

УДК 537.8; 537.8.029; 537.876; 621.396.67

Д.А. ВОВЧУК, С.Д. ГАЛЮК

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

## ПОКРАЩЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕН З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТАМАТЕРІАЛІВ (ОГЛЯД)

У роботі проаналізовано можливості використання метаматеріалів у антенних системах. Незвичайні властивості таких матеріалів ( $\epsilon < 0$  та/або  $\mu < 0$ ) дають змогу покращити випромінюючу здатність антен, зменшити їх розміри, збільшити смугу робочих частот, а також звузити діаграми спрямованості та забезпечити необхідний рівень коефіцієнта підсилення антен. Застосування метаматеріалів у антенних конструкціях дозволяє подолати обмеження Чу. Структура роботи дозволяє поетапно прослідкувати за процесом синтезу метаматеріалів на основі простих прикладів.

Ключові слова: метаматеріали, метаструктури, антени, діаграма спрямованості, діапазон частот.

S.D. HALIUK, D.A. VOVCHUK  
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

## ENHANCEMENT OF ANTENNAS CHARACTERISTICS USING METAMATERIALS (SURVEY)

In this paper the topical radio engineering issue of the enhancement of antennas characteristics was reviewed. This is due to the fact that the fast grow of requirements to the modern antenna devices that include the decreasing of their dimensions, increasing of the operation frequency range, gain, as well as providing of the needed directivity of their radiation pattern. One of the prospective approaches to solve this problem is to use the so-called metamaterials that is an electromagnetically homogenous arrangement of artificial structural elements, designed to achieve advantageous and unusual electromagnetic properties ( $\epsilon < 0$  and/or  $\mu < 0$ ). In the paper the metastructures based on split ring resonators (SRRs) or cutting square SRRs (magnetic negative metamaterials – MNG) were considered. Such elements can be used as the inclusions of dielectric substrates for printed antennas. It improves radiation efficiency and allows to control of the width of radiation pattern compared with the case when SRRs are absent. Another type of metamaterials that possess by negative value of permittivity (ENG) includes structures such as semisphere shell and parallel metallic wires. First one makes possible overcoming the Chu's limit. Second metastructure gives the possibility of the width of radiation pattern. The broadband radiation can be reached by irregular wire metastructure that experimentally examined at microwave frequency range. Finally, the survey shows the simple way to synthesize the double negative metamaterials by combination of MNG and MNG components. It allows to increase the radiation gain and enhance the directivity of antennas due to better matching between metamaterial and modified antennas.

Keywords: metamaterial, metastructure, antenna, radiation pattern, frequency range.

### Вступ

Сучасні системи зв'язку вимагають мінітюаризації розмірів приладів та підвищення функціональної здатності їх модулів. Існуючі підходи майже вичерпали здатність задовольняти необхідні вимоги, що висуваються до пристроїв, які функціонують у діапазоні високих, надвисоких частот та вище.

Є багато робіт, де вивчаються перспективні матеріали та конструкції на їх основі, так звані метаматеріали, – електрично однорідні штучно структуровані елементи, що дозволяють досягнути незвичайних електромагнітних (ЕМ) властивостей [1]. Такі властивості пояснюються від'ємними значеннями діелектричної та/або магнітної проникностей ( $\epsilon < 0$  та/або  $\mu < 0$ ), відповідно [2–4]. Матеріали з  $\epsilon > 0$  та  $\mu > 0$  називають подвійно позитивними (double positive, DPS),  $\epsilon > 0$  та  $\mu < 0$  – магнетонегативні (magnetically negative, MNG),  $\epsilon < 0$  та  $\mu > 0$  – електрично негативні (electrically negative, ENG), а також  $\epsilon < 0$  and  $\mu < 0$  – подвійно негативні (double negative, DNG). Як відомо, до першого класу із природних матеріалів відповідно до приведеної класифікації можна віднести діелектрики; до другого – плазму; до третього – гіротропні магнетики; в то час як матеріали, які б можна було віднести до четвертого класу, на даний момент не були виявлені у природі, проте можуть бути штучно реалізованими [2].

У наш час метаматеріали вже знайшли своє застосування у антенних технологіях для покращення випромінювання елементарних антен та розширення їх частотної смуги, що веде до можливості функціонування, долаючи обмеження Чу [5, 6]; розширення можливостей друкованих антен, що дає змогу зменшення взаємного впливу елементів антенних масивів, а також, навпаки, досягнення вузької діаграми спрямованості з більшим коефіцієнтом спрямованості та підсилення [7].

Метою даної роботи є огляд існуючих підходів до модифікації антенних випромінювачів для покращення їх характеристик з використанням метаматеріалів.

### Метаматеріали у антенних технологіях

**MNG метаструктури.** Існує багато типів MNG структур, серед яких подвійні кільцеві резонатори (split ring resonator, SRR) [8–10] (рис. 1, а) або розрізні квадратні SRR (cutting square SRR) [11, 12] (рис. 1, б), металеві трубки чи роли [13], S-подібні елементи [14] тощо. Використання набору MNG елементів як підкладок друкованих антен забезпечує можливість розширення смуги частот при випромінюванні ЕМ хвиль у вільний простір. Найбільш поширеним є використанням MNG структур при конструюванні підкладок патч-антен, що можуть знайти застосування у МІМО технологіях для зменшення взаємних впливів сусідніх елементів антени [15, 16].

Структура, що наведена на рис. 2, складається із діелектричного блоку висотою  $t$ , який навантажено SRR включеннями вздовж осі  $x$  з періодом  $d_x$  та вздовж осі  $z$  з періодом  $d_z$ . Патч-антена безконтактно розміщена на поверхні структури. Це дозволяє підвищити пропускну здатність та ефективність

випромінювання таких антен в порівнянні із відповідними характеристиками антен на звичайній діелектричній підкладці [15].

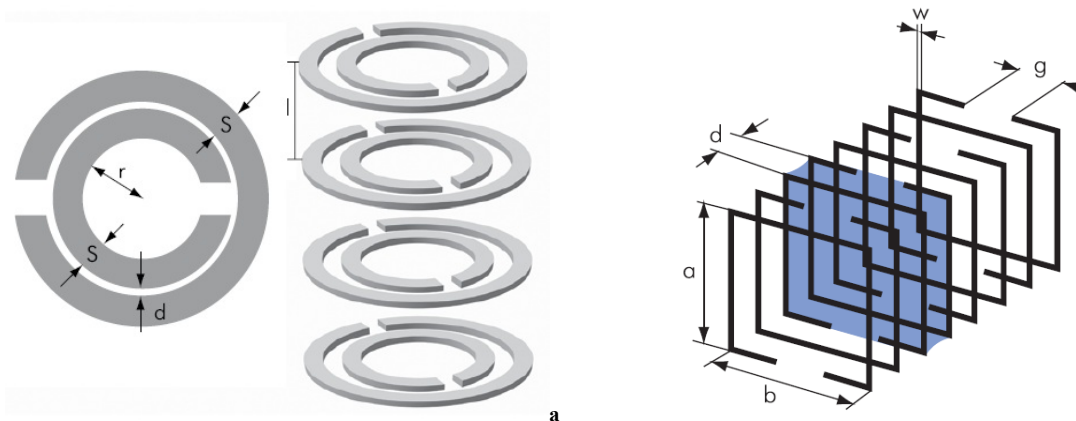


Рис. 1. Структури, що володіють від’ємним значенням магнітної проникності: а) подвійні кільцеві резонатори [8] та б) розрізні квадратні резонатори, що формують соленоїд [11]

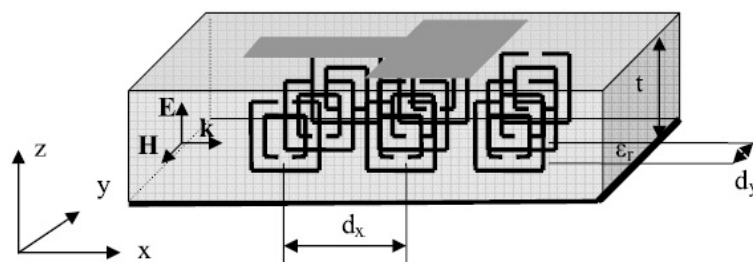


Рис. 2. Антенна конструкція з MNG елементами підкладкою на основі розрізних квадратних SRR, вмонтованими в діелектричну підкладку, що забезпечує покращення процесу випромінювання патч-антени [15]

Ще один підхід до розробки метапідкладок для досягнення високого значення коефіцієнту підсилення патч-антен розглянуто в роботі [16]. Запропоновану модифікацію показано на рис. 3. Структура складається з двох шарів із круговими отворами із заданим значенням розмірів елементарних комірок та відстанями між їх центрами. На відміну від попереднього випадку, патч-антена розміщена в основі структури на тонкому шарі діелектрику, як показано на рис. 3. Діаграма спрямованості запропонованої антени є більш вузькою ( $25^\circ$  та  $27^\circ$  у площинах  $x-z$  та  $y-z$ , відповідно рис. 3, б та в – суцільна лінія), ніж у випадку патч-антени із звичайною діелектричною підкладкою ( $63^\circ$  та  $117^\circ$  у площинах  $x-z$  та  $y-z$ , відповідно рис. 3, б та в – суцільна лінія із точками). Також, запропонована модифікація дозволяє збільшити коефіцієнт підсилення антени від 6,8 дБ до 17,2 дБ [16].

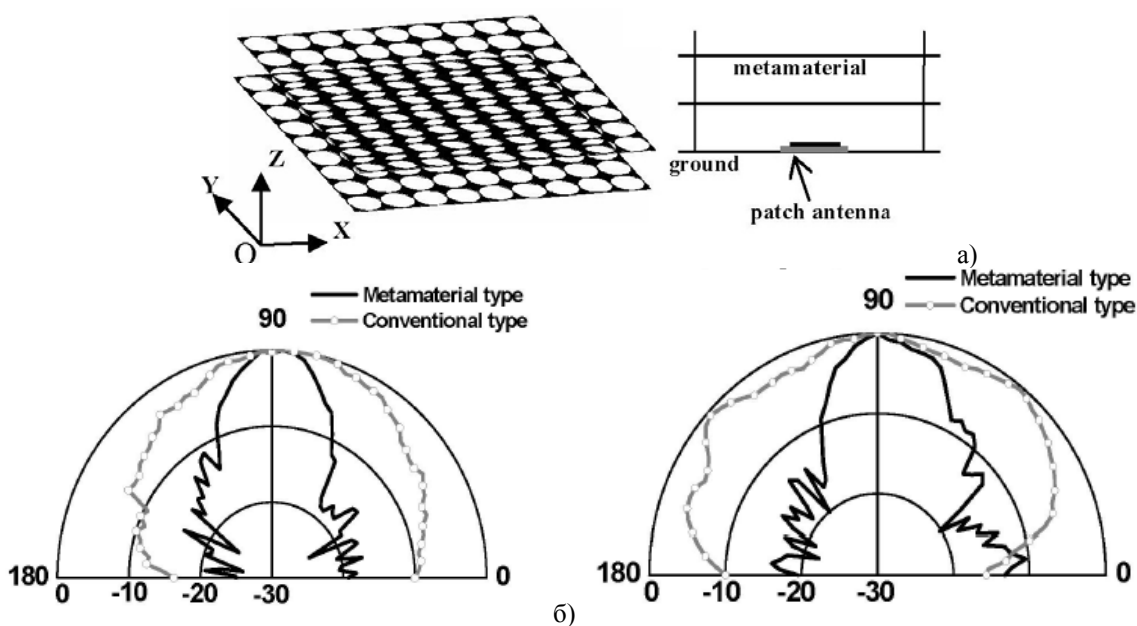


Рис. 3. Конструкція, що складається з двох шарів із круговими отворами та дозволяє покращити випромінювання патч-антени, розміщеної в основі структури (а) та діаграми спрямованості у площинах  $x-z$  (б) та  $y-z$  (в) без (суцільна лінія із точками – Conventional type) та із (суцільна лінія – Metamaterial type) використанням метаструктури [16]

**ENG метаструктури.** Основним принципом застосування ENG-матеріалів є зменшення великого значення реактивної складової електрично малих антен. Для прикладу, розглянута у [17] метаоболонка (півсфера, що характеризується негативним значенням діелектричної проникності) розміщена по центрі коаксимальної лінії передавання чвертьхвильового випромінювача і повністю покриває плече монополя (рис. 4). При цьому, для отримання необхідного ефекту, товщина оболонки повинна бути менша, ніж  $\lambda/100$  довжини хвилі резонансної частоти монополя. Таким чином, поєднання DPS складової монополя із ENG-півсферою, які складають ємнісну та індуктивну складові відповідно, формує LC-резонатор [5]. Така модифікація чвертьхвильової антени дозволяє підвищити добротність антени та перевищити обмеження Чу в 1,583 разів [5], не зважаючи на той факт, що здатність такої антени випромінювати сильно обмежена та можлива тільки на резонансній частоті [18, 19]. Одним із основних висновків, що можна зробити із роботи [5], є також збільшення потужності випромінювання модифікованої антени на резонансній частоті на 60–65 дБ, в порівнянні із випадком, коли метаоболонка відсутня.

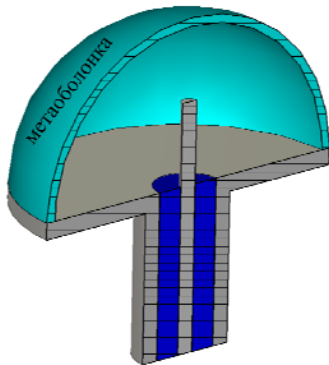


Рис. 4. Переріз електрично малої  $\lambda/4$  антени, модифікованої ENG метаоболонкою

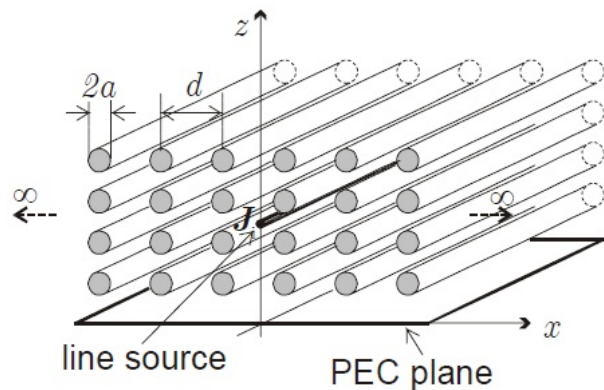


Рис. 5. Структура із нескінченної кількості паралельних металевих провідників та металевим екраном (PEC plane), що опромінюється джерелом електричних сигналів (line source) [21]

Використання DNG метаоболонки замість ENG, дозволяє зменшити радіус півсфери, забезпечуючи ті ж самі властивості чвертьхвильової антени. Це пояснюється додатковою ємністю, що вноситься DNG елементом [5].

Ще одна ENG структура може бути отримана шляхом впорядкованого розміщення металевих провідників довжиною  $L$  та діаметром  $2a$ , вмонтованих у діелектричну матрицю паралельно один одному з періодом  $d$  (рис. 5). Відстань між провідниками та їх радіус повинні задовольняти необхідному значенню фактору заповнення металу [20]. Структура на рис. 5 включає також металевий екран (PEC plane) та відображає імітаційну модель, що досліджувалась в [21]. Якщо випромінювач та провідники ENG структури одночасно розміщені вздовж осі  $y$ , то це приведе до звуження діаграми спрямованості та дає можливість керувати її шириною за рахунок зміни параметрів структури.

Одним із перспективних напрямків використання структури із паралельних металевих провідників є передавання зображень [22]. Проте, тривалий час передавання ЕМ енергії було можливо здійснювати тільки на частотах резонансів Фабрі-Перо, коли довжина структури співкратна довжині півхвилі резонансної частоти випромінювання джерела. Принцип процесу передавання зображень полягає в тому, що площина зображення розміщується перед інтерфейсом структури, а його ідентифікація проводиться шляхом аналізу розподілу електричного поля на приймальній стороні. Процеси передавання зображень таким способом є вузькосмуговими. Суттєвою перевагою такого типу метаструктур є можливість їх застосування у різних діапазонах частот, оскільки численними роботами підтверджується можливість їх синтезу розмірами до декількох сотень нанометрів [23–25].

Не зважаючи на попередні твердження, нещодавно було доведено можливість використання структур із паралельних провідників для вирішення задач ширококутності [26, 27]. Це можливо зробити, якщо джерело випромінювання безконтактно розмістити безпосередньо у структуру між провідниками структури. У роботах [26, 27] виконано дослідження процесу ширококутового передавання ЕМ енергії через повітряний проміжок між двома хвилеводними портами, розміщеними один навпроти одного, як показано на рис. 6. Дослідження включають порівняння  $S_{21}$ -параметрів для двох випадків, коли передавання відбувається без та із структурою розміщеною між портами. У першому випадку ЕМ енергія сильно розсіюється у вільний простір, а середнє значення  $S_{21}$ -параметрів становить  $-4,5$  дБ у частотному діапазоні  $0,9...2$  ГГц (одномодовий режим роботи використовуваних хвилеводів). Якщо розмістити метаструктуру між хвилеводами, вмонтувавши її на  $5$  мм у кожний із портів, отримується покращення передавання ЕМ сигналів у  $2,24$  рази. У діапазоні частот  $0,9...12$  ГГц (багатомодовий режим використовуваних хвилеводів) середнє значення покращення передавання становить  $3,78$  разів.

У роботі [28] доведено, використання розглянутої структури як антени для випромінювання у вільний простір є можливим тільки на частотах резонансів Фабрі-Перо. Для того, щоб дослідити можливість

випромінювання ЕМ сигналів у широкому діапазоні частот, було досліджено три види провідникових метаструктур (рис. 7). Перша із них є подібною до розглядуваних у роботах [26, 27] – набір із паралельних металевих провідників (рис. 7, а). Наступною є структура із впорядкованих провідників, розміщених під певним визначеним кутом відносно центральної осі та відносно сусідніх провідників – гіперлінза (рис. 7, б) [29]. Останньою структурою, яка вперше запропонована у роботі [28], є структура із невпорядковано розміщених провідників (рис. 7, в), яка може бути розглянута як набір надзвичайно великої кількості локальних гіперлінз із різною довжиною провідників та величиною кутів рознесення, в той час як її загальні розміри відповідають розмірам структури на рис. 7, а.

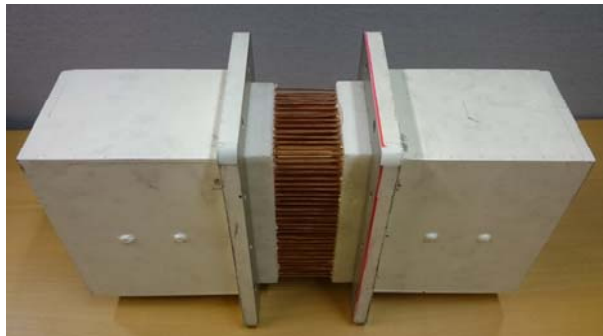


Рис. 6. Експериментальна установка, що складається з двох хвильовідних портів та структурою із паралельних металевих провідників, вмонтованою на 5 мм у кожен із них [26]

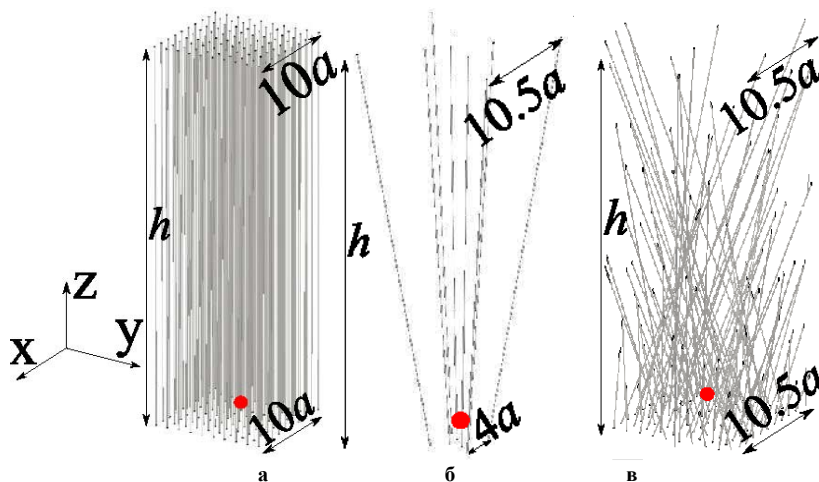


Рис. 7. Досліджувані у [28] метаструктури для покращення випромінювання ЕМ: а) набір паралельних металевих провідників; б) гіперлінза; в) набір невпорядковано розміщених провідників

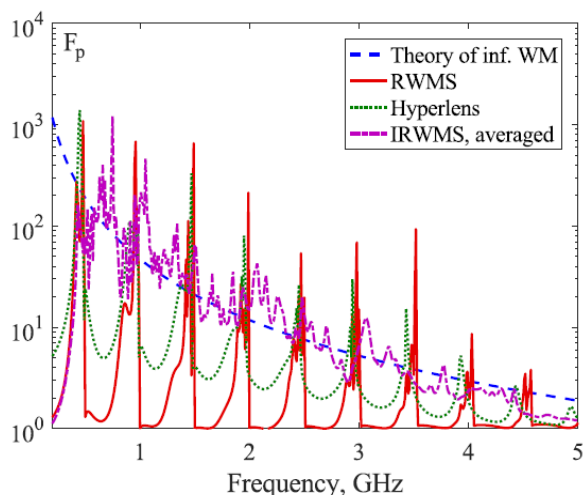


Рис. 8. Частотна залежність фактору Парсела для теоретично розрахованої (пунктирна лінія – Theory of inf. WM) структури із паралельних провідників нескінченних розмірів, досліджуваної структури із паралельних провідників (суцільна лінія – RWMS), гіперлінзи (точкова лінія – Hyperlens) та структури із невпорядковано розміщених провідників (штрихпунктирна лінія – IRWMS, averaged) [28]

Результати імітаційного моделювання показали, що джерело ЕМ сигналів, модифіковане структурою із паралельних провідників, випромінює на частотах резонансів Фабрі-Перо, що характеризується значеннями фактору Парсела порядку  $10^1 \dots 10^3$  у досліджуваному діапазоні частот 1...5 ГГц. На частотах відмінних від резонансних випромінювання відсутнє, що пояснюється значенням фактору Парсела рівним  $10^0$  (рис. 8 – суцільна лінія).

Гіперлінза характеризується такими ж високими значеннями фактору Парсела на частотах

резонансів Фабрі-Перо та, на відміну від попереднього випадку, вищими його значеннями (до  $10^1$ ) між резонансними частотами. Результати моделювання для структури із невпорядкованим розташуванням провідників показують, що значення величини фактору Парсела в середньому подібне до теоретично розрахованого для математичної моделі безкінечної структури із провідників [28]. Це означає, що структура із невпорядковано розміщених провідників може використовуватися для випромінювання ЕМ сигналів у широкому діапазоні частот.

Експериментальні установки для дослідження випромінювання структурами із паралельним та випадковим розміщенням провідників приведені на рис. 9, а та б відповідно. Якщо апертуру хвильоводного порту, що використовувалась як джерело сигналів, навантажити індуктивною діафрагмою, то отримується джерело, що випромінює слабо. Такий підхід використовувався у [28], що підтверджується пунктирною лінією на рис. 10 у досліджуваному діапазоні частот (1...1,8 ГГц). У першому випадку отримано випромінювання на частотах 1,04 та 1,17 ГГц (рис. 10 – точкова лінія). Структура ж на рис. 9, б демонструє широкосмуговий ефект, що займає діапазон частот від 1,08 до 1,46 ГГц (рис. 10 – суцільна лінія).

Також у роботі [28] було досліджено покращення випромінювання дипольної антени у смузі частот, що не містить власних резонансів диполя. Якщо диполь безконтактно вмонтований у структуру із паралельних провідників на відстань рівну кроку метаструктури, то така система забезпечує випромінювання на частотах 2,7 та 4,3 ГГц (рис. 11 – суцільна лінія). На частотах відмінних від резонансних – значення фактору Парсела очікувано рівні 1. У випадку невпорядкованої структури отримується випромінювання у всьому досліджуваному діапазоні 2...5 ГГц (рис. 11 – пунктирна лінія), що підтверджується значенням фактору Парсела більшими 1.



Рис. 9. Експериментальні установки для дослідження випромінювання ЕМ коливань структурами із паралельним (а) та із невпорядкованим розміщених (б) провідників

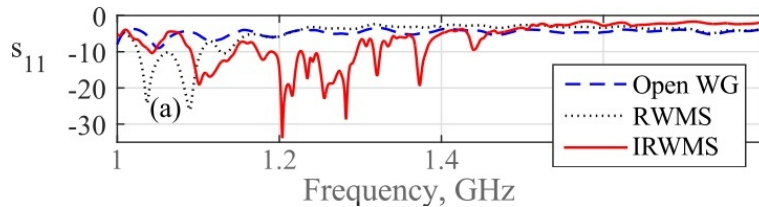


Рис. 10. Отримані експериментальним шляхом результати коефіцієнту відбивання  $S_{11}$  при випромінюванні індуктивно навантаженою апертурою хвильоводу у вільний простір (пунктирна лінія – Open WG), із вмонтованою структурою із паралельних провідників (точкова лінія – RWMS) та невпорядковано розміщених провідників (суцільна лінія – IRWMS) [28]

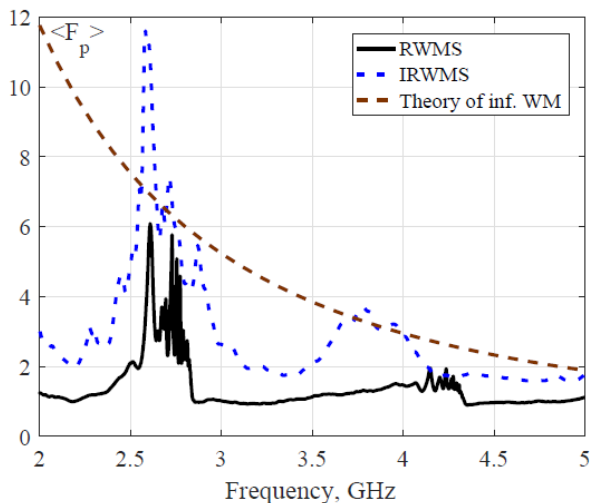


Рис. 11. Експериментально отримані частотні залежності значень фактору Парсела при випромінюванні ЕМ сигналів з використанням структури із паралельних провідників (суцільна лінія – RWMS), із випадково розміщених провідників (точкова лінія – RWMS) та теоретично розрахунок структури (пунктирна лінія – Theory of inf. WM) [28]

резонаторів чи розрізних квадратних резонаторів (ENG та MNG, відповідно) розробляють DNG середовища (рис. 12) [30, 31]. Структура, що приведена на рис. 12, б, експериментально досліджена у [31]. Структурні компоненти реалізовані друкованим методом та почергово розміщені у паралельних площинах. Чвертьхвильова антена використовувалась як джерело сигналів і вмонтовувалась всередину метаматеріалу у центрі нижньої частини структури. Результати досліджень показали строго направлену діаграму спрямованості у порівнянні з випадком, коли чвертьхвильова антена випромінює у вільний простір без метаструктури (рис. 13).

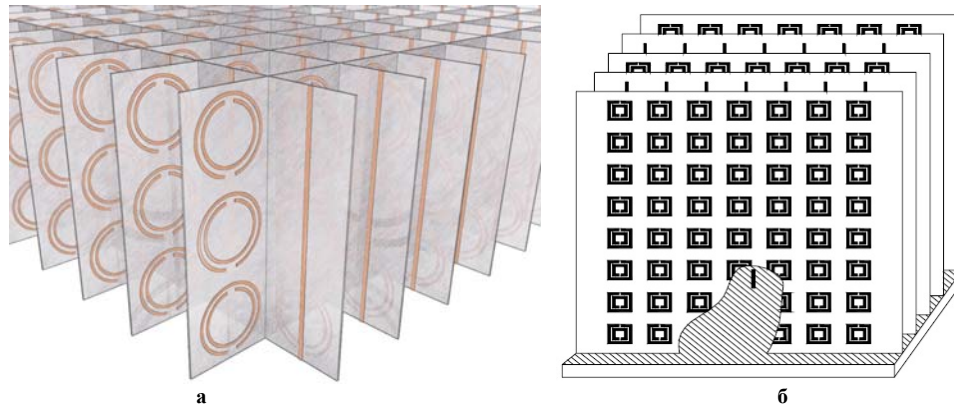


Рис. 12. Структура із паралельних провідників і подвійних кільцевих резонаторів (а) [30] та модифікація чвертьхвильової антени шляхом її вмонтування в основі DNG метаматеріалу, що складається із розрізних квадратних резонаторів (б) [31]

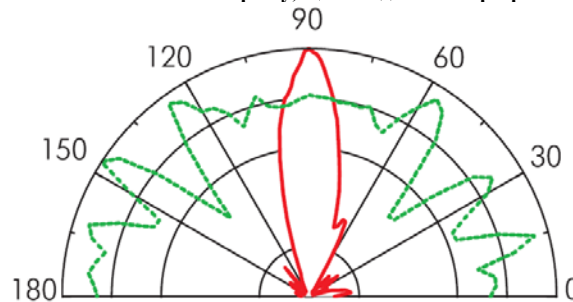


Рис. 13. Діаграми спрямованості монопольної антени при її випромінюванні у вільний простір (пунктирна лінія) та при її безпосередній модифікації подвійно негативною метаструктурою, що приведена на рис.12, б (суцільна лінія) [31]

### Висновки

У роботі наведено класифікацію матеріалів з точки зору таких електродинамічних характеристик як діелектрична  $\epsilon$  та магнітна  $\mu$  проникності. На основі цього, здійснено огляд можливих застосувань метаматеріалів для покращення процесів випромінювання антен. Показано, що за допомогою метаматеріалів різних конструкцій та шляхом зміни значень їх параметрів, можна забезпечити покращення випромінювання елементарних антен, зменшити їх розміри, розширити смугу робочих частот, а також сформувані діаграми спрямованості та необхідний рівень підсилення антени.

Для уможливлення контролю ширини діаграми спрямованості, здійснюються модифікації діелектричних підкладок шляхом включення розрізних кільцевих резонаторів різної форми (MNG метаматеріал) або шляхом розміщення лінійного випромінювача в структурі із паралельних провідників (ENG метаматеріал) у напрямку провідників. Забезпечення роботи у широкому діапазоні частот можливе з використанням структур і невпорядкованим розміщенням провідників, що підтверджується відповідними частотними залежностями фактору Парсела.

З допомогою синтезу DNG метаматеріалів можна досягнути кращому узгодженню індуктивної та ємнісної реактивних складових, ніж окремо MNG чи ENG матеріалів.

Дана оглядова робота стане корисною для дослідників, розробників та конструкторів антен, що повинні забезпечувати задані характеристики.

### Література

1. Sihvola A. Metamaterials in electromagnetic // *Metamaterials*. – 2008. – Vol. 1, no. 1. – P. 2–11.
2. *Metamaterials: Physics and Engineering Explorations* // Edited by Engheta N. and Ziolkowski R. W. – Wiley-IEEE Press. – 2006. – 414 p.
3. Eleftheriades G. V., Balmain K. G. *Negative Refraction Metamaterials: Fundamental Principles and Applications* // Wiley-VCH, Weinheim, Germany. – 2005.
4. Capolino F. *Metamaterials Handbook 1: Theory and Phenomena of Metamaterials* // CRC Press, Boca Raton, CA, 2009.
5. Ziolkowski R. W., Erentok A. *Metamaterial-Based Efficient Electrically Small Antennas* // IEEE

Transactions on Antennas and Propagation. – July 2006. – Vol. 54. – No. 7. – P. 2113–2130.

6. Stuart H. R., Pidwerbetsky A. Electrically Small Antenna Elements Using Negative Permittivity Resonators // Strategic White Paper. – 2006. – P. 10–19.

7. Slyusar V.I. Metamaterials on Antenna Solutions // Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques, Lviv, Ukraine. – 6–9 October 2009. – P. 19–24.

8. Kostin M.V., Shevchenko V.V. Artificial magnetics based on double circular elements // Proceeding of Bianisotropics'94. – 1994. – P' erigueux, France. – P. 49–56.

9. Pendry J.B., Holden A. J., Robins D. J. and Stewart W. J. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. – 1999. – Vol. 47. – No. 11. – P. 2075–2084.

10. Marques R., Medina F. and Ruffi-el-Idrissi R. Role of bianisotropy in negative permeability and left-handed metamaterials // Physical Review B. – 2002. – Vol. 65. – P. 144440 (1–6).

11. Ikonen P., Maslovski S.I., Tretyakov S.A. and Kolmakov I.A. New artificial high-permeability material for microwave applications // Progress in Electromagnetics Research Symposium, Pisa, Italy. – March 2004. – P. 485–488.

12. Maslovski S., Ikonen P., Kolmakov I., Tretyakov S. and Kaunisto M. Artificial magnetic materials based on the new magnetic particle: metasolenoid // Progress In Electromagnetics Research (PIER). – 2005. – Vol. 54. – P. 61–81.

13. Schneider H.J. and Dullenkopf P. Slotted tube resonator: A new NMR probe head at high observing frequencies // Rev. Sci. Instrum. – 1977. – Vol. 48. – no. 1. – P. 68–73.

14. Neil P. Theory, Simulation, Fabrication and Testing of Double Negative and Epsilon Near Zero Metamaterials for Microwave Applications // Master's Thesis in Electrical Engineering. – June 2008. – P. 165.

15. Mookiah P., Dandekar K.R. Metamaterial-Substrate Antenna Array for MIMO Communication System // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2009. – vol. 57. – no. 10. – P. 3283–3292.

16. Semichaevsky A., Akyurtlu A. Homogenization of Metamaterial-Loaded Substrates and Superstrates for Antennas // Progress In Electromagnetics Research. – 2007. – Vol. 71. – P. 129–147.

17. Weng Z.-B., Wang N.-B., Jiao Y.-Ch. Study on High Gain Patch Antenna with Metamaterial Cover // 7<sup>th</sup> Int. Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory. – 2006.

18. Wheeler H. A. Fundamental limitations of small antennas // Proceeding IRE. – 1947. – P. 1479–1484.

19. Chu L.J. Physical Limitations of Omni-Directional antennas // Journal of Applied Physics. – December 1948. – Vol. 19. – P. 1163–1175.

20. Kosulnikov S. Yu., Yankovskaya E. A., Maslovski S. I., Belov P. A. and Kivshar Yu. S. Optimal filling factor of nanorod lenses for subwavelength imaging // Physical Review A 84. – 2011. – 065801 (1–4).

21. Burghignoli P. *et. all* Radiation from Elementary Sources in the Presence of Wire-Medium Slabs: Physical Mechanisms and Full-Wave Analysis. – P. 113–116.

22. Simovski C. R., Belov P. A., Atrashchenko A. V. and Kivshar Y. S., Wire metamaterials: physics and applications // Advanced Materials. – 2012. – 24. – 4229 (1–20).

23. Belov P. A., Zhao Y., Tse S., Ikonen P., Silveirinha M. G., Simovski C. R., Tretyakov S., Hao Y., Parini C. Transmission of images with subwavelength resolution to distances of several wavelengths in the microwave range // Physical Review B. – 2008. – 77. – 193108 (1–4).

24. Silveirinha M. G., Belov P. A., Simovski C. R. Ultimate limit of resolution of subwavelength imaging devices formed by metallic rods // Optics Letters. – 2008. – Vol. 33. – no. 15. – P. 1726–1728.

25. Wurtz G. A., Pollard R., Hendren W., Wiederrecht G., Gosztola D., Podolskiy V., Zayats A. Designed ultrafast optical nonlinearity in a plasmonic nanorod metamaterial enhanced by nonlocality // Nature Nanotechnol. – 2011. – Vol. 6. – P.107–111.

26. Vovchuk D., Kosulnikov S., Nefedov I., Tretyakov S. and Simovski C. Multi-Mode Broadband Power Transfer through a Wire Medium Slab // Progress in Electromagnetics Research. – 2015. – Vol. 154. – P. 171–180.

27. Kosulnikov S., Vovchuk D., Nefedov I., Tretyakov S. and Simovski C. Broadband Power Transfer Through a Metallic Wire Medium Slab // URSI International Symposium on Electromagnetic Theory (EMTS), Espoo, Finland. – 2016. – P. 596–599.

28. Kosulnikov S.Yu., Mirmoosa M.S., Vovchuk D.A., Tretyakov S.A., Glybovski S.B. and Simovski C.R. Enhancement of Radiation with Irregular Wire Media // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2016. – P. 596–599.

29. Kosulnikov S., Filonov D., Glybovski S., Belov P., Tretyakov S., Simovski C. Wire-Medium Hyperlens for Enhancing Radiation From Subwavelength Dipole Sources // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2015. – Vol. 63. – P. 4848–4856.

30. Asadchy V. Spatially dispersive metasurfaces // PhD Thesis, Department of Electronics and Nanoengineering, Aalto University. – 2017. – 113 p.

31. Sui Q., Li C., Li L.L., Li F. Experimental Study of  $\lambda/4$  Monopole Antennas in a Left-Handed Meta-Material // Progress in Electromagnetics Research. – 2005. – no. 51. – P. 281–293.

Рецензія/Peer review : 22.9.2018 р.

Надрукована/Printed : 19.9.2018 р.

Рецензент: к.т.н., доц. Озирковський Л.Д.