

## **ВІДГУК**

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Ткача Владислава Олеговича “Модуляція електромагнітних сигналів з використанням метаповерхонь для покращення детектування та ідентифікації розсіювачів”, подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка

### **Актуальність теми дисертації**

Сучасний стан радіолокаційних систем вимагає нових підходів до детектування та ідентифікації об’єктів. У першу чергу це зумовлено швидким зростанням загального повітряного руху та поширення технологій БПЛА, що все частіше інтегруються у структури так званих розумних міст, з метою доставки різноманітних товарів, здійснення моніторингу автомобільного трафіку тощо. Такі апарати знаходять застосування для моніторингу важкодоступної для людини місцевості, дослідження сільськогосподарських угідь, картографування та ін. Ці системи повинні функціонувати в різноманітних умовах навколишнього середовища, де ефективне управління повітряним простором стає ще складнішим з огляду на значне розширення радіоелектронних засобів.

На сучасному етапі виявлення та ідентифікація малих БПЛА, що створюють значні проблеми через їх критично низьке значення ефективної площі розсіювання (ЕПР), є надзвичайно актуальним оскільки для них є характерним низьке значення співвідношення сигнал/шум. Це ускладнює їх виявлення за допомогою звичайних радарних систем навіть на порівняно невеликих відстанях. Більше того, частотні характеристики ефекту Доплера та мікро-Доплера часто схожі на спектральні патерни птахів, що ускладнює їх розрізнення. Із останніх наукових досліджень видно, що значного прогресу у збільшенні значення ЕПР можна досягнути шляхом використання штучно створених матеріалів – метаматеріалів.

Такі властивості метаматеріалів, як покращене значення ЕПР досягаються завдяки унікальним конструктивним особливостям їх складових компонентів. Для проектування засобів виявлення використовують різноманітні алгоритми, при цьому технології виготовлення вимагають високого рівня точності та якості матеріалів. Компактні розміри та можливості розроблення структур з незвичайними властивостями, які зумовлюють актуальність подальших досліджень у таких галузях, як автомобіле- та літакобудування, радарні та комунікаційні системи. Вищевказані фактори зумовлюють актуальність проведеного дисертаційного дослідження.

### **Структура та зміст роботи**

Дисертаційна робота складається з анотацій, вступу, чотирьох розділів, які містять 53 рисунки, висновків, списку використаних джерел із 195 найменувань та двох додатків. Загальний обсяг дисертації – 166 сторінок.

**Вступ** зосереджено на обґрунтуванні вибору теми дослідження, конкретизації об'єкта дослідження, роз'ясненні мети і завдань роботи, обґрунтуванні методів дослідження, акцентуванні наукової новизни отриманих результатів і їх практичній вартості, конкретизації особистого внеску автора, апробації результатів дослідження на наукових міжнародних конференціях та підтвердження зв'язку теми дисертації з науковими дослідженнями організації, де була виконана дисертація.

**Перший розділ** присвячено огляду вітчизняних і закордонних літературних джерел, що відображають сучасний науковий та технологічний стан розвитку систем модуляції електромагнітних сигналів з використанням метаповерхонь. Проведено огляд літературних джерел, присвячених технологіям та властивостям метаматеріалів і їх компонентів, зокрема електричним та магнітним диполям, ознайомлено з явищами розсіювання енергії ЕМ хвиль, принципами побудови розсіювачів та надрозсіювачів на базі метаматеріалів. Встановлено, що такі структури можуть ефективно використовуватися для покращення детектування та ідентифікації розсіювачів.

У **другому розділі** проведено дослідження ЕМ властивостей різних кільцевих резонаторів (РКР) різних конфігурацій та розроблення пристроїв модуляції на їх основі. В першу чергу це стосується РКР різних конфігурацій зі сталими геометричними розмірами. Для вивчення частотних характеристик РКР на основі S-параметрів, в середовищі моделювання CST Microwave Studio розроблено відповідну модель, складовими якої є кільцевий резонатор та магнітна рамкова антена. Значну увагу приділено віддаленому детектуванню резонансних характеристик РКР за допомогою аналізу їх ЕПР при зміні частоти опромінюваного сигналу. Такий підхід описує взаємодію в дальньому полі ЕМ хвилі з РКР, що досліджуються. Досліджено можливості керування ЕМ характеристиками РКР різних конфігурацій, в тому числі контрольованими в часі. Запропоновано смуговий фільтр із заданими частотними параметрами на основі РКР, характеристики якого досліджуються на основі аналізу числових результатів.

**Третій розділ** призначений розробленню підходів для покращення рівня детектування об'єктів з малим значенням ЕПР шляхом використання надрозсіювачів. Описано спосіб побудови надрозсіювача, який базується на врахуванні взаємодії ЕМ хвиль із матеріалами. Ідея підходу полягає в тому, що для детектування використовуються тривимірні структури з підвищеним значенням ЕПР, побудовані на основі масивів електричних і магнітних резонаторів, які взаємодіють в зоні ближнього поля. Такі конструкції можуть вважатися штучно спроектованими метаматеріалами з врахуванням конкретних вимог технічних реалізацій. Для побудови оптимальної структури засобу детектування на основі РКР та прямих провідників застосування генетичний алгоритм. Результати числового моделювання дозволяють встановити оптимальні параметри засобів детектування.

У **четвертому розділі** досліджуються проблеми маркування БПЛА шляхом використання пасивних резонансних міток для їх ідентифікації з використанням детектування на основі ефекту мікро-Доплера. Окреслено, як основні положення ефекту мікро-Доплера для малих БПЛА використовуються для дослідження ЕПР їхніх пропелерів. Дослідження проведено у широкому діапазоні частот на основі експериментальних даних. Експерименти зосереджено на розробленні ЕМ наліпок та принципів кодування БПЛА шляхом введення резонансних дипольних розсіювачів на лопаті. Проведено детектування рухомого БПЛА в реальних умовах.

**Висновки** роботи чітко сформульовані; вони повною мірою висвітлюють результати, отримані в роботі, які стосуються розробки засобів покращення детектування та ідентифікації розсіювачів на основі використання метаповерхонь. За змістом та рівнем аргументованості висновки відповідають вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

**Перелік літературних джерел** має інформативний характер; всебічно характеризує галузь досліджень і свідчить про широку ерудицію автора в цій галузі.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, їх достовірність**

Для отримання основних результатів роботи автор використав аналітично-числові підходи, які застосовувалися в дослідженні комунікаційних систем аналогічного типу. Моделі базуються на використанні рівнянь Максвелла з наступним переходом до їх числового розв'язання у часовій і 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.

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 та Midas (Orbit Ltd).

Таке поєднання теоретичних, чисельних і експериментальних підходів дає можливість зробити висновок про достатню обґрунтованість і достовірність отриманих у дисертаційній роботі наукових і практичних результатів, а також викладених висновків і рекомендацій.

**Новизна наукових положень дисертаційної роботи**

Автором дисертації розв'язано важливу і актуальну науково-технічну проблему розроблення комунікаційних систем, пов'язаних із питанням близькопольової та

далекопольової взаємодії, дослідженням та розробленням складових компонентів, що характеризуються контрольованим ЕМ відгуком для модифікування як провідних так і безпровідних ліній зв'язку, до яких належать пристрої розсіювання енергії ЕМ хвиль із фіксованим та контрольованим в часі значенням ЕПР із можливістю модуляції його значення шляхом електронного та механічного налаштування параметрів.

У процесі виконання роботи автор отримав низку нових наукових та технічних результатів, а саме:

1. Розроблено метод керування смугою робочих частот адаптивного смугового фільтра мікрохвильового діапазону на основі РКР шляхом введення керованих радіоелементів, до яких відносяться 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.

2. Розроблено 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.

3. Розроблено 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.

### **Практичне значення одержаних результатів**

Практичне значення отриманих результатів наступне:

1. Розроблено автономний пристрій на базі мікроконтролера Arduino nano для аналізу амплітудно-частотних характеристик в діапазоні частот від 0,1 ГГц до 2,5 ГГц, що характеризується нижчою собівартістю в порівнянні з існуючими аналогами.

2. 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.

3. Розроблено надрозсіювач, застосування якого дозволяє збільшити максимальну відстань детектування малопомітних об'єктів, а саме БПЛА із малим значенням ЕПР близько  $0,01 \text{ м}^2$ .

**Основні результати роботи опубліковано** у 10 наукових працях, з них 3 опубліковано в міжнародних наукових журналах (одна в журналі квартилю Q1), 3 публікації у фахових виданнях України, 2 публікації є матеріалами міжнародних наукових конференцій, цитованих у Scopus та 2 публікації у матеріалах інших конференцій.

### **Апробація результатів дисертаційної роботи.**

Отримані результати досліджень мають достатню апробацію, що підтверджено доповідями на престижних міжнародних наукових конференціях, зокрема:

- 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET);
- 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;
- 9th International IEEE Conference on Microwaves, Communications, Antennas, Biomedical Engineering, and Electronic Systems (COMCAS) – Tel Aviv, Israel, 9-11 July, 2024;
- 18th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials) – Chania, Greece, 09-14 September, 2024;

### **Зауваження**

1. На рис. 2.3, де наведено результати моделювання та експериментальна залежність параметрів  $S_{11}$  від довжини смужки, яка утворює розрив внутрішніх плечей РКР, обидві криві неперервні. У зв'язку з цим не зрозуміло, яким чином проводився експеримент. Якщо дані експерименту було інтерпольовано і цей результат наведено, то на це потрібно було додатково вказати. Також не пояснюється суттєва різниця в результатах моделювання і даних експерименту.

Це зауваження стосується і наступних результатів розділу, де порівнюються результати комп'ютерного моделювання і експерименту.

2. У підрозділі 3.2, де викладено застосування генетичного алгоритму для формування метаструктури на основі РКР та прямих провідників, не формалізовано постановку задачі оптимізації цільових параметрів, не сформульовано чітко функцію мети, яка підлягатиме оптимізації, це дещо утруднює розуміння мети досліджень, що стає зрозумілим вже після оцінки отриманих результатів оптимізації.

3. Більше уваги варто було б приділити моментам, які стосуються процедури вибору оптимального розв'язку на основі генетичного алгоритму, оскільки внаслідок наявності великої кількості варіантів для вибору точок, для яких буде формуватися оптимальний розв'язок, використано додаткові процедури методу PyNEC та CMA-ES, що суттєво збільшує його складність.

4. При проведенні експерименту впливу маркування для виявлення БПЛА на відкритій місцевості використовувався розсіювач, змонтований з 8-ми РКР (рис. 3.10г). Але як видно, монтування такої структури може суттєво погіршити аеродинамічні характеристики БПЛА, в першу чергу зменшити його швидкість. Невідомо, чи були якісь міркування відносно усунення цього фактору на якість радіопомітності.

5. При проведенні детектування рухомого БПЛА в реальних умовах експеримент було проведено для ідеального випадку, в якому фактично не було зовнішніх завад, які

знаходяться близько напрямку антена - БПЛА. У зв'язку з цим, варто було б дослідити залежності ЕПР при наявності завад, які знаходяться близько від осі антена – БПЛА.

Підсумовуючи, слід зазначити, що наведені вище зауваження, які стосуються недоліків дисертації, не впливають на якість виконаного дисертаційного дослідження; не зменшують наукової новизни та практичної цінності дисертаційної роботи, не знижують загальної позитивної оцінки проведеного дисертаційного дослідження.

### Висновок

Дисертаційна робота Ткача Владислава Олеговича «Модуляція електромагнітних сигналів з використанням метаповерхонь для покращення детектування та ідентифікації розсіювачів» на здобуття наукового ступеня доктора філософії написана сучасною науково-технічною мовою, послідовно, логічно та грамотно; виклад проілюстровано великою кількістю графічних даних. Спосіб викладу матеріалу забезпечує його доступне сприйняття. Дисертація за змістом, кількістю та якістю отриманих наукових та практичних результатів є завершеним науковим дослідженням, що містить нові науково обґрунтовані результати, присвячені вивченню ЕМ властивостей метаматеріалів та їх складових компонентів з метою їхнього застосування для модифікації ліній передавання та виявлення, і відповідає напрямкам досліджень за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка.

Наукові результати дисертації відповідають вимогам, які висуваються до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії, оскільки вони опубліковані в трьох статтях у журналах, один з яких належить до квартилю Q1. За науковим рівнем, практичною значимістю, рівнем апробації та якістю публікацій дисертація 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 Ткач Владислав Олегович заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 17 – Електроніка та телекомунікації за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка.

Офіційний опонент:

завідувач відділу числових методів математичної фізики  
Інституту прикладних проблем механіки і математики  
ім. Я. С. Підстригача НАН України,  
доктор технічних наук, проф.

Михайло АНДРІЙЧУК

04 червня 2025 р.

