

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації

Ткача Владислава Олеговича

«Модуляція електромагнітних сигналів з використанням метаповерхонь для покращення детектування та ідентифікації розсіювачів»

на здобуття ступеня доктора філософії

з галузі знань 17 – Електроніка та телекомунікації

за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка

1. Обґрунтування вибору теми дослідження та її зв'язок із планами наукових робіт Університету.

Зростання інтенсивності глобального повітряного руху, зумовлене поширенням технологій безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для вирішення повсякденних завдань, розумних міст, доставки товарів, моніторингу автомобільного трафіку тощо, ускладнює виявлення, ідентифікацію та відстеження великої кількості штучних рухомих об'єктів, які за властивостями відбивання електромагнітних (ЕМ) хвиль мало відрізняються від природних. Наприклад, частотні характеристики ефекту Доплера для БПЛА часто збігаються зі спектральними патернами птахів, що ускладнює їх розпізнавання та розрізнення. Одним із шляхів підвищення радіопомітності БПЛА є використання надрозсіювачів – пасивних відбивачів зі збільшеною площею розсіювання, побудованих на основі метаматеріалів. Крім того, маркування рухомих складових БПЛА пасивними резонансними розсіювачами дозволяє формувати унікальні патерни у вторинному випромінюванні, що дозволяє розрізняти та ідентифікувати апарати одного типу.

Метою дисертаційної роботи є вивчення ЕМ-характеристик метаматеріалів та їхніх складових компонентів, розроблення та практична реалізація сенсорних структур і адаптивних смугових фільтрів шляхом модифікації ліній передавання, а також компактних структур із значно збільшеною ефективною площею розсіювання (ЕПР) для покращення радіолокаційного розпізнавання малих БПЛА та їхнього розрізнення шляхом виявлення індивідуальних патернів ефекту мікро-Доплера у вторинному випромінюванні, яке спричиняють одиничні пасивні дипольні розсіювачі рухомих складових БПЛА.

Для досягнення поставленої мети визначено наступні **завдання**:

- Провести огляд літературних джерел, присвячених технологіям та властивостям метаматеріалів та їх компонентам, зокрема електричним та магнітним дипольям, ознайомитися з явищами розсіювання енергії ЕМ-хвиль, принципами побудови розсіювачів та надрозсіювачів на базі метаматеріалів, методами радіолокації та побудови простих радіолокаційних систем, що використовують ефект Доплера та мікро-Доплера для виявлення та ідентифікації рухомих об'єктів.
- Здійснити огляд перспективних застосувань метаматеріалів для покращення детектування та ідентифікування БПЛА, що характеризуються критично малим значенням ЕПР.
- Розробити шляхи модифікації розрізних кільцевих резонаторів (РКР) з метою уможливлення контролю їх резонансних властивостей у широкій смузі частот зі збереженням їх загальних геометричних розмірів, провести комп'ютерне моделювання та здійснити експериментальні дослідження модифікованих РКР.
- Розробити пристрої на основі модифікованих РКР, що використовують їх високу чутливість у зоні сильної близькопольової взаємодії, та їх варіативність щодо

контролю резонансної частоти для імпедансної модуляції через введення керованих радіокомпонентів.

- Розробити методику для синтезу, реалізувати та провести експериментальні дослідження надрозсіювача з аномально високим значенням ЕПР у широкому діапазоні частот на основі метаматеріалів.
- Застосувати надрозсіювачі для маркування БПЛА із критично малим значенням власної ЕПР для покращення його радіолокаційної видимості. Провести аналіз впливу надрозсіювачів на максимальну віддаль виявлення об'єкта від співвідношення сигнал/шум.
- Запропонувати та реалізувати метод ідентифікації БПЛА шляхом нанесення на лопаті пасивних радіоміток на основі резонаторів, провести імітаційне моделювання та експериментальні дослідження в безеховій камері та під відкритим небом, проаналізувати залежність ефективності ідентифікації патернів впливу ефекту мікро-Доплера на вторинне випромінювання від співвідношення сигнал-шум.

Предмет дослідження: аналітичні моделі, імітаційні моделі та експериментальні макети електричних та магнітних диполів із різними геометричними параметрами, а також пристроїв на їх основі.

Об'єкт дослідження: процеси розсіювання енергії ЕМ-хвиль від структур, побудованих на основі комбінації електричних та магнітних диполів, та передавання ЕМ-сигналів через модифіковані лінії передавання з використанням РКР.

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.).

Дослідження, які представлені в дисертаційній роботі, також 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.).

2. Формулювання наукового завдання, нове розв'язання якого отримано в дисертації.

Наукове завдання, що розв'язується в дисертаційній роботі Ткача В.О., полягає у розробленні та практичній реалізації імітаційних моделей та експериментальних макетів пристроїв на основі метаматеріалів для покращення детектування та ідентифікації розсіювачів.

3. Наукові положення, розроблені особисто дисертантом, та їх новизна.

При виконанні дисертаційної роботи отримано такі пункти наукової новизни:

- **Удосконалено** метод синтезу РКР 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 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.
- **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 (2×2×2 чи 3×3×3), 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.
- **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 імовірності правильного розпізнавання не менше 0,98 при співвідношенні сигнал/шум 20дБ.

4. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються.

Достовірність отриманих результатів підтверджується високим рівнем відповідності між теоретичними розрахунками, комп'ютерним моделюванням та експериментальними даними, використанням усталених методів досліджень у галузі електродинаміки. Для проведення досліджень комп'ютерних моделей РКР використано програмне забезпечення CST Microwave Studio і COMSOL, яке уможливлює 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 підходить 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.

5. Рівень теоретичної підготовки здобувача, його особистий внесок у розв'язання конкретного наукового завдання. Рівень обізнаності здобувача з результатами наукових досліджень інших учених.

Здобувач має високий рівень теоретичної та практичної підготовки в галузі радіотехніки та телекомунікацій, що дозволяє йому ефективно вирішувати комплексні наукові завдання. Усі результати, представлені в дисертаційній роботі, отримані здобувачем самостійно шляхом висунення та обґрунтування гіпотез, теоретичних досліджень, створенням та перевіркою імітаційних моделей, розробленням зразків, проведенням експериментальних вимірювань та аналізом отриманих даних. У роботах, опублікованих у співавторстві, особистий внесок конкретизовано у списку публікацій за темою дисертації. Здобувач продемонстрував високий рівень обізнаності з науковими досягненнями інших учених у галузі досліджень метаматеріалів та їх прикладного застосування. Проведений аналіз наукових досягнень у цій сфері дозволив здобувачу значно розширити розуміння сучасних тенденцій та вдосконалити існуючі підходи для досягнення нових результатів.

6. Наукове та практичне значення роботи.

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 різним значенням 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 радіоелемента (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.

7. Повнота викладу матеріалів дисертації у публікаціях та особистий внесок здобувача.

Відповідно до даних програми перевірки схожості текстів частка оригінального тексту дисертаційної роботи за результатами перевірки становить 97%. Робота вважається такою, що має високий рівень оригінальності та відповідає принципам академічної доброчесності.

У рамках виконання дисертаційного дослідження опубліковано 9 наукових праць: 2 статті в міжнародних виданнях, що індексуються у наукометричних базах Web of Science Core Collection та/або Scopus, 4 статті опубліковано у наукових фахових виданнях України. Крім того, результати роботи представлені у 3 тезах доповідей на конференціях, з яких 1 захід відбувся за кордоном.

Усі результати, представлені в дисертаційній роботі, здобувач отримав самостійно шляхом проведення теоретичних досліджень, комп'ютерного моделювання, експериментальних вимірювань та аналізу отриманих даних. У роботах, опублікованих у співавторстві, особистий внесок автора конкретизовано у списку 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, Q3) (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).

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

3. **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).
4. **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>
5. **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:

6. Vovchuk, D., Khobzei, M., **Tkach, V.**, Eliashiv, 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).
7. 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 однегативних метаматеріалів для передачі ЕМ-сигналів у широкому діапазоні частот, що дає змогу використовувати такі структури для створення хвилеводів мікрохвильового та терагерцового діапазону частот.).
8. **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:

9. 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).

8. Апробація матеріалів дисертації.

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

- Наукових семінарах кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича;
- Наукових семінарах Інституту фотоніки, електроніки та телекомунікацій Ризького технічного університету – м. Рига, Латвія, жовтень 2023р., березень та липень 2024р.;
- Наукових семінарах Лабораторії динаміки наноструктур Тель-Авівського університету – м. Тель-Авів, Ізраїль, липень 2023 р.;
- 18th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials) – Chania, Greece, 09-14 September, 2024;
- 9th International IEEE Conference on Microwaves, Communications, Antennas, Biomedical Engineering, and Electronic Systems (COMCAS) – Tel Aviv, Israel, 9-11 July, 2024;
- 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) – Florence, Italy, 26-31 March, 2023;
- 11th IEEE Israel and Tel Aviv University Antenna Symposium – Tel Aviv, Israel, 4 May, 2023;
- IEEE Workshop on Microwave Theory and Technology in Wireless Communications – Riga (Latvia), 04-06 October, 2023;
- I Міжнародна науково-практична конференція «Молодіжна наука заради миру та розвитку» (МНЗМР) – Чернівці, Україна, 9-11 листопада, 2022 р.;
- 16th IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET) – Lviv-Slavske, Ukraine, 22-26 February, 2022;

9. Оцінка мови і стилю дисертації.

Дисертація написана чіткою та зрозумілою мовою, відповідає критеріям науковості, забезпечуючи логічність, послідовність і об'єктивність викладення результатів досліджень. Застосована термінологія є загальноновизнаною, забезпечує читачу доступність сприйняття та необхідне розуміння для практичного використання чи відтворення отриманих результатів.

10. Відповідність змісту дисертації спеціальності з відповідної галузі знань, з якої вона подається до захисту.

Зміст дисертації повністю відповідає вимогам галузі знань 17 – Електроніка та телекомунікації та спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка. У роботі розглянуто актуальне наукове завдання цієї галузі, використано сучасні теоретичні й експериментальні методи дослідження, а також запропоновано та апробовано нові підходи, які відповідають напряму спеціалізації.

11. Дотримання нормативних вимог щодо оформлення дисертації.

Дисертаційна робота відповідає встановленим нормативним вимогам, визначеним наказом МОН «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» від 12.01.2017 р. № 40.

12. Рекомендація дисертації до захисту.

Дисертаційна робота Ткача Владислава Олеговича «Модуляція електромагнітних сигналів з використанням метаповерхонь для покращення детектування та ідентифікації розсіювачів», подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD) з галузі знань 17 – Електроніка та телекомунікації за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка, за своєю актуальністю, науково-теоретичним рівнем, новизною постановки й розв'язання завдань, а також практичним значенням отриманих результатів відповідає вимогам п. 6–9 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти або наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022 р. №44 (зі змінами, внесеними Постановою КМУ №507 від 03.05.2024 р.).

За результатами публічної презентації дисертації та її обговорення на засіданні кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки Навчально-наукового інституту фізико-технічних і комп'ютерних наук Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича від 03.03.2025 р., дисертацію Ткача Владислава Олеговича «Модуляція електромагнітних сигналів з використанням метаповерхонь для покращення детектування та ідентифікації розсіювачів» одногосно рекомендовано до захисту в разовій спеціалізованій раді для здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD) з галузі знань 17 – Електроніка та телекомунікації за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка.

14.03.2024 р.

Голова засідання

д.т.н., професор, завідувач
кафедри радіотехніки
та інформаційної безпеки

Андрій САМІЛА

