

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора,
професора кафедри технічної кібернетики й інформаційних технологій
імені професора Р. В. Мерктя
Одеського національного морського університету
Полікаровських Олексія Ілліча
на дисертаційну роботу Ткача Владислава Олеговича
«Модуляція електромагнітних сигналів з використанням метаповерхонь для
покращення детектування та ідентифікації розсіювачів»,
представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії
в галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації»
за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Актуальність теми дисертації

Актуальність теми дослідження зумовлена стрімким розвитком технологій безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та їх масовим впровадженням у різні сфери діяльності – від логістики й моніторингу трафіку в межах «розумних міст» до дистанційного зондування в сільському господарстві, надзвичайних ситуаціях, тощо. Така тенденція призводить до зростання навантаження на системи управління повітряним простором, водночас створюючи нові виклики для систем радіолокаційного спостереження.

Особливу складність становить виявлення і класифікація малогабаритних БПЛА з низьким значенням ефективної площі розсіювання (ЕПР), що обумовлює низьке співвідношення сигнал/шум і знижує ефективність традиційних радарів. До того ж, спектральні характеристики сигналів, відбитих від таких об'єктів, часто подібні до інших повітряних природних цілей, зокрема птахів, що ускладнює їх надійну ідентифікацію.

На цьому тлі особливу перспективу демонструє використання штучно створених структур, так званих метаматеріалів і метаповерхонь, здатних суттєво змінювати характеристики розсіювання електромагнітних (ЕМ) хвиль від об'єктів. Зокрема, завдяки конструктивним особливостям вони дозволяють підвищити радіолокаційну помітність БПЛА (створення, так званих надрозсіювачів, що дозволяють досягати надзвичайного рівня розсіювання у структурах співрозмірних пів довжини/довжині хвилі) та формувати унікальні патерни завдяки ефекту мікро-Доплера, що не зустрічаються в природі та можуть бути використані для ідентифікації.

Додаткову цінність має інтеграція алгоритмів машинного навчання, що здатні ефективно аналізувати динамічні характеристики розсіяного сигналу

та розпізнавати об'єкти різного роду. Проте, класифікація цілей одного типу (наприклад, декілька однакових БПЛА, що пілотують одночасно) досі залишається складним завданням і потребує подальших досліджень.

Таким чином, удосконалення методів радіолокаційного виявлення шляхом підвищення ЕПР із використанням метаструктур та розробка інтелектуальних підходів до ідентифікації об'єктів є надзвичайно важливим в умовах сучасних викликів та прогресу в радіолокаційних технологіях.

Сукупність вищесказаного окреслює та показує, що дана дисертаційна робота є безсумнівно актуальною.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни

Автором було визначено мету та висвітлено її в дисертаційній роботі наступним чином: «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 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 автором чітко окреслено 7 пунктів задач, які в результаті повністю були виконані. Завдання співвідносяться з ознаками наукової новизни дослідження, про що свідчить правильність методології та методики дослідження. Об'єкт, предмет та мета роботи логічно пов'язані. Зміст дисертації відповідає її темі та спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка». Виклад матеріалів дослідження є логічним, послідовним та відповідає вимогам наукового стилю.

Аналіз дисертаційної роботи Ткача В.О., поданої до захисту, свідчить про те, що її наукові положення, висновки та рекомендації є змістовними, достатньо обґрунтованими та достовірними. Проведені дослідження, представлені у дисертаційній роботі, базуються як на фундаментальних, так і на сучасних науково-інженерних засадах, узагальненні провідних наукових концепцій, аналізі літературних джерел, а також на результатах авторського наукового аналізу.

Достовірність отриманих у дисертаційній роботі наукових результатів, висновків і рекомендацій базується на належному застосуванні методів дослідження, зокрема, для проведення досліджень комп'ютерних моделей РКР використано програмне забезпечення CST Microwave Studio і COMSOL,

яке уможливило 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. Апаратна обробка сигналів виконана на базі мікроконтролера Arduino, запрограмованого у середовищі Arduino IDE. Обробка 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. Симбіоз таких підходів забезпечує обґрунтованість, узгодженість і достовірність наукових результатів, допомагає належне порівняння та відповідність результатів, отриманих аналітичним та експериментальним шляхами.

Наукова новизна одержаних результатів

Серед пунктів наукової новизни слід відмітити, що автором вперше було запропоновано: (1) 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, що призвело до зростання відстані детектування малопомітного об'єкту на прикладі БПЛА типу DJI Mini 2 у 1,5 та 5 разів в залежності від розмірності структури ($2 \times 2 \times 2$ чи $3 \times 3 \times 3$ резонансні елементи); а також (2) 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.

Автором дисертаційної роботи було 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, що вже знайшли своє застосування в ряді пристроїв; а також в результаті виконання роботи набув подальшого розвитку метод керування смугою робочих частот адаптивного смугового фільтра мікрохвильового діапазону на основі РКР шляхом введення керованих радіоелементів, що дозволило реалізувати ряд адаптивних смугових фільтрів.

Крім цього отримано ряд практичних результатів, що висвітлені п'ятьма пунктами в дисертаційній роботі.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності

Дисертаційна робота виконана Ткачем В.О. є цілісною, завершеною та самостійно виконаною науковою працею, яка містить особистий внесок здобувача, має теоретичну і практичну цінність для розвитку сучасної науки та інженерії. Дисертаційна робота містить комплекс аналітичних та експериментальних досліджень, що включають вивчення ЕМ-властивостей дипольних резонаторів – прямих провідників (електричних диполів) та кільцевих резонаторів (магнітних диполів), їх модифікацію й оптимізацію та, як результат, їх поєднання в одному конструктивному рішенні для досягнення контролю робочої частоти та смуги робочих частот, що вирішують ряд задач стосовно реалізації адаптивних смугових фільтрів, сенсорних пристроїв із високим рівнем чутливості, надрозсіювачів для покращення радіолокаційного детектування шляхом значного покращення значення ЕПР, а також підвищення значення ЕПР пластикових пропелерів та розроблення методів пасивної ідентифікації БПЛА однієї серії.

За змістом і напрямками проведених досліджень дисертація відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності в галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації» за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Ознайомившись із текстом дисертаційної роботи та опублікованими науковими працями автора, можу зробити висновок, що дисертаційна робота є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень, що відповідає принципам академічної доброчесності.

Мова та стиль викладення результатів

Текст дисертаційної роботи викладено українською мовою. Стиль викладення матеріалів дослідження відповідає вимогам, що висуваються до наукових праць такого рівня, вирізняється науковістю, спостерігається системність, обґрунтованість, логічність та послідовність, текст є стилістично коректним.

Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів і висновків до кожного з них, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації складає 166 сторінок, з яких основний зміст - 143 сторінки. Дисертація містить 53 рисунки. Список використаних джерел налічує 195 найменувань на 17 сторінках та 2 додатки на 6 сторінках.

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** дисертації 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.

У **другому розділі** дисертації проведено аналіз та оптимізацію 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.

У третьому розділі дисертації вивчено явище 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 10мм 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.

У четвертому розділі дисертації увагу зосереджено 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.

У висновках зазначено основні результати, що отримані в дисертаційній роботі, у процесі вирішення сформульованих у вступі задач дослідження.

Виходячи із вищесказаного, зазначаю, що дисертація є завершеною науковою кваліфікаційною роботою, а її автор виконав всі поставлені задачі та досяг поставленої мети.

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи

За матеріалами дисертації опубліковано 10 наукових праць: 3 статті в міжнародних виданнях, що індексуються у наукометричних базах Scopus, 4 статті опубліковано у наукових фахових виданнях України (з яких одна стаття додатково відображає результати дисертації). Крім того, результати роботи представлені у 3 тезах конференцій, з яких 1 захід відбувся за кордоном.

Дискусійні положення та зауваження щодо змісту дисертаційної роботи

1. У розділі 1 підрозділах 1.2.2-1.2.3 описано механізм ефекту мікро-Доплера та приведено вплив на нього наявності двох механічних осциляторів, на прикладі двох електричних диполів, зв'язаних сильною близькопольовою взаємодією (до $1,5\lambda$). Чи впливає така взаємодія на підхід щодо кодування пасивними резонансними мітками для ідентифікації малих БПЛА, описаних у розділі 4? Які відстані між пропелерами та лопатями є допустимими? Як кількість лопатей впливає на кодування з точки зору ЕМ-взаємодії?

2. У дисертаційній роботі не описано ЕМ-взаємодію пасивних міток та корпусу чи складових БПЛА. Чи впливає відстань між пропелерами та корпусом БПЛА на ефект мікро-Доплера, наприклад через вторинне розсіювання ЕМ-хвиль?

3. У підрозділі 4.2.1 проведено ряд комп'ютерних моделювань присвячених розсіюванню ЕМ-хвиль пропелера, що обертається, та приведено результати в залежності від кута повороту для частотних діапазонів 2-30 ГГц та 65-110 ГГц. Чи проводились подібні дослідження для частотного діапазону 30-65 ГГц?

4. У підрозділі 4.3.2 приведено результати вимірювань з використанням радару AWR1642, проте надалі ці результати не використовуються.

5. Для ідентифікації маркованих БПЛА на основі вторинного випромінювання використано згорткову нейромережу, що використовує графічні зображення спектрів. Часові залежності та спектри подані як послідовність чисел містять не менше інформації, що і на зображенні, також можуть бути використані для навчання та при використанні нейромережі потенційно забезпечивши більшу точність виявлення.

6. В розділі 4 в основному описується процес ідентифікації БПЛА в статичному положенні – зависання в повітрі на певній відстані перед радаром. Натомість, рис. 4.10 показує результат вимірювання для БПЛА, що рухається по прямій траєкторії, змінюючи швидкість та напрямок. Хоча вимірювання та аналіз проведено і для БПЛА в польоті, проте траєкторія і динаміка польоту все ще залишаються досить простими. Чи здійснювались вимірювання для випадкових траєкторій польоту і, якщо так, то на скільки відрізняються результати детектування?

7. Допущено неточність у наступному: зі списку опублікованих праць видно, що кількість опублікованих статей у базі Scopus є 3, хоча автором зазначено, що таких статей є 2.

Висловлені вище зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів, а також не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Загальний висновок

Дисертація за актуальністю, науковою новизною, теоретичною значущістю і практичною цінністю відповідає предметній області спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» (галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації»). Її зміст та оформлення 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). З урахуванням вищевикладеного вважаю, що Ткач Владислав Олегович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка» (галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації»).

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри технічної
кібернетики й інформаційних
технологій імені професора Р. В. Меркта
Одеського національного
морського університету

Олексій ПОЛКАРОВСЬКИХ

*Підпис завідувача
в. секретаря ОКМУ
Чоробий І.О.*

