

АНАТОЦІЯ

Ткач В.О. Модуляція електромагнітних сигналів з використанням метаповерхонь для покращення детектування та ідентифікації розсіювачів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка. – Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці, 2025.

Дисертаційна робота присвячена вивченню електромагнітних (ЕМ) властивостей метаматеріалів та їх складових компонентів з метою їх застосування для модифікації ліній передавання і, як результат, розроблення смугових фільтрів із заданими характеристиками, зокрема, керованими в часі; розробленню компактних структур з підвищеним значенням ефективної площі розсіювання (ЕПР) для покращення радіолокаційної видимості малопомітних об'єктів; а також використанню таких резонаторів для маркування та, радіочастотної ідентифікації безпілотних літальних апаратів (БПЛА) на основі радіолокаційного розпізнавання унікальних патернів за рахунок ефекту мікро-Доплера відбитої від об'єкту ЕМ-хвилі.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі проведених досліджень, визначено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, представлені методи, об'єкт і предмет досліджень, зазначено особистий внесок здобувача, а також наведено дані щодо публікацій за темою дисертації.

У **першому розділі** здійснено огляд актуальних на сьогодні літературних джерел. Розглянуто механізми розсіювання енергії ЕМ-хвиль від різного типу нерухомих та рухомих об'єктів, основні фізичні обмеження, що накладаються на рівень розсіювання та можливості реалізації розсіювачів, що здатні перевищити ці обмеження, – надрозсіювачів. Встановлено, що реалізація надрозсіювачів можлива із використанням метаматеріалів, проте їх дизайн зазвичай вимагає високої точності розрахунків, що, на сьогоднішній день,

вирішується шляхом оптимізації параметрів їх складових компонентів – довжин прямих металевих провідників (електричних диполів) і загальних розмірів, орієнтацією і модифікацією розрізу розрізних кільцевих резонаторів (РКР) (магнітних диполів). Один з поширених методів оптимізації полягає у використанні генетичних алгоритмів на основі штучної нейронної мережі. Актуальні завдання сучасної радіолокації, пов'язані із покращенням видимості БПЛА із малим значенням ЕПР, можуть бути вирішені шляхом застосування надрозсіювачів. Ще одним кроком до збільшення радіолокаційної помітності об'єктів, особливо для задач детектування та ідентифікації, є розроблення методів на основі ефекту мікро-Доплера, принципи та приклади використання якого також розглянуто в межах розділу. Окрім того увагу приділено методам імпедансної та механічної модуляції, що пояснюють виникнення ефекту мікро-Доплера.

Другий розділ присвячено аналізу та оптимізації параметрів різних геометричних конфігурацій РКР з метою керування їх частотним відгуком, зокрема, значенням резонансної частоти. Моделювання та експериментальні дані показали можливість застосування РКР у діапазоні частот 0,6-2,2 ГГц при незмінній площі РКР. Також продемонстровано можливість керування ЕМ-характеристиками РКР в часі шляхом введення в розріз біполярного транзистора, що працює в ключовому режимі. На основі оптимізованих РКР розроблено смугові фільтри та експериментально продемонстровано можливість керування смугою їх робочих частот. Завдяки високій чутливості РКР до діелектричних об'єктів, ці структури дозволяють створювати сенсорні пристрої, що реагують на появу об'єктів в зоні близького поля. Цей ефект використано для розроблення пристрою здатного детектувати ці зміни в часі та конвертувати їх у цифрові імпульси. Ця розробка стала основою сенсорного пристрою виявлення дотиків пальця людини та використання його як складової системи контролю доступу.

Наукова новизна результатів, отриманих у другому розділі, полягає у тому що:

- ***Удосконалено*** метод синтезу РКР шляхом зміни внутрішніх геометричних параметрів, що уможливило контроль їх резонансної частоти у надширокому діапазоні частот від 0,65 ГГц до 2,2 ГГц та застосування в пристроях контролю доступу з комбінуванням РКР з різним значенням резонансних частот для формування унікальних систем сенсорів з надзвичайною чутливістю у зоні сильної близькопольової взаємодії, а також побудови смугових фільтрів на основі модифікованих РКР.
- ***Набув подальшого розвитку*** метод керування смугою робочих частот адаптивного смугового фільтра мікрохвильового діапазону на основі РКР шляхом введення керованих радіоелементів, таких як: варакторний діод для неперервної зміни ємності і, відповідно, неперервного контролю резонансної частоти РКР та біполярний транзистор, що працює у ключовому режимі для дискретної зміни ємності РКР між двома станами. Це уможливило синтез адаптивних смугових фільтрів, що використовують варакторний діод як параметр налаштування ЕМ-характеристик РКР та забезпечують можливість контролю смуги пропускання в діапазоні від 110 МГц до 180 МГц навколо центральної частоти 1,1 ГГц.

Третій розділ присвячено вивченню явища надрозсіювання, коли в досить малому (по відношенню до довжини хвилі) об'ємі концентрується масив одиночних резонаторів, що як об'ємна структура характеризується збільшеною ЕПР (порівняно зі своїми лінійними розмірами). У роботі використано РКР, що є магнітними диполями, та прямі провідники, що є електричними диполями. Задача оптимізації такого розміщення складна, оскільки в зоні сильної близькопольової взаємодії кожен компонент має тенденцію до «спектрального розпорошення» власних резонансних режимів. У випадку великої кількості складових компонентів значно зростає кількість

параметрів (розміри РКР та їх просторова орієнтація, довжина провідників та їх просторова орієнтація, тощо), що унеможлиблює аналітичні розрахунки. Через це для оптимізації використано генетичний алгоритм за допомогою якого отримано метаструктури, що демонструють збільшену ЕПР. З урахуванням співвідношення фізичних розмірів до довжини хвилі, такі метаструктури можна віднести до класу надрозсіювачів. Експериментально реалізовано структури розмірністю $2 \times 2 \times 2$ елементи висотою 10 мм та $3 \times 3 \times 3$ елементи висотою 20 мм. За рахунок малих масогабаритних розмірів та високого значення ЕПР, надрозсіювачі можуть прикріплюватися до малопомітних об'єктів збільшуючи їх радіолокаційну видимість. Експериментальні дослідження проведені на відкритому просторі з використанням квадрокоптера DJI Mini 2 показали, що відстань детектування радаром зростає від 1,5 до 5 разів в залежності від розмірності структури.

Наукова новизна висновків, отриманих у третьому розділі, полягає у тому що:

- *Вперше* запропоновано метод синтезу об'ємних метаструктур зі збільшеною ЕПР шляхом еволюційної оптимізації розподілу власних мод резонаторів, що забезпечується контролем розподілу їх мультиполів з метою підвищення властивостей розсіювання. Це, в залежності від розмірності структури ($2 \times 2 \times 2$ чи $3 \times 3 \times 3$), уможливило збільшення ЕПР у 16 та 80 разів для маркованого БПЛА типу DJI Mini 2 порівняно з немаркованим, що призвело до зростання відстані детектування у 1,5 та 5 разів відповідно.

Четвертий розділ зосереджений на розвитку та реалізації ідеї маркування БПЛА пасивними резонаторами для їх ідентифікації. Суть пропозиції у використанні ефекту мікро-Доплера, що полягає у зміні характеристик вторинного випромінювання при відбиванні сигналу від складових об'єкту, які здійснюють мікроколивання або вібрації (наприклад, пропелери БПЛА, гвинт вертольоту, руки і ноги людини, крила птахів, тощо). Кожен із цих мікрорухів має свій особливий патерн, що може бути

ідентифікований шляхом аналізу спектру відбитої від нього ЕМ-хвилі. Проблема полягає в тому, що малі БПЛА характеризуються подібним до птахів значенням ЕПР, часто подібною частотою обертання пропелерів та здійснюють польоти там, де і птахи. В сучасних науково-технічних рішеннях проблему розпізнавання та класифікації таких об'єктів частково вирішує штучний інтелект, проте його застосування потребує надзвичайно великої кількості експериментальних даних для навчання, що часто стає проблематичним або неможливим. Варто зазначити, що штучний інтелект взагалі не вирішує завдання розпізнавання БПЛА однієї серії. Запропоноване маркування пропелерів резонансними пасивними компонентами покликане розв'язати завдання розрізнення штучних та природних об'єктів з низьким значенням ЕПР та уможливити ідентифікацію однотипних об'єктів. Дослідження показали, що в залежності від кількості лопатей БПЛА, можна задавати значну кількість кодів-ідентифікаторів (наприклад, DJI Mini 2 має 4 пропелера по 2 лопаті, тому можна задавати 8-розрядний код, проте за виключенням симетричних комбінацій). Шляхом моделювання та експериментальних досліджень встановлено, що різні комбінації демонструють відмінні ЕМ-відгуки, яким відповідають унікальні спектральні патерни. Такі сигнали значно відрізняються від природних, а, отже, легко ідентифікуються радаром. Зібрані експериментальні дані використано для навчання алгоритму в чистому вигляді та зі штучним додаванням шумів. Навчену модель застосовано для розпізнавання БПЛА з випадковою траєкторією польоту. Імовірність правильної ідентифікації перевищувала 98% при значенні співвідношення сигнал/шум 20 дБ. Розпізнавання також можливе при менших співвідношеннях сигнал/шум, проте залежить від відстані Хемінга між кодовими комбінаціями.

Наукова новизна результатів, отриманих у четвертому розділі, полягає у тому що:

- *Вперше* запропоновано метод ідентифікації БПЛА шляхом маркування його лопатей пасивними резонансними розсіювачами,

що, в залежності від їх взаємного розміщення, дозволяє задавати коди-ідентифікатори, які можна розрізнити на основі аналізу індивідуальних спектральних розподілів, зумовлених впливом ефекту мікро-Доплера на відбиті ЕМ-хвилі. Ефективність методу перевірена шляхом реалізації алгоритму розрізнення сигналів на основі згорткової нейромережі, де отримано ймовірності правильного розпізнавання не менше 0,98 при співвідношенні сигнал/шум 20 дБ.

При виконанні дисертаційної роботи отримано наступні практичні результати:

- Розроблено автономний пристрій на базі мікроконтролера Arduino nano для аналізу АЧХ в діапазоні частот від 0,1 ГГц до 2,5 ГГц, що характеризується нижчою собівартістю в порівнянні з аналогами.
- Реалізовано пристрій контролю доступу на основі лінії передавання модифікованої РКР із різними ЕМ-характеристиками. Пристрій характеризується високим рівнем захищеності, оскільки простір ключів K залежить від кількості РКР із різними значеннями резонансних частот, наприклад, для досліджених 14 типів РКР $K = 10^{15}$.
- Розроблено адаптивний смуговий фільтр на основі модифікації РКР з можливістю динамічної зміни його ЕМ-характеристик шляхом введення керованого радіoeлемента (варакторного діода чи транзистора), що дозволяє забезпечити контроль робочої смуги шириною до 180 МГц навколо центральної частоти, що становить 1,1 ГГц. Особливість пристрою полягає в тому, що значення центральної частоти може змінюватись шляхом зміни внутрішніх геометричних параметрів РКР при збереженні його загальних розмірів в діапазоні частот від 0,65 ГГц до 2,2 ГГц.
- Розроблено надрозсіювач, застосування якого дозволяє збільшити максимальну відстань детектування малопомітних об'єктів (БПЛА із малим значенням ЕПР близько $0,01 \text{ м}^2$). Такий надрозсіювач є об'ємним метаматеріалом у вигляді комбінації електричних і

магнітних диполів, що є компактною структурою у порівнянні із робочою довжиною хвилі (для структури розмірністю $2 \times 2 \times 2$ елементи габаритний розмір складає 100 мм на 100 мм з висотою 10 мм або структури розмірністю $3 \times 3 \times 3$ елементи – розміром 150 мм на 150 мм з висотою 20 мм, що становить 3,3 та 5 довжини хвилі відповідно), проте характеризується високим значенням ЕПР, що становить відповідно $0,16 \text{ м}^2$ та $0,8 \text{ м}^2$. Це дозволило збільшити відстань детектування у 1,5 рази для структури розмірністю $2 \times 2 \times 2$ та у 5 разів для структури розмірністю $3 \times 3 \times 3$.

- Запропоновано використання маркування пластикових лопатей БПЛА шляхом задання унікальних кодів-ідентифікаторів пасивними резонансними розсіювачами, що відкриває можливість ідентифікації БПЛА однієї серії, за умови проведення маркування для визначених комбінацій лопатей.

Ключові слова: метаматеріали та метаповерхні, поляризація, інтерференція, випромінювання, розсіювання (об'єкт розсіювання), фаза та амплітуда сигналу, модуляція сигналів (аналогова та цифрова), діаграма спрямованості, частотний діапазон, передавально-приймальна антена (резонансна антена), безпілотні літальні апарати, результати моделювання, ефект мікро-Доплера, штучна нейронна мережа, коефіцієнти відбивання і проходження.

ABSTRACT

Tkach V.O. Metasurfaces-based electromagnetic signal modulation for scatterers detection and identification enhancement. – Qualifying scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 172 – Telecommunications and Radio Engineering. – Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University. Chernivtsi, 2025.

The dissertation work is devoted to the study of electromagnetic (EM) properties of metamaterials and their constituent components with the aim of their application for modification of transmission lines and, as a result, the development of bandpass filters with specified characteristics, in particular, time-controlled ones; the development of compact structures with an increased value of the Radar Cross Section (RCS) to improve the radar visibility of low-visibility objects; as well as the use of such resonators for marking and, as a result, radio frequency identification of unmanned aerial vehicles (UAVs) based on radar recognition of unique patterns due to the micro-Doppler effect of the EM wave reflected from the object.

The **Introduction** substantiates the relevance of the dissertation topic, formulates the purpose and objectives of the research, determines the scientific novelty and practical significance of the results obtained, presents the methods, object and subject of research, indicates the personal contribution of the applicant, and also provides data about publications on the topic of the dissertation.

The first section reviews the current literature. The mechanisms of EM wave energy scattering from various types of stationary and moving objects, the main physical limitations imposed on the level of scattering, and the possibilities of implementing scatterers capable of exceeding these limitations – super-scatterers – are considered. It has been established that the implementation of super-scatterers is possible using metamaterials, however, their design usually requires high accuracy of calculations, which, to date, is solved by optimizing the parameters of their constituent components - the lengths of straight metal conductors (electric dipoles) and overall dimensions, by orientation and modification of the cross-section of split ring resonators (SRRs) (magnetic dipoles). One of common optimization methods is the use of genetic algorithms based on an artificial neural network. Current tasks of modern radar, related to improving the visibility of UAVs with a low RCS value, can be solved using super-scatterers. Another step towards increasing the radar visibility of objects, especially for detection and identification tasks, is the development of methods based on the micro-Doppler effect, the principles and examples of its use are also considered within the section. Attention is also paid to

the methods of impedance and mechanical modulation, which explain the occurrence of the micro-Doppler effect.

The second section is devoted to the analysis and optimization of parameters of various geometric configurations of SRRs, in order to control their frequency response, in particular, the value of the resonant frequency. Simulation and experimental data showed the possibility of using SRRs in the frequency range of 0.6-2.2 GHz with a constant SRR area. The possibility of controlling the EM characteristics of the SRR in time by introducing a bipolar transistor operating in the switching mode into the cut is also demonstrated. Based on optimized SRRs, bandpass filters were developed, and the possibility of controlling their operating frequency band was experimentally demonstrated. Due to the high sensitivity of SRRs to dielectric objects, these structures allow the creation of sensor devices that respond to the appearance of objects in the near-field zone. This effect was used to develop a device capable of detecting these changes over time and converting them into digital pulses. This development became the basis of a sensor device for detecting human finger touches and using it as a component of an access control system.

The scientific novelty of the results obtained in the second section lies in the fact that:

- The method of synthesis of SRRs **was improved** by changing their internal geometric parameters, which made it possible to control their resonant frequency in an ultra-wide frequency range from 0.65 GHz to 2.2 GHz and use them in access control devices with a combination of SRRs with different resonant frequencies to form unique sensor systems with extreme sensitivity in the near-field zone interaction, as well as to construct bandpass filters based on modified SRRs.
- The method of controlling the operating frequency band of an adaptive bandpass filter of the microwave range based on a SRR **was further developed** by introducing controlled radio elements, such as: a varactor diode for continuous change of capacitance and, accordingly, continuous

control of the resonant frequency of the SRR, and a bipolar transistor operating in a switch mode for discrete change of the SRR capacitance between two states. This enabled the synthesis of adaptive bandpass filters that use a varactor diode as a parameter for tuning the EM characteristics of the SRR and provide the ability to control the bandwidth in the range from 110 MHz to 180 MHz around the center frequency of 1.1 GHz.

The third section is devoted to the study of superscattering phenomenon, when an array of single resonators is concentrated in a fairly small (relative to the wavelength) volume, which, as a volumetric structure, is characterized by an increased RCS (compared to its linear dimensions). The work uses SRRs, which are magnetic dipoles, and straight conductors, which are electric dipoles. The task of optimizing such placement is difficult, since in the zone of strong near-field interaction each component tends to “spectral dispersion” of its own resonant modes. In the case of a large number of components, the number of parameters (SRRs dimensions and their spatial orientation, conductor length and their spatial orientation, etc.) increases significantly, which makes analytical calculations impossible. Therefore, a genetic algorithm was used for optimization, with the help of which metastructures demonstrating increased RCS were obtained. Taking into account the ratio of physical dimensions to the wavelength, such metastructures can be classified as super-scatterers. A structure with dimensions of $2 \times 2 \times 2$ elements with a height of 10 mm and $3 \times 3 \times 3$ elements with a height of 20 mm has been experimentally implemented. Due to their small size and weight and high RCS value, super-scatterers can be attached to low-visibility objects, increasing their radar visibility. Experimental studies conducted in open space using the DJI Mini 2 quadcopter showed that the radar detection distance increases from 1.5 to 5 times depending on the size of the structure.

The scientific novelty of the results obtained in the third section lies in the fact that:

- **For the first time** a method was proposed for synthesizing volumetric metastructures with increased RCS by evolutionary optimization of the

distribution of resonator eigenmodes, which is ensured by controlling the distribution of their multipoles in order to improve scattering properties. This, depending on the structure dimensions ($2 \times 2 \times 2$ or $3 \times 3 \times 3$), enabled an increase in RCS by 16 and 80 times for a marked DJI Mini 2 UAV compared to an unmarked one, which led to an increase in detection distance by 1.5 and 5 times, respectively.

The fourth section focuses on the development and implementation of the idea of marking UAVs with passive resonators for their identification. The essence of the proposal is to use the micro-Doppler effect, which consists in changing the characteristics of secondary radiation when the signal is reflected from components of the object that perform micro-oscillations or vibrations (for example, UAV propellers, helicopter propellers, human arms and legs, bird wings, etc.). Each of these micro-movements has its own specific pattern, which can be identified by analyzing the spectrum of the EM wave reflected from it. The problem is that small UAVs have similar RCS values to birds, often similar propeller speeds, and fly where birds do. In modern scientific and technical solutions, the problem of recognizing and classifying such objects is partially solved by artificial intelligence, but its application requires an extremely large amount of experimental data for training, which often becomes problematic or impossible. It is worth noting that artificial intelligence does not solve the problem of recognizing UAVs of the same series at all. The proposed marking of propellers with resonant passive components is designed to solve the problem of distinguishing artificial and natural objects with low RCS values and enable the identification of objects of the same type. Studies have shown that depending on the number of blades of the UAV, a significant number of identifier codes can be set (for example, the DJI Mini 2 has 4 propellers with 2 blades each, so an 8-bit code can be set, but with the exception of symmetrical combinations). Through simulation and experimental studies, it has been established that different combinations exhibit distinct EM responses, which correspond to unique spectral patterns. Such signals are significantly different from natural ones, and therefore are easily identified by radar. The collected experimental data was used

to train the algorithm in its pure form and with artificial noise addition. The trained model was applied to recognize UAVs with a random flight path. The probability of correct identification exceeded 98% at a signal-to-noise ratio of 20 dB. Recognition is also possible at lower signal-to-noise ratios, but depends on the Hamming distance between the code combinations.

The scientific novelty of the results obtained in the fourth section lies in the fact that:

- **For the first time**, a method of identifying a UAV by marking its blades with passive resonant scatterers has been proposed, which, depending on their mutual placement, allows setting identifier codes that can be distinguished based on the analysis of individual spectral distributions caused by the influence of the micro-Doppler effect on reflected EM waves. The effectiveness of the method was verified by implementing a signal discrimination algorithm based on a convolutional neural network, where the probability of correct recognition was obtained at least 0.98 at a signal-to-noise ratio of 20 dB.

The following practical results were obtained during the dissertation work:

- An autonomous device based on the Arduino nano has been developed for frequency response analysis in the frequency range from 0.1 GHz to 2.5 GHz, characterized by a lower cost compared to analogues.
- An access control device based on a transmission line of modified SRR with different EM characteristics has been implemented. The device is characterized by a high level of security, since the key space K depends on the number of SRRs with different values of resonant frequencies, for example, for the 14 types of SRRs studied, $K = 10^{15}$.
- An adaptive bandpass filter has been developed based on a modification of the SRR with the ability to dynamically change its EM characteristics by introducing a controlled radio element (varactor diode or transistor), which allows for control of the operating bandwidth up to 180 MHz wide around

the center frequency of 1.1 GHz. A feature of the device is that the value of the center frequency can be changed by changing the internal geometric parameters of the SRR while maintaining its overall dimensions in the frequency range from 0.65 GHz to 2.2 GHz.

- A superscatterer has been developed, the use of which allows increasing the maximum detection distance of low-visibility objects (UAVs with a low RCS value of about 0.01 m^2). Such a superscatterer is a volumetric metamaterial in the form of a combination of electric and magnetic dipoles, which is a compact structure compared to the operating wavelength (for a structure with dimensions of $2 \times 2 \times 2$ elements, the overall size is 100 mm by 100 mm with a height of 10 mm or a structure with dimensions of $3 \times 3 \times 3$ with a height of 20 mm, which is 3.3 and 5 wavelengths, respectively, but is characterized by a high RCS value, which is 0.16 m^2 and 0.8 m^2 , respectively. This made it possible to increase the detection distance by 1.5 times for a structure with dimensions of $2 \times 2 \times 2$ and by 5 times for a structure with dimensions of $3 \times 3 \times 3$.
- It has been proposed to use marking of plastic UAV blades by assigning unique identifier codes to passive resonant scatterers, which opens up the possibility of identifying UAVs of the same series, provided that marking is carried out for certain combinations of blades.

Keywords: metamaterials and metasurfaces, polarization, interference, radiation, scattering (scattering object), signal phase and amplitude, signal modulation (analogue and digital), radiation pattern, frequency range, transmitting-receiving antenna (resonant antenna), unmanned aerial vehicles, numerical results, micro-Doppler effect, artificial neural network, reflection and transmission coefficients.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці у міжнародних наукових виданнях, які входять до наукометричної бази Scopus:

1. **Tkach, V.**, Khobzei, M., Haliuk, S., Safronov, I., Samila, A., Bobrovs, V., & Vovchuk, D. (2025). Microwave theremin piano: SRR-based touchpad. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 123, 89–94. <https://doi.org/10.2528/pierl24080404> (Scopus) (*особистий внесок: запропоновано ідею розроблення системи контролю доступу на основі лінії передавання модифікованої РКР з різними ЕМ-характеристиками; розроблено низьковартісний пристрій аналізу АЧХ, що здатний обробляти сигнал в реальному часі та працювати автономно без використання комп'ютера; проведено комп'ютерні моделювання та експериментальні дослідження характеристик набору РКР з різними ЕМ-характеристиками, а також проведено перевірку запропонованої системи контролю доступу з різною кількістю ключів-ідентифікаторів за допомогою розробленого пристрою*).
2. Hutsul, T., Khobzei, M., **Tkach, V.**, Krulikovskiy, O., Moisiuk, O., Ivashko, V., & Samila, A. (2024). Review of approaches to the use of unmanned aerial vehicles, remote sensing and geographic information systems in humanitarian demining: Ukrainian case. *Heliyon*, 10(7), e29142. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29142> (Scopus, Q1) (*особистий внесок: проведено аналіз літературних джерел щодо особливостей класифікації та методів вибору БПЛА, а також їх використання для дистанційного зондування та геоінформаційних систем у гуманітарному розмінуванні на сучасному етапі*).
3. Dobrykh, D., Grotov, K., Mikhailovskaya, A., Vovchuk, D., Tkach, V., Khobzei, M., Kharchevskii, A., Glam, A., & Ginzburg, P. (2025). 3D evolutionarily designed metamaterials for scattering

maximization. *Communications Engineering*, 4(1), 40. <https://doi.org/10.1038/s44172-025-00349-x> (Scopus, Q1) (особистий внесок: проведено аналіз сучасних літературних джерел щодо оптимізації структур на основі ЕМ-резонаторів з метою підвищення значення ЕПР; виконано комп'ютерні моделювання ЕМ-характеристик оптимізованих метаструктур розмірністю $2 \times 2 \times 2$ та $3 \times 3 \times 3$ елементи; виготовлено експериментальні зразки таких елементів; проведено експериментальні вимірювання БПЛА, оснащених оптимізованими метаструктурами у лабораторних та реальних умовах).

Наукові праці у виданнях, що входять до переліку наукових фахових видань України:

4. **Ткач, В., & Хобзей, М.** (2024). Виявлення дронів шляхом детектування ефекту мікро-доплера. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, (4), 242–247. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-80-30> (особистий внесок: проведено аналіз сучасних літературних джерел щодо виявлення БПЛА шляхом детектування сигналів мікро-Доплера; досліджено залежність значення ЕПР від значення кута обертання пропелера, як за допомогою комп'ютерних моделювань, так і експериментальних вимірювань у безеховій камері, а також проведено вимірювання для детектування ефекту мікро-Доплера за допомогою радару неперервної хвилі).
5. **Tkach, V.** (2024). Access Control System Based on Ring Resonator's Sensitive Properties. *Security of Infocommunication Systems and Internet of Things*, 2(1), 01012. <https://doi.org/10.31861/sisiot2024.1.01012>
6. **Ткач, В.** (2024). Адаптивний смуговий фільтр мікрохвильового діапазону частот. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, (5), 102–108. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-176-5-102-108>

Наукові праці, що підтверджують апробацію матеріалів дисертації:

7. Vovchuk, D., Khobzei, M., **Tkach, V.**, Eliiashiv, O., Tzidki, O., Grotov, K., Bobrovs, V., Glam, A., & Ginzburg, P. (2024). Micro-Doppler encoding for long-range drone monitoring. *2024 Eighteenth International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials)*, 1–3. <https://doi.org/10.1109/Metamaterials62190.2024.10703226> (особистий внесок: проведено комп'ютерні моделювання ЕМ-характеристик пропелера БПЛА, модифікованого пасивними резонансними елементами у вигляді наліпок, а також виготовлено експериментальні зразки таких елементів; проведено експериментальні випробування як у лабораторних, так і в реальних умовах для отримання сигналів мікро-Доплера та оцінки якості детектування БПЛА, оснащених такими резонаторами).
8. Andriichuk, K., Derevesnikova, Y., **Tkach, V.**, & Haliuk, S. (2022). Wire media applications for devices of EM power transfer at broad microwave and sub-THz frequency bands (survey). *2022 IEEE 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, 1-4. <https://doi.org/10.1109/TCSET55632.2022.9766870> (особистий внесок: проведено аналіз літературних джерел щодо використання однонегативних метаматеріалів для передачі ЕМ-сигналів у широкому діапазоні частот, що дає змогу використовувати такі структури для створення хвилеводів мікрохвильового та терагерцового діапазону частот.).
9. **Ткач, В.**, Хобзей, М., Апостолук, М., Івоняк Ю., & Вовчук Д (2022). Дослідження характеристик смугового фільтра на основі розрізних кільцевих резонаторів. *Міжнародна науково-практична конференція «Молодіжна наука заради миру та розвитку»*, 653–655. <https://archer.chnu.edu.ua/xmlui/handle/123456789/6979> (особистий внесок: створено експериментальний макет та проведено

лабораторні вимірювання смугового фільтра у вигляді лінії передавання на основі РКР).

**Наукові праці, що додатково відображають результати досліджень,
викладених у дисертаційній роботі:**

10. Гуцул, Т., Жежера, І., & Ткач, В. (2023). Особливості класифікації та методів вибору БПЛА. *Технічні науки та технології*, 4(30), 201–212. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4\(30\)-201-212](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4(30)-201-212) (особистий внесок: проведено аналіз літературних джерел щодо особливостей класифікації БПЛА та їх застосування в різних сферах людської діяльності).