

## **РЕЦЕНЗІЯ**

на дисертаційну роботу Хобзея Миколи Михайловича  
на тему: «Метаструктури із паралельних провідників для систем провідного  
та безпровідного передавання електромагнітних сигналів»,  
яку подано для здобуття ступеня доктора філософії  
з галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації»  
за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

### **Актуальність теми дисертаційного дослідження та зв'язок з науковими планами і програмами**

У сучасних умовах стрімкого розвитку телекомунікаційних технологій, Інтернету речей, бездротових мереж виникає об'єктивна потреба в нових технічних рішеннях, що дозволяють забезпечити широкосмугове та ефективне передавання електромагнітних (ЕМ) сигналів як у провідному, так і в безпровідному каналі зв'язку. Відповідь на цей запит науки і техніки дають метаматеріали, які демонструють керовані ЕМ властивості та відкривають нові можливості для формування хвильових процесів. Одним із перспективних напрямків досліджень у цій галузі є вивчення структур із паралельних провідників (СПП). Такі структури можуть бути адаптовані для широкого спектра застосувань: від створення хвилеводів, сенсорів і антен до високоточних пристроїв медичної спектроскопії, ендоскопії та елементів адаптивних систем бездротового зв'язку.

Дисертаційна робота Хобзея Миколи Михайловича присвячена розробленню та практичній реалізації функціональних модулів систем провідного та безпровідного передавання ЕМ сигналів шляхом використання СПП, що дозволяє покращити характеристики приймально-передавального тракту в широкому діапазоні частот з можливістю їх параметричної ідентифікації. Ця тематика досліджень відповідає не лише актуальним науковим та інженерним викликам, а й практичним потребам в галузі радіотехніки та телекомунікацій. Дослідження, представлені в дисертаційній роботі виконувалися в межах науково-дослідних проєктів, що реалізуються

відповідно до державної реєстрації №0121U112870 (2021–2025), №0123U100679 (2023–2025), №0120U101249 (2020–2022), а також у рамках проєктів, підтриманих грантами Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича для молодих учених та госпдоговірної теми.

### **Структура та зміст дисертаційної роботи**

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів основного тексту, загальних висновків, списку використаних джерел (який налічує 180 найменувань) та двох додатків. Загальний обсяг роботи становить 171 сторінку. Основний зміст дисертації проілюстровано 62 рисунками та таблицею.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми, визначено мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження, викладено наукову новизну, практичне значення, зв'язок із науковими програмами, а також надано загальну характеристику структури дисертації.

*Перший розділ* є оглядово-аналітичним і присвячений аналізу сучасного стану досліджень обраної галузі. У ньому узагальнено понад 100 джерел з тематики метаматеріалів та структур з провідників різних типів. Окрему увагу приділено класифікації СПП, технологіям їх виготовлення в різних частотних діапазонах та можливостям використання.

У *другому розділі* подано результати розробки та дослідження багатоканального хвилеводу на основі СПП. Експериментальний макет завдовжки  $5,3\lambda$  (на частоті 4 ГГц) дозволив передавати зображення, що сформовані від електрично малих джерел через дискретні канали із просторовою роздільною здатністю  $0,26\lambda$ . Продемонстровано можливість передавання растрових зображень в діапазоні 0,3–4 ГГц та 0,1–1 ТГц.

*Третій розділ* присвячено дослідженню методу контролю резонансів Фабрі-Перо у діапазоні 1,138–1,178 ГГц зі смугою до 80 МГц шляхом варіювання геометричних параметрів СПП. Визначено оптимальні значення коефіцієнта заповнення металом (від  $3,14 \times 10^{-6}$  до  $3,14 \times 10^{-2}$ ), що забезпечує максимальну ефективність роботи антенних систем, розроблених на основі СПП.

У четвертому розділі досліджено динамічну зміну ЕМ характеристик СПП при її механічній деформації. Розроблено СПП-резонатор з можливістю провідного та безпровідного контролю значення деформації у діапазоні 0,8–12 ГГц. Запропонований метод провідної оцінки після постобробки досягає точності відтворення значення рівня деформації на рівні 0,002λ.

*Висновки* узагальнюють основні результати роботи.

### **Обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій**

Наукові положення, сформульовані в дисертаційній роботі, є обґрунтованими і викладені в її основних розділах. Їх достовірність підтверджується узгодженістю між теоретичними розрахунками, комп'ютерним моделюванням (з використанням CST Microwave Studio) і результатами експериментів. Для обробки та аналізу даних використовувались відомі методи математичного моделювання (з використанням Matlab). Використання загальноприйнятих підходів заснованих на рівняннях Максвелла у поєднанні з власними рішеннями здобувача забезпечує достатній рівень обґрунтованості отриманих результатів, які не викликають сумнівів щодо своєї коректності.

### **Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях**

Основні наукові результати, винесені на захист дисертації, знайшли належне відображення у публікаціях здобувача. Загалом за темою дисертаційної роботи опубліковано 15 наукових праць, з яких три статті – у високореєтингових рецензованих міжнародних журналах, що індексуються у базі даних Scopus (Q1–Q3), дві статті – у фахових наукових виданнях України (категорія Б), одна стаття – у провідному зарубіжному журналі, що додатково відображає результати дослідження. Дев'ять разів результати роботи були представлені у тезах доповідей на міжнародних наукових конференціях. Положення дисертації були апробовані на 14 міжнародних конференціях та форумах, а також у ході обговорень на наукових семінарах. Такий рівень публікацій та апробації свідчить про повноту і належне представлення основних результатів дисертації.

## Наукова новизна отриманих результатів

Наукова новизна отриманих результатів дисертаційної роботи полягає у розробленні нових та удосконаленні існуючих підходів до використання метаструктур із паралельних провідників для провідного та безпровідного передавання ЕМ сигналів у широкому діапазоні частот. Уперше запропоновано концепцію представлення СПП як оптично довгого ендоскопа для передавання растрових зображень у суб-ГГц/ГГц (0,3–4 ГГц) і суб-ТГц (0,1–1 ТГц) діапазонах частот, що забезпечує високу роздільну здатність до  $0,13\lambda$ . Запропоновано метод цифрового відновлення зображень, отриманих через СПП, із застосуванням автоматичного порогового розділення методом Оцу, що дозволяє забезпечити стабільну якість відновлення при відношенні сигнал/шум понад 20 дБ.

Також уперше продемонстровано можливість керування характеристиками резонансів Фабрі-Перо у СПП за рахунок зміни геометричних параметрів структури, зокрема, радіуса провідників та міжпровідникових відстаней. Показано, що зміна коефіцієнта заповнення металом у діапазоні від  $3,14 \times 10^{-6}$  до  $3,14 \times 10^{-2}$  дозволяє досягти регульованої смуги пропускання в межах 40–80 МГц, що є корисним для антен сучасних бездротових систем зв'язку (LTE, LTE-A, 5G) та радарних технологій.

Вперше експериментально реалізовано метод модуляції ЕМ властивостей СПП шляхом стиснення/розтягнення структури, що дозволило з високою точністю (до  $0,002\lambda$ ) контролювати положення резонансів. Набув подальшого розвитку та експериментально підтверджено метод віддаленого контролю лінійної деформації СПП з використанням радарних систем, що уможливорює оцінювання величини стиснення/розтягнення шляхом визначення ЕПР в діапазоні частот 0,8–12 ГГц.

Отримані результати дослідження суттєво розширюють практичні уявлення про роботу СПП і відкривають нові можливості для їх застосування в радіотехніці, телекомунікаціях, медичній діагностиці та радарних системах.

## **Практичне значення отриманих результатів**

Практичне значення результатів, отриманих у дисертаційній роботі, полягає в розробленні та експериментальному підтвердженні нових конструкцій і функціональних модулів для систем провідного та безпроводного передавання ЕМ сигналів, реалізованих на основі СПП. Запропоновано та апробовано багатоканальний хвилевід, здатний передавати сигнали від дискретних джерел у суб-ГГц/ГГц діапазоні. Розроблено комп'ютерну модель ендоскопа на основі СПП, що може знайти своє застосування для використання в медичній діагностиці та спектроскопії в суб-ТГц діапазоні, з досягнутою роздільною здатністю до  $0,13\lambda$ . Створено антену зі змінними частотними характеристиками, яку протестовано в міжнародних сертифікованих лабораторіях, та резонатор, здатний визначати ступінь механічної деформації з високою точністю  $0,002\lambda$ .

## **Відповідність дисертації встановленим вимогам**

Дисертаційна робота Хобзея М. М. повністю відповідає встановленим вимогам до кваліфікаційних наукових досліджень на здобуття ступеня доктора філософії. Робота відзначається актуальністю тематики представлених досліджень, високим рівнем наукової новизни, теоретичним обґрунтуванням і практичною значущістю результатів. Основні положення дисертації апробовані, результати опубліковані у наукових виданнях та успішно представлені на міжнародних наукових конференціях. Обсяг і структура дисертації, якість оформлення, рівень апробації та публікацій цілком відповідають чинним нормативам, а тематика дослідження здобувача відповідає галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації» та спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

## **Зауваження до дисертаційної роботи**

1. У підрозділі 2.4 наведено результати комп'ютерного моделювання процесу передавання растрових зображень через СПП, зокрема розподіли напруженості електричного поля в площині вихідної апертури на чотирьох різних частотах:  $f_1 = 2$  ГГц,  $f_2 = 3$  ГГц,  $f_3 = 3,5$  ГГц,  $f_4 = 3,85$  ГГц. Натомість у

підрозділі 2.5, який демонструє результати експериментальних досліджень, аналогічні розподіли Е-поля та результати цифрового аналізу зображень подано лише для частот  $f_3$  та  $f_4$ . Незрозуміло, з чим пов'язана така вибірковість, і чи проводилися експерименти для частот  $f_1$  та  $f_2$ .

2. Не розкрито фізичний механізм передавання растрових зображень у міжрезонансному діапазоні частот. Залишається незрозумілим, чому передавання зображень між резонансами Фабрі-Перо є ефективним, тоді як на самих частотах резонансів або кратних їм спостерігається суттєве погіршення якості передавання, що виявляється у зростанні коефіцієнта бітової помилки BER, як це проілюстровано на рис. 2.8г.

3. Розділ 3 присвячено вивченню конструктивних змін СПП (радіус провідників, періодичність їх розташування) з метою застосування структури в антенних технологіях. Основна увага зосереджена на характеристиках відбивання ( $S_{11}$ -параметри), що відображають ступінь узгодженості з джерелом сигналу. Однак недостатньо розглянуто характеристики випромінювання в далекій зоні – зокрема діаграму спрямованості, її ширину та коефіцієнт підсилення. На рис. 3.5 наведено результати комп'ютерного моделювання діаграм спрямованості для частот 1,17 ГГц та 1,5 ГГц, однак не вказано, чи виконувались відповідні експериментальні дослідження, а також не проаналізовано, як геометричні зміни структури впливають на зазначені параметри.

4. Актуальна наукова тема модульованих у часі метаматеріалів знаходить дедалі ширше застосування у сучасних технологіях. Одним із ключових параметрів таких систем є швидкість модуляції. У розділі 4 розглянуто динамічне регулювання характеристик СПП шляхом механічної деформації (стискання/розтягування), однак відсутня оцінка максимально можливої частоти такої модуляції, що є критичним для визначення швидкодії пристрою та його практичної реалізації.

Попри зазначені зауваження, вони не мають принципового характеру і не знижують загальної наукової цінності та практичної значущості представленої

роботи. Дисертація характеризується високим рівнем наукового опрацювання теми та актуальністю досліджень.

### **Загальний висновок**

Дисертаційна робота «Метаструктури із паралельних провідників для систем провідного та безпровідного передавання електромагнітних сигналів» є завершеним науковим дослідженням, що 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 Микола Михайлович Хобзей 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

