

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора,
професора кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем
Вінницького національного технічного університету

Семенова Андрія Олександровича

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

Актуальність теми дисертації.

Стрімкий розвиток інформаційно-комунікаційних технологій та глобальне зростання обсягів інформаційного трафіку формують нові вимоги до сучасних засобів передавання і оброблення даних. Зокрема, актуальним є створення ефективних та дешевих радіотехнічних і телекомунікаційних систем, здатних забезпечити стабільну передачу великих обсягів інформації у широкому частотному діапазоні. У зв'язку з цим особливої значущості набувають нові підходи до реалізації пристроїв передавання сигналів, засновані на використанні штучно створених середовищ – метаматеріалів. Метаматеріали в сучасних дослідженнях демонструють унікальні можливості для створення пристроїв формування, передавання, приймання та фільтрації електромагнітних хвиль. Одним із перспективних представників метаматеріалів є структури з паралельних провідників, які забезпечують можливість реалізувати як провідне, так і безпроводне передавання електромагнітних хвиль у широкому діапазоні частот. Сукупність цих факторів зумовлює активні дослідження у напрямку застосування структур з паралельних провідників для створення радіотехнічних пристроїв і засобів телекомунікацій. Йдеться, зокрема, про хвилеводи, мікрохвильові ендоскопи, антени, резонансні структури та інші функціональні модулі.

Таким чином, тема дисертаційної роботи Хобзея Миколи Михайловича «Метаструктури із паралельних провідників для систем провідного та безпроводного передавання електромагнітних сигналів» є безперечно актуальною. За сукупністю отриманих результатів, рівнем їхньої теоретичної і практичної значущості в роботі вирішено важливе науково-прикладне

завдання – розроблення та практична реалізація функціональних модулів систем провідного та безпроводного передавання електромагнітних сигналів шляхом використання структур із паралельних провідників, що дозволяє покращити характеристики приймально-передавального тракту в широкому діапазоні частот з можливістю їх параметричної ідентифікації.

Оцінка змісту та завершеності дисертації.

Наукові положення, висновки та рекомендації, викладені в дисертаційній роботі, є належним чином обґрунтованими і в більшості випадків підтверджуються результатами експериментальних досліджень.

У **вступі** обґрунтовано актуальність дослідження, сформульовано мету, завдання, об'єкт і предмет роботи, показано зв'язок із науковими програмами, планами, темами, охарактеризовано структуру дослідження та наведено дані щодо публікацій та апробації результатів.

У **першому розділі** проведено аналіз сучасних літературних джерел, присвячених різним типам структур із провідників – структур із паралельних провідників, суперлінз, гіперлінз і випадкових масивів. Розглянуто їх застосування для передавання електромагнітних хвиль у широкому частотному діапазоні – від суб-ГГц до інфрачервоного. Визначено переваги структур із паралельних провідників, зокрема їх здатність функціонувати не лише на резонансах Фабрі-Перо, а й у широкому частотному спектрі, що робить ці структури перспективними для подальших досліджень.

Другий розділ присвячено розробці хвилеводів на основі структури із паралельних провідників, що реалізують оптично довгі ендоскопи. Проведено комп'ютерні моделювання та експерименти з передавання растрових зображень у частотних діапазонах 0,3-1 ГГц, 1-4 ГГц та 0,1-1 ТГц. Розраховано спектр бітових помилок, що підтвердило ефективність розробленої структури як багатоканального хвилеводу для систем зв'язку та ендоскопії. Показано, що при відношенні сигнал/шум 15-20 дБ зображення передаються з високою точністю.

У **третьому розділі** досліджено вплив конструктивних параметрів – радіуса провідників і відстані між провідниками – на частотні характеристики. Показано, що зміна радіусу зумовлює зсув резонансів Фабрі-Перо на 40 МГц. Експериментально реалізовано дві конфігурації антен на основі структур із паралельних провідників (17 на 7 і 27 на 13 провідників) із

різними коефіцієнтами заповнення металом, що дозволило варіювати ширину смуги пропускання в межах 40-80 МГц.

Четвертий розділ присвячено динамічному керуванню резонансними характеристиками структур із паралельних провідників шляхом механічної деформації (стискання/розтягнення). Розроблено експериментальний макет на основі гнучкого діелектрика, що дозволяє реалізувати такі деформації. За результатами комп'ютерного моделювання та експериментів (для оптимальної структури 4 на 4) продемонстровано можливість точного виявлення деформацій із роздільною здатністю 0,002λ. Середньоквадратичні відхилення при деформації становили 0,84 % (по осі X) та 0,5 % (по осі Y). Підтверджено можливість дистанційного контролю деформації структури шляхом аналізу ефективної площі розсіювання.

Завершується робота загальними **висновками**, у яких узагальнено основні положення дисертаційного дослідження, подано **список використаних джерел**, а також **додатки**.

Виходячи з аналізу основного змісту дисертації, можна стверджувати, що вона є завершеною науковою кваліфікаційною роботою, у якій автор успішно розв'язав поставлені завдання та досяг сформульованої мети дослідження.

Достовірність та новизна наукових положень.

Достовірність результатів, отриманих у дисертаційній роботі, ґрунтується на порівнянні даних, здобутих різними методами дослідження: теоретичними розрахунками, комп'ютерним моделюванням та експериментами. Високий ступінь узгодженості між результатами теоретичного аналізу, моделювання із застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення CST Studio Suite та результатами фізичних вимірювань, проведених на високоточному обладнанні в безехових камерах, підтверджує обґрунтованість продемонстрованих результатів досліджень, а також правильність розроблених комп'ютерних моделей і експериментальних макетів. Відповідно, це дає всі підстави вважати отримані результати науково обґрунтованими та відтворюваними, що уможливорює їх подальше застосування в практичних розробках.

Результати наукової новизни дисертації є такими:

1. Вперше запропоновано та експериментально підтверджено методику представлення структури з паралельних провідників у вигляді оптично довгого ендоскопа для передавання растрових зображень у широкому суб-ГГц/ГГц (0,3-

4 ГГц) та суб-ТГц (0,1-1 ТГц) діапазонах частот шляхом дискретизації структури з паралельних провідників на елементарні комірки масиву хвилеводів, апертури яких можна розглядати як окремі пікселі розмірами $2a$ на $2a$, де a – відстань між провідниками. Це уможливило досягнення роздільної здатності менше ніж $0,26\lambda$ для суб-ТГц/ТГц діапазону частот та менше ніж $0,13\lambda$ для суб-ТГц діапазону частот при передаванні енергії електромагнітних коливань від окремих незалежних джерел.

2. Набув подальшого розвитку та експериментально підтверджено метод відновлення зображення на приймальній стороні структури з паралельних провідників, який полягає в оцифруванні зображення, що детектувалося на приймальній апертурі, шляхом застосування порогового значення, автоматично визначеного за допомогою методу Оцу. Ефективність методу перевірена шляхом оцінювання помилково відновлених бітів растрового зображення на основі розрахунку спектру значень коефіцієнта бітових помилок та доведено ефективну сталість відновлення при значеннях відношення сигнал/шум більше ніж 20 дБ.

3. Вперше запропоновано та експериментально підтверджено метод контролю значень частот резонансів Фабрі-Перо (від 1,138 ГГц до 1,178 ГГц) та їх частотної смуги (від 40 МГц до 80 МГц) шляхом зміни радіусу провідників структури з паралельних провідників та періоду їх розташування, при цьому значення коефіцієнта заповнення металом змінювались у діапазоні від $3,14 \times 10^{-6}$ до $3,14 \times 10^{-2}$, що дало змогу розробити антену, здатну знайти своє застосування у сучасних системах безпроводного зв'язку, таких як LTE, LTE-A, 5G, а також у радарних технологіях, де зазвичай вимагається 5-10 % смуги робочих частот від значення носійної частоти.

4. Вперше запропоновано та експериментально підтверджено метод модуляції електромагнітних параметрів структури з паралельних провідників шляхом зміни відстані між провідниками структури, а отже, зміни ємності структури в цілому та, як результат, контролю значення резонансів Фабрі-Перо. Це уможливило оцінювання величини лінійної деформації стиснення/розтягнення експериментально дослідженої структури з паралельних провідників з точністю $0,002\lambda$, що є рекордною роздільною здатністю для таких систем на даний момент.

5. Набув подальшого розвитку та експериментально підтверджено метод віддаленого контролю лінійної деформації структури з паралельних провідників з використанням радарних систем, що уможливлює оцінювання величини

стиснення/розтягнення шляхом визначення ефективної площі розсіювання в діапазоні частот 0,8-12 ГГц.

Важливість отриманих результатів для науки і практики, можливі шляхи використання результатів дослідження.

Отримані в дисертаційній роботі наукові результати становлять важливу теоретичну та практичну складову для проєктування сучасних радіотехнічних і телекомунікаційних пристроїв провідного та безпроводного передавання електромагнітних сигналів у широкому частотному діапазоні. Зазначені пристрої можуть бути реалізовані з використанням провідникових метаструктур, досліджених і обґрунтованих автором.

Практичне значення одержаних результатів у дисертаційній роботі Хобзеєм М. М. полягає в наступному:

1. Розроблено багатоканальний хвилевід на основі структури з паралельних провідників (довжина становить $5,3\lambda$ на частоті 4 ГГц), здатний одночасно передавати електромагнітні хвилі від дискретних джерел. Такими джерелами були електрично малі ($< 0,12\lambda$ для діапазону частот 0,3-4 ГГц) дипольні антени. Передача здійснюється по паралельних комірках структури з паралельних провідників із роздільною здатністю $0,26\lambda$ і менше.

2. Розроблено модель оптично довгого ендоскопа на основі структури з паралельних провідників у суб-ТГц діапазоні частот із розмірами 0,58 мм завтовшки та 2 мм завдовжки ($6,6\lambda$ на частоті 1 ТГц). Розробка є перспективною для медичної ендоскопії та спектроскопії, зокрема для передавання растрових зображень, детектування чужорідних клітин у крові пацієнта та розрізнення бактерій різного роду. Досягнуто роздільну здатність $0,13\lambda$ і менше.

3. Розроблено антенну конструкцію зі змінними та керованими частотними характеристиками на основі модифікації хвилеводного порту шляхом вмонтування в його апертуру структури з паралельних провідників. Антену протестовано в безеховій камері університету Аалто (м. Еспоо, Фінляндія), сертифікованій для вимірювань у мікрохвильовому діапазоні частот від 1 ГГц до 30 ГГц. Дослідження показали, що антена ефективно працює в діапазоні частот $\sim 1,138$ - $1,178$ ГГц із робочою смугою до 80 МГц. Водночас вона може бути легко модифікована для інших діапазонів частот та адаптована до вимог сучасних систем безпроводного зв'язку, зокрема LTE, LTE-A, 5G, а також радарних технологій S-, C- та X-діапазонів частот.

4. Розроблено СПП-резонатор, здатний динамічно змінювати свої геометричні параметри, що дозволяє керувати значеннями резонансів Фабрі-Перо. Така структура може бути використана як у розробленні адаптивних антенних систем, так і для створення високоточних сенсорних технологій, зокрема враховуючи високу точність, що становить $0,002\lambda$, у діапазоні частот 1-12 ГГц. Ефективність роботи цієї структури була протестована в безеховій камері університету Тель-Авіва (м. Тель-Авів, Ізраїль), сертифікованій для вимірювань у мікрохвильовому діапазоні частот від 1 ГГц до 20 ГГц.

Методи досліджень, які використані в дисертаційній роботі.

У процесі виконання дисертаційної роботи Хобзей М. М. застосував сучасні програмні та експериментальні методи досліджень, що уможливили забезпечити високий рівень достовірності отриманих результатів. Зокрема, для моделювання електромагнітних процесів у запропонованих структурах із паралельних провідників використовувалося середовище CST Studio Suite, яке забезпечує точне чисельне розв'язання рівнянь Максвелла як у часовій, так і у частотній області. Це дало змогу всебічно дослідити характеристики та параметри поширення електромагнітного поля в межах досліджуваних метаструктур. Для математичної обробки результатів та чисельного аналізу отриманих сигналів застосовувалися програмні пакети Matlab & Simulink, які надали широкі можливості для обробки даних, зокрема із використанням алгоритмів швидкого перетворення Фур'є.

Теоретична частина дослідження заснована на класичних положеннях електродинаміки, а також на сучасних підходах до опису поширення хвиль у штучних середовищах. Експериментальна перевірка результатів здійснювалась із використанням безехових мікрохвильових камер та високоточного вимірювального обладнання, що дозволило визначити параметри, такі як коефіцієнти відбивання й проходження, ефективну площу розсіювання, а також побудувати діаграми спрямованості. Використання якісної вимірювальної бази забезпечило високу точність експериментальних даних та їх відтворюваність.

Зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дослідження, які представлені в дисертаційній роботі виконувалися в рамках таких науково-технічних проєктів та науково-дослідних робіт:

1. Науково-дослідна робота кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки «Методи формування сигнальних конструкцій та інформаційні процеси програмно-апаратної взаємодії широкосмугових телекомунікаційних систем та Інтернету речей» (Держ. реєстр. №0121U112870, 2021-2025 рр.).

2. Науково-дослідна робота за грантом Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича для молодих вчених «Розроблення багатоканального хвилеводу на основі метаструктури із паралельних провідників з можливістю передавання растрових зображень у широкому діапазоні частот» (наказ ректора від 15.09.2021 р. №298 «Про результати конкурсу грантів ЧНУ для молодих науковців», 2021 р.).

3. Проєкт науково-технічної (експериментальної) розробки молодих вчених «Портативний комплекс для наземного аерозондування вибухових закладок», (Держ. реєстр. №0123U100679, 2023-2025 рр.).

4. Проєкт науково-технічної (експериментальної) розробки молодих вчених «Розроблення апаратно-програмних засобів виявлення вибухових та наркотичних речовин на основі методу ядерного квадрупольного резонансу», (Держ. реєстр. №0120U101249, 2020- 2022 рр.).

5. Науково-дослідна робота за грантом Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича для молодих вчених «Керований в часі просторовий фільтр електромагнітних хвиль на основі кодованої метаповерхні», (наказ ректора від 31.10.2022 р. №301 «Про результати конкурсу грантів ЧНУ для молодих науковців», 2022 р.).

6. Науково-дослідна робота «Розробка комп'ютерних моделей планарних антен Уда-Ягі для бездротових систем зв'язку» (замовник – ПП «АРТОН», договір №18.000, 2024 р.).

Публікація та апробація результатів дисертаційної роботи.

Усі основні положення та найважливіші результати дисертаційної роботи, винесені на захист, опубліковані у достатньому обсязі – у 15 наукових публікаціях, серед яких: 3 статті – у міжнародних виданнях, що індексуються в наукометричній базі Scopus; 2 статті – у наукових фахових виданнях України; 1 стаття – у провідному зарубіжному журналі. Крім того, результати дослідження представлені у 9 тезах доповідей на міжнародних наукових конференціях, з яких 5 індексовані в наукометричній базі Scopus.

Основні результати дисертації були також предметом обговорення на 6 українських і міжнародних наукових семінарах, а також на 14 міжнародних конференціях та форумах із різними формами участі, що свідчить про належну апробацію отриманих дослідження.

Відповідність дисертації встановленим вимогам.

Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 171 сторінку друкованого тексту, вона містить 62 рисунки, список використаних джерел із 180 найменувань, а також додатки. Зміст дисертації повністю відповідає спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка». Стиль викладення матеріалу є послідовним, науково виваженим і водночас доступним для сприйняття, що забезпечує зрозуміле подання результатів дослідження.

Дисертаційна робота Хобзея М. М. відповідає вимогам до оформлення дисертацій, 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. Потребує детального пояснення термін «плазмова частота», який автор використав після формули (1.1) як опис змінної ω_p на стор. 38. Також потребує додаткового пояснення термін «магнітна плазмова частота» який автор використав після формули (1.2) на сторінці 39.

2. У Висновках до розділу 2 на стор. 99 зазначено, що «Джерелами ЕМ хвиль виступали електрично малі дипольні антени ...» Електрично малі дипольні антени, це є несиметричні дипольні антени, довжина плеча яких менша чверті робочої хвилі. У п. 2.1 для дослідження елементарної комірки СПП автор використав півхвильову симетричну дипольну антену.

3. Назва п.п. 3.2 і 3.3 дисертаційної роботи має спільну фразу «Контроль частотними характеристиками». У зазначених підрозділах відсутня інформація що є об'єктом контролю. Можливо здобувач мав на увазі «Керування частотними характеристиками»?

4. На рисунку 2.2(б) показаний графік частотної залежності коефіцієнта відбивання S_{11} елементарної комірки структури з паралельних провідників у діапазоні частот 1,0-2,0 ГГц при збудженні електромагнітної хвилі дипольною антеною. Чисельні значення коефіцієнта відбивання S_{11} на частоті 0,935 ГГц

становить біля 1,0 дБ та на частот 1,865 ГГц становить біля 1,35 дБ. В абзаці над рисунком 2.2 (стор. 71) сказано: «Отримані коефіцієнти S_{11} показують, що досліджувана ЕК характеризується узгодження імпедансів із вмонтованою дипольною антеною на частотах резонансу Фабрі-Перо ...» Потребує додаткового пояснення чи достатньо узгоджена елементарна комірка із вмонтованою дипольною антеною при вказаних чисельних значеннях коефіцієнта відбивання.

5. На рисунку 2.13(б) показаний графік частотних характеристик коефіцієнта відбивання комп'ютерної моделі структури з паралельних провідників суб-ТГц розмірів. На цьому графіку видно 12 резонансів у діапазоні частот від 0,1 ТГц до 1,0 ТГц із значеннями коефіцієнта відбивання S_{11} у діапазоні 0,02 дБ до 0,22 дБ. Які значення коефіцієнта стоячої хвилі їм відповідають? Чи будуть істотно розрізнятися вказані резонансні частоти засобами вимірювальної техніки при такій малій різниці абсолютної величини S_{11} ?

6. Не дотримана єдина термінології по тексту дисертації. Наприклад, на стор. 37 у першому реченні п.п. 1.1.1. написано «діелектрична проникність стає негативною ...», а в наступному реченні написано «від'ємна діелектрична проникність ...»

7. Рисунок 1.4, що відображений на сторінках 40-41, розміщений до його згадування в тексті. Аналогічне зауваження до розміщення рисунка 2.5 на стор. 78-79.

Зазначені зауваження не є визначальними і не ставлять під сумнів наукову новизну та практичну значимість результатів, а також не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновки.

1. Дисертаційна робота Хобзея Миколи Михайловича на тему: «Метаструктури із паралельних провідників для систем провідного та безпровідного передавання електромагнітних сигналів» є завершеним науково-дослідним дослідженням, яке містить нові науково обґрунтовані результати. У сукупності вони вирішують важливе науково-прикладне завдання, що полягає у розробленні та практичній реалізації функціональних модулів систем провідного та безпровідного передавання електромагнітних сигналів шляхом використання структур із паралельних провідників.

2. Отримані Хобзеєм М. М. у дисертаційній роботі наукові та практичні результати є значущими для галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації». Тема і зміст дисертації повністю відповідають спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

3. За науковим рівнем, практичною цінністю, апробацією та публікаціями, повнотою висновків і рекомендацій, дисертаційна робота 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 Кабінету Міністрів України № 44 від 12.01.2022 р. (зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМУ № 341 від 21.03.2022 р., № 502 від 19.05.2023 р., № 507 від 03.05.2024 р.), а її автор Хобзей Микола Михайлович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації» за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Офіційний опонент,
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри інформаційних
радіоелектронних технологій і систем
Вінницького національного
технічного університету

Андрій СЕМЕНОВ

03 червня 2025 року

Підпис професора Андрія СЕМЕНОВА

ЗАСВІДЧУЮ

Учений секретар
Вченої ради ВНТУ
к. т. н., доцент, доцент кафедри
безпеки життєдіяльності та
педагогіки безпеки



Інна ВІШТАК