

АНОТАЦІЯ

Хобзей М. М. Метаструктури із паралельних провідників для систем провідного та безпроводного передавання електромагнітних сигналів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка. – Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці, 2025.

Дисертаційна робота присвячена розробленню та практичній реалізації функціональних модулів систем провідного та безпроводного передавання електромагнітних (ЕМ) сигналів. 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.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання проведених досліджень, визначено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, представлені методи, об'єкт і предмет досліджень, зазначено особистий внесок здобувача, а також наведено дані щодо публікацій за темою дисертації.

У **першому розділі** здійснено аналіз літературних джерел, присвячених дослідженню структур із провідників різних типів – СПП, суперлінз, структур із провідників, що розходяться (гіперлінз), та структур із випадковим розміщенням провідників. Проведено детальний аналіз ряду їх застосувань, включаючи пристрої передавання енергії ЕМ хвиль, джерелами яких є як точкові джерела так і цілі зображення, як через прямі чи каскадні структури – хвилеводи, так і вигнуті – ендоскопи; пристрої термофотовольтаїки; антени, тощо. Вивчено можливості виготовлення провідникових структур для їх використання в різних діапазонах частот, що включають діапазони від суб-ГГц та аж до інфрачервоного діапазону частот. Виявлено складність у реалізації структури із провідників, що розходяться, та структури з випадковим

розміщенням провідників. Це безпосередньо відбивається на їх можливих застосуваннях, тоді як останні дослідження СПП продемонстрували значний прогрес та можливість функціонування не лише на частотах резонансів Фабрі-Перо, а й у широкому діапазоні частот. З урахуванням цього сформульовано основні висновки щодо актуальної проблематики досліджень СПП.

Другий розділ присвячено розробленню хвилеводу (ендоскопа) на основі СПП (ЕСПП) для можливості передавання ЕМ хвиль, які випромінюються окремими дискретними джерелами, одночасно по паралельних каналах оптично довгої СПП. Для цього розглянуто можливість передавання через один окремий канал – елементарну комірку (ЕК). Остання складається із чотирьох провідників, які у поперечному перерізі формують квадрат розмірністю a на a (a – відстань між провідниками), в діапазоні частот 0,5-2 ГГц (два перші резонанси Фабрі-Перо). Результати досліджень продемонстрували можливість функціонування такого хвилеводу між резонансами Фабрі-Перо. Таким чином, була розроблена модель СПП розмірністю 10 на 10 металевих провідників, на основі якої досліджено коефіцієнти проходження S_{21} через кожен ЕК. Як наслідок, було визначено можливу роздільну здатність у поперечному перерізі СПП із можливістю подальшого передавання растрових зображень, сформованих масивом дискретних джерел ЕМ хвиль (електрично малих дипольних випромінювачів). Здійснено передавання растрових зображень різної форми (латинські літери R, N та Y) у частотних діапазонах – суб-ГГц (0,3-1 ГГц), ГГц (1-4 ГГц) та суб-ТГц (0,1-1 ТГц) з метою використання таких ЕСПП як багатоканальних хвилеводів радіочастотного діапазону та для медичної ендоскопії і спектроскопії суб-ТГц діапазону. Проведено оцінку помилково відновлених бітів растрового зображення, що передається через оптично довгий ендоскоп на основі СПП шляхом розрахунку спектру значень коефіцієнтів бітових помилок, що засвідчило ефективність роботи при значеннях відношення сигнал/шум 15-20 дБ.

Наукова новизна результатів, отриманих у другому розділі, полягає у тому що:

- ***Вперше*** запропоновано та експериментально підтверджено методику представлення СПП 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 СПП на ЕК 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-ГГц/ГГц діапазону частот та менше ніж $0,13\lambda$ для суб-ТГц діапазону частот при передаванні енергії ЕМ коливань від окремих незалежних джерел;
- ***Набув подальшого розвитку*** та експериментально підтверджено метод відновлення зображення на приймальній стороні СПП, 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.

У **третьому розділі** вивчався вплив конструктивних параметрів СПП на її ЕМ характеристики на основі зміни радіусу провідників та відстані між ними. Досліджувались коефіцієнти відбивання S_{11} хвилеводного порту модифікованого СПП. Продемонстровано, що положення резонансів Фабрі-Перо, вздовж частотної осі, може змінюватися від 1,138 ГГц до 1,178 ГГц (зсув на 40 МГц) при зміні радіусу провідників від 0,01 мм до 1 мм. Це відповідає значенню коефіцієнту заповнення металом від $3,14 \times 10^{-6}$ до $3,14 \times 10^{-2}$ для фіксованого значення періоду розміщення провідників $a = 10$ мм. Якщо ж коефіцієнт заповнення металом регулюється шляхом зміни

значення періоду розміщення провідників, то відбувається зміна ширини смуги робочих частот. Підтвердженням цього слугують порівняння двох експериментально реалізованих СПП розмірністю: 17 на 7 (провідники діаметром $2r = 1,5$ мм та з періодом розташування $a = 6$ мм) та 27 на 13 (провідники діаметром $2r = 1$ мм та з періодом розташування $a = 10$ мм) металевих провідників, коефіцієнти заповнення металом яких відповідно становили 0,049 та 0,00785. Цей підхід дозволив керувати смугою робочих частот в діапазоні від 40 МГц до 80 МГц, що може задовільнити вимоги сучасних систем 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.

Наукова новизна результатів, отриманих у третьому розділі, полягає у тому що:

- *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 СПП 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.

Четвертий розділ присвячено динамічному контролю ЕМ характеристик СПП з метою їх подальшого застосування у вимірювальних системах: а) через модифікацію точкового джерела ЕМ хвиль – детектування в зоні сильної близько-польової взаємодії; б) через оцінювання ефективної площі розсіювання (ЕПР) – детектування в зоні далеко-польової взаємодії. Шляхом імітаційного (комп'ютерного) моделювання здійснено аналіз власних мод та коефіцієнту добротності в залежності від рівня стискання/розтягнення

СПП по осі x та y для СПП розмірністю m на n , де $m = n = [2:2:6]$. Визначено, що оптимальною є розмірність 4 на 4. Розроблення експериментального макета дозволило вирішити актуальне питання реалізації структур такого типу, що дозволяють стискання/розтягнення: а) вибір гнучкого діелектричного матеріалу, здатного розміщувати провідники ($\epsilon \approx 1$), та б) конструювання тримачів для провідників, спроможних забезпечувати збереження сталої відстані між ними вздовж осі, яка не стискається. Як результат експериментальних досліджень, отримано можливість детектування рівня стискання/розтягнення із роздільною здатністю $0,002\lambda$ при середньому значенні середньоквадратичного відхилення для стискання вздовж осей x та y , що у свою чергу склали 0,84 % і 0,5 % відповідно, що наразі є рекордними показниками. Результати імітаційного моделювання та експериментальних досліджень підтвердили можливість віддаленого детектування рівня стискання/розтягнення СПП на основі визначення значень ЕПР.

Наукова новизна результатів, отриманих у четвертому розділі, полягає у тому що:

- ***Вперше*** запропоновано та експериментально підтверджено метод модуляції ЕМ параметрів СПП 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 дослідженого СПП з точністю $0,002\lambda$, що є рекордною роздільною здатністю для таких систем на даний момент;
- ***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.

При виконанні дисертаційної роботи отримано наступні практичні результати:

- Розроблено багатоканальний хвилевід на основі СПП (довжина становить $5,3\lambda$ на частоті 4 ГГц), здатний одночасно передавати ЕМ 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 СПП із роздільною здатністю $0,26\lambda$ і менше;
- Розроблено модель оптично довгого ендоскопа на основі СПП 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;
- Розроблено антенну конструкцію зі змінними та керованими частотними характеристиками на основі модифікації хвелеводного порту шляхом вмонтування в його апертуру СПП. 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;
- 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.

Ключові слова: метаматеріали, структури з паралельних провідників, поляризація, інтерференція, електромагнітна хвиля, випромінювання, випромінювання електромагнітного спектру хвиль, оптична анізотропія, розсіювання (об'єкт розсіювання), ефективна площа розсіювання, діаграма спрямованості, візуалізація (біомедична візуалізація), передавально-приймальна антена (резонансна антена), коефіцієнти відбивання і проходження, результати моделювання.

ABSTRACT

Khobzei M. M. Wire media for wired and wireless electromagnetic signal transfer – Qualifying scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 172 – Telecommunications and Radio Engineering. – Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, 2025.

The dissertation is devoted to the development and practical implementation of functional modules for systems of wired and wireless transmission of electromagnetic (EM) signals. The main focus is on the use of wire media (WM), which allows improving the characteristics of transmit-receive path in a wide frequency range, and also provides the possibility of their parametric identification.

The **Introduction** substantiates the relevance of the dissertation topic, formulates the purpose and objectives of the research, determines the scientific novelty and practical significance of the results obtained, presents the methods, object and subject of research, indicates the personal contribution of the applicant, and also provides data about publications on the topic of the dissertation.

The **first section** analyzes literary sources devoted to the study of structures made of different types of wires – WM, superlenses, structures made of diverging wires (hyperlenses), and structures with random location of wires. A detailed analysis of a number of their applications has been carried out, including devices for transmitting EM wave energy, the sources of which are both point sources and entire images, both through straight or cascade structures - waveguides, and curved ones - endoscopes; thermophotovoltaic devices; antennas, etc. The possibilities of manufacturing WM structures for their use in various frequency ranges, including ranges from sub-GHz up to the infrared frequency range, have been studied. The complexity of implementing the structure of diverging wires and the structure with random location of wires was revealed. This directly affects their possible applications, whereas recent studies of WM have demonstrated significant progress and the possibility of functioning not only at the Fabry-Perot resonance frequencies, but also in a wide frequency range. Taking this into account, the main conclusions on the current problems of WM research are formulated.

The second section is devoted to the development of a waveguide (endoscope) based on WM (EWM) to enable the transmission of EM waves emitted by separate discrete sources simultaneously through parallel channels of an optically long WM. For this purpose, the possibility of transmission through one separate channel – a unit cell (UC) – was considered. The latter consists of four wires, which in cross-section form a square with dimensions a by a , in the frequency range 0.5-2 GHz (the first two Fabry-Perot resonances). The results of the studies showed the possibility of functioning of such a waveguide between the Fabry-Perot resonances. Thus, a model of the WM with dimensions of 10 by 10 metal wires was developed, on the basis of which the transmission coefficients S_{21} through each UC were investigated. As a result, the possible resolution in the cross-section of the WM was determined with the possibility of further transmission of raster images formed by an array of discrete sources of EM waves (electrically small dipole emitters). The transmission of raster images of various shapes (Latin letters R, N and Y) in the frequency ranges of sub-GHz (0.3-1 GHz), GHz (1-4 GHz) and sub-THz

(0.1-1 THz) was carried out with the aim of using such endoscopes based on WM as multi-channel waveguides of the radio frequency range and for medical endoscopy and spectroscopy of the sub-THz range. An evaluation of erroneously restored bits of a raster image transmitted through an optically long endoscope based on a WM was carried out by calculating the spectrum of values of bit error rates, which confirmed the efficiency of operation at signal-to-noise ratio values of 15-20 dB.

The scientific novelty of the results obtained in the second section lies in the fact that:

- **For the first time**, a method for representing the WM in the form of an optically long endoscope for transmitting raster images in a wide sub-GHz/GHz (0.3-4 GHz) and sub-THz (0.1-1 THz) frequency ranges by discretizing the WM on the UC of an array of waveguides, the apertures of which can be considered as individual pixels with dimensions $2a$ by $2a$, where a is wire spacing, has been proposed and experimentally confirmed. This made it possible to achieve a resolution of less than 0.26λ for the sub-GHz/GHz frequency range and less than 0.13λ for the sub-THz frequency range when transmitting EM oscillation energy from separate independent sources;
- The method of image restoration on the receiving side of the WM *was further developed* and experimentally confirmed, which consists in digitizing the image detected at the receiving aperture by applying a threshold value automatically determined using the Otsu method. The effectiveness of the method was verified by evaluating erroneously restored bits of a raster image based on calculating the spectrum of bit error rate values, and the effective stability of restoration was proven at signal-to-noise ratio values greater than 20 dB.

In **the third section**, the influence of the design parameters of the WM on its EM characteristics was studied based on changing the radius of the wires and their spacing. The reflection coefficients S_{11} of the waveguide port of the modified WM were studied. It is demonstrated that the position of the Fabry-Perot resonances,

along the frequency axis, can vary from 1.138 GHz to 1.178 GHz (a shift of 40 MHz) when the radius of the wires changes from 0.01 mm to 1 mm. This corresponds to a metal filling factor value of 3.14×10^{-6} to 3.14×10^{-2} for a fixed value of the wire spacing $a = 10$ mm. If the metal filling factor is adjusted by changing the value of the wire spacing, then the width of the operating frequency band changes. This is confirmed by a comparison of two experimentally implemented WM with dimensions: 17 by 7 (wires with a diameter of $2r = 1.5$ mm and a spacing $a = 6$ mm) and 27 by 13 (wires with a diameter of $2r = 1$ mm and a spacing $a = 10$ mm) of metal wires, the metal filling coefficients of which were 0.049 and 0.00785, respectively. This approach made it possible to control the operating frequency band in the range from 40 MHz to 80 MHz, which can meet the requirements of modern wireless communication systems such as LTE, LTE-A, 5G, as well as in radar technologies, where 5-10 % of the operating frequency band of the carrier frequency value is usually required.

The scientific novelty of the results obtained in the third section lies in the fact that:

- **For the first time**, a method for controlling the values of the Fabry-Perot resonance frequencies (from 1.138 GHz to 1.178 GHz) and their frequency band (from 40 MHz to 80 MHz) by changing the radius of the WM wires and their spacing was proposed and experimentally confirmed, in doing so, the values of the metal filling factor varied in the range from 3.14×10^{-6} to 3.14×10^{-2} , which made it possible to develop an antenna capable of finding its application in modern wireless communication systems, such as LTE, LTE-A, 5G, as well as in radar technologies, where typically 5-10 % of the operating frequency band of the carrier frequency value is required.

The fourth section is devoted to the dynamic control of the EM characteristics of WM with the aim of their further application in measuring systems: a) through modification of the point source of EM waves – detection in the zone of strong near-field interaction, b) through estimation of the radar cross-section (RCS) – detection in the zone of far-field interaction. By means of simulation

modeling, an analysis of the eigenmodes and quality factor was carried out depending on the compression/stretching level of the WM along the x and y axis for the WM with dimensions m by n , where $m = n = [2:2:6]$. It was determined that the optimal dimension is 4 by 4. The development of an experimental model allowed us to solve the urgent issue of implementing structures of this type that allow compression/stretching: a) choosing a flexible dielectric material capable of accommodating wires ($\epsilon \approx 1$), and b) designing holders for wires capable of maintaining a constant distance between them along the axis that is not compressed. As a result of experimental studies, the ability to detect the level of compression/stretching with a resolution of 0.002λ was obtained with an average value of the root mean square deviation for compression along the x and y axes, which in turn amounted to 0.84 % and 0.5 %, respectively, which are currently record indicators. The results of simulation modeling and experimental studies confirmed the possibility of remote detection of the level of compression/tension of the WM based on the determination of RCS values.

The scientific novelty of the results obtained in the fourth section lies in the fact that:

- **For the first time**, a method of modulating the EM parameters of the WM by changing the distance between the wires of the structure, and therefore, changing the capacitance of the structure as a whole and, as a result, controlling the value of the Fabry-Perot resonances, was proposed and experimentally confirmed. This made it possible to estimate the magnitude of the linear compression/tension deformation of the experimentally studied WM with an accuracy of 0.002λ , which is a record resolution for such systems at the moment;
- The method of remote control of linear deformation of WM using radar systems **has been further developed** and experimentally confirmed, which makes it possible to estimate the magnitude of compression/tension by determining the RCS in the frequency range of 0.8-12 GHz.

The following practical results were obtained during the dissertation work:

- A multi-channel waveguide based on WM (the length is 5.3λ at a frequency of 4 GHz) has been developed, capable of simultaneously transmitting EM waves from discrete sources. Such sources were electrically small ($< 0.12\lambda$ for the frequency range 0.3-4 GHz) dipole antennas. Transmission is carried out over parallel WM cells with a resolution of 0.26λ or less;
- A model of an optically long endoscope based on WM in the sub-THz frequency range with dimensions of 0.58 mm thick and 2 mm long (6.6λ at a frequency of 1 THz) has been developed. The development is promising for medical endoscopy and spectroscopy, in particular for transmitting raster images, detecting foreign cells in a patient's blood, and distinguishing bacteria of various kinds. A resolution of 0.13λ and less has been achieved;
- An antenna design with variable and controllable frequency characteristics has been developed based on the modification of the waveguide port by embedding the WM in its aperture. The antenna was tested in the anechoic chamber of Aalto University (Espoo, Finland), certified for measurements in the microwave frequency range from 1 GHz to 30 GHz. Studies have shown that the antenna operates effectively in the frequency range of ~ 1.138 - 1.178 GHz with an operating bandwidth of up to 80 MHz. At the same time, it can be easily modified for other frequency ranges and adapted to the requirements of modern wireless communication systems, in particular LTE, LTE-A, 5G, as well as radar technologies of S-, C- and X-band frequencies;
- A WM resonator has been developed that is capable of dynamically changing its geometric parameters, which allows controlling the values of the Fabry-Perot resonances. Such a structure can be used both in the development of adaptive antenna systems and for the creation of high-precision sensor technologies, in particular, taking into account the high

accuracy of 0.002λ in the frequency range of 1-12 GHz. The efficiency of this structure was tested in the anechoic chamber of Tel Aviv University (Tel Aviv, Israel), certified for measurements in the microwave frequency range from 1 GHz to 20 GHz.

Keywords: metamaterials, wire media, polarization, interference, electromagnetic wave, radiation, electromagnetic wave spectrum radiation, optical anisotropy, scattering (scattering object), radar cross-section, radiation pattern, imaging (biomedical imaging), transmitting-receiving antenna (resonant antenna), reflection and transmission coefficients, numerical results.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці у міжнародних наукових виданнях, які входять до наукометричної бази Scopus:

1. **Khobzei, M.**, Tkach, V., Vovchuk, D., Mikhailovskaya, A., Haliuk, S., Samila, A., Porins, J., Salgals, T., Bobrovs, V., & Ginzburg, P. (2025). Deformable time-modulated wire media resonators. *Photonics and Nanostructures: Fundamentals and Applications*, 63, 101343. <https://doi.org/10.1016/j.photonics.2024.101343> (Scopus, Q2) (особистий внесок: досліджено СПП із керованими ЕМ характеристиками за допомогою механічної модуляції, виконано комп'ютерне моделювання та експерименти зі стискання й розтягнення структури вздовж двох осей).
2. Vovchuk, D., **Khobzei, M.**, Apostoliuk, M., Tkach, V., & Simovski, C. (2023). Broadband transfer of binary images via optically long wire media. *Nanophotonics*, 12(14), 2797–2807. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2022-0538> (Scopus, Q1) (особистий внесок: розроблено модель ЕСПП, виконано її моделювання, створено макет і досліджено передавання растрових зображень у робочому частотному діапазоні).

3. Vovchuk, D., & **Khobzei, M.** (2020). Investigation of frequencies characteristics of modified waveguide aperture by wire media. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 93, 59–64. <https://doi.org/10.2528/pierl20070107> (Scopus, Q3) (особистий внесок: запропоновано модифікацію хвильового порту з інтегрованими СПП, виконано моделювання випромінювання ЕМ хвиль, аналіз коефіцієнтів відбивання S_{11} , діаграм спрямованості та електричного поля в апертурі, розроблено зразки СПП із різним заповненням металом і проведено вимірювання коефіцієнтів S_{11}).

Наукові праці у виданнях, що входять до переліку наукових фахових видань України:

4. **Khobzei, M.** (2024). Sub-GHz Broadband Multi-channel Waveguiding Based on Subwavelength Wire Media. *Security of Infocommunication Systems and Internet of Things*, 2(1), 01010. <https://doi.org/10.31861/sisiot2024.1.01010>
5. Політанський, Л., Вовчук, Д., Галюк, С., **Хобзей, М.**, & Робулець, П. (2020). Застосування провідникових метаструктур у радіотехнічних засобах для передавання та випромінювання ЕМ хвиль (огляд). *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, (3), 102–110. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-150-3-102-110> (особистий внесок: проведено аналіз літературних джерел щодо пристроїв передавання ЕМ сигналів на основі СПП у вузько- та широкосмугових частотних діапазонах).

Наукові праці, що підтверджують апробацію матеріалів дисертації:

6. **Khobzei, M.**, Tkach, V., Haliuk, S., Samila, A., Bobrovs, V., Ginzburg, P., Simovski, C., & Vovchuk, D. (2024). Deformable Wire Media Resonators. *2024 Eighteenth International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials)*, 1–4.

<https://doi.org/10.1109/Metamaterials62190.2024.10703307> (особистий внесок: досліджено СПП із керованими ЕМ характеристиками за допомогою механічної модуляції, виконано комп'ютерне моделювання та експерименти зі стискання й розтягнення структури вздовж двох осей).

7. **Khobzei, M.**, Vovchuk, D., Apostoliuk, M., Tkach, V., & Simovski, C. (2022). Optically Long Broadband Digital Endoscope. 2022 Sixteenth International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials), 1–4.
<https://doi.org/10.1109/Metamaterials54993.2022.9920839> (особистий внесок: розроблено модель ЕСПП, виконано її моделювання, створено макет і досліджено передавання растрових зображень у робочому частотному діапазоні).
8. Robulets, P., Vovchuk, D., **Khobzei, M.**, Derevesnikova, Y., Apostolyuk, M., & Politanskyi, L. (2020). Multiple harmonic signal transfer using wire media structure. 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 1–4.
<https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235408> (особистий внесок: запропоновано СПП як масив елементарних комірок для передавання зображень, проведено моделювання з передавання гармонічних сигналів та оцінки розподілу електричного поля).
9. Vovchuk, D., Haliuk, S., **Khobzei, M.**, & Robulets, P. (2018). Simple principles of antennas modification based on metamaterials (survey). 2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), 277–280.
<https://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2018.8632059> (особистий внесок: запропоновано модифікацію хвилеводного порту з інтегрованими СПП, виконано моделювання випромінювання ЕМ хвиль, аналіз коефіцієнтів відбивання S_{11} , діаграм спрямованості та

електричного поля в апертурі, розроблено зразки СПП із різним заповненням металом і проведено вимірювання коефіцієнтів S_{11}).

10. Vovchuk, D., **Khobzei, M.**, & Zhadan, I. (2018). Properties of antennas modified by wire media. 2018 *International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/UkrMiCo43733.2018.9047582> (особистий внесок: запропоновано модифікацію хвилеводного порту з інтегрованими СПП, виконано моделювання випромінювання ЕМ хвиль, аналіз коефіцієнтів відбивання S_{11} , діаграм спрямованості та електричного поля в апертурі, розроблено зразки СПП із різним заповненням металом і проведено вимірювання коефіцієнтів S_{11}).
11. **Хобзей, М.**, Ткач, В., Еліяшів, О., Хавруняк, М., & Вовчук, Д. (2023). Широкопasmове передавання зображень через структуру із паралельних провідників. II Міжнародна науково-практична конференція «Молодіжна наука заради миру та розвитку», 425–428. <https://archer.chnu.edu.ua/xmlui/handle/123456789/8523> (особистий внесок: розроблено модель ЕСПП, виконано її моделювання, створено макет і досліджено передавання растрових зображень у робочому частотному діапазоні).
12. **Khobzei, M.**, Khavruniak, M., Andriichuk, K., & Vovchuk, D. (2021). Imaging within wire media unit cell performed on PCB. *Physical and technological problems of transmission, processing and storage of information in infocommunication systems: Proceedings of IXth International Scientific-Practical Conference*, 55–56. <https://drive.google.com/file/d/1TlIeBHjRasLWDJBP5z08ARj65LvEnDkH/view?usp=sharing> (особистий внесок: запропоновано СПП як масив елементарних комірок для передавання зображень, проведено моделювання з передавання гармонічних сигналів і оцінки робочої смуги частот між резонансами Фабрі-Перо).

13. Політанський, Л., Вовчук, Д., **Хобзей, М.**, Хавруняк, М., & Андрійчук, К. (2020). Випромінювання електромагнітних хвиль через структуру із паралельних провідників зі змінними конструктивними параметрами. *X Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій».*, 44–46. http://rtt.zntu.edu.ua/data/Tezy_NUZP_2020.pdf (особистий внесок: запропоновано модифікацію хвильового порту з інтегрованими СПП, виконано моделювання випромінювання ЕМ хвиль, аналіз коефіцієнтів відбивання S_{11} , розроблено зразки СПП із різним заповненням металом і проведено вимірювання коефіцієнтів S_{11}).
14. **Khobzei, M.**, Apostolyuk, M., & Vovchuk, D. (2018). Model of antenna modified by regular wire media for control of its main characteristics. *International Youth Science Forum “Litteris et Artibus”*, 34–35. <https://doi.org/10.23939/lea2018.01.034> (особистий внесок: запропоновано модифікацію хвильового порту з інтегрованими СПП, виконано моделювання випромінювання ЕМ хвиль, аналіз коефіцієнтів відбивання S_{11} , розроблено зразки СПП із різним заповненням металом і проведено вимірювання коефіцієнтів S_{11}).

**Наукові праці, що додатково відображають результати досліджень,
викладених у дисертаційній роботі:**

15. **Khobzei, M.**, Vovchuk, D., & Michalska, M. (2018). Overview of applications of wire medium in radio engineering means. *Informatyka Automatyka Pomiaru w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, 8(4), 32–35. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.8023> (особистий внесок: проведено аналіз літературних джерел щодо пристроїв передавання ЕМ сигналів на основі СПП у вузько- та широкосмугових частотних діапазонах).