Міністерство освіти і науки України
Чорноморський національний університет імені Петра Могили

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Тогоєв Олексій Романович

УДК 004.67:612.1:004.312

ДИСЕРТАЦІЯ

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПОШУКУ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ПАРАМЕТРІВ WIFI-СИГНАЛУ

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія
Галузь знань 12 Інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ О. Р. Тогоєв

Науковий керівник Журавська Ірина Миколаївна, д-р техн. наук, професор

Миколаїв – 2025

АНОТАЦІЯ

Тогоєв О. Р. Методи та засоби пошуку та ідентифікації об’єктів на основі аналізу параметрів WiFi-сигналу**.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 123 Комп’ютерна інженерія. – Чорноморський національний університет імені Петра Могили, Миколаїв, 2025.

Дисертаційне дослідження спрямоване на вирішення науково-практичної проблеми удосконалення, створення та впровадження методів та засобів аналізу параметрів WiFi-сигналу з метою підвищення ефективності пошуку об’єктів та покращення якості їх ідентифікації

Метою дослідження є розвиток методів та засобів моніторингу середовища (приміщення) для виявлення та ідентифікації об’єктів на основі аналізу RSSI та CSI інформації про мережу Wi-Fi.

Об’єкт дослідження

Процес виявлення та ідентифікації об’єктів на основі аналізу сигналів WiFi-мережі.

Предмет дослідження

Методи та засоби пошуку та ідентифікації об’єктів на основі аналізу параметрів WiFi-сигналу.

Наукова новизна отриманих результатів:

– **вперше запропоновано** метод пошуку рухомих об’єктів як хостів бездротової мережі на основі мультиагентного підходу, що може бути використано для визначення черговості обслуговування та дозволяє прискорити на 11,2 % формування черги на обслуговування рухомих об’єктів на основі прослуховування трафіку бездротових мереж у приміщеннях корпоративної мережі;

– **удосконалено** метод ідентифікації матеріалів за інформацією про стан каналу (CSI) шляхом двоступеневої обробки (калібруванням фази та низькочастотною фільтрацією) та використанням критерія подібності $\geq 0{,}95$. Запропоновані зміни дали змогу підвищити точність розпізнавання металевих об’єктів на 14,38 % (з середнього базового рівня 77,62 % до 92 %) та збільшити точність визначення скляних об’єктів на 3,38 % (до 81 %), що підтверджується результатами 80 контрольних дослідів (8 класів × 10 вимірювань).

– **набули подальшого розвитку** методи багатокласової класифікації об’єктів за амплітудними та фазовими патернами CSI: розроблено експериментальну базу з восьми різнорідних матеріалів (метал, скло, тканина, пластик, сіль, борошно, картон, селітра) й доведено можливість коректної ідентифікації у 77,62 % випадків у середньому, при цьому для картону досягнуто 89 % успіху, а для селітри – 83 %, що демонструє стійкість підходу до об’єктів з близькими діелектричними властивостями.

Практичне значення отриманих результатів:

- розроблена процедура віддаленого моніторингу переміщення об’єктів бездротової корпоративної мережі на основі мультиагентного підходу з урахуванням багатостороннього характеру радіоканалу, що дозволяє підвищити точність виявлення об’єктів бездротової корпоративної мережі за рахунок обчислення характеристик сигналу (CSI) під час прямого зв’язку рухомих об’єктів (peer-to-peer), а також зв’язку через WiFi-точки доступу. Впроваджено в організацію навчального процесу в умовах воєнного стану та надзвичайних ситуації для НПП та здобувачів кафедри комп’ютерної інженерії ЧНУ ім. Петра Могили;

– реалізована можливість розбудови системи для моніторингу навколишнього середовища, ідентифікації змін та визначення параметрів об’єктів без потреби в додаткових датчиках чи камерах. Це сприяє заощадженню ресурсів та розширює горизонти використання технології Wi-Fi та WiFi-сніферів;

− методика та результати досліджень, проведених під час роботи над дисертацією, було використано при розробленні робочих програм і проведенні лекційних, практичних та лабораторних робіт з дисциплін «Комп'ютерні мережі», «Бездротові комп'ютерні мережі» та «Технології захисту інформації» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальностями 123 Комп'ютерна інженерія та 122 Комп'ютерні науки;

− практичну цінність мають комп'ютерні програми «Smart Monitor» та «Складання WiFi-мапи переміщення пацієнтів територією реабілітаційного центру», які дозволяють забезпечити оперативний та точний навігаційний супровід людей на території, охопленій бездротовою корпоративною мережею, за умови наявності у людей персональних гаджетів (Свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір відповідно № 107018 та № 107427).

Отримані результати дослідження мають вагоме прикладне значення у сфері автоматизованих систем аналізу сигналів Wi-Fi, моніторингу місцезнаходження об'єктів, персоналізованого позиціонування та стандартизації методів ідентифікації матеріалів і пристроїв. Розроблені підходи придатні для застосування в системах безконтактного моніторингу та безпеки, корпоративних WiFi-мережах, «розумних» просторах та платформах Інтернету речей (IoT), наукових дослідженнях, розробці інтелектуальних систем класифікації об'єктів, а також у навчальному процесі підготовки фахівців за спеціальністю Комп'ютерна інженерія.

Основні результати дисертаційної роботи впроваджено:

− у науково-дослідну роботу (надалі – НДР) ЧНУ ім. Петра Могили «Розробка модулів автоматизації бездротових приладів відновлення пост-інфарктних, пост-інсультних пацієнтів в індивідуальних умовах віддаленої реабілітації» (№ держ. реєстрації 0121U109898, 2021–2022 рр.), в якій здобувач брав участь як виконавець;

− у НДР ЧНУ ім. Петра Могили «Розроблення мобільних малогабаритних та стаціонарних бездротових приладів ранньої діагностики, профілактики, лікування та посттравматичних відновлень військово-цивільного застосування»

(№ держ. реєстрації 0119U100422, 2019–2020 рр.), в якій здобувач брав участь як виконавець;

– у навчальний процес за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти на кафедрі комп'ютерної інженерії Чорноморського національного університету імені Петра Могили при проведенні лекційних занять та лабораторних робіт з дисциплін «Бездротові комп'ютерні мережі», «Технології захисту інформації» українською мовою для низки спеціальностей галузі 12 Інформаційні технології.

За темою дисертаційного дослідження **опубліковано** 20 наукових праць, з них 2 статті – у періодичних наукових фахових виданнях України (кат. Б); 3 статті у періодичних наукових фахових виданнях, проіндексованих у наукометричних базах Scopus та Web of Science; 12 робіт апробаційного характеру у форматі тез доповідей на міжнародних та всеукраїнських конференціях (у т. ч. 2 праці проіндексовано у наукометричній базі Scopus). Додатково відображають наукові результати дисертації 1 стаття – в зарубіжному періодичному науковому виданні (OECP); 2 свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір.

Апробація результатів дисертації

Матеріали дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на науково-технічних конференціях та семінарах:

- CEUR Workshop Proceedings (Ukraine, Zaporizhzhia, 2019, 2020);
- Всеукраїнська науково-практична конференція «Могилянські читання» (Миколаїв, 2018, 2020, 2024);
- Міжнародна наукова конференція «Ольвійський форум: Стратегії країн Причорноморського регіону в геополітичному просторі» (Миколаїв, 2024);
- SWorld-Ger Conference on Future in the results of modern scientific research (Germany, Karlsruhe, 2024);
- Всеукраїнська науково-практична конференція «Актуальні завдання медичної, біологічної фізики та інформатики» (Вінниця, 2023);
- Всеукраїнська науково-практична конференція «Інтелектуальний потенціал» (Хмельницький, 2020);

– Всеукраїнська науково-практична конференція «Інтелектуальні інформаційні системи» (Миколаїв, 2019);

– Mezinárodní vědecko-praktická konference “Moderní vymoženosti vědy” (Česká republika, Praha, 2018);

– International Conference of European Academy of Science (Bundesrepublik Deutschland, Bonn, 2018).

У вступі обґрунтовано теми дослідження методів і засобів виявлення та ідентифікації об’єктів, показано взаємозв’язок дисертації з науково-дослідними проєктами, визначено та представлено мету й завдання роботи, описано об’єкт, предмет і застосовані методи, а також наведено відомості про наукову новизну та прикладне значення здобутих результатів. Додатково подано інформацію про особистий внесок автора та список публікацій, що відповідають темі дослідження.

Перший розділ дисертації присвячений аналізу сучасної ситуації щодо виявлення та ідентифікації об’єктів із застосуванням технології Wi-Fi. У ньому здійснений аналіз сучасного стану науково-практичної розробленості питання ідентифікації об’єктів з використанням Wi-Fi, викладено теоретичні основи виявлення та ідентифікації об’єктів у WiFi-мережі.

Визначено, що питання виявлення та ідентифікації об’єктів з використанням мережі Wi-Fi вивчається сьогодні у трьох напрямках: дослідження фізичних змін сигналу, розробка теоретичних моделей, розробка класичних та глибинних методів машинного навчання.

Другий розділ присвячено методам отримання та обробки даних про місцезнаходження й розпізнавання об’єктів у бездротових мережах. Розглянуто підходи до локалізації за допомогою WiFi-відбитків (RSSI Fingerprinting), що дозволяють визначати положення об’єктів у приміщеннях без використання GPS. Детально описано алгоритм k-найближчих сусідів (k-NN) для завдань позиціонування, а також переваги баєсівських моделей для роботи з невизначеностями та залежностями сигналів CSI. Окрему увагу приділено аналізу пакетів даних Wi-Fi і використанню технологій «сніфінгу»

для підвищення точності позиціонування, а також методам на основі моделювання поширення радіохвиль і системам RADAR. Підкреслено потенціал CSI (Channel State Information) як джерела унікальних характеристик для ідентифікації людей, пристроїв і навіть предметів у середовищі, що дозволяє створювати комплексні системи безконтактного моніторингу.

Третій розділ зосереджено на розробленні та дослідженні інструментів для реалізації експериментів з пошуку та ідентифікації об’єктів. Було запропоновано метод пошуку рухомих об’єктів як хостів бездротової мережі на основі мультиагентного підходу. Окремо обґрунтовано вибір мов програмування (Python для аналізу даних і побудови графічних інтерфейсів та C++ для роботи з апаратними компонентами ESP32) і бібліотек (Pandas, PyQt, routeros_api) для ефективної реалізації алгоритмів обробки сигналів та інтеграції з мережевим обладнанням. Проаналізовано апаратну базу – від точок доступу MikroTik для збору RSSI-даних до мікроконтролерів ESP32 для роботи з CSI – з наведенням технічних характеристик і порівнянь моделей. Визначено архітектуру майбутніх експериментів та алгоритми, що забезпечують поєднання даних із різних джерел у єдиній системі моніторингу.

У **четвертому** розділі описано реалізації експериментальної частини дослідження та аналізу отриманих результатів. Представлено розроблені експериментальні алгоритми, схеми збору даних та їхнє практичне застосування для оцінки ефективності підходів на основі RSSI та CSI.

Було удосконалено метод ідентифікації матеріалів за інформацією про стан каналів (CSI) шляхом двоступеневої обробки (калібруванням фази та низькочастотною фільтрацією) та використанням критерія подібності $\geq 0{,}95$.

Набули подальшого розвитку методи багатокласової класифікації об’єктів за амплітудними та фазовими патернами CSI: розроблено експериментальну базу з восьми різнорідних матеріалів. Проведено тестування розробленої системи на різних апаратних конфігураціях (MikroTik, ESP32), що дозволило оцінити точність, швидкодію та стійкість алгоритмів у реальних умовах. Окремо розглянуто порівняння отриманих результатів із класичними методами

позиціонування, а також визначено обмеження та потенційні напрями вдосконалення. На основі отриманих даних зроблено висновок про доцільність інтеграції кількох методів та подальший розвиток системи для практичного використання в реальному середовищі.

У **висновках** узагальнено ключові результати проведеного дослідження та визначено перспективні напрями подальшого вдосконалення методів і засобів виявлення та ідентифікації об’єктів. Розроблені підходи й алгоритми показали високу результативність у вирішенні завдань пошуку та ідентифікації, що підтверджує їх практичну цінність для впровадження у системи неінвазивного моніторингу. Застосування запропонованих методів сприяє підвищенню точності одержаних даних, скороченню часу обробки сигналів та автоматизації процесів оцінювання параметрів.

Ключові слова: *місцезнаходження та ідентифікації об’єктів, корпоративна мережа, інтерактивна комп’ютерна мережа, канали зв’язку, бездротова мережа, WiFi-сигнал, точка доступу, аналіз RSSI, аналіз CSI, моніторинг, віддалений доступ, дистанційний моніторинг процесів, контроль доступу, моделювання, комп’ютеризована система.*

ABSTRACT

Tohoiev O. R. Methods and means for searching and identifying objects based on the analysis of Wi-Fi signal parameters. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for obtaining the Doctor of Philosophy scientific degree in the specialty 123 Computer Engineering (branch of knowledge 12 – Information Technologies). – Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, 2025.

The PhD thesis is devoted to solving the scientific and applied problem of improving, developing, and implementing methods and tools for analyzing the parameters of the Wi-Fi signal to increase the efficiency of object search and improve the quality of their identification.

The research goal and objectives is the development of methods and means of monitoring the environment (premises) to detect and identify objects based on the analysis of RSSI and CSI information about the Wi-Fi network.

Object of research

The process of detecting and identifying objects based on the analysis of Wi-Fi signals.

Subject of research

Methods and tools for searching and identifying objects based on the analysis of Wi-Fi signal parameters.

Scientific novelty of the obtained results

For the first time:

– a wireless method for determining the location of moving objects as hosts of a wireless network based on a multi-agent approach, which can be used to determine the order of service and allows to accelerate the formation of a queue for moving objects by 11.2% based on listening to wireless network traffic in the premises of the corporate network.

Improved:

– a method for identifying materials based on channel state information (CSI) by two-stage processing (phase calibration and low-pass filtering) and using a similarity criterion of ≥ 0.95. The proposed changes made it possible to increase the accuracy of metal object recognition by 14.38% (from the average baseline level of 77.62% to 92%) and to increase the accuracy of glass object detection by 3.38% (up to 81%), which is confirmed by the results of 80 control experiments (8 classes × 10 measurements).

Have been developed further:

– methods of multi-class classification of objects by amplitude and phase patterns CSI: an experimental base of eight heterogeneous materials (metal, glass, fabric, plastic, salt, flour, cardboard, nitrate) was developed and the possibility of correct identification in 77.62% of cases on average was proved, with 89% success for cardboard and 83% for nitrate, which demonstrates the stability of the approach to objects with similar dielectric properties.

Practical significance of the obtained results:

– a procedure for remote monitoring of the movement of objects of a wireless corporate network based on a multi-agent approach, taking into account the multilateral nature of the radio channel, which allows to increase the accuracy of detecting objects of a wireless corporate network by calculating the characteristics of the signal (CSI) during direct communication of moving objects (peer-to-peer), as well as communication via Wi-Fi access points. Implemented in the organization of the educational process in martial law and emergency situations for research and teaching staff and students of the Department of Computer Engineering of the Petro Mohyla National University;

– the ability to develop a system for environmental monitoring, identifying changes and determining the parameters of objects without the need for additional sensors or cameras. This helps to save resources and expands the horizons of using Wi-Fi technology and Wi-Fi sniffers;

– the methodology and results of the research conducted during the work on the dissertation were used in the development of work programs and conducting lectures, practical and laboratory work in the disciplines “Computer Networks”, “Wireless Computer Networks” and “Information Security Technologies” for applicants for the first (bachelor’s) level of higher education in the specialties 123 Computer Engineering and 122 Computer Science (Appendix A);

– of practical value are the computer programs “Smart Monitor” and “Development a WiFi map of patients’ movement on the territory of the rehabilitation center”, which allow for prompt and accurate navigation support of people in the territory covered by the wireless corporate network, provided that people have personal gadgets (Certificate of Copyright Registration for the work No. 107018 and No. 107427, respectively).

The results of the dissertation are of significant practical importance in the field of automated systems for analyzing Wi-Fi signals, monitoring the location of objects, personalized positioning, and standardizing methods for identifying materials and devices. The proposed methods can be used in contactless monitoring and security systems, corporate Wi-Fi networks, smart spaces and Internet of Things (IoT) platforms, scientific research, development of intelligent object classification systems, as well as in the educational process of training specialists in computer engineering.

The main results of the PhD thesis have been implemented in:

– in the research work of the Petro Mohyla Black Sea National University “Development of automation modules for wireless recovery devices for post-infarction, post-stroke patients in individual conditions of remote rehabilitation” (state registration number 0121U109898, 2021–2022), in which the applicant participated as a performer;

– in the research work of the Petro Mohyla Black Sea National University “Development of mobile small-sized and stationary wireless devices for early diagnosis, prevention, treatment and post-traumatic recovery for military and civilian use” (State Registration No. 0119U100422, 2019–2020), in which the applicant participated as a performer;

– in the educational process at the first (bachelor's) level of higher education at the Department of Computer Engineering of Petro Mohyla Black Sea National University during lectures and laboratory work in the disciplines "Wireless Computer Networks", "Information Security Technologies" in Ukrainian for students of specialties in the field 12 Information Technology.

On the topic of the dissertation research, 20 scientific papers were published, including 2 articles in periodicals of scientific professional editions of Ukraine (Cat. B); 3 articles in periodicals of scientific professional editions indexed in the scientometric databases Scopus and Web of Science; 12 works of an approbation nature in the format of abstracts at international and all-Ukrainian conferences (including 2 works indexed in the scientometric database Scopus). Additionally, the scientific results of the dissertation are reflected in 1 article in a foreign periodical scientific publication (OECD); 2 certificates of copyright registration for the work.

The introduction substantiates the topics of research into methods and means of detecting and identifying objects, shows the connection between the dissertation and research projects, defines and presents the purpose and objectives of the work, describes the object, subject, and methods used, and provides information on the scientific novelty and applied significance of the results obtained. Additionally, information on the author's personal contribution and a list of publications relevant to the research topic are provided.

The first chapter of the thesis is devoted to the analysis of the current situation regarding the detection and identification of objects using Wi-Fi technology. It analyzes the current state of scientific and practical development of the issue of object identification using Wi-Fi, outlines the theoretical foundations of detection and identification of objects in a Wi-Fi network.

It is determined that the issue of detecting and identifying objects using Wi-Fi is being studied today in three areas: the study of physical signal changes, the development of theoretical models, and the development of classical and deep machine learning methods.

The second chapter is devoted to methods of obtaining and processing data on the location and recognition of objects in wireless networks. Approaches to localization using Wi-Fi fingerprints (RSSI Fingerprinting) are considered, which allow determining the position of objects in the premises without using GPS. The-k-nearest neighbors (k-NN) algorithm for positioning tasks is described in detail, as well as the advantages of Bayesian models for dealing with uncertainties and dependencies of CSI signals. Particular attention is paid to the analysis of Wi-Fi data packets and the use of "sniffing" technologies to improve positioning accuracy, as-well as methods based on modeling radio wave propagation and RADAR systems. The potential of CSI (Channel State Information) as a source of unique characteristics for identifying people, devices, and even objects in the environment is emphasized, which allows for the creation of integrated contactless monitoring systems.

The third chapter focuses on the development and research of tools for implementing experiments on object search and identification. The choice of programming languages (Python for data analysis and building graphical interfaces and C++ for working with ESP32 hardware components) and libraries (Pandas, PyQt, routeros_api) for the effective implementation of signal processing algorithms and integration with network equipment is separately justified. The hardware base – from MikroTik access points for collecting RSSI data to ESP32 microcontrollers for working with CSI – is analyzed, with technical characteristics and model comparisons. The architecture of future experiments and algorithms that combine data from different sources in a single monitoring system are defined.

A method for searching for moving objects as wireless network hosts based on a multi-agent approach was proposed.

The **fourth chapter** is devoted to the implementation of the experimental part of the study and the analysis of the results. We present the developed experimental algorithms, data collection schemes and their practical application to evaluate the effectiveness of RSSI and CSI-based approaches.

The method of identifying materials based on channel state information (CSI) was improved by two-stage processing (phase calibration and low-frequency filtering) and using a similarity criterion of ≥ 0.95.

Methods for multi-class classification of objects based on CSI amplitude and phase patterns were further developed: an experimental database of eight heterogeneous materials was developed.

The developed system was tested on different hardware configurations (MikroTik, ESP32), which allowed us to evaluate the accuracy, speed and stability of the algorithms in real conditions. A comparison of the obtained results with classical positioning methods is considered separately, and limitations and potential areas of improvement are identified. Based on the data obtained, it is concluded that it is expedient to integrate several methods and further develop the system for practical use in a real environment.

In the conclusions, summarize the main results of the study and identify promising areas for further improvement of methods and means of detecting and identifying objects.

The developed approaches and algorithms have shown high effectiveness in solving search and identification tasks, which confirms their practical value for implementation in non-invasive monitoring systems. The use of the proposed methods contributes to increasing the accuracy of the data obtained, reducing signal processing time, and automating parameter evaluation processes.

Keywords: *location and identification of objects, corporate network, interactive computer network, communication channels, wireless network, Wi-Fi signal, access point, analysis of RSSI, analysis of CSI, monitoring, remote access, remote process monitoring, access control, modeling, computerized system.*

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації та відповідають п. 8 Постанови КМУ від 12.01.2022 № 44

1. Tohoiev O. Determining the location of patients in remote rehabilitation by means of a wireless network. *ACTA IMEKO*. 2023. Vol. 12, No. 3. P. 1–5. DOI: 10.21014/actaimeko.v12i3.1495. **ISSN 2221-870X.** URL: https://acta.imeko.org/index.php/acta-imeko/issue/view/45 **Scopus (Q3)**

2. Burlachenko I. S., Savinov V. Yu., Tohoiev O. R., Zhuravska I. M. The cloud GNSS data fusion approach based on multi-agent authentication protocols' analysis in the corporate logistics management systems. *Radio Electronics, Computer Science,* Control [ed.: S. Subbotin]. 2021. Vol. 4. P. 95–105. DOI: 10.15588/1607-3274-2021-4-9. **ISSN 1607-3274. WoS ID: 000749681500009 (Q4)**

3. Тогоєв О. Р. Метод деанонімізації користувачів iOS через протокол AirDrop. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво* : наук. журн. / Луцьк. нац. техн. ун-т. 2022. Вип. 49. С. 12–17. DOI: 10.36910/6775-2524-0560-2022-49-02. **ISSN 2524-0552. кат. Б** URL: http://cit-journal.com.ua/index.php/cit/article/view/385 (дата звернення: 28.03.2023).

4. Бурлаченко І. С., Савінов В. Ю., Тогоєв О. Р. Мультиагентна система позиціонування рухомих об'єктів як хостів бездротової мережі. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2020. Т. 1, № 5 (288). С. 72–80. DOI: 10.31891/2307-5732-2020-289-5-72-80. **ISSN 2307-5732. кат. Б**

5. Tohoiev O., Burlachenko I., Zhuravska I., Savinov V. The monitoring system based on a multi-agent approach for moving objects positioning in wireless networks. *CEUR Workshop Proceedings* [ed.: S. Subbotin]. 2020. Vol. 2608. P. 79–90. DOI: https://doi.org/10.32782/cmis/2608-7. **ISSN 1613-0073**. URL: http://ceur-ws.org/Vol-2608/ (Last accessed: June 04, 2021). **Scopus EID: 2-s2.0-85085527044.**

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

– *матеріали конференцій, індексовані в наукометрічній базі Scopus*

6. Burlachenko I. S., Zhuravska I. M., Ukhan Y. O., Tohoiev O. R., Tiutiunyk Y. I. Multi-agent monitoring system for heat loss mapping of multi-story buildings. *CEUR Workshop Proc. Information-Communication Technologies & Embedded Systems (ICT&ES).* 2019. Vol. 2516. P. 218–225. **ISSN 1613-0073**. Available at http://ceur-ws.org/Vol-2516/ (Last accessed Apr. 19, 2021). **Scopus EID: 2-s2.0-85077180431.**

7. Zhuravska I., Musiyenko M., Tohoiev O. Development the heat leak detection method for hidden thermal objects by means the information-measuring computer system. *CEUR Workshop Proceedings* [eds.: D. Luengo, S. Subbotin, P. Arras, et al.]. 2019. Vol. 2353. P. 350–364. DOI: 10.32782/cmis/2353-28. **ISSN 1613-0073**. Available at URL: http://ceur-ws.org/Vol-2353/ (Last accessed May 18, 2021). **Scopus EID: 2-s2.0-85065465684**.

– *інші матеріали конференцій*

8. Тогоєв О. Р. Використання Postman для сніфінгу вебтрафіку. *Могилянські читання* – 2024 : тези доп. XXVII Всеукр. наук.-метод. конф. Миколаїв, 06–10 листоп. 2024 р. Миколаїв : Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили, 2024. С. 138–139. Відомості доступні також в Інтернеті URL: https://dspace.chmnu.edu.ua/jspui/handle/123456789/2507

9. Журавська І. М., Тогоєв О. Аналіз інформаційної безпеки та присутності людей у контрольованій зоні на основі прослуховування трафіку комп’ютерної мережі. *Future in the results of modern scientific research* : SWorld-Ger Conf. Proc., Aug. 30, 2024. No. gec34-00. P. 25–33. DOI: 10.30890/2709-1783.2024-34-00-015. URL: https://www.proconference.org/index.php/gec/article/view/gec34-00-015

10. Тогоєв О. Р. Засоби LTE-сніфінгу. *Ольвійський форум-2024: стратегії країн Причорноморського регіону в геополітичному просторі* : матеріали XXI Міжнар. наук. конф., м. Миколаїв, 20–23 червня 2024 р.

11. Тогоєв О. Р. Визначення місцеположення та моніторинг стану пацієнтів на віддаленій реабілітації засобами бездротових мереж. *Актуальні завдання медичної, біологічної фізики та інформатики* : матеріали II Всеукр. наук.-практ. конф., Вінниця, 07 квітня 2023 р. Вінниця : Вінниц. нац. техн. ун-т ім. М. І. Пирогова, 2023. С. 144–146.

12. Тогоєв О. Р. Особливості Private PSK (Pre-Shared Key). *Могилянські читання – 2020* : тези доп. XXIII Всеукр. наук.-метод. конф. Миколаїв, 16-20 листоп. 2020 р. Миколаїв : Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили, 2020. С. 58–60. Відомості доступні також в Інтернеті URL: https://dspace.chmnu.edu.ua/jspui/handle/123456789/405

13. Тогоєв О. Р. Організація захисту інфраструктури електронної комерції на базі протоколів DoT та DoH. *Інтелектуальний потенціал – 2020* : тези доп. Всеукр. наук.-практ. конф. Хмельницький, 9–10 листоп. 2020 р. Хмельницький : ПВНЗ УЕП, 2020. Ч. 1. С. 82–85.

14. Тогоєв О. Р. Система управління доступом до Wi-Fi мережі. *Інтелектуальні інформаційні системи :* тези доп. Всеукр. наук.-практ. конф., Миколаїв, 19–21 лютого 2019 р. / Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили. Миколаїв : ЧНУ ім. Петра Могили, 2019. С. 53–54.

15. Tohoiev O. Wi-Fi network access control system: analysis of existing security support technologies. *Moderní vymoženosti vědy –2019 :* Materiály XV Mezinárodní vědecko-praktická konference, Praha, 22–30 ledna 2019 r. Praha : Publishing House «Education and Science», 2019. Vol. 7. P. 54–55.

16. Tohoiev O. Wireless Security issues. *Third International conference of European Academy of Science* : Proceedings. Bonn, 20–30 Dec. 2018. P. 34–35. Available at: URL: https://www.academia.edu/38385979/ Third_International_Conference_of_European_Academy_of_Science/.

17. Тогоєв О. Р., Дворник О. В. Технологія підтримки безпеки в системі управління доступом до Wi-Fi мережі: аналіз існуючих технологій підтримки безпеки. *Могилянські читання – 2018* : тези доп. XXI Всеукр. наук.-метод. конф.,

Миколаїв, 14–16 листоп. 2018 р. / Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили. Миколаїв : ЧНУ ім. Петра Могили, 2018. С. 119–120.

Список публікацій, які додатково відображають наукові результати дисертації

18. Zhuravska I. M., Tohoiev O. R., Frych D. O. Objects' detection in the controlled area based on signal analysis using passive listening Wi-Fi network traffic. *Modern engineering and innovative technologies*. 2024. Is. 34, Part 1. P.-31-37. DOI: 10.30890/2567-5273.2024-34-00-064. **ISSN 2567-5273**. URL https://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit34-00-064

ОЕСР, Німеччина

19. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір 107018. «Комп'ютерна програма "Smart Monitor"» : комп'ютерна програма / К. О. Обухова, І. М. Журавська, О. Р. Тогоєв ; дата реєстр. 04.08.2021, Бюл. № 66.

20. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір 107427. Комп'ютерна програма «Комп'ютерна програма "Складання WiFi-мапи переміщення пацієнтів територією реабілітаційного центру"» : комп'ютерна програма / О. Р. Тогоєв, В. Д. Веселовський, О. В. Дворник, І. М. Журавська, К. О. Обухова, Є. О. Ухань ; дата реєстр. 17.08.2021, Бюл. № 66.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ANN	– Artificial Neural Network
AP	– Access Point
CNN	– Convolutional Neural Network
CSI	– Channel State Information
GMM	– Gaussian Mixture Model
GUI	– Graphical User Interface
IoT	– Internet of Things
LOS	– Line of Sight
MIMO	– Multiple-Input and Multiple-Output
NIC	– Network Interface Card
OFDM	– Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PCA	– Principal Component Analysis
RF	– Radio Frequency
RNN	– Recurrent Neural Network
RSSI	– Received Signal Strength Indication
SISO	– Single-Input and Singe-Output
STBC	– Space-Time Block Code
SSID	– Service Set Identifier
UART	– Universal Asynchronous Receiver-Transmitter

ВСТУП

Дисертаційна робота присвячена розв’язанню науково-прикладної задачі вдосконалення, розробки та впровадження методів та засобів аналізу параметрів WiFi-сигналу з метою підвищення ефективності пошуку об’єктів та покращення якості їх ідентифікації

Мета та завдання дослідження. є підвищення точності та надійності визначення місцезнаходження та ідентифікації об’єктів у WiFi-мережах шляхом розроблення та впровадження методів аналізу RSSI і CSI, алгоритмів машинного навчання та комплексних програмно-апаратних рішень.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

- **проаналізувати існуючі методи позиціонування у WiFi-мережах** (на основі RSSI, CSI, трилатерації, fingerprinting) та технології ідентифікації об’єктів, обґрунтувати вибір алгоритмічної бази та підходів до дослідження;
- **розробити моделі обробки сигналів Wi-Fi (RSSI та CSI)**, включаючи методи фільтрації шумів, зниження розмірності та виділення ключових ознак для задач позиціонування та ідентифікації;
- **створити алгоритми ідентифікації об’єктів на основі CSI** із використанням методів машинного навчання (k-NN, SVM, нейронні мережі) та оцінити їх ефективність у різних сценаріях використання;
- **розробити програмно-апаратний комплекс** для збору, обробки та візуалізації даних Wi-Fi, що поєднує ESP32, MikroTik та програмні модулі на Python/C++;
- **експериментально дослідити роботу розроблених методів та засобів** у реальних WiFi-мережах та оцінити точність ідентифікації об’єктів і стабільність позиціонування.

Об’єкт дослідження

Процес виявлення та ідентифікації об’єктів на основі аналізу сигналів WiFi-мережі.

Предмет дослідження

Методи та засоби пошуку та ідентифікації об’єктів на основі аналізу параметрів WiFi-сигналу.

Методи дослідження

Для вирішення визначених науково-прикладних завдань було застосовано різноманітні підходи, зокрема аналіз літературних джерел, методи алгоритмізації для створення алгоритмів та підбору відповідних інструментів, серед яких:

– **методи обробки даних**, зокрема стійкі до аномалій у значеннях сигналів RSSI та CSI, що дозволяють мінімізувати вплив викидів та шумових флуктуацій;

– **методи розпізнавання образів, машинного навчання та інтелектуального аналізу даних**, серед яких алгоритм k-найближчих сусідів (k-NN), Support Vector Machines, Random Forest, а також сучасні глибинні нейронні мережі для класифікації сигналів та ідентифікації об’єктів;

– **методи цифрової обробки сигналів** (зокрема середньозважені, медіанні) для зменшення шуму, калібрування фазових параметрів CSI.

– **вперше запропоновано** метод пошуку рухомих об’єктів як хостів бездротової мережі на основі мультиагентного підходу, що може бути використано для визначення черговості обслуговування та дозволяє прискорити на 11,2 % формування черги на обслуговування рухомих об’єктів на основі прослуховування трафіку бездротових мереж у приміщеннях корпоративної мережі;

– **удосконалено** метод ідентифікації матеріалів за інформацією про стан каналу (CSI) шляхом двоступеневої обробки (калібруванням фази та низькочастотною фільтрацією) та використанням критерія подібності $\geq 0{,}95$. Запропоновані зміни дали змогу підвищити точність розпізнавання металевих об’єктів на 14,38 % (з середнього базового рівня 77,62 % до 92 %) та збільшити точність визначення скляних об’єктів на 3,38 % (до 81 %), що підтверджується результатами 80 контрольних дослідів (8 класів × 10 вимірювань).

– **набули подальшого розвитку** методи багатокласової класифікації об’єктів за амплітудними та фазовими патернами CSI: розроблено експериментальну базу з восьми різнорідних матеріалів (селітра, метал, сіль, скло, тканина, борошно, пластик та картон) й доведено можливість коректної ідентифікації у 77,62 % випадків у середньому, при цьому для картону досягнуто 89 % успіху, а для селітри – 83 %, що демонструє стійкість підходу до об’єктів з близькими діелектричними властивостями.

Практичне значення отриманих результатів:

- розроблена процедура віддаленого моніторингу переміщення об’єктів бездротової корпоративної мережі на основі мультиагентного підходу з урахуванням багатостороннього характеру радіоканалу, що дозволяє підвищити точність виявлення об’єктів бездротової корпоративної мережі за рахунок обчислення характеристик сигналу (CSI) під час прямого зв’язку рухомих об’єктів (peer-to-peer), а також зв’язку через WiFi-точки доступу. Впроваджено в організацію навчального процесу в умовах воєнного стану та надзвичайних ситуації для НПП та здобувачів кафедри комп’ютерної інженерії ЧНУ ім. Петра Могили;

- реалізована можливість розбудови системи для моніторингу навколишнього середовища, ідентифікації змін та визначення параметрів об’єктів без потреби в додаткових датчиках чи камерах. Це сприяє заощадженню ресурсів та розширює горизонти використання технології Wi-Fi та WiFi-сніферів;

- методика та результати досліджень, проведених під час роботи над дисертацією, було використано при розробленні робочих програм і проведенні лекційних, практичних та лабораторних робіт з дисциплін «Комп’ютерні мережі», «Бездротові комп’ютерні мережі» та «Технології захисту інформації» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальностями 123 Комп’ютерна інженерія та 122 Комп’ютерні науки (додаток А);

- практичну цінність мають комп’ютерні програми «Smart Monitor» та «Складання WiFi-мапи переміщення пацієнтів територією реабілітаційного

центру», які дозволяють забезпечити оперативний та точний навігаційний супровід людей на території, охопленій бездротовою корпоративною мережею, за умови наявності у людей персональних гаджетів (Свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір відповідно № 107018 та № 107427).

Отримані результати дисертації мають значне прикладне значення для сфер автоматизованої обробки сигналів, аналізу даних і персоналізованих сервісів, зокрема у медицині, корпоративних WiFi-мережах та системах «розумного» середовища. Розроблені методи та створені прототипи можуть знаходити застосування у клінічній діагностиці, наукових дослідженнях, розробці інтелектуальних IoT-рішень, а також у навчальному процесі підготовки спеціалістів з комп'ютерної інженерії.

Основні результати дисертаційної роботи впроваджено:

– у науково-дослідну роботу (надалі – НДР) ЧНУ ім. Петра Могили «Розробка модулів автоматизації бездротових приладів відновлення пост-інфарктних, пост-інсультних пацієнтів в індивідуальних умовах віддаленої реабілітації» (№ держ. реєстрації 0121U109898, 2021–2022 рр.), в якій здобувач брав участь як виконавець (Акт впровадження від 16 січня 2023 р., додаток А);

- у НДР ЧНУ ім. Петра Могили «Розроблення мобільних малогабаритних та стаціонарних бездротових приладів ранньої діагностики, профілактики, лікування та посттравматичних відновлень військово-цивільного застосування» (№ держ. реєстрації 0119U100422, 2019–2020 рр.), в якій здобувач брав участь як виконавець (Акт впровадження від 18 січня 2021 р., додаток А);

- у навчальний процес за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти на кафедрі комп'ютерної інженерії Чорноморського національного університету імені Петра Могили при проведенні лекційних занять та лабораторних робіт з дисциплін «Бездротові комп'ютерні мережі», «Технології захисту інформації» українською мовою для низки спеціальностей галузі 12 Інформаційні технології (Акт впровадження від 27 червня 2025 р., додаток А).

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконувалася у відповідності до завдань таких наукових програм, планів, тем:

- науково-дослідної роботи (надалі – НДР) ЧНУ ім. Петра Могили «Розробка модулів автоматизації бездротових приладів відновлення пост-інфарктних, пост-інсультних пацієнтів в індивідуальних умовах віддаленої реабілітації» (№ держ. реєстрації 0121U109898, 2021–2022 рр.), в якій здобувач брав участь як виконавець;
- НДР ЧНУ ім. Петра Могили «Розроблення мобільних малогабаритних та стаціонарних бездротових приладів ранньої діагностики, профілактики, лікування та посттравматичних відновлень військово-цивільного застосування» (№ держ. реєстрації 0119U100422, 2019–2020 рр.), в якій здобувач брав участь як виконавець;
- «Інженерія даних як процеси виявлення, збору, реєстрації та подальшої обробки даних в рамках побудови апаратно-програмної інфраструктури даних» (№ держ. реєстрації 0125U000904, 2022–2029 рр.), в якій здобувач бере участь як виконавець.

Особистий внесок здобувача

Основний зміст роботи, всі теоретичні та практичні результати, висновки і дослідження, що представлено до захисту, одержані автором самостійно (додаток Д). Особисто здобувачеві належать наступні наукові результати:

- у роботі [2] здобувачем розроблено **методику визначення місцезнаходження пацієнтів** на базі WiFi-трафіку з використанням RSSI; описано проведені експерименти та створено прототип системи, що забезпечує позиціонування в умовах відсутності GPS;
- у роботі [4; 6] здобувачем створено **мультиагентну модель моніторингу рухомих об’єктів** у корпоративній мережі; автором запропоновано архітектуру комунікації агентів та алгоритм об’єднання даних з різних точок доступу;

– у роботах [5; 9; 18] здобувачем запропоновано **CSI-підхід до ідентифікації об'єктів**, проведено тестування CNN-моделі, яка забезпечила точність понад 97 % при розпізнаванні типів об'єктів;

– у роботі [7] здобувачем створено **програмне рішення** для збору та візуалізації даних витоку тепла для прихованих об'єктів за допомогою комп'ютеризованих систем;

– у роботі [19] здобувачем розроблено **алгоритм інтеграції RSSI-даних** із кількох точок доступу для визначення координат об'єкта, створено базову реалізацію «Smart Monitor»;

– у [20] здобувачем створено **програмні рішення** для збору та візуалізації даних Wi-Fi, інтегровано алгоритми класифікації (k-NN, Random Forest, CNN) і модулі попередньої обробки CSI.

Апробація результатів дисертації:

Матеріали дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на науково-технічних конференціях та семінарах:

- CEUR Workshop Proceedings (Ukraine, Zaporizhzhia, 2019, 2020);
- Всеукраїнська науково-практична конференція «Могилянські читання» (Миколаїв, 2018, 2020, 2024);
- Міжнародна наукова конференція «Ольвійський форум: Стратегії країн Причорноморського регіону в геополітичному просторі» (Миколаїв, 2024);
- SWorld-Ger Conference on Future in the results of modern scientific research (Germany, Karlsruhe, 2024);
- Всеукраїнська науково-практична конференція «Актуальні завдання медичної, біологічної фізики та інформатики» (Вінниця, 2023);
- Всеукраїнська науково-практична конференція «Інтелектуальний потенціал» (Хмельницький, 2020);
- Всеукраїнська науково-практична конференція «Інтелектуальні інформаційні системи» (Миколаїв, 2019);
- Mezinárodní vědecko-praktická konference "Moderní vymoženosti vědy" (Česká republika, Praha, 2018);

- International Conference of European Academy of Science (Bundesrepublik Deutschland, Bonn, 2018).

Публікації

За темою дисертаційного дослідження **опубліковано** 20 наукових праць, з них 2 статті – у періодичних наукових фахових виданнях України (кат. Б); 3 статті у періодичних наукових фахових виданнях, проіндексованих у наукометричних базах Scopus та Web of Science; 12 робіт апробаційного характеру у форматі тез доповідей на міжнародних та всеукраїнських конференціях (у т. ч. 2 праці проіндексовано у наукометричній базі Scopus). Додатково відображають наукові результати дисертації 1 стаття – в зарубіжному періодичному науковому виданні (OECP); 2 свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір.

Структура та обсяг дисертації

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел до кожного розділу та п’яти додатків. Основний зміст роботи викладено на 132 сторінках друкованого тексту, містить 27 рисунків та 15 таблиць. Список використаних джерел містить 101 найменування. Загальний обсяг роботи становить 167 сторінок.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Напрямки досліджень методів та засобів пошуку та ідентифікації об’єктів на основі аналізу параметрів WiFi-сигналу

Аналіз сучасного стану розробленості питання ідентифікації об’єктів з використанням мережі Wi-Fi дозволяє виділити три напрямки розвитку наукової думки з цього приводу, а саме: дослідження фізичних змін сигналу (RSSI, CSI, AoA, ToF); розробку теоретичних моделей (Fresnel, просторово-частотних); створення методів машинного навчання із поділом їх на класичні (k-NN, SVM, деревоподібні моделі, RF) та методи глибинного навчання (CNN, RNN/LSTM, GAN, трансформери) для розпізнавання руху, особистості, присутності за мінімальних даних.

Одним з провідних методів ідентифікації об’єктів науковці називають ультрафінгпринтинг (Device-free Wi-Fi fingerprinting / CSI). CSI (Channel State Information), який дозволяє виявляти найменші зміни в сигналі, спричинені переміщенням або присутністю людей й предметів. Переважно дослідження зосереджені на підвищенні ефективності ідентифікації людей.

У дослідженні [1] йдеться про можливості ідентифікації людини в приміщенні за допомогою сигналів WiFi. Підхід дослідників ґрунтується на спостереженні, що кожна людина має специфічні моделі впливу на навколишній сигнал Wi-Fi під час руху в приміщенні, враховуючи характеристики форми її тіла та моделі руху. Такий вплив можна відобразити за допомогою часових рядів інформації про стан каналу (CSI) Wi-Fi. Зокрема, для ідентифікації людини на основі форми хвилі CSI автори пропонують використовувати комбінацію методів аналізу головних компонентів (PCA), дискретного вейвлет-перетворення (DWT) та динамічного деформування часу (DTW).

В [2] дослідники запропонували систему Wi-Motion, яка використовує інформацію про амплітуду та фазу, отриману з послідовності CSI, для побудови

відповідних класифікаторів та об’єднує результати за допомогою стратегії комбінування, заснованої на апостеріорній ймовірності. За результатами авторів, Wi-Motion може розпізнавати шість видів людської діяльності із середньою точністю 98,4 %.

У [3] автори розглянули питання підвищення ефективності ідентифікації особи на основі зору через WiFi та 3D-ID. Науковці використали багатоканальні (MIMO) підходи та AoA-оцінку для побудови 3D-зображень людини у фізичному середовищі. Потім було застосовано глибоке навчання для оцифрування візуалізації людини у 3D-зображення тіла та вилучення як статичної форми тіла, так і динамічних моделей ходьби для ефективної ідентифікації особи. Автори брали до уваги і надійність системи, зробивши її стійкою до атак.

В [4] здійснено комплексне дослідження наукових розробок в галузі ідентифікації людини на основі Wi-Fi за допомогою машинного навчання, описуючи перехід від RSSI до CSI з підтримкою ML та DL (SVM, CNN, RNN/LSTM, трансформери та GAN). Науковці також описують моделі ML, що використовуються для ідентифікації людини, системи та методи ідентифікації людини на основі Wi-Fi. У полі зору дослідників і майбутні тенденції щодо ідентифікації людини за допомогою бездротових сигналів.

В [5] досліджено ефективність технології ідентифікації LOS/NLOS на основі інформації про просторово-частотний домен сигналу Wi-Fi. Автори аналізують характеристики сигналу в частотно-просторовій області (AoA + ToF) для розпізнавання LOS/NLOS конфігурацій, пропонуючи використовувати інформацію про стан каналу в просторово-частотному домені для встановлення спільного розподілу кута приходу та часу польоту сигналу Wi-Fi, а також вилучення ознак з його оцінених результатів кластеризації для завершення ідентифікації поза прямою видимістю. Запропонований ними метод демонструє стійкість до середовищ LOS та NLOS у статичних сценаріях.

Яньчжао Ван, Чунді Сю, Сюаньлі Чжан та Дункай Ян досліджували питання локалізація Wi-Fi у приміщенні на основі відбитків CSI.

Вони запропонували так званий метод локалізації «відбитків пальців випадкового лісу» (RFFP) [30] з використанням інформації про стан каналу (CSI), який використовує модель випадкового лісу, відповідно навчену на офлайн-стадії, щоб заощадити місце в пам’яті та мати хороші характеристики проти багатопроменевості. На основі серії різноманітних експериментів встановлено, що порівняно з іншими алгоритмами, включаючи *K*-найближчих сусідів (KNN), зважених *K*-найближчих сусідів (WKNN), REPTree, CART та J48, метод RFFP забезпечує набагато більшу точність класифікації, а також нижчу середню похибку визначення місцезнаходження. Автори показали, що метод RFFP має високу комплексну продуктивність, включаючи точність, надійність, низьке робоче навантаження та кращий захист від багатопроменевих згасань [1].

В оглядовому дослідженні [7] методів позиціювання в приміщенні на основі Wi-Fi, автори розділяють їх на методи активного і пасивного позиціювання залежно від того, чи ціль має певні пристрої. Також вони аналізують проблеми та тенденції розвитку сучасного технологічного середовища.

У роботі [8] досліджено питання ідентифікації людини без використання пристроїв за допомогою поведінкових сигнатур у WiFi-сенсориці. Вони пропонують два підходи розв’язання проблеми: з опорою на модель (Model-based) (Fresnel’s zone, фізична модель, як у WiFall [29], RT-Fall [31] тощо) та з опорою на дані про рух (Data-driven**)** (CNN, LSTM, GAN, трансформери) – для витягу маркерів руху, ідентифікації, локалізації. У підсумку, дослідники пропонують нову безпристроєву біометричну (DFB) систему WirelessID [32], яка досліджує поведінку людини та фізичні сигнатури тіла, вбудовані в інформацію про стан каналу (CSI), шляхом вилучення просторово-часових ознак. Автори доводять, що коливання сигналу, які відповідають різним частинам тіла, по-різному впливають на ефективність ідентифікації та вводять в систему функцію просторово-часової уваги.

В дослідженні [9] йдеться про проблему розпізнавання людської активності на основі Wi-Fi через стіну з використанням глибокого навчання.

У роботі пропонується метод досягнення високоточної бездротової сигналізації на основі розпізнавання поведінки CSI шляхом відображення прогнозів крізь стіну та ширшого кута за допомогою сигналів Wi-Fi. Метод використовує MIMO для використання багатопроменевого поширення та збільшення можливостей антен передачі та прийому сигналу. Для покращення вилучення ознак з даних амплітуди в приміщенні застосовуються методи попередньої обробки, засновані на CSI. Крім того, для класифікації випадків активності в приміщенні використовується алгоритм глибокого навчання на основі RNN з алгоритмом LSTM, що досягає точності до 97,5 % у класифікації семи видів діяльності.

Дослідники в [10] здійснюють комплексне дослідження щодо WiFi-сенсорики для розпізнавання особистості людини. Автори підсумовують та аналізують дослідження технології WiFi-сенсорики в розпізнаванні особистості людини, а саме: розглянуто історію технології WiFi-сенсорики, здійснено порівняння її з традиційними технологіями розпізнавання особи та іншими бездротовими технологіями сенсорного зондування, а також виділено її переваги для розпізнавання особи. В публікації представлено етапи процесу WiFi-сенсорики (збір і попередню обробку даних, вилучення ознак, класифікація особи), розглянуто сучасні підходи з використанням WiFi-сенсорики для розпізнавання особи (однієї та кількох цілей), представлено та проаналізовано три види підходів (на основі шаблонів, моделей та глибокого навчання) для розпізнавання однієї цілі та два види підходів (пряме розпізнавання та розділене розпізнавання) для розпізнавання кількох цілей. Нарешті, обговорюються майбутні напрямки досліджень, які включають трансферне навчання, покращене розпізнавання кількох цілей та побудову уніфікованого набору даних.

Отже, вивчення наукових джерел дозволяє зробити висновок, що інтерес дослідників сконцентрована передусім на використанні сучасних неінвазивних бездротових технологій в ідентифікації та локалізації людини або групи людей. Досягнення в цій сфері, безперечно, мають найширший спектр застосувань від економіки й логістики до сфери безпеки. Тому наше дослідження буде спрямоване як на пошук ефективних методів локалізації об’єктів (та суб’єктів) у

просторі приміщення в статиці та динаміці (трекінг), так і на розробку ефективних методів ідентифікації об’єктів та матеріалів.

1.2 Теоретичні засади виявлення об’єктів у WiFi-мережі

1.2.1 Інформація про стан каналу

Інформація про стан каналу (англ. Channel State Information, CSI) – це набір даних, що характеризують властивості середовища, в якому поширюються радіохвилі у бездротових мережах. У контексті Wi-Fi така інформація містить точні параметри сигналів, зокрема амплітуду і фазу, що фіксуються на різних піддіапазонах технології OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [11; 33]. Завдяки цим даним можливо визначити присутність об’єктів у зоні дії мережі, а також відстежувати їхнє переміщення.

У типовій структурі CSI-системи на основі Wi-Fi можна виокремити кілька ключових елементів:

1) точки доступу (Access Points, APs) – обладнання, що забезпечує підключення бездротових пристроїв до мережі та водночас фіксує параметри сигналів;

2) кінцеві пристрої – смартфони, ноутбуки чи інша техніка, що взаємодіє з точками доступу і може брати участь у зборі CSI-інформації;

3) передавальне середовище – канал, у якому відбувається передача сигналів між точками доступу та клієнтами.

Робота CSI у Wi-Fi базується на спостереженні за тим, як радіохвилі поширюються у просторі. Під час передачі сигналу від точки доступу частина хвиль відбивається від різних перешкод – наприклад, стін, меблів або людей. Через це сигнал доходить до приймача по декількох траєкторіях, викликаючи інтерференцію. У результаті відбуваються зміни параметрів сигналу (амплітуди та фази) на кожному з підканалів OFDM [12; 34]. Такі зміни є унікальними для конкретного простору та залежать від розміщення й властивостей об’єктів, які в ньому присутні.

CSI надає інформацію про фазу й амплітуду сигналів для кожного окремого підканалу OFDM, що дозволяє з високою точністю аналізувати особливості середовища з багатьма шляхами проходження сигналу. Такі дані дають змогу виявляти наявність об’єктів і відстежувати їх пересування в межах дії Wi-Fi, ґрунтуючись на змінах у зафіксованих параметрах [13].

Щоб отримати CSI, застосовують спеціалізоване програмне забезпечення та драйвери, наприклад, Linux 802.11n CSI Tool [14]. Ці інструменти забезпечують доступ до детальної інформації про канал зв’язку в бездротових мережах, що функціонують на основі стандартів 802.11n і 802.11ac (рис. 1.1).

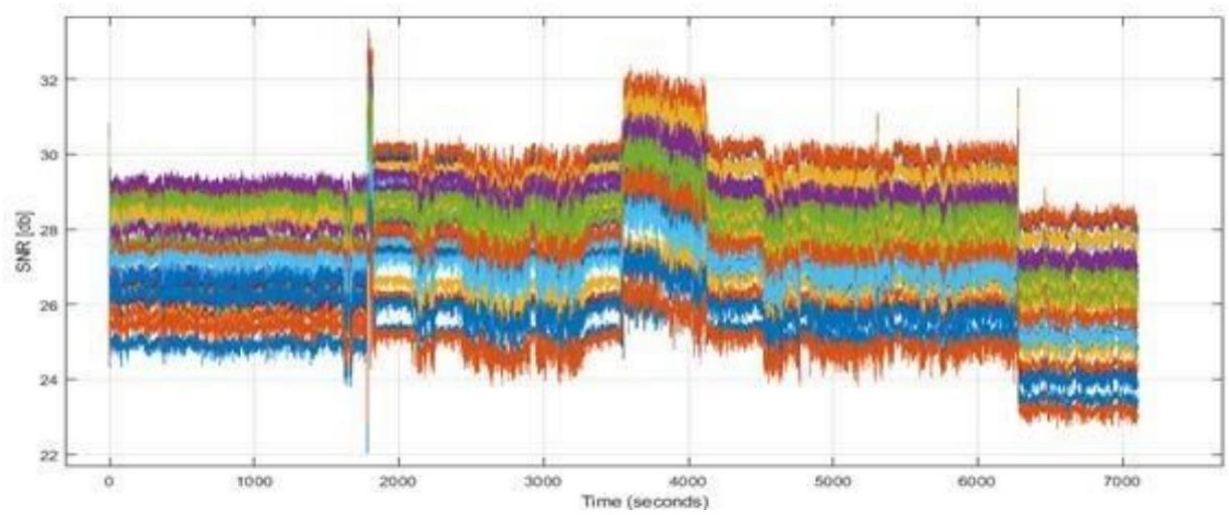


Рисунок 1.1 – Графік відношення сигнал/шум CSI [3]

Використання CSI уможливлює створення нових систем та застосунків, які працюють на базі Wi-Fi. Окрім виявлення об’єктів і їх руху, ці дані можна застосовувати для ідентифікації рухових дій [15], відстеження просторового переміщення [16], а також визначення розташування пристроїв [17] та інших подібних завдань.

Втім, у роботі з CSI виникають певні труднощі. Зокрема, зміни в навколишньому середовищі або наявність перешкод можуть впливати на точність результатів і викликати помилки. До того ж, обробка великого обсягу зібраних даних потребує значних обчислювальних ресурсів.

1.2.2 Використання RSSI для спостереження за об’єктами

У бездротових мережах одним із головних параметрів, який можна швидко отримати, є RSSI (Received Signal Strength Indicator) – показник рівня сили сигналу, що надходить від передавального пристрою до приймача. Цей параметр широко застосовується в задачах, пов’язаних із визначенням присутності об’єктів та спостереженням за змінами в середовищі.

RSSI не вимірюється в абсолютних фізичних одиницях, таких як вати, а подається у відносному вигляді – як умовні одиниці або відсотки. Його значення залежить від просторової відстані між джерелом сигналу та приймачем: чим більша ця відстань, тим слабшим стає сигнал через природне загасання в середовищі. Додатково, на цей показник впливають перешкоди – наприклад, стіни, предмети меблів, тіла людей чи інші джерела радіосигналів, які працюють на близьких частотах.

Сигнали в просторі втрачають силу відповідно до законів поширення радіохвиль. В умовах ідеального (вільного) простору інтенсивність сигналу зменшується пропорційно до квадрата відстані – це так звана модель поширення у вільному середовищі. Проте в реальних умовах з’являються додаткові явища, як-от відбиття, розсіювання та інтерференція, що ускладнюють прогнозування загасання сигналу.

Сучасні бездротові пристрої, включно з точками доступу Wi-Fi та різними типами клієнтського обладнання, здатні визначати RSSI. Водночас варто враховувати, що значення можуть відрізнятися залежно від моделі або виробника через технічні особливості вимірювання. У деяких випадках RSSI подається у децибелах відносно одного мілівата (dBm), що дозволяє здійснювати коректне порівняння між різними пристроями.

Зміни в RSSI можуть свідчити про появу або переміщення об’єктів у зоні дії мережі, що робить цей параметр придатним для низки практичних сценаріїв:

- **виявлення об’єктів у просторі.** Різке коливання RSSI може свідчити про те, що в межах покриття з’явився новий об’єкт;

- **аналіз руху**. Вивчаючи, як змінюється RSSI з часом і в різних місцях, можна встановити напрямок і характер переміщення об’єктів у межах дії мережі;
- **визначення розташування**. Завдяки методам подібно до трилатерації або фінгерпринтингу можливо оцінити приблизне положення об’єкта, використовуючи вимірювання сигналу з кількох джерел;
- **розрізнення типів об’єктів**. Оскільки різні матеріали та форми по-різному впливають на поведінку сигналу, аналіз змін RSSI дозволяє ідентифікувати об’єкти за їх характерним впливом на сигнал.

Попри те, що RSSI є корисним інструментом для аналізу присутності об’єктів, його застосування супроводжується рядом обмежень, які необхідно враховувати:

- **вплив навколишнього середовища.** Такі фактори, як наявність перешкод, ефекти багатопроменевого поширення сигналу та інші зовнішні умови можуть спотворювати результати, що ускладнює їх правильну інтерпретацію;
- **обмежена точність позиціювання.** Використання одного лише RSSI для визначення координат дає лише орієнтовні результати. Тому на початкових етапах досліджень доцільно попередньо фіксувати відстань до об’єкта;
- **відмінності між пристроями.** Показники RSSI можуть варіюватися залежно від виробника чи конкретної моделі обладнання, що ускладнює уніфікацію результатів та їх порівняння;
- **змінність умов.** Динамічні зміни в обстановці, наприклад переміщення людей або предметів, впливають на значення сигналу, тому система потребує регулярного оновлення налаштувань або адаптації.

Щоб зменшити вплив зазначених обмежень, використовують додаткові підходи, зокрема алгоритми машинного навчання, методи попередньої обробки даних, поєднання кількох параметрів (наприклад, RSSI разом із часовими характеристиками), а також інтеграцію з іншими сенсорами. Окрім цього для того щоб здійснювати RSSI виміри не потрібно бути підключеним до WiFi-

мережі як в [18; 27], однак наші виміри працюють на найнижчому рівні моделі OSI, а саме на 1, він же фізичний рівень.

Загалом RSSI залишається доступним і практичним інструментом для виявлення об’єктів, спостереження за переміщенням і оцінки розташування в межах WiFi-мереж. Хоча цей показник має певні вади, за умови правильного підходу до аналізу та обробки інформації, він може стати основою для створення ефективних рішень у сфері бездротового моніторингу. Розуміння його специфіки та лімітів є вкрай важливим для створення надійних та точних систем..

1.2.3 Застосування антенних конфігурацій SISO та MIMO з метою виявлення об’єктів

У WiFi-мережах передача та прийом сигналів здійснюється з використанням різних антенних конфігурацій. Основними серед них є технології MIMO та SISO, які мають важливе значення для систем, що працюють з CSI-даними з метою виявлення об’єктів.

SISO – це базова антена конфігурація, де одна антена виконує функцію передавача, а інша – приймача. Вона часто застосовується у системах, що аналізують CSI, завдяки ряду переваг:

- **простота реалізації.** Відсутність потреби у складних антенних системах і алгоритмах управління сигналом робить таке рішення легким у реалізації та фінансово доступним;
- **достатній рівень деталізації.** Для задач, пов’язаних з аналізом руху та присутності, важлива якість інформації про фазу і амплітуду сигналу. Навіть SISO може забезпечити необхідну точність цих даних;
- **менше ускладнень через багатопроменевість.** У певних умовах велика кількість відбиттів сигналу, характерна для MIMO, може ускладнювати обробку. У випадку SISO модель розповсюдження сигналу простіша.

Втім, у SISO є певні обмеження стосовно дальності дії та стійкості до завад, особливо в умовах великих або перевантажених перешкодами просторів.

На відміну від цього, MIMO – це більш прогресивна технологія, що передбачає одночасне використання кількох антен для передавання й приймання сигналу. Такий підхід дає змогу істотно збільшити пропускну здатність та ефективність передавання завдяки паралельному використанню багатьох шляхів поширення. У межах CSI-аналізу ця технологія надає переваги:

– **краща якість зв'язку.** Додаткові антени створюють можливість отримання детальнішої інформації про навколишній простір, що позитивно впливає на виявлення об'єктів;

– **покриття.** Більш ефективне проникнення сигналу через перепони і розширення зони дії особливо важливі у складних середовищах;

– **завадостійкість.** Завдяки використанню кількох каналів передавання система здатна краще протистояти перешкодам.

Втім, MIMO-системи вимагають складнішого апаратного забезпечення[35], включаючи багатокомпонентні антени та високопродуктивну обробку даних, що збільшує витрати на реалізацію.

1.2.4 Використання технології OFDM для побудування CSI-матриці

Однією з головних причин використання CSI є підтримка високої якості передавання даних. У стандарті 802.11n застосовується технологія OFDM (ортогональне частотне мультиплексування), що дає змогу передавати інформацію через кілька підканалів одночасно, використовуючи множинні антени як на стороні передавання, так і приймання сигналу (рис. 1.2).

На стабільність та якість з'єднання між передавачем і приймачем впливають різні фактори, зокрема загасання сигналу, втрати на відстані та явища розсіювання. Для точного оцінювання цих параметрів застосовують показник CSI, що дає змогу отримувати інформацію про стан кожного підканалу для всіх пар антен.

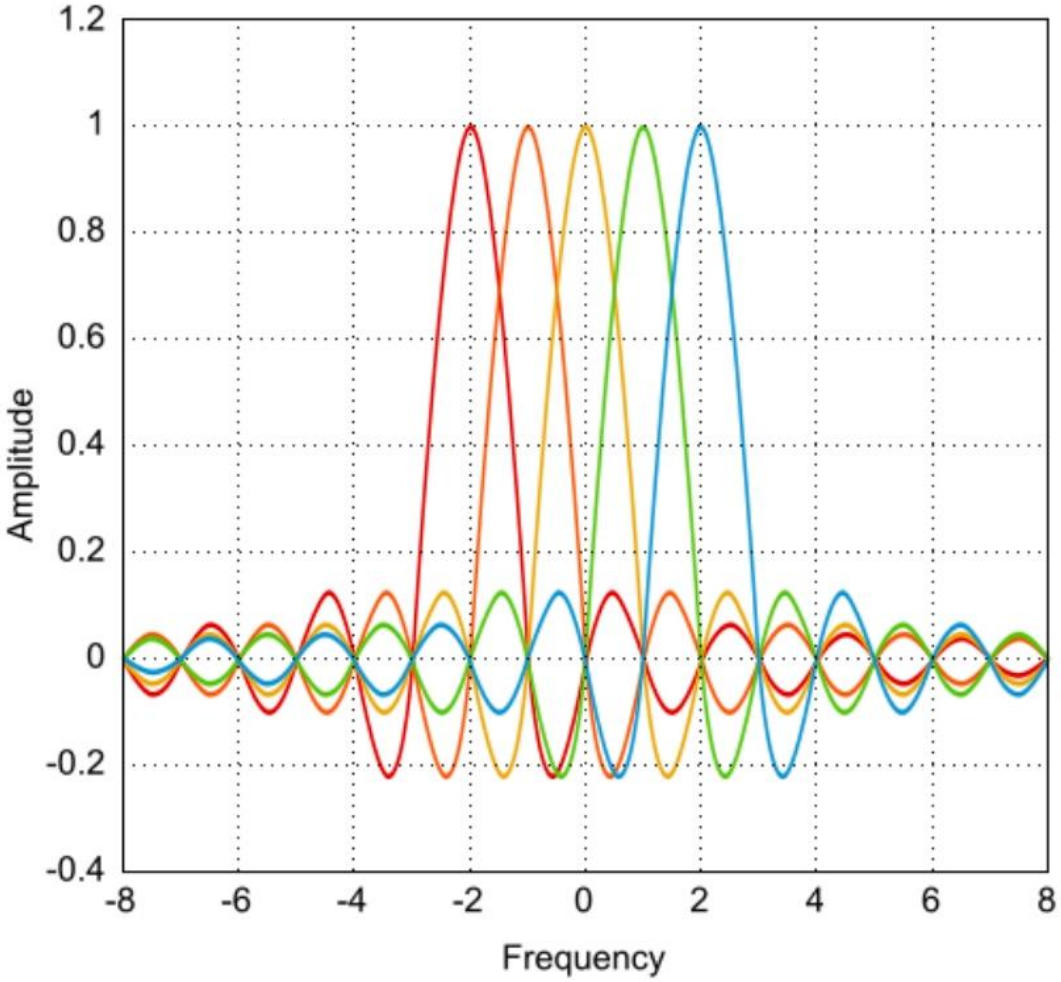


Рисунок 1.2 – Піднесучі OFDM-сигналу [12]

Канальна матриця H, що репрезентує CSI, складається з комплексних значень, які визначають характеристики сигналу: амплітуду та фазу для конкретної піднесучої [19]. У системах MIMO формування цієї матриці відбувається в процесі передавання: кожен підканал, поширюючись різними шляхами, формує неповторний слід (сигнатуру), який виражається як набір складових фази та амплітуди.

На приймальному боці пристрій опрацьовує отримані сигнали, формуючи відповідну CSI-матрицю. Потім, він відправляє зворотний зв'язок передавачу. Цей зворотній зв'язок містить повну інформацію про стан каналу для кожного з підканалів.

1.2.5 Переваги та недоліки застосування CSI у WiFi-мережах для виявлення об’єктів

Застосування CSI у Wi-Fi мережах як засобу виявлення об’єктів є новаторським і перспективним методом, що дозволяє проводити прихований моніторинг середовища без потреби у спеціалізованих датчиках.

На відміну від стандартних рішень – таких як камери відеоспостереження, інфрачервоні детектори чи лазерні системи – ця технологія базується на аналізі змін радіосигналу в уже наявній WiFi-інфраструктурі.

Серед головних переваг такого підходу варто виділити:

- **високу чутливість.** CSI дає змогу виявляти навіть мінімальні зміни в оточенні, зокрема спричинені рухом чи появою об’єктів. Це стає можливим завдяки детальному аналізу амплітудно-фазових параметрів сигналу на різних піднесучих;
- **широке охоплення.** Оскільки використовуються звичайні Wi-Fi точки доступу, система може ефективно працювати як у приміщеннях великої площі, так і на відкритих просторах;
- **проникність сигналу.** Радіохвилі Wi-Fi легко проходять крізь фізичні перешкоди (стіни, меблі тощо), що робить систему універсальною;
- **низькі витрати.** Завдяки використанню бюджетних пристроїв, та вже наявної мережевої інфраструктури, рішення є економічно доступним.

Втім, ця технологія також має низку обмежень:

- **сприйнятливість до завад.** Дані CSI можуть зазнавати спотворень через інші бездротові пристрої, електромагнітні джерела шуму чи змінні умови в оточенні;
- **обмежена деталізація.** Хоча CSI дає змогу виявляти об’єкти, вона не забезпечує такої ж точності у визначенні їх розміру, форми чи положення, як це роблять візуальні або лазерні системи;

- **високі вимоги до обробки.** Аналіз таких даних вимагає значних обчислювальних потужностей та складних алгоритмів, зокрема з галузі машинного навчання;
- **питання конфіденційності.** Спостереження за присутністю чи переміщенням людей за допомогою бездротових сигналів потребує відповідного захисту;
- **обмеження сумісності.** Не всі версії Wi-Fi підтримують зчитування CSI, тому в деяких випадках може знадобитися модернізація обладнання.

Попри ці виклики, використання CSI залишається багатообіцяючим напрямом для розробки систем моніторингу, особливо там, де важливими є економічність, непомітність роботи та охоплення великих площ без встановлення додаткових сенсорів.

1.3 Сучасні IT технології в галузі виявлення об’єктів у мережі Wi-Fi

1.3.1 ШІ та технології глибинного навчання

Згорткові нейронні мережі (CNN), рекурентні нейронні мережі (RNN) та штучні нейронні мережі (ANN) являють собою одними з найефективніших архітектур глибокого навчання, які активно застосовуються у сучасних системах обробки даних. Кожна з них має власні переваги, що надає їм універсальності. В рамках опрацювання даних CSI ці моделі є ключовими, адже вони можуть самостійно виявляти комплексні просторово-часові структури в багатовимірних сигналах. Архітектури RNN та CNN на даний момент є передовими рішеннями для задач ідентифікації, класифікації та моніторингу об'єктів, грунтуючись на параметрах бездротового каналу.

Прикладом результативного використання CNN [36] є DeepSense [20], створена дослідниками Каліфорнійського університету. У ній застосовуються згорткові нейронні мережі для розпізнавання різних типів людської активності, зокрема ходьби, стрибків і присідань на основі CSI-даних. DeepSense має

більше 90 % позитивних результатів під час тестувань в різних умовах.

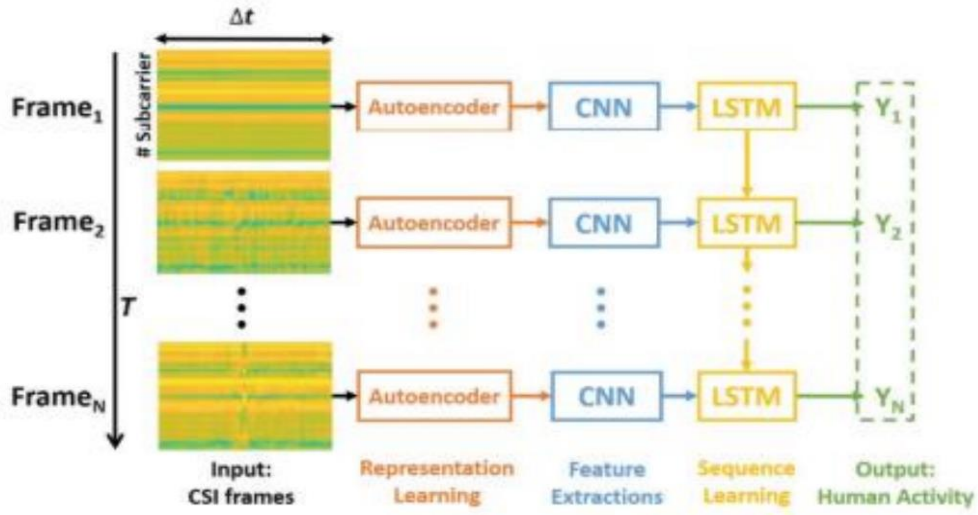


Рисунок 1.3 – Архітектура DeepSense [20]

Переваги використання глибокого навчання полягають у забезпеченні підвищеної точності класифікації, здатності ефективно обробляти великі обсяги даних та виявляти приховані закономірності без потреби у попередньому формуванні ознак, водночас такі можливості супроводжуються обмеженнями, що проявляються у значній обчислювальній складності та потребі у великих масивах анотованих даних для навчання.

Рекурентні нейронні мережі або RNN, зокрема, ефективно працюють із послідовними та часовими даними, якими є CSI-сигнали. Наприклад, у дослідженні [18] представлено систему **WiFi-U** [37], яка використовує RNN переміщення осіб з точністю до 0,5 метра.

Ще одним прикладом використання методів машинного навчання є система **FreeDetector** [21]. Вона працює на основі стандартного WiFi-обладнання та не потребує жодних додаткових сенсорів чи пристроїв, що носяться на тілі. Основний принцип роботи полягає у спостереженні за змінами у характеристиках поширення радіосигналу, спричинених рухами людей.

Ключові особливості системи FreeDetector:

– застосування модифікованих драйверів для зчитування CSI-даних у реальному часі з кількох Wi-Fi точок доступу;

– обробкою «сирих» CSI-даних з виокремленням релевантних ознак, таких як фаза та амплітуди;

– застосування методів машинного навчання (зокрема RF та ANN) для класифікації видів руху та визначення кількості людей.

Недоліки FreeDetector:

– обмежена надійність у варіативних середовищах;

– залежність від апаратно-програмної конфігурації;

– відсутність уніфікованих стандартів та обмежена інтеграційна сумісність.

За результатами експериментів, FreeDetector досягає точності понад 87 % у різних умовах і здатна розпізнавати типи рухів, зокрема ходьбу, сидіння тощо. При цьому результативність системи може визначатися топологією мережі, архітектури приміщення та наявних перешкод. Також система має обмеження у визначенні точного розташування осіб та їх індивідуальної ідентифікації.

Загалом, досвід реалізації FreeDetector підтверджує доцільність застосування CSI-аналізу та глибокого навчання для створення інтелектуальних систем моніторингу, особливо у сфері безпеки, розумного дому та аналізу поведінки.

1.3.2 Технології для розумних просторів

Дані, отримані з CSI, здатні взаємодіяти з іншими датчиками та технологіями, що сприяє розробці інтелектуальних просторів. Мова йде про розумні оселі, офісні приміщення чи навіть цілі міські території. Застосування подібних інтегрованих систем забезпечує всебічний аналіз навколишнього середовища та поведінки користувачів. Це необхідно для автоматизації різних процесів, збільшення показників енергоефективності та створення більшого комфорту.

Одним із них є система WiTrack, розробленою компанією Microsoft Research [13]. Вона використовує CSI-дані для точного відстеження рух людей у будівлі та контроль пристроями розумного дому – такими як освітлення, кліматичне обладнання чи мультимедійні системи (рис. 1.4). Наприклад, WiTrack може розпізнати вхід людини до кімнати, автоматично ввімкнути освітлення та налаштувати температуру відповідно до попередньо встановлених параметрів комфорту. Також система дає змогу керувати за допомогою жестів рук, без необхідності фізично торкатися пристроїв.

Рисунок 1.4 – Приклад роботи WiTrack [13]

Переваги інтеграції CSI-даних в інтелектуальні середовища:

– можливість безконтактного виявлення присутності та активності людини;

– автоматичне керування пристроями на основі аналізу поведінкових моделей;

– підвищення енергоефективності шляхом оптимізації роботи побутових систем;

– створення адаптивного середовища, яке реагує на індивідуальні потреби користувача.

Втім, реалізація подібних систем вимагає ретельного проєктування архітектури та узгодження всіх компонентів між собою. До того ж, одним з ключових викликів залишається забезпечення конфіденційності та кібербезпеки, оскільки такі системи обробляють потенційно чутливі дані про поведінку користувачів.

Незважаючи на ці труднощі, використання CSI-даних у системах інтелектуального середовища є перспективним напрямком [28]. Ця технологія сприяє створенню розумних, адаптивних та екологічно орієнтованих середовищ життя і праці, здатних суттєво покращити якість повсякденного життя користувачів.

1.4 Ідентифікація об’єктів у мережі

Аналіз та моніторинг мережевого трафіку стає невід’ємною частиною ефективного управління та забезпечення безпеки інформаційних систем. Програмне забезпечення для сніфінгу та аналізу трафіку грає ключову роль у цьому процесі, допомагаючи адміністратором мереж і інженерам отримувати детальну інформацію про мережевий рух та ефективно виявляти потенційні проблеми.

Програмне забезпечення для сніфінгу [22, 38] та аналізу трафіку виконує такі функції щодо ефективного контролю та оптимізації мережевих процесів, як:

– захоплення пакетів даних: перехоплення та запис пакетів інформації, що обмінюються між пристроями в мережі;

– статистика мережевого трафіку (детальна інформація про обсяг трафіку [39], його розподіл, інші статистичні дані, що допомагають виявляти ресурсозатратні процеси та оптимізувати їх роботу);

– оснащення для аналізу даних: докладний розгляд та інтерпретація захопленої інформації, фільтрація даних за різними параметрами [40];

– ідентифікація загроз: виявлення потенційно шкідливого трафіку, ідентифікація можливих загрози безпеці мережі, що дозволяє вчасно реагувати та усувати їх.

Використання програмного забезпечення для сніфінгу та аналізу трафіку дозволяє вирішити ключові виклики мережевого управління: виявлення проблем, моніторинг перформансу, дистанційний моніторинг процесів, контроль безпеки (віддаленого доступу) та оптимізацію мережі. Ці переваги роблять програмне забезпечення для сніфінгу та аналізу трафіку невід'ємною частиною ефективного управління мережею.

Програмне забезпечення для сніфінгу уможливлює високий рівень контролю та оптимізації мережевих процесів, зокрема: моніторинг трафіку, інструменти безпеки таргетування на аномалії, аналітика мережі та оптимізація архітектури. Ці ключові можливості допомагають не лише забезпечити ефективний контроль за мережею, але і підвищити її надійність та забезпечити високий рівень безпеки у сучасних умовах розвитку технологій.

Для дослідження мережевого трафіку застосовують такі програми, як Wireshark [23], SolarWinds Network Analyzer [24], PRTG Network Monitor [25] та ін.

Ці програми допомагають забезпечити безпеку, ефективність та надійність мережевих інфраструктур та мережевого управління.

Після збору даних за допомогою програм для сніфінгу та аналізу трафіку, важливо правильно інтерпретувати ці результати. Методи аналізу представлені у вигляді табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Методи інтерпретації та аналізу трафіку

Назва	**Опис**	**Застосування**
Статистика мережевого трафіку	Збір та аналіз статистики щодо обсягу, швидкості та інших параметрів мережевого трафіку.	Визначення пікових навантажень, ідентифікація тривалих періодів низької активності.
Розшифрування пакетів даних	Аналіз вмісту пакетів для розуміння обміну даними між пристроями.	Виявлення конкретних протоколів, ідентифікація типу передачі даних.

Назва	Опис	Застосування
Виявлення вторгнення	Виявлення аномальних або підозрілих активностей, що можуть свідчити про вторгнення або злам.	Забезпечення безпеки мережі шляхом виявлення та блокування потенційно шкідливих дій.

Ці методи надають можливість не лише отримати дані, а й глибоко їх проаналізувати, роблячи результати аналізу трафіку [26] важливим ресурсом для прийняття управлінських рішень та забезпечення безпеки мережі.

Програмні засоби сніфінгу та аналізу трафіку знаходить застосування у різних аспектах управління та забезпечення безпеки мережі, найпоширеніші з яких представлені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Використання програмного забезпечення для сніфінгу та аналізу трафіка

Назва	Опис	Застосування
Моніторинг мережі	Відстеження трафіку, ідентифікація проблем.	Оптимізація мережевої продуктивності, виявлення заторів, планування ресурсів.
Аналіз безпеки	Виявлення потенційно небезпечних або шкідливих активностей у мережі.	Виявлення інтрудерів, захист від атак, моніторинг безпеки мережі.
Тримання записів	Збереження детальних записів про трафік та активність в мережі.	Аудит безпеки, аналіз подій, вирішення інцидентів.

Ці практичні застосування наведених засобів пошуку та ідентифікації об’єктів дозволяють забезпечити стабільність та безпеку мережі, реагувати на можливі загрози та ефективно управляти ресурсами і процесами у мережевому середовищі.

У світі постійного зростання мережевих технологій програмне забезпечення для сніфінгу та аналізу трафіку стає невід’ємною частиною ефективного

управління та забезпечення безпеки мережі. Вищезазначені функції, технічні вимоги та переваги використання цього ПЗ роблять його ключовим інструментом для адміністраторів мереж, інженерів та аналітиків.

Висновки до розділу 1

На підставі вищевказаного щодо актуальності та стану сучасного розробленості питання методів і засобів локалізації й ідентифікації об’єктів на основі аналізу параметрів WiFi-сигналу акцентуємо увагу на таких ключових аспектах:

1) стан розробленості питання. Науково-прикладні дослідження до недавнього часу були зосереджені передусім на використанні сучасних бездротових технологій в локалізації та ідентифікації об’єктів, що має найширший спектр застосувань від економіки й логістики до сфери безпеки. Протягом останніх трьох років акцент у вітчизняних дослідженнях зміщується з суб’єктів на об’єкти (та їхні складові, матеріали) а також зі статики на динаміку (трекінг). Однак відсутні дослідження, де б обидва напрямки поєднувались;

2) теоретичні основи виявлення об’єктів у WiFi-мережі. В ході дослідження особливостей виявлення об’єктів у WiFi-мережі було проаналізовано інформацію про стан каналу (CSI), показник рівня сили сигналу (RSSI), антенні конфігурації (SISO, MIMO) та мультиантенну технологію (OFDM), переваги та недоліки застосування CSI у WiFi-мережах для виявлення об’єктів.

Аналіз функціонування та побудови CSI у WiFi-мережах виявив, що застосування CSI для розпізнавання об'єктів має декілька плюсів (можливість працювати в умовах обмеженої видимості, невисокі вимоги до техніки, порівняно низька вартість впровадження). Водночас потрібно брати до уваги її сприйнятливість до шумів та обмежену дальність дії.;

3) сучасні інформаційні технології щодо виявлення об’єктів у мережі Wi-Fi. В ході аналізу технологій штучного інтелекту та глибокого навчання було розглянуто згорткові нейронні мережі (CNN), рекурентні нейронні мережі (RNN)

та штучні нейронні мережі (ANN) які активно застосовуються у сучасних системах обробки даних, а також технології для інтелектуальних середовищ (зокрема WiTrack).

Показано, що CNN та RNN відіграють ключову роль в аналізі CSI-даних, оскільки здатні автоматично виявляти складні просторово-часові закономірності у багатовимірних сигналах. Встановлено, що одним із ключових викликів залишається забезпечення конфіденційності та кібербезпеки, оскільки такі системи обробляють потенційно чутливі дані про поведінку користувачів;

4) ідентифікація об’єктів у мережі. Під час аналізу можливостей наявного програмного забезпечення щодо ідентифікації об’єктів у мережі, було встановлено переваги й недоліки програм для аналізу трафіку (Wireshark, SolarWinds Network Analyzer, PRTG Network Monitor та ін). Висвітлені методи аналізу та інтерпретації трафіку (статистика, розшифрування пакетів даних, виявлення вторгнення). Акцентовано на важливості правильної інтерпретації отриманих результатів.

Аналіз поширених способів обробки CSI-даних та алгоритмів машинного навчання підтвердив інтенсивний прогрес цієї сфери, особливо щодо використання нейронних мереж.

Попри те, що переважна більшість розробок орієнтовані на ідентифікацію людини та її рухів, доведено, що CSI можна пристосувати для розпізнавання інших видів об’єктів, зокрема загрозливих, що відкриває нові перспективи у сфері безпеки.

Викладене вище дозволило сформулювати вимоги до створення системи виявлення та ідентифікації об’єктів на основі CSI мережі Wi-Fi, а саме:

– розроблювані методи та засоби мають забезпечити у режимі реального часу отримання, оброблення й аналізування CSI-даних для виявлення та класифікації об’єктів;

– така система повинна спиратися на продуктивне та доступне апаратне забезпечення та дієвий програмний комплекс;

5) на основі здійсненого аналізу було сформульоване загальне завдання дисертаційного дослідження, конкретизоване у задачах, виконання яких доцільно здійснювати у три етапи:

– систематизувати та порівняти наявні моделі та методи локалізації та ідентифікації об’єктів у WiFi-мережі, виходячи з конкретних завдань (виявлення - класифікація, статика - трекінг тощо);

– запропонувати та експериментально перевірити ефективність алгоритму просторової локалізації об’єктів у приміщенні;

– запропонувати та експериментально перевірити ефективність роботи системи ідентифікації об’єктів за допомогою мережі Wi-Fi.

Результати розв’язання викладених вище задач надалі можуть бути використані при удосконаленні методів та засобів пошуку та ідентифікації об’єктів на основі аналізу параметрів WiFi-сигналу.

Таким чином, в даному розділі обґрунтовано мету, задачі та методику проведення досліджень, результати яких представлено в наступних розділах.

Список використаних джерел до розділу 1

1. Wang Y., Xiu C., Zhang X., Yang D. WiFi indoor localization with CSI fingerprinting-based random forest. *Sensors*. 2018. Vol. 18. P. 2869. DOI: 10.3390/s1809286.

2. Xin T., Guo B., Wang Z., Li M., Yu Z., Zhou X. FreeSense: Indoor Human Identification with Wi-Fi Signals. *2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. 2016. P. 1–7. DOI: 10.1109/GLOCOM.2016.7841847.

3. Li H., He X., ChenX., Fang Y., Fang Q. Wi-Motion: A Robust Human Activity Recognition Using WiFi Signals. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 153287–153299. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2948102.

4. Ren Y., Yang J. Robust person identification: A WiFi vision-based approach. 2022. arXiv preprint arXiv:2210.00127.

5. Mosharaf M., Kwak J. B., Choi W. WiFi-based human identification with machine learning: A comprehensive survey. *Sensors*. 2024. Vol. 24. P. 6413. DOI: 10.3390/s24196413.

6. Deng Z., Liu R., Gao Y. Research on LOS/NLOS identification technology based on WiFi signal space-frequency domain information. *In: Sun, J., Yang, C., Xie, J. (eds) China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2020 Proceedings: Volume III. CSNC 2020. Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2020. Vol. 652. Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-15-3715-8_33.

7. Liu F., Liu J., Yin Y., Wang W., Hu D., Chen P., Niu, Q. (), Survey on WiFi-based indoor positioning techniques. *IET Communications.* 2020. Vol. 14. P. 1372–1383. DOI: 10.1049/iet-com.2019.1059.

8. Zhang R., Jing X. Device-free human identification using behavior signatures in WiFi sensing. *Sensors.* 2021. Vol. 21. P. 5921. DOI: 10.3390/s21175921.

9. Abuhoureyah F. S., Wong Ya. C., Isira A. S. B. M. WiFi-based human activity recognition through wall using deep learning. *Engineering Applications of Artificial Intelligence.* 2024. Vol. 127, Part A. DOI: 10.1016/j.engappai.2023.107171.

10. Duan P.; Diao X.; Cao Y.; Zhang D.; Zhang B.; Kong J. A Comprehensive Survey on Wi-Fi Sensing for Human Identity Recognition. *Electronics*. 2023. Vol. 12. P. 4858. DOI: 10.3390/electronics12234858

11. 60GHz mobile imaging radar / Y. Zhu et al. Mobile Computing Systems and Applications (HotMobile’15) : Proc. of the 16th Internat. Workshop, Santa Fe, New Mexico, USA. New York, NY, USA, 2015. DOI: 10.1145/2699343.2699363.

12. A survey on behavior recognition using WiFi channel state information / S. Yousefi et al. *IEEE Communications Magazine*. 2017. Vol. 55, no. 10. P. 98–104. DOI: 10.1109/MCOM.2017.1700082.

13. Abazorius A. New system allows for high-accuracy, through-wall, 3-D motion tracking. *Massachusetts Institute of Technology News* : web site. Publ. Dec. 11, 2013. URL: https://news.mit.edu/2013/new-system-allows-for-high- accuracy-through-wall-3-d-motion-tracking-1211 (Last accessed: 13.05.2025).

14. Adib F., Katabi D. See through walls with WiFi! *SIGCOMM'13*: Proc. of the ACM Conf., Hong Kong China. New York, NY, USA, 2013. DOI: 10.1145/2486001.2486039.

15. Capturing the human figure through a wall / F. Adib et al. *ACM Transactions on Graphics.* 2015. Vol. 34, no. 6. P. 1–13. DOI: 10.1145/2816795.2818072.

16. Channel state information from pure communication to sense and track human motion: A survey / M. A. A. Al-qaness et al. *Sensors.* 2019. Vol. 19, no. 15. P. 3329. DOI: 10.3390/S19153329 .

17. CSI-MIMO: Indoor Wi-Fi fingerprinting system / Y. Chapre et al. *Local Computer Networks (LCN)* : Proc. of the 2014 IEEE 39th Conf., Edmonton, AB, 08–11 September 2014. DOI: 10.1109/LCN.2014.6925773.

18. Tohoiev O., Burlachenko I., Zhuravska I., Savinov V. The monitoring system based on a multi-agent approach for moving objects positioning in wireless networks. *CEUR Workshop Proceedings* [ed.: S. Subbotin]. 2020. Vol. 2608. P. 79–90. DOI: 10.32782/cmis/2608-7.

19. Peng X., Chen R., Yu K., Ye F., Xue W. An Improved Weighted K-Nearest Neighbor Algorithm for Indoor Localization. *Electronics.* 2020;9:2117. DOI: 10.3390/electronics9122117.

20. Zou H., Zhou Yu,, Yang J., Spanos C. J. Towards occupant activity driven smart buildings via WiFi-enabled IoT devices and deep learning. *Energy and Buildings.* 2018. Vol. 177. P. 12–22. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.08.010.

21. Zou H., Zhou Yu,, Yang J., Gu W., Xie L., Spanos C. J. FreeDetector: Device-free occupancy detection with commodity WiFi. *Sensing, Communication and Networking (SECON Workshops)* : Proc. of the 2017 IEEE International Conference, San Diego, CA, USA, 2017. P. 1–5. DOI: 10.1109/SECONW.2017.8011040.

22. Тогоєв О. Р. Метод деанонімізації користувачів iOS через протокол AirDrop. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво* : наук. журн. / Луцьк. нац. техн. ун-т. 2022. Вип. 49. С. 12–17. DOI: 10.36910/6775-2524-0560-2022-49-02. ISSN 2524-0552

23. Tampubolon P., Putri E. E., Zalianti N., Raditya M. Identifikasi malware pada Wireshark. *Jurnal Kajian Teknik Elektro*. 2024. Vol. 9. P. 64–68. DOI: 10.52447/jkte.v9i1.8004.

24. Anisa G., Widianingsih F. SolarWinds attack: Stages, implications, and mitigation strategies in the Cyber Age. *Electronic Integrated Computer Algorithm Journal*. 2024. Vol. 2. P. 47–52. DOI: 10.62123/enigma.v2i1.31.

25. Fathima A., Devi G. Enhancing university network management and security: a real-time monitoring, visualization & cyber attack detection approach using Paessler PRTG and Sophos Firewall. *International Journal of System Assurance Engineering and Management.* 2024. 18 p. DOI: 10.1007/s13198-024-02448-y.

26. Tohoiev O. Determining the location of patients in remote rehabilitation by means of a wireless network. *ACTA IMEKO.* 2023. Vol. 12, No. 3. P. 1–5. DOI: 10.21014/actaimeko.v12i3.1495.

27. Burlachenko I. S., Savinov V. Yu., Tohoiev O. R., Zhuravska I. M. The cloud GNSS data fusion approach based on multi-agent authentication protocols' analysis in the corporate logistics management systems. *Radio Electronics, Computer Science, Control* [ed.: S. Subbotin]. 2021. Vol. 4. P. 95–105. DOI: 10.15588/1607-3274-2021-4-9.

28. Burlachenko I. S., Zhuravska I. M., Ukhan Y. O., Tohoiev O. R., Tiutiunyk Y. I. Multi-agent monitoring system for heat loss mapping of multi-story buildings. *CEUR Workshop Proc. Information-Communication Technologies & Embedded Systems (ICT&ES).* 2019. Vol. 2516. P. 218–225. **ISSN 1613-0073**. Available at http://ceur-ws.org/Vol-2516/ (Last accessed: Apr. 19, 2021).

29. Wang, Y. & Wu, K. & Ni, Lionel. WiFall: Device-Free Fall Detection by Wireless Networks. 2017 DOI: 16. 581-594. 10.1109/TMC.2016.2557792.

30. Nieves, Adriyel & Wyglinski, Alexander.. Medusa: A Guide to Build an Agile RF Fingerprinting Testbed [Application Notes]. IEEE Microwave Magazine. 2025 DOI: 26. 104-116. 10.1109/MMM.2025.3555759.

31. Jha, Sohan.. Non-Minimal RT Coupling and its Impact on Inflationary Evolution in f(R, T) Gravity. 2025 DOI: 10.48550/arXiv.2504.10876.

32. Zhang, Ronghui & Jing, Xiaojun. Device-Free Human Identification Using Behavior Signatures in WiFi Sensing. Sensors. 2021 DOI: 21. 5921. 10.3390/s21175921.

33. Ankireddy, Sravan Kumar Reddy & Hebbar, S. & Viswanath, Pramod & Kim, Hyeji. Deep-OFDM: Neural Modulation for High Mobility. 2025. DIO:10.48550/arXiv.2506.17530.

34. Yu, Jingze & Ju, Cheng & Wang, Dongdong & Liu, Na & Chen, Chunyao & Fan, Jiamin. Orthogonal Transform-Assisted OFDM Modulation Scheme for Nonterrestrial Network Systems. International Journal of Satellite 2025. Communications and Networking. n/a-n/a. 10.1002/sat.70001.

35. Butovitsch, Peter & Asplund, Henrik & Astely, David & Chapman, Thomas & Faxér, Sebastian & Frenne, Mattias & Ghasemzadeh, Farshid & Hagström, Måns & Hogan, Billy & Jöngren, George & Karlsson, Jonas & Kronestedt, Fredric & Larsson, Erik. 2025. Massive MIMO in Practice - From 5G to 6G. DOI:10.1002/itl2.70069

36. Rahajoe, Ani & Suriansyah, Muhammad & Jr, Angelo. Hybrid Neural Network-Based Road Damage Detection Using CNN-RNN and CNN-MLP Models. Jurnal Teknik Informatika (Jutif). 6. 2025. DOI: 1217-1228. 10.52436/1.jutif.2025.6.3.4435.

37. Wang, Xu & Berry, Randall. Price Competition with LTE-U and WiFi. 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2001.01388.

38. Johnson, Natalie & Cotelo-Larrea, Anamaria & Stetzik, Lucas & Akkaya, Ümit Murat & Zhang, Zihao & Gadziola, Marie & Varga, Adrienn & Ma, Minghong & Wesson, Daniel. Dopaminergic signaling to ventral striatum neurons initiates sniffing behavior. Nature Communications. 2025. DOI:16. 10.1038/s41467-024-55644-6.

39. Liu, Yishan. Analysis Model Integrating Traffic Volume and Temperature for Traffic Flow Prediction. Applied and Computational Engineering. 2025. DOI: 140. 31-37. 10.54254/2755-2721/2025.21273.

РОЗДІЛ 2
МЕТОДИ ОТРИМАННЯ ТА МОДЕЛІ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ WI-FI МІСЦЕЗНАХОДЖЕННЯ ТА РОЗПІЗНАВАННЯ ОБ'ЄКТІВ

Для створення ефективних систем ідентифікації об'єктів важливою є їхня локалізація. Метод локалізації WiFi-відбитків застосовується для наближення місцезнаходження, оскільки не вимагає інформації про розподіл бездротових точок доступу (AP) і не потребує обчислення кута приймачар[23]. Метод використовує вимірювання індикатора сили отриманого сигналу (RSSI) доступних точок доступу для прогнозування положення пристрою користувача в місцях, де глобальна система позиціонування (GPS) недостатня, наприклад, у приміщенні.

Процес зчитування відбитків RSSI через Wi-Fi складається з двох етапів: офлайн або навчання та онлайн або моніторинг або тестування. На етапі навчання багатовимірні вектори значень RSSI (відбитки) збираються з різних датчиків(точок доступу) в певному діапазоні та пов'язуються з визначеними місцями. Ці вимірювання використовуються для створення бази даних (радіокарти), яка охоплює область інтересу. Під час онлайн-етапу поточний пристрій користувача отримує вектор RSSI у неідентифікованому місці, який порівнюється зі збереженим вектором RSSI у відбитку.

Інформація, що зберігається в базі даних Wi-Fi RSSI, є непослідовною через різну видимість точок доступу. Такі фактори, як відбиття, багатопроменеві перешкоди та зміни в середовищі або конфігурації пристрою, впливають на сигнал, що приймається точками доступу, і знижують точність системи локалізації на основі відбитків Wi-Fi RSSI, особливо в приміщенні.

База даних відбитків Wi-Fi RSSI має менше ступенів свободи порівняно з розмірами бази даних, оскільки вимірювання Wi-Fi RSSI є нелінійними з відстанню, пройденою сигналом, що показує просторову кореляцію даних RSSI. Крім того, база даних відбитків має часову кореляцію, враховуючи подібність, яка існує між значеннями RSSI, отриманими точкою доступу в різний час у фіксованому положенні.

2.1 Методи отримання даних про місцезнаходження об’єктів

2.1.1 Метод *k*-найближчих сусідів

Метод *k*-найближчих сусідів (англ. *k-nearest neighbor method, k-NN*) [1] – це непараметричний метод, розроблений Е. Фіксом, Дж. Ходжесом і розвинутий Т. Ковером. Метод використовується для і регресії. В обох ситуаціях вхідна інформація збирається з *k* найближчих точок вибірки, але в класифікації *k-HC* результат – це приналежність до класу найближчих сусідів (*k* – позитивне ціле число). Натомість у регресії *k-HC* кінцевим результатом є числове значення ознаки об'єкта (*k* розраховується як середнє значення для *k*-найближчих сусідів). Таким чином, цей метод підходить як для визначення категорії об'єктів, так і для оцінювання їх параметрів.

У ситуаціях, де потрібна класифікація чи регресія, потрібно використовувати ваги для сусідів. Це дає змогу ближчим сусідам більше впливати на середнє значення, аніж тим, що знаходяться далі. Поширений підхід полягає в тому, щоб призначити кожному сусіду вагу, обчислювану як $1/d$, де d – це відстань до нього.

Особливістю алгоритму *k*-НС є те, що він чутливий до локальної структури даних.

Припустимо, у нас є пари:

$$(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \ldots, (X_n, Y_n), \tag{2.1}$$

які приймають значення в множині $R^d \times \{1,2\}$, де Y – мітка класу точки X,
отже $X \vee Y = r \sim P_r$ для r=1,2 (і розподілів ймовірностейP_t).

Для заданої норми $\vee\times\vee$ на R^d і точки $x \in R^d$, послідовність $(X_{(1)}, Y_{(1)}), \ldots, (X_{(n)}, Y_{(n)})$, буде таким перевпорядкуванням даних, що
$\vee X_{(1)} - x \vee \leq \ldots \leq \vee X_{(n)} - x \vee$

Точність алгоритму *k*-НС може погіршитись через наявність шумових або невідповідних ознак, або якщо масштаби ознак не відповідають їх важливості.

Метод k-найближчих сусідів можна інтерпретувати як процес надання k-найближчим елементам певної ваги. $\frac{1}{k}$, а всі іншим ваги 0. Це можна поширити на вагові класифікатори найближчих сусідів, у яких i-му за відстанню сусіду надається певна вага. ω , з $\sum_{i=1}^{n}$ ω $= 1$

Наприклад, нехай C_n^{wnn}позначає зважений найближчий класифікатор з вагами $\{\omega$ $\}_{i=1}^{n}$ За умови регулярності щодо розподілів класів надмірний ризик має наступне асимптотичне розширення:

$$R_r(C_n^{wnn}) - R_R(C^{Bayes}) = (B_1 s_n^2 + B_2 t_n^2)\{1 + o(1)\} \qquad (2.2)$$

для констант B_1 і B_2, де $s_n^2 = \sum_{i=1}^{n}$ ω^2 і$t_n = n^{\frac{-2}{d}} \sum_{i=1}^{n}$ ω $\{i^{1+\frac{2}{d}} - (i-1)^{1+\frac{2}{d}}\}$ Найбільш ефективна стратегія зважування $\{\omega$ $\}_{i=1}^{n}$, яка балансує два вищенаведені члени, визначається наступним чином:

$$\text{k} = \left[\text{Bn}\,\tfrac{4}{\text{d}+4}\right] \text{ та } \omega = \frac{1}{\text{k}}\left[1 + \frac{\text{d}}{2} - \frac{\text{d}}{2\text{k}^{\frac{2}{\text{d}}}}\{\text{i}^{1+\frac{2}{\text{d}}} - (\text{i}-1)^{1+\frac{2}{\text{d}}}\}\right]$$

для i = 1, 2, … k і ω $= 0$ для $i = k$ $+ 1, \ldots, n$.

За умови оптимальних ваг провідним елементом в асимптотичному розкладі надлишкового ризику є $O\left(n - \frac{4}{d+4}\right)$. Аналогічні висновки залишаються вірними у разі застосування для агрегування класифікатора найближчого сусіда.

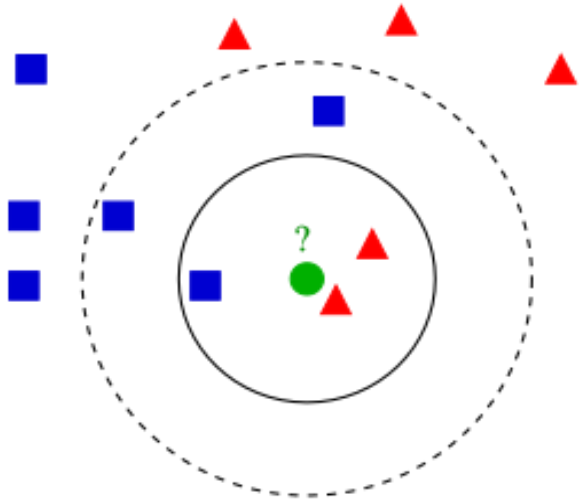


Рисунок 2.1 – Приклад k-НС-класифікації

Тестовий об’єкт (позначений зеленим колом) має бути віднесений або до синіх квадратів, або до червоних трикутників. При k = 3 (менше коло) він

класифікується як червоний трикутник, оскільки всередині цього кола знаходяться два трикутники та лише один квадрат. При $k = 5$ (більше коло) об’єкт відносять до синіх квадратів, адже в межах кола три квадрати проти двох трикутників.Метод k-НС має як переваги[24], так і недоліки для локалізації та ідентифікації об’єктів. Серед переваг можна виділити:

– простоту реалізації: алгоритм не потребує етапу навчання в класичному розумінні;

– гнучкість щодо типу об’єктів: може працювати з різними типами ознак (геолокація, візуальні дескриптори, сенсорні дані);

– інтуїтивність: принцип об’єкти, які близько один до одного, ймовірно, належать до одного класу легко зрозумілий;

– працює з багатовимірними просторами: якщо правильно обрати метрику відстані, алгоритм може ефективно працювати у векторних просторах, характерних для зображень або координат;

– немає припущень про розподіл даних: на відміну від моделей типу GMM [25] чи лінійних моделей [26], k-NN не потребує припущення про форму розподілу.

2.2 Баєсівська модель в контексті аналізу інформації про стан каналу

Баєсові мережі – це ймовірнісні графічні моделі, котрі мають широке застосування для створення структурованих відображень залежностей між змінними у даних. Вони також називаються мережами Баєса, мережами переконань чи причинно-наслідковими мережами. Такі моделі забезпечують ефективне розв’язання задач прогнозування, виявлення аномалій, діагностування, автоматизованого аналізу, ймовірнісного висновування, передбачення часових рядів і ухвалення рішень за умов невизначеності.

У контексті аналізу інформації про стан каналу (англ. Channel State Information, CSI) у бездротових комп’ютерних мережах, баєсові мережі використовуються для моделювання й інтерпретації складних залежностей між параметрами каналу. Наприклад, вузли графа можуть представляти змінні, що

стосуються амплітуди та фази сигналу, частотних характеристик каналу, рівня шуму, типу середовища передавання або показників багатопроменевого поширення (англ. Multipath Effects) [27]. Такі моделі дають змогу виконувати ймовірнісну оцінку якості каналу [28], знаходити аномальні стани [29] або оптимізувати адаптивне керування ресурсами мережі [30] (наприклад, вибір схеми модуляції [31] чи передавання).

Структурно, баєсова мережа – це орієнтований ациклічний граф, де кожна вершина представляє собою випадкову змінну, а ребра між вершинами відображають умовні залежності. Змінні можуть бути дискретними (наприклад, категорія якості каналу = {висока, середня, низька}) або неперервними (наприклад, коефіцієнт загасання, рівень інтерференції). У випадку, коли вершина містить кілька пов’язаних змінних (наприклад, комплексні коефіцієнти CSI [2] в домені OFDM), така вершина вважається багатозмінною.

Таким чином, баєсові мережі надають формалізований та гнучкий підхід до моделювання невизначеностей, характерних для аналізу CSI у бездротових системах зв’язку, зокрема у задачах оптимізації пропускної здатності, покращення надійності передачі даних та забезпечення адаптивної комунікації.

Необхідно знайти

$$P(L_i \vee C) = \frac{P(C \vee L_i) \times P(L_i)}{P(C)}, \tag{2.3}$$

де L_i – одна з можливих локацій (наприклад, аудиторія, або координати (x, y));

$P(C \vee L_i)$ – модель правдоподібності:ймовірність отримати CSI C, якщо об’єкт перебуває в локації L_i;

$P(L_i)$ – апріорна ймовірність перебування в цій локації (можна взяти однакову для всіх або побудувати з історії рухів);

$P(C)$ – загальна ймовірність CSI (нормалізуючий коефіцієнт).

Практична реалізація:

1) провести вимірювання CSI для різних відомих точок (англ. Location Fingerprints);

2) визначити правдоподібність моделі $P(C \vee L_i)$. Припустимо, що розподіл CSI в кожній локації нормальний. Для кожної піднесучої (англ. Subcarrier) обчислюємо середнє і стандартне відхилення амплітуди або фази. Отже, маємо формулу (2.4):

$$P(C \vee L_i) = \Pi_j \times N(C_j \vee \mu_{ij}, \sigma_{ij}^2), \tag{2.4}$$

де j – індекс піднесучої;

C – вектор спостережень CSI. Наприклад, це можуть бути **амплітуди** на різних піднесучих WiFi-сигналу:

$$C = [C_1, C_2, \ldots, C_n], \tag{2.5}$$

де C_i – значення CSI на піднесучій j;

$N(C_j \vee \mu_{ij}, \sigma_{ij}^2)$ – нормальний (гаусівський) розподіл, який описує, як значення C_i розподілене в локації L_i з параметрами:

μ_{ij} – середнє значення CSI на піднесучій j у локації L_i;

σ_{ij} – стандартне відхилення (шум/варіація) на цій піднесучій;

Π_j – добуток по всіх піднесучих. Це означає, що можливо **припустити незалежність** між каналами: кожне значення CSI C_j не залежить від інших;

3) побудова апостеріорного розподілу $P(C \vee L_i)$.

Оцінюємо це для кожної локації та вибираємо ту, де ймовірність максимальна (MAP-оцінка) за формулою:

$$L^{\operatorname{argmax} P(C \vee L_i)} \times P(L_i). \tag{2.6}$$

Таким чином, для кожної локації оцінюється, наскільки правдоподібно, що спостережний CSI виник саме там, і вибирається найбільш імовірна комбінація.

2.3 Принцип роботи WiFi-позиціювання

Сучасні технології локалізації Wi-Fi цілковито базуються на тому, що мобільні пристрої передають інформацію про себе, користуючись зондувальними запитами, що обмінюються з точками доступу (AP). Інформація надсилається через більшість каналів та приймається сусідніми точками доступу на різних каналах, що є корисним для визначення місця розташування.

Частота зондування впливає на енергоспоживання, що є вагомим фактором для роботи мобільних сканерів; оновлення коливаються від 10 секунд до 5 хвилин, залежно від пристрою, операційної системи, драйвера, стану акумулятора, енергоспоживання та активності користувача. Це спричиняє недостатність даних для адекватного відтворення реального руху об’єкта.

У розглянутому випадку відкривається перспектива збирати дані про розташування, застосовуючи інформаційні пакети, які надає точка доступу. Це дає змогу підвищити частоту оновлення координат. Завдяки використанню пакетів даних, оновлення сервісу визначення місця розташування (LBS) запускаються мережею і стають доступними значно частіше. Це забезпечує отримання більшої кількості інформації з точок, що необхідні для точного відстеження дій кінцевого користувача.

Коли мобільні WiFi-пристрої з’єднуються з точкою доступу, сусідні точки доступу не можуть перехоплювати пакети даних, оскільки вони працюють на іншому каналі. Це ускладнює оцінювання місцезнаходження. WSM, взаємодіючи з асоційованою AP та сусідніми AP одночасно, сканує канали, щоб зібрати численні показники з переданого пакета даних і, отже, визначити місцезнаходження мобільного пристрою. Це реалізується без додаткових фінансових навантажень для радіостанцій, котрі забезпечують обслуговування, а також без погіршення ефективності роботи служб передачі даних на них, які працюють в діапазоні 2,4 ГГц, так і в 5 ГГц.

Використання пакетів даних забезпечує більшу узгодженість визначення місцезнаходження на різних пристроях. Крім того, це ефективно працює

на пристроях з ОС iOS, де пристрій може змінювати свою MAC-адресу у тестових кадрах.

При дослідженні пакетів було проаналізовано інформацію канального рівня. Заголовок кадру містить апаратні адреси відправника та одержувача, завдяки чому стає можливим ідентифікувати, який пристрій надіслав кадр і який його має отримати та обробити. На відміну від ієрархічних та маршрутизованих адрес, апаратні адреси є однорівневими. Це означає, що жодна частина адреси не може вказувати на приналежність до логічної або фізичної групи. Складовими пакету канального рівня є:

- преамбула;
- MAC-адресу одержувача (Destination Address, DA);
- MAC-адресу відправника (Source Address, SA);
- тип даних;
- дані;
- контрольна сума.

Таблиця 2.1 – Склад пакета канального рівня

Преамбула	SFD	DA	SA	Type/ Length	DSAP	SSAP	Поле управління	Data	FCS
7 байт	1 байт	6 байт	6 байт	2 байта	1 байт	1 байт	1 байт	46–1497 байт	4 байта

З наведеного переліку відомості про фізичну адресу відправника стануть в нагоді для ідентифікації пристрою. Для визначення позиції у реальному часі, важливо фіксувати час прибуття пакету та записувати MAC адресу.

Отримані дані з конкретної точки слід об’єднати з даними від усіх точок доступу (AP), розміщених в межах одного приміщення.

Зібрану інформацію треба візуалізувати на плані приміщення, що дасть змогу спостерігати статистику відвідувань.

Для кращого аналізу рекомендується виокремити конкретний пристрій і стежити тільки за його переміщеннями між точками доступу.

2.4 Визначення місцезнаходження об’єктів за допомогою бездротової мережі

Системи локалізації рухомих об’єктів у просторі на основі стаціонарної мережі (зокрема, за параметрами телекомунікаційного обладнання) є дієвими для відстеження переміщень пацієнтів на короткі дистанції. Такими «рухомими об’єктами» можуть бути будь які об’єкти. У будь-якому випадку, таку мобільну мережу доставки слід розглядати як корпоративну мережу з єдиним планом MAC-адрес і можливістю прослуховування (сніфінгу) вузлів, підключених за допомогою засобів віддаленого доступу. У традиційному розумінні сніфінгова атака – це перехоплення інформації шляхом зчитування мережевого трафіку за допомогою сніфера пакетів, тобто спеціального програмного забезпечення для фіксації мережевих пакетів. Сніфінг зазвичай використовується зловмисниками для отримання несанкціонованого доступу до конфіденційної інформації, що зрештою призводить до виходу мережі з ладу або пошкодження, або для читання повідомлень, що циркулюють в мережі та дистанційного моніторингу процесів в мережі. Тому заходи інформаційної безпеки спрямовані на протидію сніфінг-атакам в комп’ютерних мережах [3; 22], дистанційного моніторингу процесів в комп’ютерних мережах та налаштуванням VPN для віддаленого доступу до мережі. Вищезгадана технологія сніфінгу трафіку може бути застосована для визначення місцезнаходження людей, які пересуваються в межах території, де розгорнута інтерактивна комп’ютерна мережа (бездротова локальна мережа), якщо вони мають при собі гаджет (наприклад, смартфон, планшет, смарт-годинник тощо), який має увімкнений модуль Wi-Fi. За допомогою технології сніфінгу трафіку можна визначити місцезнаходження об’єкта.

На даний час науковцями та практиками проведено значну кількість досліджень з проблеми розгортання системи позиціонування рухомих об’єктів, які мають вбудований модуль бездротового зв’язку. Аналіз таких досліджень

свідчить, що похибка існуючих методів коливається від 1,78 до 10 метрів. Науковці розглядали різні аспекти методів позиціонування та навігації [4; 5]. Найбільш поширеними технологіями позиціонування є супутникові системи (такі як GPS та Galileo) та наземні стільникові мережі.

До кінця не вирішеними та актуальними залишаються завдання визначення граничних меж точності позиціонування системи, які визначаються наявністю шумів та перешкод; опису роботи низки нових методів (таких як пряме позиціонування), спрямованих на забезпечення роботи GPS при дуже слабких прийнятих радіосигналів (наприклад, в гірській місцевості); а також методів оптимального поєднання вимірювань на основі радіо сигналів та сигналів від різних датчиків, таких як інерціальні платформи (в тому числі з гіроскопами).

Перспективними є також дослідження в нових сферах бездротових мереж сенсорів, де декілька вузлів обмінюються сигналами та інформацією для покращення своїх позицій[22]. В останнє десятиліття одним з найпопулярніших рішень стала локалізація об’єктів на основі Wi-Fi, яка вважається найбільш перспективною для дослідження відкритих питань як в науковому, так і в промисловому співтоваристві.

Основною концепцією бездротової мережі Wi-Fi є наявність точки доступу (AP), яка підключається до інтернет-сервісу провайдера і передає радіосигнал. Зазвичай точка доступу складається з приймача, передавача, дротового мережевого інтерфейсу та програмного забезпечення для швидкого налаштування. Навколо точки доступу формується мережа в радіусі 50–100 метрів (так звана точка доступу або зона Wi-Fi). Відстань передачі залежить від потужності передавача (в деяких моделях обладнання вона програмується), наявності та характеристик перешкод, таких як антени. Сьогодні широко використовується стандарт 802.11n, який забезпечує швидкість передачі даних до 320 Мбіт/с [6].

Методи позиціонування Wi-Fi можна розділити на дві основні групи. Одна з них базується на картографуванні та каталозі мап, складеному з даних супутникових систем (СС), а інша – на моделюванні поширення радіохвиль

(РХ) [7] або каналів зв’язку. Модель РХ визначає залежність між рівнем сигналу та відстанню. Для визначення відстані між відомими датчиками та пацієнтом можна використовувати алгоритми трилатерації [8], формула моделі кола наведена в (2.7):

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = d_i^2. \quad (2.7)$$

Це рівняння кола з центром (x_i, y_i) і діаметром d_i.

Оскільки в експериментах в розділах 3 та 4 використовується чотири точки доступу (АР), тоді формула (2.7) перетворюються в систему нелінійних рівнянь (2.8) [32]:

$$\begin{aligned} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 &= d_1^2; \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 &= d_2^2; \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 &= d_3^2; \\ (x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 &= d_4^2. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Після цього треба обчислити координати за формулою, наведеною в (2.9):

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 - (x - x_1)^2 - (y - y_1)^2 = d_2^2 - d_1^2. \quad (2.9)$$

І так робимо для кожної точки, тобто АР1 до АР2, АР1 до АР3, АР1 до АР4.

Отже, в нас є система (2.10) з трьох рівнянь:

$$\begin{aligned} a_1x + b_1y &= c_1; \\ a_2x + b_2y &= c_2; \\ a_3x + b_3y &= c_3, \end{aligned} \quad (2.10)$$

де b – це вектор, який містить константи правих частин [33] після перетворення системи кіл у систему лінійних рівнянь.

Проте наразі для встановлення зв’язку між відстанню та рівнем сигналу необхідно виконати кілька десятків вимірювань. Через це модель не можна вважати повністю динамічною, і вона потребує подальших досліджень та вдосконалення, зокрема таких як:

1) дослідити тенденції розвитку радіохвильових технологій у контексті проєктів з визначення місцеположення рухомих об’єктів;

2) аргументувати необхідність та виконати реалізацію MAC-орієнтованого підходу для спостереження за численними об’єктами в бездротовій сенсорній мережі;

3) створити алгоритм локалізації рухомих об’єктів на базі комплексного підходу до їх позиціонування та ідентифікації.

Визначимо межі використання різних методів визначення місцезнаходження рухомих об’єктів у системах з високим рівнем інформаційної безпеки.

Розглянемо позиціонування на основі моделювання поширення радіохвиль (RF) [8]. Автори використовують RSSI з Bluetooth; однак це не підходить для використання в закладі, оскільки для цього потрібен окремий пристрій або вмикати Bluetooth окремо на смартфоні. Метою такого моделювання є встановлення математичної залежності між відстанню від передавача до приймача та потужністю сигналу. Математичний вираз визначають за допомогою поліноміальної регресії третього порядку. Головною перевагою цієї технології є висока швидкість позиціонування. Важливо й те, що точки доступу (AP) мають фіксовані координати (рис. 2.2). Розробка методів визначення місця перебування пацієнта шляхом комбінування характеристик сигналів від точок доступу є актуальною задачею сьогодення. Водночас регресія потребує значного обсягу точної інформації про рівень сигналу за тривалий проміжок часу. Такий метод забезпечує точність позиціонування в межах 1–3 м. Для оцінювання ефективності технологій позиціонування застосовується інтегральний квадратичний критерій якості [9].

Для відстеження переміщення об’єкта також використовується радіочастотна система RADAR [10].

Принцип роботи RADAR полягає у запису та обробки інформації про рівень сигналу на декількох базових станціях, розташованих у зоні інтересу, щоб забезпечити перекриття покриття. Усунути небажані шуми в системах SONAR і

RADAR можна шляхом застосування методу формування променя, запропонованого в [11] і добре зарекомендувала себе при побудові окремої інфраструктури для застосунків телеметрії.

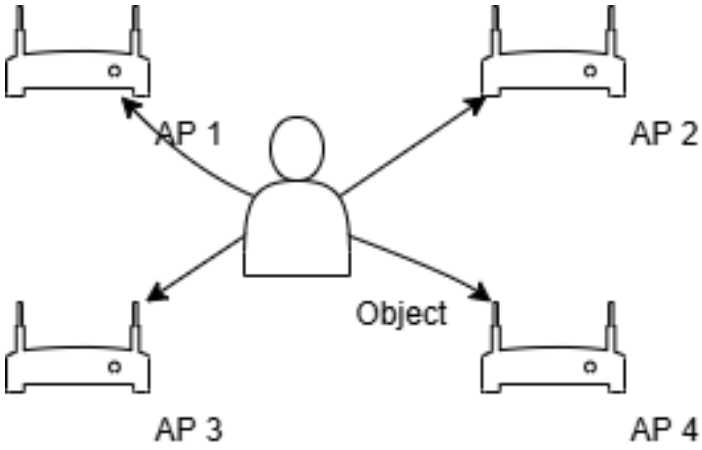


Рисунок 2.2 – Об’єкти в системі з фіксованою позицією AP

Застосовуючи технологію RADAR [10], мобільний пристрій використовує CC-карту цільової локації. Первинна CC-карта формується на основі координат, вимірювань CC та положення об’єкта. Потужність сигналу з кожної точки доступу зіставляється з відповідною інформацією з бази даних, після чого визначається передбачуване місцезнаходження.Середня похибка цього методу становить 1,78 м, але максимальна похибка може досягати 40 м [12]. Таким чином, якщо необхідно визначити місцезнаходження рухомого об’єкта з більшою точністю, то необхідно звернутися до інших методів позиціонування такого об’єкта.

2.5 Застосування CSI у бездротових мережах для ідентифікації об’єктів

Інформація про канал (CSI) – це сукупність комплексних коефіцієнтів Wi-Fi каналу для кожної піднесучої, які описують загасання та фазовий зсув сигналу. У реальному оточенні сигнал прямує складним багатопроменевим шляхом (відбиття, дифракція, розсіювання), тому CSI фіксує ці численні траєкторії, стаючи своєрідною «зоровою пам’яттю» середовища[13; 14]. Навіть незначні рухи об’єкта або просто його поява змінюють шари відбиттів – і це унікально відображається у CSI. Експерименти свідчать, що тимчасові

коливання амплітуди CSI демонструють специфічні схеми для різних об’єктів, дій та рухів [14].

CSI описується чотиривимірним тензором [15], котрий містить інформацію про час, частоту та розташування антен MIMO. Він охоплює зміни багатопроменевого каналу. Зміни навколишнього середовища у приміщенні, такі як рух об’єкта або відкриття дверей, викликають помітні коливання в CSI. Виявити такі зміни можна саме завдяки цим коливанням. Дослідженнями доведено, що амплітудні моделі CSI різних об’єктів значно відрізняються.

Щоб підготувати дані CSI, застосовують попередню обробку даних. Це може бути калібрування фази, яке усуває зсуви в часі або частоті. Також використовуються середньозважені, медіанні або низькочастотні фільтри для очищення від шумів. Видаляються аномальні стрибки. Ці дії збільшують надійність сенсорної системи і дозволяють виділити корисні особливості сигналу.

За допомогою CSI можна ідентифікувати наступні класи об’єктів:

а) **Люди.** CSI дає змогу не тільки констатувати наявність людини, але й диференціювати конкретних осіб, точно ідентифікувати особистість (Person ReID). Так, двопотокова нейронна мережа (аналіз часу і частоти) показала Rank-1 $\approx$ 98,13 % у задачі ReID, а трансформерна модель для пасивної ідентифікації досягла 99,82 % точності [16];

б) **Безумовні пристрої.** Пристрої Wi-Fi (смартфони, лептопи, роутери тощо) мають індивідуальні апаратні «відтінки» на CSI [17]. Різниця фазових відхилень між антенами є стійким маркером, котрий уможливлює розрізнення приладів. Використання CNN на подібних ознаках RPE забезпечило точність $>$ 98 % у визначенні пристроїв та розпізнаванні шкідливих точок доступу;

в) **Об’єкти.** Статичні або динамічні предмети також впливають на сигнал. У системах безпеки продемонстровано, що речі, заховані в багажі (ноутбук, одяг, пляшка з водою), можуть бути класифіковані за CSI з точністю близько 97 % [18]. Існують дослідження, спрямовані на визначення матеріалу об’єктів (дерево,

метал та інше) на базі статистичних даних CSI [19]. Таким чином, за допомогою CSI можна розпізнавати не лише осіб та пристрої, але й деякі предмети або стани (наприклад, відчинені/зачинені двері, тип рідини у ємності тощо).

Для обробки сигналів CSI використовуються наступні алгоритми та методи:

– передобробка і фільтрація: на «сирих» даних CSI видаляють фазові зсуви та артефакти (усувають затримки синхронізації, дрейф частоти тощо), а також застосовують фільтри (середнє, медіанне, смугові тощо) для згладжування шумів. Це необхідно, бо без обробки шум та нестабільності апаратури призводять до похибок;

– операції перетворення: для виділення характерних ознак можуть використовуватися перетворення Фур'є та хвильові перетворення, що показують енергію сигналу в частотному домені. Також застосовують методи обчислення кутів приходу (AoA) і часу затримки (ToF) багатопроменевих компонент, які дозволяють локалізувати об'єкти;

– видобуток ознак: з даних CSI виокремлюють різноманітні статистичні показники (середнє, дисперсія, крос-кореляція між датчиками(антенами), спектральні дескриптори тощо). Наприклад, просто статистики амплітуди CSI можна подавати на SVM чи RandomForest для класифікації;

– класифікація: для ідентифікації об'єктів застосовують машинне навчання. Раніше використовували SVM, RandomForest чи k-NN; зараз активніше – глибокі нейромережі, які самостійно виділяють релевантні ознаки із послідовності CSI.

Незважаючи на очевидні переваги, CSI має і суттєві недоліки, серед яких:

– багатопроменевість (через велику кількість відбиттів невеликі зміни положення об'єкта можуть призводити до сильних спотворень CSI. Водночас, сигнали від різних об'єктів накладаються, що ускладнює відокремлення впливу саме того, кого/що необхідно ідентифікувати;

– інтерференція та шум (на CSI впливають перешкоди від інших мереж чи пристроїв. У комунікаційних схемах рівняльники намагаються усувати ко-канальну інтерференцію, але в сенсорному режимі ці перешкоди викликають похибки у вимірах. Для надійності потрібно фільтрувати шум та мати механізми виявлення аномальних варіацій);

– зміни середовища (ідентифікаційні моделі часто надто підлаштовані під початкове середовище. Експерименти показують, що без перенавчання точність може різко впасти (з ≈ 85 % до ≈ 30 %) при зміні геометрії приміщення. Тобто модель, натренована в одній кімнаті, може не працювати в іншій без адаптації);

– апаратна різнорідність (різні Wi-Fi чіпи та драйвери дають дещо відмінні CSI. Невирівняні фазові зсуви (похибки апаратури) можуть погіршувати результати. З іншого боку, саме ці специфічні зрушення фази стали в нагоді для відтворення «апаратних відбитків» пристроїв. Однак їх слід враховувати при перенесенні моделей між пристроями).

Висновки до розділу 2

У другому розділі проаналізовано сучасні методи визначення місцезнаходження та ідентифікації рухомих об’єктів у бездротових мережах із акцентом на технології WiFi-позиціонування. Встановлено, що найпоширенішим підходом щодо локалізації об’єктів, є метод WiFi-відбитків (англ. Fingerprinting), який базується на використанні векторів RSSI, сформованих у процесі попереднього вимірювання в контрольованому середовищі. Незважаючи на свою ефективність у середовищах із відсутністю сигналу GPS, даний метод є чутливим до змін у середовищі, багатопроменевих ефектів та тимчасової нестабільності радіосигналів.

Проведений аналіз свідчить про доцільність використання алгоритму k-найближчих сусідів (k-NN) як простого та гнучкого інструменту для реалізації задач позиціонування. Метод демонструє прийнятні результати за умови попередньої нормалізації ознак та відсутності значних шумових впливів.

Підвищення точності k-NN можливе шляхом використання вагових коефіцієнтів, що враховують відстань до сусідів.

Окрему увагу приділено баєсівським моделям, які, завдяки своїй ймовірнісній природі, забезпечують більш точне моделювання невизначеностей, що притаманні аналізу інформації про стан каналу (CSI). Ці моделі дозволяють враховувати залежності між параметрами сигналу, такими як амплітуда, фаза, спектральна щільність потужності та тип середовища поширення.

Аналіз функціонування WiFi-позиціювання з використанням даних, отриманих з інформаційних пакетів, засвідчив перспективність підходів, що базуються на частішому оновленні координат через трафік даних, а не через зондувальні кадри. Це дозволяє отримувати більш стабільні та точні вимірювання, зокрема на пристроях з обмеженим доступом до апаратних інтерфейсів (наприклад, iOS).

Показано, що використання технологій сніфінгу (пасивного перехоплення кадрів) для визначення позиції користувача є доцільним за умови забезпечення належного рівня інформаційної безпеки. Водночас, важливо враховувати юридичні та етичні аспекти такого підходу в контексті захисту персональних даних.

Розглянуто також методи позиціонування, що базуються на моделюванні поширення радіохвиль, зокрема із застосуванням поліноміальної регресії та систем типу RADAR. Ці методи демонструють високу точність позиціонування (до 1–3 м), однак потребують значного обсягу навчальних даних та належної калибровки середовища.

CSI у бездротових мережах відкриває потужні можливості для неінвазивного ідентифікаційного сенсингу: від розпізнавання людей та пристроїв до виявлення конкретних предметів. Комбінація фізичних моделей каналу та сучасних методів ML/DL забезпечує високу точність у численних застосунках (розумний дім, безпека, моніторинг руху тощо). Разом із тим, практичне впровадження вимагає подолання викликів: нестабільності середовища, перешкод, розмаїття апаратури та потреби у масштабованих

датасетах для навчання. Із розвитком стандартів (наприклад, 802.11bf) та вдосконаленням алгоритмів CSI-сенсингу ці проблеми поступово вирішуються, роблячи CSI-системи все більш надійними та практичними

Отже, сформульовано висновок щодо доцільності поєднання кількох методів визначення локації та ідентифікації об’єктів з метою підвищення точності, надійності й адаптивності системи. Подальші дослідження слід зосередити на розробці комплексних алгоритмів, що поєднують дані з різних джерел (Wi-Fi, сенсори, інерціальні платформи), а також на побудові кооперативних систем локалізації та ідентифікації з урахуванням динамічних характеристик середовища.

Список використаних джерел до розділу 2

1. Zhang Yu, Song X., Wei Yo. Evaluate K NN stream queries by cache mechanisms. *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*. 2025. Vol. 0 (0). DOI: 10.1177/14727978251358736.

2. Tohoiev O., Burlachenko I., Zhuravska I., Savinov V. The monitoring system based on a multi-agent approach for moving objects positioning in wireless networks. *CEUR Workshop Proceedings* [ed.: S. Subbotin]. 2020. Vol. 2608. P. 79–90. DOI: 10.32782/cmis/2608-7.

3. Abazorius A. New system allows for high-accuracy, through-wall, 3-D motion tracking. *Massachusetts Institute of Technology News* : web site. Publ. Dec. 11, 2013. URL: https://news.mit.edu/2013/new-system-allows-for-high- accuracy-through-wall-3-d-motion-tracking-1211 (Last accessed: 13.05.2025).

4. Li Yi., Wu H., Meng D., Gao G., Lian C., Wang X. Ground positioning method of spaceborne SAR high-resolution sliding-spot mode based on antenna pointing vector. *Remote Sensing*. Vol. 202214, No. 5233. P. 1–19. DOI: 10.3390/rs14205233.

5. Santerre R., Pan L., Cai C. Single point positioning using GPS, GLONASS and BeiDou satellites. *Positioning*. 2014. Vol. 5. P. 107–114. DOI: 10.4236/pos.2014.54013.

6. Chenglian Y., Lazebny V. S. Analysis of the research of real bandwidth in standard IEEE 802.11 wireless networks. *Problems of informatization and management.* 2019. Vol. 1, No. 61. P. 30–39. DOI: 10.18372/2073-4751.1.14033.

7. Pasichnyk V., Savchuk V., Yegorova O. Mobile information technologies of navigation of a user in complex indoor environment. *Bulletin of the Lviv Polytechnic National University, Radio electronic devices and systems.* 2016. Vol. 849. P. 236–240. URL: https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/jun/4933/p29_0.pdf

8. Burlachenko I., Zhuravska I., Musiyenko M. Devising a method for the active coordination of video cameras in optical navigation based on multi-agent approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2017. Vol. 1/9 (85). P. 17–25. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.90863.

9. Jianyong Z., Haiyong L., Zili C., Zhaohui L. RSSI based bluetooth low energy indoor positioning. *Proc. of the 2014 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN),* Busan. 2014. P. 526–533 DOI: 10.1109/IPIN.2014.7275525.

10. Antonucci A., et al., Performance analysis of a 60-GHz radar for indoor positioning and tracking. *Proc. of the 2019 Int. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN),* Pisa, Italy, 30 September – 3 October 2019. P. 1–7. DOI: 10.1109/IPIN.2019.8911764.

11. Rahman M. Z. U., Aswitha P. V. S., Sriprathyusha D., Sameera Farheen S. K. Beamforming in cognitive radio networks using partial update adaptive learning algorithm. *Acta IMEKO*. 2022. Vol. 11 (1). P. 1–8. DOI: 10.21014/acta_imeko.v11i1.1214.

12. Huang X., Tsoi J.K.P., Patel N. mmWave radar sensors fusion for indoor object detection and tracking. *Electronics.* 2022. Vol. 11(14). P. 1–22. DOI: 10.3390/electronics11142209.

13. Li Q., Liu W., Zhang Z., Sun F., Chen R. Efficient and high-accuracy ray tracing in discretized ionospheric models. 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2506.18579.

14. Ma Yo., Zhou G., Wang S. WiFi Sensing with Channel State Information: A Survey. *ACM Computing Surveys*. 2019. Vol. 52. P. 1–36. DOI: 10.1145/3310194.

15. Chen E., Han Yu., Li J. High-dimensional tensor discriminant analysis with incomplete tensors. 2024. arXiv:2410.14783. DOI: 10.48550/arXiv.2410.14783.

16. Mao C., Tan C., Hu J., Zheng M. Time-frequency analysis of variable-length WiFi CSI signals for person re-identification. 2024. arXiv.2407.09045. DOI: 10.48550/arXiv.2407.09045.

17. Cominelli M., Gringoli F., Restuccia F. Exposing the CSI: A systematic investigation of CSI-based Wi-Fi sensing capabilities and limitations. *2023 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom)*. 2023. P. 81–90. DOI: 10.1109/PERCOM56429.2023.10099368.

18. Shi C., Zhao T., Xie Yu., Zhang T., Wang Ya., Guo X., Chen Yi. Environment-independent in-baggage object identification using WiFi signals. *2021 IEEE 18th International Conference on Mobile Ad Hoc and Smart Systems (MASS), Denver, CO, USA*. 2021. P. 71–79. DOI: 10.1109/MASS52906.2021.00018.

19. Li C., Li, F., Du W., Yin L., Wang B., Wang C., Luo T. A material identification approach based on Wi-Fi signal. *Computers, Materials & Continua*. 2021. Vol. 69. P. 3383–3397. DOI: 10.32604/cmc.2021.020765.

20. Abuhoureyah F., Wong Ya. C., Isira A. S. B. M., Al-Andoli M. N. CSI-based location independent human activity recognition using deep learning. *Human-Centric Intelligent Systems*. 2023. Vol. 3. DOI: 10.1007/s44230-023-00047-x.

21. Abuhoureyah F., Chiew W. Ya., Zitouni M. S. WiFi-based human activity recognition using multi-head adaptive attention mechanism. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*. 2024. Vol. 47. P. 1–16. DOI: 10.3233/JIFS-234379.

22. Бурлаченко І. С., Савінов В. Ю., Тогоєв О. Р. Мультиагентна система позиціонування рухомих об’єктів як хостів бездротової мережі. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2020. Т. 1, № 5 (288). С. 72–80. DOI: 10.31891/2307-5732-2020-289-5-72-80.

23. Wang Z., Zhang J. A., Xu M., Guo Y. Single-target real-time passive WiFi tracking. 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2109.06006.

24. Gao X., Hou T., Shin H., Nallanathan A. LoC-WiFi-SLAM: Low-complexity of WiFi-enhanced SLAM. *IEEE Transactions on Communications*. 2025. DOI: 10.1109/TCOMM.2025.3571919

25. Paranjape I., Hussein I., Murray-Krezan J., Phillips S., Chakravorty S. Sensor fusion methods for Gaussian mixture models. 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2506.00383.

26. Clark M., Berry S. Generalized Linear Models. 2025. DOI: 10.1201/9781003451501-8

27. Park K.-D., Yoon W.-J., Lee J.-S. Reduction of multipath effect in GNSS Positioning by applying pseudorange acceleration as weight. *Sensors*. 2024. DOI: 10.3390/s24216880.

28. Zhao Q., Xu F., Feng L., Zhou M., Shen M., Zhang P., Sun Y. CollFree: Exploiting full-duplex capabilities in WiFi contention for enhanced throughput efficiency. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2025. DOI: 10.1109/JSAC.2025.3584431.

29. Li B., Yu X., Chen J., Zheng J., Yang Z., Zhang J. Gesture recognition based on WiFi signals with the ability of cross-user and cross-orientation. *IEEE Sensors Journal*. 2025. DOI: 10.1109/JSEN.2025.3585572.

30. Nagalla S., Inturi Y., Inturi B., i Research. Adaptive resource allocation and cost optimization in cloud computing. *International Journal of Advanced Research in Engineering & Technology*. 2025. Vol. 16. P. 310–328. DOI: 10.34218/IJARET_16_02_019.

31. Chun H., Rajbhandari S., Faulkner G., Xie E., McKendry J., Gu E., Dawson M., O'Brien D. Optimum device and modulation scheme selection for optical wireless communications. *Journal of Lightwave Technology*. 2021. DOI: 10.1109/JLT.2021.3051379.

32. Saff E., Snider A. Linear Systems of Differential Equations. 2025. DOI: 10.1007/978-3-031-97222-5_7.

33. Carstensen C., Nataraj N. A priori and a posteriori error analysis of the Crouzeix-Raviart and Morley FEM with original and modified right-hand sides.

Computational Methods in Applied Mathematics. 2021. DOI: 10.1515/cmam-2021-0029.

34. Sanson J., Shah R. C., Pinaroc M., Frascolla V. Extracting range-Doppler information of moving targets from Wi-Fi Channel State Information : Preprint. August 2025. 6 p. DOI: 10.48550/arXiv.2508.02799.

35. Zeng Yo., Wu D., Xiong J., Zhang D. Boosting WiFi sensing performance via CSI ratio. *IEEE Pervasive Computing*. 2020. Vol. 99. P. 1–9. DOI: 10.1109/MPRV.2020.3041024.

36. Gao R., Zhang M., Jie Z., Li Ya., et. al. Towards position-independent sensing for gesture recognition with Wi-Fi. *Proceedings of the ACM on Interactive Mobile Wearable and Ubiquitous Technologies*. 2021. Vol. 5, Is. 2. P. 1–28. DOI: 10.1145/3463504.

37. Jiang D., Li M., Xu C. WiGAN: A WiFi based gesture recognition system with GANs. *Sensors.* 2020. Vol. 20, Is. 17, No. 4757. DOI: 10.3390/s20174757

РОЗДІЛ 3
РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПОШУКУ ОБ'ЄКТІВ ТА ЇХ ІДЕНТИФІКАЦІЇ НА ОСНОВІ ПАРАМЕТРІВ WIFI-СИГНАЛУ

Тема дослідження передбачає два напрямки роботи – це пошук об'єктів та їх ідентифікація. Як описано у попередніх розділах, універсальні засоби, які були б достатньо ефективними для обох напрямків, відсутні. Тому в даному розділі ці засоби розглядатимуться окремо. В підрозділі 3.1 обґрунтований вибір апаратних засобів для обох напрямків дослідження. В підрозділі 3.2 буде описано окремо мови програмування та бібліотеки які будуть використані в експериментах з пошуку та ідентифікації об'єктів. Підрозділ 3.3 міститиме алгоритми експериментів.

3.1 Вибір апаратних засобів

3.1.1 Вибір апаратних засобів для пошуку об'єктів за допомогою RSSI

Для реалізації системи пошуку об'єктів було використано два типи точок Mikrotik RB952Ui-5ac2nD та Mikrotik RBD52G-5HacD2HnD-TC.

MikroTik hAP ac lite (модель RB952Ui-5ac2nD) – це дводіапазонний WiFi -роутер, який працює одночасно на частотах 2,4 ГГц і 5 ГГц. Підтримує роботу в бездротових стандартах 802.11a/b/g/n/ac. Основні його характеристики наведені в табл. 3.1–3.2.

Таблиця 3.1 – Характеристики MikroTik RB952Ui-5ac2nD

Характеристики Wi-Fi					
RATE (2,4 GHz)	Rx, dBm	Tx, dBm	RATE (5 GHz)	Rx, dBm	Tx, dBm
1 Mbit/s	22	–96	6 Mbit/s	23	–93
11 Mbit/s	22	–89	54 Mbit/s	20	–75
6 Mbit/s	20	–93	MCS0	23	–93
54 Mbit/s	18	–74	MCS7	19	–71
MCS0	20	–93	MCS9	16	–63
MCS7	16	–71			

Таблиця 3.2 – Тести продуктивності MikroTik RB952Ui-5ac2nD

RB952Ui-5ac2nD		QCA9531 (650 MHz) 100M all port test					
Mode	Configuration	1518 byte		512 byte		64 byte	
		kpps	Mbps	kpps	Mbps	kpps	Mbps
Bridging	none (fast path)	40,6	493,0	117,4	480,9	217,0	111,1
Bridging	25 bridge filter rules	40,6	493,0	70,1	287,1	70,9	36,3
Routing	none (fast path)	40,6	493,0	117,4	480,9	200,8	102,8
Routing	25 simple queues	40,6	493,0	79,6	326,0	90,8	46,5
Routing	25 IP filter rules	40,6	493,0	42,2	172,8	43,2	22,1

Перевагою hAP ac lite є підтримка роботи на частоті 5 ГГц, що дозволяє йому забезпечити стабільне функціонування в багатоповерхівках і офісних будівлях з високим рівнем перешкод.

На корпусі маршрутизатора розміщено повнорозмірний порт USB 2.0, призначений для підключення зовнішніх накопичувачів або 3G/4G-модемів. Модель MikroTik RB952Ui-5ac2nD підтримує живлення як від блоку живлення, так і через перший мережевий порт за технологією Passive POE. Через п’ятий мережевий порт можна подавати живлення 24 В; 0,5 А за технологією Passive Power over Ethernet (PoE) на інший пристрій, наприклад, для живлення точки доступу в іншій кімнаті чи на подвір’ї.

MikroTik hAP ac2 (RBD52G-5HacD2HnD-TC) це двосмуговий WiFi-маршрутизатор із п’ятьма портами на 1Gbit/s. Він також має USB-порт для підключення зовнішніх накопичувачів або 3G/4G-модемів. Пристрій підтримує апаратне шифрування IPsec і дає змогу встановлювати пакет The Dude Server, який використовується для моніторингу мережевих пристроїв, серверів і сервісів, встановлення між ними зв’язків та сповіщення у разі виникнення збоїв.

WiFi-роутер MikroTik hAP ac2 працює на 2,4 ГГц і 5 ГГц, продуктивний, надійний, підтримує апаратне шифрування. Основні його характеристики наведені в табл. 3.3–3.4.

Таблиця 3.3 – Характеристики MikroTik RBD52G-5HacD2HnD-TC

Характеристики Wi-Fi					
RATE (2,4 GHz)	Rx, dBm	Tx, dBm	RATE (5 GHz)	Rx, dBm	Tx, dBm
1 Mbit/s	27	–100	6 Mbit/s	26	–96
11 Mbit/s	27	–94	54 Mbit/s	22	–80
6 Mbit/s	27	–96	MCS0	26	–96
54 Mbit/s	24	–78	MCS7	21	–75
MCS0	27	–96	MCS9	19	–70
MCS7	23	–73			

Таблиця 3.4 – Тести продуктивності MikroTik RBD52G-5HacD2HnD-TC

RBD52G-5HacD2HnD-TC		IPQ-4018 1G all port test					
Mode	Configuration	1518 byte		512 byte		64 byte	
		kpps	Mbps	kpps	Mbps	kpps	Mbps
Bridging	none (fast path)	162,5	1973,4	469,9	1924,7	1484,8	760,2
Bridging	25 bridge filter rules	162,1	1968,5	352,9	1445,5	359,2	183,9
Routing	none (fast path)	162,5	1973,4	469,9	1924,7	1488	761,9
Routing	25 simple queues	162,5	1973,4	469,9	1924,7	506,3	259,2
Routing	25 IP filter rules	162,2	1969,8	240,8	986,3	242,9	124,4

Отже, маршрутизатори MikroTik – RB952Ui-5ac2nD (hAP ac lite) та RBD52G-5HacD2HnD-TC (hAP ac2) це поширені WiFi-роутери з різними рівнями потужності. Порівняння характеристик обох маршрутизаторів наведено в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Порівняння характеристики AP

Параметр	hAP ac2	hAP ac lite
Стандарти WiFi	Wi-Fi 3 (802.11g) Wi-Fi 4 (802.11n) Wi-Fi 5 (802.11ac)	
Частотний діапазон, ГГц	2,4 та 5	
Макс. швидкість, Mbps	867	433
Швидкість LAN/WAN портів	1 Gbps	100 Mbps
Коефіцієнт підсилення, dBi	2,5	2
Потужність передавача, dBm	27	23
Потужність сигналу 2,4 ГГц, dBm	26	22
Потужність сигналу 5 GHz, dBm	26	23
Процесор	716 МГц, 4 ядра (IPQ-4018 ARM)	650 МГц, 1 ядро (QCA9531)
Оперативна пам’ять	128 Мбайт RAM	64 Мбайт RAM
Порти Ethernet	5 × Gigabit (10/100/1000 Mbps)	5 × 10/100 Mbps
PoE (Power over Ethernet)	Вхід тільки (без PoE-out)	Вхід + PoE-out на 5-му порту
Firewall/NAT/Queues	Обмежено (одне ядро)	Добре працює (4 ядра ARM)

З табл. 3.5 видно, що hAP ac lite є недорогим компактним пристроєм, що працює лише з Fast Ethernet (100 Mbps), має PoE-out, що зручно для живлення іншого пристрою, може бути застосований для простих задач. Тоді як hAP ac2 має багатоядерний процесор, підтримує Gigabit Ethernet, має USB-порт

(для 3G/4G модемів, накопичувачів), має кращу продуктивність для VPN, фаєрволів, QoS.

3.2.2 Вибір апаратних засобів для ідентифікації об’єктів за допомогою CSI

ESP32 – це серія високопродуктивних мікроконтролерів від Espressif Systems, з 32-бітним процесором Tensilica Xtensa LX6 в основі. Вона була розроблена для різноманітних задач, зокрема для IoT (Internet of Things, укр. Інтернет речей), а також для обробки даних, отриманих з різних сенсорів.

ESP32 є відкритою платформою, містить апаратну і програмну складові, надаючи розробникам можливість створювати проєкти та коригувати вихідний код згідно власних потреб. Для розробки застосунків використовується мова програмування C/C++. ESP32 підтримується широкою спільнотою розробників, має багатий арсенал бібліотек, прикладів коду та документації, що спрощує процес розробки.

Мікроконтролер ESP32 оснащено значною кількістю портів вводу/виводу (GPIO). Це надає можливість працювати з багатьма інтерфейсами (UART, SPI, I2C), що значно спрощує підключення до датчиків, модулів та різноманітних пристроїв, розширюючи можливості збору інформації.

Для розробки системи ідентифікації об’єктів, що використовує дані CSI з WiFi-мережі, ключовим є вибір мікроконтролера. Він відповідає за збір та ефективну обробку інформації. Нижче наведені технічні характеристики найбільш поширених варіантів серії ESP32: ESP32-S2; ESP32-S3; ESP32-C3; ESP32-C6.

ESP32 – універсальний бюджетний мікроконтролер, розроблений компанією Espressif Systems 2016 року.

ESP32 є ефективний для розробки проєктів, що потребують значних обчислювальних ресурсів, здатності працювати з багатьма задачами водночас та широкого набору інтерфейсів. Завдяки двоядерному процесору, значній кількості контактів GPIO та підтримці бездротових технологій Wi-Fi та

Bluetooth, він чудово підходить для складних IoT-застосунків, систем обробки даних, які працюють в режимі реального часу, та розробок, для роботи яких необхідно бездротове з'єднання.

ESP32-S2 зпроєктований для роботи з низьким енергоспоживанням та має інтегрований USB-інтерфейсом, який полегшує програмування та підключення до комп'ютера. Водночас відсутність Bluetooth і одноядерний процесор можуть звужувати можливості його використання в окремих сценаріях.

ESP32-S3 – це є покращена версія мікроконтролера, оснащений двоядерним процесором та підтримує Bluetooth 5.0 LE, що робить його хорошим вибором для IoT-проєктів. Збільшена оперативна пам'ять і більша кількість GPIO-виводів сприяють його використанню, зокрема, для обробки даних CSI.

Мікроконтролер ESP32-C3 особливо корисний для проєктів, ключові вимоги яких – зменшення розміру та заощадження бюджету. Архітектура RISC-V передбачає економію енергії, але менша кількість входів/виходів загального призначення (GPIO) та нижча тактова частота звужують можливості його використання в проєктах, які потребують обробки даних CSI.

ESP32-C6 вирізняється здатністю працювати з Wi-Fi як на 2,4 ГГц, так і на 5 ГГц, на додачу до підтримки стандарту IEEE 802.15.4. Це робить його ефективним для систем, де необхідні різні протоколи комунікації. Збільшена кількість GPIO, порівняно з ESP32-C3, уможливлює підключення різноманітних сенсорів та периферійних пристроїв.

Порівняння характеристик мікроконтролерів ESP32 наведено в табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Характеристики мікроконтролерів серії ESP32 [10]

Параметри	**Моделі**			
	ESP32	**ESP32-S2**	**ESP32-S3**	**ESP32-C3**
Процесор	Tensilica Hitensa 32-bit LX6	Tensilica Hitensa 32-bit LX7	Tensilica Hitensa 32-bit LX7	RISC-V 32-bit
SRAM, kbyte	520	320	512	400

Параметри	**Моделі**			
	ESP32	**ESP32-S2**	**ESP32-S3**	**ESP32-C3**
ROM, kbyte	448	128	384	384
JTAG	Так	Так	n/a	Так
Кеш, kbyte	64	8/16 (configurable)	n/a	16
Версія Wi-Fi	Wi-Fi 4			
Версія Bluetooth	BLE 4.2 (upgrade to 5.0, with limitations)	Hi	BLE 5.0	BLE 5.0
Ethernet	Так	Hi	n/a	Hi
RTC memory, kbyte	16	16	16	8
PMU	Так	Так	n/a	Так
ULP coprocessor	Так	ULP-RISC-V	n/a	Hi
Cryptographic Accelerator	SHA, RSA, AES, RNG	SHA, RSA, AES, RNG, HMAC, Digital Signature	SHA, RSA, AES, RNG, HMAC, Digital Signature	SHA, RSA, AES, RNG, HMAC, Digital Signature
Secure boot	Так	Так	Так	Так
Flash encryption	Так	XTS-AES 128/256	Так	XTS-AES 128
SPI	4	4	n/a	3
I2C	2	2	n/a	1
I2S	2	1	n/a	1
UART	3	2	n/a	2

Параметри	**Моделі**			
	ESP32	**ESP32-S2**	**ESP32-S3**	**ESP32-C3**
GPIO	34	43	44	22
LED PWM	16	8	n/a	6
MCPWM	6	0	2	0
Pulse counter	8	4	n/a	0
USB	Hi	USB OTG 1.1	n/a	Serial/JTA G
ADC	2 × 12-bit SAR, up to 18 channels	2 × 13-bit SAR, up to 20 channels	n/a	2 ×12-bit SAR, up to 6 channels
DAC	2 × 8-bit	2 × 8-bit	n/a	Hi
RMT	8 × transmission/ reception	4 × transmission/rec eption	n/a	2 × transmission + 2 × reception
Таймер	4 × 64-bit	4 × 64-bit	n/a	2 × 54-bit + 1 × 52-bit
Temperature Sensor	Так	Так	n/a	Так
Hall Sensor	Так	Hi	n/a	Hi
Touch Sensor	10	14	n/a	Hi

Отже, у процесі конструювання системи розпізнавання об’єктів, що оперує даними CSI мережі Wi-Fi, було взято за основу ESP32 (плата ESP32-DevKit-V1). Наш вибір зумовлений його двоядерним процесором, достатнім обсягом пам’яті, наявністю GPIO та підтримкою Wi-Fi стандарту 802.11n. Водночас, ця варіація

мікроконтролера характеризується найбільшою поширеністю та помірною вартістю. Крім того, ESP32-DevKit-V1 є повністю сумісним з інструментом ESP32-CSI-Tool для збору даних про стан Wi-Fi каналу, що підтверджується списком протестованих пристроїв в офіційній документації.

Викладене вище дозволяє вважати ESP32 (плати ESP32-DevKit-V1) найбільш доцільним рішенням розробки системи ідентифікації об’єктів, що використовує дані CSI з Wi-Fi мережі. Технічні властивості мікроконтролера в повній мірі задовольняють всі вимоги до апаратної складової.

3.2 Вибір засобів розробки систем пошуку та ідентифікації об’єктів

Для розробки інтерактивної комп’ютерної мережі пошуку об’єктів через аналіз мережевого трафіку було обрано Python. Це високорівнева мова з динамічною типізацією та об’єктно-орієнтованим підходом, що суттєво спрощує читання й аналіз коду. Її перевагою є здатність взаємодіяти з великою кількістю бібліотек, потрібних для реалізації алгоритмів машинного навчання. Завдяки цьому Python є дієвим інструментом для створення систем, що застосовують нейронні мережі для обробки трафіку.

В даному дослідженні було використано наступні бібліотеки та інтерфейси: Pandas, routeros_api.

Pandas – програмна бібліотека [18], розроблена для опрацювання й аналізу даних. Вона має набір засобів для взаємодії з різноманітними структурами даних та здійснення маніпуляцій, зокрема фільтрації, сортування, групування та агрегації. Ці засоби полегшують операції з числовими таблицями й часовими рядами. Крім того, бібліотека забезпечує функціонал для читання та збереження даних з різних джерел, зокрема файлів CSV, баз даних SQL та файлів Excel.

Бібліотека дозволяє: індексувати дані та маніпулювати ними; має інструменти для зчитування та записування даних з файлів різних форматів; вирівнювати файли та підтримувати пропущені; переформатовувати дані для отримання зведень; робити зрізи за мітками, отримувати під набори даних з великих наборів; здійснювати операції розділення-зміни-об’єднання даних;

ієрархічно індексувати дані; виконувати різноманітні і складні операції з часовими рядами. В процесі розвитку Pandas була значною мірою удосконалена. Критичні ланцюги її коду написано на Cython [1] та C.

Routeros_api – це Python-бібліотека [19], яка надає можливість працювати з пристроями MikroTik, використовуючи офіційний API [2] (не через SSH [3] або CLI [4], а безпосередньо через API-протокол MikroTik).

Ця бібліотека дозволяє:

– отримувати інформацію з MikroTik (IP-адреси, списки користувачів, стан інтерфейсів, дистанційно моніторити процеси);

– змінювати налаштування (додавати правила фаєрволу, налаштовувати DHCP, PPP, маршрути);

– автоматизувати завдання без потреби відкривати WinBox чи Web UI.

Такий підхід є практичним, швидким та гарантує безпеку для автоматизації, збору статистики або дистанційного управління. Серед недоліків слід вказати, що бібліотека працює лише з RouterOS API.

Для розробки програмного забезпечення системи розпізнавання об’єктів на базі CSI WiFi-мережі було вибрано дві основні мови програмування: C++ для роботи з мікроконтролером ESP32 [5] та Python для обробки й візуалізації даних на комп’ютері.

Перевага C++, у цьому випадку перевага полягає в можливості забезпечувати низькорівневий доступ до апаратних функцій підключення до бездротових сенсорних мереж і віддалений доступ до датчиків (антен), за допомогою яких можна отримати інформацію про стан каналів зв’язку.

Код для ESP32, написаний мовою C++, було скомпільовано за допомогою cmake утиліти, з використанням середовища розробки(IDE) від Espressif. У результаті, скомпільована програма легко оптимізується для конкретної архітектури мікроконтролера, що забезпечує максимально ефективну роботу.

Ще однією перевагою C++, важливою для нашого експерименту, є велика кількість бібліотек для роботи з різними пристроями, датчиками та сенсорами, зокрема бібліотек для ESP32 від Espressif. Усе програмне забезпечення, що

забезпечує взаємодію з WiFi-модулем і отримання CSI-даних у межах дослідження, було реалізовано саме мовою C++.

На противагу C++, Python є інтерпретованою мовою з динамічною типізацією. Це забезпечує їй більшу гнучкість і портативність, оскільки один і той самий код може працювати на різних операційних системах без необхідності перекомпіляції.

Важливою перевагою Python є наявність широкого набору бібліотек для візуалізації (PyQtGraph, Matplotlib, Plotly), обробки даних (NumPy, SciPy) та машинного навчання (TensorFlow, Scikit-learn). Зокрема, для відображення даних і створення графічного інтерфейсу (GUI) застосунку планується використовувати бібліотеку PyQt5.

PyQt це обгортка для мови Python над кросплатформною бібліотекою Qt, що використовується для створення GUI-застосунків. Використання PyQt дозволило поєднати простоту та гнучкість Python із розширеними можливостями Qt для розробки сучасних і інтерактивних інтерфейсів користувача.

Однією з важливих переваг PyQt у межах нашого дослідження є наявність PyQtGraph – спеціалізованого інструмента для побудови різноманітних високоякісних графіків (лінійних, стовпчикових, точкових, 3D-поверхонь тощо) та відображення даних. Завдяки цьому стало можливим візуалізувати CSI-дані, отримані в різних форматах.

Крім того, PyQt містить QtDesigner – інструмент для розробки графічного інтерфейсу за допомогою зручного візуального конструктора. Під час експериментів QtDesigner дозволив створювати вікна застосунків, розташовувати в них віджети (кнопки, поля введення, діаграми тощо) та налаштовувати їх властивості. Це помітно спростило та прискорило процес створення інтерфейсів. Порівняно з іншими популярними бібліотеками візуалізації даних для Python (нп., Matplotlib), PyQt має певні переваги (табл. 3.7).

Таблиця 3.7 – Порівняння PyQt та Matplotlib

Критерій	**PyQt (PyQtGraph)**	**Matplotlib**
Платформи	Кросплатформна	Кросплатформна
GUI	Вбудовані віджети GUI	Окремі вікна
Інтерактивність	Висока	Обмежена
Продуктивність	Висока	Середня
3D-графіка	Підтримується	Обмежена підтримка
Анімація	Вбудована	Необхідний додатковий код
Конструктор для розробки GUI	QtDesigner	-

Як видно з табл. 3.7, PyQt демонструє розширену інтерактивність, перевершує продуктивністю, підтримує тривимірну графіку та анімацію, пропонує зручний QtDesigner для візуальної розробки інтерфейсу. Водночас Matplotlib орієнтований на візуалізацію даних, тому є більш придатним для розв’язання простих завдань або для вбудовування графіків у вебзастосунки.

Поєднання мови C++, що гарантує злагоджену взаємодію з апаратними ресурсами ESP32, та Python, який застосовується для наступної обробки здобутих даних і їхнього візуального представлення на комп'ютері, можна вважати найкращим вибором для реалізації експериментальної складової дослідження. Більш того, кросплатформність обох мов значно розширює гнучкість та дає змогу у майбутньому адаптувати застосунок для функціонування на будь-якій системі.

3.3 Алгоритми проведення експериментів з пошуку та ідентифікації об’єктів

3.3.1 Розробка алгоритму пошуку рухомих об’єктів за допомогою RSSI

Як було показано вище, існуючі методи мобільного позиціонування, розроблені для стаціонарних об’єктів, не дозволяють відстежувати рухомі об’єкти, і вони не будуть перехоплені WiFi-сніфером [7]. Тому, наступним етапом дослідження стала розробка алгоритму пошуку рухомих об’єктів.

Запропонований алгоритм складається з трьох етапів: збір даних про канали зв’язку, моделювання розповсюдження, визначення місцезнаходження об’єкта. Даний метод був реалізований на всій корпоративній мережі ЧНУ імені Петра Могили (рис. 3.1).

Частина корпоративної мережі, де проводився експеримент, наведена на рис. 3.2.

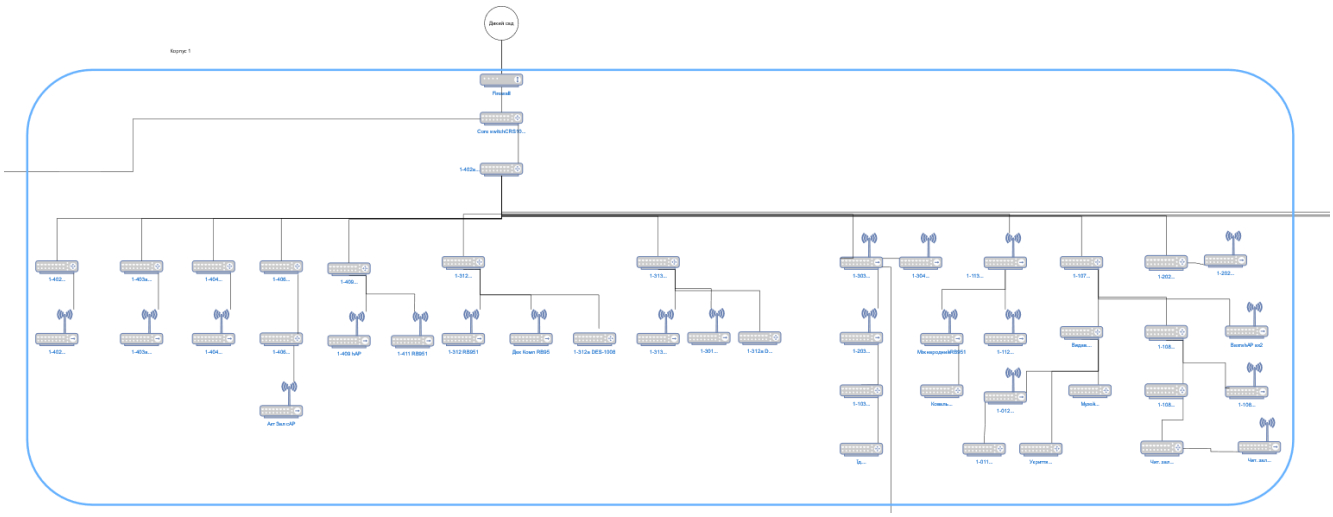


Рисунок 3.2 – Структурна схема частини корпоративної мережі, де проводилися експерименти

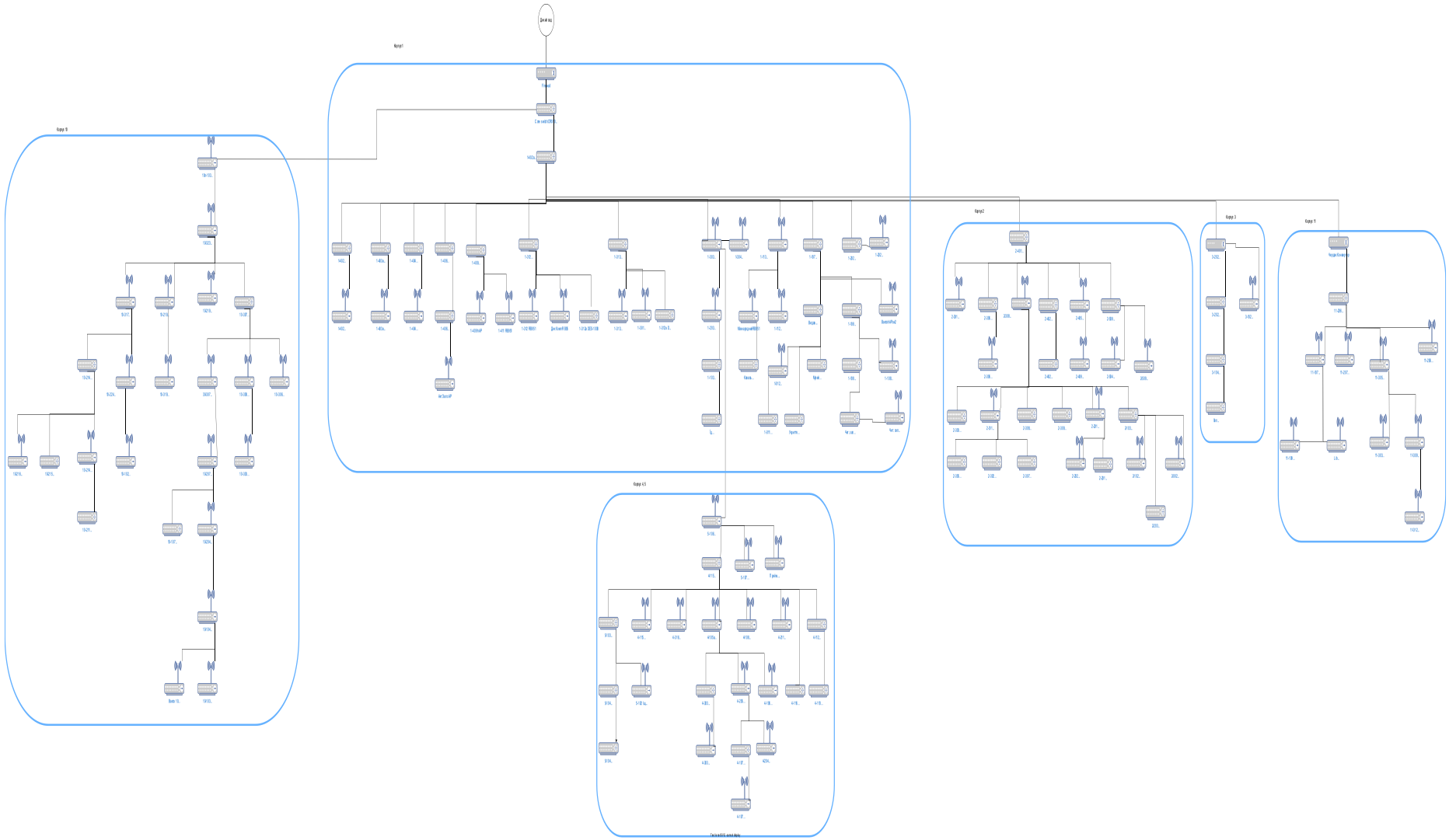


Рисунок 3.1 – Структурна схема корпоративної мережі ЧНУ імені Петра Могили

На етапі збору даних пошуковий сервер запитує кожну точку доступу на отримання результатів RSSI-опитування. Алгоритм роботи точки доступу (сканування MAC-адрес на стороні AP) схематично представлений на рис. 3.3.

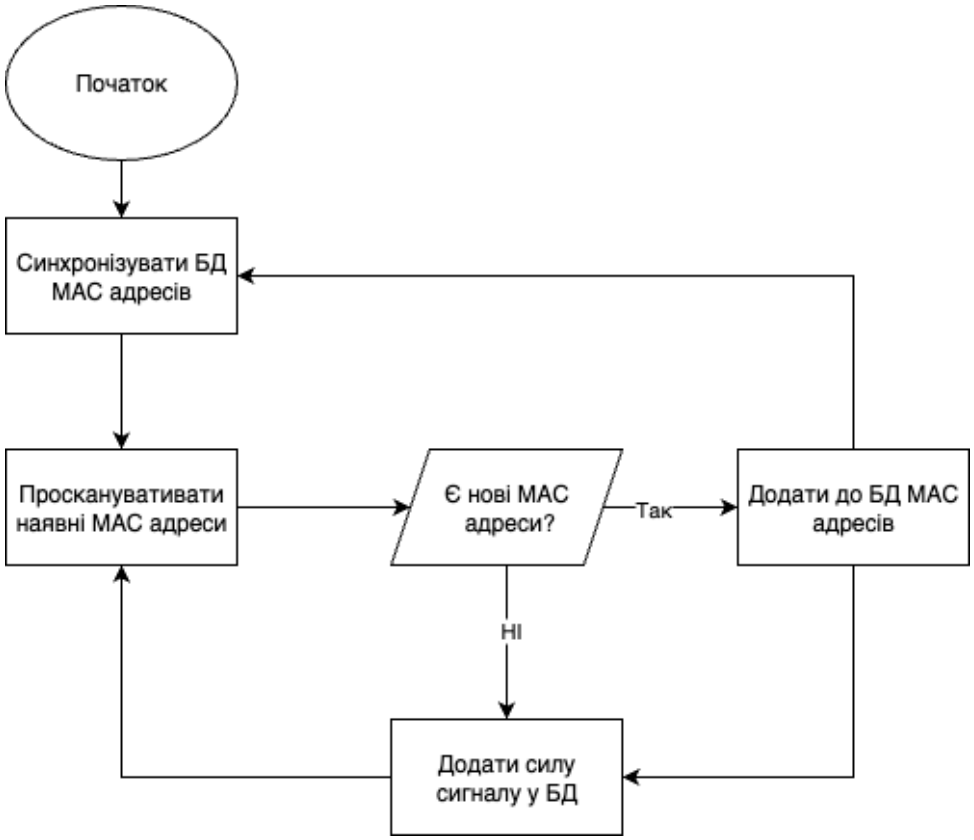


Рисунок 3.3 – Алгоритм сканування MAC адрес на стороні AP

На етапі збору даних сервер також періодично запитує кожну точку доступу (бездротову мережа сенсорів) для сканування каналів зв’язку (рис. 3.4). На етапі пошуку термінал досліджує спектр Wi-Fi на наявність доступних точок доступу та визначає індикатор рівня прийнятого сигналу (RSSI), який досягає антени кожної точки доступу (рис. 3.5). Потім ця інформація надсилається на пошуковий сервер, який визначає точку на змодельованій мапі поширення сигналу від пристрою з модулем Wi-Fi на рухомий об’єкт (див. рис. 3.5). Код обробки та візуалізації мапи наведено в додатку Б.

Результати, включаючи список точок доступу та відповідні їм RSSI, зберігаються в базі даних (БД) на сервері. Кожного разу при отриманні RSSI-даних від точок доступу за поточний час розраховуються нові параметри місцезнаходження. При розрахунку параметрів місцезнаходження

для конкретної точки доступу надсилається запит до бази даних на вимірювання сигналу, отриманого від цієї точки доступу і виявленого іншою точкою доступу. Алгоритм роботи серверу наведений на рис 3.4.

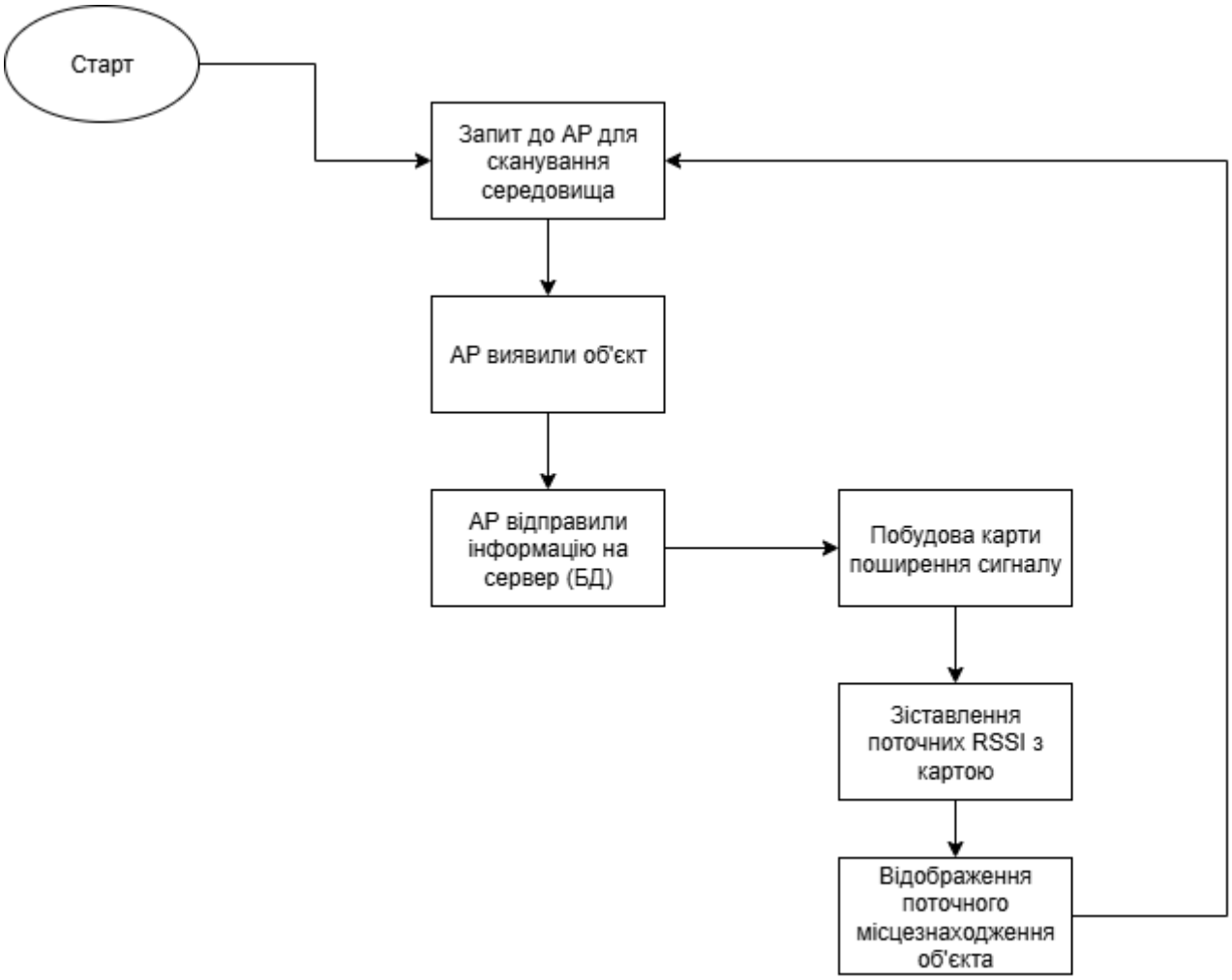


Рисунок 3.4 – Блок-схема алгоритму роботи сервера

Для розрахунку відстані від передавача до приймача на основі стандарту IEEE 802.11 використовується RSSI для вимірювання відносної потужності сигналу (в dBm). Однак, не існує конкретних формул для розрахунку точних відстаней через вплив реального середовища в приміщенні та реалізацію виробниками.

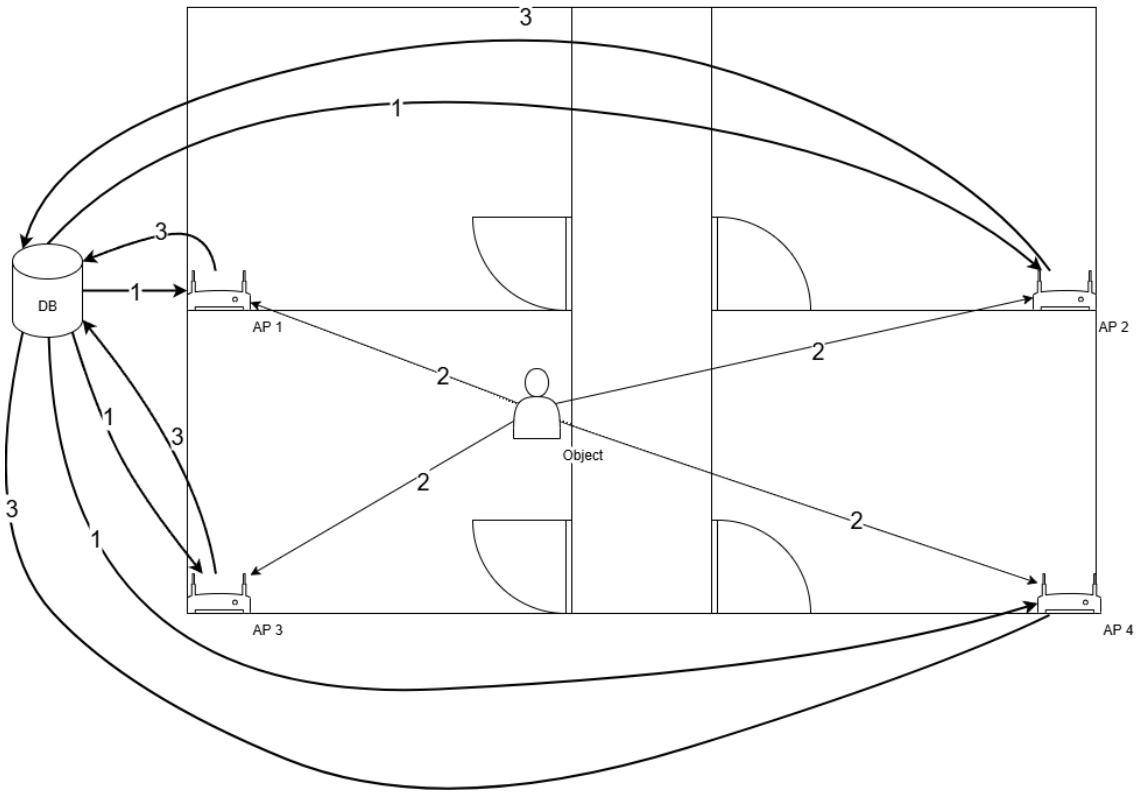


Рисунок 3.5 – Основні етапи пошуку об’єкту

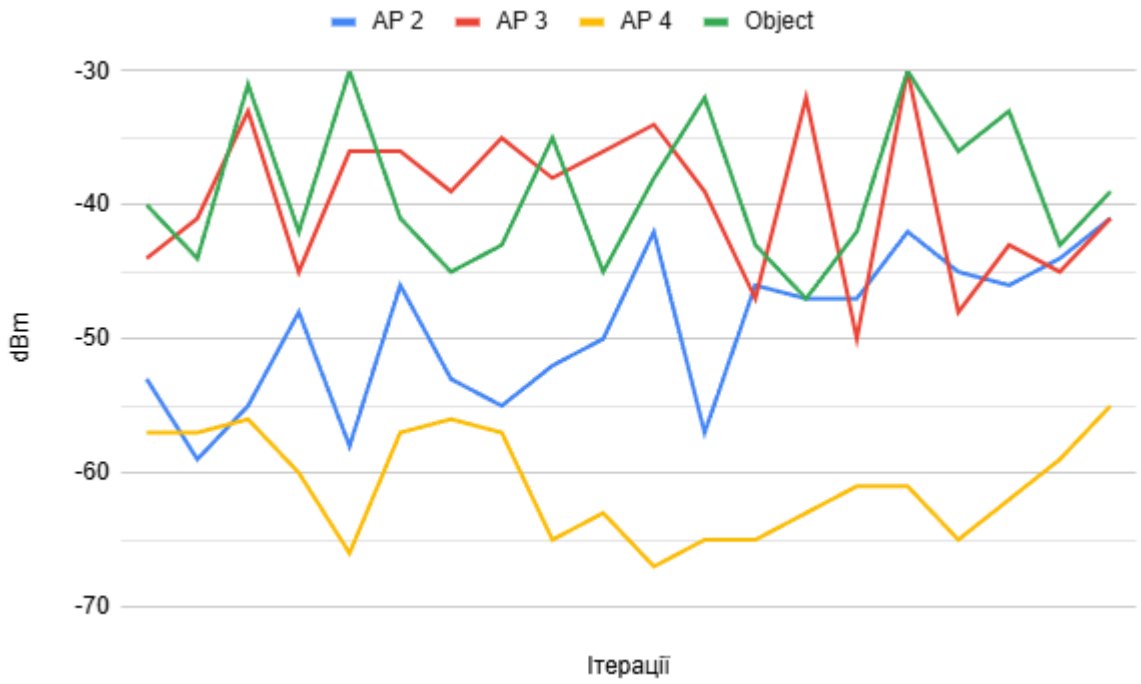


Рисунок 3.6 – Приклад сигналів, випромінюваних точкою AP1, виявлених точками AP2, AP3 та AP4 та Object

Згідно з [9] та з використанням простої моделі поширення втрат потужності, вимірювання відстані RSSI має вигляд:

$$PL = PL0 + 10\gamma \times \log10(d / d0) + \Delta, \quad (3.1)$$

де PL – втрати на відстані d, м;

$PL0$, dBm – загальні втрати на відстані $d0$, м;

γ – експонента втрат в залежності від навколишнього середовища;

d – відстань між об’єктом і контрольною точкою доступу;

Δ – змінна, яка враховує зміну середнього значення, її також часто називають тіньовим згасанням [6].

Доцільність використання цього методу було доказано в НДР № 0121U109898 (додаток А), де було продемонстровано прискорення формування черги на обслуговування об’єктів(пацієнтів) на 11,2 %. Також теоретично обґрунтовано та розглянуто практичну реалізацію WiFi-сніфера для визначення розташування рухомих об’єктів (пацієнтів під час проведення реабілітаційних заходів), підключених до бездротової мережі за допомогою власних гаджетів.

Для цього пропонується використовувати індикатор рівня прийнятого сигналу або RSSI. Він позначає рівень потужності або енергії, присутньої в прийнятому радіосигналі, що вимірюється в міліватах або децибелах, які відносяться до 1 мілівата.

RSSI визначає рівень потужності сигналу та є ключовим параметром для обчислення відстані до об’єкта, а відтак і його позиції. Значення RSSI виражаються в dBm (децибел-мілліват), що є логарифмічною шкалою, на відміну від mW, яка є лінійною. Значення RSSI починаються з «0» найвищого рівня та зменшується зі спаданням потужності сигналу. Значення зі знаком мінус 130 dBm – є загальноприйнятою межею, однак мінімальне значення RSSI зазвичай вище, оскільки воно визначається швидкістю оновлення та робочою частотою сигналу. Використання dBm є зручнішим за mW, адже приймачі здатні фіксувати надзвичайно слабкі сигнали, які складно виразити в міліватах. Наприклад, 0,000000000001 mW відповідає −120 dBm. Тому подання у dB є більш наочним, ніж у mW.

Отже, для реалізації прототипу для пошуку об’єктів за допомогою RSSI позначимо кожен запис у базі даних за допомогою позначення $RSSI_{j,i}$, де індекс j позначає APj, на якому вимірювався сигнал, а індекс i – APi, з якого прийшов сигнал, що вимірювався. При визначенні параметра γ_i для поширення сигналу, що надходить з APi, необхідно зробити запит до БД щодо вимірювань $RSSI_m$, та $RSSI_{n,i}$, зібраних на інтервалі δ, де індекси m, n представляють пару АТ, які не є APi .

Експериментальна оцінка продемонструвала, що вищої точності можна досягти, виключивши вимірювання з точки доступу (АР), розташованої на тій самій стіні, що й АРі. Зокрема, характеристики параметрів для точки доступу АР2 на рис. 4.1, розраховані на основі вимірювань, отриманих в точках доступу АР3 і АР4, перевершили характеристики, згенеровані з використанням вимірювань з точки доступу АР1. Спостережувана розбіжність в оцінці параметрів була пов’язана з відображенням стіни, на якій була встановлена передавальна точка. Знаючи просторове положення точок доступу, можна отримати відстані $d_{i,m}$ і $d_{i,n}$, які є відстанями між APi і APm або APn.

Переписавши рівняння (3.1) з введеними підрядковими, отримаємо рівняння, яке можна використати для визначення γ_i. При цьому $d0$ приймається рівним «1». Таким чином, рівняння (3.1) перетворюється на (3.2):

$$RSSI_{m,i} - RSSI_{n,i} = 10\gamma_i \log 10 \frac{d_{i,m}}{d_{i,n}} \quad (3.1)$$

Показник γ_i втрати рівня сигналу на шляху проходження точки доступу APi можна розрахувати за допомогою регресії за методом найменших квадратів рівняння (3.2). Для пояснення цього явища доцільно розширити модель втрат сигналу параметром β_i, який враховує ефект різниці кутів між напрямком прямого шляху проходження сигналу та вектором нормалі до стіни, на якій встановлена точка доступу. Розширену модель проходження сигналу можна записати у вигляді (3.2):

$$RSSI_{m,i} - RSSI_{n,i} = 10\gamma_i log10\frac{d_{i,m}}{d_{i,n}} + 10\beta_i log10\frac{d_{i,m}}{d_{i,n}} \times (a_{i,m} - a_{i,n}), \quad (3.2)$$

де введений додатковий символ $a_{i,j}$ визначається як (3.3):

$$a_{i,j} = \frac{\sphericalangle(n_i, s_{i,j})}{\frac{\pi}{2}} \quad (3.3)$$

Використовуючи формулу (3.2), можна використовувати дані з усіх досліджених точок доступу як вхідні дані для визначення значень γ_i та β_i . Це означає, що існує $N \times (N-1) / 2 \times h$ точок вимірювання, з яких можна зробити висновок параметрів рівня сигналу, де N – кількість точок доступу в межах діапазону AP_i.

Модель розповсюдження сигналу в приміщенні [10] розроблена та регулярно оновлюється Міжнародним союзом електрозв'язку (МСЕ), який є агенцією ООН у сфері інформаційних та комунікаційних технологій. Відповідно до стандарту МСЕ R.1238, для будівель γ_i завжди дорівнює 20 [11].

3.3.2 Ідентифікація об'єктів за допомогою CSI

В п. 3.2.2 визначено, що комп'ютеризована система пошуку об'єктів за CSI-даними Wi-Fi мережі складатиметься з мікроконтролера ESP32-DevKit-V1, комп'ютера з ПЗ на базі Python і PyQt, а також бази даних для зберігання CSI-даних використовується SQLite. Схему взаємодії цих компонентів подано на рис. 3.7.

На рис. 3.7 показано три основні складові системи: маршрутизатор Mikrotik (Tx), мікроконтролер ESP32 (Rx) та ноутбук (сервер), на якому виконується обробка CSI-даних. Маршрутизатор виступає джерелом передавання пакетів у мережі Wi-Fi 802.11n. ESP32, під'єднаний до тієї ж мережі, збирає CSI-показники в режимі реального часу.

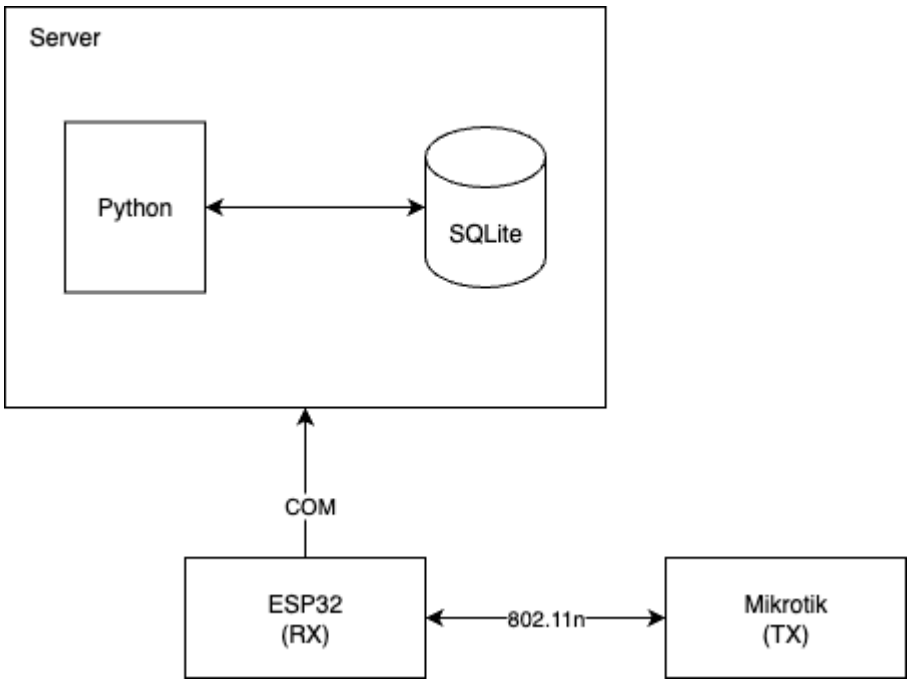


Рисунок 3.7 – Концептуальна модель взаємодії компонентів

Функціонування системи розгортатиметься наступним чином:

1) мікроконтролер ESP32 безперервно перехоплює CSI-інформацію з WiFi-мережі 802.11n та передає на сервер;

2) на сервері працює програмне забезпечення, створене за допомогою Python, що отримує CSI-дані;

3) далі код виконує початкову обробку отриманих CSI-показників і порівнює їх з еталонними, збереженими у базі даних;

4) результати зіставлення та розпізнавання об’єктів візуалізують за допомогою бібліотеки PyQt;

5) у базі даних SQLite-зберігаються еталонні CSI-параметрів, які характеризують різноманітні типи об’єктів. Завдяки цьому система може навчатися та розпізнавати нові об’єкти.

Робота системи буде розділена на два основні блоки: збір еталонних даних про певні об’єкти та розпізнавання реальних об’єктів [8]. Такий розподіл є важливим, адже для точної ідентифікації об’єктів комп’ютеризована система повинна мати еталонні CSI-параметри для різних типів об’єктів. Порівнюючи отримані в режимі реального часу дані з еталонними, система зможе визначати, який об’єкт перебуває в зоні покриття WiFi-мережі.

Далі розглянемо докладніше кожен етап:

1) для кожного типу об’єкта, що потребує розпізнавання, система виконує підготовчий етап зі збору еталонних CSI-даних;

2) об’єкт розміщується там, де діє WiFi-мережа, і до неї під’єднується мікроконтролер ESP32, який збирає необхідні CSI-дані;

3) зібрані еталонні CSI-показники зберігаються у базі даних SQLite разом із міткою, що позначає тип об’єкта, для подальшого застосування під час розпізнавання.

Етап виявлення об’єктів:

1) мікроконтролер ESP32 невпинно зчитує CSI-параметри з WiFi-з’єднання у режимі реального часу;

2) зібрані CSI-інформації передаються через інтерфейс UART на сервер для подальшого опрацювання;

3) серверний-застосунок, отримує CSI-дані з ESP32, застосунок виконує первинну обробку, виділяючи CSI-дані з-поміж інших параметрів;

4) потім ці дані порівнюються з еталонними показниками з бази даних;

5) алгоритм зіставлення шаблонів оцінює рівень відповідності поточних CSI-даних еталонним для кожного різновиду об’єкта;

6) тип об’єкта визначається відповідно до еталонного шаблону з бази, що найбільше відповідає отриманим даним;

7) результати ідентифікації виводяться в графічному інтерфейсі користувача, розробленому з використанням бібліотеки PyQt.

Основним апаратним елементом системи виступає мікроконтролер ESP32 з інтегрованим модулем Wi-Fi та можливістю зчитування CSI-даних. На нього було завантажено прошивку, розроблену мовою C++, яка виконує такі функції:

– підключення до заданої WiFi-мережі;

– безперервне збирання CSI-даних у реальному часі;

– передача отриманих CSI-даних через інтерфейс UART на комп’ютер для подальшої обробки.

Було розроблено застосунок із графічним інтерфейсом користувача (GUI), реалізований мовою Python з використанням бібліотеки PyQt. Інтерфейс містить такі ключові елементи та забезпечує таку функціональність:

1) графік для відображення вхідних CSI-параметрів реалізовано як компонент, що показує дані, отримані від ESP32 у режимі реального часу. Він дозволяє користувачу наочно спостерігати зміни характеристик сигналу при появі об’єктів у зоні дії WiFi-мережі;

2) інтерфейс для введення еталонних даних реалізовано як вікно, де користувач визначає тип об'єкта, який буде слугувати еталоном. Наявна кнопка, що ініціює процес фіксації еталонних CSI-параметрів на заздалегідь визначений відрізок часу (скажімо, на 60 секунд). Процедура збору інформації вимагає знаходження об'єкта в області дії Wi-Fi мережі. Після завершення фіксації, еталонні CSI-параметри разом з інформацією про тип об'єкта зберігаються в базі даних SQLite;

3) інтерфейс, призначений для ідентифікації об'єктів, містить кнопку «Запустити детектор», яка активує режим розпізнавання. З моменту натискання цієї кнопки, система невпинно отримує CSI-дані від мікроконтролера ESP32. Ці дані зіставляються з еталонними значеннями, взятими з бази даних, застосовуючи алгоритм зіставлення шаблонів. Інформація про тип розпізнаного об'єкта виводиться на екран інтерфейсу в реальному часі.

Графічний інтерфейс, розроблений на основі бібліотеки PyQt, забезпечує комфортну взаємодію з системою, візуалізацію даних та управління процесами збору еталонних значень і розпізнавання. Також, він дозволяє швидко інтегрувати в базу даних нові типи об'єктів та моніторити роботу системи в режимі реального часу..

Налаштування апаратної частини системи має починатися зі з’єднання плати розробки ESP32-DevKit-V1 з комп’ютером. Це потрібно для конфігурації плати та завантаження на плату необхідної прошивки. Для цього використовується USB-інтерфейс, який сьогодні є стандартним способом підключення для більшості платформ на основі мікроконтролерів.

ESP32-DevKit-V1 має роз’єм microUSB, через який вона приєднується до комп’ютера. Оскільки ESP32 не має прямого USB-інтерфейсу для передачі інформації, було використано послідовний інтерфейс UART для зв’язку з комп’ютером.

Для забезпечення зв’язку між ESP32 та комп’ютером через USB у плату ESP32-DevKit-V1 вбудовано мікросхему перетворювача інтерфейсів USB – UART. Вона трансформує дані між протоколами USB та UART, що дозволяє комп’ютеру обмінюватися інформацією з ESP32 через віртуальний COM-порт (рис. 3.8).

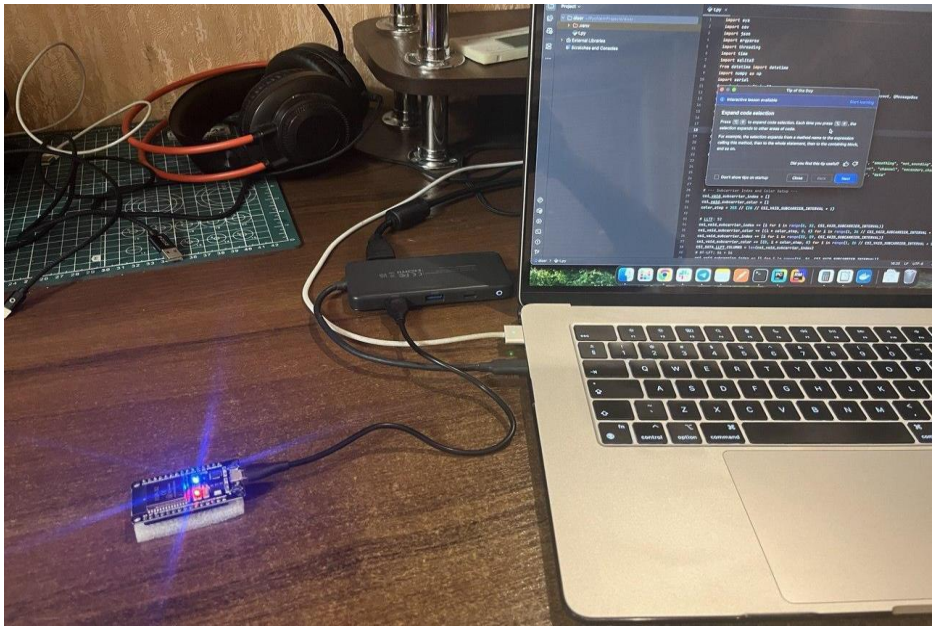


Рисунок 3.8 – Підключення мікроконтролера ESP32

Після підключення ESP32-DevKit-V1 до комп’ютера за допомогою USB-кабелю операційна система автоматично інсталювала необхідні драйвери для віртуального COM-порту. Це забезпечило можливість взаємодії програмного середовища розробки з ESP32 через послідовний інтерфейс UART.

Використання UART для взаємодії з ESP32 має низку переваг, зокрема: спрощення процесу відлагодження та моніторингу мікроконтролера (діагностичні повідомлення й дані відображаються у терміналі на комп’ютері користувача); забезпечення двонапрямленого обміну (дозволяє завантажувати програми на ESP32 та передавати команди чи дані з комп’ютера під час роботи програми); сумісність ESP32 із широким спектром програмних і апаратних

засобів, що є ключовим для успішного проведення експерименту. Код прошивки ESP32 наведено в додатку В.

Як згадувалось у розділі 2, функціонування системи виявлення об’єктів заснована на двох ключових стадіях: збір еталонних даних та безпосереднє розпізнавання об’єктів. Відповідно до цих етапів, основні функції програмного забезпечення можна розділити також на дві частини:

1) функція збереження еталонних даних в базі даних (БД);

2) функція зіставлення вхідних даних з наявними еталонними.

Розглянемо детальніше принципи роботи кожної з цих основних функцій застосунку. Функція збору еталонних CSI-даних реалізована наступним чином:

– на першому етапі функція здійснює підключення до БД SQLite, де заплановано зберігати еталонні CSI-дані;

– далі ініціюється таймер на 60 секунд, що визначає тривалість збору даних;

– після цього стартує безперервне зчитування CSI-даних з послідовного порту комп’ютера, куди вони передаються через WiFi-мережу, що обслуговує зону, де розташований об’єкт дослідження;

– отримані CSI-дані підлягають попередній обробці програмним забезпеченням з метою вилучення корисної інформації;

– усереднені еталонні CSI-дані разом з міткою, що ідентифікує досліджуваний об’єкт, записуються до БД;

– після завершення 60-секундного відліку таймера збір еталонних даних припиняється, і зібрані CSI-шаблони для конкретного об’єкта стають доступним.

Блок-схему алгоритму, що відображає функцію запису еталонних даних, представлено на рис. 3.9.

Функція зіставлення працює шляхом порівняння вхідних даних з еталонними:

– після переходу в порівняльний режим відбувається з’єднання з послідовним портом для отримання CSI-даних та підключення до БД, де зберігаються еталонні дані;

– далі система безперервно зчитує CSI-дані з послідовного порту в реальному часі;

– отримані дані порівнюються з усіма наявними еталонними даними в базі;

– для кожного типу об’єкта з бази даних витягуються відповідні еталонні CSI-дані, що марковані маркером типу об’єкта.

Рисунок 3.9 – Алгоритм функції запису еталонних даних

Процес порівняння проходить таким чином: кожна піднесуча вхідних даних зіставляється з кожною піднесучою еталонних даних, після чого

обчислюється коефіцієнт подібності. Якщо середній коефіцієнт подібності всіх піднесучих перевищує 95 %, вважається, що об’єкт ідентифіковано.

Коефіцієнт подібності обчислюється шляхом аналізу амплітуди та фази піднесучих вхідних та еталонних CSI-даних. Чим ближчі ці значення для кожної піднесучої, тим вищий показник подібності. Якщо подібності всіх піднесучих перевищує встановлений поріг у 95 %, система інтерпретує поточні вхідні дані як такі, що відповідають еталонним для певного типу об’єкта. Блок-схема алгоритму функції порівняння даних з еталонними представлена на рис. 3.10.

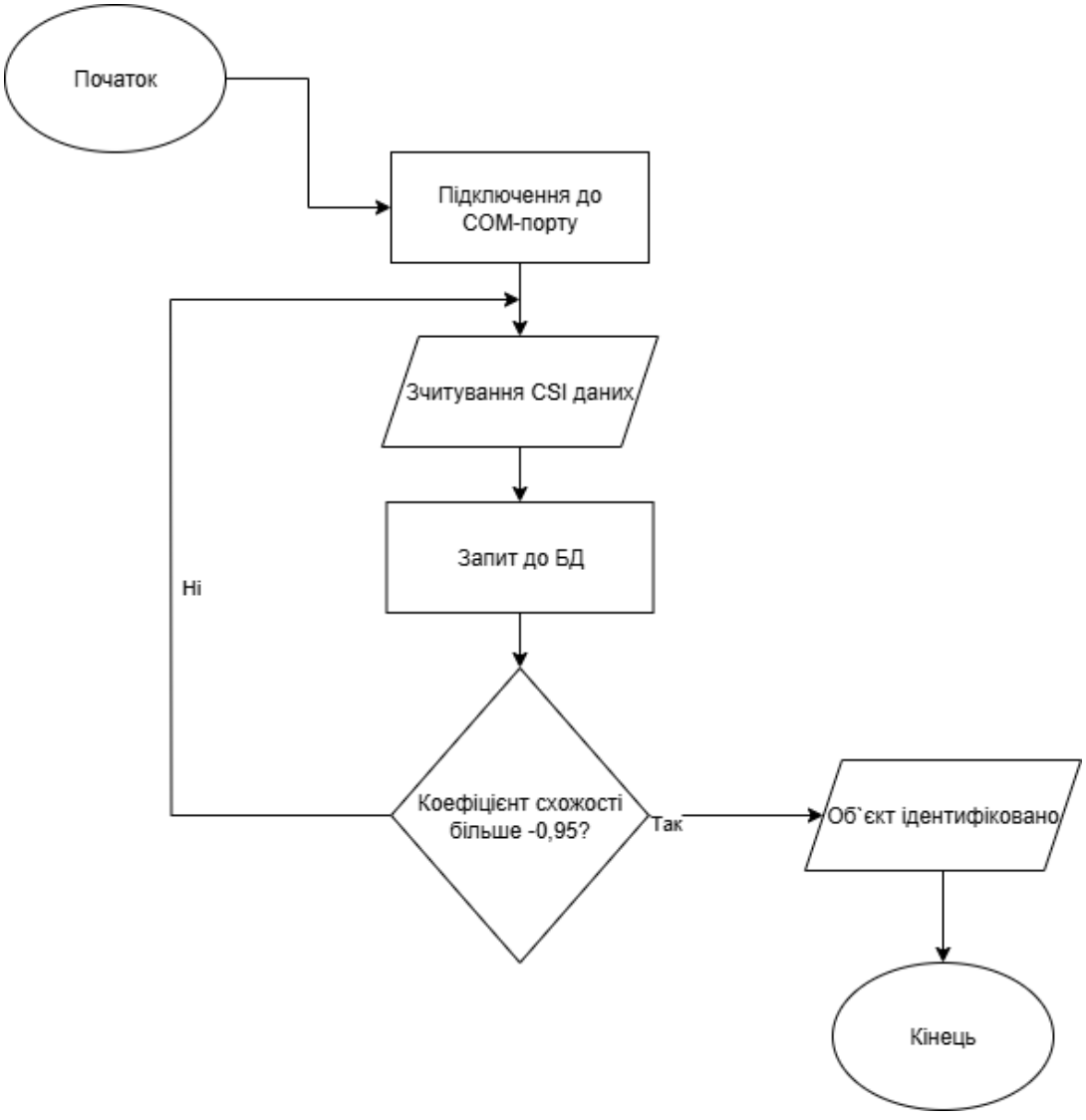


Рисунок 3.10 – Алгоритм режиму порівняння вхідних даних з еталонними

Внаслідок роботи було створено програму [9] з графічним інтерфейсом для системи ідентифікації об’єктів, що базується на аналізі даних CSI WiFi-мережі. Програму розроблено з використанням мови Python та бібліотеки PyQt.

Окрім двох ключових функцій – збору еталонних CSI-даних та розпізнавання об’єктів, – код програми містить допоміжні функції, необхідні для правильної роботи системи. Наприклад, функції зчитування інформації з послідовного порту комп’ютера та обробки отриманих CSI-даних для виділення важливих даних. Реалізація всіх функцій – як основних, так і додаткових – детально описана в додатку Г.

Висновки до розділу 3

У розділі здійснено дослідження основних компонентів апаратно-програмного забезпечення для розроблення системи виявлення та ідентифікації об’єктів. Запропоновано метод пошуку рухомих об’єктів як хостів бездротової мережі на основі мультиагентного підходу, що може бути використано для визначення черговості обслуговування та дозволяє прискорити на 11,2 % формування черги на обслуговування рухомих об’єктів на основі прослуховування трафіку бездротових мереж у приміщеннях корпоративної мережі.

Здійснено вибір засобів розробки систем пошуку та ідентифікації об’єктів. Для програмної реалізації експериментальної частини було обрано дві мови програмування: Python та C++. Зокрема, для експерименту щодо пошуку об’єктів – мову Python, яка працює з динамічною типізацією та об’єктноорієнтованим дизайном. Вона активно взаємодіє з різноманітними бібліотеками, необхідними для реалізації алгоритмів машинного навчання, зокрема з обраними у дослідженні Pandas та routeros_api. Для експерименту з ідентифікації об’єктів на першому етапі (робота з мікроконтролером ESP32) було обрано C++, а для візуалізації та аналізу отриманих даних – Python;

Здійснено вибір апаратних засобів. Серед апаратних засобів для реалізації системи пошуку об’єктів було обґрунтовано вибір двох типів точок: Mikrotik RB952Ui-5ac2nD та Mikrotik RBD52G-5HacD2HnD-TC. В експерименті з ідентифікації об’єктів в якості платформи для збору CSI-даних було обрано

мікроконтролер ESP32 та застосунок ESP32-CSI-Tool. Для зберігання даних використано СКБД SQLite.

Розроблено алгоритми проведення експериментів з пошуку та ідентифікації об’єктів. Доведено, що наявні алгоритми позиціювання статичних об’єктів не дозволяють відстежувати об’єкти рухомі. Розроблений триетапний алгоритм (збір даних, моделювання розповсюдження, визначення місцезнаходження об’єкта), що розв’язує цю проблему.

Запропонований алгоритм ідентифікації об’єктів складається з двох етапів: збір еталонних даних та безпосереднє розпізнавання об’єктів. Відповідно, виділяються дві функції програмного забезпечення:

1) функція збереження еталонних даних в БД;

2) функція зіставлення вхідних даних з наявними еталонними. У написаному коді програми передбачені також функції, необхідні для правильної роботи системи. Як от: зчитування інформації з послідовного порту комп’ютера, виділення важливих CSI даних серед масиву отриманих.

Вибрані апаратні та програмні компоненти, розроблена архітектурна концепція й запропоновані алгоритми формують міцну основу для практичного впровадження системи виявлення та ідентифікації об’єктів, подробиці якої буде розглянуто в наступному розділі.

Список використаних джерел до розділу 3

1. Cython: C-Extensions for Python. URL: https://cython.org/ (Last accessed: 11.06.2025).

2. What Is an API (Application Programming Interface). URL: https://www.oracle.com/ua/cloud/cloud-native/api-management/what-is-api/ (Last accessed: 11.06.2025).

3. Secure Shell (SSH) protocol. URL: https://www.cloudflare.com/learning/access-management/what-is-ssh/ (Last accessed: 11.06.2025).

4. What is a CLI (Command Line Interface). URL (Last accessed: 11.06.2025).

5. ESP32 Resources: SDK & Demos, tools, sample codes, documentation and FAQ. URL: https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32/resources (Last accessed: 11.06.2025).

6. Antonucci A., et al., Performance analysis of a 60-GHz radar for indoor positioning and tracking. *Proc. of the 2019 Int. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Pisa, Italy, 30 September – 3 October 2019. P. 1–7. DOI: 10.1109/IPIN.2019.8911764.

7. Jianyong Z., Haiyong L., Zili C., Zhaohui L. RSSI based Bluetooth Low Energy indoor positioning. *Proc. of the 2014 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Busan, 2014. P. 526–533. DOI: 10.1109/IPIN.2014.7275525.

8. Zhuravska I. M., Tohoiev O. R., Frych D. O. Objects' detection in the controlled area based on signal analysis using passive listening Wi-Fi network traffic. *Modern engineering and innovative technologies*. 2024. Is. 34, Part 1. P. 31–37. DOI: 10.30890/2567-5273.2024-34-00-06.

9. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір 107018. «Комп'ютерна програма "Smart Monitor"» : комп'ютерна програма / К. О. Обухова, І. М. Журавська, О. Р. Тогоєв ; дата реєстр. 04.08.2021, Бюл. № 66.

10. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір 107427. Комп'ютерна програма «Комп'ютерна програма "Складання WiFi-мапи переміщення пацієнтів територією реабілітаційного центру"» : комп'ютерна програма / О. Р. Тогоєв, В. Д. Веселовський, О. В. Дворник, І. М. Журавська, К. О. Обухова, Є. О. Ухань ; дата реєстр. 17.08.2021, Бюл. № 66.

11. ITU-R Recommendations, Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz. Geneva, Switzerland, International Telecommunication Union (ITU), 2015. P. 1238–8. URL: https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1238 (Last accessed: 18.06.2025).

12. Tohoiev O. Determining the location of patients in remote rehabilitation by means of a wireless network. *ACTA IMEKO*. 2023. Vol. 12, No. 3. P. 1–5. DOI:

10.21014/actaimeko.v12i3.1495. **ISSN 2221-870X.** URL: https://acta.imeko.org/index.php/acta-imeko/issue/view/45 **Scopus Q3**

13. Бурлаченко І. С., Савінов В. Ю., Тогоєв О. Р. Мультиагентна система позиціонування рухомих об’єктів як хостів бездротової мережі. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2020. Т. 1, № 5 (288). С. 72–80. DOI: 10.31891/2307-5732-2020-289-5-72-80.

14. Tohoiev O., Burlachenko I., Zhuravska I., Savinov V. The monitoring system based on a multi-agent approach for moving objects positioning in wireless networks. *CEUR Workshop Proceedings* [ed.: S. Subbotin]. 2020. Vol. 2608. P. 79-90. DOI: https://doi.org/10.32782/cmis/2608-7. **ISSN 1613-0073**. URL: http://ceur-ws.org/Vol-2608/ (Last accessed: June 04, 2025). **Scopus**

15. Тогоєв О. Р. Виявлення об'єктів у WiFi-мережі за аналізом CSI-параметрів. *Ольвійський форум – 2025 : стратегії країн Причорноморського регіону в геополітичному просторі.* Дизайн, комп’ютерні технології : зб. тез XXII Міжнар. наук. конф., м. Миколаїв, 16–21 червня 2025 р. Миколаїв : ЧНУ ім. Петра Могили, 2025. С. 142–144. DOI: 10.34132/mspc2025.01.06.30.

16. Журавська І. М., Тогоєв О. Аналіз інформаційної безпеки та присутності людей у контрольованій зоні на основі прослуховування трафіку комп’ютерної мережі. *Future in the results of modern scientific research* : SWorld-Ger Conf. Proc., Aug. 30, 2024. No. gec34-00. P. 25–33. DOI: 10.30890/2709-1783.2024-34-00-015.

17. Тогоєв О. Р. Визначення місцеположення та моніторинг стану пацієнтів на віддаленій реабілітації засобами бездротових мереж. *Актуальні завдання медичної, біологічної фізики та інформатики* : матеріали II Всеукр. наук.-практ. конф., Вінниця, 07 квітня 2023 р. Вінниця : Вінниц. нац. техн. ун-т ім. М. І. Пирогова, 2023. С. 144–146.

18. Pandas : Documentation. 2025. URL: https://pandas.pydata.org/ (Last accessed: 18.06.2025).

19. RouterOS-api 0.21.0. 2025. URL: https://pypi.org/project/RouterOS-api/ (Last accessed: 18.06.2025).

РОЗДІЛ 4
АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ПОШУКУ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ПАРАМЕТРІВ WIFI-СИГНАЛУ

4.1 Прототипи пошуку та ідентифікації об'єктів

4.1.1 Реалізація прототипу для пошуку об'єктів за допомогою RSSI

Перший напрямок експериментального дослідження присвячений розробці системи моніторингу середовища для пошуку рухомих об'єктів.

Потужність сигналу залежить від виробника точки доступу. У прикладі для MikroTik hAP2 Lite була використана точка доступу, вона має потужність Tx 27 dBm. Для мобільних пристроїв також не існує стандартної потужності в dBm, у прикладі використовувався мобільний телефон з антеною Tx 22 dBm.

План приміщення, де проводиться експеримент з точками доступа (AP), наведено на рис. 4.1.

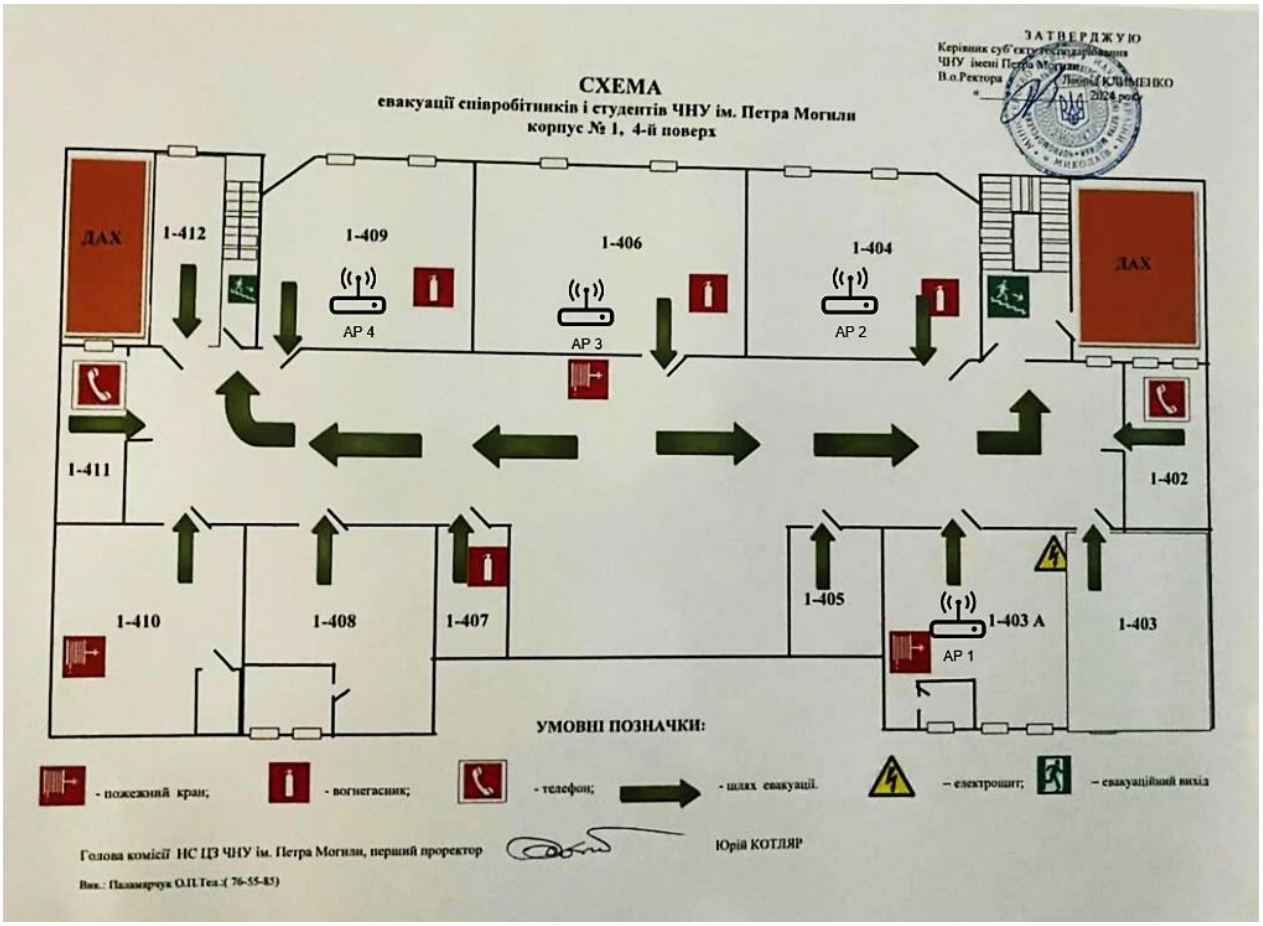


Рисунок 4.1 – План приміщень поверху з точками доступу

Отже, задачею **Експерименту 1** є пошук одного вибраного об’єкта.

Для цього необхідно запустити розроблений під ці задачі програмний застосунок (код наведено в додатку Б), та перейти в розділ «Search» в меню і вибрати об’єкт, який необхідно знайти. Для цього в колонці «Select» потрібно активувати чекбокс, та натиснути кнопку «Search Objects». Після чого відкриється лістинг з результатом пошуку. Інтерфейс у режимі «Search» можна побачити на на рис. 4.2.

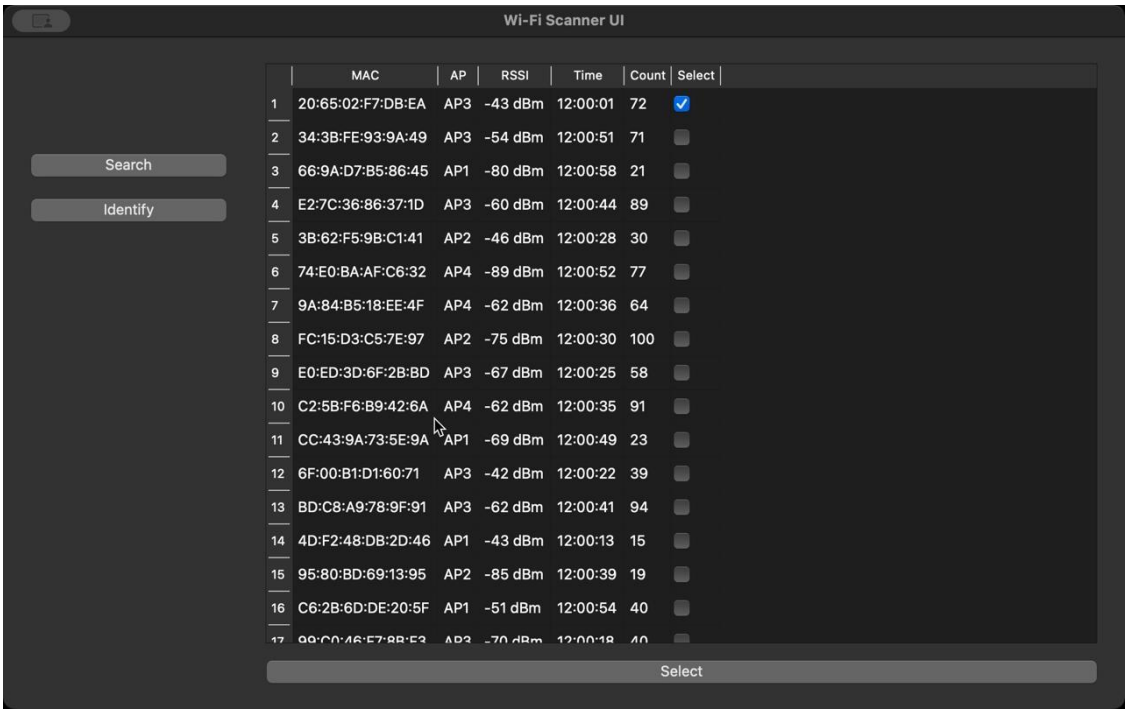
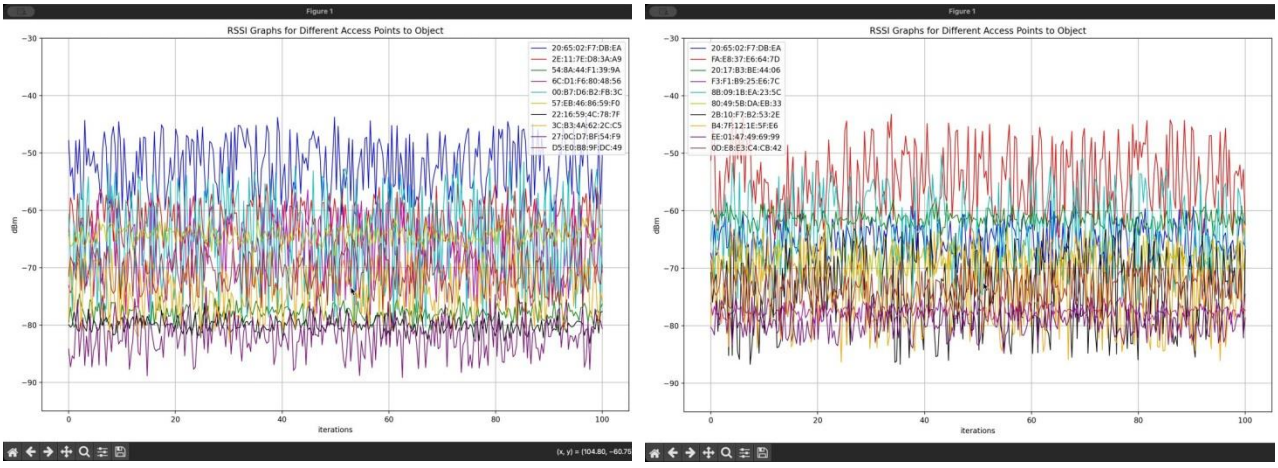
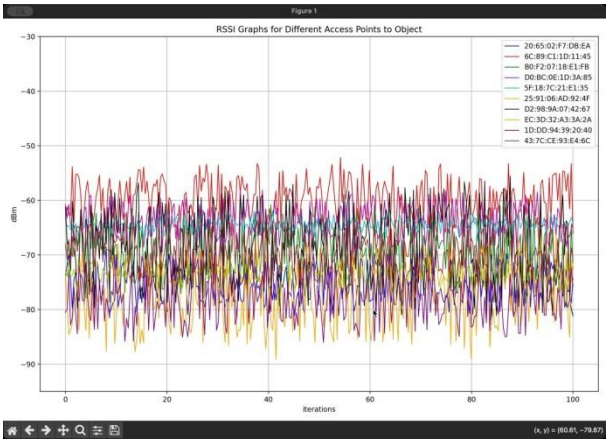


Рисунок 4.2 – Інтерфейс у режимі «Search»

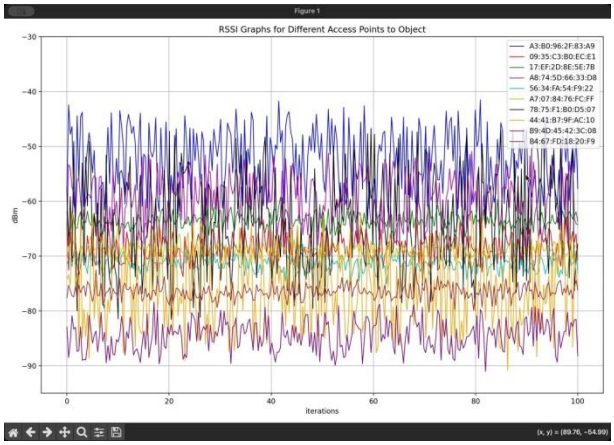
Проміжне сканування ефіру надало результати, наведені на рис. 4.3.



а) AP1 б) AP2



в) AP3



г) AP4

Рисунок 4.3 – Результати отриманих даних з точок доступу AP1, AP2, AP3, AP4 для **Експерименту 1**

Проміжні результати отриманих даних з точок доступу наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати сканування для **Експерименту 2**

№ об'єкта	**MAC**	**AP**	**RSSI, dBm**	**Time**	**Count**
1	20:65:02:F7:DB:EA	AP3	–43	12:00:01	77
2	34:3B:FE:93:9A:49	AP4	–54	12:00:51	71
3	66:9A:D7:B5:86:45	AP1	–80	12:00:58	21
4	E2:7C:36:86:37:1D	AP3	–60	12:00:44	89
5	EA:D0:42:FB:8D:4B	AP1	–77	12:00:28	30
6	28:4B:E7:C2:75:1C	AP3	–88	12:00:52	77
7	58:5A:6E:9A:91:E8	AP4	–53	12:00:36	64
8	5E:25:E3:F6:64:E7	AP1	–53	12:00:30	100
9	74:4C:C3:1A:51:99	AP2	–41	12:00:25	58
10	10:E9:50:AC:CA:11	AP1	–48	12:00:35	91
11	64:6A:4B:D6:DB:0A	AP1	–80	12:00:49	23
12	E1:C3:B2:27:47:19	AP4	–80	12:00:22	39
13	04:B4:FC:EE:F8:92	AP4	–45	12:00:41	94
14	8B:8F:BB:7D:66:7F	AP4	–54	12:00:13	15
15	C1:AA:37:72:75:8A	AP1	–77	12:00:39	19
16	BE:B5:C5:2B:D6:C0	AP4	–56	12:00:54	40
17	69:AD:E5:3D:85:A1	AP2	–64	12:00:18	40

№ об’єкта	MAC	AP	RSSI, dBm	Time	Count
18	A6:F5:07:4D:66:6D	AP2	–66	12:00:34	21
19	81:D1:67:02:E1:72	AP3	–75	12:00:22	33
20	63:BC:49:46:07:B4	AP3	–45	12:00:18	45

Отже, рівень WiFi-сигналу коливається від хорошого рівня (мінус 45 dBm) до слабшого рівня сигналу (мінус 55 dBm), як показано на рис. 4.3. Як бачимо, рівень сигналу AP1 хороший (мінус 52 dBm), сигнал від об’єкта становить мінус 55 dBm. Сигнал AP2 і AP3 слабший (від мінус 80 dBm до мінус 90 dBm), в з AP4 взагалі немає сигналу.

Для дослідження було обрано бездротовий маршрутизатор MikroTik hAP2 Lite.

Сканування – це періодичний процес. Якщо його частота занадто висока, це призводить до додаткового навантаження на мережу Wi-Fi, що є небажаним, оскільки впливає на продуктивність передачі даних бездротової мережі. Занадто низька частота сканування означає, що зміни в мережі Wi-Fi, яку вирішено використовувати для визначення місцезнаходження рухомих об’єктів займуть занадто багато часу, щоб стати значущими та ефективними. Вибір занадто великої кількості ітерацій матиме ті ж наслідки, що й вибір занадто тривалого періоду прослуховування. Занадто мала кількість ітерацій призведе до більшого впливу на дисперсію RSSI, ніж бажано. Після тестування в якості частоти оновлення було обрано одну хвилину, що гарантує, що зміни через довготривалу нестабільність Wi-Fi та зміни у внутрішньому просторі матимуть значний вплив менш ніж за 10 хвилин, оскільки вони будуть присутні у більш ніж 50 % точок даних, що використовуються для розрахунку. Після всіх розрахунків та побудови мапи, розроблений застосунок покаже досліднику, в якій кімнаті/будівлі знаходиться обраний об’єкт. Приклад такої мапи наведено на рис. 4.4.

Таким чином, в **Експерименті 1** було поставлено задачу знайти один заданий об’єкт. Результати пошуку показали, що об’єкт знаходиться в кімнаті 1-403А.

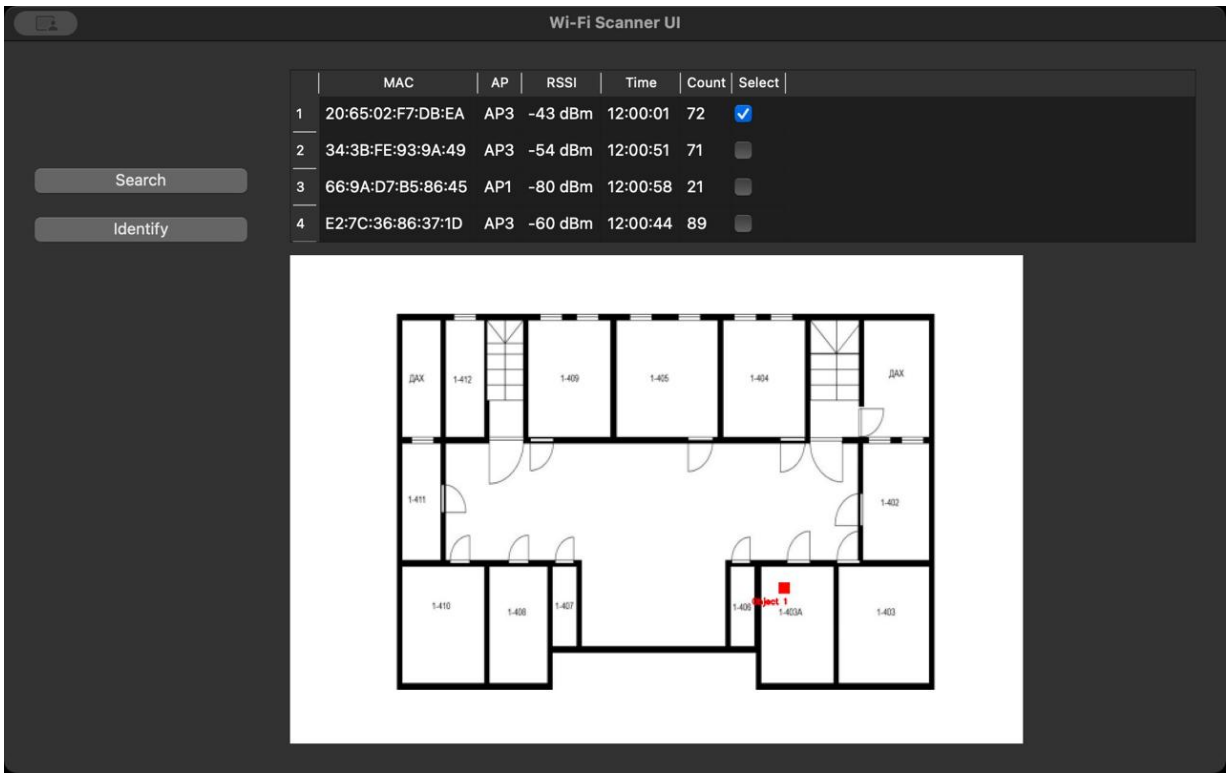


Рисунок 4.4 – Мапа результату пошуку одного заданого об’єкта для **Експерименту 1**

Задачею **Експерименту 2** є пошук декількох (чотирьох) об’єктів. Для цього у вікні навподобі рис. 4.4 вибираємо 4 об’єкти (рис 4.5).

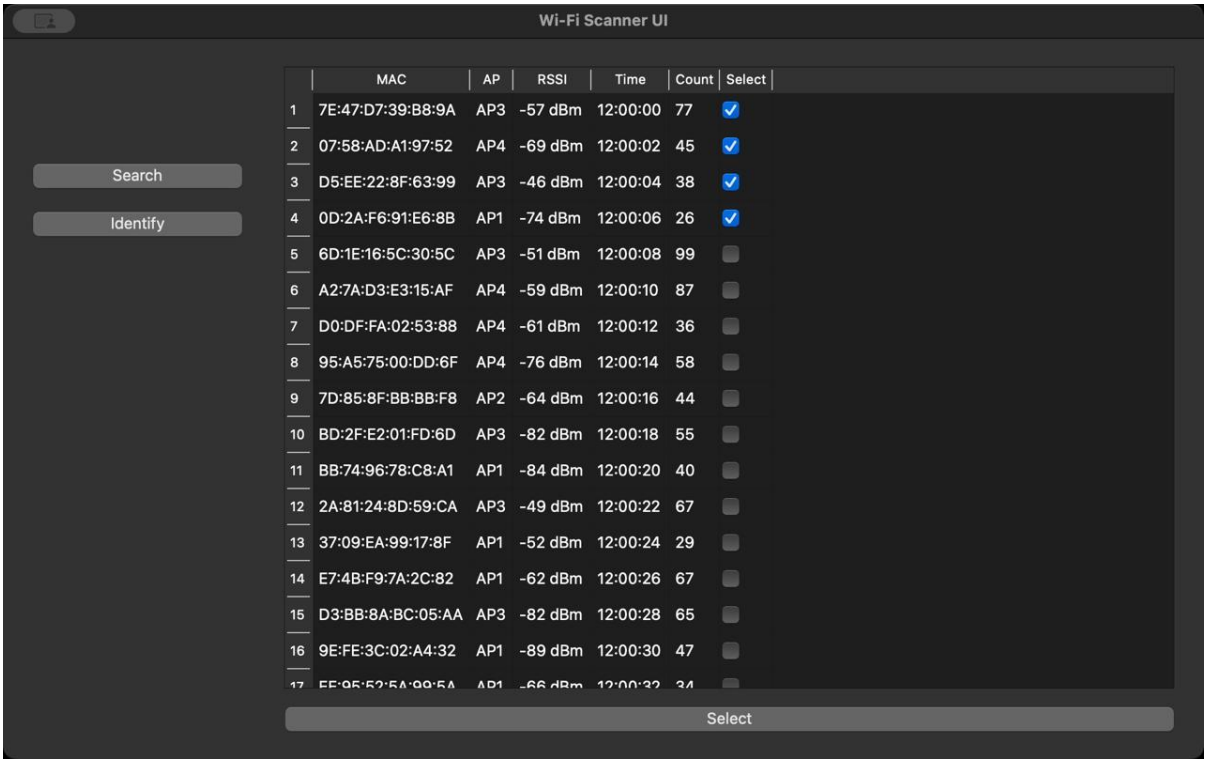
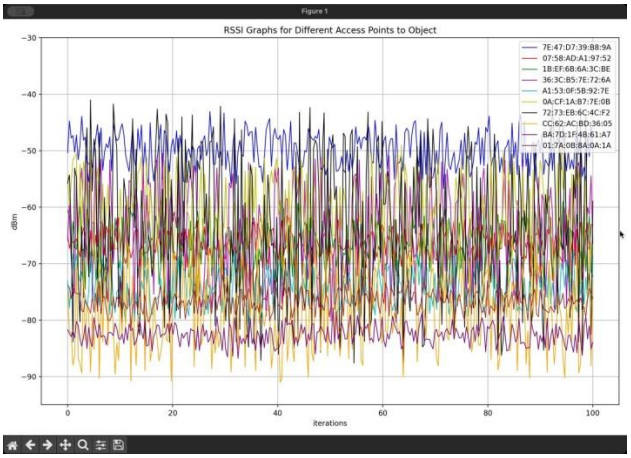
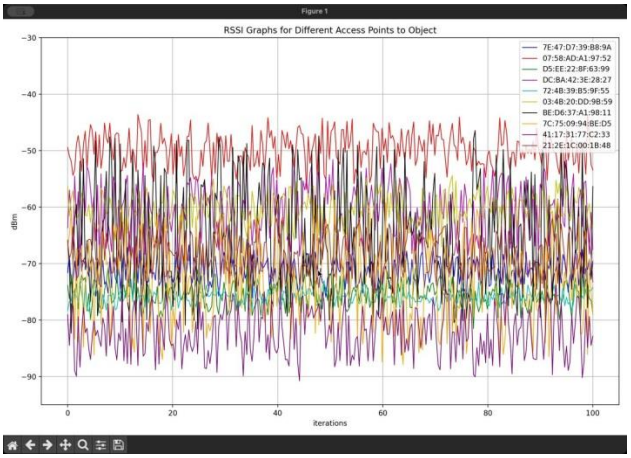


Рисунок 4.5 – Вибір об’єктів для **Експерименту 2**

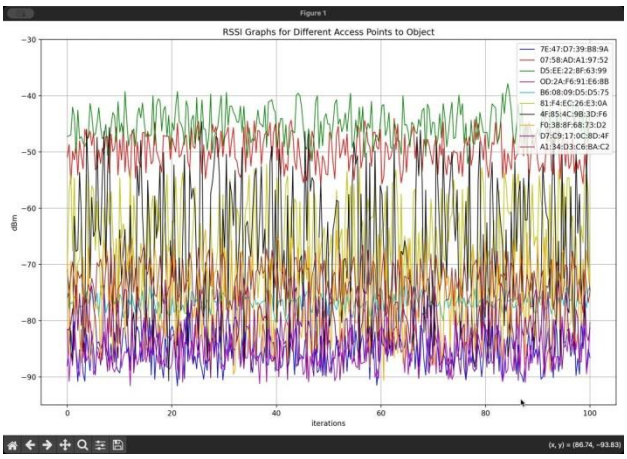
Проміжне сканування ефіру надало результати, наведені на рис. 4.6.



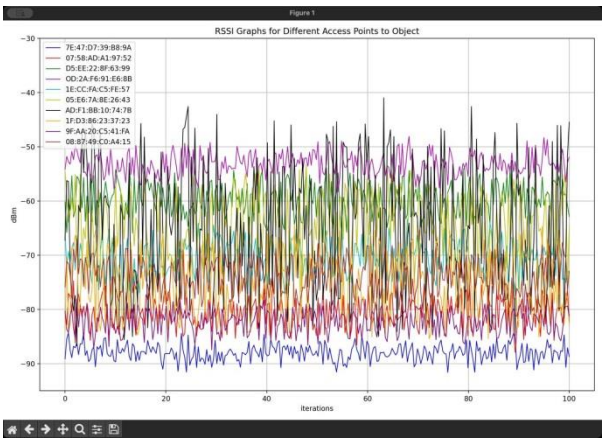
а) AP1



б) AP2



в) AP3



г) AP4

Рисунок 4.6 – Результати отриманих даних з точок доступу AP1, AP2, AP3, AP4 для другого експерименту

Проміжні результати отриманих даних з точок доступу наведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Результати сканування для другого експерименту

№ об’єкта	MAC	AP	RSSI, dBm	Time	Count
1	7E:47:D7:39:B8:9A	AP3	–57	12:40:53	77
2	07:58:AD:A1:97:52	AP4	–69	12:40:26	45
3	D5:EE:22:8F:63:99	AP3	–46	12:40:57	38
4	OD:2A:F6:91:E6:8B	AP1	–74	12:40:07	26
5	6D:1E:16:5C:30:5C	AP3	–51	12:40:56	99

№ об’єкта	MAC	AP	RSSI, dBm	Time	Count
6	A2:7A:D3:E3:15:AF	AP4	–59	12:40:09	87
7	DO:DF:FA:02:53:88	AP4	–61	12:40:11	36
8	95:A5:75:00:DD:6F	AP4	–76	12:40:29	58
9	7D:85:8F:BB:BB:F8	AP2	–64	12:40:30	44
10	BD:2F:E2:01:FD:6D	AP3	–82	12:40:18	55
11	BB:74:96:78:C8:A1	AP1	–84	12:40:50	40
12	2A:81:24:8D:59:CA	AP3	–49	12:40:22	67
13	37:09:EA:99:17:8F	AP1	–52	12:40:52	29
14	E7:4B:F9:7A:2C:82	AP1	–62	12:40:47	67
15	D3:BB:8A:BC:05:AA	AP3	–82	12:40:45	65
16	9E:FE:3C:02:A4:32	AP1	–80	12:40:13	47
17	FE:AD:F8:6D:81:8E	AP1	–66	12:40:01	34
18	8B:DC:E3:51:DE:5B	AP3	–46	12:40:37	21
19	39:9C:47:13:F6:94	AP3	–52	12:40:17	15
20	02:AB:46:81:78:78	AP4	–76	12:40:15	33

На рис. 4.6, а зафіксовано потужний сигнал від об’єкта 1 (біля –50 dBm) та трохи слабший, але стабільний сигнал від об’єкта 2 (приблизно –65 dBm). Це дає підставу вважати, що об’єкт 1 розташований неподалік від точки доступу, а об’єкт 2 перебуває на середній відстані. Водночас сигнали від інших об’єктів не зареєстровано, що може свідчити про їхню відсутність у радіусі дії AP1 або про значну втрату сигналу.

На рис. 4.6, б чітко видно потужний сигнал від об’єкта 2, він десь на рівні мінус 50 dBm. Сигнал від об’єкта 1 теж стабільний, хоча і слабший, орієнтовно мінус 70 dBm. Об’єкт 3 виявляє найменшу інтенсивність сигналу, в діапазоні від –75 dBm до –85 dBm, що може бути зумовлено великою відстанню або наявністю перешкод. Відтак, AP2 забезпечує ефективне приймання сигналу від об’єкта 2, задовільне від об’єкта 1 та слабке від об’єкта 3.

Як демонструє рис. 4.6, в сигнал від об’єкта 1 досить потужний (близько мінус 47 dBm), що вказує на його близькість до точки доступу. Об’єкт 2 видає стійкий, хоч і слабший сигнал, приблизно –65 dBm. Сигнали від об’єктів 3 та 4

варіюються від –82 dBm до –90 dBm, що свідчить про слабкий прийом, і, скоріше за все, значну відстань або наявність перешкод між ними та точкою доступу AP3.

Отже, з графіка рис. 4.6, г, об’єкт 4 фіксує найпотужніший сигнал (приблизно –47 dBm), що вказує на його найближче розташування до точки доступу. Об’єкт 3 також характеризується порівняно високим рівнем сигналу (мінус 57 dBm), що свідчить про середню відстань. На противагу цьому, сигнали від об’єктів 2 та 1 є слабкими, варіюючись в межах від –80 dBm до –90 dBm. Це вказує на помітне погіршення якості з’єднання з цими об’єктами з боку AP4, найімовірніше, через велику відстань.

Рисунок 4.7 – Мапа результату пошуку 4 об’єктів для **Експерименту 2**

Таким чином, проведені експерименти показали працездатність та ефективність запропонованого у розділі 2 бездротового метода визначення місцеположення рухомих об’єктів як хостів бездротової мережі.

4.1.2 Реалізація прототипу ідентифікації об’єктів за допомогою CSI

Друга частина експериментального дослідження спрямована на вдосконалення системи методів моніторингу середовища з метою виявлення об’єктів шляхом аналізу CSI-інформації про WiFi-мережу.

Розвинена інфраструктура бездротових мереж в Україні створює умови для розробки та дослідження CSI у WiFi-мережі.

Ця система демонструє економічну ефективність та простоту реалізації. Застосування радіочастотних сигналів замінює традиційні датчики чи камери, забезпечуючи неінвазивний та безперешкодний моніторинг навколишнього середовища, що набуває особливого значення, скажімо, в умовах військового конфлікту або надзвичайних обставин. До того ж, вона може виявитися корисною для вирішення різноманітних повсякденних задач, як-от контроль доступу, виявлення несанкціонованого проникнення та відстеження пересувань [4]. Застосування систем спостереження за об’єктами, що базуються на аналізі CSI даних WiFi-мереж, може значно посилити рівень захисту в місцях з великою кількістю людей. Йдеться про вокзали, торгово-розважальні комплекси, театри та кінозали.

Для вивчення та апробації розробленої системи ідентифікації об’єктів, що базується на даних CSI WiFi-мережі, було відібрано вісім видів матеріалів: метал, скло, текстиль, пластик, сіль, борошно, картон та селітра.

Вибір саме цих речовин був зумовлений тим, у майбутньому цю систему можна застосовувати для виявлення небезпечних об’єктів, зокрема саморобних вибухових пристроїв, складовими яких можуть бути вищевказані матеріали.

Експерименти відбувалися в приміщенні, де було створено контрольоване середовище для дослідження (рис. 4.8). Роль маршрутизатора виконував другий ноутбук, на якому було активовано точку доступу Wi-Fi.

Дослідження проводилися в близьких до ідеальних умовах, з вимкненим електроживленням, задля уникнення будь-яких перешкод або сторонніх сигналів від інших роутерів. Отже, було забезпечено оптимальні умови для проведення експериментів.

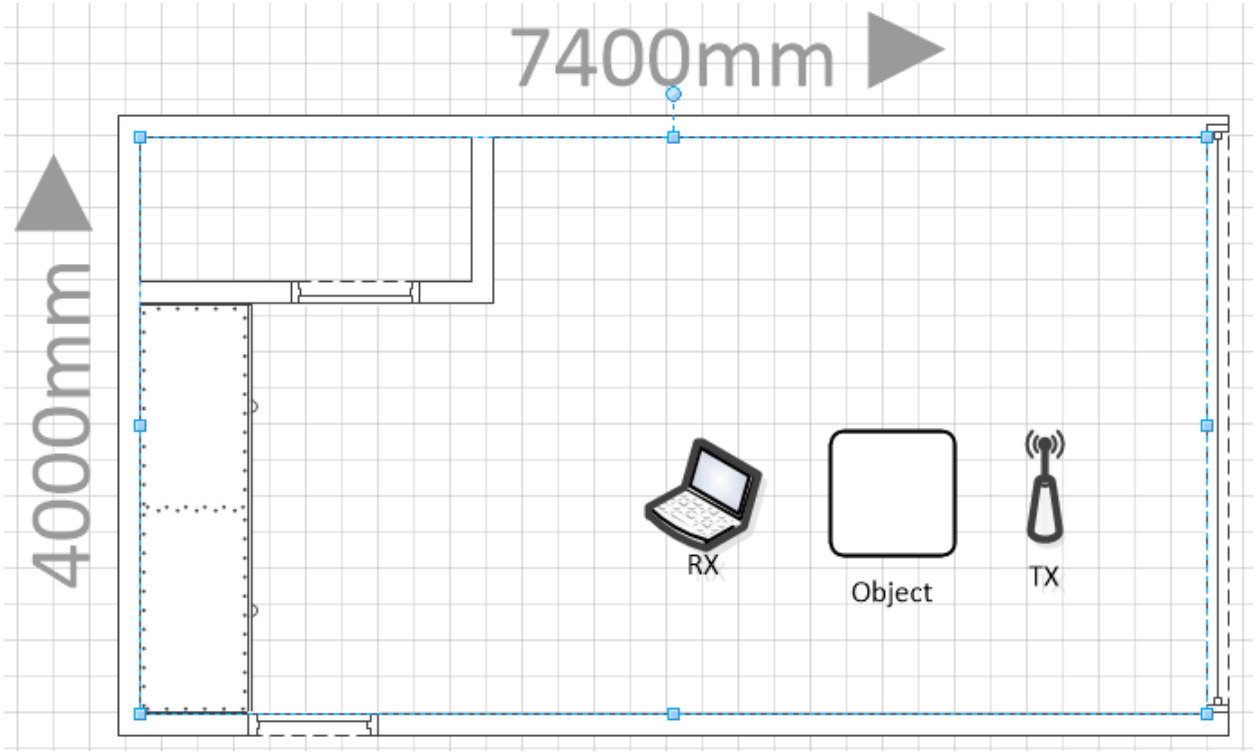


Рисунок 4.8 – Схема приміщення для експериментів

Під час досліджень кожен з матеріалів розташовувався в зоні покриття мережі Wi-Fi, на дистанції по 50 см між передавачем та приймачем, що були розміщені на спеціальній дерев'яній платформі, висотою 40 см. Схематичне зображення проведення експериментів представлено на рис. 4.9.

а)

б)

Рисунок 4.9 – Проведення дослідження з різними об'єктами

Система здійснювала збір CSI-даних, які описували вплив даного матеріалу на радіосигнал. Було проаналізовано зміни потужності RSSI

в залежності від виду об’єкта, а також було досліджено та побудовано графіки CSI для різноманітних типів об’єктів (рис. 4.10).

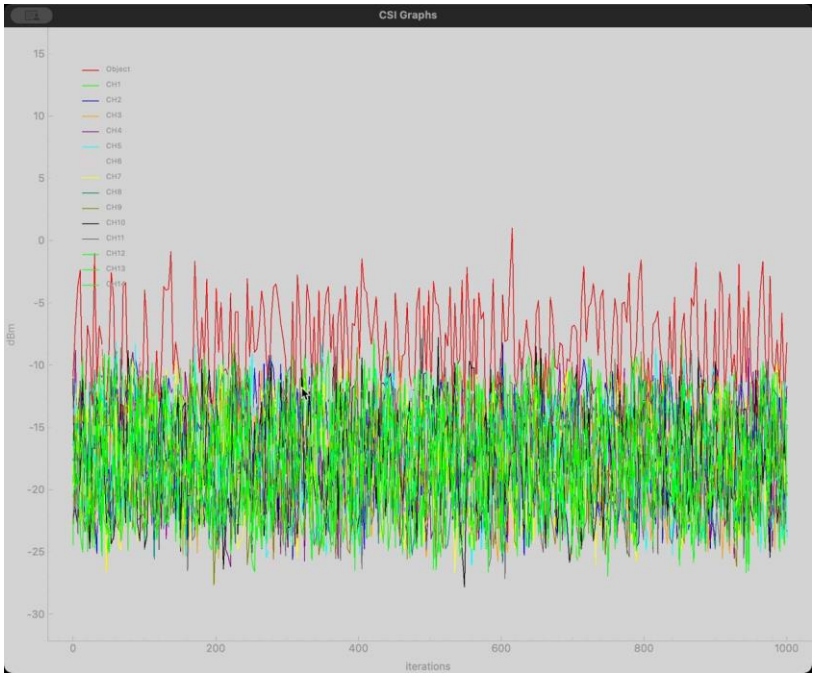


Рисунок 4.10 – Візуалізація CSI-даних

На рис. 4.11 наведено блок-схему алгоритму проведення експерименту та збору еталонних даних.

Рисунок 4.11 – Алгоритм збору еталонних даних

Зібрані експериментальні результати слугували еталонними матеріалами, призначеними для майбутнього застосування у алгоритмічному розпізнаванні об’єктів.

4.2 Результати експериментів з пошуку та ідентифікації об’єктів

4.2.1 Використання RSSI для відстеження об’єктів у просторі

Запропонований метод, заснований на прослуховуванні сигналів Wi-Fi, є подальшим розвитком Рекомендацій ITU-R [1]. Цей підхід може бути застосований до широкого спектру бездротового телекомунікаційного обладнання та вимагає лише базової інформації про точку доступу. На основі показників RSSI будується мапа місцезнаходження пацієнта, що дає змогу здійснювати відстеження об’єктів у просторі за допомогою звичайного смартфона з активованим передавачем Wi-Fi.

Недоліком методу є те, що показник RSSI недостатньо корелює з фактичною якістю сигналу, однак він придатний для приблизної оцінки рівня прийому. Більш точну інформацію може надати показник якості зв’язку (Link Quality Indicator, LQI), що відображає відсоток неушкоджених даних, які проходять через приймач. Значення LQI часто подають у форматі 9:100, де перше число відображає RFMD (або RF), а друге – фактичний відсоток якості зв’язку.

Доцільність застосування цього параметра підкріплюється тим, що в умовах локальної мережі з численними пристроями, які мають увімкнені WiFi-модулі, виникають додаткові завади. У такій ситуації потужність сигналу може бути високою, проте співвідношення сигнал/шум залишається нижчим за необхідний рівень для точної локалізації рухомого об’єкта. Для більш надійного використання LQI доцільніше застосовувати Bluetooth-модулі, які також інтегровані в більшість сучасних гаджетів, або інші технології стандарту 802.15.

Важливою перевагою запропонованого алгоритму є те, що він не потребує спеціалізованих антен, які застосовувалися у попередніх дослідженнях [2; 3]. На відміну від методів, що покладалися на складні антенно-конфігураційні

рішення для досягнення високої точності, запропонований алгоритм використовує вбудовані методи обробки сигналів і стандартні антени, що широко представлені у більшості пристроїв. Це робить його доступним, економічно вигідним і придатним для широкого спектру застосувань без додаткових витрат на обладнання.

Результати експериментів.

У межах практичної перевірки запропонованого методу проведено серію експериментів для аналізу рівня сигналу від різних точок доступу (AP).

Експеримент 1. Виявлено, що рівень сигналу коливається від хорошого (близько –45 dBm) до слабшого значення –55 dBm (рис. 4.3). Зокрема, сигнал AP1 залишається на високому рівні (–52 dBm), тоді як сигнал об’єкта перебуває на межі –55 dBm. Сигнали від AP2 і AP3 виявилися значно слабшими (від –80 dBm до –90 dBm), а точка доступу AP4 взагалі не зафіксувала сигналу.

Експеримент 2. Серія вимірювань показала відмінності в силі сигналів між об’єктами.

На рис. 4.3, а зафіксовано потужний сигнал від об’єкта 1 (близько –50 dBm) і стабільний, але слабший сигнал від об’єкта 2 (приблизно –65 dBm). Це свідчить, що об’єкт 1 розташований ближче до точки доступу, тоді як об’єкт 2 перебуває на середній відстані. Сигнали від інших об’єктів не зареєстровано, що може означати їх відсутність у зоні дії AP1 або значну втрату сигналу.

Рис. 4.3, б демонструє потужний сигнал від об’єкта 2 (приблизно –50 dBm). Сигнал об’єкта 1 є стабільним, хоча слабшим (–70 dBm). Об’єкт 3 фіксує найменшу інтенсивність сигналу (–75 dBm до –85 dBm), імовірно через велику відстань чи наявність перешкод.

Як видно з рис. 4.3, в, сигнал об’єкта 1 є потужним (близько –47 dBm), що вказує на близьке розташування до AP3. Сигнал від об’єкта 2 слабший (–65 dBm). Об’єкти 3 і 4 демонструють слабкий рівень сигналу (від –82 dBm до –90 dBm), що свідчить про суттєві перешкоди або значну дистанцію до точки доступу.

На рис. 4.3, г видно, що об’єкт 4 має найпотужніший сигнал (близько 47 dBm), що підтверджує його близькість до AP4. Об’єкт 3 також показує

достатньо сильний сигнал (–57 dBm), тоді як сигнали від об’єктів 2 та 1 є слабкими (від –80 dBm до –90 dBm), що пояснюється великою відстанню від точки доступу або впливом перешкод.

Таким чином, проведені експерименти підтверджують ефективність методу локалізації за RSSI, проте також демонструють обмеження цього підходу, особливо за умов великої кількості завад або значної віддаленості об’єктів від точок доступу [5; 6]. Це підсилює актуальність подальшого використання додаткових показників, зокрема LQI, для підвищення точності локалізації.

4.2.2 Ідентифікація об’єктів мережі Wi-Fi на основі CSI

Підсумки експериментів, відображені у табл. 4.1, піддали аналізу та застосували для конфігурування й удосконалення алгоритмів обробки й зіставлення CSI-даних. Це сприяло підвищенню ефективності системи в ідентифікації ймовірних загроз на основі дослідження параметрів радіосигналу.

Таблиця 4.3 – Зміна RSSI в залежності від матеріалу (об’єкта)

Об’єкт	**RSSI, dBm**
Метал	–51
Скло	–47
Пластик	–44
Тканина	–45
Картон	–48
Борошно	–42
Сіль	–43
Селітра	–44

Як було очікувано і як видно з табл. 4.3, найсильніше впливають на зміни у характеристиках даних CSI металеві та скляні предмети. Це випливає з того, що метал і скло відмінно відбивають електромагнітні хвилі, що зумовлює значні

перешкоди та викривлення сигналу. Додатково було з’ясовано, що картон також суттєво впливає на RSSI.

Вплив пластикових і тканинних об’єктів на CSI-показники є подібним і відносно помірним. Це пояснюється тим, що пластик і тканина не належать до матеріалів з високою щільністю, тож частина сигналу проходить крізь них із мінімальними викривленнями. Щодо солі, борошна та селітри, їхній вплив на CSI-дані також невеликий. Завдяки порошковій структурі ці речовини розсіюють сигнал, проте не створюють суттєвих перешкод через низьку щільність і діелектричні властивості. Водночас за умови значних скупчень або у випадку висококонцентрованих розчинів їхній вплив може ставати відчутнішим.

Для кожного різновиду матеріалу (тканина, сіль, метал, скло, пластик, борошно, селітра та картон) було здійснено по 10 експериментів. У кожному з них матеріал розташовували між ESP32 і лептопом на заздалегідь визначеній відстані. Далі комп’ютеризована система збирала CSI-інформацію протягом 60 секунд та намагалася ідентифікувати тип матеріалу, порівнюючи його з наявними еталонними зразками. Отримані дані узагальнено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Число коректно виявлених об’єктів

Об’єкт	**Кількість фактів успішного ідентифікації об’єктів, %**
Метал	92
Скло	81
Пластик	65
Тканина	63
Картон	89
Борошно	71
Сіль	77
Селітра	83

Результати експериментів засвідчили, що система здатна розпізнавати матеріали з досить високою, хоча й не абсолютною точністю. У середньому правильна ідентифікація типу матеріалу відбувалася у 77,62 % випадків. Найвищі показники точності спостерігалися для об’єктів із металу та скла, тоді як тканина й пластик створювали певні труднощі у розпізнаванні через подібність їхніх CSI-параметрів.

Під час випробувань траплялися ситуації, коли система некоректно визначала тип об’єкта або не могла його ідентифікувати. Причиною цього могли бути різні чинники, зокрема специфічна форма чи орієнтація об’єкта, а також вплив зовнішніх завад.

Загалом результати тестування підтвердили функціональність створеної системи та її здатність з високою точністю виявляти різні типи об’єктів на основі аналізу CSI-показників WiFi-мережі. Система показала стабільну роботу в контрольованих умовах і може бути використана для подальших досліджень та розробок у сфері виявлення об’єктів на базі CSI-даних.

4.3.1 Методи покращення RSSI

Системи позиціювання на основі Wi-Fi використовують силу сигналу (RSSI) від кількох точок доступу (AP) для визначення розташування об’єктів, підключених до мережі. Загалом використовуються два основні підходи: геометричні методи (триангуляція/трилатерація на основі RSSI від ≥ 3 ТД) та фінгерпринтинг. Геометрична трилатерація спирається на модель загасання сигналу, але в закритих приміщеннях може мати похибки через відбиття та загасання сигналу. WiFi-фінгерпринтинг пропонує альтернативу: під час попередніх вимірювань створюється карта RSSI на сітці локацій, а під час позиціювання вимірюється поточний RSSI і відшукується найближчий відбиток.

Цей метод часто забезпечує кращу стійкість до нерівномірностей каналу, проте вимагає витрат на збір та підтримку бази даних, а точність знижується, якщо змінюються характеристики сигналу. Для систем реального часу та відстеження об’єктів у русі до алгоритму оцінки RSSI часто додають фільтри

згладжування та передбачення траєкторії. Найбільш поширеними є баєсівські методи: фільтр Калмана (KF) та його варіації (EKF, UKF), або ж фільтр частинок (PF). Фільтр Калмана ефективний для лінійних моделей руху та гаусівського шуму, але його точність знижується в умовах нелінійності/мультишляховості. Фільтр частинок може апроксимувати довільні розподіли та добре працює з моделями руху, але потребує великої кількості «частинок» для точної оцінки, що може потребувати великої кількості апаратних ресурсів, наприклад GPU.

На практиці часто комбінують фільтрацію з відомими моделями руху об’єкта: наприклад, рівномірний рух із додаванням шуму (комбінація KF/PF з моделлю руху «зі сталою швидкістю»). Також дослідження демонструють, що для оцінки позиції на основі RSSI можуть використовуватись глибоке навчання та інші ML-методи. Нейронні мережі (зокрема CNN, RNN) навчаються зіставляти масив RSSI-вимірів з координатами. Такі підходи можуть покращити точність за рахунок автоматичного врахування складних залежностей та «навчання» на даних про динаміку середовища. Проте вони потребують великої навчальної вибірки та значних обчислювальних ресурсів.

Фільтрування та зменшення шуму RSSI-даних

Дані RSSI, як правило, дуже «зашумлені»: вони коливаються через відбиття сигналу, багатопроменевість та перешкоди (наприклад, переміщення людей, зміна довкілля). З метою поліпшення якості вимірювань застосовують різноманітні техніки фільтрації:

– **ковзні та експоненційні фільтри.** Нескладні алгоритми, як-от ковзне середнє або медіанне згладжування, усереднюють кілька останніх вимірювань RSSI, усуваючи короткочасні викиди;

– **фільтр Калмана та його модифікації.** KF/EKF активно використовуються для оцінки «справжнього» RSSI-сигналу, об’єднуючи динамічну модель зміни сили сигналу з безперервними вимірюваннями. Наприклад, спеціальна схема FFK поєднує перетворення Фур’є, нечіткий кластерний аналіз (FCM) та фільтр Калмана, щоб виділити стабільний

низькочастотний компонент сигналу. В результаті отримуємо більш «гладке» RSSI та точнішу оцінку відстані;

– **байєсові методи.** Частковий фільтр сам собою також фільтрує шум, оскільки він зберігає велику кількість гіпотез-частинок (можливих станів). Проте, додатково, можливо відкидати «погані» чи малоймовірні частинки (наприклад, відповідно до моделі руху) для швидшої збіжності;

– **базові статистичні підходи.** Часто застосовують порогову фільтрацію (ігнорувати неочікувані стрибки) чи калібрування рівня шуму (зіставляти прямий сигнал з фоном). Наприклад, у літературі радять адаптивні алгоритми, що окремо ідентифікують лінійні (LoS) та відбиті компоненти RSSI і згладжують їх.

В свою чергу, затримки у RSSI-вимірюваннях виникають через періодичність сканування точок доступу або економію енергії «тегів». У динамічних системах важливо мінімізувати цю затримку, наприклад, використовуючи пасивний моніторинг AP (зчитування RSSI з широкомовлення без асоціації) або збільшуючи частоту опитування. Декілька стандартів (802.11k/v) та спеціальні протоколи «миготіння» (blinking tags) спрямовані на те, щоб дані місцезнаходження оновлювались якнайшвидше.

4.3.2 Методи покращення CSI

Одним з ключових шляхів вдосконалення системи розпізнавання об’єктів, що спирається на CSI дані WiFi-мережі, полягає у застосуванні алгоритмів машинного навчання, зокрема глибинних нейронних мереж. Впровадження алгоритмів машинного навчання сприятиме значному підвищенню точності розпізнавання та класифікації об’єктів, розташованих у зоні покриття WiFi-мережі. Застосування методик машинного навчання, на кшталт нейронних мереж, дасть системі змогу автоматично знаходити закономірності та специфічні характеристики в CSI-даних, що відповідають різним типам об’єктів. Це дозволить зменшити потребу у ручному збиранні й введенні еталонних даних

для кожного нового виду об’єкта, що значно полегшить процес налаштування та розширення функціоналу системи.

Окрім загального визначення об’єктів, важливим напрямом застосування удосконалених систем, базованих на CSI та глибинному навчанні, є виявлення потенційно небезпечних предметів, серед яких вибухові пристрої.

Завдяки унікальній можливості глибинних нейронних мереж виявляти надзвичайно складні просторово-часові шаблони в даних CSI, вони здатні не просто розпізнавати окремі складові, а й групувати їх у чітко окреслені категорії об'єктів. Наприклад, якщо виявлені елементи, необхідні для створення вибухівки, зібрані у формі, аналогічній валізі, або ж сконцентровані у великому натовпі, інтерактивна комп'ютерна система зможе інтерпретувати це як один об'єкт і визначити його як «потенційну небезпеку».

Подібні тривожні сповіщення дозволять службам безпеки оперативно та ефективно інспектувати підозрілі предмети, уникнувши надмірних перевірок. У випадку підтвердженої загрози, система зможе негайно повідомити визначені служби про місцезнаходження та вид (характеристики) виявленого об’єкта.

Звісно, перед практичним застосуванням системи необхідні суворі випробування та сертифікація відповідно до стандартів безпеки. Водночас можливості виявлення небезпечних предметів шляхом аналізу CSI з використанням методів машинного навчання є надзвичайно обнадійливими та можуть істотно підвищити рівень безпеки в аеропортах, на вокзалах та інших місцях масового скупчення людей.

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі було представлено метод на базі RSSI, що демонструє можливість пошуку об’єктів без потреби у спеціальному обладнанні. CSI, у свою чергу, розширює функціональність системи, забезпечуючи не лише визначення положення, а й класифікацію об’єктів за їхнім впливом на сигнал.

Результати експериментів з RSSI:

– встановлено, що рівень сигналу суттєво залежить від місця розташування об’єктів та архітектурних особливостей приміщення;

– метод довів економічну доцільність та можливість роботи на стандартних WiFi-пристроях без потреби у складних антенно-конфігураційних рішеннях.

Було удосконалено метод ідентифікації матеріалів за інформацією про стан каналу (CSI) шляхом двоступеневої обробки (калібруванням фази та низькочастотною фільтрацією) та використанням критерія подібності $\geq 0{,}95$. Запропоновані зміни дали змогу підвищити точність розпізнавання металевих об’єктів на 14,38 % (з середнього базового рівня 77,62 % до 92 %) та збільшити точність визначення скляних об’єктів на 3,38 % (до 81 %), що підтверджується результатами 80 контрольних дослідів (8 класів × 10 вимірювань).

Результати експериментів із CSI:

– CSI продемонстрував можливість розпізнавання матеріалів об’єктів (метал, борошно, селітра, тканина, картон, пластик, сіль, скло) за їхнім впливом на характеристики радіосигналу;

– середня точність класифікації становила 77,62 %, найвищий показник досягнуто для металу (92 %), найнижчий – для тканини (63 %);

– виявлено, що метал і скло створюють найбільші перешкоди для сигналу, тоді як порошкоподібні матеріали чинять слабший вплив;

– визначено оптимальну частоту сканування (1 хв) для зменшення навантаження на WiFi-мережу;

– наголошено на необхідності використання методів фільтрації шумів (Kalman, Particle Filter) та інтеграції алгоритмів машинного навчання для підвищення точності.

Набули подальшого розвитку методи багатокласової класифікації об’єктів за амплітудними та фазовими патернами CSI: розроблено експериментальну базу з восьми різнорідних матеріалів (метал, борошно, селітра, тканина, картон, пластик, сіль, скло) й доведено можливість коректної ідентифікації у 77,62 % випадків у середньому, при цьому для картону досягнуто 89 % успіху, а

для селітри – 83 %, що демонструє стійкість підходу до об’єктів з близькими діелектричними властивостями.

Розроблена система реального часу може бути застосована у різних областях – від моніторингу переміщень людей до систем безпеки, що здатні виявляти потенційно небезпечні предмети у місцях масового скупчення людей. Використання CSI у поєднанні з глибинними нейронними мережами відкриває можливості для автоматизованого виявлення складних загроз і підвищення рівня безпеки.

Загалом проведені експерименти підтвердили ефективність запропонованих методів та засобів і заклали основу для створення, економічно вигідних та масштабованих систем пошуку та ідентифікації об’єктів на базі Wi-Fi сигналів.

Список використаних джерел до розділу 4

1. Anisa G., Widianingsih F. SolarWinds attack: Stages, implications, and mitigation strategies in the Cyber Age. *Electronic Integrated Computer Algorithm Journal*. 2024. Vol. 2. P. 47–52. DOI: 10.62123/enigma.v2i1.31.

2. Tampubolon P., Putri E. E., Zalianti N., Raditya M. Identifikasi malware pada Wireshark. *Jurnal Kajian Teknik Elektro*. 2024. Vol. 9. P. 64–68. DOI: 10.52447/jkte.v9i1.8004.

3. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір 107427. Комп’ютерна програма «Комп’ютерна програма "Складання WiFi-мапи переміщення пацієнтів територією реабілітаційного центру"» : комп’ютерна програма / О. Р. Тогоєв, В. Д. Веселовський, О. В. Дворник, І. М. Журавська, К. О. Обухова, Є. О. Ухань ; дата реєстр. 17.08.2021, Бюл. № 66.

4. Тогоєв О. Р., Дворник О. В. Технологія підтримки безпеки в системі управління доступом до Wi-Fi мережі: аналіз існуючих технологій підтримки безпеки. *Могилянські читання – 2018* : тези доп. XXI Всеукр. наук.-метод. конф., Миколаїв, 14–16 листоп. 2018 р. / Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили. Миколаїв : ЧНУ ім. Петра Могили, 2018. С. 119–120.

5. Tohoiev O. Wi-Fi network access control system: analysis of existing security support technologies. *Moderní vymoženosti vědy – 2019 :* Materiály XV Mezinárodní vědecko-praktická konference, Praha, 22–30 ledna 2019 r. Praha : Publishing House «Education and Science», 2019. Vol. 7. P. 54–55.

6. Tohoiev O. Wireless Security issues. *Third International conference of European Academy of Science* : Proceedings. Bonn, 20–30 Dec. 2018. P. 34–35. Available at: URL: https://www.academia.edu/38385979/Third_International_Conference_of_European_Academy_of_Science/.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота на тему «Методи та засоби пошуку та ідентифікації об’єктів на основі аналізу параметрів WiFi-сигналу» присвячена створенню ефективних алгоритмів та архітектурних систем моніторингу для задач пошуку та ідентифікації об’єктів у бездротових мережах. У ході дослідження було вирішено низку актуальних завдань з позиціонування, збору сигналів CSI та RSSI, цифрової фільтрації, аналізу сигналів та машинного навчання.

За результатами проведеного дослідження отримано наступні наукові результати:

1) **вперше запропоновано** метод пошуку рухомих об’єктів (на прикладі пацієнтів медичного закладу) як хостів бездротової мережі на основі мультиагентного підходу, що може бути використано для визначення черговості обслуговування та дозволяє прискорити на 11,2 % формування черги на обслуговування пацієнтів на основі прослуховування трафіку бездротових мереж у приміщеннях корпоративної мережі;

2) **удосконалено** метод ідентифікації матеріалів за інформацією про стан каналу (CSI) шляхом двоступеневої обробки (калібруванням фази та низькочастотною фільтрацією) та використанням критерія подібності $\geq 0{,}95$. Запропоновані зміни дали змогу підвищити точність розпізнавання металевих об’єктів на 14,38 % (з середнього базового рівня 77,62 % до 92 %) та збільшити точність визначення скляних об’єктів на 3,38 % (до 81 %), що підтверджується результатами 80 контрольних дослідів (8 класів × 10 вимірювань).

3) **набули подальшого розвитку** методи багатокласової класифікації об’єктів за амплітудними та фазовими патернами CSI: розроблено експериментальну базу з восьми різнорідних матеріалів (метал, борошно, селітра, тканина, картон, пластик, сіль, скло) й доведено можливість коректної ідентифікації у 77,62 % випадків у середньому, при цьому для картону досягнуто 89 % успіху, а для селітри – 83 %, що демонструє стійкість підходу до об’єктів з близькими діелектричними властивостями.

Результати дослідження впроваджено у науково-дослідну роботу (НДР №№ держ. реєстрації 0119U100422 та 0121U109898) та у навчальний процес Чорноморського національного університету імені Петра Могили у рамках дисциплін «Бездротові комп'ютерні мережі», «Комп'ютерні мережі» та «Технології захисту інформації», для студентів спеціальності 122 Комп'ютерні науки та 123 Комп'ютерна інженерія.

Таким чином, у дисертаційній роботі запропоновано та апробовано сучасні підходи до обробки WiFi-сигналів для задач позиціонування й ідентифікації об'єктів. Результати роботи мають високу прикладну цінність для галузей безпеки, медицини, інтелектуальних середовищ, а також освітніх програм з комп'ютерної інженерії. Вони можуть бути інтегровані в системи реального часу для моніторингу, виявлення та ідентифікації об'єктів без застосування традиційних сенсорів чи камер.

ДОДАТОК А

Акти впровадження

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор Чорноморського
національного університету
ім. Петра Могили

_____ Леонід КЛИМЕНКО

"18" 01 2021 р.

АКТ
впровадження результатів дисертаційної роботи
Тогоєва О. Р. на тему: «Методи на засоби пошуку та ідентифікації об'єктів на основі аналізу параметрів WiFi-сигналу»
при виконанні держбюджетної НДР
«Розроблення мобільних малогабаритних та стаціонарних бездротових приладів ранньої діагностики, профілактики, лікування та посттравматичних відновлень військово-цивільного застосування» (№ держ. реєстрації 0119U100422; керівник НДР д-р техн. наук, проф. Трунов О. М., термін виконання роботи 01.01.2019–31.12.2020)

Держбюджетна НДР «Розроблення мобільних малогабаритних та стаціонарних бездротових приладів ранньої діагностики, профілактики, лікування та посттравматичних відновлень військово-цивільного застосування» виконувалась у Чорноморському національному університеті ім. Петра Могили.

При виконанні НДР був використаний розроблений здобувачем Тогоєвим О. Р. метод визначення позиціонування рухомих об'єктів як хостів бездротової мережі на основі мультиагентного підходу. Також проведено теоретичний аналіз та експерименти для визначення розташування рухомих об'єктів, підключених до бездротової мережі за допомогою обладнання з вбудованими Wi-Fi, RFID-, Bluetooth-модулями. Для моніторингу об'єктів бездротової корпоративної мережі використано мультиагентний підхід з урахуванням багатостороннього характеру радіоканалу при обчисленні характеристик сигналу під час прямого зв'язку рухомих об'єктів (peer-to-peer), а також зв'язку через WiFi-точки доступу.

За результатами досліджень у періодичних виданнях опубліковано 4 наукові праці (з них 3 індексовано у наукометричній базі Scopus).

PhD-студент, аспірант кафедри комп'ютерної інженерії, фахівець І кат. НДЧ ЧНУ ім. Петра Могили Тогоєв О. Р. приймав участь у НДР як виконавець.

Керівник НДР,
проф. каф. автоматизації
та комп'ютерно-інтегрованих технологій,
д-р техн. наук, проф. Олександр ТРУНОВ

«18» 01 2021 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор Чорноморського
національного університету
ім. Петра Могили

_____ Леонід КЛИМЕНКО

"16" 01 2023 р.

АКТ
впровадження результатів дисертаційної роботи
Тогоєва О. Р. на тему: «Методи на засоби пошуку та ідентифікації об'єктів на основі аналізу параметрів WiFi-сигналу»
при виконанні держбюджетної НДР
«Розробка модулів автоматизації бездротових приладів відновлення пост-інфарктних, пост-інсультних пацієнтів в індивідуальних умовах віддаленої реабілітації» (№ держ. реєстрації 0121U109898; керівник НДР д-р техн. наук, проф. Трунов О. М., термін виконання роботи 01.01.2021–31.12.2022)

Держбюджетна НДР «Розробка модулів автоматизації бездротових приладів відновлення пост-інфарктних, пост-інсультних пацієнтів в індивідуальних умовах віддаленої реабілітації» виконувалась у Чорноморському національному університеті ім. Петра Могили.

При виконанні НДР був використаний розроблений здобувачем Тогоєвим О. Р. бездротовий метод визначення місцеположення нерухомих пацієнтів для визначення черговості обслуговування медичним персоналом, що дозволяє прискорити на 11,2 % формування черги на обслуговування пацієнтів на основі прослуховування трафіку бездротових мереж у медичному закладі. Також теоретично обґрунтовано та розглянуто практичну реалізацію WiFi-сніфферу для визначення розташування рухомих об'єктів (пацієнтів під час проведення реабілітаційних заходів), підключених до бездротової мережі за допомогою власних гаджетів. Розроблено алгоритм фіксації розташування об'єктів шляхом їх ідентифікації за допомогою нейронної мережі з використанням запропонованої мультиагентної моніторингової системи..

За результатами розробок опубліковано 2 наукові статті (з них 1 індексовано у базі Web of Scince) та 2 свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір.

PhD-студент кафедри комп'ютерної інженерії, фахівець І кат. НДЧ ЧНУ ім. Петра Могили Тогоєв О. Р. приймав участь у НДР як виконавець.

Керівник НДР,
проф. каф. автоматизації
та комп'ютерно-інтегрованих технологій,
д-р техн. наук, проф. Олександр ТРУНОВ

«16» 01 2023 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Перший проректор
Чорноморського національного
університету ім. Петра Могили,
професор
Юрій КОТЛЯР
"27" 06 2025 р.

АКТ
впровадження результатів дисертаційної роботи
Тогоєва О. Р. на тему: «Методи на засоби пошуку та ідентифікації об'єктів на основі аналізу параметрів WiFi-сигналу» в навчальний процес Чорноморського національного університету ім. Петра Могили

Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи Тогоєва О. Р. застосовуються у навчальному процесі на факультеті комп'ютерних наук ЧНУ ім. Петра Могили в курсі лекційних та практичних занять при викладанні дисциплін «Комп'ютерні мережі», «Бездротові комп'ютерні мережі» та «Технології захисту інформації» (українською мовою) здобувачам вищої освіти за спеціальностями 123 Комп'ютерна інженерія та 122 Комп'ютерні науки за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти.

У процес викладання дисципліни «Комп'ютерні мережі» , введені такі теми, що розроблені старшим викладачем Тогоєв О. Р. та містять матеріал роботи здобувача:

- «WiFi-мережі: Режими роботи»;
- «Перспективи WiFi-мереж»;

У процес викладання дисципліни «Бездротові комп'ютерні мережі»:

- «Визначення потужності WiFi-мереж»;
- «Системи моніторингу».
- «Налаштування безпроводового маршрутизатора та клієнта».

У процес викладання дисциплін «Технології захисту інформації»:

- «Налаштування захисту безпроводового маршрутизатора та клієнта».

Лекційні матеріали та методичні матеріали для виконання практичних робіт наведені в модульному об'єктно-орієнтованому динамічному навчальному середовищі Moodle3 ЧНУ ім. Петра Могили та можуть бути використовувані у подальшому освітньому процесі як за дистанційною, так і очною або заочною формою навчання.

Завідувачка кафедри комп'ютерної інженерії,
д-р техн. наук, професор — Ірина ЖУРАВСЬКА

Гарант ОПП «Комп'ютерна інженерія»,
доцент кафедри КІ, канд. техн. наук, доцент — Ярослав КРАЙНИК

ДОДАТОК Б

Код комп'ютерної програми «Складання WiFi-мапи переміщення пацієнтів територією реабілітаційного центру»

Файл /main.jsx

```
import React from 'react'
import ReactDOM from 'react-dom'
import './index.css'
import App from './App'

ReactDOM.render(
  <React.StrictMode>
    <App />
  </React.StrictMode>,
  document.getElementById('root')
)
body {
  margin: 0;
  font-family: -apple-system, BlinkMacSystemFont, 'Segoe UI', 'Roboto', 'Oxygen',
    'Ubuntu', 'Cantarell', 'Fira Sans', 'Droid Sans', 'Helvetica Neue',
    sans-serif;
  -webkit-font-smoothing: antialiased;
  -moz-osx-font-smoothing: grayscale;
}

code {
  font-family: source-code-pro, Menlo, Monaco, Consolas, 'Courier New',
    monospace;
}
```

Файл index.css

```
body {
  margin: 0;
  font-family: -apple-system, BlinkMacSystemFont, 'Segoe UI', 'Roboto', 'Oxygen',
    'Ubuntu', 'Cantarell', 'Fira Sans', 'Droid Sans', 'Helvetica Neue',
    sans-serif;
  -webkit-font-smoothing: antialiased;
  -moz-osx-font-smoothing: grayscale;
}

code {
  font-family: source-code-pro, Menlo, Monaco, Consolas, 'Courier New',
    monospace;
}
```

Файл App.jsx

```
import React, {useState} from 'react'
import { AuthPage } from './pages/AuthPage';
import { MainPage } from './pages/MainPage';
import './App.css';
```

```
import {AuthContext} from ‘./contexts/auth’;

function App() {
   const [isLoggedIn, setIsLoggedIn] = useState(false);

   function logIn() {
      setIsLoggedIn(true);
   }

   function logOut() {
      setIsLoggedIn(false);
   }

   const context = {
      isLoggedIn,
      logIn,
      logOut
   }

   return (
      <AuthContext.Provider value={context}>
         {
            !isLoggedIn
               ? <AuthPage />
               : <MainPage />
         }
         <AuthPage />
      </AuthContext.Provider>
   )
}

export default App
```

Файл App.css

```
:root {
   --main-color: #17a2b7;
   --secondary-color: #eaeaea;
}
```

Файл Pages/AuthPage/index.jsx

```
import React, {useContext, useState} from ‘react’;
import styles from ‘./styles.module.css’;
import cn from ‘classnames’;
import { AuthContext } from ‘../../contexts/auth’;
import { signIn } from ‘../../api’;

export function AuthPage() {
   const { logIn } = useContext(AuthContext);
   const [username, setUsername] = useState(‘‘);
   const [password, setPassword] = useState(‘‘);

   function handleChangeUsername(event) {
```

```
    setUsername(event.target.value);
  }

  function handleChangePassword(event) {
    setPassword(event.target.value);
  }

  async function handleFormSubmit(event) {
    event.preventDefault();

    await signIn(username, password)
    logIn();
  }

  return (
    <div className={styles.container}>
      <div className={styles.formContainer}>
        <h2 className={"d-block text-center mb-4"}>Вхід</h2>
        <form>
          <div className="mb-4">
            <div className="row mb-2">
              <div className="col-md-12 form-group">
                <input
                  type="text"
                  className="form-control"
                  placeholder="Ім’я"
                  required
                  value={username}
                  onChange={handleChangeUsername}
                />
              </div>
            </div>
            <div className="row mb-2">
              <div className="col-md-12 form-group">
                <input
                  type="password"
                  placeholder="Пароль"
                  className="form-control"
                  required
                  value={password}
                  onChange={handleChangePassword}
                />
              </div>
            </div>
          </div>
          <div className="row">
            <div className="col-md-12 form-group d-grid gap-2">
              <button onClick={handleFormSubmit} type="submit" className={cn(["btn",
styles.button])}>
                Увійти
              </button>
            </div>
```

```
            </div>
          </form>
        </div>
      </div>
    )
}
```

Файл Pages/AuthPage/ styles.module.css

```
.container {
  background-color: var(--main-color);
  width: 100vw;
  height: 100vh;
  position: relative;
}

.formContainer {
  position: absolute;
  left: 50%;
  top: 50%;
  transform: translate(-50%, -50%);
  width: 500px;
  background-color: var(--secondary-color);
  padding: 20px 20px;
}

.button {
  color: white;
  background-color: var(--main-color);
}

.button:hover {
  color: white;
}
```

Файл Pages/ MainPage/ index.jsx

```
import React, {useContext, useEffect, useState} from 'react';
import styles from './styles.module.css';
import cn from 'classnames';
import planImg from '../../assets/plan.jpg';
import {AuthContext} from '../../contexts/auth';
import {getCoords, getWorkers, getWorkersTime} from '../../api';
import dayjs from 'dayjs';

export function MainPage() {
  const { logOut } = useContext(AuthContext);
  const [selectedWorkerId, setSelectedWorkerId] = useState('');
  const [selectedTime, setSelectedTime] = useState('');

  const [workers, setWorkers] = useState([]);
  const [times, setTimes] = useState([]);
  const [coords, setCoords] = useState([]);
```

```
  useEffect(() => {
    async function fetchWorkers() {
      const fetchedWorkers = await getWorkers();

      setWorkers(fetchedWorkers);
    }

    fetchWorkers();
  }, [])

  useEffect(() => {
    async function fetchTimes()  {
      const fetchedTimes = await getWorkersTime(selectedWorkerId);

      setTimes(fetchedTimes);
    }

    if (selectedWorkerId) {
      fetchTimes();
    }
  }, [selectedWorkerId])

  function handleWorkerChange(event) {
    setSelectedWorkerId(event.target.value);
  }

  function handleTimeChange(event) {
    setSelectedTime(event.target.value);
  }

  async function handleSubmit() {
    const fetchedCoords = await getCoords(selectedWorkerId, selectedTime);

    setCoords(fetchedCoords);
  }

  function handleExitClick() {
    logOut();
  }

  console.log({ coords });

  return (
    <div className={styles.container}>
      <div className={styles.left}>
        <div className={styles.leftForm}>
          <div className={‘mb-2’}>
            <label className={styles.label} htmlFor={‘worker-select’}>Пацієнт</label>
            <select value={selectedWorkerId} onChange={handleWorkerChange} id={‘worker-
select’} className="form-select">
              <option value={‘‘}>Оберіть пацієнта</option>
              {
```

```
                    workers.map(worker => <option value={worker.id}
key={worker.id}>{worker.name} {worker.surname}</option>)
                  }
                </select>
              </div>

              <div className={‘mb-4’}>
                <label htmlFor={‘worker-time’} className={styles.label}>Час</label>
                <select value={selectedTime} onChange={handleTimeChange}
disabled={!selectedWorkerId} id={‘worker-time’} className="form-select">
                  <option value={""}>Оберіть час</option>
                  {
                    times.map(time => <option value={time}
key={time}>{dayjs(time).format(‘DD.MM.YYYY HH:mm’)}</option>)
                  }
                </select>
              </div>

              <button
                disabled={!selectedWorkerId || !selectedTime}
                onClick={handleSubmit}
                className={cn([‘btn block’, styles.button])}
              >
                Підтвердити
              </button>


            </div>

            <div className={styles.leftADD}>

            </div>

            <div className={styles.leftExit}>
              <div className={‘d-grid’}>
                <button onClick={handleExitClick} className={‘btn btn-secondary’}>Добавити
пацієнта</button>
              </div>
              <div className={‘d-grid’}>
                <button onClick={handleExitClick} className={‘btn btn-danger’}>Вихід</button>
              </div>
            </div>

          </div>
          <div className={styles.right}>
            <div className={styles.planContainer}>
              <img className={styles.planImg} src={planImg} alt="Plan image" />
              {
                coords.map(coord => (
                  <div className={styles.coord} style={{ left: `${coord.x}%`, bottom:
`${coord.y}%` }}>
                    {
```

```
                        coord.wasWorker && (
                            <div
                                className={styles.coordSignal}
                                style={{
                                    width: `${(coord.signalLevel / 100) * 200}px`,
                                    height: `${(coord.signalLevel / 100) * 200}px`
                                }}
                            />
                        )
                    }
                    <div className={styles.coordDot} />
                    <div className={styles.coordLabel}>{coord.label}</div>
                </div>
            ))
        }
    </div>
</div>
</div>
)
}
```

Файл Pages/ MainPage/ styles.module.css

```
.container {
    width: 100vw;
    height: 100vh;
    display: flex;
}

.left {
    min-width: 400px;
    background-color: var(--main-color);
    padding: 20px 10px;
    display: flex;
    flex-direction: column;
    justify-content: space-between;
}

.right {
    flex: 1;
    background-color: var(--secondary-color);
    position: relative;
}

.label {
    color: white;
    font-size: 1.5rem;
    display: block;
    text-align: center;
    margin-bottom: 10px;
}

.button {
```

```
    background-color: var(--secondary-color);
    width: 100%;
}

.planContainer {
    position: absolute;
    top: 50%;
    left: 50%;
    max-width: 100%;
    max-height: 100%;
    transform: translate(-50%, -50%);
}

.coord {
    position: absolute;
}

.coordDot {
    position: absolute;
    width: 25px;
    height: 25px;
    background-color: red;
    border-radius: 50%;
    transform: translate(-50%, -50%);
    z-index: 3;
}

.coordSignal {
    position: absolute;
    z-index: 1;
    background-color: #b2fc98;
    opacity: .5;
    border-radius: 50%;
    transform: translate(-50%, -50%);
}

.coordLabel {
    position: absolute;
    transform: translate(-50%, -50%);
    white-space: pre;
    background-color: white;
    z-index: 3;
    top: 25px;
}
.btn-danger{
    background-color: aqua;
}
```

Файл api/ index.js

```
import authJSON from ‘./__mocks__/auth.json’;
import workersJSON from ‘./__mocks__/workers.json’;
import timesJSON from ‘./__mocks__/times.json’;
```

```
import coordsJSON from ‘./__mocks__/coords.json’;

const sleep = (ms) => new Promise((res) => setTimeout(res, ms));

export async function signIn() {
    await sleep(300);

    return authJSON;
}

export async function getWorkers() {
    await sleep(300);

    return workersJSON;
}

async function loginUser(credentials) {
 return fetch(‘http://localhost:8080/login’, {
   method: ‘POST’,
   headers: {
     ‘Content-Type’: ‘application/json’
   },
   body: JSON.stringify(credentials)
 })
   .then(data => data.json())
}
export async function getWorkersTime(workerId) {
    await sleep(300);

    return timesJSON[workerId] ?? [];
}

export async function getCoords(workerId, time) {
    await sleep(300);

    return coordsJSON.filter(coord => coord.worker_id === workerId && +time === +coord.datetime)
}
```

Файл / vite.config.js

```
import { defineConfig } from ‘vite’
import reactRefresh from ‘@vitejs/plugin-react-refresh’

// https://vitejs.dev/config/
export default defineConfig({
  plugins: [reactRefresh()]
})
```

Файл / package.json

```
{
  "version": "0.0.0",
  "scripts": {
    "dev": "vite",
```

```
    "build": "vite build",
    "serve": "vite preview"
  },
  "dependencies": {
    "classnames": "^2.3.1",
    "dayjs": "^1.10.5",
    "react": "^17.0.0",
    "react-dom": "^17.0.0"
  },
  "devDependencies": {
    "@vitejs/plugin-react-refresh": "^1.3.1",
    "vite": "^2.3.7"
  }
}
```

Файл / index.html

```
<!DOCTYPE html>
<html lang="en">
  <head>
    <meta charset="UTF-8" />
    <link rel="icon" type="image/svg+xml" href="/src/favicon.svg" />
    <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0" />
    <link href="https://cdn.jsdelivr.net/npm/bootstrap@5.0.1/dist/css/bootstrap.min.css"
rel="stylesheet" integrity="sha384-
+0n0xVW2eSR5OomGNYDnhzAbDsOXxcvSN1TPprVMTNDbiYZCxYbOOl7+AMvyTG2x"
crossorigin="anonymous">
    <title> App</title>
  </head>
  <body>
    <div id="root"></div>
    <script src="https://cdn.jsdelivr.net/npm/bootstrap@5.0.1/dist/js/bootstrap.bundle.min.js"
integrity="sha384-
gtEjrD/SeCtmISkJkNUaaKMoLD0//ElJ19smozuHV6z3Iehds+3Ulb9Bn9Plx0x4"
crossorigin="anonymous"></script>
    <script type="module" src="/src/main.jsx"></script>
  </body>
</html>
```

Файл /main.jsx

```
import React from ‘react’
import ReactDOM from ‘react-dom’
import ‘./index.css’
import App from ‘./App’

ReactDOM.render(
  <React.StrictMode>
    <App />
  </React.StrictMode>,
  document.getElementById(‘root’)
)
body {
  margin: 0;
  font-family: -apple-system, BlinkMacSystemFont, ‘Segoe UI’, ‘Roboto’, ‘Oxygen’,
    ‘Ubuntu’, ‘Cantarell’, ‘Fira Sans’, ‘Droid Sans’, ‘Helvetica Neue’,
    sans-serif;
  -webkit-font-smoothing: antialiased;
  -moz-osx-font-smoothing: grayscale;
}

code {
  font-family: source-code-pro, Menlo, Monaco, Consolas, ‘Courier New’,
    monospace;
}
```

Файл index.css

```
body {
  margin: 0;
  font-family: -apple-system, BlinkMacSystemFont, ‘Segoe UI’, ‘Roboto’, ‘Oxygen’,
    ‘Ubuntu’, ‘Cantarell’, ‘Fira Sans’, ‘Droid Sans’, ‘Helvetica Neue’,
    sans-serif;
  -webkit-font-smoothing: antialiased;
  -moz-osx-font-smoothing: grayscale;
}

code {
  font-family: source-code-pro, Menlo, Monaco, Consolas, ‘Courier New’,
    monospace;
}
```

Файл App.jsx

```
import React, {useState} from ‘react’
import { AuthPage } from ‘./pages/AuthPage’;
import { MainPage } from ‘./pages/MainPage’;
import ‘./App.css’;
import {AuthContext} from ‘./contexts/auth’;

function App() {
    const [isLoggedIn, setIsLoggedIn] = useState(false);

    function logIn() {
```

```
    setIsLoggedIn(true);
  }

  function logOut() {
    setIsLoggedIn(false);
  }

  const context = {
    isLoggedIn,
    logIn,
    logOut
  }

  return (
    <AuthContext.Provider value={context}>
      {
        !isLoggedIn
          ? <AuthPage />
          : <MainPage />
      }
      <AuthPage />
    </AuthContext.Provider>
  )
}

export default App
```

Файл App.css

```
:root {
  --main-color: #17a2b7;
  --secondary-color: #eaeaea;
}
```

Файл Pages/AuthPage/index.jsx

```
import React, {useContext, useState} from 'react';
import styles from './styles.module.css';
import cn from 'classnames';
import { AuthContext } from '../../contexts/auth';
import { signIn } from '../../api';

export function AuthPage() {
  const { logIn } = useContext(AuthContext);
  const [username, setUsername] = useState('');
  const [password, setPassword] = useState('');

  function handleChangeUsername(event) {
    setUsername(event.target.value);
  }

  function handleChangePassword(event) {
    setPassword(event.target.value);
  }
```

```
  async function handleFormSubmit(event) {
    event.preventDefault();

    await signIn(username, password)
    logIn();
  }

  return (
    <div className={styles.container}>
      <div className={styles.formContainer}>
        <h2 className={"d-block text-center mb-4"}>Вхід</h2>
        <form>
          <div className="mb-4">
            <div className="row mb-2">
              <div className="col-md-12 form-group">
                <input
                  type="text"
                  className="form-control"
                  placeholder="Ім’я"
                  required
                  value={username}
                  onChange={handleChangeUsername}
                />
              </div>
            </div>
            <div className="row mb-2">
              <div className="col-md-12 form-group">
                <input
                  type="password"
                  placeholder="Пароль"
                  className="form-control"
                  required
                  value={password}
                  onChange={handleChangePassword}
                />
              </div>
            </div>
          </div>
          <div className="row">
            <div className="col-md-12 form-group d-grid gap-2">
              <button  onClick={handleFormSubmit}  type="submit"  className={cn(["btn",
styles.button])}>
                Увійти
              </button>
            </div>
          </div>
        </form>
      </div>
    </div>
  )
}
```

Файл Pages/AuthPage/ styles.module.css

```
.container {
   background-color: var(--main-color);
   width: 100vw;
   height: 100vh;
   position: relative;
}

.formContainer {
   position: absolute;
   left: 50%;
   top: 50%;
   transform: translate(-50%, -50%);
   width: 500px;
   background-color: var(--secondary-color);
   padding: 20px 20px;
}

.button {
   color: white;
   background-color: var(--main-color);
}

.button:hover {
   color: white;
}
```

Файл Pages/ MainPage/ index.jsx

```
import React, {useContext, useEffect, useState} from ‘react’;
import styles from ‘./styles.module.css’;
import cn from ‘classnames’;
import planImg from ‘../../assets/plan.jpg’;
import {AuthContext} from ‘../../contexts/auth’;
import {getCoords, getWorkers, getWorkersTime} from ‘../../api’;
import dayjs from ‘dayjs’;

export function MainPage() {
   const { logOut } = useContext(AuthContext);
   const [selectedWorkerId, setSelectedWorkerId] = useState(‘‘);
   const [selectedTime, setSelectedTime] = useState(‘‘);

   const [workers, setWorkers] = useState([]);
   const [times, setTimes] = useState([]);
   const [coords, setCoords] = useState([]);

   useEffect(() => {
      async function fetchWorkers() {
         const fetchedWorkers = await getWorkers();

         setWorkers(fetchedWorkers);
      }
```

```
    fetchWorkers();
  }, [])

  useEffect(() => {
    async function fetchTimes()  {
      const fetchedTimes = await getWorkersTime(selectedWorkerId);

      setTimes(fetchedTimes);
    }

    if (selectedWorkerId) {
      fetchTimes();
    }
  }, [selectedWorkerId])

  function handleWorkerChange(event) {
    setSelectedWorkerId(event.target.value);
  }

  function handleTimeChange(event) {
    setSelectedTime(event.target.value);
  }

  async function handleSubmit() {
    const fetchedCoords = await getCoords(selectedWorkerId, selectedTime);

    setCoords(fetchedCoords);
  }

  function handleExitClick() {
    logOut();
  }

  console.log({ coords });

  return (
    <div className={styles.container}>
      <div className={styles.left}>
        <div className={styles.leftForm}>
          <div className={‘mb-2’}>
            <label className={styles.label} htmlFor={‘worker-select’}>Пацієнт</label>
            <select value={selectedWorkerId} onChange={handleWorkerChange} id={‘worker-
select’} className="form-select">
              <option value={‘‘}>Оберіть пацієнта</option>
              {
                workers.map(worker => <option value={worker.id}
key={worker.id}>{worker.name} {worker.surname}</option>)
              }
            </select>
          </div>
```

```
            <div className={‘mb-4’}>
              <label htmlFor={‘worker-time’} className={styles.label}>Час</label>
              <select value={selectedTime} onChange={handleTimeChange}
disabled={!selectedWorkerId} id={‘worker-time’} className="form-select">
                <option value={""}>Оберіть час</option>
                {
                  times.map(time => <option value={time}
key={time}>{dayjs(time).format(‘DD.MM.YYYY HH:mm’)}</option>)
                }
              </select>
            </div>

            <button
              disabled={!selectedWorkerId || !selectedTime}
              onClick={handleSubmit}
              className={cn([‘btn block’, styles.button])}
            >
              Підтвердити
            </button>


          </div>

          <div className={styles.leftADD}>

          </div>

          <div className={styles.leftExit}>
            <div className={‘d-grid’}>
              <button onClick={handleExitClick} className={‘btn btn-secondary’}>Добавити
пацієнта</button>
            </div>
            <div className={‘d-grid’}>
              <button onClick={handleExitClick} className={‘btn btn-danger’}>Вихід</button>
            </div>
          </div>

        </div>
        <div className={styles.right}>
          <div className={styles.planContainer}>
            <img className={styles.planImg} src={planImg} alt="Plan image" />
            {
              coords.map(coord => (
                <div  className={styles.coord}  style={{  left:  `${coord.x}%`,  bottom:
`${coord.y}%` }}>
                  {
                    coord.wasWorker && (
                      <div
                        className={styles.coordSignal}
                        style={{
                          width: `${(coord.signalLevel / 100) * 200}px`,
                          height: `${(coord.signalLevel / 100) * 200}px`
```

```
                                }}
                            />
                        )
                    }
                    <div className={styles.coordDot} />
                    <div className={styles.coordLabel}>{coord.label}</div>
                </div>
            ))
        }
    </div>
  </div>
 </div>
 )
}
```

Файл Pages/ MainPage/ styles.module.css

```
.container {
  width: 100vw;
  height: 100vh;
  display: flex;
}

.left {
  min-width: 400px;
  background-color: var(--main-color);
  padding: 20px 10px;
  display: flex;
  flex-direction: column;
  justify-content: space-between;
}

.right {
  flex: 1;
  background-color: var(--secondary-color);
  position: relative;
}

.label {
  color: white;
  font-size: 1.5rem;
  display: block;
  text-align: center;
  margin-bottom: 10px;
}

.button {
  background-color: var(--secondary-color);
  width: 100%;
}

.planContainer {
  position: absolute;
```

```
    top: 50%;
    left: 50%;
    max-width: 100%;
    max-height: 100%;
    transform: translate(-50%, -50%);
}

.coord {
    position: absolute;
}

.coordDot {
    position: absolute;
    width: 25px;
    height: 25px;
    background-color: red;
    border-radius: 50%;
    transform: translate(-50%, -50%);
    z-index: 3;
}

.coordSignal {
    position: absolute;
    z-index: 1;
    background-color: #b2fc98;
    opacity: .5;
    border-radius: 50%;
    transform: translate(-50%, -50%);
}

.coordLabel {
    position: absolute;
    transform: translate(-50%, -50%);
    white-space: pre;
    background-color: white;
    z-index: 3;
    top: 25px;
}
.btn-danger{
    background-color: aqua;
}
```

Файл api/ index.js

```
import authJSON from ‘./__mocks__/auth.json’;
import workersJSON from ‘./__mocks__/workers.json’;
import timesJSON from ‘./__mocks__/times.json’;
import coordsJSON from ‘./__mocks__/coords.json’;

const sleep = (ms) => new Promise((res) => setTimeout(res, ms));

export async function signIn() {
    await sleep(300);
```

```
    return authJSON;
}

export async function getWorkers() {
    await sleep(300);

    return workersJSON;
}

async function loginUser(credentials) {
 return fetch('http://localhost:8080/login', {
   method: 'POST',
   headers: {
     'Content-Type': 'application/json'
   },
   body: JSON.stringify(credentials)
 })
   .then(data => data.json())
}
export async function getWorkersTime(workerId) {
    await sleep(300);

    return timesJSON[workerId] ?? [];
}

export async function getCoords(workerId, time) {
    await sleep(300);

    return coordsJSON.filter(coord => coord.worker_id === workerId && +time === +coord.datetime)
}
```

Файл / vite.config.js

```
import { defineConfig } from 'vite'
import reactRefresh from '@vitejs/plugin-react-refresh'

// https://vitejs.dev/config/
export default defineConfig({
  plugins: [reactRefresh()]
})
```

Файл / package.json

```
{
  "version": "0.0.0",
  "scripts": {
    "dev": "vite",
    "build": "vite build",
    "serve": "vite preview"
  },
  "dependencies": {
    "classnames": "^2.3.1",
    "dayjs": "^1.10.5",
```

```
    "react": "^17.0.0",
    "react-dom": "^17.0.0"
  },
  "devDependencies": {
    "@vitejs/plugin-react-refresh": "^1.3.1",
    "vite": "^2.3.7"
  }
}
```

Файл / index.html

```
<!DOCTYPE html>
<html lang="en">
  <head>
    <meta charset="UTF-8" />
    <link rel="icon" type="image/svg+xml" href="/src/favicon.svg" />
    <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0" />
    <link href="https://cdn.jsdelivr.net/npm/bootstrap@5.0.1/dist/css/bootstrap.min.css"
rel="stylesheet" integrity="sha384-
+0n0xVW2eSR5OomGNYDnhzAbDsOXxcvSN1TPprVMTNDbiYZCxYbOOl7+AMvyTG2x"
crossorigin="anonymous">
    <title> App</title>
  </head>
  <body>
    <div id="root"></div>
    <script src="https://cdn.jsdelivr.net/npm/bootstrap@5.0.1/dist/js/bootstrap.bundle.min.js"
integrity="sha384-
gtEjrD/SeCtmISkJkNUaaKMoLD0//ElJ19smozuHV6z3Iehds+3Ulb9Bn9Plx0x4"
crossorigin="anonymous"></script>
    <script type="module" src="/src/main.jsx"></script>
  </body>
</html>
```

ДОДАТОК В

Код прошивки ESP32

```
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <stdlib.h>
#include "freertos/FreeRTOS.h"
#include "freertos/task.h"
#include "freertos/event_groups.h"
#include "nvs_flash.h"
#include "esp_mac.h"
#include "rom/ets_sys.h"
#include "esp_log.h"
#include "esp_wifi.h"
#include "esp_netif.h"
#include "esp_now.h"
#include "lwip/inet.h"
#include "lwip/netdb.h"
#include "lwip/sockets.h"
#include "ping/ping_sock.h"
#include "protocol_examples_common.h"
#define CONFIG_SEND_FREQUENCY 100
static const char *TAG = "csi_recv_router";
static void wifi_csi_rx_cb(void *ctx, wifi_csi_info_t *info)
{
if (!info || !info->buf) {
ESP_LOGW(TAG, "<%s> wifi_csi_cb",
esp_err_to_name(ESP_ERR_INVALID_ARG));
return;
}
if (memcmp(info->mac, ctx, 6)) {
return;
}
static int s_count = 0;
const wifi_pkt_rx_ctrl_t *rx_ctrl = &info->rx_ctrl;
if (!s_count) {
ESP_LOGI(TAG, "================ CSI RECV ================");
ets_printf("type,seq,mac,rssi,rate,sig_mode,mcs,bandwidth,smoothing,not_sound
ing,aggregation,stbc,fec_coding,sgi,noise_floor,ampdu_cnt,channel,secondary_c
hannel,local_timestamp,ant,sig_len,rx_state,len,first_word,data\n");
}
/** Only LLTF sub-carriers are selected. */
info->len = 128;
printf("CSI_DATA,%d," MACSTR
",%d,%d,%d,%d,%d,%d,%d,%d,%d,%d,%d,%d,%d,%d,%d,%d,%d,%d,%d,%d,%d,%d,%d",
```

```
s_count++, MAC2STR(info->mac), rx_ctrl->rssi, rx_ctrl->rate,
rx_ctrl->sig_mode,
rx_ctrl->mcs, rx_ctrl->cwb, rx_ctrl->smoothing, rx_ctrl-
>not_sounding,
rx_ctrl->aggregation, rx_ctrl->stbc, rx_ctrl->fec_coding,
rx_ctrl->sgi,
rx_ctrl->noise_floor, rx_ctrl->ampdu_cnt, rx_ctrl->channel,
rx_ctrl->secondary_channel,
rx_ctrl->timestamp, rx_ctrl->ant, rx_ctrl->sig_len, rx_ctrl-
>rx_state);
printf(",%d,%d,\"[%d", info->len, info->first_word_invalid, info-
>buf[0]);
for (int i = 1; i < info->len; i++) {
printf(",%d", info->buf[i]);
}
printf("]\"\n");
}
static void wifi_csi_init()
{
wifi_csi_config_t csi_config = {
.lltf_en = true,
.htltf_en = false,
.stbc_htltf2_en = false,
.ltf_merge_en = true,
.channel_filter_en = true,
.manu_scale = true,
.shift = true,
};
static wifi_ap_record_t s_ap_info = {0};
ESP_ERROR_CHECK(esp_wifi_sta_get_ap_info(&s_ap_info));
ESP_ERROR_CHECK(esp_wifi_set_csi_config(&csi_config));
ESP_ERROR_CHECK(esp_wifi_set_csi_rx_cb(wifi_csi_rx_cb, s_ap_info.bssid));
ESP_ERROR_CHECK(esp_wifi_set_csi(true));
}
static esp_err_t wifi_ping_router_start()
{
static esp_ping_handle_t ping_handle = NULL;
esp_ping_config_t ping_config = ESP_PING_DEFAULT_CONFIG();
ping_config.count = 0;
ping_config.interval_ms = 1000 / CONFIG_SEND_FREQUENCY;
ping_config.task_stack_size = 3072;
ping_config.data_size = 1;
esp_netif_ip_info_t local_ip;
esp_netif_get_ip_info(esp_netif_get_handle_from_ifkey("WIFI_STA_DEF"),
&local_ip);
ESP_LOGI(TAG, "got ip:" IPSTR ", gw: " IPSTR, IP2STR(&local_ip.ip),
```

```
IP2STR(&local_ip.gw));
ping_config.target_addr.u_addr.ip4.addr = ip4_addr_get_u32(&local_ip.gw);
ping_config.target_addr.type = ESP_IPADDR_TYPE_V4;
esp_ping_callbacks_t cbs = { 0 };
esp_ping_new_session(&ping_config, &cbs, &ping_handle);
esp_ping_start(ping_handle);
return ESP_OK;
}
void app_main()
{
ESP_ERROR_CHECK(nvs_flash_init());
ESP_ERROR_CHECK(esp_netif_init());
ESP_ERROR_CHECK(esp_event_loop_create_default());
ESP_ERROR_CHECK(example_connect());
wifi_csi_init();
wifi_ping_router_start();
}
```

ДОДАТОК Г

Код програми аналізу CSI

```
import sys
import csv
import json
import argparse
import threading
import time
import sqlite3
from datetime import datetime
import numpy as np
import serial
from io import StringIO
from PyQt5.QtWidgets import QApplication, QPushButton, QWidget, QVBoxLayout, QMessageBox
from PyQt5 import QtWidgets, QtCore
from PyQt5.QtCore import pyqtSlot, QThread
from pyqtgraph import PlotWidget
import pyqtgraph as pq

# --- Constants ---
CSI_VAID_SUBCARRIER_INTERVAL = 3
CSI_DATA_INDEX = 200  # buffer size

DATA_COLUMNS_NAMES = [
    "type", "id", "mac", "rssi", "rate", "sig_mode", "mcs", "bandwidth", "smoothing", "not_sounding",
    "aggregation", "stbc", "fec_coding", "sgi", "noise_floor", "ampdu_cnt", "channel", "secondary_channel",
    "local_timestamp", "ant", "sig_len", "rx_state", "len", "first_word", "data"
]

# --- Subcarrier Index and Color Setup ---
csi_vaid_subcarrier_index = []
csi_vaid_subcarrier_color = []
color_step = 255 // (28 // CSI_VAID_SUBCARRIER_INTERVAL + 1)

# LLTF: 52
csi_vaid_subcarrier_index += [i for i in range(6, 32, CSI_VAID_SUBCARRIER_INTERVAL)]
csi_vaid_subcarrier_color += [(i * color_step, 0, 0) for i in range(1, 26 // CSI_VAID_SUBCARRIER_INTERVAL + 2)]
csi_vaid_subcarrier_index += [i for i in range(33, 59, CSI_VAID_SUBCARRIER_INTERVAL)]
csi_vaid_subcarrier_color += [(0, i * color_step, 0) for i in range(1, 26 // CSI_VAID_SUBCARRIER_INTERVAL + 2)]
CSI_DATA_LLFT_COLUMNS = len(csi_vaid_subcarrier_index)
# HT-LFT: 56 + 56
csi_vaid_subcarrier_index += [i for i in range(66, 94, CSI_VAID_SUBCARRIER_INTERVAL)]
csi_vaid_subcarrier_color += [(0, 0, i * color_step) for i in range(1, 28 // CSI_VAID_SUBCARRIER_INTERVAL + 2)]
csi_vaid_subcarrier_index += [i for i in range(95, 123, CSI_VAID_SUBCARRIER_INTERVAL)]
```

```
csi_vaid_subcarrier_color += [(i * color_step, i * color_step, i * color_step) for i in range(1, 28 // CSI_VAID_SUBCARRIER_INTERVAL + 2)]
CSI_DATA_COLUMNS = len(csi_vaid_subcarrier_index)

# --- Data Buffer ---
csi_data_array = np.zeros([CSI_DATA_INDEX, CSI_DATA_COLUMNS], dtype=np.complex64)

# --- UI Loading ---
uiclass, baseclass = pq.Qt.loadUiType("my.ui")


def record_csi_data():
    with sqlite3.connect('wfscan.db') as conn:
        cursor = conn.cursor()
        start_time = time.time()
        end_time = start_time + 60
        while time.time() < end_time:
            csi_data = json.dumps(csi_data_array[–1].tolist())
            timestamp = datetime.now().strftime('%Y–%m–%d %H:%M:%S')
            cursor.execute("INSERT INTO csi_data (timestamp, csi_data) VALUES (?, ?)", (timestamp, csi_data))
            conn.commit()
            time.sleep(0.1)
    print("CSI data recording completed.")


def compare_csi_data(input_csi_data):
    with sqlite3.connect('wfscan.db') as conn:
        cursor = conn.cursor()
        cursor.execute("SELECT csi_data FROM csi_data")
        db_csi_data = cursor.fetchall()
        input_array = np.array(input_csi_data)
        for db_data in db_csi_data:
            db_array = np.array(json.loads(db_data[0]))
            if input_array.shape != db_array.shape:
                continue
            similarity = np.mean(np.abs(input_array – db_array) < 0.05) * 100
            if similarity >= 95:
                return True
    return False


class MainWindow(uiclass, baseclass):
    def __init__(self):
        super().__init__()
        self.setupUi(self)
        self.plot_placeholder = self.findChild(QtWidgets.QWidget, 'widget')
        self.csi_plot = CsiDataGraphicalWindow()
        plot_layout = QVBoxLayout(self.plot_placeholder)
        plot_layout.addWidget(self.csi_plot)
        self.experimentButton.clicked.connect(self.on_experiment_button_clicked)
        self.startButton = QPushButton("Запис CSI даних", self)
```

```
        self.startButton.clicked.connect(self.start_recording)

    @pyqtSlot()
    def on_experiment_button_clicked(self):
        text = self.lineEditObjectType.text()
        self.save_data(text)
        print(text)

    def open_dialog(self, obj):
        box = QMessageBox()
        box.setWindowTitle("Об’єкт визначено")
        box.setText(f"Об’єкт визначено: {obj}")
        box.setIcon(QMessageBox.Information)
        box.exec_()

    def start_recording(self):
        threading.Thread(target=record_csi_data, daemon=True).start()

    def save_data(self, data):
        with open("data.txt", "a") as file:
            file.write(data + "\n")


class CsiDataGraphicalWindow(QWidget):
    def __init__(self):
        super().__init__()
        self.resize(1280, 720)
        self.plotWidget_ted = PlotWidget(self)
        self.plotWidget_ted.setGeometry(QtCore.QRect(0, 0, 1280, 720))
        self.plotWidget_ted.setYRange(–5, 50)
        self.plotWidget_ted.addLegend()
        self.plotWidget_ted.setBackground(‘white’)
        self.plotWidget_ted.showGrid(x=True, y=True, alpha=1)
        self.plotWidget_ted.setLabel(‘left’, "Амплітуда")
        self.plotWidget_ted.setLabel(‘bottom’, "Фаза")
        self.csi_phase_array = np.abs(csi_data_array)
        self.curve_list = []
        for i in range(CSI_DATA_COLUMNS):
            curve = self.plotWidget_ted.plot(
                self.csi_phase_array[:, i], name=str(i),
                pen=csi_vaid_subcarrier_color[i])
            self.curve_list.append(curve)
        self.timer = pq.QtCore.QTimer()
        self.timer.timeout.connect(self.update_data)
        self.timer.start(100)

    def update_data(self):
        self.csi_phase_array = np.abs(csi_data_array)
        for i in range(CSI_DATA_COLUMNS):
            self.curve_list[i].setData(self.csi_phase_array[:, i])
        if compare_csi_data(csi_data_array[–1]):
            parent = self.parent()
```

```
            if parent:
                parent.open_dialog("Знайдено схожий об’єкт")

    @staticmethod
    def csi_data_read_parse(port: str, csv_writer):
        ser = serial.Serial(port=port, baudrate=921600, bytesize=8, parity='N', stopbits=1)
        if ser.isOpen():
            print("Serial port opened successfully")
        else:
            print("Failed to open serial port")
            return
        while True:
            strings = str(ser.readline())
            if not strings:
                break
            strings = strings.lstrip('b\'').rstrip('\\r\\n\'')
            index = strings.find('CSI_DATA')
            if index == –1:
                continue
            csv_reader = csv.reader(StringIO(strings))
            csi_data = next(csv_reader)
            if len(csi_data) != len(DATA_COLUMNS_NAMES):
                print("Element count mismatch")
                continue
            try:
                csi_raw_data = json.loads(csi_data[–1])
            except json.JSONDecodeError:
                print("Data is incomplete")
                continue
            if len(csi_raw_data) not in (128, 256, 384):
                print(f"Element count mismatch: {len(csi_raw_data)}")
                continue
            csv_writer.writerow(csi_data)
            # Rotate data to the left
            csi_data_array[:–1] = csi_data_array[1:]
            csi_vaid_subcarrier_len = CSI_DATA_LLFT_COLUMNS if len(csi_raw_data) == 128 else
CSI_DATA_COLUMNS
            for i in range(csi_vaid_subcarrier_len):
                csi_data_array[–1][i] = complex(
                    csi_raw_data[csi_vaid_subcarrier_index[i] * 2 + 1],
                    csi_raw_data[csi_vaid_subcarrier_index[i] * 2]
                )
            ser.close()
            return


class SubThread(QThread):
    def __init__(self, serial_port, save_file_name):
        super().__init__()
        self.serial_port = serial_port
        self.save_file_fd = open(save_file_name, 'w')
        self.csv_writer = csv.writer(self.save_file_fd)
```

```
        self.csv_writer.writerow(DATA_COLUMNS_NAMES)

    def run(self):
        CsiDataGraphicalWindow.csi_data_read_parse(self.serial_port, self.csv_writer)

    def __del__(self):
        self.save_file_fd.close()
        self.wait()


def main():
    if sys.version_info < (3, 6):
        print("Python version must be >= 3.6")
        exit()
    parser = argparse.ArgumentParser(
        description="Read CSI data from serial port and display graphically"
    )
    parser.add_argument('-p', '--port', dest='port', required=True, help="Serial port number for csv_recv device")
    parser.add_argument('-s', '--store', dest='store_file', default='./csi_data.csv', help="File to store serial port data")
    args = parser.parse_args()
    app = QApplication(sys.argv)
    subthread = SubThread(args.port, args.store_file)
    subthread.start()
    window = MainWindow()
    window.show()
    sys.exit(app.exec())


if __name__ == '__main__':
    main()
```

ДОДАТОК Д

Список опублікованих наукових праць за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації та відповідають п. 8 Постанови КМУ від 12.01.2022 № 44

1. Tohoiev O. Determining the location of patients in remote rehabilitation by means of a wireless network. *ACTA IMEKO*. 2023. Vol. 12, No. 3. P. 1–5. DOI: 10.21014/actaimeko.v12i3.1495. **ISSN 2221-870X.** URL: https://acta.imeko.org/index.php/acta-imeko/issue/view/45 **Scopus (Q3)**

2. Burlachenko I. S., Savinov V. Yu., Tohoiev O. R., Zhuravska I. M. The cloud GNSS data fusion approach based on multi-agent authentication protocols' analysis in the corporate logistics management systems. *Radio Electronics, Computer Science,* Control [ed.: S. Subbotin]. 2021. Vol. 4. P. 95–105. DOI: 10.15588/1607-3274-2021-4-9. **ISSN 1607-3274. WoS ID: 000749681500009 (Q4)**

3. Тогоєв О. Р. Метод деанонімізації користувачів iOS через протокол AirDrop. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво* : наук. журн. / Луцьк. нац. техн. ун-т. 2022. Вип. 49. С. 12–17. DOI: 10.36910/6775-2524-0560-2022-49-02. ISSN 2524-0552. **кат. Б** URL: http://cit-journal.com.ua/index.php/cit/article/view/385 (дата звернення: 28.03.2023).

4. Бурлаченко І. С., Савінов В. Ю., Тогоєв О. Р. Мультиагентна система позиціонування рухомих об'єктів як хостів бездротової мережі. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2020. Т. 1, № 5 (288). С. 72–80. DOI: 10.31891/2307-5732-2020-289-5-72-80. **кат. Б**

5. Tohoiev O., Burlachenko I., Zhuravska I., Savinov V. The monitoring system based on a multi-agent approach for moving objects positioning in wireless networks. *CEUR Workshop Proceedings* [ed.: S. Subbotin]. 2020. Vol. 2608. P. 79–90. DOI: https://doi.org/10.32782/cmis/2608-7. **ISSN 1613-0073**. URL: http://ceur-ws.org/Vol-2608/ (Last accessed: June 04, 2021). **Scopus EID: 2-s2.0-85085527044.**

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

– *матеріали конференцій, індексовані в наукометрічній базі Scopus*

6. Burlachenko I. S., Zhuravska I. M., Ukhan Y. O., Tohoiev O. R., Tiutiunyk Y. I. Multi-agent monitoring system for heat loss mapping of multi-story buildings. *CEUR Workshop Proc. Information-Communication Technologies & Embedded Systems (ICT&ES).* 2019. Vol. 2516. P. 218–225. **ISSN 1613-0073**. Available at http://ceur-ws.org/Vol-2516/ (Last accessed Apr. 19, 2021). **Scopus EID: 2-s2.0-85077180431.**

7. Zhuravska I., Musiyenko M., Tohoiev O. Development the heat leak detection method for hidden thermal objects by means the information-measuring computer system. *CEUR Workshop Proceedings* [eds.: D. Luengo, S. Subbotin, P. Arras, et al.]. 2019. Vol. 2353. P. 350–364. **DOI: 10.32782/cmis/2353-28. ISSN 1613-0073**. Available at URL: http://ceur-ws.org/Vol-2353/ (Last accessed May 18, 2021). **Scopus EID: 2-s2.0-85065465684**.

– *інші матеріали конференцій*

8. Тогоєв О. Р. Використання Postman для сніфінгу вебтрафіку. *Могилянські читання* – 2024 : тези доп. XXVII Всеукр. наук.-метод. конф. Миколаїв, 06–10 листоп. 2024 р. Миколаїв : Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили, 2024. С. 138–139. Відомості доступні також в Інтернеті URL: https://dspace.chmnu.edu.ua/jspui/handle/123456789/2507

9. Журавська І. М., Тогоєв О. Аналіз інформаційної безпеки та присутності людей у контрольованій зоні на основі прослуховування трафіку комп’ютерної мережі. *Future in the results of modern scientific research* : SWorld-Ger Conf. Proc., Aug. 30, 2024. No. gec34-00. P. 25–33. DOI: 10.30890/2709-1783.2024-34-00-015. URL: https://www.proconference.org/index.php/gec/article/view/gec34-00-015

10. Тогоєв О. Р. Засоби LTE-сніфінгу. *Ольвійський форум – 2024: Стратегії країн Причорноморського регіону в геополітичному просторі* : матеріали XXI Міжнар. наук. конф., м. Миколаїв, 20–23 червня 2024 р.

11. Тогоєв О. Р. Визначення місцеположення та моніторинг стану пацієнтів на віддаленій реабілітації засобами бездротових мереж. *Актуальні завдання медичної, біологічної фізики та інформатики* : матеріали II Всеукр. наук.-практ. конф., Вінниця, 07 квітня 2023 р. Вінниця : Вінниц. нац. техн. ун-т ім. М. І. Пирогова, 2023. С. 144–146.

12. Тогоєв О. Р. Особливості Private PSK (Pre-Shared Key). *Могилянські читання – 2020* : тези доп. XXIII Всеукр. наук.-метод. конф. Миколаїв, 16-20 листоп. 2020 р. Миколаїв : Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили, 2020. С. 58–60. Відомості доступні також в Інтернеті URL: https://dspace.chmnu.edu.ua/jspui/handle/123456789/405

13. Тогоєв О. Р. Організація захисту інфраструктури електронної комерції на базі протоколів DoT та DoH. *Інтелектуальний потенціал – 2020* : тези доп. Всеукр. наук.-практ. конф. Хмельницький, 9–10 листоп. 2020 р. Хмельницький : ПВНЗ УЕП, 2020. Ч. 1. С. 82–85.

14. Тогоєв О. Р. Система управління доступом до Wi-Fi мережі. *Інтелектуальні інформаційні системи :* тези доп. Всеукр. наук.-практ. конф., Миколаїв, 19–21 лютого 2019 р. / Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили. Миколаїв : ЧНУ ім. Петра Могили, 2019. С. 53–54.

15. Tohoiev O. Wi-Fi network access control system: analysis of existing security support technologies. *Moderní vymoženosti vědy –2019 :* Materiály XV Mezinárodní vědecko-praktická konference, Praha, 22–30 ledna 2019 r. Praha : Publishing House «Education and Science», 2019. Vol. 7. P. 54–55.

16. Tohoiev O. Wireless Security issues. *Third International conference of European Academy of Science* : Proceedings. Bonn, 20–30 Dec. 2018. P. 34–35. Available at: URL: https://www.academia.edu/38385979/ Third_International_Conference_of_European_Academy_of_Science/.

17. Тогоєв О. Р., Дворник О. В. Технологія підтримки безпеки в системі управління доступом до Wi-Fi мережі: аналіз існуючих технологій підтримки безпеки. *Могилянські читання – 2018* : тези доп. XXI Всеукр. наук.-метод. конф.,

Миколаїв, 14–16 листоп. 2018 р. / Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили. Миколаїв : ЧНУ ім. Петра Могили, 2018. С. 119–120.

Список публікацій, які додатково відображають наукові результати дисертації

18. Zhuravska I. M., Tohoiev O. R., Frych D. O. Objects' detection in the controlled area based on signal analysis using passive listening Wi-Fi network traffic. *Modern engineering and innovative technologies*. 2024. Is. 34, Part 1. P. 31–37. DOI: 10.30890/2567-5273.2024-34-00-064. **ISSN 2567-5273**. URL: https://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit34-00-064 **OECP**

19. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір 107018. «Комп'ютерна програма "Smart Monitor"» : комп'ютерна програма / К. О. Обухова, І. М. Журавська, О. Р. Тогоєв ; дата реєстр. 04.08.2021, Бюл. № 66.

20. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір 107427. Комп'ютерна програма «Комп'ютерна програма "Складання WiFi-мапи переміщення пацієнтів територією реабілітаційного центру"» : комп'ютерна програма / О. Р. Тогоєв, В. Д. Веселовський, О. В. Дворник, І. М. Журавська, К. О. Обухова, Є. О. Ухань ; дата реєстр. 17.08.2021, Бюл. № 66.