

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

В останні десятиліття стрімкий розвиток фотоніки, оптичних та мікрохвильових технологій значною мірою зумовив зростання інтересу до метаматеріалів, що являються штучно створеними структурами, які здатні змінювати характеристики електромагнітної хвилі. Саме завдяки метаматеріалам стало можливим реалізувати такі ефекти, як негативне заломлення, фокусування нижче за дифракційну межу, кероване поглинання та гіперболічне поширення хвиль, що раніше вважались лише теоретичними гіпотезами. Сьогодні такі властивості відкривають нові перспективи у створенні телекомунікаційних пристроїв. Особливої уваги заслуговує окремий клас метаматеріалів – структури з паралельних провідників (СПП). Ці структури показали здатність ефективно взаємодіяти з електромагнітними хвилями в широкому діапазоні частот, забезпечуючи при цьому мінімальні втрати. У порівнянні з іншими метаматеріалами СПП має відносно просту геометрію та добре масштабується для різних діапазонів частот. Саме це робить такі метаструктури перспективними для розробки нових типів хвилеводів, мікрохвильових антен, резонансних елементів та сенсорних пристроїв. Зважаючи на вказане, дослідження СПП, їхніх електромагнітних характеристик та можливостей адаптивного налаштування має не лише теоретичну, а й чітко виражену прикладну цінність. Їх потенціал стає особливо помітним у задачах, де необхідно забезпечити якісне передавання сигналів у складних або обмежених умовах, а також у міжчастотних режимах поза резонансами.

Дослідження, проведене у межах дисертаційної роботи Хобзея М. М., відповідає актуальним потребам науки та техніки. Воно спрямоване на вирішення важливої задачі створення ефективних функціональних модулів для приймально-передавальних систем, здатних працювати у широкому частотному діапазоні з можливістю параметричної ідентифікації. Ураховуючи темпи розвитку технологій обробки сигналів, вимоги до підвищеної пропускної здатності та точності передавання, обрана тема є на часі, а її результати являються цінним внеском у розвиток мікрохвильової інженерії.

Дисертаційна робота виконувалась у межах наукового напрямку кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки та дослідницької теми №0121U112870

(2021–2025). Окремі результати отримано в рамках науково-технічних і прикладних проєктів за номерами держреєстрації: №0123U100679, №0120U101249, №0121U112870, а також у межах грантів Чернівецького національного університету (накази №298 від 15.09.2021 р. та №301 від 31.10.2022 р.) і госпдоговірної тематики (договір №18.000, 2024 р.).

Структура та зміст дисертаційної роботи

Дисертаційна робота складається з анотацій, вступу, чотирьох основних розділів, підсумкових висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 171 сторінку, містить 62 рисунки, одну таблицю, бібліографічний список із 180 джерел та додатки.

У **вступній частині** дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність обраної теми, визначено мету дослідження, його об'єкт, предмет і основні завдання. Наведено інформацію про зв'язок дослідження з науковою тематикою кафедри, окреслено структуру та обсяг дисертації. Подано характеристику наукової новизни отриманих результатів, а також висвітлено їхнє практичне значення. Зазначено кількість публікацій, виступи на конференціях та участь у наукових семінарах.

У **першому розділі** здійснено аналіз сучасних наукових джерел, що стосуються структур із провідників, зокрема СПП, суперлінз, гіперлінз та випадкових розміщень провідників. Оцінено їхні можливості для передавання електромагнітних хвиль, у тому числі через прямі, каскадні й вигнуті структури, включаючи ендоскопічні конфігурації. Також проаналізовано частотні діапазони функціонування таких структур від суб-ГГц до інфрачервоного. Особливу увагу приділено СПП як перспективним елементам, що демонструють ефективну роботу в широкому частотному діапазоні, включно з нерезонансними режимами. На основі огляду сформульовано висновки щодо актуальності та перспективності досліджень у цьому напрямі.

Другий розділ присвячений створенню та дослідженню хвилеводу (оптично довгого ендоскопа) на основі СПП, призначеного для передачі растрових зображень. Розроблено СПП і проаналізовано можливість передавання сигналів від дискретних джерел через окремі канали (елементарні комірки). Досліджено параметри передавання зображень латинських літер у частотних діапазонах: суб-ГГц, ГГц та суб-ТГц. Визначено роздільну здатність передавання та якість відновлення зображень при різних співвідношеннях сигнал/шум.

У **третьому розділі** розглянуто вплив конструктивних параметрів СПП на частотні характеристики структури. Досліджено можливість зміщення резонансів Фабрі-Перо та регулювання ширини смуги пропускання за допомогою керування коефіцієнтом заповнення металом. Представлено результати експериментальних досліджень на прикладі двох реалізованих СПП з різними геометричними параметрами.

Четвертий розділ присвячено можливості керування електромагнітними характеристиками СПП шляхом її механічної деформації (стискання або розтягнення) з метою застосування таких структур у сенсорних та вимірювальних системах. За допомогою моделювання вивчено зміну резонансних характеристик залежно від деформації структури. Створено експериментальний макет, який дозволяє реалізувати такі механічні зміни. Результати досліджень показали можливість точної детекції рівня деформації зі значною роздільною здатністю.

Дисертаційна робота завершується **загальними висновками**, у яких узагальнено ключові результати проведеного дослідження, наведено основні наукові положення, що виносяться на захист, подано **список використаних джерел** та представлено **додатки**.

Обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, викладених у дисертаційній роботі, не викликає сумнівів і підтверджується як застосованими методами дослідження, так і результатами, отриманими у кількох незалежних формах. Зокрема, було забезпечено високий рівень узгодженості між теоретичними розрахунками, результатами комп'ютерного моделювання (із застосуванням CST Studio Suite та MATLAB) та експериментальними дослідженнями, проведеними в безехових камерах із використанням мережевих векторних аналізаторів. Особистий внесок здобувача у виконання дисертаційної роботи є вагомим. У публікаціях, виконаних у співавторстві, обсяг особистого внеску здобувача чітко визначені у відповідному переліку дисертаційного рукопису.

Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях

Наукові результати, отримані в дисертаційній роботі, були опубліковані та апробовані в достатньому обсязі. Загалом опубліковано 15 наукових праць, серед яких три статті розміщені в міжнародних виданнях, що індексуються у базі Scopus та належать до кuartилів Q1-Q3, дві публікації у фахових наукових журналах України, ще одна – у провідному закордонному виданні. Крім того, результати дисертації були представлені у формі тез доповідей на дев'яти міжнародних конференціях. Апробація дослідження відбувалася на шести наукових семінарах та чотирнадцяти міжнародних конференціях.

Наукова новизна отриманих результатів

У дисертаційній роботі сформульовано низку положень, що мають високу наукову новизну. Вперше запропоновано та експериментально підтверджено концепцію використання СПП як оптично довгого ендоскопа для передавання растрових зображень у широкому частотному діапазоні від суб-ГГц до суб-ТГц.

Це стало можливим завдяки дискретизації СПП на елементарні канали з роздільною здатністю до $0,13\lambda$. Запропоновано метод оцифрування прийнятого зображення із застосуванням порогової обробки за методом Оцу, який забезпечує стабільну якість відновлення при SNR понад 20 дБ.

Досліджено та підтверджено можливість керування резонансами Фабрі-Перо шляхом зміни геометрії структури – радіуса провідників та періоду їх розташування, що дозволило розширити частотну смугу до 80 МГц і зробити розроблені рішення придатними для сучасних комунікаційних систем.

Вперше реалізовано підхід до динамічного контролю параметрів СПП за допомогою механічної деформації, з досягненням високої точності визначення змін деформації (до $0,002\lambda$). Також експериментально доведено ефективність віддаленого контролю механічної деформації СПП шляхом оцінювання ефективної площі розсіювання в широкому частотному діапазоні.

Практичне значення отриманих результатів

У процесі виконання дисертаційної роботи отримано низку практичних результатів, які мають значну прикладну цінність у галузі радіотехніки та телекомунікацій. Зокрема, розроблено багатоканальний хвилевід на основі СПП, здатний передавати електромагнітні хвилі від дискретних джерел з роздільною здатністю до $0,26\lambda$. Також створено модель ендоскопа на основі СПП для суб-ТГц діапазону, придатну для застосування в медичній ендоскопії та спектроскопії, при цьому досягнута роздільна здатність становить $0,13\lambda$ і менше.

Окрему практичну цінність становить розроблена антена з можливістю керування частотними характеристиками шляхом інтеграції СПП в апертуру хвилеводного порту. Випробування у безеховій камері підтвердили її ефективну роботу в діапазоні 1,138–1,178 ГГц із шириною смуги до 80 МГц.

Крім того, у роботі запропоновано СПП-резонатор з можливістю динамічного керування своїми параметрами, що дозволяє змінювати резонансні характеристики в режимі реального часу та забезпечує точність вимірювання деформацій до $0,002\lambda$.

Відповідність дисертації встановленим вимогам

Дисертаційна робота Хобзея М. М. повністю відповідає встановленим вимогам до кваліфікаційних наукових праць на здобуття ступеня доктора філософії, що визначені чинними нормативними документами, зокрема затвердженим наказом Міністерства освіти і науки України № 40 від 12 січня 2017 року (зі змінами згідно з наказом № 759 від 31 травня 2019 року).

Зауваження до дисертаційної роботи

1. На рис. 2.3а-б представлено експериментальний макет та результати дослідження функцій відбивання та передавання через елементарну комірку

СПП шляхом вимірювання спектрів параметрів S_{11} і S_{21} відповідно. Однак отримані залежності, наведені на рис. 2.3б, виглядають зашумленими та містять, крім резонансів Фабрі-Перо, додаткові низькочастотні осциляції, що може викликати сумніви щодо достовірності таких вимірювань. Залишається незрозумілим, з чим саме це пов'язано, та чи проводилось калібрування вимірювальних кабелів перед початком експерименту?

2. Підрозділ 2.3 присвячено визначенню допустимого значення просторової роздільної здатності апертури СПП для передавання растрових зображень. Проте із наданого опису не зовсім зрозуміло, чому саме обране значення просторової роздільної здатності дорівнює $2a$, а також чим зумовлена різниця між результатами комп'ютерного моделювання та експериментальних досліджень щодо перехресного передавання сигналів у межах СПП.

3. Підрозділи 4.1 та 4.2 присвячені розвитку ідеї динамічного контролю електромагнітних характеристик СПП шляхом її механічної деформації та описують механізм фізичної реалізації такого підходу у вигляді експериментального зразка. Проте залишаються відкритими такі питання:

- чи передбачалося стиснення або розтягнення СПП одночасно вздовж двох осей, і чи проводилися відповідні дослідження;
- чому для аналізу обрані саме моди TE_{22} та TE_{30} , чи розглядалися моди вищих порядків, які, завдяки більшому Q -фактору, потенційно можуть покращити роздільну здатність згідно з підходом, запропонованим у роботі;
- яким чином змінні умови навколишнього середовища, зокрема вологість, впливають на електромагнітні характеристики експериментальної СПП, враховуючи, що в якості основи використано еластичний матеріал – поліпропілен.

Водночас зазначені зауваження не є критичними, не знижують наукової новизни та практичної цінності отриманих результатів і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Хобзея Миколи Михайловича на тему «Метаструктури із паралельних провідників для систем провідного та безпровідного передавання електромагнітних сигналів» є завершеним самостійним дослідженням, у якому представлено низку нових, науково обґрунтованих результатів. Тематика дослідження повністю відповідає сучасним напрямкам розвитку галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації» та спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка». У роботі досягнуто вагомих теоретичних та прикладних результатів, що підтверджуються належним рівнем апробації, кількістю наукових публікацій та обґрунтованістю висновків. Дисертація відповідає положенням «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу

вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12.01.2022 року (із змінами згідно з постановами КМУ № 341 від 21.03.2022 р., № 502 від 19.05.2023 р., № 507 від 03.05.2024 р.).

Ураховуючи наведене, вважаю, що Хобзей Микола Михайлович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка» у межах галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації».

Рецензент

кандидат фізико-математичних наук,
асистент кафедри комп'ютерних наук
Чернівецького національного університету
імені Юрія Федьковича



Олександр ОЛАР

Підпис Олара О. засвідчую
Учений секретар Чернівецького національного
університету імені Юрія Федьковича
" 07 " грудня 2024

