

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу 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

Актуальність дисертаційного дослідження

Метаматеріали, будучи відкритими теоретично та аналітично вже півстоліття тому та експериментально підтвердженими чверть століття тому, не тільки залишаються актуальним науковим та інженерним інструментом на сьогодні, а й переживають становлення нового витка розвитку – третьої генерації метаматеріалів, що включає в себе модульовані в часі структури. Самі по собі метаматеріали – це штучно-створені структури, що характеризуються неприродними електромагнітними (ЕМ) властивостями (від’ємне значення діелектричної та/чи магнітної проникності). Основною перевагою таких матеріалів є те, що як з ЕМ так і з технічної точки зору, завдяки сучасним інженерно-технічним можливостям можна реалізовувати компактні структури (співрозмірні довжині хвилі), вирішуючи ряд задач, що диктуються сучасними системами провідного та безпроводного зв’язку – малі масогабаритні розміри, контроль смуги робочих частот, адаптивність, тощо. Оскільки дисертаційна робота присвячена вивченню 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, то нове покоління метаматеріалів та метаповерхонь із здатністю імпедансної або механічної модуляції ЕМ-хвилі, з якою вони взаємодіють, є підходящим інструментом для вирішення ряду поставлених задач.

Варто зазначити, що розроблення сучасних зразків метаматеріалів та метаповерхонь протягом останнього десятиліття досягнули піку свого розвитку на основі загальноприйнятих підходів. Натомість, подальший процес оптимізації вимагає розгляду більшої кількості параметрів, що піддаються оптимізації, для все більшої кількості конструктивних елементів, що входять у склад метаматеріалу/метаповерхні. Так, наприклад, щоб досягнути явища надрозсіювання, необхідно вмістити в досить малому (порівняно з довжиною хвилі) об’ємі досить велику кількість одиночних резонаторів (наприклад, електричних та магнітних диполів), комбінування яких веде до появи мультиполів вищих порядків. Введення ж додаткового ступеня свободи – зміни ЕМ-властивостей в часі складових компонентів метаматеріалу/метаповерхні, відкриває нові фізичні принципи керування ЕМ-хвилями та може призвести до реалізації систем ідентифікації БПЛА за унікальними спектральними ознаками,

що є однією із актуальних задач сьогодення та однією із задач, поставлених в дисертаційній роботі.

Структура і зміст роботи

Обсяг дисертації становить 166 сторінок, із яких 143 – основний текст. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел та додатків.

У **вступі** автор чітко формулює мету та завдання дослідження, обґрунтовує актуальність теми, окреслює наукову новизну та практичне значення роботи.

Перший розділ присвячено детальному огляду сучасних наукових джерел, які стосуються основних принципів розсіювання ЕМ-хвиль та технологій створення надрозсіювачів на базі метаматеріалів. Розглянуто фізичні механізми імпедансної модуляції, зокрема ефект мікро-Доплера. Визначено сучасний стан розвитку технологій детектування БПЛА та запропоновано перспективні напрямки подальших досліджень.

Другий розділ містить результати дослідження електромагнітних властивостей різних конфігурацій розрізних кільцевих резонаторів (РКР). Автором здійснено моделювання та експериментальну перевірку способів керування резонансними властивостями РКР в діапазоні частот 0,65–2,2 ГГц. На основі отриманих результатів спроектовано адаптивні смугові фільтри із можливістю керування частотними характеристиками в реальному часі. Також створено сенсорні пристрої для застосування в системах контролю доступу, які відрізняються високою чутливістю до змін у близькопольовій взаємодії з об'єктами.

Третій розділ охоплює розроблення компактних структур з підвищеною ЕПР, які отримано шляхом застосування генетичних алгоритмів для оптимізації розміщення елементів метаструктур. Проведено комп'ютерне моделювання та експериментальні дослідження таких структур. Доведено ефективність використання надрозсіювачів для значного збільшення дальності виявлення малопомітних об'єктів. На прикладі БПЛА DJI Mini 2 показано підвищення дальності їхнього детектування у 1,5–5 разів залежно від розмірності метаструктури.

Останній, **четвертий розділ** дисертації присвячений інноваційному методу маркування БПЛА пасивними резонансними ЕМ-мітками для створення унікальних спектральних патернів на основі ефекту мікро-Доплера. Представлено результати комп'ютерного моделювання та експериментальних випробувань в лабораторних та реальних умовах. Показано, що запропоноване маркування дозволяє досягнути високої точності ідентифікації БПЛА (понад 98%), навіть у разі низького співвідношення сигнал/шум, використовуючи нейромережеві алгоритми розпізнавання.

Наукова новизна

Наукова цінність дисертаційної роботи полягає у розвитку методів та підходів щодо модулювання електромагнітних сигналів із застосуванням метаматеріалів та метаповерхонь для вирішення актуальних завдань радіолокації та телекомунікацій.

Удосконалено метод синтезу РКР, що дозволяє керувати резонансною частотою в широкому частотному діапазоні (від 0,65 ГГц до 2,2 ГГц) без зміни загальних розмірів. Це відкриває перспективи створення високочутливих сенсорних пристроїв та адаптивних смугових фільтрів, які ефективно реагують на зміни умов експлуатації та можуть бути інтегровані у системи контролю доступу та комунікацій.

Вдосконалений метод керування робочою смугою адаптивних смугових фільтрів за допомогою введення керованих радіокомпонентів, таких як варакторні діоди та транзистори, дозволяє здійснювати гнучке налаштування параметрів пристроїв в реальному часі, що забезпечує суттєве підвищення ефективності та універсальності їхнього застосування у різних радіотехнічних системах.

Вперше запропонований метод синтезу компактних надрозсіювачів із високим значенням ЕПР через еволюційну оптимізацію розподілу власних мод резонаторів дозволяє істотно покращити радіолокаційну помітність малопомітних об'єктів, зокрема безпілотних літальних апаратів. Експериментально доведено, що запропоновані структури можуть збільшувати ЕПР БПЛА DJI Mini 2 у 16–80 разів залежно від їхньої конфігурації.

Запропоноване маркування малих БПЛА за допомогою пасивних резонансних дипольних міток, які встановлюються на лопаті БПЛА дозволяє формувати унікальні спектральні патерни мікро-Доплера, що забезпечують точне розрізнення навіть однотипних об'єктів. Використання штучних нейронних мереж дозволило досягти ймовірності правильної ідентифікації понад 98%, що суттєво підвищує ефективність роботи систем моніторингу повітряного простору.

Практична цінність роботи

Практична цінність результатів дисертаційного дослідження полягає в розробленні пристроїв та методів, що можуть бути безпосередньо впроваджені у сучасні телекомунікаційні, радіолокаційні та системи безпеки. Основними практичними результатами вважаю такі:

1. Розроблення адаптивних смугових фільтрів мікрохвильового діапазону, які базуються на керованих в часі резонансних характеристиках РКР. Практична цінність таких фільтрів полягає у можливості гнучкого налаштування робочої частоти та смуги пропускання пристроїв у широкому діапазоні, що є критично важливим для сучасних систем зв'язку та сенсорних мереж. Завдяки використанню керованих елементів (варакторних діодів, транзисторів), ці фільтри можуть динамічно пристосовуватися до змінних умов експлуатації, підвищуючи стабільність роботи комунікаційних систем і ефективність використання частотного ресурсу.
2. Створення сенсорних пристроїв на основі модифікованих РКР. Запропоновані автором сенсори характеризуються високою чутливістю в зоні близькопольової взаємодії, що дозволяє виявляти об'єкти в безпосередній близькості із високою точністю. Це має значні перспективи практичного застосування у системах контролю доступу, системах безпеки

приміщень та будівель, де необхідно гарантувати точне та швидке реагування на наближення людини або стороннього предмета.

3. Розроблення компактних метаструктур із надвисоким значенням ЕПР, які можуть застосовуватись для підвищення видимості малогабаритних БПЛА. Це особливо актуально у цивільних застосуваннях, оскільки дозволяє істотно збільшити дистанцію їх виявлення стандартними радарними системами без суттєвого збільшення габаритів БПЛА. Експериментально доведено, що використання запропонованих автором метаструктур може збільшити дальність виявлення БПЛА у 1,5-5 разів залежно від типу структури.
4. Запропонований автором метод маркування БПЛА пасивними резонансними мітками для ідентифікації. Це інноваційне рішення надає можливість задавати унікальні ідентифікаційні коди, які визначаються аналізом ефекту мікро-Доплера. Практична цінність такого методу полягає у високій точності ідентифікації, підтвердженій експериментально (ймовірність правильної ідентифікації понад 98% при співвідношенні сигнал/шум 20 дБ). Це має суттєве значення для систем моніторингу повітряного простору та ускладнює несанкціоноване використання однотипних БПЛА.

Обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій

Наукові положення, які представлені в дисертаційній роботі, є добре обґрунтованими та належно висвітленими у відповідних розділах дисертації.

Основні результати, які отримані здобувачем та виносяться на захист, цілком відповідають меті та завданням роботи, обговорені на наукових семінарах, міжнародних конференціях та опубліковані у фахових виданнях України та зарубіжних виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus. Достовірність отриманих результатів ґрунтується на використанні загальноприйнятих теоретичних підходів та методів досліджень та не викликає сумнівів. Під час виконання дисертаційного дослідження було проаналізовано значну кількість наукової літератури (195 посилань).

Зауваження

У процесі ознайомлення з дисертацією виникли деякі запитання й зауваження, які наведено нижче:

1. Параметри РКР та структури надрозсіювачів вказано без обґрунтування передумов та алгоритму їх розроблення. Через це незрозуміло чи їх характеристики є частиною технічного завдання (тобто очікувані), чи отриманим результатом дослідження.

2. Для пошуку структур ефективних надрозсіювачів використано алгоритм еволюційної оптимізації СМА-ES. Жодних обґрунтувань переваг обраного чи аналізу альтернативних методів оптимізації структур не наведено.

3. Підрозділ 3.5 та зокрема результати, представлені на рис. 3.5а, демонструють мультипольне розкладання ЕПР як функцію частоти. Незважаючи на те, що у розкладанні взято до уваги мультиполі досить високих порядків, сумарне значення ЕПР значно перевищує можливу суму значень ЕПР всіх отриманих мультиполів. З чим це пов'язано?

4. В підрозділі 3.6 приведено експериментальні результати лабораторних вимірювань розроблених метаструктур розмірністю $2 \times 2 \times 2$ та $3 \times 3 \times 3$ елементи. Проте, в порівнянні із результатами, що було отримано як при мультипольному розкладанні на рис. 3.5а для структури розмірністю $3 \times 3 \times 3$ елементи, так і в процесі оптимізації на рис. 3.2в, що містять один чіткий максимум, частотна залежність ЕПР для експериментальних досліджень містить два чіткі максимуми. З чим це пов'язано та які варіанти вирішення даної проблеми?

Зазначені зауваження не впливають на висновок про високий науковий рівень дисертаційного дослідження та його загальну позитивну оцінку.

Повнота викладу в опублікованих працях наукових положень, висновків та рекомендацій.

Результати дослідження опубліковано у 10 наукових працях, з яких 3 проіндексовано у наукометричній базі даних Scopus (зокрема, 2 статті – у журналах квартилю Q1, 1 стаття – квартилю Q4), 4 статті – у фахових наукових виданнях України категорії «Б» (одна з них додатково відображає результати дисертаційної роботи), а також тричі результати дослідження були представлені у тезах доповідей на міжнародних наукових конференціях. Зміст опублікованих матеріалів охоплює всі розділи дисертації.

Відсутність академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації

Представлені в наукових працях і дисертації результати дослідження є новими та повністю відповідають принципам академічної доброчесності. Дисертант чітко вказав свій особистий внесок у публікаціях. Використані в дисертаційній роботі ідеї, теоретичні підходи, методи, а також експериментальні та теоретичні результати інших авторів належним чином задокументовані із відповідними посиланнями на джерела.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Ткача В.О. є завершеним науковим дослідженням, яке виконано автором самостійно на високому науковому рівні. Низку нових результатів, отриманих у роботі, можна вважати достовірними та науково обґрунтованими, та такими, що мають значний науковий та практичний інтерес. Матеріал дисертації викладено в логічній послідовності, супроводжується великою кількістю графічних даних, які детально відображають результати проведених досліджень. Аналіз представлених даних достатньо розкриває сутність фізичних явищ та процесів, що сприяє глибокому розумінню предмету дослідження. Сформульовані висновки отримали необхідну і достатню теоретичну аргументацію та є методологічно обґрунтованими.

Дисертаційна робота Ткача Владислава Олеговича «Модуляція електромагнітних сигналів з використанням метаповерхонь для покращення детектування та ідентифікації розсіювачів» подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації» за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка» за її актуальністю, науково-теоретичним рівнем, новизною постановки та розв'язання проблеми, практичним значенням отриманих результатів, системністю викладення 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 КМУ № 44 від 12.01.2022 р. (зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМУ № 341 від 21.03.2022, № 502 від 19.05.2023 р., № 507 від 03.05.2024 р.), а також “Вимогам до оформлення дисертації”, затверджених Наказом Міністерства освіти і науки України № 40 від 12 січня 2017 року (зі змінами від № 759 від 31.05.2019 року), а її автор Владислав Олегович Ткач заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка» з галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації».

Рецензент

кандидат фізико-математичних наук,
доцент кафедри поліграфічних,
мультимедійних та оптичних технологій
Чернівецького національного університету
імені Юрія Федьковича

Ірина СОЛТИС

