активного маневрування в складних умовах.

Модель криволінійного руху демонструє гармонічний рух із періодичними коливаннями положення, швидкості та прискорення. Ця модель підходить для опису об'єктів, що виконують маневри з тангенціальним та нормальним прискоренням.

### **Перелік посилань**

1. Mangawati, A., Mohana, Leesan, M., & Aradhya, H. V. R. (2018). Object Tracking Algorithms for Video Surveillance Applications. 2018 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP), pp.0667 – 0.671 doi:10.1109/iccsp.2018.8524260
2. X. Rong Li and V. P. Jilkov, "Survey of maneuvering target tracking. Part I. Dynamic models," in IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 39, no. 4, pp. 1333-1364, Oct. 2003, doi: 10.1109/TAES.2003.1261132.

### **Анотація**

В даній роботі проводиться аналіз математичних моделей руху маневруючих об'єктів для систем супроводження. А саме, розглядаються моделі руху Марківська для поворотів, Зінгера та криволінійна. Представлено параметри руху об'єктів, згенерованих з використанням цих моделей.

**Ключові слова:** модель руху, маневруючий об'єкт, траєкторія.

### **Abstract**

In this paper, we analyze mathematical models of maneuvering objects for tracking systems. The Markov for turning, Singer, and curvilinear motion are considered. The motion parameters of objects generated using these models are presented.

**Keywords:** motion model, maneuvering object, trajectory.

## ПІДХОДИ ДО УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ ДРОНІВ НА ФОНІ АДИТИВНИХ ШУМІВ

Назаров І. С.; Чмельов В. О., к.т.н., доц.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

**Аналіз існуючих рішень.** Система виявлення дронів Rantelon DTS — 2458 аналізує радіосигнали в діапазонах 2,4 ГГц та 5,8 ГГц [4]. Визначає напрямок приходу сигналу, а при використанні кількох детекторів — місцезнаходження дрона методом триангуляції. Слабкі сторони: дальності ефективного виявлення залежність від потужності передавача дрона; у міських умовах ефективність виявлення може знижуватися через радіочастотний шум.



Рисунок 1. Система виявлення дронів Детектор Rantelon DTS—2458

Для подібних систем постає актуальна задача розробки нових алгоритмів виявлення джерел ЕМВ. Відоме правило оптимального виявлення базується на аналізі статистичних характеристик сигналу для визначення його наявності чи відсутності [1, 2]. Розглядаються дві гіпотези:  $H_0$  — сигнал відсутній (тільки шум), і  $H_1$  — сигнал присутній (є джерело ЕМВ).

Основою є відношення правдоподібності (рис. 2).

$$\Lambda(Y) = \frac{P_{H_1}(Y)}{P_{H_0}(Y)} \quad (1)$$

де:  $\Lambda(Y)$  — відношення правдоподібності, яке показує співвідношення умовних ймовірностей для гіпотез  $H_1$  та  $H_0$ ,  $P_{H_1}(Y)$  — умовна ймовірність спостереження  $Y$  за умови справедливості гіпотези  $H_1$  (наявність корисного сигналу);  $P_{H_0}(Y)$  — умовна ймовірність спостереження  $Y$  за умови справедливості гіпотези  $H_0$  (відсутність корисного сигналу) [1].

Правило оптимального виявлення базується на порівнянні відношення правдоподібності  $\Lambda(Y)$  з порогом  $\lambda$ . Якщо  $\Lambda(Y) \geq \lambda$ , приймається гіпотеза  $H_1$ ; якщо  $\Lambda(Y) < \lambda$  —  $H_0$ . Поріг  $\lambda$  залежить від вибраного критерію оптимізації, такого як критерій Неймана-Пірсона або Байєсів критерій [3]. Це дозволяє будувати ефективні алгоритми для виявлення з мінімізацією ймовірності помилок.

Але, сигнал від дрону зазнає значних флуктуацій через маневри дрону та дії адитивних шумів. Джерело сигналу можна описати через дві моделі: 1- модель передбачає сукупність незалежних випромінювачів із середнім значенням потужності, де сигнал зазнає флуктуацій через нерівномірність випромінювання та адитивні шуми. 2- модель враховує компоненту сталого випромінювання, що підтримує стабільність сигналу навіть за складних умов.

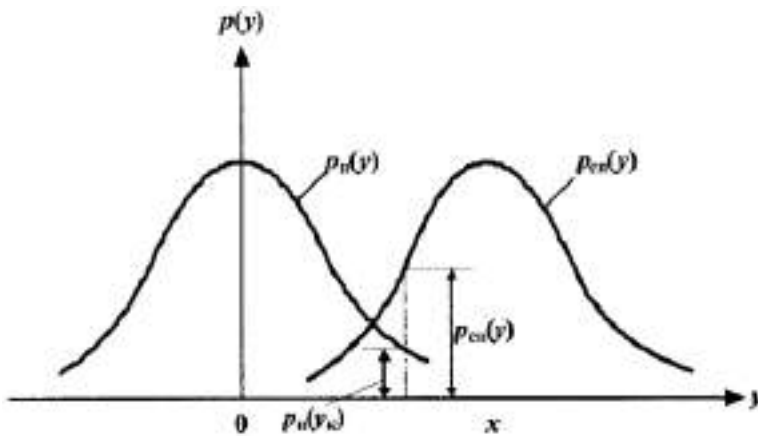


Рисунок 2. Графік ймовірнісних щільностей.  $P_n(y)$  відповідає фоновому шуму,  $P_{cn}(y)$  — сигналу на фоні шуму.

$\sigma^2$  — дисперсія шуму.

Закон Релея-Райса пов'язує параметри: середнє значення та дисперсію:

$$\bar{X} = 1,25\sigma_x; D\{X\} = 0,43\sigma_x^2 \quad (3)$$

де:  $\bar{X}$  — риска знак усереднення.

У разі сталого джерела сигналу використовується узагальнений закон Релея – Райса (рис. 3), де враховується стабільний компонент потужності  $P$ :

$$p(x) = \frac{X}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{X^2 + X_c^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{XP}{\sigma^2}\right) \quad (4)$$

де:  $P$  — потужність сталого випромінювання сигналу,  $\exp\left(-\frac{X^2 + X_c^2}{2\sigma^2}\right)$  — експоненційний множник, що враховує згасання ймовірності для великих  $X$  та  $P$ ,  $I_0\left(\frac{XP}{\sigma^2}\right)$  — модифікована функція Бесселя нульового порядку, що описує залежність від взаємодії амплітуди та потужності.

Цей вираз дозволяє врахувати сталу складову сигналу на фоні шумів. Алгоритм оптимального виявлення, коли сигнал розподілений за законом Релея-Райса, можна визначити за допомогою правила трьох  $\sigma_x$ , що дозволяє мінімізувати ймовірність хибних тривог.

Для розподілу Релея ймовірність перевищення порогового значення  $T$  визначається як:

У разі флуктуаційної моделі амплітуда сигналу розподілена за законом Релея-Райса, і густина ймовірності амплітуди визначається відповідною формулою

$$p(x) = \frac{X}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{X^2}{\sigma^2}\right) \quad (2)$$

де:  $p(x)$  — густина ймовірності для випадкової амплітуди  $X$  без сталого випромінювання,  $X$  — амплітуда сигналу,



$$p(X > T) = \exp\left(-\frac{T^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

де:  $p(X > T)$  — ймовірність того, що амплітуда сигналу  $X$  перевищить заданий поріг  $T$ ,  $T$  — порогове значення амплітуди сигналу, яке встановлюється для прийняття рішення,  $\exp\left(-\frac{T^2}{2\sigma^2}\right)$  — експоненційний коефіцієнт, який зменшується зі збільшенням  $T$ , що показує спад ймовірності при більших порогах.

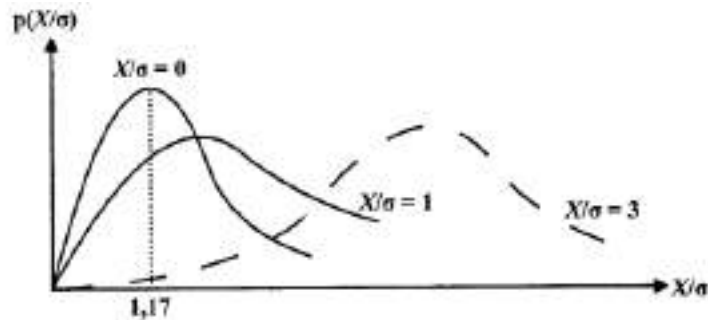


Рисунок 3. Густина ймовірності розподілу амплітуди сигналу за законом Релея для різних значень  $\frac{X}{\sigma}$ .

Використання закону Релея-Райса підвищує чутливість порогу виявлення, особливо при високому рівні потужності  $P$ . Порівнюючи два методи виявлення, можна сказати, що закон Релея-Райса дозволяє спростити простий алгоритм виявлення сигналів дронів.

#### Перелік посилань

1. Shyrman, Ja.D. and Manzhos, V.M. (2008), *Teoriya i tehnyka obrobky radiolokacijnoi' informacii' na foni pereshkod*, VIRTА PPO, Harkiv, 268 p.
2. Merrill Skolnik. *Radar Handbook*. Third Edition by The McGraw-Hill Companies, New York, 2008. -1352p.
3. Mark A. Richards. *Fundamentals of Radar Signal Processing*. Second Edition by McGraw-Hill Education, New York, 2014. – 894p.
4. Система виявлення дронів Детектор Rantelon DTS-2458: <https://prodrone.com.ua/5300004512/>

#### Анотація

У роботі досліджуються методи виявлення дронів на основі сигналів передачі відео. Розглянуто правило оптимального виявлення для мінімізації помилок і застосування закону Релея-Райса. Порівняно ефективність двох методів виявлення для вибору найкращого підходу.

**Ключові слова:** виявлення дронів, Rantelon DTS — 2458, оптимальне виявлення, закон Релея (Райса), радіолокація.

#### Abstract

The paper investigates methods for detecting drones based on video transmission signals. The optimal detection rule for minimizing errors and applying the Rayleigh-Rice law are considered. The effectiveness of two detection methods is compared to select the best approach.

**Keywords:** drone detection, Rantelon DTS — 2458, optimal detection, Rayleigh (Rice) law, radar systems.

## **ВИКОРИСТАННЯ ТОНАЛЬНИХ БАГАТОЧАСТОТНИХ СИГНАЛІВ ДЛЯ КОДУВАННЯ ДАНИХ В РАДІО КАНАЛАХ**

*Пащук І. В.; Домбровський М. З., к.т.н.*

*Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, Україна*

В теперішній час одним із перспективних напрямків зростання генерації потужності досягають шляхом впровадження розподілених на великих територіях вітро- та сонячних джерел генерації з двосторонніми потоками енергії та даних, що значно ускладнює управління енергопостачанням.

Управління такими складними енергосистемами з розподіленою генерацією здійснюють на основі концепції Smart-Grid [1]. Концепція Smart Grid (SG) це розумна активно-адаптивна мережа мікрогрід [2], для ситуативної обізнаності та управління SG облаштовується:

- великою кількістю датчиків, які вимірюють поточні параметри для оцінки стану об'єктів мережі в різних режимах роботи енергосистеми;
- засобами управління активними елементами мережі та електроустановками споживачів (взаємодії на основі стандарту IEC 61850–8–2) [3].

У розподіленій мережі для обміну даними з віддаленими об'єктами SG використовують радіо канали.

В енергосистемах для дистанційного вимірювання (телевимірювання) електричних і неелектричних величин використовують пристрої низькочастотної системи типу ТНЧ-2. Вимірювальна інформація передається каналом зв'язку у формі частоти синусоїдального змінного струму. Випускаються пристрої двох моделей: А і Б. Місткість пристрою моделі А - 5 безперервних ТВ або 35 повідомлень ТС; моделі Б - 10 безперервних телевимірювань або 70 повідомлень ТС. Такі обмежені можливості недостатні для отримання усієї інформації в SG.

В даний час для обміну даними з віддаленими об'єктами використовують радіомодеми. Як правило, радіомодеми працюють у УКХ діапазоні частот від 136 МГц до 174 МГц або від 403 МГц до 470 МГц з використанням маніпуляції синусоїдного сигналу. Застосування радіомодему не гарантує достовірність передачі даних та кодових слів управління в мережі тому, що залежить від відношення потужностей сигналу та завад в радіоканалі, крім того створює загрози несанкціонованого доступу чи небажаного втручання в управління енергомережою. Завади та нестабільні умови, пов'язані з бездротовим каналом, спричиняють пошкодження або втрату даних. Зазначені недоліки створюють загрозу безпечного функціонування SG.

Відомим рішенням для усунення чи зменшення загрози безпечного функціонування є двотональний багато частотний метод (DTMF) з двох

накладених один на одного синусоїдальних хвиль з частотами, вибраними з набору з восьми стандартизованих частот, виявлення яких здійснюють за алгоритмом Герцеля. Цей алгоритм використовує фільтри, налаштовані на вісім частот DTMF [4, 5].

Проте, модифікований алгоритм Герцеля може виявити вхідну частоту в межах  $\pm 1,5\%$  зміщення. Цей алгоритм не перевіряє проблеми переповнення та не є повним алгоритмом виявлення. Щоб забезпечити повне виявлення, необхідна подальша оцінка виявленого тону.

На підставі викладеного, констатуємо, що при використанні радіо каналів потрібно забезпечити достовірність та конфіденційність даних, для гарантування безпеки функціонування SG.

Для досягнення таких цілей дослідники у роботах [6-9] пропонують рішення безпеки за допомогою методів криптографії, які не вирішують на достатньому рівні безпечності даних управління у функціонуванні розподілених енергосистем.

Отже, встановлено наявність науково-технічного завдання забезпечення достовірності та конфіденційності даних в радіо каналах обміну даними з віддаленими об'єктами у мережах типу SG. Для розв'язання цього завдання пропонуємо використання двох, або трьох послідовних в часі комбінації коротких посилок різної частоти  $i$ , з діапазону частот (420-2000) Гц., на основі цифрових методів генерування високої стабільності і точності частоти генератора і відповідно формування дуже вузької смуги (одиниці Герц) пропускання фільтрів. Для побудови генератора сітки частот і набору фільтрів, обрано уніфіковану структуру цифрової ланки 2-го порядку для реалізації цифрового вузько смугового фільтра (одиниці Герц) за рахунок деталізації розрахунку комплексно - спряжених коефіцієнтів функції передачі, яка шляхом зміни коефіцієнтів переналаштовується на генерування сітки тональних частот, з точністю частоти не гірше 0,1 Гц і стабільністю не менше  $10^{-6}$ .

Цифровий резонатор з мінімальним затратами забезпечує:

- однорідну структуру обчислювального пристрою;
- простий циклічний алгоритм реалізації генератора частот і набору фільтрів;
- можливість переналагодження і зміни параметрів генерації потрібної частоти і смугової фільтрації шляхом програмування.

Висновок. Розглянуто метод та засоби побудови уніфікованих цифрових пристроїв (резонатора) для генерації і фільтрації тональних сигналів, які використовують для покращення достовірності та конфіденційності передачі даних у SG щоб підвищити ефективність захисту та якість керування енергопостачанням.

**Перелік посилань**

1. X. Fang, S. Misra, G. Xue and D. Yang, "Smart Grid — The New and Improved Power Grid: A Survey," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 14, no. 4, pp. 944-980, Fourth Quarter 2012, doi: 10.1109/SURV.2011.101911.00087.
2. L. Tightiz, H. Yang, H. Bevrani, "An Interoperable Communication Framework for Grid Frequency Regulation Support from Microgrids. " Sensors 2021, 21, 4555. <https://doi.org/10.3390/s21134555>.
3. M. Daoud and X. Fernando, "On the Communication Requirements for the Smart Grid," Energy and Power Engineering, Vol. 3 No. 1, 2011, pp. 53-60. doi: 10.4236/epe.2011.31008.
4. K. Shaterian and H. Gharaee, "DTMF detection with Goertzel algorithm using FPGA, a resource sharing approach," 2010 International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications, Kuala Lumpur, Malaysia, 2010, pp. 196-199, doi: 10.1109/ICEDSA.2010.5503074.
5. Rehman, B. Khaleelu, et al. "Detection of DTMF by using Goertzel algorithm and optimized resource-sharing approach." Intelligent Communication, Control and Devices: Proceedings of ICICCD 2018. Springer Singapore, 2020.
6. K. Chelli, "Security issues in wireless sensor networks: Attacks and countermeasures," in Proc. World Congr. Eng., vol. 1. 2015, pp. 1–6.
7. Tsopa O. Basic technologies and techniques ml/ai for improving physical layer security for 5g/6g communications systems / O. Tsopa, O. Dudka A. Merzlikin // System analysis and intelligent systems for management: The 17th International scientific and practical conference, Ankara, Turkey, 2-5 May 2023. – P. 403–408.
8. Антонов В. М., Пермяков О. Ю. Комп'ютерні мережі військового призначення. Київ: МК-Прес, 2005. 314 с.
9. Кучеренко Ю. Ф., Носик А. М., Александров О. В., Власік С. М., Бродова О. В. Вимоги до мережецентричних систем управління спеціального призначення. Polish journal of science. 2022. № 53. С. 77–82. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6997368>.

**Анотація**

Представлені вимоги до обміну даними з віддаленими об'єктами у розподіленій мережі Smart-Grid. Розглянуто особливості забезпечення достовірності та конфіденційності даних в радіо каналах обміну даними з віддаленими об'єктами, показано метод та засоби побудови уніфікованих цифрових пристроїв (резонатора) для генерації і фільтрації тональних сигналів, які використовують для підвищення достовірності та конфіденційності передачі даних.

**Ключові слова:** розподілена генерація, двосторонні потоки даних, DTMF, алгоритм Герцеля, цифровий вузько смуговий фільтр.

**Abstract**

Requirements for data exchange with remote objects in a distributed Smart-Grid network are presented. The peculiarities of ensuring the reliability and confidentiality of data in radio data exchange channels with remote objects are considered, the method and solutions of building unified digital devices (resonator) for generating and filtering tone signals, which are used to increase the reliability and confidentiality of data transmission, are shown.

**Keywords:** distributed generation, two-way data streams, DTMF, Herzel algorithm, digital narrowband filter.

## **АНАЛІЗ МЕТОДІВ РЕАЛІЗАЦІЇ ПЛАНУВАННЯ РУХУ РІЙНИХ ДРОНІВ НА БАЗІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ**

**Юрченко О. А.; Жук С. Я., д.т.н., проф.**

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна*

У сучасному світі використання дронів набуває все більшого значення, відкриваючи нові можливості в різноманітних галузях, включаючи сільське господарство, логістику та оборонну сферу. А використання рійних систем дозволяє покращити їх ефективність, масштабність та адаптивність. Проте, успішне функціонування роїв дронів вимагає врахування численних змінних: траєкторії, обмежень простору, перешкод і зовнішніх факторів. Планування руху та уникнення зіткнень є ключовим аспектом, що впливає на успішність їх використання.

Успішне планування руху вимагає застосування різних підходів, кожен з яких має свої особливості, переваги та обмеження[1]:

Класичні методи, алгоритми пошуку шляху, такі як Dijkstra і A\* забезпечують розрахунок найкоротших шляхів у статичних середовищах. Вони ефективні для малих роїв, проте не враховують динаміку змін середовища та взаємодію між дронами. У роях з великою кількістю агентів ці методи стають обчислювально затратними, що ускладнює їх застосування в реальному часі.

Методи потенційних полів базуються на концепції штучних сил: атрактивний потенціал спрямовує дрони до цілі, а репульсивний уникає зіткнень із перешкодами. Простота реалізації та швидкість роблять його придатним для реального часу. Однак у середовищах із високою щільністю дронів можливі проблеми, зокрема локальні мінімуми, коли дрони «застрягають» у певних точках.

Алгоритми розподіленого планування дозволяють кожному дрону автономно приймати рішення, використовуючи локальну інформацію зменшуючи залежність від централізованого контролю та обчислювальні витрати, що важливо для великих роїв. Цей підхід забезпечує ефективну взаємодію дронів, дозволяючи адаптацію у реальному часі.

Методи еволюційних алгоритмів, такі як генетичні алгоритми та Particle Swarm Optimization, моделюють процес природного відбору або соціальну поведінку. Вони дозволяють знаходити глобальні оптимуми в складних середовищах, адаптуючись до різних умов. Еволюційні алгоритми є потужним інструментом для оптимізації траєкторій у складних рійних системах.

Алгоритми машинного навчання, особливо глибоке навчання, відкриває нові можливості для планування руху. Нейронні мережі, такі як CNN

(для обробки просторових даних) і LSTM (для аналізу часових послідовностей), дозволяють дронам навчатися оптимальним траєкторіям на основі великих наборів даних. Це сприяє прогнозуванню поведінки дронів, виявленню потенційних зіткнень і адаптації до змін середовища.

Навчання моделей може відбуватися у симуляціях або на реальних даних, що забезпечує високу точність і адаптивність навігаційних систем. Це дозволяє створювати складні сценарії для рійних дронів, враховувати різноманітні чинники та підвищувати ефективність і надійність роботи.

Для навчання нейронних мереж у контексті планування руху дронів важливо забезпечити адекватне врахування низки параметрів [2]:

Положення та орієнтація: визначають просторове розташування;

Швидкість і напрямок руху;

Відстані до перешкод: допомагають тренувати уникнення зіткнень;

Динамічні зміни: дозволяють адаптуватися до умов середовища в реальному часі.

Ці параметри інтегруються в процес навчання, що дає мережі змогу адаптуватися для досягнення максимальної ефективності в різних умовах.

Дослідження та розробка методів планування руху рійних дронів із використанням штучного інтелекту створює нові можливості оптимізації та автоматизації. Застосування таких підходів як алгоритми машинного навчання, еволюційні методи, алгоритми потенційних полів, дозволяють дронам ефективно оперувати навіть у складних умовах і швидко адаптуватися до динамічних змін середовища.

Результати цих досліджень можуть значно вплинути на галузі логістики, сільського господарства, оборонних і рятувальних операцій, сприяючи підвищенню безпеки, ефективності та автономності роїв дронів.

#### **Перелік посилань**

1. Wang, J.; Tang, Y.; Kavalen, J.; Abdelzaher, A.F.; Pandit, S.P. Autonomous UAV Swarm: Behavior Generation and Simulation. In Proceedings of the 2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Pearl Street Dallas, TX, USA, 12–15 June 2018; pp. 1–8.

2. Cybulski, P.; Zieliński, Z. UAV Swarms Behavior Modeling Using Tracking Bigraphical Reactive Systems. *Sensors* 2021, 21, 622. <https://doi.org/10.3390/s21020622>

#### **Анотація**

В роботі описано та аналізовано методи реалізації планування руху для рійних дронів з використанням алгоритмів штучного інтелекту, оглядаючи їх використання в оптимізації траєкторій польоту в динамічному оточенні.

**Ключові слова:** штучний інтелект, рійні дрони, планування руху, оптимізація траєкторій.

#### **Abstract**

The paper describes and analyses motion planning methods for drone swarms using artificial intelligence algorithms, reviewing their application in optimizing flight trajectories in dynamic environments.

**Keywords:** artificial intelligence, drone swarms, pathfinding, trajectory optimization.

### **Секція 3. Електроніка, нанотехнології, біомедичні системи, радіовимірювання.**

*Електронні матеріали, наноелектроніка та нанотехнології, теорія та практика радіовимірювань, радіоелектроніка біомедичних технологій, мікроелектроніка, ультразвукова техніка, технічна діагностика та методи неруйнівного контролю, оптичні системи та фотоніка.*

**Керівник секції:** Андрій Мовчанюк

**Секретар секції:** Ірина Сушко

## **MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION WITH CONSTRAINTS IN THE PROCESS OF ELECTRONICS DESIGN**

*Nikitchuk A. V.*

*Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine*

The objective function (OF) in electronic device design tasks is a key mathematical tool that describes the optimization criterion of the system. It allows formalizing the optimization problem in such a way that all necessary constraints and characteristics of the device are taken into account by integrating them into a single function [1, 2]. The method of their integration typically depends on the specific optimization task.

In most cases, to simplify calculations, the optimization task focuses on the key aspect (main criterion) that is decisive for the success of the project, while other characteristics are considered as constraints [3]. To account for all important characteristics simultaneously, each of them must be included in the OF through a combined function [4] (linear combination of criteria)  $F(x)$ :

$$F(x) = w_1f_1(x) + w_2f_2(x) + \dots + w_nf_n(x),$$

where:  $f_1, f_2, \dots, f_n$  — are individual objective functions (criteria) that reflect specific characteristics of the device (temperature, mechanical stability, reliability, energy consumption, dimensions, etc.).

$w_{1,2}, \dots, w_n$  — are weight coefficients that determine the relative importance of each criterion.

$x$  — is a set of variables that influence the characteristics of the device, for example:

- geometric parameters (dimensions, heat dissipation areas, component placement);
- materials (types of materials, thermal conductivity, mass);
- operating modes (load coefficients);
- other parameters (permissible vibration, noise level, cooling systems, etc.).

With this approach,  $F(x)$  becomes a generalized metric that accounts for all the desired properties of the device. These properties have different physical natures and units of measurement, and their inclusion in a single function may complicate the mathematical model and make its computation impractical. Therefore, they need to be normalized. Additionally, during multi-objective optimization, they may conflict with each other. For example:

- minimizing temperature may lead to an increase in dimensions due to the need to enlarge the heat dissipation area;
- reducing energy consumption may decrease performance.



The selection of priorities and the establishment of constraints play a key role. They allow for deciding how to allocate resources and what to focus the optimization on. It is necessary to clearly define which goals are the most important and which are acceptable compromises, taking this into account by adjusting the weight coefficients  $w$ . The absence of prioritization can lead to results that do not meet practical requirements.

Interaction between criteria is also important. For example, vibration resilience may depend on the placement of components (mass, center of gravity), but this placement also affects electromagnetic compatibility or heat dissipation. Design or ergonomics requirements for the device can also influence the arrangement of structural modules and limit space. Thus, the mechanism for coordinating between different criteria, in order to maintain balance and avoid excessive changes in the structural-constructional module (SCM) structure, may be the constraints set by the device designer. On one hand, the presence of constraints reduces the number of possible variants and narrows the search space, which can speed up optimization. On the other hand, constraints require additional checks, which increases computational costs.

In the algorithm developed based on random search (Fig. 1), the reduction in computational costs for calculating the OF for infeasible solutions is achieved by considering the following during the topology generation stage:

- geometric constraints to avoid component overlap;
- minimum distances between components;
- fixed positions (if necessary) of critical elements;
- restriction of the search space for the optimal solution for each component.

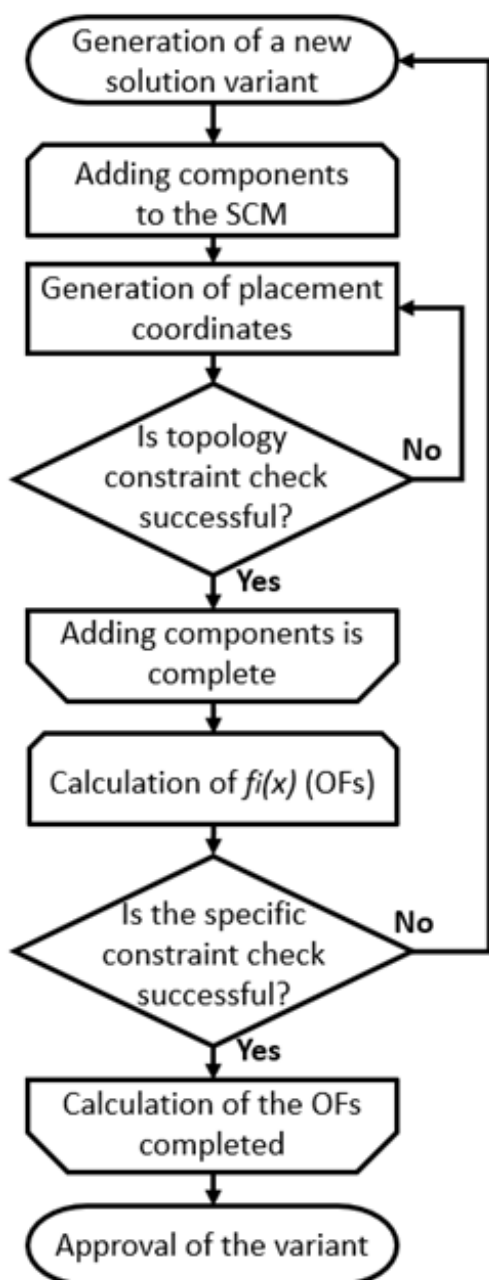


Figure 1. Simplified algorithm for generating an SCM variants during optimization with constraints

If at any stage of the solution verification the variant is rejected, a new one is immediately generated. This ensures that only the feasible region is explored. Additionally, during the calculation of the objective function, system-specific constraints (thermal, electrical, mechanical, economic, etc.) may be applied.

The application of multi-objective optimization in combination with random search algorithms and appropriate constraints allows solving complex tasks and can significantly improve the efficiency of design.

#### References

1. Multi-objective design and optimization of a vienna rectifier with parametric uncertainty quantification [Electronic resource] / Niloofar Rashidi Mehrabadi [et al.] // 2017 IEEE 18th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), Stanford, CA, USA, 9–12 July 2017. – [S. 1.], 2017. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/compel.2017.8013377> (date of access: 21.11.2024). – Title from screen.

2. Automatized Multi-objective Optimization for Reliability of Power Electronics [Electronic resource] / Tibor Debreceni [et al.] // 2024 IEEE 10th Electronics System-Integration Technology Conference (ESTC), Berlin, Germany, 11–13 September 2024. – [S. 1.], 2024. – P. 1–11. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/estc60143.2024.10712033> (date of access: 21.11.2024). – Title from screen.

3. Uvarov B. M. Radioelectronic Apparatus Design with Optimal Reliability Indicators [Electronic resource] / B. M. Uvarov, A. V. Nikitchuk // Visnyk NTUU KPI Seriya - Radio-tehnika Radioaparatabuduvannia. – 2018. – No. 75. – P. 48–53. – Mode of access: <https://doi.org/10.20535/radap.2018.75.48-53> (date of access: 21.11.2024). – Title from screen.

4. Uvarov B. M. Optimization of thermal regimes and reliability of constructions of radio-electronic devices with probabilistic characteristics : Scientific publication / B. M. Uvarov, Yu. F. Zinkovskyi. – Kyiv : Korniiichuk, 2011. – 201 p.

#### Анотація

Розглядається застосування багатокритеріальної оптимізації з обмеженнями в процесі проектування електронних пристроїв. Описано методи інтеграції різних характеристик системи в цільову функцію для досягнення балансу між взаємопов'язаними критеріями, такими як температура, механічна стабільність, енергоспоживання та ін. Розроблено алгоритм перевірки обмежень в процесі генерації варіантів конструкцій за допомогою випадкового пошуку, що дозволяє зменшити обчислювальні витрати та підвищити ефективність проектування.

**Ключові слова:** багатокритеріальна, оптимізація, цільова функція, електронні, пристрої, алгоритм.

#### Abstract

The application of multi-criteria optimization with constraints in the process of electronic device design is considered. Methods for integrating various system characteristics into the objective function to achieve a balance between interconnected criteria, such as temperature, mechanical stability, energy consumption, etc., are described. An algorithm for constraint verification during the generation of design variants using random search is developed, which helps reduce computational costs and improve design efficiency.

**Keywords:** multi-objective, optimization, objective function, electronic, devices, algorithm.

## **АВТОМАТИЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ЗАВАНТАЖЕННЯ МЛИНА МШЦ**

*Божок Д. О.; Степанов М. М. д.т.н., проф.*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна*

Процес подрібнення руди по енергоємності в три рази перевищує процес по транспортуванні пульпи і в десятки разів решту процесів пов'язаних зі збагаченням руди, тобто є найбільш енергоємним. Оскільки кульові млини – найбільш енергоємні агрегати, оптимізація режиму їх роботи є важливим засобом економії і підвищення ефективності використання електроенергії. Тому актуальним є вирішення задачі вибору раціонального режиму роботи кульових млинів, тобто встановлення, за яких умов кульові млини працюють з максимальною ефективністю [1].

Існуючі системи керування процесом завантаження базуються на класичних алгоритмах, таких як ПД-регулювання, та часто використовують застарілі засоби контролю, що не дозволяють забезпечити достатню адаптивність до змінних умов роботи. Це призводить до підвищених енерговитрат, нерівномірного завантаження млина та прискореного зносу обладнання.

Дана робота спрямована на розробку адаптивної системи керування процесом завантаження млина із застосуванням сучасних сенсорів і алгоритмів на основі нейронних мереж, що дозволяє підвищити ефективність, точність та енергозбереження у роботі млина.

Метою роботи є розробка сучасної адаптивної системи автоматизації керування завантаженням млина МШЦ на основі використання сучасних сенсорів та інтелектуальних алгоритмів.

На рис. 1 представлено структурну схему системи, яка включає датчики, мікроконтролер STM32F769I та серверний ПК. Ця архітектура забезпечує оперативний збір, передачу та обробку даних.

Датчики передають дані про вагу руди, витрати води та рівень вібрацій на мікроконтролер. Кожен сигнал спочатку оцифровується та фільтрується для усунення шумів.

Мікроконтролер здійснює попередню обробку даних (усереднення, нормалізація) та передає їх на серверний ПК через Ethernet.

Серверний ПК обробляє дані за допомогою алгоритмів нейронних мереж. Алгоритми аналізують тренди вібрацій, вагу та витрату води, оптимізуючи параметри завантаження.

На основі результатів аналізу сервер передає команди виконавчим механізмам через мікроконтролер. Частотний перетворювач регулює швидкість конвеєра, а електропривод налаштовує витрату води.

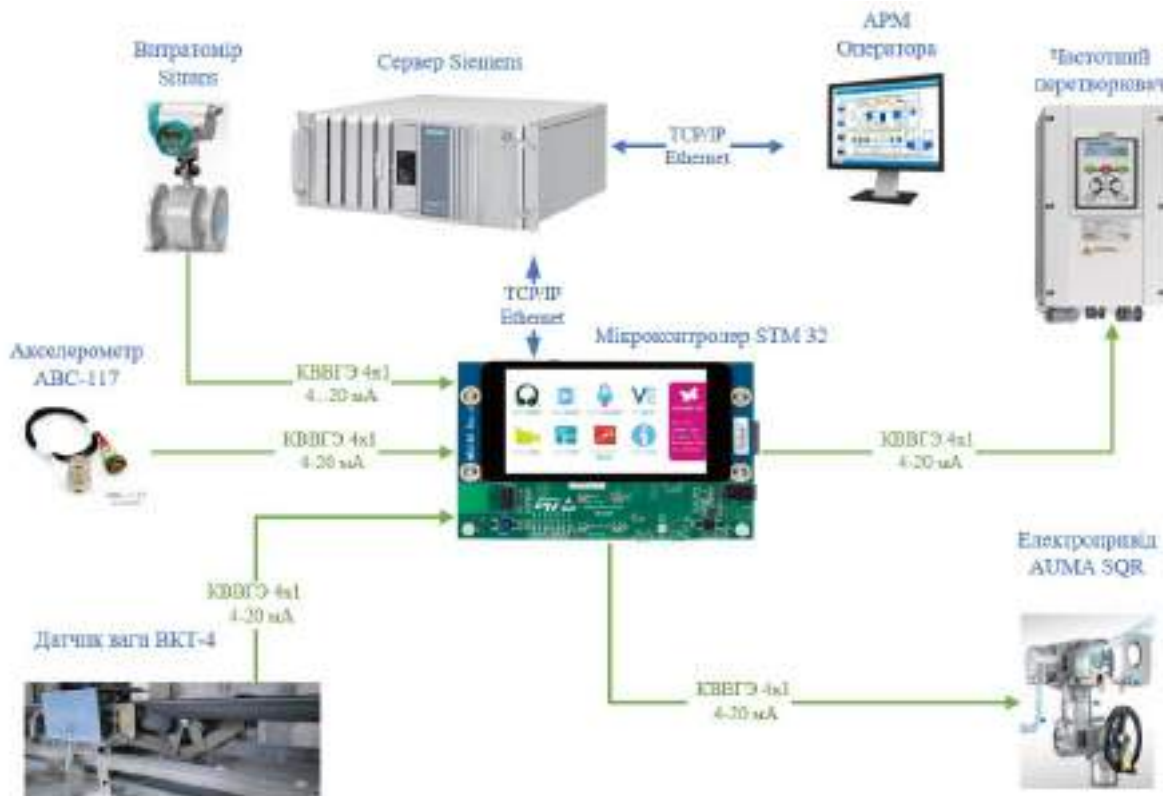


Рисунок 1. Взаємодія між датчиками, мікроконтролером та виконавчими механізмами

### *Впровадження нейронної мережі*

Алгоритм керування ґрунтується на нейронній мережі, яка аналізує сигнали вібрацій та визначає оптимальні параметри подачі руди і води. Запропонована адаптивна система керування на основі нейронних мереж забезпечує підвищену точність і надійність процесу завантаження млина МШЦ.

Використання сучасних сенсорів дозволяє зменшити вібрації, підвищити енергоефективність і знизити знос обладнання.

Система може бути рекомендована для впровадження на гірничозбагачувальних підприємствах з метою підвищення ефективності роботи млина та зменшення витрат електроенергії.

### *Графік вібрацій*

Підтримання стабільної подачі руди не дозволяє максимально використовувати поточну продуктивність млина і в цілому призводить до зниження загальної продуктивності і збільшення енерговитрат. Добовий зріз процесу одного з головних млинів (Рис. 2) [2] показує, що стабілізація подачі руди не усуває істотних коливань об'ємного заповнення млина (за даними приладу віброакустичного контролю на графіку – приладу типу «ВАЗМ») і відсотка виходу готового класу (на графіку – ВГК). Система явно втрачає близько (10-15)% продуктивності через те, що оператор не ризикує піднімати продуктивність через побоювання перевантаження.

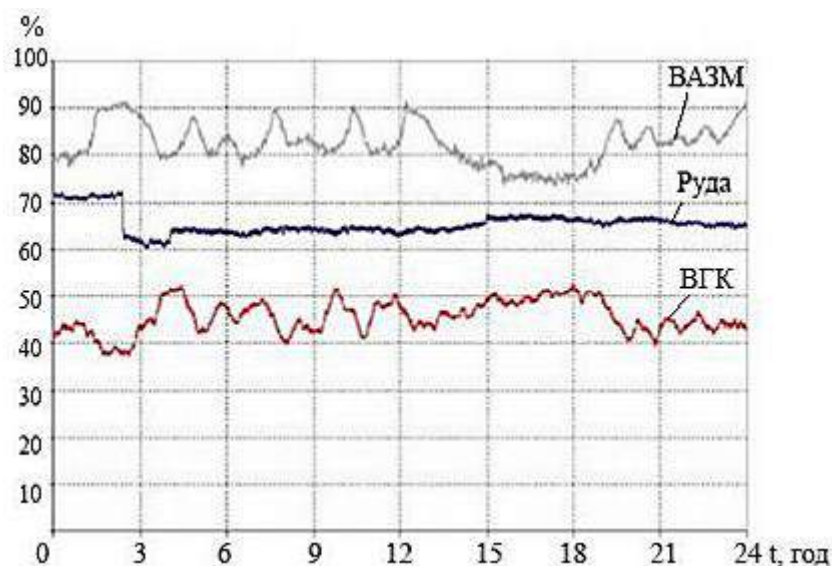


Рисунок 2. Добовий зріз процесу головного млина, де ВАЗМ – дані приладу віброакустичного контролю; ВГК – вихід готового класу; Руда – подача руди

Саме тому, необхідно використовувати адаптивну систему завантаження млина, яка здатна швидко реагувати на зміни фізико-хімічних властивостей сировини.

#### Перелік посилань

1 Kupin A., Senko A. Principles of intellectual control and classification optimization in conditions of technological processes of beneficiation complexes.- CEUR-WS.- 2015. -Vol. 1356.- Pp. 153-160.

2. Сенько А.О. Нейромережеві моделі для прогнозування параметрів технологічного процесу подрібнення руди / А. І. Купін // Системні технології. Регіональний міжвузівський зб. наук. праць. – Дніпро, 2018. – № 2(115). – С. 128–134.

#### Анотація

У роботі представлено сучасну адаптивну систему автоматизації керування завантаженням млина типу МШЦ. Запропоновано використання датчика ваги, витратоміра та акселерометрів для підвищення точності вимірювань, а також алгоритмів нейронних мереж для оптимізації процесу завантаження. Система забезпечує зниження вібрацій та підвищення енергоефективності, що сприяє покращенню роботи млина.

**Ключові слова:** автоматизація керування, завантаження млина, нейронні мережі, датчики вібрацій, оптимізація процесу.

#### Abstract

The study presents a modern adaptive automation system for controlling the loading process of an Ball mill. The proposed solution utilizes a weight sensor, a flow meter, and accelerometers to enhance measurement accuracy, along with neural network algorithms to optimize the loading process. The system ensures reduced vibrations and increased energy efficiency, contributing to improved mill performance.

**Keywords:** control automation, mill loading, neural networks, vibration sensors, process optimization.

## ВИЗНАЧЕННЯ РОЗМІРУ ЧАСТИНОК ЗА ДОПОМОГОЮ ІНДИКАТРИСИ РОЗСІЮВАННЯ

Головня В. М.; Головня Є. С.; Зінковський Ю. Ф., д.т.н., проф.  
КПІ ім. Ігоря Сікорського», Київ, Україна

Серед сукупності різноманітних діагностичних методів варто виділити методи, що базуються на взаємодії лазерного випромінювання з органічними структурами біологічних об'єктів. Важливу роль у відображенні функціонального стану організму відіграє кров, а також її складові частини – формені елементи крові. Кількість, форма та концентрація клітин крові тісно пов'язані з функціональним станом організму. Таким чином, взаємодія лазерного випромінювання з клітинами крові, яка базується на пружному розсіюванні лазерного випромінювання складовими цільної крові, дає можливість отримати важливу діагностичну інформацію про стан організму людини.

Якщо пучок світла інтенсивністю  $I_0$  проходить через область, що містить в одиниці об'єму  $N$  частинок радіусом  $r_p$ , то інтенсивність пучка після проходження довжини  $l$  задається рівнянням

$$I_{\text{пр}}(l) = I_0 \exp(-\pi r_p^2 Q_0(r) N l), \quad (1)$$

де  $Q_0$  – фактор ефективності ослаблення світла для кожної частинки – функція розміру частинки, довжини хвилі й показника заломлення. Вираз  $I_0 \exp(-\pi r_p^2 Q_0 N l)$  визначає сумарну інтенсивність розсіяного світла на відстані  $l$ .

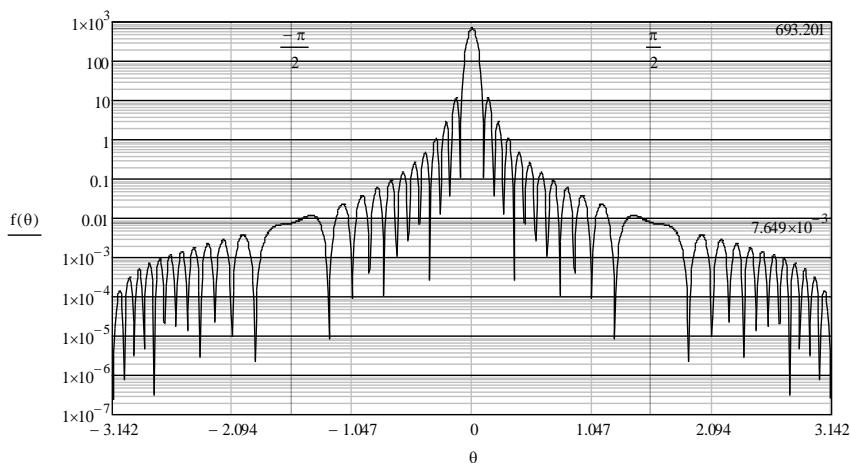


Рисунок 1. Індикатриса розсіювання еритроцита ( $d_{\text{сер}}=7,5\text{мкм}$ ) в декатрово-логарифмічній системі координат

Якщо  $Q_{01}$  – фактор ефективності ослаблення для частинок аерозолі при довжині хвилі  $\lambda_1$ , а  $Q_{02}$  – фактор ефективності ослаблення для тих же частинок при  $\lambda_2$ , то

$$\frac{Q_{01}}{Q_{02}} = \frac{\ln I_{01} - \ln I_{1\text{пр}}}{\ln I_{02} - \ln I_{2\text{пр}}}$$

Якщо виміряти інтенсивність світла, що пройшло, при двох довжинах

хвиль  $\lambda_1$  й  $\lambda_2$ , то можна визначити співвідношення  $Q_{o1}/Q_{o2}$ . Тому що  $q_1 = 2\pi r_p/\lambda_1, q_2 = 2\pi r_p/\lambda_2$  й  $q_1/q_2 = \lambda_1/\lambda_2$ . Радіус частинки визначається за формулою  $r_p = q_1\lambda_1/2\pi$ , або  $r_p = q_2\lambda_2/2\pi$ . Використовуючи коефіцієнти  $Q_o$  для  $n=1,20$ , можна побудувати криву  $Q_o = f(q)$  для різних показників заломлення [52]. Якщо її представити в логарифмічному масштабі, то можна визначити й розмір частинок. Результати моделювання представлені на рис. 1, 2.

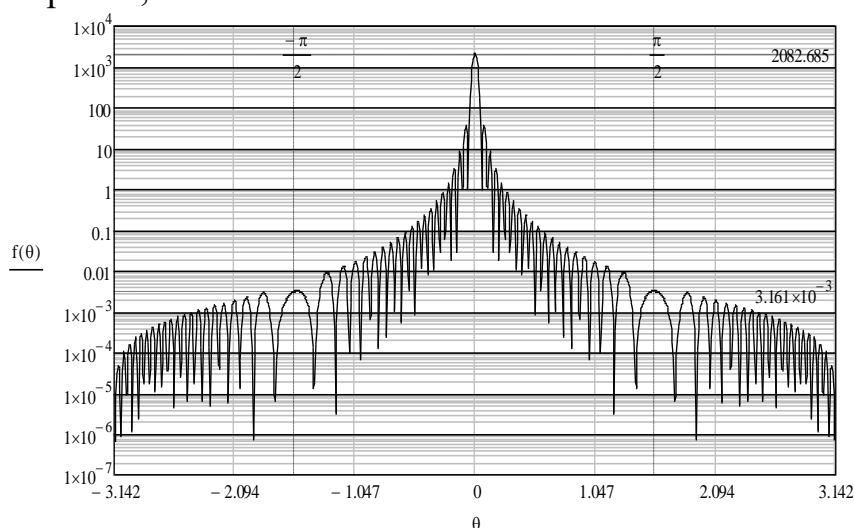


Рисунок 2. Індикатриса розсіювання нейтрофіла ( $d_{сер}=13\mu\text{км}$ ) в декатрово-логарифмічній системі координат

Для кожного виду частинок характерний свій діапазон значень головного пелюстка індикатрисы розсіювання, що розміщений симетрично, та кожний змодельований тип частинки має власну характерну форму цього пелюстка, а також простежується коливальна спадаюча залежність значення індикатрисы розсіювання від характеристичного діаметру частинки.

На основі проведених вимірювань були отримані сукупності графічних залежностей індикатрисы розсіювання від розміру частинки та кута сканування розсіяного випромінювання, що дозволяє говорити про можливе створення у майбутньому бази даних світлорозсіювання лазерного випромінювання при взаємодії з клітинами крові людини.

#### Перелік посилань

1. Suparno S, Aziz KN. 2024. In Depth Review on Light Scattering Techniques for Characterization of Protein, Polymer, Macromolecule, and Nanoparticle. *NanoWorld J* 10(2): 29-40, doi: 10.17756/nwj.2024-132.

#### Анотація

Отриманно сукупності графічних залежностей індикатрисы розсіювання від розміру частинки та кута сканування розсіяного випромінювання.

**Ключові слова:** лазер, індикатриса розсіювання, кров, еритроцит.

#### Abstract

Graphical dependences of the scattering indicatrix on the particle size and the scanning angle of the scattered radiation were obtained.

**Keywords:** laser, scattering indicatrix, blood, erythrocyte.

На отриманих графічних залежностях індикатрисы розсіювання на частинках крові можна виділити окремі області, які можуть бути використані для визначення типу частинок за видом графічної залежності.

## **ВИКОРИСТАННЯ ХМАРНИХ ОБЧИСЛЕНЬ ТА АЛГОРИТМІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ У ПЕРВИННІЙ ДІАГНОСТИЦІ ЗДОРОВ'Я ЗА ДОПОМОГОЮ ПОРТАТИВНИХ МЕДИЧНИХ ПРИСТРОЇВ**

*Коваленко І. Л.; Мовчанюк А. В., к.т.н., доц.*

*Радіотехнічний факультет КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна*

### **Актуальність теми доповіді**

У сучасній медицині хмарні обчислення та алгоритми штучного інтелекту (ШІ) відкривають нові можливості для пристроїв, що використовуються у первинній діагностиці. Компактні пристрої для моніторингу здоров'я дозволяють збирати великі обсяги даних у реальному часі. Застосування хмарних технологій для обробки цих даних, а також алгоритмів ШІ для їх аналізу, підвищує якість діагностики та моніторингу пацієнтів, відкриваючи новий рівень персоналізованої медицини.

### **Переваги хмарних обчислень та ШІ для медичних пристроїв**

Інтеграція хмарних обчислень та ШІ дозволяє ефективно опрацьовувати великі обсяги даних, зібраних медичними IoT-пристроями, забезпечуючи:

- Обчислення і первинний аналіз в хмарі, що знижує потребу у потужних процесорах на пристроях.
- Оперативний доступ до життєвих показників пацієнтів через обробку даних на основі алгоритмів ШІ, що сприяє швидкій діагностиці.
- Персоналізований моніторинг стану здоров'я, який враховує індивідуальні особливості пацієнта, завдяки алгоритмам машинного навчання.

### **Використання ШІ та хмарних технологій для віддаленого моніторингу**

Завдяки обчислювальним можливостям хмарних платформ та аналізу даних із залученням алгоритмів ШІ, віддалений моніторинг пацієнтів стає ще більш точним і ефективним, зокрема для хронічно хворих пацієнтів. Це дозволяє:

- В реальному часі передавати дані для подальшого аналізу за допомогою ШІ, що сприяє оперативній реакції на зміни у стані здоров'я.
- Забезпечувати безперервне спостереження без значного залучення лікаря, знижуючи витрати на медичне обслуговування.

### **Досвід використання хмарних обчислень та ШІ для моніторингу фертильності**

Одним із прикладів ефективного застосування хмарних обчислень та алгоритмів штучного інтелекту є інноваційний пристрій для моніторингу фертильності у жінок. Сучасний медичний пристрій, що використовує такі технології, дозволяє точно відстежувати періоди фертильності, ґрунтуючись на біологічних показниках користувача – рівнях вільних гормонів стероїдної групи естрогенів – естрадіолу, у висохлих зразках слини. Це



особливо важливо для жінок, які планують вагітність або мають труднощі з зачаттям, оскільки естрадіол чинить визначальний фемінізуючий вплив на жіночий організм і його флуктуації є важливим чинником репродуктивних процесів.

Під час овуляції структура кристалізації слини змінюється, утворюючи характерні форми, схожі на листя папороті, які можна точно визначити за допомогою алгоритмів ШІ. Даний процес носить назву фернінг – відкритий понад 70 років назад, добре досліджений та підтверджений клінічно. Але через складність використання мікроскопів у повсякденному житті і необхідність навичок розпізнання певних малюнків кристалізації, метод не набув популярності у користувачів.

Використання сучасного підходу IoT (Рисунок 1) для вирішення наведених вище проблем, дозволило створити простий і зручний для використання пристрій первинної діагностики: збір даних виконується автоматично, без участі користувача, за допомогою розробленої електронно-оптичної системи, надсилається на аналіз на хмарний сервіс, де алгоритми ШІ аналізують зображення зразку і надають зрозумілі результати користувачу у зручний для нього метод – повідомленням у месенджер, у мобільний застосунок чи у вигляді смс.

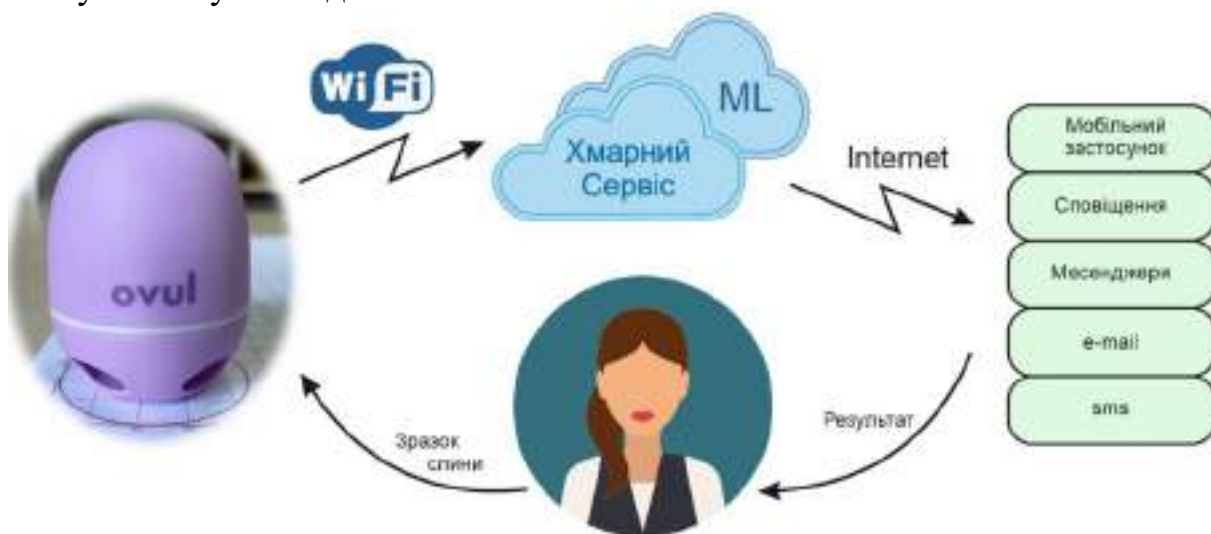


Рисунок 1. Структурна схема підходу IoT для первинної діагностики фертильного періоду

Основні етапи роботи пристрою та його компоненти:

**Збір даних:** Пристрій оснащений розробленою електронно-оптичною системою для аналізу слини, доповненою специфічною системою підсвітки зразку, що дозволяє виявляти наявність, форму та кількість кристалів, характерних для певних фаз менструального циклу.

**Первинна обробка даних:** Після отримання зображення сенсором, первинна обробка здійснюється локальним процесором – дані стискаються для зменшення обсягу перед відправкою в хмару. Це дозволяє значно скоротити обсяг даних і, відповідно, затрати на передачу, забезпечуючи водночас

високу швидкість і точність аналізу.

*Аналіз у хмарі:* Оброблені зображення надходять у хмарний сервіс, де алгоритми ШІ аналізують рівень кристалізації та інші показники. Використання хмарних обчислень дозволяє швидко і ефективно обробляти великі обсяги даних, застосовуючи алгоритми машинного навчання, які визначають рівень фертильності з точністю понад 96 %.

*Персоналізовані рекомендації та інформування користувача:* На основі отриманих даних користувачка отримує висновки про свій стан у зручний для неї спосіб — через мобільний додаток, сповіщення або електронну пошту. Інтерфейс дозволяє гнучко налаштовувати повідомлення, що забезпечує зручність використання та високий рівень комунікації з користувачами.

### **Висновки**

Застосування хмарних обчислень та алгоритмів ШІ значно розширює можливості медичних пристроїв, роблячи їх більш зручними для користувачів та ефективними у первинній діагностиці. Така інтеграція сприяє безперервному моніторингу стану здоров'я, швидкій діагностиці та персоналізованому підходу до лікування, що є важливим кроком до підвищення якості охорони здоров'я.

### **Перелік посилань**

1. Коваленко І. Л., Мовчанюк А.В., (2024). Використання підходу IoT як перспективний напрям розвитку первинної діагностики станів людини, XVIII Міжнародна науково-технічна конференція "Перспективи телекомунікацій" ПТ-2024: Збірник мат-ів конф-ії. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – с.232. ISSN 2664-3057.

2. Himanshu Verma, Naveen Chauhan, Lalit Kumar Awasthi, A Comprehensive review of 'Internet of Healthcare Things': Networking aspects, technologies, services, applications, challenges, and security concerns, Computer Science Review, Volume 50, 2023, 100591, ISSN 1574-0137.

3. C. O. Rolim, F. L. Koch, C. B. Westphall, J. Werner, A. Fracalossi and G. S. Salvador, "A Cloud Computing Solution for Patient's Data Collection in Health Care Institutions," 2010 Second International Conference on eHealth, Telemedicine, and Social Medicine, Saint Maarten, Netherlands Antilles, 2010, pp. 95-99, doi: 10.1109/eTELEMED.2010.19.

### **Анотація**

Сучасні технології хмарних обчислень та алгоритмів штучного інтелекту (ШІ) значно підвищують ефективність медичних пристроїв, які використовуються у первинній діагностиці. Доповідь розглядає використання даних технологій для створення компактного пристрою моніторингу фертильності, що поєднує оптичну систему з алгоритмами ШІ для точної оцінки фертильного вікна.

**Ключові слова:** хмарні обчислення, штучний інтелект, медичні пристрої, фертильність.

### **Abstract**

Modern cloud computing technologies and artificial intelligence algorithms are significantly increasing the efficiency of medical devices used in primary diagnostics. This report discusses the use of these technologies to create a compact fertility monitoring device that combines an optical system with AI algorithms to accurately estimate the fertile window.

**Keywords:** cloud computing, artificial intelligence, medical devices, fertility.

## **РОЗРОБКА МЕТОДУ ВИЯВЛЕННЯ КРОКІВ ЗА ДОПОМОГОЮ MEMS АКСЕЛЕРОМЕТРА ДЛЯ СИСТЕМ ОХОРОНИ ПЕРИМЕТРУ**

*Пархоменко Б. О.; Мовчанюк А. В., к.т.н., доц.  
Радіотехнічний факультет, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна*

### **Актуальність дослідження**

Системи охорони периметру стають дедалі актуальнішими у сфері безпеки, особливо в умовах необхідності оперативного виявлення сторонньої активності. Використання *MEMS* акселерометрів, таких як *LIS2DW12*, відкриває нові можливості для створення недорогих, автономних та енергоефективних сенсорів для виявлення кроків.

*MEMS* акселерометр було обрано для цієї задачі через його здатність зчитувати низькочастотні сигнали, що є важливим для реєстрації вібрацій від кроків. Окрім того, він характеризується низьким енергоспоживанням, що дозволяє використовувати його в автономних системах тривалий час. Простота відтворення цього сенсора та можливість його роботи в складних умовах, таких як значні температурні перепади або підвищена вологість, робить його перспективним вибором для охоронних систем.

Проте висока чутливість цих сенсорів до шуму суттєво ускладнює їх практичне застосування, особливо у випадках короткострокових сигналів, таких як кроки. У зв'язку з цим актуальним є дослідження методів обробки сигналів, які б дозволили підвищити точність виявлення при мінімальних обчислювальних витратах. Це дослідження спрямоване на подолання цих викликів та вдосконалення систем безпеки нового покоління.

### **Мета і завдання дослідження**

Метою дослідження є створення методу виявлення кроків за допомогою *MEMS* акселерометра, здатного забезпечувати високу точність в умовах високого рівня шуму, з мінімальними обчислювальними витратами.

### **Методологія**

Для дослідження було використано акселерометр *LIS2DW12*, розпаяний на плату *STEVAL-MKI179V1*, яка підключена до плати *STM32 NUCLEO-F401RE*. Програмування мікроконтролера виконувалося в середовищі *STM32CubeIDE*, що забезпечило зчитування значень акселерометра в одиницях *mg*. Акселерометр був налаштований для роботи в режимі чутливості *2g* та з частотою дискретизації *200 Гц*, що дозволяє отримувати дані з достатньою деталізацією для аналізу низькочастотних сигналів.

Зчитані дані оброблялися за допомогою *Python*. Для стабілізації сигналу було застосовано метод інтеграції, однак корисного сигналу візуально виявлено не було. Крім того, була використана полосова фільтрація для

виділення частот, характерних для кроків, але цей підхід також не дав результатів. Попередні результати вказують на необхідність подальшого вдосконалення методів обробки для виявлення корисних сигналів на фоні значного рівня шуму.

### **Результати дослідження**

1. *Виявлення сигналів на відстані:* Експериментально встановлено, що вібрації від кроків занадто малі, щоб бути помітними на відстані понад 2 метри. Це обмеження значно звужує можливості застосування акселерометра для охорони великих периметрів.

2. *Обробка сигналів і шум:* Полосова фільтрація, що використовувалася для зменшення шумів, виявилася недостатньою. Незважаючи на зниження частини шумів, залишається низькочастотна складова, яка ускладнює виділення корисного сигналу.

3. *Джерело шумів:* Природа шумів залишається нез'ясованою, оскільки жодних очевидних факторів, таких як механічні вібрації чи електромагнітні завади, виявлено не було. Це створює додаткові труднощі для точного аналізу та обробки даних.

4. *Обмеження методу:* Застосовані підходи поки не дозволяють ефективно виділяти корисний сигнал у присутності високого рівня шуму, що вказує на необхідність розробки нових підходів для обробки даних акселерометра.

### **Висновки**

Проведені дослідження виявили значні обмеження у використанні акселерометра LIS2DW12 для задач виявлення кроків у системах охорони периметру. Основною проблемою є низький рівень вібрації від кроків, яка не фіксується сенсором на відстанях. Крім того, існуючі методи обробки сигналу, такі як інтеграція та полосова фільтрація, виявилися недостатніми для повного придушення шумів і виділення корисного сигналу.

Нез'ясована природа шумів ускладнює їх компенсацію, що підкреслює необхідність подальших досліджень у цьому напрямку. Попри обмеження, результати можуть стати основою для вдосконалення методів обробки сигналів, зокрема шляхом впровадження більш складних алгоритмів фільтрації та підвищення чутливості сенсора.

Подальші дослідження спрямовуватимуться на розробку методів, які дозволять ефективно виявляти короткострокові сигнали навіть за умов високого рівня шуму, а також на адаптацію акселерометра до задач реального часу у складних умовах експлуатації.

#### Перелік посилань

1. STMicroelectronics. *LIS2DW12 MEMS Digital Output Motion Sensor: High-Performance Ultralow-Power 3-Axis Accelerometer*. Datasheet, September 2024. [Online]. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/lis2dw12.pdf>.
2. STMicroelectronics. *NUCLEO-F401RE: STM32 Nucleo-64 Development Board*. Data brief, Rev 19, June 2024. [Online]. Available: <https://www.st.com/en/product/nucleo-f401re>.
3. STMicroelectronics. *STM32 Nucleo-64 Boards (MB1136) User Manual, UM1724, Rev 14*. August 2020. Available online: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-f401re.html#documentation>.
4. Schumer, S. *Analysis of Human Footsteps Utilizing Multi-Axial Seismic Fusion*. Proceedings of ICASSP 2011, pp. 697-700.
5. Hou, Y., Jiao, R., & Yu, H. (2020). MEMS based Geophones and Seismometers. *Sensors and Actuators: A. Physical*.
6. Schumer, S. (2011). *Analysis of Human Footsteps Utilizing Multi-Axial Seismic Fusion*. Proceedings of ICASSP 2011, pp. 697-700.

#### Анотація

У роботі досліджено використання акселерометра LIS2DW12 для розробки методу виявлення кроків у системах охорони периметру. Проведений аналіз показав, що основною проблемою даного сенсора є високий рівень шуму, що ускладнює виявлення короткострокових відхилень сигналу. Для вирішення цієї проблеми було застосовано метод інтегрування сигналу, який дозволяє визначати середні відхилення на основі тривалих спостережень. Однак зазначено, що даний підхід не забезпечує достатньої чутливості для короткотривалих сигналів, таких як одиничні кроки. Представлені результати можуть стати основою для подальшого вдосконалення методів обробки сигналів із шумних сенсорів.

**Ключові слова:** виявлення кроків, MEMS акселерометр, LIS2DW12, інтегрування сигналу, шум сенсора, короткострокові відхилення, обробка сигналів.

#### Abstract

This study investigates the use of the LIS2DW12 accelerometer for developing a step detection method in perimeter security systems. The analysis revealed that the primary challenge of this sensor is its high noise level, which complicates the detection of short-term signal deviations. To address this issue, a signal integration method was applied, enabling the identification of average deviations over extended observation periods. However, it was noted that this approach lacks sufficient sensitivity for short-term signals, such as individual steps. The presented findings can serve as a foundation for further improvement of signal processing methods for noisy sensors.

**Keywords:** step detection, MEMS accelerometer, LIS2DW12, signal integration, sensor noise, short-term deviations, signal processing.

## **СТВОРЕННЯ УНІВЕРСАЛЬНОЇ НАЗЕМНОЇ РОБОТИЗОВАНОЇ ПЛАТФОРМИ**

*Педченко Н. М., PhD; Боряк Б. Р., к.т.н.; Лактіонов О. І., к.т.н.;  
Янко А. С., к.т.н., доц.*

*Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна*

Сучасні реалії війни, пов'язані з високими темпами розвитку технологій, динамічно ставлять нові завдання для конструкторів та науковців. Роботизовані платформи все активніше починають використовуватись на полі бою, але є тактико-технічні та конструктивні питання, які стримують процес їх масового застосування.

Роботизована платформа, для використання її на полі бою, повинна відповідати таким вимогам:

- висока прохідність;
- достатня для виконання поставлених завдань автономність;
- можливість працювати за різних кліматичних умов;
- налагоджена постійна система зв'язку;
- надійність.

На першому етапі дослідження, у 2024 році, вирішувалися питання моделювання конструкції та її прохідності по рельєфах різного типу. Для вирішення питання прохідності роботизованої платформи, запропоновано використати схему двоколісної платформи із хвостовим стабілізатором [1].

Бойовий досвід застосування розвідувальних наземних роботів такого типу Ізраїлем та Сполученими Штатами Америки, які першими застосували їх при виконанні бойових завдань [2], така конструкція має відносно не велику вагу та високу прохідність. Тому для виконання поставлених завдань на пересічній місцевості із складним рельєфом дана схема найбільш актуальна.

Враховуючи конструктивні особливості двоколісної схеми, роботизована платформа може виконувати, як роботу по до розвідці так і трансформуватися в дистанційно керовану турель. Роботизована платформа, виконана за двоколісною схемою є конструктивно простою, тому добре підходить для швидкого виготовлення, та масштабування виробництва.

Для підвищення автономності, платформу пропонується оснащувати гібридною силовою установкою. За попередніми підрахунками, гібридна силова установка дасть можливість підвищити час застосування роботизованої платформи майже на 45%. Також вона дасть змогу використовувати робота при різних кліматичних умовах та виконувати завдання при відсутній можливості заряджання акумуляторних батарей в польових умовах.

Одним із найважливіших параметрів застосування наземного роботизованого комплексу є постійний та надійний зв'язок з оператором. За умо-

ви оснащення роботизованої платформи стрілецькою зброєю, відповідальність за безперебійний зв'язок має бути на найвищому рівні.

Враховуючи реальний досвід застосування наземних роботів силами оборони України [3], доцільним є варіант створення ретрансляційної системи зв'язку з оператором. Це дасть можливість збільшити радіус дії роботизованого комплексу, не беручи до уваги навколишній рельєф, здійснювати управління на різних частотах, та додатково отримувати інформацію про місцевість, шляхи переміщення, та заздалегідь прокладати маршрути до заданої точки. Ретрансляційні антени пропонуються встановлюватися на носії безпілотної літакової типу, оснащені двигунами внутрішнього згорання. Безпілотики із силовою установкою такого типу мають можливість доволі довгий час знаходитись в повітрі та працювати при різних кліматичних умовах.

#### **Перелік посилань**

1. Моделювання базової конструкції робототехнічної платформи [Електронний ресурс] / Олександр ЛАКТИОНОВ [та ін.] // Measuring and computing devices in technological processes. – 2024. – № 3. – С. 95–99. – Режим доступу: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-79-13>
2. <https://sasgroup-asia.com/throwbot2/>
3. <https://www.forbes.com/sites/davidaxe/2024/09/19/ukraines-gun-armed-ground-robot-just-cleared-a-russian-trench-in-kursk/>

#### **Анотація**

Зараз як ніколи актуальним стає питання розробки простого за конструкцією, але ефективного на полі бою наземного роботизованого комплексу. Оптимальним варіантом може бути робот, який одночасно є розвідувальним та ударним. Проста конструкція платформи, виконана за двоколісною схемою, дозволить виконувати швидку збірку та легко масштабувати виробництво. Гібридна силова установка на борту робота дозволить виконувати завдання при різних кліматичних умовах, збільшити потужність та автономність конструкції.

**Ключові слова:** роботизована платформа, двоколісна схема, гібридна силова установка, ретрансляційна система.

#### **Abstract**

Now, more than ever, the issue of developing a simple in design, but effective on the battlefield ground robotic complex is becoming more relevant. The optimal option may be a robot that can be both reconnaissance and strike. The simple design of the platform, made according to a two-wheeled scheme, will allow for quick assembly and easy scale-up of production. The hybrid power plant on board the robot will allow performing tasks in different climatic conditions, increasing the power and autonomy of the structure.

**Keywords:** robotic platform, two-wheeled scheme, hybrid power plant, relay system

## ОСОБЛИВОСТІ ОБРОБКИ КАПНОГРАМ

*Пономарьов І. В.; Антипенко Р. В., к.т.н., доц.*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна*

Моніторинг стану пацієнта за допомогою капнографії наразі є одним з найбільш провідних способів діагностики стану дихальної системи пацієнта. Капнограф — пристрій, що вимірює парціальний тиск (концентрацію) діоксиду вуглецю у повітрі, що видихається пацієнтом, а також відображає зміну концентрації в часі (капнограма) [1].

За рівнем концентрації  $\text{CO}_2$  визначаються такі симптоми як гіпокапнія (концентрація  $\text{CO}_2$  нижче 37%) та гіперкапнія (концентрація  $\text{CO}_2$  вище 37%), а форма кривої капнограми вказує на супутні захворювання. На рис. 1 показані деякі капнограми пацієнтів [2].

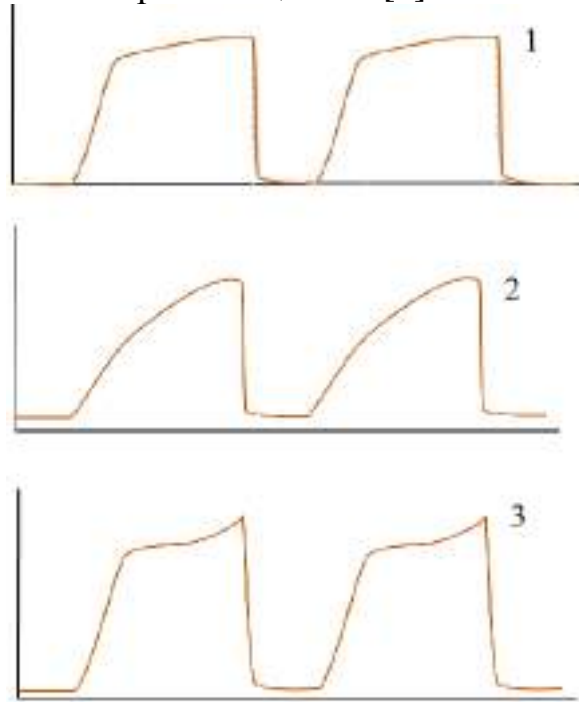


Рисунок 1. Приклади капнограм: 1 — варіант норми, 2 — пацієнт з бронхіальною астмою, 3 — пацієнт з вагітністю [1]

Для всіх капнограм можна виділити три фази видиху: початок видиху, фаза плато та кінець видиху. Для варіанту норми у фазах початку та кінця видиху спостерігається різка зміна концентрації  $\text{CO}_2$ , під час фази плато спостерігається невелике підвищення концентрації  $\text{CO}_2$ , також пікове значення в кінці фази плато становить приблизно 37%. Для пацієнтів з бронхіальною астмою фаза плато майже не спостерігається, при цьому у фазі початку видиху концентрація поступово підвищується, пікове значення концентрації зазвичай є меншим за 37%. Для вагітних у кінці фази плато спостерігається різке підвищення концентрації.



У ході проведення власних досліджень, за допомогою реального капнографа оптичного типу, було отримано криві для пацієнта без наявних порушень дихання, пацієнта з бронхіальною астмою та пацієнта з вагітністю. По отриманим кривим виявлено що, внаслідок низької частоти дискретизації (для дослідного капнографа приблизно 12-ть відліків на секунду), графіки є «ступінчатим» та отримати чітку криву при цьому не є можливим. На рис. 2 показані реальні капнограми для відповідних пацієнтів.

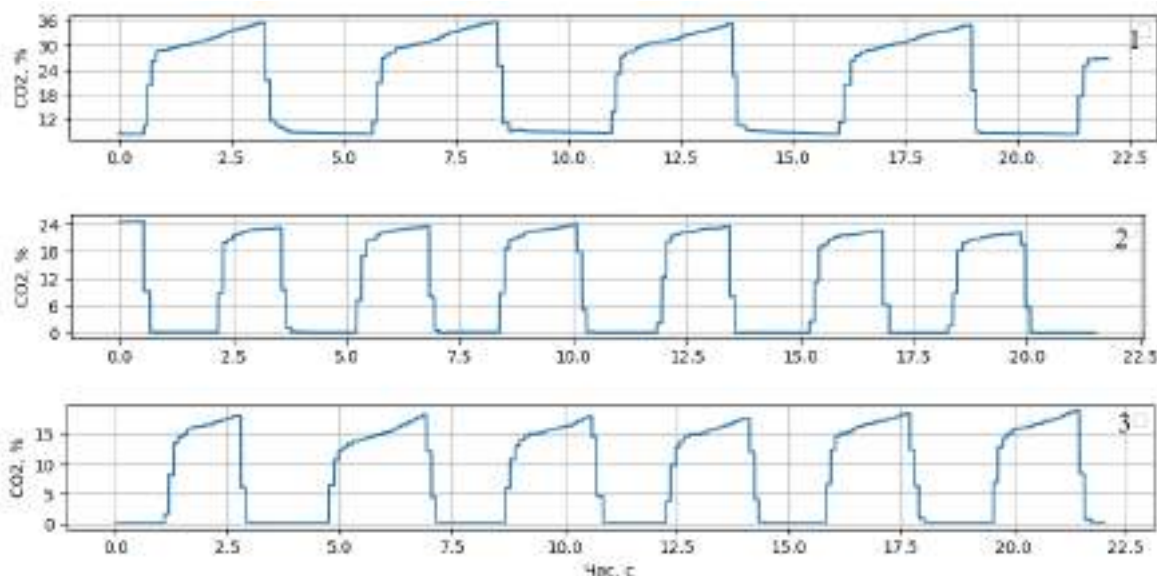


Рисунок 2. Приклади реальних капнограм: 1 — варіант норми, 2 — пацієнт з бронхіальною астмою, 3 — пацієнт з вагітністю

Ступінчата форма капнограм не дозволяє якісно оцінити стан пацієнта, для вирішення даної проблеми була використана додаткова фільтрація. Критеріями якісної фільтрації є збереження форми капнограми (оскільки важливі складові можуть мати невелику амплітуду та невеликий час відображення) та збереження пікових значень концентрації  $\text{CO}_2$  (оскільки дане значення вказує на стан дихальної системи). На рис. 3 показано досліджені способи фільтрації капнограм.

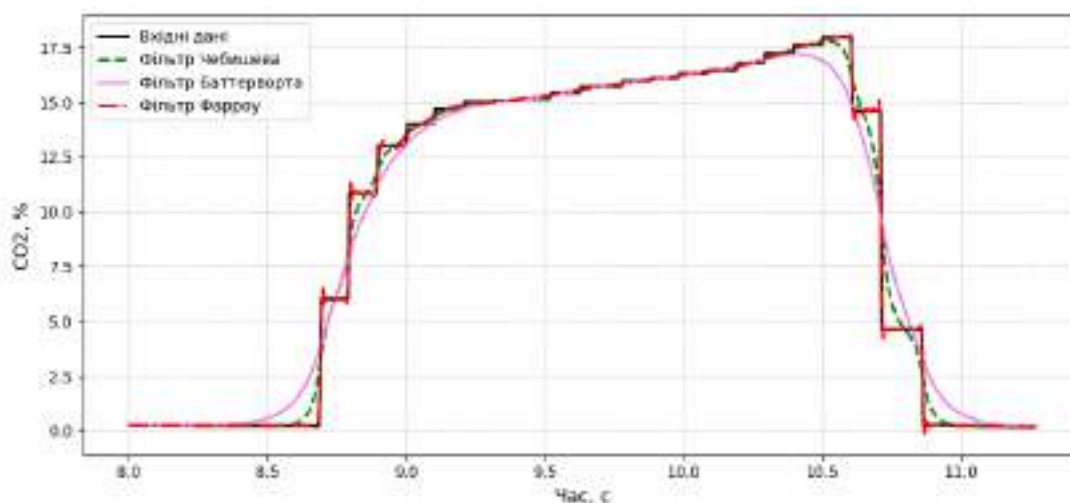


Рисунок 3. Фільтрація капнограм

Для дослідження якості фільтрації було використано три фільтри: фільтр Чебишева першого порядку, фільтр Баттерворта першого порядку та фільтр Фарроу на основі кубічної інтерполяції [3]. Обробка сигналів проводилась у програмному забезпеченні Python із встановленими бібліотеками «scipy signal» та «scipy interpolate».

В результаті дослідження, згідно з графіками вихідних кривих, визначено що фільтр Фарроу якісно виконує фільтрацію для областей з невеликою зміною концентрації CO<sub>2</sub> (у фазі плато), при цьому області з високою зміною концентрації (фази початку та кінця видиху) так само залишаються у вигляді «сходинок», форма сигналу при цьому в цілому зберігається та відображає пікове значення концентрації. Фільтр Баттерворта якісно виконує фільтрацію у всіх фазах видиху та майже зберігає форму сигналу, проте не зберігає пікове значення та характерний «зубець» для пацієнта з вагітністю в кінці видиху. Фільтр Чебишева якісно виконує фільтрацію у всіх фазах видиху зберігаючи при цьому форму сигналу з невисоким рівнем спотворень, а також зберігає пікове значення концентрації CO<sub>2</sub>.

Враховуючи дані фактори можна вважати фільтр Чебишева найбільш відповідним для вирішення даної проблеми. Фільтр Чебишева дозволяє отримати криву з мінімальним рівнем спотворень, збереженням форми капнограми та збереженням пікових значень концентрації діоксиду вуглецю. До недоліків дослідження можна віднести малу вибірку капнограм для різних пацієнтів, насамперед з іншими хворобами дихальної системи та капнограм з більш високою частотою дихання (для більших частот дихання дана фільтрація може дати більші спотворення).

#### **Перелік посилань**

1. Kerslake I. Uses of capnography in the critical care unit / I. Kerslake, F. Kelly. // *VJA Education*. – 2017. – №17. – С. 178–183.
2. Yartsev A. Abnormal capnography waveforms and their interpretation [Електронний ресурс] / Alex Yartsev. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://derangedphysiology.com/main/cicm-primary-exam/required-reading/respiratory-system/Chapter%205593/abnormal-capnography-waveforms-and-their-interpretation>.
3. Adjustable Fractional-Delay FIR Filters Using the Farrow Structure and Multirate Techniques / H.Johansson, O. Gustafsson, K. Johansson, L. Wanhammar. // *APCCAS 2006 - 2006 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems*. . – 2006. – С. 1055–1058.

#### **Анотація**

Розглянуто способи цифрової фільтрації капнограм зі збереженням пікових значень та форми сигналу за допомогою різних методів фільтрації на основі реальних даних пацієнтів.

**Ключові слова:** капнографія, цифрова обробка сигналів.

#### **Abstract**

The work examines the methods of digital filtering of capnograms with the preservation of peak values and waveforms using various filtering methods based on real patient data are considered.

**Keywords:** capnography, digital signal processing.

---

## АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК АВТОРІВ

Demchyna Y. O.	9	Лащевська Н. О.	77
Dubrovka F. F.	9	Ляуданський Д. Д.	32
Dudarek G. O.	59	Маленчик Т. В.	80
Kundelskyi P. V.	62	Мельник Т. Й.	35
Martyniuk S. Yev.	59	Мирончук О. Ю.	55
Melnyk V. V.	65	Мовчанюк А. В.	29, 104, 107
Nikitchuk A. V.	62, 65, 96	Набок Е. Р.	83
Антипенко Р. В.	42, 52, 112	Назаров І. С.	87
Богомолів М. Ф.	39	Неуймін О. С.	83
Божок Д. О.	99	Парфило І. О.	39
Борисенко А. О.	13	Парфьонов Г. В.	42
Борова Ю. О.	77	Пархоменко Б. О.	107
Боряк Б. Р.	110	Пащук І. В.	90
Броварник С. А.	68	Педченко Н. М.	110
Василенко Д. О.	23, 26	Площик А. С.	45
Гергіль Є. Є.	17	Політанський Р. Л.	45
Головня В. М.	102	Пономарьов І. В.	112
Головня Є. С.	102	Приходько І. О.	32, 77
Гончаров О. А.	20	Соколов К. А.	49
Горбачов Б. О.	23	Степанов М. М.	99
Домбровський М. З.	90	Сушко О. Ю.	17, 35
Євдокімов Д. О.	71	Табенський С. М.	74
Жук С. Я.	49, 80, 93	Терещенко Д. В.	52
Задорожний Г. С.	26	Цибровський О. М.	55
Зінгер Я. Л.	68, 71	Чесановський І. І.	74
Зіньковський Ю. Ф.	102	Чмельов В. О.	87
Катеринчук І. С.	74	Шпилька О. О.	20
Коваленко І. Л.	29, 104	Юрченко О. А.	93
Коротков С. С.	77	Янко А. С.	110
Лактіонов О. І.	110		

---

## РТПСАС – 2024

ХІІІ Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні проблеми, сигнали, апарати та системи». Київ, 27 – 28 листопада 2024 р.: матеріали конференції — Київ, 2024. — 116 с.

Комп'ютерна верстка В. М. Головня.

Підп. до друку \_\_\_\_\_ р. Формат 60x84 1/16.

Папір офс. Computer Modern

Спосіб друку — ризографічний. Ум. друк. арк. \_\_\_\_\_. Обл.-вид. арк. \_\_\_\_\_. Наклад \_\_\_\_ пр.

Зам. № \_\_\_\_\_

---

Видавництво «Політехніка» КПІ ім. Ігоря Сікорського

вул. Політехнічна, 14, корп. 15

м. Київ, 03056

тел. (044) 204-81-78