

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора,
професора кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем
Вінницького національного технічного університету
Семенова Андрія Олександровича
на дисертаційну роботу Ткача Владислава Олеговича на тему:
«Модуляція електромагнітних сигналів з використанням метаповерхонь
для покращення детектування та ідентифікації розсіювачів»,
яку подано для здобуття ступеня доктора філософії
за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Актуальність теми дисертації.

Сучасні радіолокаційні системи потребують нових підходів до детектування й ідентифікації об'єктів через зростання повітряного трафіку та широке впровадження БПЛА як у міській, так і позаміській місцевості. Такі апарати окрім військового призначення знаходять все більше застосування для доставки, моніторингу й картографування, що вимагає надійного контролю повітряного простору в різних умовах середовища.

Особливо складним є виявлення малих БПЛА через їх низьке значення ефективної площі розсіювання (ЕПР) і схожість спектральних характеристик з іншими об'єктами, зокрема птахами. Одним із перспективних рішень є застосування метаматеріалів, здатних підвищувати ЕПР завдяки своїй унікальній структурі. Їх проектування потребує точних алгоритмів і високоякісних матеріалів, а можливість створення компактних і функціональних структур відкриває широкі перспективи для конструювання радарів та систем радіозв'язку.

Новітні метаповерхні з функціями модуляції електромагнітних хвиль уможливають формувати унікальні патерни, що пов'язані із ефектом мікро-Доплера. У поєднанні з машинним навчанням це забезпечує високу точність розпізнавання об'єктів за їхніми мікровібраціями. Водночас залишається актуальним завдання диференціації схожих цілей, що разом із підвищенням ЕПР і визначає основну мету дисертаційної роботи.

Виходячи із вищесказаного, тема дисертаційної роботи Ткача Владислава Олеговича «Модуляція електромагнітних сигналів з використанням метаповерхонь для покращення детектування та ідентифікації розсіювачів» є безсумнівно актуальною. За сукупністю отриманих результатів, рівнем їхньої теоретичної і практичної значущості в роботі вирішено важливе науково-прикладне завдання – покращення радіолокаційної видимості малопомітних об'єктів шляхом збільшення їх ЕПР за допомогою використання метаструктур та уможливлення їх ідентифікації через формування та розпізнавання унікальних патернів сигналу ефекту мікро-Доплера.

Оцінка змісту та завершеності дисертації.

Наукові положення, висновки та рекомендації, викладені в дисертаційній роботі, є належним чином обґрунтованими і в більшості випадків підтверджуються результатами моделювання та експериментальних досліджень.

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. Зокрема, детально розглянуто процеси розсіювання електромагнітних хвиль нерухомими та рухомими об'єктами, а також фізичні обмеження, які визначають межі рівня їх радіолокаційної помітності. Особливу увагу приділено концепції надрозсіювачів – структур, здатних перевищувати традиційні межі розсіювання за рахунок використання метаматеріалів. Описано принципи побудови таких структур із застосуванням електричних та магнітних диполів, а також сучасні підходи до їх оптимізації, зокрема на основі нейромережових генетичних алгоритмів. Ще одним підходом до підвищення радіолокаційної помітності об'єктів, особливо з метою їхнього виявлення та ідентифікації, є використання ефекту мікро-Доплера. У розділі розглянуто його основні принципи та приклади застосування. Також проаналізовано методи імпедансної та механічної модуляції, які спричиняють виникнення цього ефекту.

Другий розділ присвячено аналізу та оптимізації параметрів різних геометричних конфігурацій розрізного кільцевого резонатора з метою керування їх частотним відгуком, зокрема, значенням резонансної частоти. Показано, що при фіксованій площі розрізного кільцевого резонатора можлива робота в широкому частотному діапазоні 0,6-2,2 ГГц, а введення в розріз розрізного кільцевого резонатора біполярного транзистора в ключовому режимі дозволяє змінювати його електромагнітні характеристики в часі. На основі оптимізованих розрізних кільцевих резонаторів було розроблено смугові фільтри та експериментально продемонстровано можливість керування смугою їх робочих частот. Крім того, здобувач показав практичне використання високої чутливості розрізного кільцевого резонатора до діелектричних об'єктів в близькому полі. Зазначений ефект здобувач використав для розроблення пристрою, який здатний детектувати ці зміни в часі та конвертувати їх у цифрові імпульси. Ця розробка стала основою функціонування сенсорного пристрою виявлення дотиків пальця людини та використання його як складової системи контролю доступу.

Третій розділ присвячено вивченню явища надрозсіювання, яке виникає при щільному розміщенні елементів у малому об'ємі порівняно з довжиною хвилі. Використовуючи комбінації магнітних (РКР) та електричних (прямі

провідники) диполів, сформовано об'ємні метаструктури. Для оптимізації просторового розташування компонентів, з урахуванням їхньої сильної взаємодії у близькому полі, було застосовано генетичний алгоритм. У результаті отримано конфігурації надрозсіювачів, що демонструють суттєве збільшення ефективної площі розсіювання. Розроблені експериментальні зразки об'ємних метаструктур розмірністю $2 \times 2 \times 2$ елементи висотою 10 мм та $3 \times 3 \times 3$ елементи висотою 20 мм. Результати виконаних експериментальних досліджень об'ємних метаструктур із використанням квадрокоптера DJI Mini 2 показали, що відстань детектування радаром зростає від 1,5 до 5 разів залежно від розмірності структури.

У **четвертому розділі** увагу зосереджено на актуальній науково-практичній проблемі ідентифікації безпілотних літальних апаратів (БПЛА) за допомогою пасивного радіолокаційного маркування. Зокрема, обґрунтовано й реалізовано оригінальну ідею застосування пасивних резонансних структур на пропелерах БПЛА, які формують унікальні спектральні патерни вторинного випромінювання завдяки ефекту мікро-Доплера. Шляхом моделювання та експериментальних досліджень встановлено, що різні комбінації маркування лопатей демонструють відмінні електромагнітні відгуки. Такі сигнали значно відрізняються від природних, а, отже, легко ідентифікуються радаром. Зібрані експериментальні дані використано для навчання алгоритму розпізнавання на основі згорткової нейромережі в чистому вигляді та зі штучним додаванням шумів. Навчену модель застосовано для розпізнавання БПЛА з випадковою траєкторією польоту. Показано, що імовірність правильної ідентифікації перевищувала 98% при значенні співвідношення сигнал/шум 20 дБ.

Завершується робота загальними **висновками**, у яких узагальнено основні положення дисертаційного дослідження, подано **список використаних джерел**, а також **додатки**.

Виходячи з аналізу основного змісту дисертації, можна стверджувати, що вона є завершеною науковою кваліфікаційною роботою, у якій автор успішно розв'язав поставлені завдання та досяг сформульованої мети дослідження.

Достовірність та новизна наукових положень.

Достовірність отриманих результатів підтверджується високим рівнем відповідності між теоретичними розрахунками, імітаційним моделюванням та експериментальними даними, що здійснювались шляхом використання теоретичних та аналітичних моделей з використанням спеціальних алгоритмів розрахунку і аналізу як окремих компонентів метаматеріалів (кільцевих резонаторів), так і метаматеріалів в цілому (набори електричних і магнітних диполів); комп'ютерне моделювання електромагнітних процесів із застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення CST Studio Suite як отриманих моделей досліджуваних структур, так і складових компонентів БПЛА;

а також експериментальними дослідженнями у сертифікованій безеховій камері та вимірюваннями у польових умовах. Отримані результати свідчать про наукову та інженерну обґрунтованість та можливість практичної імплементації.

Результати наукової новизни дисертації є такими:

- Удосконалено метод синтезу розрізних кільцевих резонаторів шляхом зміни їх 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 розрізних кільцевих резонаторів із 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 розрізних кільцевих резонаторів.
- Набув подальшого розвитку метод керування смугою робочих частот адаптивного смугового фільтра мікрохвильового діапазону на основі розрізного кільцевого резонатора 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 розрізного кільцевого резонатора між двома станами. Це уможливило синтез адаптивних смугових фільтрів, що використовують варакторний діод як параметр налаштування електромагнітних характеристик розрізного кільцевого резонатора та забезпечують можливість контролю смуги пропускання в діапазоні від 110 МГц до 180 МГц навколо центральної частоти 1,1 ГГц.
- Вперше запропоновано метод синтезу об'ємних метаструктур зі збільшеною ефективною площею розсіювання 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 ефективної площі розсіювання 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.
- 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 електромагнітні 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.

Важливість отриманих результатів для науки і практики, можливі шляхи використання результатів дослідження.

Отримані в дисертаційній роботі наукові результати становлять важливу теоретичну та практичну складову для розробки сучасних радіолокаційних систем, орієнтованих на виявлення та ідентифікацію об'єктів з низьким значенням ефективної площі розсіювання. Реалізація таких рішень базується на використанні резонансних структур, параметри яких були теоретично обґрунтовані та експериментально підтверджені здобувачем.

Практичне значення одержаних результатів у дисертаційній роботі Ткачем В. О. полягає в наступному:

- 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 розрізним кільцевим резонатором із різними електромагнітними характеристиками. Пристрій характеризується високим рівнем захищеності, оскільки простір ключів K залежить від кількості розрізних кільцевих резонаторів із різним значенням резонансних частот, наприклад, для досліджених 14 типів розрізних кільцевих резонаторів $K = 10^{15}$.
- Розроблено адаптивний смуговий фільтр на основі модифікації розрізного кільцевого резонатора з можливістю динамічної зміни його електромагнітних характеристик шляхом введення керованого радіoelementa (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 розрізного кільцевого резонатора 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 ефективної площі розсіювання 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 ефективної площі розсіювання, що становить відповідно $0,16 \text{ м}^2$ та $0,8 \text{ м}^2$. Це уможливило 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.

Методи досліджень, які використані в дисертаційній роботі.

Для проведення досліджень комп'ютерних моделей розрізного кільцевого резонатора здобувачем використано сучасні програмні забезпечення, такі як CST Microwave Studio і COMSOL, які уможливлюють чисельне моделювання розв'язків системи рівнянь Максвелла як у часовій, так і у частотній областях. Для аналізу та оброблення отриманих даних застосовано інструменти середовища Matlab&Simulink, яке надає широкий спектр методів для математичного моделювання та чисельних розрахунків, зокрема для спектрального аналізу сигналів використано методи швидкого перетворення Фур'є. Апаратне оброблення сигналів виконано на базі мікроконтролера Arduino, запрограмованого у середовищі Arduino IDE. Оброблення та візуалізація сигналів, отриманих із мікроконтролера в реальному часі, здійснювалось в IDE Processing. Аналітичні розрахунки надрозсіювачів проведено із використанням алгоритмів еволюційної оптимізації Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy згідно з адаптованим методом наближення моментів PyNEC, який придатний для структур, що складаються зі струмопровідних елементів. Експериментальні зразки, а саме макети друкованих плат, спроектовано в програмному середовищі для друкованих плат EasyEDA. У процесі експериментальних досліджень використано методи вимірювання коефіцієнтів відбивання та проходження, ефективної площі розсіювання та діаграм розсіювання, які проводилися в мікрохвильовій безеховій камері із застосуванням високоточного обладнання, такого як: Performance Network Analyzer, Midas (Orbit Ltd.) тощо.

Таким чином, поєднання чисельних, теоретичних і експериментальних підходів забезпечує повну обґрунтованість, узгодженість і достовірність наукових результатів, висновків і рекомендацій викладених у дисертаційній роботі, виконаної Ткачем В.О.

Зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалася відповідно до тематики наукових досліджень кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки в межах науково-дослідної роботи «Методи формування сигнальних конструкцій та інформаційні процеси програмно-апаратної взаємодії широкосмугових телекомунікаційних систем та Інтернету речей» (Держ. реєстр. №0121U112870, 2021-2025 рр.).

Також дослідження, що представлені в дисертаційній роботі, виконувалися в рамках таких науково-технічних проєктів та науково-дослідних робіт:

- Проєкт науково-технічної (експериментальної) розробки молодих вчених «Портативний комплекс для наземного аерозондування вибухових закладок», (Держ. реєстр. № 0123U100679, 2023-2025 рр.).
- Науково-дослідна робота за грантом Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича для молодих вчених «Керований в часі просторовий фільтр електромагнітних хвиль на основі кодованої метаповерхні», (наказ ректора від 31.10.2022 р. №301 «Про результати конкурсу грантів ЧНУ для молодих науковців», 2022 р.).
- Науково-дослідна робота «Розробка комп'ютерних моделей планарних антен Уда-Ягі для безпроводних систем зв'язку» (замовник – ПП «АРТОН», договір №18.000, 2024 р.).

Публікація та апробація результатів дисертаційної роботи.

У рамках виконання дисертаційного дослідження опубліковано 10 наукових праць: 3 статті в міжнародних виданнях, що індексовані у наукометричних базах Scopus та/або Web of Science Core Collection, 4 статті опубліковано у наукових фахових виданнях України. Крім того, результати роботи представлені у 3 тезах конференцій (з яких 1 захід відбувся за кордоном), що індексовані в наукометричній базі Scopus.

Основні результати, отримані в дисертаційній роботі, були предметом обговорень на:

- Науковому семінарі кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, березень 2023; (очна участь)
- Наукових семінарах Інституту фотоніки, електроніки та телекомунікацій Ризького технічного університету – м. Рига, Латвія, жовтень 2023, березень та липень 2024; (очна участь)
- Науковому семінарі Лабораторії динаміки наноструктур Тель-Авівського університету – м. Тель-Авів, Ізраїль, липень 2023; (очна участь)

- 18th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials) – Chania, Greece, 09-14 September, 2024; (очна участь)
- 9th International IEEE Conference on Microwaves, Communications, Antennas, Biomedical Engineering, and Electronic Systems (COMCAS) – Tel Aviv, Israel, 9-11 July, 2024; (очна участь)
- 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) – Florence, Italy, 26-31 March, 2023; (очна участь)
- 11th IEEE Israel and Tel Aviv University Antenna Symposium – Tel Aviv, Israel, 4 May, 2023; (очна участь)
- IEEE Workshop on Microwave Theory and Technology in Wireless Communications – Riga (Latvia), 04-06 October, 2023; (очна участь)
- I Міжнародна науково-практична конференція «Молодіжна наука заради миру та розвитку» (МНЗМР) – Чернівці, Україна, 9-11 листопада, 2022; (онлайн участь)
- 16th IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET) – Lviv-Slavske, Ukraine, 22-26 February, 2022. (онлайн участь)

Відповідність дисертації встановленим вимогам.

Дисертаційна робота відповідає встановленим нормативним вимогам. Вона включає вступ, чотири основні розділи, підсумкові висновки, список використаних джерел та додатки. Загальний обсяг роботи становить 166 сторінок, містить 53 рисунки, бібліографічний список із 195 джерел та додатки.

Дисертаційна робота Ткача В. О. відповідає вимогам до оформлення дисертацій, затвердженим наказом Міністерства освіти і науки України № 40 від 12 січня 2017 року (зі змінами згідно з наказом № 759 від 31 травня 2019 року).

Зауваження до дисертаційної роботи.

1. У підпису під рисунком 2.2 на сторінці 58 зазначено «Залежність ємності від відстані g між металевими смужками». По вісі ординат графіку на рисунку 2.2 відкладені чисельні значення величини відношень еліптичного інтегралу першого порядку при різних значеннях аргументу, що є безрозмірним значенням дробу з формули (2.2).

2. У підпису під рисунком 2.3 на сторінці 60 помилково вказано, що (б) – це графічна залежність зміни загального значення ємності від зміни значення n . У дійсності на рис. 2.3(б) зображена конструкція розрізного кільцевого резонатора з позначенням основних його геометричних розмірів. Аналогічне зауваження до рисунку 2.4 на сторінці 61 і до рисунку 2.5 на сторінці 62.

3. На сторінці 59 автор описав експериментальне обладнання та деталі комп'ютерного моделювання дослідження частотної характеристики S_{11}

розрізного кільцевого резонатора. Але опису експериментальних результатів здобувач не приділив належної уваги. У той же час, на рисунках 2.3, 2.4 і 2.5 видно значну різницю форми графіків частотних характеристик S_{11} , які отримані шляхом моделювання та експериментально, що можна пояснити різницею опорів рамкової антени та розрізного кільцевого резонатора на різних частотах.

4. На рисунках 2.6 і 2.7 показані результати комп'ютерного моделювання розподілу електричного поля по поверхні розрізного кільцевого резонатора, але відсутня температурна шкала кольорів для визначення рівня інтенсивності досліджуваних векторних величин.

5. Дисертаційна робота носить прикладний науково-дослідний характер. У ній мала кількість теоретичних співвідношень і розрахункових формул – лише одна в розділі 1, дев'ять у розділі 2, відсутні в розділі 3 та одна в розділі 4. При цьому, деякі рисунки містять графіки з результатами розрахунку частотних характеристик розроблених пристроїв (наприклад рис. 1.8-1.9 на стор. 47-48 або рис. 2.11 на стор. 74).

6. У дисертації відсутня інформація про імовірність помилкової ідентифікації БПЛА, що не використовують пропоновані ЕМ-наліпки. Також у дисертації мало уваги приділено оцінюванню факторів від яких залежить якість кодування та точність детектування рухомого БПЛА при використанні запропонованих резонансних дипольних розсіювачів на лопаті.

7. Чим пояснити вищу ефективність розпізнавання БПЛА за допомогою комп'ютерної згорткової нейромережі в порівнянні з методом найменших квадратів при співвідношенні сигнал/шум у діапазоні 5-11 дБ (графік на рис. 4.11). Які при цьому потрібні обчислювальні потужності для функціонування такої комп'ютерної згорткової нейромережі та скільки часу на це потрібно?

8. У списку публікацій за темою дисертації на стор. 16 помилково зазначено, що періодичне видання Communications Engineering видавництва Springer Nature віднесене до 1-го квартилю наукометричної бази Scopus (на час підготовки відгуку фахове видання Communications Engineering віднесене до Q2 категорії «Energy» та до Q3 категорії «Chemical Engineering» бази Scopus).

Висновки.

1. Дисертаційна робота Ткача Владислава Олеговича на тему: «Модуляція електромагнітних сигналів з використанням метаповерхонь для покращення детектування та ідентифікації розсіювачів» є завершеним науково-дослідним дослідженням, яке містить нові науково обґрунтовані результати. У сукупності вони вирішують важливе науково-прикладне завдання, що полягає у розробленні та практичній реалізації метаструктур для покращення радіолокаційної видимості малопомітних об'єктів шляхом збільшення їх ефективної площі розсіювання та уможливлення їх ідентифікації за рахунок формування унікальних патернів сигналу мікро-Доплера.

2. Отримані Ткачем В. О. у дисертаційній роботі наукові та практичні результати є значущими для галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації». Тема і зміст дисертації повністю відповідають спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

3. За науковим рівнем, практичною цінністю, апробацією та публікаціями, повнотою висновків і рекомендацій, дисертаційна робота відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12.01.2022 р. (зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМУ № 341 від 21.03.2022 р., № 502 від 19.05.2023 р., № 507 від 03.05.2024 р.), а її автор Ткач Владислав Олегович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації» за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Офіційний опонент,
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри інформаційних
радіoeлектронних технологій і систем
Вінницького національного
технічного університету

Андрій СЕМЕНОВ

04 червня 2025 року

Підпис професора Андрія СЕМЕНОВА

ЗАСВІДЧУЮ

Учений секретар
Вченої ради ВНТУ
к. т. н., доцент, доцент кафедри
безпеки життєдіяльності та
педагогіки безпеки



Інна ВІШТАК