

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Хобзея Миколи Михайловича “Метаструктури із паралельних провідників для систем провідного та безпровідного передавання електромагнітних сигналів”, подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка

Актуальність теми дисертації

На сучасному етапі розвитку радіоелектронної та мікроелектронної апаратури суттєво зростає доля приладів, які працюють в діапазоні міліметрових та субміліметрових довжини хвиль. Особливо помітним стає таке зростання в галузях спектроскопії, ендоскопії, супутникового зв'язку, радіоастрономії та багатьох інших, які вимагають високої точності та ефективності передачі, прийому та обробки сигналів на високих частотах, включаючи терагерцовий діапазон.

Такі прилади з розвитком сучасних технологій сприяють значному прогресу в багатьох галузях науки та техніки. Зрозуміло, що в процесі їхнього використання виникають нові виклики, які вимагають розв'язання низки проблем теоретичного, технологічного та інженерного характеру. До таких проблем належить розробка мікрохвильових приладів з меншою вагою, оптимальними вихідними характеристиками, що є суттєвою вимогою в процесі розробки мікроелектромеханічних систем.

В останні роки значно зріс інтерес до дослідження нових підходів стосовно проектування мікроелектромеханічних систем. Це викликає необхідність вдосконалювати існуючі технології та розробляти нові прилади, які могли б відповідати зростаючим вимогам до якості сигналу, швидкості передавання, енергоефективності та надійності.

Однією з компонент досягнення таких вимог є використання у процесі розроблення приладів мікроелектроніки нового класу матеріалів, які отримали назву метаматеріали. У зв'язку з цим виникає потреба у глибокому міждисциплінарному і технологічному поєднанні зусиль для вирішення актуальних завдань у даній галузі, багато з яких ще не знайшли свого завершення. Тому дослідження метаструктур із паралельних провідників для систем провідного та безпровідного передавання електромагнітних сигналів є актуальною проблемою як в теоретичному, так і в інженерному відношенні.

Структура та зміст роботи

Дисертаційна робота складається з анотацій, вступу, чотирьох розділів, які містять 62 рисунки, висновків, списку використаних джерел із 180 найменувань та двох додатків. Загальний обсяг дисертації – 171 сторінка.

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 цінності, 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 метаматеріалів і структур паралельних провідників (СПП), як їх окремого класу. Встановлено, що СПП можуть використовуватися як ефективний інструмент реалізації довгих каналів зв'язку, включаючи півхвильові (суперлінзи) та оптично довгі (ендоскопи) структури, а також засобів для удосконалення систем живлення антен.

У **другому розділі** автором вперше запропоновано та досліджено можливість використання СПП як оптично довгого ендоскопа для передавання растрових зображень у широкому діапазоні частот, що реалізовано завдяки вдосконаленню моделі передавання енергії ЕМ хвиль окремими дискретними джерелами одночасно через паралельні комірки СПП. Електрично малі дипольні антени при цьому виступають джерелами ЕМ хвиль. Причому їхні резонансні частоти розташовані значно вище робочого діапазону досліджуваного СПП. Це дозволяє знехтувати взаємодією між сусідніми дипольними антенами та досягнути широко частотного узгодження імпедансів між антенами і СПП.

Проведено дослідження ефективності функціонування СПП як багатоканального хвилеводу у різних діапазонах частот. Крім того, для частот нижчого гігагерцового діапазону реалізовано експериментальну установку, яка демонструє ефективність передачі в термінах S-коефіцієнтів. Обчислювальні експерименти, проведені з використанням пакету CST Studio Suite, показали можливість ефективного використання запропонованого хвилеводу як у вищих діапазонах хвиль, включаючи терагерцовий, так і продемонстровано широкополосність такої лінії передачі. З отриманих результатів можна зробити висновок що запропоновані системи можна використовувати як багатоканальні хвилеводи радіочастотного діапазону, так і використовувати їх в медичній ендоскопії та спектроскопії суб-ТГц діапазону частот.

Також набув розвитку метод відновлення зображення на приймальній стороні системи, який полягає в оцифруванні зображення, яке детектувалося на приймальній стороні, шляхом застосування порогового значення. Метод базується на аналізі гістограми інтенсивностей пікселів зображення та максимізації міжкласової дисперсії.

Третій розділ присвячено дослідженню використання СПП для модифікації хвилеводу з метою його застосування в антенній техніці. Новизна результатів полягає в тому, що вперше запропоновано антену на основі СПП із контрольованими параметрами. Велику увагу приділено розвитку методу контролю резонансних частот СПП, що досягається зміною поперечних характеристик, а саме радіуса провідників та періоду їхнього розташування. Ця зміна призводить до зміни індуктивності кожного

окремого провідника СПП і ємності між сусідніми провідниками, що впливає на зміну загальної індуктивності і ємності СПП і в результаті змінює резонансну частоту Фабрі-Перо. Зміну цієї частоти встановлено як з допомогою числових розрахунків, так і експериментальних досліджень.

У **четвертому розділі** проведено динамічний контроль ЕМ характеристик СПП шляхом її механічної деформації, що відбувається за рахунок механічної зміни геометричних розмірів СПП, зокрема відстані між провідниками. Ця трансформація призводить до зміни ємності всієї структури, що, у свою чергу, дає можливість контролювати значення резонансних частот Фабрі-Перо.

Метою комп'ютерного моделювання було встановлення ієрархії власних мод і вивчення впливу кількості провідників, які формують масив СПП. Для діапазону частот 1.8-2.0 ГГц, який відповідав другому резонансу вибраних структур, джерело випромінювання було нерезонансним по всьому діапазону. Це дозволило досліджувати резонансні моди, здатні значно покращити узгодження.

Разом з тим було проведено експериментальні дослідження стискання СПП, які стосуються провідного детектування рівня стискання.

Для експериментального підтвердження можливості стискання СПП необхідно було вирішити низку технічних питань, зокрема, знайдено рішення стосовно вибору гнучкого діелектричного матеріалу, здатного розміщувати провідники, та конструювання тримачів для провідників, які забезпечують збереження сталої відстані між ними вздовж осі, яка не стискається. В основу діелектричного заповнення СПП вибрано еластичний поліпропилен, діелектрична проникність якого добре апроксимується значенням $\epsilon = 1$. Таке значення було підтверджене експериментально шляхом перевірки взаємодії дипольної антени та еластичного матеріалу в ближньому полі.

У ході експериментальних досліджень було отримано кольорові карти коефіцієнтів відбивання S_{11} , які демонструють широкі резонанси і не заважають точному визначенню резонансних частот. Проведено також дослідження характеристик ефективної площі розсіювання СПП резонатора шляхом безпровідного детектування рівня стискання.

Експериментальне підтвердження одного з результатів, отриманих під час комп'ютерного моделювання було проведено для частотного діапазону 2.0 – 12.0 ГГц при заданому значенні періоду розташування провідників. З цією метою розроблено експериментальну установку, що дозволила точно вимірювати ЕПР, яка складалася з векторного мережевого аналізатора з підключеною широкосмуговою передавально-приймальною рупорною антеною.

Висновки роботи чітко сформульовані; вони повною мірою висвітлюють результати, отримані в роботі. 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

Автором дисертації виконано аналіз комплексної проблеми комп'ютерної та практичної реалізації функціональних модулів систем провідного та безпровідного передавання ЕМ сигналів, проведено усестороннє теоретичне та практичне обґрунтування шляхів її вирішення. Основна увага зосереджена на використанні структур із паралельних провідників (СПП), що дозволяє покращити характеристики приймально-передавального тракту в широкому діапазоні частот, а також забезпечує можливість їх параметричної ідентифікації.

Обґрунтованість і достовірність наведених у дисертаційній роботі наукових результатів, висновків і рекомендацій досягається використанням комп'ютерних методів розв'язування задач розсіювання на ССП та ретельного системного аналізу фізичних процесів у сукупності таких систем з порівнянням результатів чисельного моделювання та експериментальних даних.

Новизна наукових положень дисертаційної роботи

У процесі дослідження ефектів поширення ЕМ випромінювання системами паралельних провідників, виходячи з поставленої мети роботи, автор отримав низку нових наукових та технічних результатів, серед яких, на мою думку, найважливішими є:

1. Запропоновано та експериментально підтверджено метод подання СПП у формі оптично довгого ендоскопа з метою передавання растрових зображень у широкому діапазоні частот, включаючи субтерагерцовий нижній діапазон частот, з використанням представлення СПП у вигляді елементарних комірок масиву хвилеводів, апертури яких можна розглядати як окремі пікселі.

2. Реалізацію СПП використано як хвилевід з метою його застосування в антенній техніці. Запропоновано антену на основі СПП із контрольованими параметрами. На основі проведених досліджень набув подальшого розвитку метод контролю резонансних частот СПП шляхом зміни радіуса провідників та періоду їхнього розташування. У результаті комп'ютерного моделювання показано, що значення резонансів Фабрі-Перо вздовж частотної осі може змінюватися суттєво в гігігерцовому діапазоні частот.

3. Дослідження власних мод розглянутої СПП показало можливість детектування ступеня стискання СПП з великою точністю порядку декількох тисячних довжини хвилі, що реалізовано за допомогою простого математичного алгоритму постобробки сигналу.

Практичне значення одержаних результатів

Практичне значення отриманих результатів наступне:

1. Розроблено багатоканальний хвилевід на основі СПП, здатний одночасно передавати ЕМ хвилі від дискретних джерел. Передача здійснюється по паралельних

комірках СПП із роздільною здатністю часток довжини хвилі.

2. Розроблено модель оптично довгого ендоскопа на основі СПП у субтерагерцовому діапазоні частот, яка може використовуватися для медичної ендоскопії та спектроскопії.

3. Розроблено хвилевідну антенну конструкцію зі змінними та керованими частотними характеристиками на основі модифікації хвилеводного порту шляхом вмонтування в його апертуру СПП. Антену протестовано в безеховій камері, сертифікованій для вимірювань у мікрохвильовому діапазоні частот від 1 ГГц до 30 ГГц. Антена може бути модифікована для інших діапазонів частот та адаптована до вимог сучасних систем безпроводного зв'язку.

Основні результати роботи опубліковано у 15 наукових працях, з них 3 опубліковано в міжнародних наукових журналах кватилів Q1 – Q3, 2 публікації у фахових виданнях України, 6 публікацій є матеріалами міжнародних наукових конференцій, цитованих у Scopus та 4 публікації у матеріалах інших конференцій.

Апробація результатів дисертаційної роботи.

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

- 2018 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo);
- 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET);
- 2022 Sixteenth International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials);
- 2024 Eighteenth International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials).

Зауваження

1. На мій погляд, не зовсім вдалою є назва дисертаційної роботи, оскільки поняття метаструктури (метаматеріалу) відноситься до об'єктів, які мають компоненти з різними фізичними властивостями. Якщо розглядати СПП, які досліджуються в роботі, то з точки зору функціональних характеристик, їх можна розглядати як метаструктури, однак з точки зору технічної реалізації це не зовсім коректно.

2. Постановку задачі поширення ЕМ хвиль у структурі СПП сформульовано на описовому рівні з посиланням на джерела, які стосуються технічних та технологічних аспектів. Для кращого розуміння проблематики роботи, на мій погляд, варто було сформулювати електродинамічну постановку задачі і навести результати числового моделювання, які б мали узгоджуватися з результатами моделювання в середовищі CST Studio Suite.

3. В процесі проведення експерименту визначення резонансів Фабрі-Перо елементарної комірки не визначено умови, які визначають чистоту експерименту. Резонанси чітко виділені, але не зрозуміло, в яких умовах проходив експеримент, чи необхідно було використовувати безехову камеру? Крім того, вказано, що на рис. 3б наведено експериментальні дані, але як видно з поведінки наведених кривих, вони більше відповідають результатам комп'ютерного моделювання.

4. В розділі 3, де проводиться дослідження СПП як хвилеводу для застосування в системі вузькосмугового передавання енергії ЕМ хвиль шляхом зміни геометричних розмірів СПП, не вказано які співвідношення необхідно встановлювати на період системи і радіус провідників, щоб взаємовплив окремих провідників не впливав суттєво на процес поширення ЕМ хвиль.

5. На рис. 4.15 (стор. 136) показано порівняння значень ефективного поперечника розсіювання, отриманих під час експериментів та комп'ютерного моделювання, при фіксованих значеннях періоду розташування провідників. Однак, дві криві наведено суцільною лінією; це не зовсім коректно, оскільки зрозуміло, що експериментальні дані отримано для дискретних значень частот.

Підсумовуючи, слід зазначити, що наведені вище зауваження щодо недоліків дисертації не впливають на високий рівень отриманих результатів; не зменшують наукової новизни та практичної цінності дисертаційної роботи, не знижують загальної позитивної оцінки проведеного дослідження.

Висновок

Дисертаційна робота «Метаструктури із паралельних провідників для систем провідного та безпровідного передавання електромагнітних сигналів» на здобуття вченого ступеня доктора філософії, автором якої є Хобзей Микола Михайлович, написана сучасною науково-технічною мовою, послідовно, логічно та грамотно; виклад проілюстровано великою кількістю графічного матеріалу. Стиль викладу матеріалу забезпечує доступність його сприйняття. Дисертація за змістом є завершеним науковим дослідженням, що містить нові науково обґрунтовані результати, присвячені розробленню та практичній реалізації функціональних модулів систем провідного та безпровідного передавання електромагнітних (ЕМ) сигналів, і відповідає напрямам досліджень за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка.

Наукова новизна дисертації є безсумнівною, оскільки результати дослідження опубліковані в трьох статтях у журналах, які належать до квантилів Q1 – Q3. 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 Хобзей Микола Михайлович 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.

Підпис *М. Андрійчук*
з а с в і д ч ю
Вчений секретар ІППММ
ім. Я.С.Підстригача НАНУ
О. Кравчишин

