

МІНІСТЕРСТВО ОБОРОНИ УКРАЇНИ
Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації
Національного технічного університету України
„Київський політехнічний інститут”



V-й НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ СЕМІНАР
„Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних
систем та мереж спеціального призначення”

22 жовтня 2009 року

(Доповіді та тези доповідей)

Київ – 2009

ББК
Ц4 (4Укр)39
П-768

У збірнику матеріалів п'ятого науково-практичного семінару опубліковано доповіді та тези доповідей вчених, науково-педагогічних працівників, ад'юнктів, здобувачів, курсантів і студентів Військового інституту телекомунікацій та інформатизації Національного технічного університету України „Київський політехнічний інститут” та інших вищих навчальних закладів, в яких розглядаються пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення.

ЗМІСТ

(Доповіді)

1. **Голь В. Д., Солодовник В. І.** Аспекти застосування атмосферних оптичних систем передачі для радіорелейного зв'язку..... 12
2. **Ільяшов О.А.** Полігауссовський розподіл структурних сигналів у телекомунікаційних мережах спеціального призначення..... 22
3. **Кувшинов О. В.** Методи оперативного управління засобами завадозахисту військових систем радіозв'язку..... 27
4. **Міночкін А.І., Романюк В.А.** Координація та інтелектуалізація рівнів OSI – нова парадигма управління мобільними радіомережами..... 31
5. **Науменко М. І.** Самоорганізація в системі підготовки військових фахівців..... 37
6. **Польщиков К.О.** Методи управління інтенсивністю потоків даних в мобільній радіомережі спеціального призначення..... 41
7. **Приходько Ю. І.** Методологічні засади інноваційного розвитку військової освіти..... 48
8. **Слюсар В. І.** Метаматеріали в МІМО-антеннах..... 53

(Тези доповідей)

1. **Ананьїн О. В.** Компенсація впливу завад в каналі радіоуправління системи радіозв'язку..... 65
2. **Андрєєв Б.М., Терещенко О.М.** Характеристики надійності елементів і мереж у системах зв'язку..... 66
3. **Ахтанін О. Г., Тарасюк Ю. М.** Обробка сигналів земних станцій на борту супутника ретранслятора з цифровою антенною решіткою..... 67
4. **Башкиров О. М.** Підвищення пропускної спроможності системи передачі даних про повітряну обстановку..... 68
5. **Бердников О. М.** Впровадження послуг *Triple Play* на телекомунікаційних мережах..... 69
6. **Берестов Д. С.** Визначення та формування профілів захищеності інформації в автоматизованих системах..... 70
7. **Бичков А. М., Нестеренко М. М.** Аналіз загроз безпеки інформації та методів протидії при використанні складних запитів у СУБД..... 71
8. **Бовда Е. М.** Інформаційні технології в АСУ..... 72
9. **Богданов В. В.** Організаційно-технічні аспекти впровадження інфраструктури керування ключами в інформаційно-телекомунікаційних системах..... 74
10. **Богданов В. В., Маковецький О. М.** Методика вибору раціонального варіанта системи захисту інформації на основі експертних даних..... 76
11. **Богучарский В. В., Дідок Л. А.** Розвиток системи зв'язку та передачі даних в Збройних Силах України..... 78
12. **Богуш К. Ю.** Нормування форми сигналу для розпізнавання мови в інтелектуальних системах..... 79
13. **Божко В. І.** Методологія архітектурної реалізації програмного забезпечення критичного застосування в системах що інтенсивно його використовують..... 80
14. **Борисов І. В., Макаручук О. М.** Оцінка ефективності застосування сигнально-кодових конструкцій в каналах з навмисними завадами..... 81
15. **Бугера М. Г., Сілко О. В.** Методика забезпечення автентичності навчальної звітності в об'єктно-орієнтованому навчальному середовищі..... 82

МЕТАМАТЕРІАЛИ В МІМО-АНТЕННАХ

Основною тенденцією розвитку електронних технологій вже багато років є їх мініатюризація, а попит на все більш компактні проекти – постійно зростає. Революційні зміни у виробництві напівпровідників і методології проектування мікроелектронних пристроїв сприяли досягненню дуже високих норм упаковки елементів і компактних розмірів виробів в цілому. Проте, в пристроях зв'язку розміри антен все ще залишаються приводом для нарікань. Технологія друкованих антен, яка була перспективною близько двох десятиріч тому, нині досягла своїх меж щодо скорочення габаритів надвисокочастотних (НВЧ) пристроїв. Тому пошук нетрадиційних підходів до реалізації мікрохвильової техніки останнім часом істотно активізувався, про що свідчить серія публікацій автора за технологіями електрично малих антен (ЕМА) [1 – 3]. Один з нових напрямів в розвитку теорії ЕМА пов'язаний з досягненнями в області створення метаматеріалів. Розглянемо основні результати в даній області стосовно завдання удосконалення техніки ЕМА систем МІМО.

Історія і класифікація метаматеріалів

Одна з перших спроб реалізації концепції штучних електромагнітних матеріалів документально простежується в кінці ХІХ-го сторіччя, коли в 1898 р. Джагадіс Чандра Бозе (Jagadis Chandra Bose) провів перший мікрохвильовий експеримент з дослідження поляризаційних властивостей створених ним структур викривленої конфігурації. В 1914 р. Ліндман (Lindman) впливав на штучні середовища, що були множиною безладно орієнтованих маленьких дротів, скручених у спіраль і вкладених у фіксує середовище.

В 1946–48 рр. Уїнстон Кок (Winston E. Kock) вперше створив мікрохвильові лінзи, використовуючи провідні сфери, диски і періодично розташовані металеві смужки, що фактично утворили штучне середовище, яке демонструвало специфічний за величиною ефективний індекс заломлення. З тих пір складні штучні матеріали стали предметом вивчення для багатьох дослідників у всьому світі. Останніми роками нові поняття і концепції в синтезі метаматеріалів сприяли створенню структур, імітуючих електромагнітні властивості відомих речовин або маючих якісно нові функції.

Приставка „мета-” має грецьке походження і переводиться як „зовні”, що дозволяє трактувати термін „метаматеріали” як структури, чий ефективні електромагнітні властивості виходять за межі властивостей, утворюючих їх компонентів. Одна з перших згадок цього терміну відноситься до випуску новин 1999 року форуму промислової і прикладної фізики (FIAP) Американського фізичного співтовариства (APS), що анонсував в програмі засідання APS на березень 2000 р. серію докладів по секції „Метаматеріали”. Серед включених в програму секції докладів фігурує виступ Роджера Уелсера (Rodger M. Walser) [4] з університету штату Техас в Аустіні, якого і вважають автором терміну „метаматеріал”. Втім, практично одночасно з ним аналогічне поняття застосував Елі Яблоновіч (Eli Yablonovitch), чий доклад на згаданому форумі містив у назві слово „Meta-Materials”.

Аналіз публікацій з різних аспектів технологій метаматеріалів дозволяє класифікувати все різноманіття штучних середовищ залежно від ефективних значень їх діелектричної (ϵ) і магнітної (μ) проникностей згідно класифікаційній діаграмі, представленої на рис. 1. На ній фігурують як штучні середовища, так і матеріали природного походження.

Майже всі природні речовини мають діелектричну постійну і магнітну проникність більше нуля. Суттєво, що у переважної більшості з них в найцікавіших для практичного використання діапазонах частот ці параметри, як правило, взагалі більші або рівні одиниці. В закордонній літературі дані матеріали звичайно називають DPS (double positive, подвійні позитивні), підкреслюючи тим самим позитивність значень як ϵ , так і μ . На класифікаційній діаграмі рис. 1 цим природним матеріалам відповідає правий верхній

квадрант. DPS-середовища вважаються прозорими для електромагнітних хвиль, якщо внутрішні втрати в них (уявні складові діелектричної і магнітної проникностей) малі. В прозорих середовищах електромагнітні поля існують у формі електромагнітних хвиль, що розповсюджуються, хоча незначна частина їх енергії в тій чи іншій мірі піддається поглинанню.

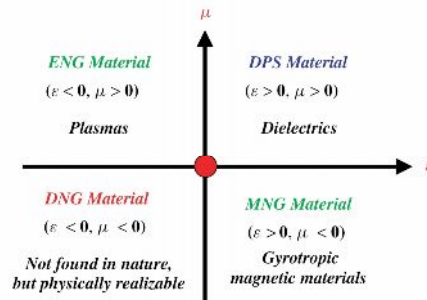


Рис. 1. Класифікація фізичних середовищ, залежно від знака величин діелектричної (ϵ) і магнітної (μ) проникностей

Матеріали, у яких негативний лише один з електромагнітних параметрів (ϵ або μ), на прийнятому за кордоном науковому жаргоні фігурують під назвою SNG (single negative, мононегативні). В таких середовищах електромагнітні хвилі не розповсюджуються і швидко затухають. З цієї причини відносно подібних матеріалів вважають, що вони непрозорі для випромінювання, якщо їх товщина більша за характерну експоненціальну довжину загасання електромагнітних хвиль. Залежно від того, який саме з параметрів приймає негативні значення, розрізняють два типи SNG-середовищ: так звані ENG (ϵ -негативні, для яких, як впливає з назви, $\epsilon < 0$ і $\mu > 0$) і MNG (μ -негативні, тобто такі, що мають параметри $\epsilon > 0$ і $\mu < 0$).

Бінегативні середовища

Останні кілька років були багаті подіями в області розвитку концепцій і рішення проблем створення метаматеріалів, що мають негативний коефіцієнт заломлення електромагнітних хвиль. Ефект негативного заломлення обумовлений одночасно негативними значеннями діелектричної постійної і магнітної проникності ($\epsilon < 0$, $\mu < 0$). Внаслідок негативних значень обох вказаних параметрів дані матеріали часто називають бінегативними середовищами (DNG, double negative). Донедавна цей клас матеріалів демонструвався тільки на основі штучних конструкцій, однак у 2006 р. було встановлено, що кристали $\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ мають негативний коефіцієнт заломлення електромагнітних хвиль у діапазоні 150 ГГц. Місце подібних середовищ на класифікаційній схемі відомих матеріалів може бути графічно представлено, як показано на рис. 1.

До розуміння фізики середовищ DNG сучасна наука підходила поволи і досить тривалий час. В результаті систематичних досліджень даного процесу за допомогою доступної літератури, у тому числі, в Інтернет, вдалося отримати деякі цікаві спостереження з історії даної області, які не слід розцінювати як спробу однозначних тверджень про пріоритет тих або інших відкриттів.

Перший етап на шляху формування сучасних уявлень про DNG пов'язують з розвитком теорії зворотних хвиль, одним з ключових понять якої стала негативна групова швидкість хвилі. Судячи з доступних в Інтернет публікацій, пальму першості в практичній постановці питання про існування хвиль з негативною груповою швидкістю слід віддати англійському фізику Артуру Шустеру (Franz Arthur Friedrich Schuster, 1851–1934). По суті, цей факт в своїй публікації [5] датованій 11 лютого 1904 р., відзначив англійський математик і гідродинамік Горацій Лемб (Horace Lamb, 1849 – 1934). За словами Г. Лемба, А. Шустер знайшов формальну можливість негативною групою швидкості електромагнітних хвиль, аналізуючи формулу з оптики, що стосується аномальної дисперсії світла. А. Шустер запропонував Г. Лембу перевірити гіпотезу про умови виникнення хвиль з негативною груповою швидкістю, що той і зробив з позитивним результатом, описаним в [5]. Таким чином, Г. Лемб з подачі

А. Шустера в 1904 р. вперше розглянув зворотні хвилі в механіці, що розповсюджуються в одному і двох вимірах. Отримавши аргументацію Г. Лемба [5], в тому ж 1904 р. А. Шустер узагальнив цю теорію на оптичні явища, вперше показавши в своїй книзі [6], що зворотні електромагнітні хвилі можливі при негативній груповій швидкості, а також, що на межі двох середовищ в одному з яких розповсюджується пряма хвиля, а в іншому – зворотна, виникає негативне заломлення (рис. 2 [6]). Так, дякуючи А. Шустеру, вказівка на можливість негативного заломлення вперше з'явилася у фізичній літературі. Проте при цьому не деталізувалося, якими могли бути характерні властивості відповідного середовища у разі його існування.

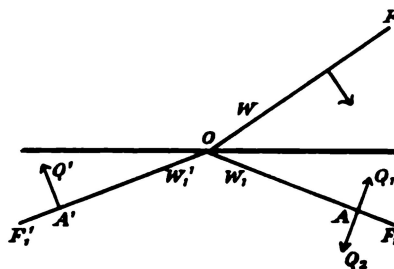


Fig. 179.

Рис. 2. Ілюстрація А. Шустера з книги [6], показує, що відхилення хвилі при вході в середовище з негативною груповою швидкістю відбувається на кут, більший кута падіння, убік, протилежний заломленню у звичайному середовищі (WF – фронт падаючої хвилі, $W_1'F_1'$ – фронт заломленої хвилі у звичайному середовищі, W_1F_1 – фронт заломленої хвилі у середовищі з негативною груповою швидкістю)

Як водиться, роботи [5, 6] не стали унікальними у своєму роді. Висновки Г. Лемба і А. Шустера про те, що негативна групова швидкість можлива через аномальну дисперсію хвиль підтвердив в 1905 р. Фон Лауе (Max Theodor Felix von Laue, 1879 – 1960). В тому ж році Поклінгтон (H.C. Rocklinton) в невеликій замітці ще раз показав, що в певному середовищі, де можлива зворотна хвиля, активізоване джерело коливань формує хвилю з груповою швидкістю, направленою від джерела, тоді як її фазова швидкість орієнтована йому назустріч.

В цілому ж, зважаючи на неочевидність практичного застосування зазначених ефектів, інтерес дослідників до них згас на кілька десятиріч, чітко визначивши рубіж між першим і другим етапами становлення теорії DNG.

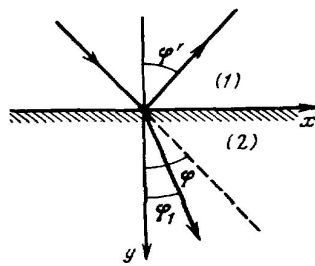


Рис. 12

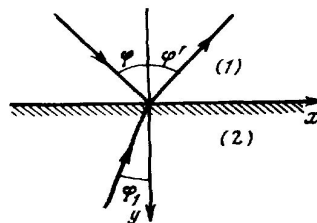


Рис. 13

Рис. 3. Ілюстрації Л. Мандельштама з книги [7]: рис. 12 – заломлення променя у звичайному середовищі, рис. 13 – у середовищі, де групова швидкість хвиль негативна

З появою в 40-х роках НВЧ-пристроїв, що використовують зворотні хвилі, більшість з вже ґрунтовно забутих положень теорії зворотних хвиль знов з'явилася у полі зору фізиків. Формальним початком другого етапу становлення теорії DNG-середовищ можна вважати лекції з оптики Л.Мандельштама (1879–1944) [7], датовані 1944 р. В них, слідом за А. Шустером, був більш детально розглянутий ефект зворотного розповсюдження хвиль і незвичайний закон заломлення при падінні хвилі з вільного простору в середовище, де

групова і фазова швидкості хвиль направлені назустріч одна одній. При цьому заломлений промінь відхиляється у протилежну сторону від нормалі, ніж при падінні на звичайне середовище, в якому ці швидкості співпадають за напрямом (рис. 3).

Вивчення зворотних хвиль в 1940-і роки минулого століття сприяло не тільки освоєнню їх практичного використання у лампах і антенах зворотної хвилі, але і сплеску в 1950-і роки теоретичного інтересу до розповсюдження зворотних хвиль у лініях передачі. Прикладом тому є робота Г. Д. Малюжинця [8], опублікована в 1951 р. В статті [9] Сивухін Д.В. (1914 – 1986) першим відзначив, що фазова і групова швидкості хвилі будуть направлені протилежно в середовищі з одночасно негативними ϵ і μ , тобто, по суті, в середовищі DNG. У розвиток цієї ідеї в 1959 р. В.Е. Пафомов теоретично довів можливість виникнення зворотних хвиль в середовищі з одночасно негативними ϵ і μ . В тому ж в 1959 р. Р.А. Сілін знов звернувся до ілюстрації закону заломлення променя в середовищі з негативною дисперсією, розглядаючи кристали із зворотними хвилями.

Найбільш розвинену теорію речовин з негативним коефіцієнтом заломлення, що має одночасно негативні значення діелектричної і магнітної проникностей, запропонував в [10], як це визнано зарубіжними ученими радянський фізик Віктор Георгійович Веселаго (народився 13.06.1929 на Україні). У серії своїх публікацій в 1960-х роках, Веселаго В.Г. обґрунтував можливість існування фізичних середовищ з негативним коефіцієнтом заломлення, що мають властивості, парадоксальні з буденної точки зору. Основоположна його стаття [10] містила теоретичний опис властивостей середовища, в якому ϵ , і μ були одночасно негативні, а також дослідження рішення рівнянь Максвелла для цього випадку (в англійському перекладі тексту, опублікованому в 1968 р., помилково заявлено, що перші результати за цією темою були видані в 1964 р.). При інтерпретації рівнянь Максвелла Веселаго вперше використовував як індекс заломлення n негативний квадратний корінь з добутку негативних величин $\epsilon\mu$, що стало досить несподіваним логічним прийомом. Відзначаючи гіпотетичність відповідного середовища, Веселаго вказав на безперечний факт, що його існування не виключається рівняннями Максвелла, і представив теоретичний аналіз процесу розповсюдження електромагнітних хвиль у подібних середовищах. З проведеного Веселаго аналізу виходило, що розповсюдження хвилі в середовищі з одночасно негативним ϵ , μ відрізняється від властивостей середовища з їх позитивними величинами.

Зокрема, в звичайних середовищах, коли $\epsilon > 0$, $\mu > 0$, електромагнітна хвиля має правосторонню орієнтацію трійки векторів H , E , k , які характеризують магнітну, електричну компоненти поля і напрям хвильового вектора k . У разі DNG-середовищ через взаємно протилежну орієнтацію векторів фазової швидкості (хвильового вектора k) і вектора Умова-Пойтінга вектори E , H і k формують лівосторонню систему координат.

Негативна величина індексу заломлення змінює геометричну оптику лінз та інших об'єктів, утворених з DNG-матеріалів. Наприклад, фокусуюча лінза в цьому випадку стає розсіюючою, і навпаки, відхиляюча двоввігнута лінза, зроблена з DNG-середовища, діє як фокусуюча. Крім того, Веселаго першим довів, що звичайна плоскопаралельна пластина з $n = -1$ може виступати в ролі збираючої лінзи. В його роботі [10] передбачені такі електромагнітні ефекти, що відбуваються в DNG-матеріалах, як: реверсивні зміни доплерівського зсуву частоти і ефекту черенковської радіації, обернення світлового тиску на світлове тяжіння. Суттєво, що ці явища не були доказові і очевидні на момент розробки теорії Веселаго через брак фізичної реалізації відповідного метасередовища. На жаль, зусилля В.Г. Веселаго і його колег з отримання матеріалу з негативним заломленням на основі магнітного напівпровідника $CdCr_2Se_4$ виявилися марними через істотні технологічні труднощі, що супроводжували синтез даної речовини. Ця невдача, а також систематичний пресинг з боку директора Фізичного інституту ім. П.Н. Лебедева Академії наук СРСР Д.В. Скобельціна, який звинувачував В.Г. Веселаго в заняттях псевдонаукою, надовго охолодили увагу дослідників до подібних проблем.

На рис. 4 стисло проілюстровано основні з розглянутих віх історії розвитку теорії DNG в рамках перших двох її етапів. Дана схема примітна тим, що під нею підписався і сам В.Г. Веселаго, тим самим виразивши свою згоду з публікаціями, які спростовували його пріоритет з низки ключових питань теорії DNG-середовищ.

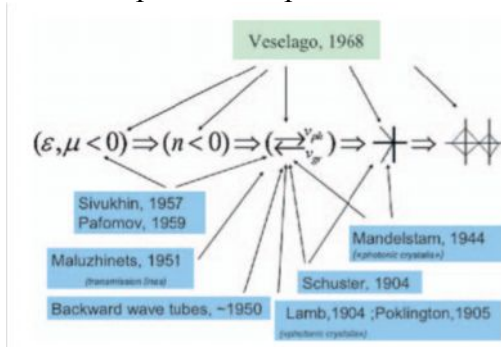


Рис. 4. Основні віхи перших двох етапів становлення теорії DNG

Проте, враховуючи значний внесок статті Веселаго [10] в теоретичне обґрунтування властивостей середовища з негативним заломленням, багато авторів іменують DNG-матеріали середовищем Веселаго (особливо у випадку $\epsilon = \mu = -1$), середовищем з негативною рефракцією або з негативним індексом заломлення (negative refractive index, NRI), а також „ліворукими” матеріалами (left-handed materials, LHM), зважаючи на відзначену в [10] лівобічну орієнтацію векторів електромагнітної хвилі.

Серед публікацій 1970-х років з теорії плоскопаралельних лінз, а також оптики DNG-середовищ необхідно відзначити роботи Р.А. Сіліна, в яких він описав оптичні властивості штучних діелектриків і дослідив особливості плоскопаралельної лінзи, виконаної з метаматеріала з негативним індексом заломлення.

Новим поштовхом до розвитку даного напрямку і початком сучасного, третього етапу у формуванні теоретичних уявлень про DNG-середовища послужила публікація Джона Пендрі (Pendry) [11], в якій було запропоновано використовувати конкретні штучно створені матеріали особливої конструкції, які мають негативні ефективні значення діелектричної і магнітної проникностей. Пендрі запропонував масово використовувати структури з мініатюрних розрізних кільцевих рамок, виконуючих роль магнітних диполів, і прямолінійних відрізків дроту.

В основі цього підходу лежить той факт, що якщо дискретні розсіюючі елементи, складові середовища, мають розміри, менші, ніж довжина хвилі випромінювання, то даний композит, з погляду електродинаміки, можна розглядати як безперервний в обмеженій смузі частот.

Іншими словами, фізичне середовище буде безперервним в електромагнітному сенсі, якщо його властивості можуть бути описані усередненими параметрами, що змінюються у масштабі, набагато більшому, ніж розміри та інтервал утворюючих матеріал компонентів.

Дивно, що Пендрі був лише в одному кроці від лежачої на поверхні ідеї поєднання форм розглянутих їм різновидів елементарних антен (рис. 5), пізніше опублікованої Девідом Смітом разом з колегами з Каліфорнійського університету в Сан-Дієго і запатентованої патентом [12].

Саме таке очевидне поєднання структурних елементів, що виходило з публікації Пендрі, дозволило у 2000 р. дослідницькій групі Девіда Сміта створити перший матеріал, який мав у сантиметровому діапазоні електромагнітних хвиль (4,2 – 4,6 ГГц) негативний коефіцієнт заломлення.

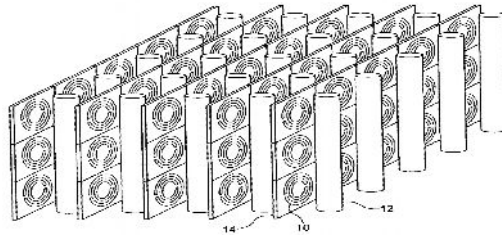


Рис. 5. Метаматеріал, запропонований в патенті [12], що вперше експериментально підтвердив ефект „ліворукості”

Цей штучний композитний матеріал складався з діелектричної основи, в якій розташовувалася множина мідних стрижнів і розрізних кілець, розташованих в строгому геометричному порядку. Стрижні, по суті, були антенами, що взаємодіяли з електричною компонентою електромагнітного поля, а розрізні кільця – антенами, реагуючими на магнітну складову. Основні розміри всіх елементів і відстань між ними були задані менше довжини хвилі, а вся система в цілому мала негативні ефективні значення ϵ і μ .

У роботі [13] був висловлений результат прямого виміру кута заломлення для призми, виготовленої з даного композиту. Експеримент, описаний в [13], переконливо показав що заломлення електромагнітної хвилі на межі вакууму і такого композитного середовища підкоряється закону Снелліуса з негативним значенням n . Тим самим можна вважати експериментально підтвердженими основні положення роботи [12]. Надалі ці експерименти були повторені незалежними групами дослідників з тим же позитивним результатом. Проте основними недоліками перших мета матеріалів, заснованих на використанні кільцевих і прямокутних SRR, є вузькосмуговість, високі рівні електромагнітних втрат, громіздкість і непрактичність для мікрохвильових технічних застосувань.

Для вирішення проблеми вузькосмуговості надалі було запропоновано багато варіантів магніточутливих елементів, що мають, зокрема форму грецької букви „омега”, спіралей. Суттєво, що проблема вузької смуги пропускання може до певної міри бути вирішена шляхом оптимізації геометричних розмірів SRR-резонаторів. Наприклад, для прямокутних SRR отримана ширина смуги пропускання 11,2 % у діапазоні частот 10,57 – 11,82 ГГц, що в 2,3 раз краще, ніж в первинному запропонованому варіанті. Для пошуку оптимальної комбінації геометричних параметрів використовувався вбудований в програмний пакет CST Microwave Studio (www.cst.com) НВЧ-оптимізатор.

Цілком очевидно, що надалі для оптимізації форми вказаних елементів доцільно використовувати генетичні алгоритми оптимізації, і відповідні роботи з'являться вже в найближчому майбутньому. Стосовно багаточастотних рішень є сенс використовувати замість розрізних кільцевих або квадратних рамок фрактальні рамки Серпінського, на основі ламаної Коха або інших фрактальних рішень. Аналогічні фрактальні конструкції слід задіяти і замість прямолінійних провідників.

Найбільш пристосованим для дослідження властивостей метаматеріалів із всіх пакетів моделювання антен на даний момент є пакет HFSS. З цієї причини моделювання електромагнітних властивостей нових метаматеріалів, використовуючих фрактальні елементи, доцільно проводити в програмній моделі HFSS.

Застосування DNG середовищ теоретично дозволяє підвищити роздільну здатність оптичних приладів, подолавши дифракційну межу. Використовуючи матеріали з $\epsilon < 0$ (і, по можливості $\mu < 0$), можна за рахунок плазмонного резонансу підсилити ближні (неоднорідні) хвилі, відповідальні за перенесення інформації про деталі, розміром багато менше довжини хвилі. Ідеальним для цього є середовище Веселаго, що має $\epsilon = \mu = -1$. Структури з одночасно негативними ϵ і μ мають цікаві, з погляду теорії, і корисні для практики властивості (розповсюдження зворотних електромагнітних хвиль, негативне заломлення, створення дійсного зображення плоскою пластинкою).

При розгляді ідеального метасередовища без втрат і частотної дисперсії мають місце істотне розширення смуги пропускання електрично малих антен (ЕМА) в порівнянні з межею Чу і більш низькі значення добротності, чим це слідує з його фундаментальної межі. Проте, перехід до реальних конструкцій метасередовищ з частотною дисперсійністю і втратами, приводить до катастрофічної деградації властивостей ідеальних антен з метаматеріалів. Тому основним завданням удосконалення метаструктур є синтез таких середовищ, які б мали мінімальні втрати і ледь помітні дисперсійні властивості.

На даному ж етапі основними напрямками застосування метаматеріалів в техніці антен є:

1) виготовлення підкладок в друкованих антенах для досягнення широкосмуговості і зменшення розмірів випромінювачів (MNG, DNG, CRLH);

2) компенсація реактивності ЕМА (ENG, DNG) в широкій смузі частот, у тому числі, перевищуючій фундаментальну межу Чу;

3) формування вузьких променів елементарними випромінювачами, зануреними в ENG або DNG середовища;

4) використання метаматеріалів для виготовлення антен поверхневої хвилі;

5) збільшення розв'язки між елементами антенних решіток, зокрема, МІМО-систем.

Розглянемо досягнуті при цьому результати докладніше, спираючись на характерні приклади конструктивного виконання відповідних метаантен.

Метаматеріали в конструкціях друкованих антен

Використання метаструктур як підкладки для друкованих мініатюризованих антен створює можливість подальшого скорочення розмірів випромінювачів, розширення їх смуги пропускання і підвищення ефективності випромінювання. Структура метаматеріалу, що утворює підкладку, може бути однорідною або композитною, утвореною з кількох типів середовищ. Так, у [14] описаний варіант використання однорідної MNG-підкладки, сформованої із занурених у діелектричну подушку розрізних квадратних рамок (рис. 6). Аналогічне рішення можливе і на основі DNG-середовища, в якому утворюючі елементи є осередками, приведеними на рис. 7.

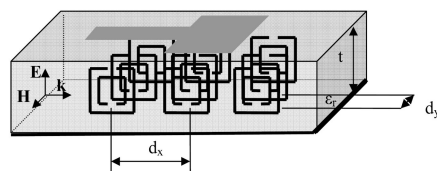


Рис. 6. Друкована антена з підкладкою з MNG [14]

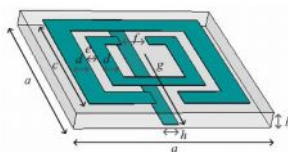


Рис. 7. Осередок DNG метаматеріалу

Серед композитних підкладок розповсюдження в антенах МІМО отримали структури, поєднуючі в собі правосторонні і лівосторонні сегменти. В числі привабливих властивостей таких гібридних рішень фахівці відзначають можливість реалізації в них частотно-регульованого коефіцієнта заломлення. Наприклад, в низькочастотному діапазоні композитний право-лівосторонній матеріал (CRLH Composite Right/Left-Handed) має негативний індекс заломлення, а при перевищенні деякої граничної частоти – позитивний. Підбором розмірів право- і лівосторонніх сегментів вдається регулювати резонансну частоту друкованої антени.

Одним з перших прикладів практичного використання метаматеріалів для серійного виготовлення друкованих антен є розробка фірмою Rayspan (<http://www.rayspan.com>) антенних решіток МІМО, використаних компанією Netgear в МІМО-маршрутизаторах WNR3500 і WNDR3300. Обидва маршрутизатори підтримують специфікації 802.11n Draft 2.0.

Деталі відповідних технічних рішень, що лягли в основу конструкції метаантен можна дізнатися з описів заявок фірми Rastrap на видачу американських патентів на винаходи [15], [16]. Суть їх полягає у використанні для виготовлення друкованої антени композитної структури CRLH на основі відрізка лінії передачі з негативним індексом заломлення, варіант якої приведений на рис. 8. Чисто зовні новий тип антен мало відрізняється від своїх друкованих прототипів, проте досягнуті результати розсіюють сумнівні скептиків в перспективності подібних рішень. Зокрема на основі метаструктур вдалося помітно зменшити габарити випромінювачів антенних решіток МІМО, що дозволило понизити їх взаємний вплив. Електрична довжина печатної метаантени може бути зменшена до $0,1\lambda$, що менше відомого обмеження в половину довжини хвилі. При цьому забезпечена робота в двох діапазонах частот (в районі 2,4 ГГц і 5,2 ГГц), а смуга пропускання антен збільшена на 15 %.

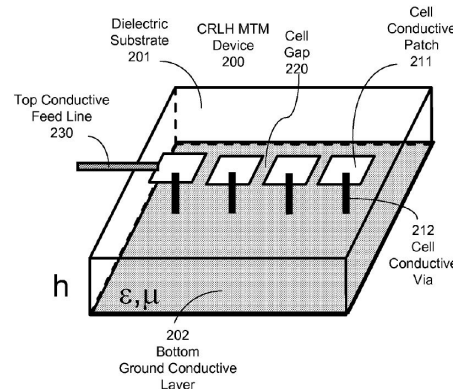


Рис. 8. CRLH –структура для антен МІМО

Метаоболонки для ЕМА

Згідно [17], основна ідея використання ENG-матеріалів в техніці електрично малих антен полягає в компенсації високої реактивної ємності ЕМА-диполя індуктивністю оточуючої його ENG-оболонки. При цьому товщина метаоболонки може бути менше сотих часток довжини хвилі у вільному просторі, що не призводить до помітних загасань електромагнітного поля. Як приклад розглянемо описану в [17] ідею інтеграції ENG-обтікача з класичним монополем, розташованим над плоским екраном і підключеним до коаксимального фідера, причому сам монополь знаходиться усередині півсферичного ковпака з ENG-матеріалу (рис. 9).

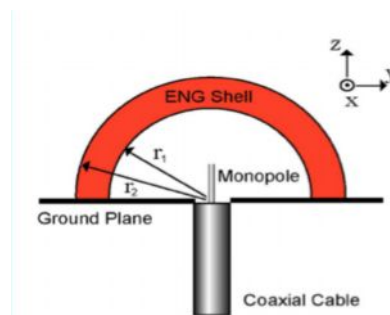


Рис. 9. Загальний вигляд конструкції ЕМА у складі монополя і ENG-оболонки [17]

Приведені в [17] результати моделювання свідчать, що у вказаній конструкції при резонансі відбувається збільшення випромінюваної монополем потужності, що становить у разі малих втрат 60 – 65 дБ порівняно з варіантом відсутності ENG-покриття. Сама по собі півсфера з ENG-матеріалу під впливом випромінювання монополя може розглядатися як електрично мала антена. Проте, цей елемент, через негативну діелектричну постійну діє як індуктивність, формуючи разом з ємнісним монополем LC-резонатор (рис. 10). Тому при фіксованій частоті резонансу із збільшенням модуля негативної діелектричної проникності ENG-середовища товщина оболонки повинна зменшуватися.

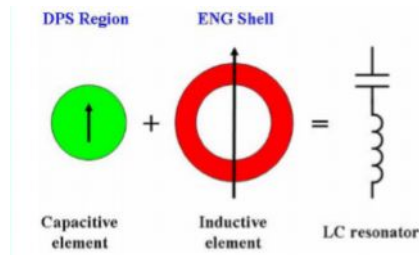


Рис. 10. Принцип компенсації реактивності ЕМА за допомогою метаоболонки [17].

Найважливішим висновком авторів [17] є твердження, що розглянута ЕМА, яка виконана з доступних метаматеріалів, має, тим не менш, виражені переваги над межею Чу. Зокрема, для використаних в розрахунках рівнів втрат і дисперсійності досягнута величина добротності Q в 1,583 рази перевищує межу Чу. Суттєво, що для ENG-матеріалу на резонансній частоті вдається добитися активного опору близько 50 Ом, майже нульової реактивності антени і ККД близько 98 – 99 %.

Аналогічна ідея може використовуватися і для випадку DNG-оболонки, які у порівнянні з ENG-покриттям дозволяють додатково зменшити розміри (товщину і радіус) оболонки. Пояснюється це тим, що використання середовища з $\mu < 0$ еквівалентно внесенню ємності послідовно з ємністю диполя, що зменшує результуючу ємність ЕМА і вимагає меншої за величиною компенсуючої індуктивності.

Підтвердженням ефектів, описаних в [17], є експериментальні результати [18], отримані для електрично малого диполя, зануреного в плазмовий розряд у газі. В описаному експерименті плазма формувалася у вакуумній трубці з безперервним розрядом на постійному струмі. При цьому було зафіксовано більш, ніж 100-кратне підвищення напруженості електричного поля передаючої електрично малої антени ($l/\lambda \ll 10^{-3}$), зануреної в плазму, в порівнянні з таким же диполем, що знаходиться у вільному просторі. Дане явище легко може бути пояснено з урахуванням розглянутих електродинамічних властивостей вібратора в оболонці з ENG структури.

Звуження діаграм випромінювання ЕМА

До теперішнього часу отримано достатньо багато експериментальних підтверджень ефекту виникнення направлених властивостей випромінювання елементарного монополя, поміщеного в DNG-середовище. В роботі [19] описаний один з таких експериментів зі зняття діаграми спрямованості вібратора, розташованого усередині метаматеріала, утвореного з розрізних квадратних рамок (SRR) і друкованих провідників. Метаматеріал демонстрував в обмеженому просторовому секторі негативний коефіцієнт заломлення в діапазоні 10,3 – 10,8 ГГц. Загальний вигляд схеми відповідної експериментальної установки приведений на рис. 11.

Метаматеріал (рис. 11) був сформований з двох типів друкованих плат квадратної форми (розміром 246×246 мм²). На платах першого типу розташований масив з 48 паралельних провідників шириною 0,5 мм і завдовжки 238 мм, слідує з інтервалом 5 мм. Плати другого типу містили матрицю квадратних SRR-елементів (геометрія окремо взятого SRR приведена на рис. 12). На кожній такій платі розташовувалося 2304 (48×48) SRR з взаємною дистанцією 5 мм.

В збірному стеку метаструктури вказані плати розташовувалися по чергові, паралельно одна одній, з взаємним інтервалом 2,5 мм. Загальна кількість плат з друкованими провідниками дорівнювала 49, а з квадратними рамками – 50. Чвертьхвильовий вібратор розміщувався паралельно друкованим провідникам усередині стека метасередовища над горизонтальним провідним екраном. Оцінка діаграм спрямованості проводилася шляхом обертання метаструктури навколо монополя.

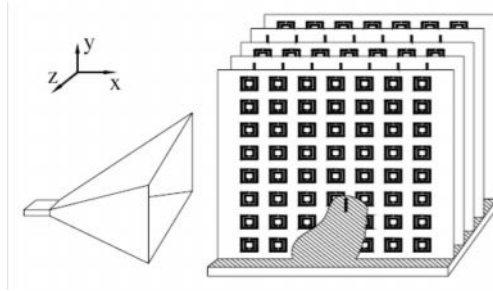


Рис. 11. Схема експерименту зі зняття діаграми спрямованості монополя, зануреного в DNG-середовище [19]

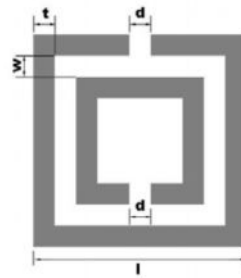


Figure 1. Single SRR with parameters $l = 3 \text{ mm}$, $d = t = w = 0.3 \text{ mm}$.

Рис. 12. Квадратний SRR, що використався для створення метасередовища [19], мав розміри $l = 3 \text{ мм}$, $d = t = w = 0,3 \text{ мм}$

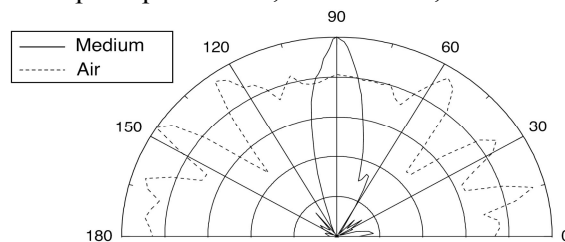


Рис. 13. Нормована діаграма спрямованості монополя в площині xz на частоті $10,6 \text{ ГГц}$ [19]

Результати виміру діаграми спрямованості вібратора у площині, паралельній горизонтально розташованому екрану ($x-z$), приведені на рис. 13. Пунктирна лінія відповідає вільно розташованому у просторі вібратору а суцільна лінія – випадку занурення монополя в метасередовище.

Необхідно відзначити, що для всебічного вивчення ефекту звуження діаграм спрямованості вібратора в метасередовищі розглянутий в [19] експеримент слід було б доповнити оцінкою залежності ширини діаграми спрямованості монополя від габаритів метаоболонки. Це дозволило б отримати однозначну відповідь на припущення, що кутові розміри діаграми спрямованості вібратора, оточеного метасередовищем, визначаються площею його розгортки. Крім того, для подібних випромінюючих структур потребує додаткової перевірки виконання теореми взаємності передаючого і приймального режимів роботи. Оскільки розглянутий метаматеріал складений з гомогенних періодичних структур ряд дослідників висунули гіпотезу, що плоска хвиля в режимі прийому може бути направлена метаоболонкою під іншим кутом, ніж в режимі передачі. Приклад порушення теореми взаємності відносно обтічника антени, виготовленого з метаматеріала, приведений в [20].

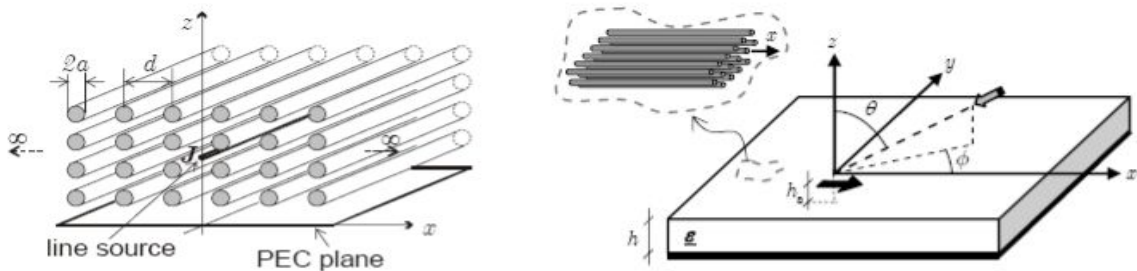


Рис. 14. Вібратор, вбудований в ENG-плиту [21]

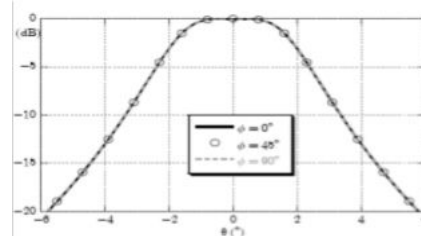


Рис. 15. Діаграма спрямованості вібратора у дротяній метапанелі [21]

Для звуження діаграми спрямованості елементарного випромінювача може застосовуватися також ENG-середовище. В [21] представлений огляд результатів дослідження особливостей діаграм випромінювання елементарного дротяного вібратора, вбудованого в метасередовище ENG-типу, яке утворене множиною паралельних провідників, розташованих над провідним екраном (рис. 14). Розрахунки поля в дальній області проводилися з допомогою методу моментів. Приклад різкого звуження діаграми спрямованості вібратора, зануреного в ENG-метасередовище, у разі його плазмової частоти 20 ГГц і частоти випромінювання 20,155 ГГц, приведений на рис. 15. Відповідне моделювання проводилося як для двовимірного, так і для тривимірного випадку. Висота метаструктури над екраном склала 60 мм, а джерело розташовувалося на відстані 30 мм від поверхні метапанелі.

На завершення слід зазначити, що аналіз відомих напрямів досліджень, що оформилися в даний час в теорії метаматеріалів, дозволяє спрогнозувати появу антенних конструкцій на основі активних і нелінійних метаструктур, теорію і технології яких ще належить розробити. Цілком імовірно, що в цей процес можуть бути залучені також хиральні метасередовища [22], матеріали з штучним магнітним і квадрупольним відгуком, метаматеріали з сильною просторовою дисперсією, за допомогою яких вже намагаються створювати оптичні прилади з розрізненням, перевищуючим дифракційну межу. Враховуючи успішний початок ери метаматеріалів в антенній техніці, що супроводжувався відкриттям цілої низки чудових ефектів, є підстави сподіватися, що розвиток цього технологічного напрямку стане не менше вражаючим.

ЛІТЕРАТУРА

1. Слюсар В. И. Антенны PIFA для мобильных средств связи: многообразие конструкций. //Электроника: наука, технология, бизнес. – 2007. – № 1. – С. 64 – 74.
2. Слюсар В. И. Фрактальные антенны. Принципиально новый тип “ломаных” антенн. //Электроника: наука, технология, бизнес. – 2007. – №. 5. – С. 78 – 83; 2007. – №. 6. – С. 82 – 89.
3. Слюсар В. И. Синтез антенн на основе генетических алгоритмов. //Первая миля. Last mile (Приложение к журналу „Электроника: наука, технология, бизнес”). – 2008. – № 6. – С. 2 – 11.
4. Rodger Walser. Metamaterials: What are they and what are they good for? //2000 March Meeting of the American Physical Society. – March 20 – 24, 2000. – Minneapolis, Minnesota. – <http://flux.aps.org/meetings/YR00/MAR00/abs/S9240.html>.

5. *Horace Lamb*. On group velocity.//Proc. London Math. Soc. 1. – 1904. – Pp. 473–479, http://www.hep.princeton.edu/~mcdonald/examples/mechanics/lamb_plms_1_473_04.pdf.
6. *Arthur Schuster*. An Introduction to the Theory of Optics. – Edward Arnold, London. – 1904. – Pp. 313 – 318.
7. *Мандельштам Л.* Лекции по некоторым вопросам теории колебаний (1944 г.). Четвертая лекция. // В кн. Мандельштам Л. Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механики. - М.: Наука, 1972. – С. 431 – 437.
8. *G. D. Malyuzhinets*. A note on the radiation principle.// Zhurnal Technicheskoi Fiziki, vol. 21, No. 8. - Pp. 940-942 (in Russian. English translation in Sov. Phys. Technical Physics), 1951.
9. *D.V. Sivukhin*, „The energy of electromagnetic waves in dispersive media,” *Opt. Spektrosk.*, vol. 3, pp. 308-312, 1957.
10. *Веселаго В.Г.* Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ϵ и μ // Успехи физических наук. – 1967.– Т. 92. – № 7. – С. 517 – 526.
11. *J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, W. J. Stewart*, Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena.// IEEE Trans. Microw. Theory Tech. – Vol. 47, No.11, 1999. – Pp. 2075 – 2084.
12. *Pat. USA № 6791432B2*. Int. Cl⁷. H01P 7/08, H01Q 15/10. Left Handed Composite Media. //David Smith, Sheldon Schultz, Norman Kroll, Richard A. Shelby. – Filed Mar. 16, 2001. – Date of Patent: Sep. 14, 2004.
13. *R. A. Shelby, D. R. Smith, S. Schultz*. Experimental Verification of a Negative Index of Refraction. //Science. – 6 April 2001. – Vol. 292. – No. 5514, pp. 77 – 79. – [http://people.ee.duke.edu/~drsmith/pubs_smith_group/Shelby_Science_\(2001\).pdf](http://people.ee.duke.edu/~drsmith/pubs_smith_group/Shelby_Science_(2001).pdf).
14. *A. Semichaevsky and A. Akyurtlu*. Homogenization of Metamaterial-Loaded Substrates and Superstrates for Antennas/ Progress In Electromagnetics Research, PIER 71, 129 – 147, 2007. – <http://ceta.mit.edu/PIER/pier71/08.07021001.S.Akyurtlu.pdf>.
15. *US Patent Application Publ. No. 2008/0258993 A1*. Int. Cl. H01Q 3/24, H01Q 1/38. Metamaterial Antenna Arrays with Radiation Pattern Shaping and Beam Switching.// Ajay Gummalla, Marin Stoytchev, Maha Achour, Gregory Poilasne. – Filed: Mar. 17, 2008. – Pub. Date: Oct. 23, 2008.
16. *US Patent Application Publ. No. 2008/0048917 A1*. Int. Cl H01Q 1/38, H01Q 9/04. Antennas Based on Metamaterial Structures.// Maha Achour, Ajay Gummalla, Marin Stoytchev. – Filed: Aug. 24, 2007. – Pub. Date: Feb. 28, 2008.
17. *Richard W. Ziolkowski*, and Aycan Erentok. Metamaterial-Based Efficient Electrically Small Antennas. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 54, No. 7, July 2006. – Pp. 2113 – 2130.
18. *Пахотин В.А.* Излучение электрически короткой антенны из ограниченного объема газоразрядной плазмы.// Письма в ЖТФ. – 2007, Том 33. – Вып. 8. – С. 22 – 29.
19. *Q. Sui, C. Li, L. L. Li, and F. Li*. Experimental Study of $\lambda/4$ Monopole Antennas in a Left-Handed Meta-Material.// Progress In Electromagnetics Research, PIER. – 2005. – No. 51. – Pp. 281–293. - <http://ceta.mit.edu/PIER/pier51/16.0401122.Sui.LL.pdf>.
20. *H. Cory, Y.J. Lee, Y. Hao and C.G. Parini*. Use of conjugate dielectric and metamaterial slabs as radomes. // IET Microw. Antennas Propag., Vol. 1, No. 1, February 2007. – Pp. 137 – 143.
21. *P. Burghignoli, G. Lovat, F. Capolino, D. R. Jackson, and D. R. Wilton*. Radiation from Elementary Sources in the Presence of Wire-Medium Slabs: Physical Mechanisms And Full-Wave Analysis. – http://www.elettromagnetismo.it/atti_rinem/2006S05A01.pdf.
22. *Lindell I.V., Sihvola A.H., Tretyakov S.A., Viitanen A.J.* Electromagnetic waves in Chiral and Bi-Isotropic Media. – London: Artech House, 1994.