УДК 623.438 : 621.396.96 : 620.22 doi:10.20998/2413-4295.2025.03.07

МЕТОДИКА АНАЛІЗУ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТА ОСНОВНИХ ТРЕНДІВ РОЗВИТКУ ЗАСОБІВ ЗМЕНШЕННЯ ПОМІТНОСТІ ОЗБРОЄННЯ ТА ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ

Ю. Г. ДАНИК[1], В. С. СТОГНІЙ[2], В. З. БАРСУКОВ[3], Я. А. КУРИПТЯ[3*]

[1] кафедра інформаційної безпеки, Навчально-науковий фізико-технічний інститут, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, УКРАЇНА
[2] ДУ "Інститут досліджень науково-технічного потенціалу та історії науки ім. Д.М. Доброва НАН України, Київ, УКРАЇНА
[3] відділ нанорозмірних вуглецевих матеріалів для акумулювання енергії, Інституту Сорбції та Проблем Ендоекології НАН України, Київ, УКРАЇНА
[*] e-mail: yarik_lg@ukr.net

АНОТАЦІЯ *Досліджені стан та тенденції розвитку методіцв і технологій, що знижують помітність озброєння та військової техніки, зокрема в умовах використання технічних засобів розвідки. Основні методи зменшення помітності включають використання радіопоглинальних матеріалів, а також оптимізовану геометрію конструкції (реальну сигнатуру) об'єктів, що сприяє відхиленню радіохвиль у напрямки, де ймовірність їх виявлення мінімальна. Також активно розвиваються технології активного маскування, зокрема системи введення в оману систем радіолокаційного виявлення та розпізнавання об'єктів. Технології радіолокації, які працюють на принципі активної, та напівактивної локації, використовуються для виявлення та отримання координатної та некоординатної інформації щодо різних об'єктів наземного, повітряного та надводного базування. Зниження ефективної площі розсіювання є важливими для зменшення помітності об'єкта на радарі ймовірності і дальності його виявлення. Метаматеріали, створені для маскування об'єктів шляхом поглинання, неспрямованого розсіювання електромагнітних хвиль, також розглядаються як перспективні засоби для значного зниження помітності та викривлення сигнатури засобів озброєння та військової техніки. Розвиток вуглецевих та магнітних матеріалів, а також наноматеріалів та адаптивних систем формує перспективу підвищення ефективності екранування радіохвиль. Радіопоглинальні матеріали використовують два основних механізми для зменшення відбиття: поглинання хвиль через матеріали та багаторазове внутрішнє відбиття хвиль. Технології зменшення помітності включають комплекс як матеріальних, так і конструкційних рішень, що забезпечують необхідний рівень маскування або зміни сигнатури об'єктів, зменшують дальність та ймовірність їх виявлення та розпізнавання. Окрім цього, у дослідженні проаналізовано фізичні основи процесів виявлення об'єктів різними типами радіолокаційних систем та показано вплив ефективної площі розсіювання на дальність детектування. Значну увагу приділено використанню вуглецевих, магнітних і полімерних композитів, які поєднують високу електропровідність і магнітну проникність, забезпечуючи ефективне екранування електромагнітного випромінювання в широкому діапазоні частот.*
Ключові слова: *озброєння; військова техніка; зменшення помітності; радіолокаційна сигнатура; радіопоглинальні матеріали; метаматеріали; маскування.*

METHODOLOGY FOR ANALYSING THE FEATURES AND MAIN TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF MEANS OF REDUCING THE VISIBILITY OF WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT

Yu. DANYK[1], V. STOGNIY[2], V. BARSUKOV[3], Ya. KURIPTYA[3*]

[1] National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky", Kyiv, UKRAINE
[2] State Institution "Institute for Research of Scientific and Technical Potential and History of Science named after D.M. Dobrov, NAS of Ukraine, Kyiv
[3] Department of Nanoscale Carbon Materials for Energy Storage, Institute for Sorption and Problems of Endoecology, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT *The state and trends in the development of technologies that reduce the visibility of weapons and military equipment, in particular in the conditions of using technical reconnaissance equipment are explored. The main methods of reducing visibility include the use of radio-absorbing materials, as well as optimized design geometry (real signature) of objects, which contributes to the deflection of radio waves in directions where the probability of their detection is minimal. Active cloaking technologies are also actively developing, in particular systems for misleading radar detection and object recognition systems. Radar technologies that operate on the principle of active and semi-active location are used to detect and obtain coordinate and non-coordinate information about various ground, air and surface-based objects. Reducing the effective scattering area is important for reducing the visibility of an object on the radar, the probability and range of its detection. Metamaterials designed to mask objects by absorbing and scattering electromagnetic waves are also considered promising tools for significantly reducing the visibility and distortion of the signature of weapons and military equipment. The development of carbon and magnetic materials, as well as nanomaterials and adaptive systems, creates the prospect of increasing the efficiency of radio wave shielding. Radio-absorbing materials use two main*

© Ю. Г. ДАНИК, В. С. СТОГНІЙ, В. З. БАРСУКОВ, Я. А. КУРИПТЯ, 2025

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

mechanisms to reduce reflection: absorption of waves by materials and multiple internal reflection of waves. Technologies for reducing visibility include a set of both material and structural solutions that provide the necessary level of masking or changing the signature of objects, reduce the range and probability of their detection and recognition. In addition, the study analyzed the physical foundations of the processes of detecting objects by different types of radar systems and showed the influence of the effective scattering area on the detection range. Considerable attention has been paid to the use of carbon, magnetic, and polymer composites that combine high electrical conductivity and magnetic permeability, providing effective shielding of electromagnetic radiation over a wide frequency range.
***Keywords**: weapons; military equipment; stealth; radar signature; radio-absorbing materials; metamaterials; camouflage.*

Вступ

Засоби зменшення помітності озброєння та військової техніки (ОВТ) мають важливе значення у сучасних умовах, особливо в оборонній сфері. Їх основною метою є зниження ймовірності виявлення об’єктів різноманітними засобами технічних видів розвідки: радарами, інфрачервоними сенсорами та іншими засобами спостереження, що дозволяє забезпечити їхню безпеку і ефективність при виконанні складних завдань. Зважаючи на постійний розвиток технологій, системи зниження помітності використовують різноманітні підходи для маскування об'єктів і забезпечують стратегічну перевагу на полі бою. Постійний розвиток технологій виявлення ОВТ спричиняє необхідність безперервного вдосконалення засобів зменшення їх помітності.

На сьогоднішній день можна виокремити низку методів, що застосовуються для зменшення помітності об'єктів при вирішенні задачі їх виявлення радарами, інфрачервоними сенсорами та іншими засобами спостереження [1,2]. Одним із таких методів є застосування радіопоглинальних матеріалів (РПМ - Radar Absorbent Materials), які знижують рівень відбитих радіохвиль, поглинаючи електромагнітне випромінювання в широкому діапазоні частот і перетворюючи його на тепло [3-5]. Це зменшує та/або змінює сигнатуру об'єкта для радарів та інших сенсорів. Матеріали, що використовуються для цього, можуть бути спеціальними композитами чи покриттями, наприклад, феритовими матеріалами [6,7].

Іншим підходом є спеціальна геометрія конструкції об'єкта, яка дозволяє зменшити кількість радіохвиль, що відбиваються назад до радара. Для цього використовуються форми, які нагадують багатогранники з нахиленими поверхнями, що дозволяє відхиляти радіохвилі в напрямки, де ймовірність їх перехоплення радарами зменшується. Такі форми суттєво зменшують радіопомітність об'єктів, наприклад, як у літаку F-117 Nighthawk [8].

Крім того, значно розвиваються технології активного маскування, які змінюють властивості об'єкта за допомогою сенсорів і ефектів, що допомагають приховати його від виявлення. Одним із прикладів є маскування в інфрачервоному спектрі випромінювання, що є важливою складовою даних технологій, оскільки знижує тепловий слід об'єкта, роблячи його менш помітним для інфрачервоних сенсорів. Для цього розробляються та використовуються спеціальні теплоізоляційні покриття або системи охолодження, які зменшують теплове випромінювання[9-13].

Активні системи глушіння (Jamming Systems) створюють радіоперешкоди, що заважають радарам точно виявляти об'єкт. Активна система глушіння передає сигнали на тій самій частоті, але з більшою потужністю, що перешкоджає точному виявленню. Такі системи можуть також створювати численні фальшиві відбиття, що вводять оператора у оману[14].

Системи "розсіювання" (Decoy Systems) створюють імітаційні сигнали або навіть фізичні об'єкти, щоб відволікти увагу від справжнього повітряного об'єкта. Це можуть бути дрони або аерозольні хмари, які створюють "псевдосигнали"[15,16].

Загалом, наведені нижче технології дозволяють значно знизити ймовірність виявлення повітряних об'єктів, забезпечуючи їх безпеку та ефективність у виконанні стратегічних місій.

Мета роботи

Аналіз особливостей і тенденцій розвитку технологій та засобів зменшення помітності озброєння і військової техніки в умовах сучасного розвитку радіолокаційних, інфрачервоних та інших систем виявлення.

Також до мети входить узагальнення фізичних принципів виявлення об’єктів, визначення основних методів зниження ефективної площі розсіювання (ЕПР) і дослідження властивостей радіопоглинальних матеріалів, мета- та нанокомпозитів, які можуть бути використані для створення ефективних засобів маскування й екранування у військових застосуваннях

Виклад основного матеріалу

Фізичні основи виявлення ОВТ. Існує кілька основних способів виявлення ОВТ. Широке розповсюдження мають засоби оптичної, оптико-електронної, інфрачервоної, акустичної, радіоелектронної, радіолокаційної та інших технічних видів розвідки. Найбільшого поширення отримала радіолокація, яка використовує відбиті об’єктом радіохвилі. Важливим є також застосування інфрачервоних сенсорів, які виявляють інфрачервоне випромінювання: тепловий слід або власне тепло, що мають об'єкти ОВТ завдяки їх двигунам та нагрітим поверхням. Оптичне спостереження з використанням різноманітних засобів включно приладів нічного

бачення на базі електронно-оптичних перетворювачів тощо застосовується для виявлення об'єктів ОВТ вдень і вночі. Додатково, існують системи акустичного виявлення, що здатні фіксувати звукові хвилі, що виникають від роботи двигунів об'єктів. Радарні або акустичні приманки, які створюють хибні сигнали, можуть відволікати увагу від реальних об'єктів. Спостереження із застосуванням засобів космічної розвідки та дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) дозволяє здійснювати моніторинг територій і об'єктів за допомогою радарних оптико-електронних та інших сенсорів з космосу. Для виявлення електронних систем використовуються методи радіоелектронного виявлення, а магнітні та електромагнітні детектори використовуються для відстеження змін в магнітному полі, викликаних об'єктами. Останнім часом також використовують радіоактивні детектори, які фіксують радіоактивне випромінювання, а акустичні датчики застосовуються для виявлення звукових хвиль, що генеруються літаками. Кожен з цих методів має свої переваги, залежно від умов, і може використовуватися в комплексі з іншими для досягнення високої ефективності виявлення.

Електромагнітне випромінювання. Переважна більшість сучасних систем виявлення озброєння та військової техніки функціонує на основі використання електромагнітного випромінювання. Електромагнітне випромінювання (ЕМВ) – це різновид енергії хвильової природи, яка виникає під час випромінювання чи поглинання заряджених частинок. Його можна уявити як поперечну хвилю, що поширюється у просторі (рис. 1). У сучасному світі поряд із природними джерелами з'явилися й штучні: електроприлади, мобільні телефони, супутники, а також радіо- й телевежі. У результаті навколо нас накопичується значна кількість штучного електромагнітного випромінювання, яке часто називають електромагнітним смогом або електромагнітними завадами (ЕМП).

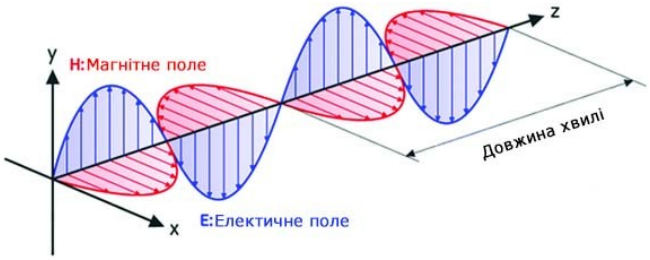

Рис. 1 – Схематичне зображення електромагнітної поперечної коливальної хвилі

Електромагнітне випромінювання від різних пристроїв може викликати завади в роботі електронних систем, що знижує їхню продуктивність і в окремих випадках навіть спричиняє вихід з ладу [17,18]. Важливою задачею також є зменшення радіолокаційної помітності військової техніки та спеціального обладнання [19]. Тому проблема захисту від впливу ЕМВ набуває особливої актуальності впродовж останніх десятиліть і розглядається як один із перспективних напрямів наукових досліджень.

Усі форми ЕМВ, від мікрохвиль до космічних променів, утворюють електромагнітний спектр. Цей спектр зазвичай впорядковується як функція його енергії, частоти або довжини хвилі в різних областях (рис. 2) Довжина хвилі (λ) — це відстань між двома суміжними вершинами, впадинами або точками перетину нуля двох послідовних хвиль. Енергія ЕМВ вимірюється в електрон-вольтах (еВ), а частота (f) — це кількість хвиль за секунду, і її можна обчислити за таким рівнянням (1):

$$f = \frac{c}{\lambda}, \qquad (1)$$

де c – швидкість світла у вакуумі (299792458 м/с).

Таким чином, для будь-яких електромагнітних хвиль частота і довжина хвилі обернено пропорційні.

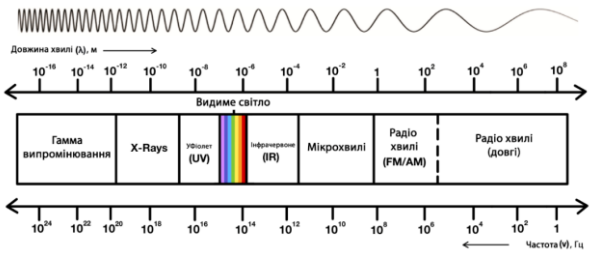

Рис. 2 – Електромагнітний спектр

Радарні технології. Термін RADAR (Radio detection and ranging) був запатентований у 1904 році Крістіаном Халсмейром. Радарні системи були розроблені під час Другої світової війни, і їх бурхливий розвиток триває до наших днів. Це електронна система, яка працює на основі принципу ехолокації, який використовують кажани для пересування або визначення місцезнаходження жертви. Кажани генерують звук, який поширюється в повітрі, доки не вдаряється об об'єкт, як-от каміння, комахи, дерева тощо, потім частина звуку повертається у формі відлуння, і кажан може почути його та використати для визначення розміру та відстані до об'єкту [20]. Подібним чином радарні системи генерують електромагнітні хвилі в потрібній зоні та отримують відбиті хвилі під час зіткнення з об'єктом, як показано на рис. 3. Радар вимірює інтервал часу між генерацією електромагнітних хвиль і поверненням відбитих хвиль на радар після зіткнення з ціллю.

Окрім виявлення об'єкта, радіолокаційні системи використовують відбиті хвилі, щоб надати більше інформації про ціль, наприклад дальність, швидкість, кутове положення, напрямок, розмір і форму. Основне радіолокаційне рівняння (2) [21]:

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

$$P_r = \frac{P_t G_t \sigma A_e}{(4\pi)^2 R^4}, \quad (2)$$

де P_r - віддана потужність, P_t – потужність передавача (Вт),G_t. - коефіцієнт підсилення переданої антени, A_e - апертура приймальної антени, σ - радіолокаційний переріз цілі ($м^2$), R - дальність між ціллю і радаром (м).

Рис. 3 – Принцип роботи радару, де чорні лінії – падаючі хвилі, що випромінює радар, а сірі лінії – відбиті хвилі від об'єкту спостереження

Діапазон R визначається рівнянням (3):

$$R = \frac{c\Delta T}{2}, \quad (3)$$

де *c* - швидкість світла; ΔT - час, що минув між генерацією електромагнітних хвиль і їх поверненням на радар після зіткнення з ціллю.

Смуги радіолокаційних частот. Після Другої світової війни для позначення діапазонів робочих частот радарів були введені певні літерні позначення. Перше стандартне літерне маркування, IEEE STD 521, було розроблено Інститутом інженерів з електротехніки та електроніки (IEEE, США) у 1976 році. Цей стандарт класифікує радіолокаційні системи за довжиною їх хвилі або частотним діапазоном, на якому вони працюють, як показано в таблиці 1. Кожен діапазон має свої особливості, і літери використовуються для позначення характеристик радара, оскільки його робоча частота має значний вплив на його функціонування [22-24]. Міжнародний союз електрозв'язку (ITU) також визначає додаткові позначення для діапазонів частот, які в більшості випадків відповідають стандарту IEEE. Залежно від наданої інформації радаром щодо цілі, його застосування для пошуку/виявлення, відстеження на землі, під землею, на морі, в повітрі та навіть у космосі є надзвичайно широким [25].

Радари можна класифікувати за їх застосуванням, тобто вони використовуються для виявлення, моніторингу погоди, картографування тощо, або за частотами, на яких вони працюють, як показано на рис. 4, де зображено різні типи радарів відповідно до їхньої робочої частоти, яка може коливатися від 30 МГц до 110 ГГц або вище.

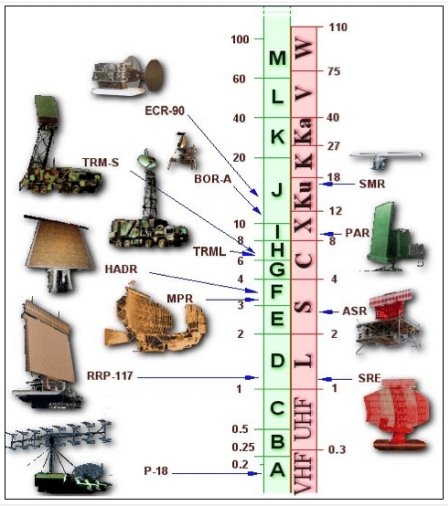

Рис. 4 – Приклади радарів відповідно до їх робочих частот [26]

Радіолокаційна помітність. Ефективна площа розсіювання (Radar Cross-Section, RCS, ЕПР) σ($м^2$), віртуальний розмір об'єкта або цілі, як його бачить радар, є основним параметром виявлення на радіолокаційних частотах. Детальне дослідження ЕПР розпочалося на початку 1930-х років, незабаром після винаходу радара [27-29]. ЕПР вимірює інтенсивність хвиль, що повертаються до радара після відбиття від об'єкта або цілі. ЕПР (σ) можна обчислити в квадратних метрах за допомогою рівняння (4):

$$\sigma = \lim_{R\to\infty} 4\pi R^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2}, \quad (4)$$

де E_s – розсіяне електричне поле, а E_i – це падіння поля на ціль. ЕПР можна виразити в децибелах відносно одного квадратного метра (дБквм) за допомогою такого виразу (5):

$$\sigma_{(dBsm)} = 10\log_{10}\frac{\sigma_{м^2}}{\sigma_R} = 10\log_{10}\frac{\sigma_{м^2}}{1м^2}. \quad (5)$$

У рівнянні (4) σ_R ЕПР еталонного об'єкта з площею, що дорівнює $1м^2$. Згідно з наведеним вище рівнянням, значення ЕПР для деяких цілей, таких як кораблі, становить близько 40 дБквм (10 $000м^2$), 0 дБквм ($1м^2$) для людей і −20 дБквм ($0{,}01м^2$) для птахів [30] (рис. 5).

Типові значення ЕПР певних об'єктів або цілей, таких як літаки та кораблі, відповідно до рівнянь (3) і (4) наведено на рисунку 3. Якщо ЕПР низький, то ймовірність виявлення противником під час бойового завдання також низька, а здатність проникнення на територію противника висока. І навпаки, високий ЕПР означає, що об'єкт або ціль, ймовірно, будуть виявлені радаром. Фактори, що впливають на ЕПР об'єкта або цілі, включають[31]: розмір цілі (причому більша ціль має більший ЕПР); матеріал конструкції (і, отже, відбивну здатність цілі); геометричну форму цілі, яка

може бути спроектована таким чином, щоб запобігти відбиванню хвиль у бік системи виявлення. Серед усіх описаних вище факторів ретельний вибір матеріалів для виготовлення є найбільш ефективним способом зменшення ЕПР.

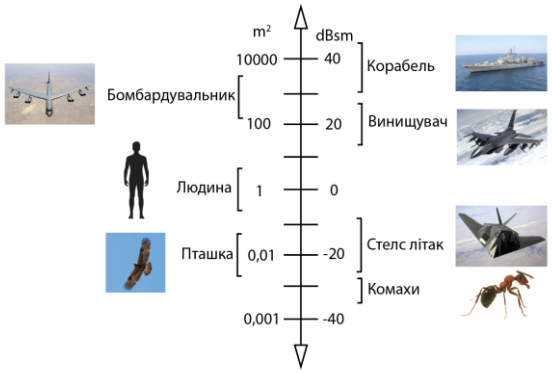

Рис. 5 – Приклади деяких значень ЕПР

Високий ЕПР означає вищу ймовірність того, що об’єкт буде виявлено радаром. Фактори, що визначають величину ЕПР, включають [32] цільові характеристики та характеристики сигналу. До цільових характеристик відносять розмір і геометрична форма цілі, матеріал з якого вона зроблена. Більша ціль матиме більший ЕПР. Цілі можуть мати геометричні форми, які дозволяють радіолокаційному сигналу не відображатися в системі виявлення. Конструкційний матеріал цілі суттєво впливатиме на відбивну здатність радіолокаційного сигналу. Наприклад, металеві та високо-електропровідні конструкції повністю відбивають сигнали, генеруючи більшу ЕПР. Не менш важливим для виявлення цілі є характеристики сигналу, а саме частота, кути падіння та відбиття сигналу. Низькочастотне розсіювання - це збудження дипольних моментів падаючою хвилею, яке залежить від об'єму мішені, а не від її геометричної форми. Навпаки, на високих частотах падаючі хвилі збуджують струми на поверхні мішеней, і їх відгук залежить від структури мішені. Кут падіння залежатиме від орієнтації радіолокаційного джерела та форми цілі. З іншого боку, кут відбиття, пов’язаний з кутом падіння, це кут, під яким відбиті хвилі відбиваються від цілі.

Основними методами зниження ЕПР на сьогодні є проектування форми об’єкту, використання радіопоглинаючих матеріалів, розсіювальних матеріалів, активне та пасивне маскування.

Методи зменшення помітності озброєння та військової техніки. Зменшення помітності озброєння та військової техніки реалізується за рахунок комплексу stealth-технологій. Основними методами є застосування радіопоглинаючих матеріалів, які знижують рівень відбитого електромагнітного випромінювання, та геометричне формування поверхонь, що забезпечує розсіювання сигналів у простір, а не їх повернення до радара. Окрему увагу приділяють сучасним підходам, серед яких активне маскування, що передбачає генерацію сигналів або застосування адаптивних покриттів для імітації фонового середовища та ускладнення виявлення техніки, а також пасивне гасіння електромагнітного випромінювання, яке базується на зниженні рівня власних вторинних випромінювань об’єкта завдяки спеціальним матеріалам та конструктивним рішенням. Сукупність перелічених заходів забезпечує суттєве зниження ймовірності виявлення військових об’єктів у широкому спектрі діапазонів спостереження та підвищує їхню ефективність у сучасних умовах ведення бойових дій.

Механізм поглинання радіолокаційних хвиль. РПМ використовують два механізми для зменшення або усунення відбитих хвиль. Перший механізм полягає у поглинанні електромагнітної хвилі матеріалами, що зменшує її інтенсивність за рахунок діелектричних, резистивних та/або магнітних втрат і, зрештою, перетворює її на теплову енергію. Другий механізм – це багаторазове внутрішнє відбиття падаючої хвилі від задньої та передньої внутрішніх поверхонь матеріалу [33-36]. Ці механізми схематично показані на рис. 6. Коли електромагнітна хвиля падає на плоску поверхню РПМ, поперечна електрично (ТЕ) поляризована хвиля (R_{TE}) дорівнює квадрату величини коефіцієнта відбиття (r) і визначається рівнянням (6) [37]:

$$R_{TE} = |r_{TE}|^2 = \left|\frac{\cos\theta - \mu_r^{-1}\sqrt{n^2 - \sin\theta^2}}{\cos\theta + \mu_r^{-1}\sqrt{n^2 - \sin\theta^2}}\right|^2, \qquad (6)$$

де ε_r і μ_r — відносна комплексна проникність і магнітна проникність матеріалу з втратами відповідно, а θ — кут падіння.

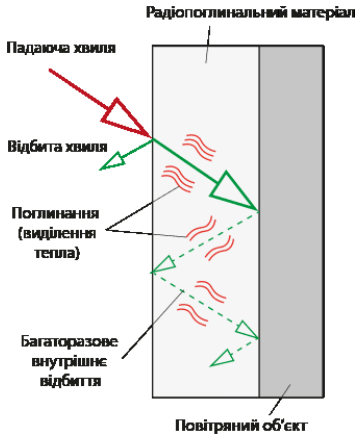

Рис. 6 – Механізм захисту від радіолокаційних хвиль у РПМ

Аналогічно, відбивна здатність поперечної магнітної (ТМ) і поляризованої хвилі (R_{TM}) також дорівнює квадрату величини r і визначається рівнянням (7):

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

$$R_{TM} = |r_{TE}|^2 = \left|\frac{\varepsilon_r \cos\theta - \mu_r^{-1}\sqrt{n^2 - \sin\theta^2}}{\varepsilon_r \cos\theta + \mu_r^{-1}\sqrt{n^2 - \sin\theta^2}}\right|^2, \quad (7)$$

При нормальному падінні відбиття хвиль TE і TM зменшується, як показано в рівнянні (8):

$$R = \left|\frac{\mu_r - n}{\mu_r + n}\right|^2, \quad (8)$$

Крім того, можна використовувати поглинальну здатність (A), розраховану за формулою (9):

$$A = 1 - R = -\left|\frac{\mu_r - n}{\mu_r + n}\right|^2, \quad (9)$$

Як правило, характеристики електромагнітного поглинання можна охарактеризувати за допомогою хвилеводу, коаксіальної лінії та методів вільного простору. Значення ϵ_r та μ_r для даного матеріалу можна отримати за допомогою векторного аналізатора мереж на основі випробуваних параметрів розсіювання. Відповідно до теорії ліній передачі, втрати на відбиття (RL) можна розрахувати за допомогою рівняння (10):

$$Z_{in} = Z_0\sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}}\tanh\left[j\left(\frac{2\pi f d}{c}\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}\right)\right], \quad (10)$$

де Z_{in} — імпеданс поглинача, що визначається рівнянням (11):

$$RL\ (dB) = 20\ \log\left|\frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0}\right| \quad (11)$$

де f і d — відповідно частота мікрохвиль і товщина, а c — швидкість світла.

Водночас Z_0 — імпеданс вільного простору (≈377 Ом), який визначається рівнянням (12):

$$z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \approx 377\Omega, \quad (12)$$

де ε_0 і μ_0 — відносна комплексна проникність і магнітна проникність вільного простору відповідно.

Оскільки імпеданс (Z_{in}) металевого літака близький до нуля, сигнал, що потрапляє на металеву поверхню, в основному відбивається. Водночас енергія, що поглинається РПМ, залежить від товщини покриття, кута падіння хвилі та специфічних властивостей матеріалу. Отже, РПМ повинен мати імпеданс, близький до імпедансу повітря, і повинен бути здатний швидко поглинати енергію електромагнітного випромінювання, коли воно проходить через матеріал. Для досягнення цієї мети поверхня літака повинна бути покрита діелектричними або магнітними матеріалами.

Ефективність захисту від електромагнітного випромінювання. Ефективність захисту (SE) - це відношення енергії падаючого випромінювання до залишкової енергії, що проходить крізь захисний матеріал. SE зазвичай виражається в децибелах (дБ) та розраховується за наступною формулою (13):

$$SE = 10\log\left|\frac{P_I}{P_T}\right| = 20\log\left|\frac{E_I}{E_T}\right| = 20\log\left|\frac{H_I}{H_T}\right|, \quad (13)$$

де P, E і H представляють напруженість поля плоскої хвилі, напруженість електричного і магнітного полів відповідно. Індекс I – падаюча хвиля, а T – хвиля, що проходить [38].

Електромагнітні перешкоди виникають у широкому діапазоні частот — від 10^4 до 10^{12} Гц. Зі зростанням показника ефективності захисту (SE) зменшується частка енергії, яка проходить крізь екранувальний матеріал. Вважається, що рівень SE у межах 10-30 дБ є мінімально необхідним для забезпечення ефективного екранування в більшості практичних застосувань. Матеріали, здатні забезпечити SE 30 дБ, блокують близько 99,9% падаючого випромінювання, що відповідає вимогам більшості промислових та комерційних сфер [39]. Водночас навіть матеріали з показником SE ≥ 20 дБ можуть знижувати інтенсивність електромагнітного випромінювання приблизно на 99% [40].

SE в дБ є сумою коефіцієнтів відбиття (SE_R), поглинання (SE_A) та багаторазового відбиття (SE_{MR}) електромагнітних хвиль (14):

$$SE = SE_R + SE_A + SE_{MR}. \quad (14)$$

Для визначення ефективності екранування матеріалів застосовуються різні підходи, серед яких теорія плоских хвиль, методи аналізу екранування в ближньому полі, моделі з використанням металевої фольги, оцінка впливу низькочастотних магнітних полів, а також метод параметрів розсіювання. Найбільш поширеним підходом є саме теорія плоских хвиль, яка дозволяє оцінити значення SE залежно від електрофізичних характеристик та товщини матеріалу [41]. Згідно з цією теорією, величина відбиття визначається різницею між хвильовим імпедансом падаючої електромагнітної хвилі та імпедансом екранувального матеріалу й може бути розрахована за наступним співвідношенням (15):

$$SE_R = 20\log\left|\frac{Z_0}{4Z_s}\right|, \quad (15)$$

де Z_0 – ім.педанс падаючої хвилі, а Z_S – імпеданс захисного матеріалу.

На основі рівняння (15) можна зробити висновок, що здатність екрану відбивати електромагнітні хвилі зростає зі зменшенням його власного імпедансу та підвищенням імпедансу хвилі. Величина імпедансу електромагнітної хвилі визначається частотою випромінювання, відстанню до джерела та характеристиками самого випромінювача. Загалом імпеданс хвилі може бути охарактеризований

як високий або низький. Оскільки навіть матеріали із середньою електропровідністю зазвичай мають низьке значення екранного імпедансу, більшість провідникових матеріалів виявляють високу ефективність у відбитті електромагнітного випромінювання.

Для поглинання та багаторазового відбиття виведені наступні рівняння (16, 17):

$$SE_A = 20\log^{\frac{t}{\delta}}\left|\frac{Z_0}{4Z_s}\right|, \quad (16)$$

$$SE_{MR} = 20\log\left(1 - e^{\frac{-2t}{\delta}}\right)\left|\frac{Z_0}{4Z_s}\right|. \quad (17)$$

У цих рівняннях t – це товщина захисного матеріалу, а δ – скін глибина.

Очевидно, що зі збільшенням товщини екранувального матеріалу підвищується ефективність поглинання електромагнітних хвиль. Водночас у тонких екранах, для яких $t < \delta$, ефект багаторазового відбиття має негативний характер, оскільки знижує загальну ефективність захисту. Вплив багаторазового відбиття стає незначним і ним зазвичай нехтують у випадках, коли втрати на поглинання SE_A перевищують 10 дБ, що характерно для дуже високих частот (~ГГц або навіть вище) [42].

Як зазначалося раніше, імпеданс електромагнітної хвилі Z визначається як відношення амплітуд електричної та магнітної складових поля (18):

$$Z = \frac{|E|}{|H|} = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\varepsilon}}, \quad (18)$$

де ω - кутова частота випромінювання, μ - магнітна проникність, σ - електрична провідність і ε - діелектрична проникність середовища.

У випадку поширення електромагнітної плоскої хвилі у вакуумі або у вільному просторі, де σ = 0, рівняння (18) набуває наступного вигляду:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{0 + j\omega\varepsilon}} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}. \quad (19)$$

Для провідних матеріалів $\sigma \gg \omega\varepsilon$, отже, імпеданс захисного матеріалу Z_S можна обчислити з рівняння (18), де f – частота падаючої електромагнітної хвилі (20):

$$Z_S = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + 0}} = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} = \sqrt{\frac{2\pi f\mu}{\sigma}}. \quad (20)$$

Ефективність захисту від електромагнітного випромінювання за рахунок відбиття та поглинання можна описати як:

$$SE_R = 39{,}5 + 10\log\frac{\sigma}{2\pi f\mu}, \quad (21)$$

$$SE_A = 8{,}7\frac{t}{\delta} = 8{,}7t\sqrt{\pi f\mu\sigma}. \quad (22)$$

Виходячи з вище наведених формул, можна стверджувати, що ефективність поглинання ЕМВ є функцією σμ, тоді як відображення ЕМВ залежить від співвідношення обох параметрів σ/μ [43]. Таким чином високопрохідні матеріали екранують ЕМВ [44]. Тоді як, магнітні матеріали з проникністю μ > 1 в значній мірі поглинають ЕМВ.

Ефективність екранування за рахунок відбиття зменшується зі збільшенням частоти, що еквівалентно -10 дБ на кожну декаду частоти. Наприклад, ефективність захисту електропровідного матеріалу з міді на частоті 1 кГц становить 138 дБ. Проте зі збільшенням частоти до 10 МГц ефективність екранування падає до 98 дБ. З іншого боку, ефективність захисту поглинанням зростає зі збільшенням частоти відповідно до графічної залежності √f на децибелах. Однак ситуація відрізняється для композитних матеріалів з гетерогенною структурою, в яких залежно від частотного діапазону може виникати поляризація матриці, провідного наповнювача і міжфазна поляризація [45]. Ці поляризаційні ділянки призводять до утворення локальних полів і відставання струму зміщення від струму провідності [46]. Наповнювачі і матриці мають різні електромагнітні властивості. Тому механізми захисту від електромагнітного випромінювання можна зрозуміти, вимірявши діелектричні (відносна комплексна діелектрична проникність εr = ε′ - jε″) і магнітні (відносна комплексна магнітна проникність μr = μ′ - jμ″) властивості захисних матеріалів. Параметр ε′ (дійсна діелектрична проникність або діелектрична проникність) відображає здатність накопичувати електричний заряд, тоді як ε″ (уявна діелектрична проникність) вказує на діелектричне розсіювання або втрати. Аналогічно, μ′ і μ″ представляють магнітну ємність і втрати відповідно. Величину втрат можна обчислити за тангенсом кута нахилу діелектричних втрат і магнітних втрат [47].

Діелектрична проникність і проникність є важливими параметрами, які впливають на ефективність захисту від ЕМ. Комплексна діелектрична проникність складається з дійсної складової ε′ та уявної складової ε″. Реальна діелектрична проникність наповнених композитів є мірою кількості мікроконденсаторів і центрів поляризації. Вона пов'язана зі струмом зміщення і в основному залежить від поляризації (локалізованих зарядів) всередині матеріалу, а також корелює з накопиченням електричного заряду в композиті. На уявну діелектричну проникність, яка пов'язана з розсіюванням електричної енергії (діелектричні втрати), в основному впливає іонна, орієнтаційна (орієнтація диполя), електронна і міжфазна поляризація. Іонна та орієнтаційна поляризація пов'язана зі зв'язаними зарядами в матеріалі. Міжфазна поляризація виникає за рахунок

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

просторових зарядів, які накопичуються через різницю в електропровідності/діелектричній проникності на межі поділу двох різних матеріалів [48]. Підвищена діелектрична проникність композитів може збільшити внесок діелектричних втрат через різницю в провідності між непровідною полімерною матрицею і провідним наповнювачем. Через таку невідповідність електропровідності між матрицею і наповнювачем, композитні матеріали можуть мати поляризацію і накопичення заряду на їхніх границях розділу. Таким чином, полімерні композити з високими діелектричними властивостями можуть бути добрими поглиначами електромагнітного випромінювання. У нанокомпозитах провідні мережі нанонаповнювачів діють як розсіювачі рухомих носіїв заряду. Збільшення кількості провідних сіток в результаті збільшення вмісту наповнювача може призвести до підвищення уявної діелектричної проникності і, зрештою, до більшого розсіювання EMI шляхом поглинання [49]. Відповідно до теорії вільних електронів, уявна діелектрична проникність або діелектричні втрати визначаються $\varepsilon'' = \sigma/2\pi\varepsilon_0 f$, що вказує на те, що збільшення провідності призводить до збільшення уявної діелектричної проникності. На противагу цьому, діелектричні втрати зменшуються зі збільшенням частоти. Залежність діелектричного відгуку від частоти можна пояснити наявністю електричних диполів. Коли частота прикладеного поля зростає, диполі, присутні в системі, не можуть переорієнтуватися достатньо швидко, щоб реагувати на прикладену електричну напругу, що призводить до зменшення діелектричних втрат [50]. Іонна та електронна поляризація відіграють роль лише на дуже високих частотах (понад 1000 ГГц). Таким чином, їхні ефекти можна ігнорувати в області низьких мікрохвильових частот. Дипольна поляризація зумовлена, головним чином, наявністю дефектів, пустот і залишкових груп у матеріалі, і на неї впливають, головним чином, виробничий процес, тип матеріалу і температура відпалу. Поляризаційна здатність композитів також може бути покращена за рахунок орієнтації та типу наповнювачів у матриці [51].

Іншим важливим параметром є проникність матеріалу. Матеріали з високою проникністю або магнітними втратами є хорошими матеріалами для захисту шляхом поглинання. Проникність деяких матеріалів змінюється зі зміною інтенсивності, температури і частоти прикладеного магнітного поля. Загальна EMI SE також залежить від частоти випромінювання. Було показано, що захисна здатність шляхом поглинання зростає зі збільшенням частоти випромінювання. Магнітні втрати складаються з втрат на гістерезис, втрат на доменну стінку, втрат на вихрові струми і залишкових втрат. Втрати на гістерезис виникають через гістерезис (відставання вектора намагніченості M від вектора магнітного поля H), коли магнітна енергія розсіюється у вигляді тепла [52]. Втратами на вихрові струми можна знехтувати для високопровідних матеріалів, і вони залишаються постійними зі зміною частоти. Магнітні втрати також виникають через природний резонанс і обмінний резонанс. Природний резонанс зазвичай відбувається на низьких частотах, а нанорозмірні частинки підсилюють обмінний резонанс. Магнітні метали та їхні сплави (Fe, FeCo, FeNi) мають високу намагніченість насичення і хорошу проникність. Однак їх провідна поведінка генерує втрати на вихрові струми, що призводить до зниження проникності на низьких частотах (зазвичай в діапазоні МГц). З іншого боку, ферити належать до напівпровідникових матеріалів і мають набагато нижчу намагніченість насичення. Таким чином, природний феромагнітний резонанс має місце в діапазоні низьких ГГц. Описані вище аспекти обмежують їх використання в діапазоні високих частот до максимальних об'ємних феромагнітних матеріалів. Для подолання цієї проблеми дослідження були зосереджені на нано- та мікророзмірних матеріалах, оскільки низькорозмірні матеріали зменшують втрати на вихрові струми. Також можна стверджувати, що високоефективні магнітні поля сприяють більшому поглинанню EMI у вищому діапазоні частот. Ефективність захисту поглинанням покращується з меншим значенням μ' (магнітне накопичення) порівняно з μ'' (магнітні втрати) [53].

Як правило, крім товщини екрануючого матеріалу, на SE впливають ще кілька факторів, включаючи електропровідність, проникність, діелектричну проникність, вміст, розмір, форму, співвідношення сторін і морфологію наповнювача/наповнювачів, що застосовуються. Серед них електропровідність є одним з ключових параметрів для ефективних екрануючих матеріалів [54]. Загалом, електропровідність композитів зростає зі збільшенням кількості провідного наповнювача, включеного в полімерну матрицю. Зі збільшенням вмісту наповнювача утворюється взаємопов'язана мережа наповнювачів у полімерній матриці, що призводить до різкого збільшення електропровідності. Таким чином, вміст і форма наповнювача є найважливішими факторами, що впливають на електропровідність композитів. На відміну від наповнювачів сферичної форми, включення волокнистої або трубчастої форми з високим співвідношенням сторін можуть легше з'єднуватися між собою при диспергуванні в полімерній матриці при більш високих концентраціях, утворюючи просторову сітчасту структуру наповнювача, що призводить до значного збільшення електропровідності. Геометричні характеристики і структура наповнювача, такі як розмір частинок, питома поверхня, схильність до агрегації або агломерації, також відіграють важливу роль у формуванні провідної мережі і загальних характеристиках SE. Питома поверхня і, отже, схильність наповнювача до агрегації збільшуються зі зменшенням розміру частинок. Наповнювачі з

високою структурованістю, наприклад, сажа, можуть легше формувати провідну мережу наповнювача в полімерних матрицях.

1. Цільове формування геометричних параметрів літального об'єкту. Формування геометричних параметрів літального об'єкту можна розглядати як перший крок для зменшення RCS. Основною метою формування є орієнтація поверхні конструкції та створення кутів для розсіювання падаючих хвиль у напрямках від радарного кута виявлення [55]. Практичними прикладами технічної реалізації формування цілі є літак F-117 або ВМС США Sea Shadow, обидва з яких містять набір панелей, правильно орієнтованих для мінімізації внеску в радіолокаційне відлуння, як схематично показано на (рис. 7) [56].

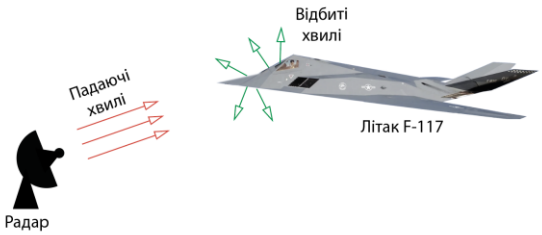

Рис. 7 – Розсіювання падаючих радіолокаційних хвиль на літаку F-117[21]

Цільове формування може бути реалізовано в транспортних засобах на етапі проектування, однак, важко або дорого реалізувати для транспортних засобів, які вже виробляються або побудовані, оскільки конструкція або конфігурація були оптимізовані для конкретних цілей; зміна дизайну після виробничого процесу може поставити під загрозу здатність літального апарату виконувати свою місію.

2. Активне маскування. Поперечний переріз радіолокаційного сигналу (РЛС) є критичним параметром для оцінки мало помітності літаючого об'єкту. Хоча РЛС є важливим параметром цілі, вона безпосередньо не вказує на ймовірність виявлення, коли ціль піддається впливу пошукового радара [27,57,58]. Радарне виявлення принципово являє собою ймовірнісну проблему, а коливаючі значення РЛС цілі вимагають ймовірнісного опису ефективності виявлення цілі. Динамічні характеристики РЛС цілі підкреслюють, що виявлення відбувається в реальних умовах, де на відлуння цілі впливає як її рух (включаючи поступальний та мікрорух), так і її кут положення, що змінюється в реальному часі, відносно падаючої хвилі [59,60]. Тому побудова сигналу відлуння цілі повинна враховувати динамічні характеристики РЛС цілі.

Ефективним методом отримання характеристик флуктуацій ЕПР цілі є вимірювання. Однак цей підхід є дорогим і не може охопити всі можливі орієнтації цілі. Для опису флуктуацій даних ЕПР цілі часто використовуються класичні статистичні моделі. Дослідники запропонували різні моделі розподілу зі статистичної точки зору [61-63]. Ці моделі полегшують опис характеристик ЕПР цілі та використовуються для кількісного розрахунку ймовірності виявлення цілі радаром, ймовірності хибної тривоги та необхідного співвідношення сигнал/шум (SNR) для одиночних або накопичених імпульсів. До часто використовуваних моделей флуктуацій належать модель Сверлінга, модель хі-квадрат, логарифмічно-нормальна модель та непараметрична модель, тощо [64-66]. Ця техніка заснована на генеруванні когерентного сигналу для гасіння радіолокаційних хвиль, що падають, і зменшення відлуння від розсіювання цілі. Основна мета полягає в тому, щоб мішень генерувала випромінювання, амплітуда і фаза якого гасять відбиту хвилю, отже, система повинна мати можливість визначати кут падіння, інтенсивність, частоту і форму падаючої хвилі, крім того, система повинна знати характеристики його відлуння для кожної довжини хвилі. Активне придушення вимагає впровадження антенних решіток, систем обробки сигналів, баз даних, а також систем керування та генерування сигналів. Складність реалізації цієї методики зростає на вищих частотах, оскільки шаблони розсіювання стають складнішими, тому для низьких частот рекомендується активна компенсація [27,67].

3. Пасивне гасіння електромагнітного випромінювання. Основним принципом роботи є введення джерела відлуння, амплітуду та фазу якого можна регулювати, щоб скасувати основне джерело відлуння. Пасивне гасіння складається з додавання навантажень на цільове тіло через згруповані або розподілені імпеданси, тому цей підхід також відомий як імпедансне навантаження. Однак цей метод ефективний лише у вузькій смузі частот і малих просторових секторах, і головна проблема полягає в тому, щоб обчислити оптимальне значення доданих імпедансів та їх положення в структурі для досягнення малого RCS. Таким чином, пасивне гасіння часто реалізується в простих об'єктах з невеликою кількістю джерел відлуння, що виключає його реалізацію в більш складних структурах. Крім того, RCSR, отриманий за допомогою цього підходу, можна змінити шляхом зміни частоти або кута огляду [68,69].

4. Радіопоглинальні матеріали (Radar Absorbent Materials – RAM, РПМ) це спеціалізовані матеріали, що використовуються для зменшення відбиття (або поглинання) радіолокаційних сигналів для забезпечення зниженої помітності, яка є основним компонентом пасивних контрзаходів у військовому застосуванні. Властивості РПМ можна оптимізувати, змінюючи їх склад, мікроструктуру та геометрію поверхні. Метод застосування РПМ базується на характеристиках втрат діелектричних або магнітних матеріалів, які забезпечують відповідне узгодження

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

імпедансу, або послаблюють радарну хвилю після її потрапляння в матеріал [70,71].

РПМ системи можна розділити за структурою та матеріалами з яких вони виготовлені (рис. 8).

Рис. 8 – Класифікація РПМ систем [72]

Вуглецеві матеріали. Вуглецеві матеріали (наприклад, кокс, графіт, графен, вуглецеве волокно, вуглецеві нановолокна, вуглецеві нанотрубки) не лише є електропровідними, вони добре поглинають електромагнітне випромінювання в широкому діапазоні частот. Різні типи вуглецю сильно відрізняються такими параметрами як провідність, структура, морфологія та вартість [73]. Привабливим у застосуванні є термо-розшарований графіт, який отримують інтеркаляцією лусочок графіту з подальшим швидким нагріванням, що викликає відшарування [74]. Кожен шматок відшарованого графіту, відомий як «черв'як» через велике розширення вздовж поперечних зав’язків між шарами карбону і результуючу велику довжину в цьому напрямку. При ущільненні черв'яків між сусідніми черв'яками відбувається механічне зчеплення, в результаті чого утворюється лист без використання зв’язуючого матеріалу. Завдяки своїй гнучкості лист відомий як «гнучкий графіт». Через високий ступінь ущільнення під час виготовлення гнучкого графіту лист демонструє сильну кристалографічну орієнтацію вуглецевих шарів у площині листа. В результаті переважної орієнтації лист є високо-анізотропним, при цьому електропровідність набагато вища в площині листа, ніж у перпендикулярному напрямку. Крім того, процес відлущування призводить до певного ступеня відкритої пористості (на додаток до закритої пористості), так що площа поверхні збільшується. Велика площа поверхні є привабливою для екранування через скін-ефект. З цих причин гнучкий графіт може демонструвати ефективність екранування до 130 дБ згідно з джерелом [75], що, по суті, є верхньою межею вимірювання втрат потужності. Додаткові переваги гнучкого графіту включають низький коефіцієнт теплового розширення, високу теплопровідність і хімічну інертність, які особливо цінні для мікроелектронних застосувань [76]. Активація вуглецю включає хімічну реакцію, яка призводить до пористості поверхні. Завдяки високій площі поверхні та скін-ефекту активоване вугільне волокно є більш ефективним для екранування, ніж відповідне вуглецеве волокно, яке не пройшло активацію. Активація зменшує міцність і модуль волокна таким чином, що зниження є більш значним, якщо ступінь активації більша. Тому активація має бути легкою, якщо вуглецеве волокно призначене для інженерних конструкцій. Однак, якщо волокно не призначене для структурного використання, ступінь активації не потрібно обмежувати. Частково завдяки своїй високій площі поверхні та скін-ефекту такі нано-вуглецеві матеріали, як графен, вуглецеві нановолокна та вуглецеві нанотрубки, можуть бути ефективні для екранування. Замість того, щоб диспергувати нановуглець у певній матриці, можна сформувати нановуглецевий папір (наприклад, папір з вуглецевих нанотрубок), який можна включити в композит [77]. Гібридні нановуглеці (включаючи вуглеці різних розмірів і форм) і пористі нановуглеці (часто відомі як аерогелі) розроблені для екранування шляхом збільшення площі поверхні та зменшення невідповідності імпедансу між матеріалом і повітрям навколо нього. Зменшення неузгодженості імпедансу допомагає зменшити втрати на відбиття, тим самим збільшуючи втрати на поглинання, що є основним механізмом екранування за допомогою вуглецю. Комбіноване використання безперервного вуглецевого волокна та вуглецевих нанотрубок привернуло увагу, включаючи ситуацію, коли нанотрубки розташовані уздовж осі вуглецевого волокна. Гібриди також можуть включати вуглець і метали. Прикладом може бути гібрид із вуглецевого волокна, наночастинок нікелю та графену [78,79]. Для матриці, яка є по суті прозорою для випромінювання, нановолоконний композит є кращим за мікроволоконний композит у екрануванні, коли нановолокно та мікроволокно мають однакову об’ємну частку. Це пов’язано зі скін-ефектом та більшою площею розділу (точніше, більшою питомою площею розділу, що відноситься до площі розділу на одиницю об’єму або на одиницю маси) у нановолокнистому композиті. Вуглецеве волокно з металевим покриттям є більш ефективним для екранування, ніж вуглецеве волокно без покриття [80]. Завдяки скін-ефекту нановуглеці з металевим покриттям, такі як вуглецеві нановолокна з нікелевим покриттям (спочатку відомі як вуглецеві нитки з нікелевим покриттям або, простіше кажучи, нікелеві

нитки), є навіть більш ефективними. Нікелеве покриття забезпечує високу провідність і магнітний характер порівняно з вуглецевим нановолокном без покриття. Використання покритого нікелем вуглецевого нановолокна як наповнювача в полімері призводить до отримання композиційного матеріалу, який демонструє ефективність екранування 87 дБ (на частоті 1–2 ГГц) при вмісті наповнювача 7 об.%. Для електромагнітних прокладок вміст наповнювача має бути низьким, оскільки пружність походить від полімерної матриці та зменшується з підвищення вмісту наповнювача [81]. Таким чином, для електромагнітних прокладок наповнювач повинен бути ефективним навіть при низькій об'ємній частці. Безперервні вуглецеві волокнисті полімерно-матричні та вуглецево-матричні композити є високоефективними для екранування. Останні також відомі як вуглець-вуглецеві композити. Ефективність частково пояснюється безперервністю вуглецевого волокна в обох композитах. Електрична безперервність є цінною, навіть якщо частота висока, а розкид зарядів невеликий. Завдяки провідності вуглецевої матриці та непровідності полімерної матриці вуглецево-матричний композит є більш ефективним для екранування, ніж відповідний полімерно-матричний композит [82]. Планарне розташування волокон і розташування стеків у макромасштабі можуть значно вплинути на ефективність екранування [83]. Завдяки своїй провідності та магнетизму нікель є ефективним матеріалом покриття для вуглецевих волокон для підвищення ефективності екранування [84].

Гібридні композити, що містять два або більше типів наповнювачів, можуть демонструвати кращий захист, ніж композити, що містять один тип наповнювача. Наприклад, двома наповнювачами є дисперсні частинки та волокна [85]. Через велике співвідношення сторін волокон порівняно з дисперсними частинками, наявність волокон покращує електричну провідність у композиті. Привабливими можуть бути багатомасштабні композити (ієрархічні композити), які передбачають поєднання наповнювачів різного масштабу. Наприклад, наповнювачами є мікровуглець (наприклад, вуглецеве волокно) і нановуглець (наприклад, вуглецева нанотрубка). У випадку, якщо мікровуглець є безперервним, а нановуглець є розривним, додавання нановуглецю до мікровуглецю може не призвести до істотного збільшення ефективності екранування. Це пов'язано з переважною екрануючою ефективністю суцільного наповнювача. Оскільки механічні властивості безперервних вуглецевих композитів кращі, ніж у розривних вуглецевих композитах, додавання розривного нанокарбону до безперервного мікровуглецю має тенденцію до зменшення об’ємної частки суцільного мікровуглецю, таким чином зменшуючи міцність і модуль композиту, а в деяких випадках також знижуючи ефективність екранування композиту. При проектуванні багатофункціонального структурного композиту необхідно враховувати як екранування, так і механічні ефекти.

Магнітні матеріали. Матеріали з електричними та магнітними диполями ідеально підходять для екранування, особливо у тих випадках, коли важливе поглинання електромагнітних хвиль, а не їх відбиття, яке має місце у металах та інших високопровідних системах. Електричні диполі зазвичай представлені матеріалами з високою діелектричною проникністю, такими як Fe_2O_3, ZrO_2, SiO_2, TiO_2, MnO_2, ZnO або $BaTiO_3$. З іншого боку, матеріали з магнітними диполями, такі як Fe_3O_4, різні ферити, му-метал або суперпермалой, мають високу магнітну проникність [86].

Основною проблемою при використанні магнітних наповнювачів є їхня гірша дисперсність у полімерних матрицях, що може призвести до погіршення механічних властивостей композитних матеріалів. Однак цю проблему можна вирішити шляхом поєднання магнітних наповнювачів з вуглецевими, що полегшує їх диспергування в матриці та покращує механічні характеристики. Такий підхід також сприяє покращенню провідності композитів.

Сучасним напрямком у розвитку полімерних композитів є використання сегрегованої мікроструктури для покращення дисперсності магнітних наповнювачів і збільшення ефективності екранування в широкосмуговому діапазоні частот.

Електропровідні полімери. Незважаючи на те, що полімери, як правило, вважаються електричними ізоляторами, існують деякі полімери з in-sito підвищеною електропровідністю в легованих станах. В таких полімерах чергуються одинарні (σ) і подвійні (π) зв'язки, і такі спряжені системи з присутністю π-електронів надають даним полімерам притаманних їм оптичних, електрохімічних та електричних/електронних властивостей. π-електрони в спряженій основі можуть легко делокалізуватися в зону провідності. В ідеалізованій ситуації однорідного ланцюга, зона провідності, що утворилася, могла б демонструвати поведінку, характерну для металів. Тому такі полімери іноді називають «органічні метали», хоча як правило їх провідність знаходиться на рівні графітових матеріалів. Такі системи є нестабільними по відношенню до зміни зв'язків, що призводить до утворення енергетичної щілини в електронному спектрі. Для подолання енергетичної щілини в структуру включають іони електроліту (допанти), які надають таким полімерам електронну провідність. Для досягнення високої провідності провідні полімери допують різними методами. Домішки в полімерах піддаються окислювально-відновним процесам, в яких відбувається перенесення зарядів з подальшим утворенням носіїв заряду. Роль допанта полягає не тільки у вилученні електронів з полімерних ланцюгів, але й у додаванні електронів до основи полімеру. Ці процеси окислення/відновлення

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

створюють у полімері носії заряду у вигляді поляронів (радикальних іонів), біполяронів (дикатіонів або діаніонів) або солітонів. Можливість контролювати їхню електропровідність шляхом регулювання параметрів, таких як ступінь окислення, рівень легування, розмір іонів домішок, рівень протонування, морфологія і хімічна структура, робить їх придатними кандидатами для екранування ЕМІ в різних технологічних застосуваннях. Ефективність екранування внутрішньо провідних полімерів зумовлена рухомими зарядами (поляронами, біполяронами, солітонами) та зв'язаними зарядами (диполями) в їхній основі. Порівняно з твердими металами, полімери з власною провідністю демонструють низьку щільність, легкість обробки та умов приготування, форму та морфологію, що легко контролюються, корозійну стійкість, структурну гнучкість та регульовану електропровідність. Наприклад, легований йодом поліацетилен має електропровідність близько $1,7 \times 10^5$ См, що можна порівняти з деякими металами. З іншого боку, як і багато інших полімерів, вони піддаються термоокислювальному старінню та іншим формам деградації. Однак, завдяки низькому вмісту водню та ароматичній структурі, їхня термічна, хімічна та термоокислювальна стабільність є дуже високою. Вони також страждають від набухання в деяких розчинниках, розтріскування або стиснення, що може негативно вплинути на їхні електричні та механічні властивості. Ці властивості можна покращити додаванням другої фази, переважно у вигляді наповнювачів, таких як металеві або магнітні частинки, оксиди металів або різні наповнювачі на основі вуглецю. Ці наповнювачі можуть покращити їх механічні властивості (переважно вуглецеві нанокомпозити, що містять наповнювачі на основі вуглецю, можуть покращувати термічну стабільність, діелектричні або магнітні властивості та електропровідність і, таким чином, підвищувати їхню загальну ефективність екранування.

До in-sito провідних полімерів в основному належать поліанілін (PANI), поліпірол (PPy), політіофен (PTH), поліфуран (PF), поліацетилен (PA), поліпарафенілен (PPP), полі(п-феніленвінілен) (PPV) і полі(3,4-етилендіокситіофен) (PEDOT)[87].

Трубки та волокна. Структури, що поглинають радіолокаційні хвилі, стали популярною областю досліджень з використанням волоконно-армованих композитних матеріалів [88]. Додавання порошку ЕМ до композитної матриці дозволяє перетворити волоконно-армовані полімерні композити на структуру ЕМ. Цей метод є логічним і відносно простим способом виробництва. Крім того, це можна досягти шляхом регулювання електричних властивостей (комплексна діелектрична проникність) або магнітних властивостей (комплексна магнітна проникність) матеріалу. Також концепція широкосмугового зв'язку може бути застосована для формування композитних радіолокаційних поглинаючих структур. Поглинаючі структури можуть бути спроєктовані для зменшення рівня розсіяних електромагнітних хвиль завдяки фазовому гасінню та узгодженню імпедансу. Прикладом такої конструкції є багатошарова поглинаюча структура Яуманна. Радіолокаційний поглинач типу Яуманна утворений з багатьох резистивних листів, прокладок з низькими втратами та низькою діелектричною проникністю. Для розділення цих листів та провідної опорної пластини можна використовувати полімерні композити з низькими втратами та низькою діелектричною проникністю. Ці композитні структури слугують прокладками, що відповідають електричним вимогам поглинача [89].

Хіральні матеріали. Штучні хіральні структури визначаються як такі, що змінюють площину поляризації. У 1950-х роках матеріали зі штучними діелектричними властивостями почали досліджувати для створення легких мікрохвильових антен. У 1980-х роках дослідження штучних хіральних матеріалів знову привернули увагу. Вчені почали вивчати їх для створення мікрохвильових радарів, що поглинають радіохвилі, для застосування в стелс-технологіях. Щодо теоретичного прогнозу відомого фізика Веселага [90], конститутивні параметри, такі як проникність штучних матеріалів, є відносно складною. Коли електромагнітні хвилі проходять через хіральні матеріали, вектор поширення орієнтований вліво, тоді як у звичайних матеріалах вектор поширення орієнтований вправо. Тому такі матеріали також відомі як лівобічні матеріали (LHM), або метаматеріали. Завдяки своїм унікальним властивостям, LHM користуються популярністю у військових відомств для застосування в стелс-технологіях та різних інших сферах [91].

Конструкції РПМ систем

Градієнтні матеріали − це матеріали, в яких властивості змінюються поступово в просторі. Зазвичай ці зміни відбуваються через різну концентрацію компонентів, або різну структуру матеріалу чи матеріалів в різних його частинах. Наприклад, броня може бути виготовлена з функціонально-градієнтного матеріалу, що змінює властивості в залежності від товщини, або використовуватися як поглинач радіолокаційних хвиль, який змінює хвильову характеристику між різними секціями [92].

Для трансформаторів, які мають широкосмугові характеристики, рішення може бути досягнуте за допомогою додавання великої кількості дискретних секцій. Так само вузько-смуговий резонансний поглинач, завдяки багатошаровій або звужувальній формі, може бути перетворений на широкосмуговий поглинач.

Характеристики діелектричних багатошарових структур змінюються таким чином, що імпеданс кожного шару змінюється плавно, що забезпечує широкосмугові властивості. Ці характеристики покращують проходження хвиль через кожен шар і

знижують рівень відбиття на межах розділу шарів. Флуктуації в структурах багатошарових поглиначів зберігаються в необмеженій кількості шарів, а їх енергія втрачається до досягнення шару, що відбиває випромінювання [93]. Мікрохвильові сигнали перетворюються на тепло завдяки спеціальній структурі поглинача, а механізми теплопередачі допомагають ефективно розсіювати це тепло. На рис. 9 показано градієнтне покриття багатошарового матеріалу.

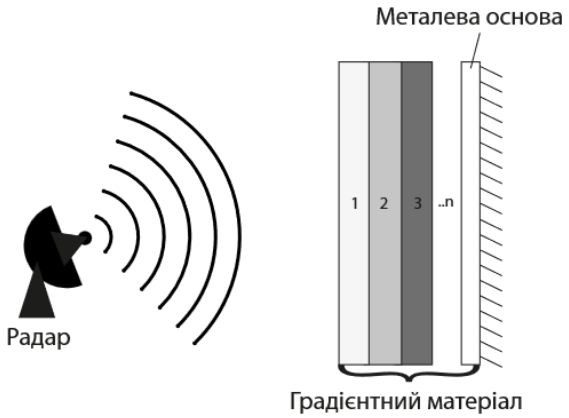

Рис. 9 – Багатошарова структура градієнтного матеріалу, де 1, 2, 3, … n – матеріали з поступовою зміною властивостей (наприклад – діелектричної та магнітної проникності) [94]

Пірамідальні поглиначі – це РПМ із геометричними неоднорідностями. Такий тип РПМ являє собою покриття у вигляді конусів, пірамід, шахт, клинів та інших геометричних структур, що перетворюють плоску падаючу хвилю в поверхневу, з подальшим її гасінням в поверхневому діелектричному шарі.

Крім того, радіопоглинаючі конструкції (РПК) можуть бути виконані в жорсткій і гнучкій формі.

Електромагнітні поглиначі зазвичай мають пірамідальну форму та виготовлені з різних видів матеріалів, наприклад, таких як полімерний композит з графітовим порошком. Їх ефективність та продуктивність зазвичай обмежені їхньою висотою, яка в найбільш ефективному поглиначі повинна становити приблизно половину найбільшої робочої довжини хвилі [95]. В результаті висота збільшується з частотами нижче 1 ГГц, що призводить до відносно масивної структури. Однак існують альтернативні способи, такі як використання феритових плиток замість збільшення висоти в діапазонах нижче 1 ГГц [96], які є дорогими та непростими в установці. Крім того, виробництво та доставка феритових плиток є складними, оскільки вони крихкі.

Пірамідальні поглиначі можуть поглинати падаючі хвилі, узгоджуючи свій імпеданс з імпедансом вільного простору. Таким чином, краще узгодження імпедансу призведе до вищого коефіцієнта поглинання та ширшої смуги пропускання. Пірамідальні поглиначі абсорбують не менше -30 дБ, що становить 99,9% потужності [97,98].

В деяких літературних джерелах, присвячених дослідженню пірамідальних поглиначів, спостерігається низька продуктивність у діапазоні нижче 1 ГГц [99]. Проблема діапазону нижче 1 ГГц також пов'язана з використанням відносно менших комерційних пірамідальних поглиначів, які розроблені для вищих частотних діапазонів [100], знижуючи відбиття приблизно до -10 дБ у нижній частині діапазону. Тому підвищення продуктивності пірамідальних поглиначів у нижній частині діапазону є важливим завданням на сьогодні. На рис. 10 показано схему пірамідального поглинача.

Рис. 10 – Схема пірамідального РПМ матеріалу

Поглиначі з узгоджувальним шаром. Поглиначі з узгоджувальним шаром можна застосовувати як заміну поглиначів з градієнтним переходом, щоб усунути проблеми з товщиною поглинаючих матеріалів. Перехідний узгоджувальний шар знаходиться між джерелом випромінювання і абсорбуючим шаром. Якщо товщина відповідного узгоджувального шару становить чверть довжини хвилі, то відбувається узгодження, і можна використовувати наступне рівняння (23):

$$Z_2 = \sqrt{Z_1 \times Z_3}, \quad (23)$$

де Z_1 – імпеданс середовища, Z_2 – імпеданс узгоджувального шару, Z_3 – імпеданс поглинаючого шару.

Якщо частота хвилі дорівнює товщині структури, спостерігається узгодження імпедансу. Таки поглиначі є вузько-смуговими і їх ефективність на певній частоті випромінювання залежить від товщини узгоджувального шару. Схематичне зображення поглинача з узгоджувальним шаром наведено на рис. 11.

Резонансні структури. До резонансних структур належать шари Далленбаха, екран Солсбері та шари Яуманна або поглиначі чверті довжини хвилі, які засновані на явищі суперпозиції відбитих від кількох поверхонь хвиль. У разі, коли хвилі, відбиті від поверхонь електропровідної плівки або металевої основи, знаходяться в протифазі і однакові за амплітудою, відбувається їх взаємна компенсація. Створення різниці фаз у півхвилі здійснюють

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

нанесенням 4/λ шару діелектрику. Основними недоліками таких РПМ систем є вузькосмуговість, погіршення поглинаючих властивостей при кутовому падінні хвилі, залежність від поляризації та необхідність збільшення товщини при зменшенні частоти радіовипромінювання [101].

Рис. 11 – Схематичне зображення поглинача з узгоджувальним шаром

У поглиначі Далленбаха не використовуються електропровідні листи, а падаюча потужність розсіюється з втратами в однорідних діелектричних матеріалах, розташованих один над одним над плоскою основою (рис. 12).

Шари Далленбаха були розроблені і запатентовані на основі феритових матеріалів. Використання двох або більше шарів з різними смугами поглинання розширить робочу смугу поглинання. Сму га пропускання стандартних феритових поглиначів була покращена за допомогою двошарової конструкції поглинача з феритовим шаром (інтерфейс повітря-поглинач) і короткими металевими волокнами (інтерфейс поглинач-метал) [102].

Рис. 12 – Шар Далленбаха

Екран Солсбері – це неактивна металева основа, що поглинає радіолокаційні хвилі, тобто тонкий резистивний лист, розміщений на відстані λ/4 від поверхні. При резонансі імпеданс короткого замикання провідного шару перетворюється на розімкнутий ланцюг у місці розташування резистивного листа, зазвичай 377 Ом. Таким чином, конструкція забезпечує ідеальне узгодження імпедансу з вільним простором на одній частоті та сильно поглинає падаючі хвилі. Максимальна смуга пропускання відбиття -10 дБ (77%) при типовому співвідношенні досягається, коли діелектрична проникність міжшарового матеріалу становить $\varepsilon_r = 1$ [103]. На рис. 13 показано принципи роботи екрану Солсбері.

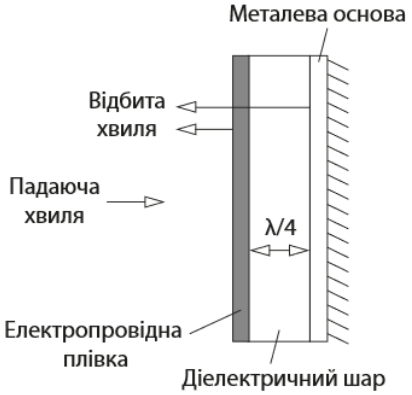

Рис. 13 – Екран Солсбері [104]

Для збільшення пропускної здатності екрану Солсбері в композитних структурах почали використовувати шари Яуманна. Іншими словами, екран Солсбері є найпростішою формою пристрою Яуманна. Математично було доведено, що перший пристрій Яуманна, який складається з двох рівномірно розташованих резистивних листів перед провідною площиною, створює два мінімуми відбиття, тим самим збільшуючи пропускну здатність. У багатошаровому пристрої Яуманна є діелектричні листи з низькими втратами, розділені листами з низькою провідністю. Провідність цих листів збільшується в напрямку до металевої площини.

Геометрія багатосекційного поглинача Яуманна показана на рис. 14 [105].

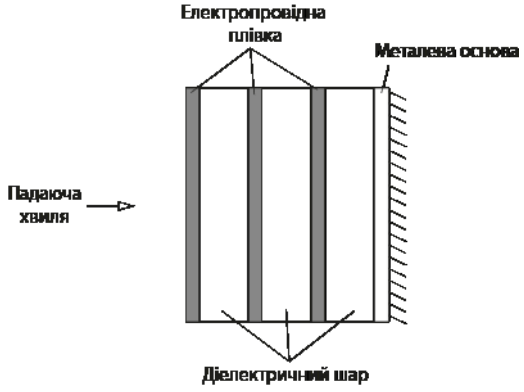

Рис. 14 – Схема 3-шарового поглинача Яуманна

Кожен діелектричний шар має ширину, що дорівнює чверті довжини хвилі, а останній діелектричний шар прилягає до металевої мідної площини. Мідь використовується як металева заземлююча площина з провідністю $\sigma = 5{,}8 \times 10^8$ См/м. Тонкі резистивні шари з критичною

резистивністю (R_{cn}) розміщені перед кожною діелектричною пластиною. Припускається, що кожен діелектричний шар має оптимальну товщину, що забезпечує ефективне зменшення відбиття хвиль та максимальне поглинання електромагнітної енергії. Критична резистивність тонких резистивних шарів (R_{cn}) дозволяє досягти необхідної ефективності в поглинанні енергії та зниженні ефективної відбитої хвилі. Це також забезпечує стабільність характеристик матеріалу при високих температурах та зменшує ймовірність деградації матеріалів під впливом електричних струмів. Мідь, з її високою провідністю, ефективно служить заземлювальною основою, що дозволяє зменшити енергетичні втрати та покращити загальні характеристики матеріалу при роботі з електромагнітними хвилями.

Метаматеріали. Метаматеріали (ММ) - це штучно створені матеріали, які демонструють цікаві електродинамічні властивості, включаючи негативний показник заломлення [106], зміну напрямку розповсюдження електромагнітних (ЕМ) хвиль (рис. 15-16) [107] та зворотний ефект Доплера [108], які не зустрічаються в природних матеріалах.

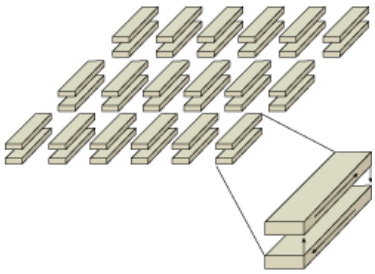

Рис. 15 – Загальний вигляд метаматеріалу, який складається з масиву окремих резонаторів[109]

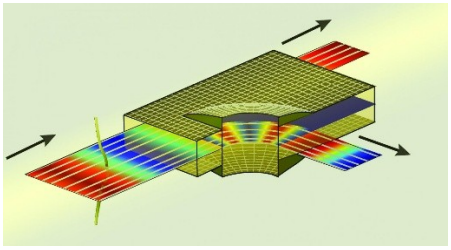

Рис. 16 – Ілюстрація світловикривляючого пристрою на основі метаматеріалу: світло поширюється вздовж поверхні оптичного чіпа та втікає в шар метаматеріалу зліва. Завдяки певній варіації товщини світло або викривляється праворуч, або поширюється прямо до виходу оптичного чіпа без перешкод [110]

Метаматеріали отримують шляхом додавання в природний матеріал різноманітних періодичних структур з найрізноманітнішими геометричними формами, які модифікують діелектричну і магнітну сприйнятливість матеріалу.

Завдяки інженерній розробці цих композитних матеріалів, ММ можна розглядати як однорідні середовища з ефективною діелектричною проникністю та магнітною проникністю [111]. Як особливий підтип, ММ можуть використовуватися як ідеальні поглиначі, що забезпечує майже повне поглинання в невеликому або широкому діапазоні частот, при цьому їх можна сконструювати таким чином, щоб подолати обмеження товщини традиційних пристроїв з чвертю довжини хвилі [112]. Товщина ідеального поглинача з метаматеріалу може бути приблизно в 25 разів меншою за товщину резонансної довжини хвилі функціональних шарів, що набагато менше, ніж у їхніх аналогів [113]. Наразі ММ отримують все більшого застосування та розвитку.

Метаматеріальний поглинач (ММП) – це блок матеріалу, який використовується для поглинання частини падаючої енергії та зазвичай складається з трьох шарів. ММП також часто називають ідеальним поглиначем. Він може забезпечити поглинання близьке до одиниці, при нульових коефіцієнтах відбиття та пропускання для плоских хвиль, які падають. Однак багатошарові поглиначі також розроблені для забезпечення широкосмугових характеристик. Металевий візерунок – це перший шар, який розташований періодично. Другий шар складається з підкладки або діелектричного шару. Нарешті, третій шар – це ще один періодичний металевий візерунок.

Активне маніпулювання поширенням електромагнітних хвиль призводить до досягнення однієї з цікавих характеристик метаматеріалів, а саме поглинання. Це явище виникає, коли електромагнітне випромінювання або світло поглинається після контакту з таким матеріалом. Причиною цього є створення властивості поглинання шляхом регулювання значень ε та μ. Поглиначі з метаматеріалів розробляються для забезпечення поглинання (зменшення помітності об’єктів) в різних діапазонах радіочастот, від мікрохвиль до оптичних частот [114]. ММП часто застосовують для комбінованого зменшення помітності об’єктів у трьох діапазонах частот: мікрохвилі, терагерцовий та оптичний діапазон.

Механізм поглинання, що демонструються цими структурами, пояснюються від'ємними значеннями ε та μ, узгодженням імпедансу, зниженням плазмової частоти металів, сильними електричними та магнітними резонансами тощо. Ці фактори управляються шляхом правильного вибору геометричної конфігурації поглинача.

Механізм поглинання ідеальних поглиначів спирається на електричний та магнітний резонанси. Магнітні резонанси можна досягти за допомогою структур, подібних до замкнутого контуру, тоді як електричні резонанси можна досягти шляхом створення щілин у структурах. Правильне структурне проектування може бути використане для

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

налаштування як електричних, так і магнітних характеристик. Одним з найпоширеніших типів резонаторів є розрізний кільцевий резонатор (РКР), який є широко поширеною конструкцією поглинача, що використовує принцип магнітного та електричного резонансів для досягнення характеристик поглинання, як показано на рис. 17.

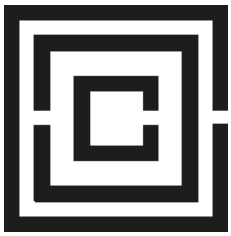

Рис. 17 – Розрізний кільцевий резонатор

Фактично, перший метаматеріальний поглинач, розроблений Ленді та його колегами, базується на тому ж принципі. Концентричні РКР зазвичай використовуються для досягнення багатосмугових характеристик поглинання [115,116]. Взаємний зв'язок між цими поглиначами створює додаткові смуги поглинання, а близько розташовані концентричні РКР призводять до широкосмугових характеристик поглинання.

Наступним принципом, який може бути відповідальним за поглинання електромагнітних хвиль, є узгодження імпедансу. Це добре відоме явище, яке виникає, коли електромагнітні хвилі передаються з одного середовища в інше, внаслідок чого частина енергії електромагнітних хвиль відбивається, а решта енергії передається. Відбиття мінімізується, коли характеристичний імпеданс відбитого середовища збігається з характеристичним імпедансом падаючого середовища. Для досягнення оптимальної продуктивності конструкції поглинача узгодження імпедансу є складним завданням. У більшості випадків першим середовищем є повітря з характеристичним імпедансом близько 377 Ом; тому імпеданс поглинача повинен бути близьким до цього значення на бажаній частоті, щоб досягти поглинання, близького до одиниці [117].

Плазмова частота матеріалу — це частота, на якій коливається густина електронного газу. У випадку напівпровідників плазмову частоту можна збільшити або зменшити шляхом легування середовища. Матеріали з негативною діелектричною проникністю можна утворити шляхом зниження плазмової частоти, яка базується на робочій частоті метаматеріального поглинача. Основною причиною зниження плазмової частоти є створення ММ-поглиначів, які можуть працювати в різних частотних режимах. Тому дуже актуально встановлювати частоту відповідно до цільового частотного режиму [118].

Конструкція ММП – це тришарові структури, що містять верхню металеву площину, середній діелектричний шар та нижню заземлювальну площину. Широко поширені конструкції цих ідеальних поглиначів наведено на рис. 18.

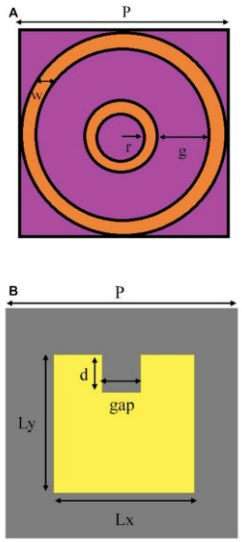

Рис. 18 – Кільце (а) та пласт (б) ідеального метаматеріального поглинача[119]

ММА для мікрохвильових частот здебільшого розроблені для застосувань у X-діапазоні, включаючи радіолокацію та інші засоби спостереження, де електромагнітне екранування має практичне застосування. Таким чином, значна частина досліджень спрямована на розробку поглиначів у цьому діапазоні частот. У 2008 році Ленді та ін. [120] розробили найвідоміший та перший у світі вузькосмуговий метаматеріальний поглинач, використовуючи розрізний кільцевий резонатор (РКР) та розрізаний дріт. Як показано на рис. 19, конструкція складалася з трьох шарів: двох провідних резонаторів та діелектричної підкладки.

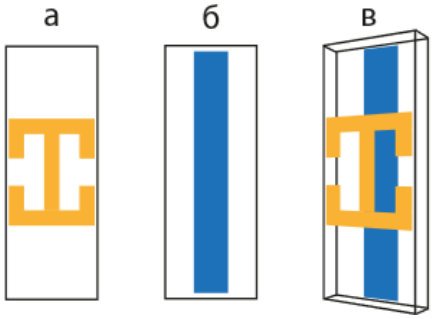

Рис. 19 – Схематична структура елемента метаматеріального поглинача(а), (б) розрізаний дріт, (в) елементарна комірка, що відображають напрямок поширення хвилі

Вперше маскування цілі було продемонстровано за допомогою метаматеріалів у мікрохвильовому діапазоні в університеті Дьюка. За допомогою маскування сигнал електромагнітної

хвилі, що передається радаром, оминає ціль, роблячи її практично невидимою (рис. 20) [109].

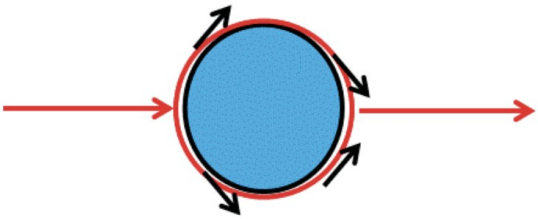

Рис. 20 – Плащ-«невидимка»

Інший спосіб приховати ціль — змусити її поглинати падаючий сигнал радара. Таке приховування було продемонстровано за допомогою моделювання з використанням фрактального частотно-селективного покриття товщиною менше 1 мм; див. рис. 21 [121]. Поглинання більше 90% (10 дБ) було досягнуто в діапазоні від 2 до 20 ГГц, а більше 99% (20 дБ) — в діапазоні від 10 до 15 ГГц. Хороше поглинання було досягнуто для всіх кутів падіння і поляризацій.

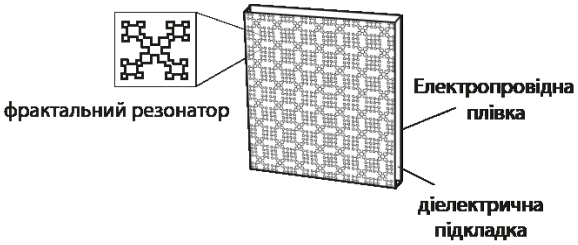

Рис. 21 – Поглинаючий фрактальний метаматеріал товщиною менше 1 мм [109]

Аналоговий контур РПМ. Аналоговий контур - це листи з матеріалу з низькими втратами, на яких нанесені специфічні провідні моделі. Моделі утворюють опір, індуктивність і ємність. Нанесений шар плівки можна відобразити еквівалентною RLC-схемою, параметри якої можна контролювати за допомогою геометричного формату, товщини плівки та провідності плівки. Приклад моделі, нанесеної на шарі АК, показано на рис. 22. Поглинач АК можна налаштувати, як і схему RLC, що дозволяє конструктору розробляти смугу пропускання багатошарової форми. Зазвичай поглинаючий матеріал АК є версією з втратами класу друкованих моделей, відомих як частотно-селективні поверхні [122,123].

Магнітні РПМ. Основним компонентом таких РПМ є карбонільне залізо та гекса-ферити, які мають магнітні властивості. Такі матеріали поглинають в діапазоні як МГц та ГГц. Можна сказати, що резонансна частота пов'язана з температурою спікання та розміром частинок, які використовуються в структурі. Наприклад, гекса-ферити типу М можуть використовуватися для високих частот (5-20 ГГц) для поглинання електромагнітних хвиль. Таким чином, за допомогою цього підходу можна використовувати два різних шари з різними властивостями, щоб збільшити абсорбуючу здатність поглинання [124].

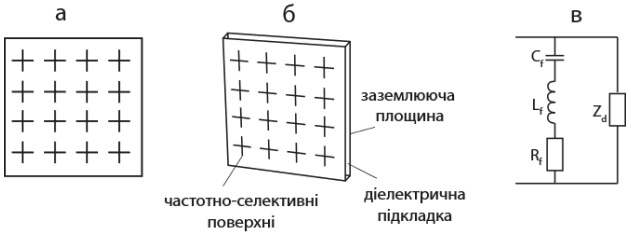

Рис. 22 – Схема аналогового РПМ: а) поперечний переріз аналогової схеми, б) тривимірний ескіз, в) еквівалентна схема

Адаптивні РПМ. Адаптивні поглиначі мають великий потенціал і активно вивчаються. Комірка, заповнена діелектричною рідиною, може використовуватися за провідним шаром у механічних пристроях. Фактично, ця методологія схожа на аналогові матеріали схеми, де можна налаштовувати ємність і опір імпедансного шару [125].

Висновки

Засоби зменшення радіолокаційної, радіоелектронної, оптичної та теплової помітності засобів озброєння та військової техніки, які є цілями для виявлення та ураження відіграють ключову роль. Їх головне призначення полягає у зниженні ймовірності виявлення ОВТ різними системами виявлення і спостереження зокрема радіолокаційними станціями, засобами радіоелектронної розвідки, оптико-електронними, інфрачервоними сенсорами та іншими видами і засобами технічних видів розвідки і спостереження. Це забезпечує підвищену живучість ОВТ і ефективність виконання бойових завдань. Постійне удосконалення технологій виявлення, із застосуванням різноманітних засобів технічних видів розвідки таких, як радарів, супутникових та інфрачервоних систем, поява нових технологій, зумовлює необхідність створення інноваційних та динамічного розвитку існуючих маскувальних систем і матеріалів, які здатні адаптуватися до умов сучасного поля бою.

Серед основних підходів до зниження помітності можна виділити використання РПМ, цільового конструювання геометричних параметрів різних видів і засобів ОВТ, систем активного маскування, активних систем глушіння радарів та маскуючих систем розсіювання. РПМ, ефективно гасять електромагнітне випромінювання у широкому частотному діапазоні та зменшують силу зворотного сигналу, який повертається до радара. Властивості РПМ можна ефективно регулювати шляхом зміни їхнього хімічного складу, мікроструктури та геометрії

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

поверхні. Основний принцип дії РПМ полягає у використанні матеріалів з діелектричними або магнітними втратами, які забезпечують оптимальне узгодження імпедансу з навколишнім середовищем та сприяють послабленню радіохвиль після їх проникнення в структуру матеріалу. РПМ розрізняють за своєю внутрішньою структурою та за типом застосовуваних матеріалів.

РПМ зазвичай складаються з вуглецевих матеріалів, таких як технічний вуглець, графен, чи магнітних матеріалів, таких як ферити, певні провідні полімери (наприклад - поліанілін), вуглецеві трубки, хіральні матеріали. Конструктивно РПМ можна класифікувати як поглиначі для узгодження імпедансу та резонансні поглиначі, хоча багато поглиначів мають характеристики обох цих класифікацій. Ці характеристики зазвичай включають ступінчастий інтерфейс для узгодження імпедансу, або поступовий перехід властивостей матеріалу для узгодження імпедансу, а також налаштовані, або так звані чверть-хвильові резонансні шари. Варто виокремити особливий тип РПМ структур - метаматеріали, що останнім часом активно досліджуються та використовуються. Метаматеріали отримують шляхом додавання в природний матеріал різноманітних періодичних структур з найрізноманітнішими геометричними формами, які модифікують діелектричну і магнітну проникність матеріалу. Зазвичай метаматеріали - це об’ємні, або як мінімум тришарові структури, що містять верхню металеву площину, середній діелектричний шар та нижню (іноді заземлювальну) площину. Метаматеріали можуть використовуватися як ідеальні поглиначі, що забезпечує майже повне поглинання в невеликому або широкому діапазоні частот, при цьому їх можна сконструювати таким чином, щоб подолати обмеження товщини традиційних пристроїв з чвертю довжини хвилі.

Ще одним ефективним конструктивним підходом до зниження радіолокаційної помітності є створення поверхонь зі спеціально розрахованими нахилами, які відхиляють відбиті радіохвилі вбік від джерела випромінювання, тим самим зменшуючи ймовірність їх виявлення. Типовим прикладом такого рішення є аеродинамічна форма літака F-117 Nighthawk, яка забезпечує мінімальне радіолокаційне відбиття.

Окрім пасивних методів, активно розвиваються технології динамічного маскування. Зокрема, інфрачервоне маскування спрямоване на зниження теплового випромінювання об’єкта шляхом застосування термостійких покриттів або інтегрованих систем охолодження, що знижують помітність у тепловому діапазоні.

Також широко використовуються системи радіоелектронного протидії, які генерують активні перешкоди — сигнали на тих самих частотах, що й сигнали виявлення, але з вищою потужністю. Це ускладнює точне визначення координат повітряної цілі.

Доповненням до таких систем виступають засоби введення в оману — так звані «приманки», які можуть створювати фальшиві електромагнітні або теплові сигнали, імітуючи наявність об’єкта в іншому місці, або ж повністю відволікаючи увагу противника від реального об'єкта.

Список літератури

1. Cha J. H., JangHuang Y., Chen G., Wang X. *et al*. Advances in radar/infrared compatible stealth materials. *J Mater Sci: Mater Electron*. 2025. 36. 278. doi:10.1007/s10854-025-14314-z.
2. Shirke N., Ghase V., Jamdar V. Recent advances in stealth coating. *Polymer Bulletin*. 2024. 81(11). P. 9389-9418.
3. Yao H., Yang J., Li H., Xu J., Bi K. Optimal design of multilayer radar absorbing materials: a simulation-optimization approach. *Advanced Composites and Hybrid Materials*. 2023. 6(1). 43.
4. Zohuri B. Radar-absorbent material and radar Cross section. In: *Radar energy warfare and the challenges of stealth technology*. Cham: Springer International Publishing. 2020. P. 147-203.
5. Yenilmez F., Mutlu I. Production of metamaterial-based radar absorbing material for stealth technology. *Brazilian Journal of Physics*. 2024. 54(2). 60.
6. Kostishin V. G., Isaev I. M., Salogub D. V. Radio-absorbing magnetic polymer composites based on spinel ferrites: a review. *Polymers*. 2024. 16(7). 1003.
7. Meng X., Xu W., Ren X., Zhu M. Progress and challenges of ferrite matrix microwave absorption materials. *Materials*. 2024. 17(10). 2315.
8. Sierra Redondo I. P. *Estudi de l’estructura del F-117A Nighthawk i reproducció d’una maqueta a escala 1: 12* (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya). 2024.
9. Sun H. T., Song L. W., Wang J., Chu Z. T., Zhu R. C., Jia Y. X., et al. Multispectral Wideband Microwave Meta-absorber with Optically Transparency and Infrared Camouflage. In: *2024 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*. IEEE. April. 2024. P. 1-8.
10. Nam J., Chang I., Lim J. S., Yun M., Cho H. H. Multispectral pattern camouflage materials based on PU/Al-flake composite: A CNN-based evaluation. *Applied Surface Science*. 2025. 680. 161436.
11. Yang Y., Wang L., Zhao G., Cheng C. Influence of Target Dynamic RCS Characteristics on Active Cancellation. *Engineering Letters*. 2025. 33(4).
12. Ryu S. H., Jo S. J., Myong R. S. Effects of cross-sectional shape on the low observability of double serpentine nozzles. *Aerospace Science and Technology*. 2024. 155. 109593.
13. Jeong H., Choi B., Kweon I., Choi S., Kim H. IR signature characteristics of a turbine engine plume with a 2D nozzle. *Infrared Physics & Technology*. 2025. 105968.
14. Fu W., Ma T. A Study of Radar Anti-jamming Based on Deep Convolutional Blind Separation Network. *IEEE Sensors Journal*. 2024.
15. Conte C., Verini Supplizi S., de Alteriis G., Mele A., Rufino G., Accardo D. Using Drone Swarms as a Countermeasure of Radar Detection. *J. Aerosp. Inf. Syst*. 2023. 20. P. 70–80.

16. Bildik E., Tsourdos A., Perrusquía A., Inalhan G. Decoys deployment for missile interception: A multi-agent reinforcement learning approach. *Aerospace*. 2024. 11(8). 684.
17. Deutschmann B., Winkler G., Kastner P. Impact of electromagnetic interference on the functional safety of smart power devices for automotive applications. *Elektrotechnik und Informationstechnik*. 2018. 135(4-5). P. 352-359.
18. Mathur P., Raman S. Electromagnetic interference (EMI): measurement and reduction techniques. *Journal of Electronic Materials*. 2020. 49. P. 2975-2998.
19. EMBZohuri B. *Radar energy warfare and the challenges of stealth technology*. Berlin: Springer. 2020. P. 310.
20. Khan A. S. *Microwave engineering: concepts and fundamentals*. CRC press. 2014.
21. Perez F. R., Estrada S. L., Briones F. C., García U. P. Invisibilidad al radar: de la ficción a la realidad, *Av. y Perspect, CINVESTAV*. 2021.
22. IEEE Aerospace and Electronic Systems Society *IEEE Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands IEEE Std 521-2019 (Revision IEEE Std 521-2002)*. 2020. P. 1-15. doi:10.1109/IEEESTD.2020.8999849.
23. Bruder J. A. IEEE Radar standards and the radar systems panel. *IEEE Aero. Electron. Syst. Mag*. 2013. 28. P. 19-22. doi:10.1109/MAES.2013.6559377.
24. Eaves J. L., Reedy E. K. Introduction to radar. *Princ. Mod. Radar (first ed.)*. Chapman & Hall. 1987. P. 1-29. doi:10.1007/978-1-4613-1971-9.
25. Skolnik M. An introduction and overview of radar. *Radar Handb (third ed.)*. McGraw-Hill. 2008. P. 1.1-1.22.
26. Wolff C. Algunos radares y su banda de frecuencias. 2009. URL: https://www.radartutorial.eu/07.waves/pic/radars.jpg.
27. Knott E. F., Schaeffer J. F., Tulley M. T. *Radar cross section*. SciTech Publishing. 2004.
28. Shim H. B., Seo M. K., Park S. J. Thermal conductivity and mechanical properties of various cross-section types carbon fiber-reinforced composites. *Journal of materials science*. 2002. 37(9). P. 1881-1885.
29. Youssef N. N. Radar cross section of complex targets. *Proceedings of the IEEE*. 1989. 77(5). P. 722-734.
30. Cha J. H., Jang W. H., Noh J. E., Choi W. H., Kim C. G. A space stealth and cosmic radiation shielding composite: polydopamine-coating and multi-walled carbon nanotube grafting onto an ultra-high-molecular-weight polyethylene/hydrogen-rich benzoxazine composite. *Composites Science and Technology*. 2022. 230. 109711.
31. Lee W. J., Lee J. W., Kim C. G. Characteristics of an electromagnetic wave absorbing composite structure with a conducting polymer electromagnetic bandgap (EBG) in the X-band. *Composites Science and Technology*. 2008. 68(12). P. 2485-2489.
32. Wang Y. L., Zhao P. Y., Liang B. L., Chen K., Wang G. S. Carbon nanotubes decorated Co/C from ZIF-67/melamine as high efficient microwave absorbing material. *Carbon*. 2023. 202. P. 66-75.
33. Bian R., He G., Zhi W., Xiang S., Wang T., Cai D. Ultralight MXene-based aerogels with high electromagnetic interference shielding performance. *Journal of Materials Chemistry C*. 2019. 7(3). P. 474-478.
34. Park S. J., Seo M. K., Nah C. Influence of surface characteristics of carbon blacks on cure and mechanical behaviors of rubber matrix compoundings. *Journal of colloid and interface science*. 2005. 291(1). P. 229-235.
35. Wang L., Ma Z., Qiu H., Zhang Y., Yu Z., Gu J. Significantly enhanced electromagnetic interference shielding performances of epoxy nanocomposites with long-range aligned lamellar structures. *Nano-Micro Letters*. 2022. 14(1). 224.
36. Ruiz-Perez F., López-Estrada S. M., Tolentino-Hernández R. V., Caballero-Briones F. Carbon-based radar absorbing materials: A critical review. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*. 2022. 7(3). 100454.
37. Cao M. S., Chen H., Wang X. X., Zhang M., Zhang Y. L., Shu J., et al. Graphene nanohybrid: excellent electromagnetic properties for electromagnetic wave absorbing and shielding. *J. Mater. Chem. C*. 2018. 6(17). P. 4586-4602.
38. Baseghi S., Garmabi H., Gavgani J. N., Adelnia H. Lightweight high-density polyethylene/carbonaceous nanosheets microcellular foams with improved electrical conductivity and mechanical properties. *J. Mater. Sci*. 2015. 50. P. 4994-5004. doi:10.1007/s10853-015-9048-3.
39. Munalli D., Dimitrakis G., Chronopoulos D., Greedy S., Long A. Electromagnetic shielding effectiveness of carbon fibre reinforced composites. *Composites Part B: Engineering*. 2019. 173. 106906.
40. Park D. H., Lee Y. K., Park S. S., Lee C. S., Kim S. H., Kim W. N. Effects of hybrid fillers on the electrical conductivity and EMI shielding efficiency of polypropylene/conductive filler composites. *Macromolecular Research*. 2013. 21. P. 905-910.
41. Al-Ghamdi A. A., Al-Hartomy O. A., El-Tantawy F., Yakuphanoglu F. Novel polyvinyl alcohol/silver hybrid nanocomposites for high performance electromagnetic wave shielding effectiveness. *Microsystem Technologies*. 2015. 21. P. 859-868.
42. Wanasinghe D., Aslani F., Ma G., Habibi D. Review of polymer composites with diverse nanofillers for electromagnetic interference shielding. *Nanomaterials*. 2020. 10(3). 541.
43. Jiang D., Murugadoss V., Wang Y., Lin J., Ding T., Wang Z., et al. Electromagnetic interference shielding polymers and nanocomposites-a review. *Polymer Reviews*. 2019. 59(2). P. 280-337.
44. Portes R. C., Lopes B. H. K., do Amaral Junior M. A., Florez-Vergara D. E., Quirino S. F., Baldan M. R. Effect of granulometric distribution on electromagnetic shielding effectiveness for polymeric composite based on natural graphite. *Science and Engineering of Composite Materials*. 2019. 26(1). P. 531-539.
45. Paul C. R., Scully R. C., Steffka M. A. *Introduction to electromagnetic compatibility*. John Wiley & Sons. 2022.
46. Al-Saleh M. H., Saadeh W. H., Sundararaj U. EMI shielding effectiveness of carbon based nanostructured polymeric materials: a comparative study. *Carbon*. 2013. 60. P. 146-156.
47. Shukla V. Review of electromagnetic interference shielding materials fabricated by iron ingredients. *Nanoscale Advances*. 2019. 1(5). P. 1640-1671.
48. Wang Z., Wei R., Gu J., Liu H., Liu C., Luo C., et al. Ultralight, highly compressible and fire-retardant graphene aerogel with self-adjustable electromagnetic wave absorption. *Carbon*. 2018. 139. P. 1126-1135.
49. Zhu J., Gu H., Luo Z., Haldolaarachige N., Young D. P., Wei S., Guo Z. Carbon nanostructure-derived polyaniline metacomposites: electrical, dielectric, and giant magnetoresistive properties. *Langmuir*. 2012. 28(27). P. 10246-10255.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

50. Yaman M. D. *Thin film coating of glass fabrics for radar absorbing composites* (Master's thesis, Izmir Institute of Technology (Turkey)). 2015.
51. Meng F., Wang H., Huang F., Guo Y., Wang Z., Hui D., Zhou Z. Graphene-based microwave absorbing composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*. 2018. 137. P. 260-277.
52. González M., Pozuelo J., Baselga J. Electromagnetic shielding materials in GHz range. *The Chemical Record*. 2018. 18(7-8). P. 1000-1009.
53. Liu Y., Zhang Y., Zhang C., Huang B., Li Y., Lai W., et al. Low temperature preparation of highly fluorinated multiwalled carbon nanotubes activated by Fe3O4 to enhance microwave absorbing property. *Nanotechnology*. 2018. 29(36). 365703.
54. Kumar P., Narayan Maiti U., Sikdar A., Kumar Das T., Kumar A., Sudarsan V. Recent advances in polymer and polymer composites for electromagnetic interference shielding: review and future prospects. *Polymer Reviews*. 2019. 59(4). P. 687-738.
55. Zaker R., Sadeghzadeh A. Passive techniques for target radar cross section reduction: A comprehensive review. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*. 2020. 30(11). e22411.
56. Ashraf R., Tabassum S. T., Hossam-E-Haider M. Analytical study of Bi-static radar cross section with a comparison at S band and X band of F-117 Nighthawk stealth aircraft. In: *2018 4th International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (iCEEiCT)*. IEEE. September. 2018. P. 406-410.
57. Mahafza B. R. *Radar systems analysis and design using MATLAB*. Chapman and Hall/CRC. 2005.
58. Cook C. *Radar signals: An introduction to theory and application*. Elsevier. 2012.
59. Jain A., Patel I. Dynamic imaging and RCS measurements of aircraft. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2002. 31(1). P. 211-226.
60. Lee S. K., Lee S., Back J., Shin T. A new method for active cancellation of engine order noise in a passenger car. *Applied Sciences*. 2018. 8(8). 1394.
61. Marcum J. A statistical theory of target detection by pulsed radar. *IRE Transactions on Information Theory*. 1960. 6(2). P. 59-267.
62. Swerling P. Radar probability of detection for some additional fluctuating target cases. *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems*. 2002. 33(2). P. 698-709.
63. Karkera H., Shettigar S. K., Katagi N. N. A Comparative Study of Two Wavelet-Based Numerical Schemes for the Solution of Nonlinear Boundary Value Problems. *IAENG International Journal of Applied Mathematics*. 2024. 54(9).
64. Weinstock W. W. *Target cross section models for radar systems analysis*. University of Pennsylvania. 1964.
65. Heidbreder G. R., Mitchell R. L. Detection probabilities for log-normally distributed signals. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 1967. (1). P. 5-13.
66. Xu X., Huang P. A new RCS statistical model of radar targets. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 1997. 33(2). P. 710-714.
67. Semenikhin A. I., Chernokolpakov A. I. Active cancellation of radar cross section of large aircraft using conformai 2-port magnetic T-shaped antenna. In: *2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*. IEEE. June. 2017. P. 181-184.
68. Schindler J. K., Mack R. B., Blacksmith P. The control of electromagnetic scattering by impedance loading. *Proceedings of the IEEE*. 2005. 53(8). P. 993-1004.
69. Khan J., Duan W., Sherbaz S. Radar cross section prediction and reduction for naval ships. *Journal of Marine science and application*. 2012. 11(2). P. 191-199. Iqbal.
70. Ertuş E. B. *Production, characterization and industrial applications of radar absorbing materials* (Master's thesis, Dokuz Eylul Universitesi (Turkey)). 2014.
71. Neo C. P., Varadan V. K. Optimization of carbon fiber composite for microwave absorber. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2004. 46(1). P. 102-106.
72. Saville P. *Review of radar absorbing materials*. Defence Research & Development Canada, Defence R & D Canada-Atlantic. 2005.
73. Chung D. D. *Carbon materials: science and applications*. Vol. 3. World Scientific. 2019.
74. Chung D. D. L. A review of exfoliated graphite. *Journal of materials science*. 2016. 51(1). P. 554-568.
75. Luo X., Chung D. D. L. Electromagnetic interference shielding reaching 130 dB using flexible graphite. *MRS online proceedings library*. 1996. 445(1). P. 235-238.
76. Wu J., Chung D. D. L. Increasing the electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon fiber polymer–matrix composite by using activated carbon fibers. *Carbon*. 2002. 40(3). P. 445-447.
77. Zhang D., Yang H., Pan J., Lewis B., Zhou W., Cai K., et al. Multi-functional CNT nanopaper polyurethane nanocomposite fabricated by ultrasonic infiltration and dip soaking processes. *Composites Part B: Engineering*. 2020. 182. 107646.
78. Lan C., Guo M., Li C., Qiu Y., Ma Y., Sun J. Axial alignment of carbon nanotubes on fibers to enable highly conductive fabrics for electromagnetic interference shielding. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2020. 12(6). P. 7477-7485.
79. Wan C., Jiao Y., Li X., Tian W., Li J., Wu Y. A multi-dimensional and level-by-level assembly strategy for constructing flexible and sandwich-type nanoheterostructures for high-performance electromagnetic interference shielding. *Nanoscale*. 2020. 12(5). P. 3308-3316.
80. Kim T., Chung D. D. L. Mats and fabrics for electromagnetic interference shielding. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2006. 15(3). P. 295-298.
81. Shui X., Chung D. D. L. 0.4 μm diameter nickel-filament silicone-matrix resilient composites for electromagnetic interference shielding. 1997.
82. Luo X., Chung D. D. L. Electromagnetic interference shielding using continuous carbon-fiber carbon-matrix and polymer-matrix composites. *Composites Part B: Engineering*. 1999. 30(3). P. 227-231.
83. Bhardwaj P., Kaushik S., Gairola P., Gairola S. P. Exceptional electromagnetic radiation shielding performance and dielectric properties of surfactant assisted polypyrrole-carbon allotropes composites. *Radiation Physics and Chemistry*. 2018. 151. P. 156-163.
84. Sastry D. N., Revanasiddappa M., Suresh T., Kiran Y. R., Raghavendra S. C. Electromagnetic shielding effectiveness studies on polyaniline/CSA-WO3 composites at Ku Band frequencies. In: *AIP Conference Proceedings*. Vol. 1953. № 1. AIP Publishing LLC. May. 2018. P. 090067.

85. Kaur G., Adhikari R., Cass P., Bown M., Gunatillake P. Electrically conductive polymers and composites for biomedical applications. *Rsc Advances*. 2015. 5(47). P. 37553-37567.
86. Suetake K. Application of ferrite to electromagnetic wave absorber and its characteristics. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1971. 19(1). P. 65-72.
87. Poddar A. K., Patel S. S., Patel H. D. Synthesis, characterization and applications of conductive polymers: A brief review. *Polymers for Advanced Technologies*. 2021. 32(12). P. 4616-4641.
88. Fang Z., Cao X., Li C., Zhang H., Zhang J., Zhang H. Investigation of carbon foams as microwave absorber: Numerical prediction and experimental validation. *Carbon*. 2006. 44(15). P. 3368-3370.
89. Zhang Z., Li T., Jing D., Zhuang Q. Fabrication and optimization of radar absorbing structures composed of glass/carbon fibers/epoxy laminate composites filled with carbon nanotubes. In: *2008 Conference on Optoelectronic and Microelectronic Materials and Devices*. IEEE. July. 2008. P. 209-212.
90. Veselago V. G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of and. *Usp. fiz. nauk*. 1967. 92(3). P. 517-526.
91. Dubey A., Shami T. C. Metamaterials in electromagnetic wave absorbers. *Defence Science Journal*. 2012. 62(4). P. 261-268.
92. Iqbal M. N., Abd Malek M. F. B., Ronald S. H., Mezan M. S. B., Juni K. M., Chat R. A study of the EMC performance of a graded-impedance, microwave, rice-husk absorber. *Progress In Electromagnetics Research*. 2012. 131. P. 19-44.
93. Kartini K., Mahmud H. B., Hamidah M. S. Absorption and permeability performance of Selangor rice husk ash blended grade 30 concrete. *Journal of engineering science and technology*. 2010. 5(1). P. 1-16.
94. Yaman M. D. *Thin film coating of glass fabrics for radar absorbing composites* (Master's thesis, Izmir Institute of Technology (Turkey)). 2015.
95. MIRTAHERI S. A., Yin J., Seki H., Mizumoto T., Naito Y. The characteristics of electromagnetic wave absorber composed of rubber, carbon and ferrite. *IEICE TRANSACTIONS (1976-1990)*. 1989. 72(12). P. 1447-1452.
96. Koledintseva M., Drewniak J., Zhang Y., Lenn J., Thoms M. Modeling of ferrite-based materials for shielding enclosures. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2009. 321(7). P. 730-733.
97. Yeng Seng L., Ping Jack S., Kok Yeow Y., Fwen Hoon W., Chia Yew L., Hong Seng G., Malek F. Enhanced microwave absorption of rice husk-based pyramidal microwave absorber with different lossy base layer. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*. 2020. 14(3). P. 215-222.
98. Pell R., Whattoff P., Lindsay J. Climate impact of graphite production. *Minviro: London, UK*. 2021.
99. Fallahi A., Enayati A. Modeling pyramidal absorbers using the fourier modal method and the mode matching technique. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2016. 58(3). P. 820-827.
100. Nv A. a. C. Emerson & Cuming Anechoic Chambers. URL: https://www.ecanechoicchambers.com/.
101. Ahmad H., Tariq A., Shehzad A., Faheem M. S., Shafiq M., Rashid I. A., et al. Stealth technology: Methods and composite materials—A review. *Polymer Composites*. 2019. 40(12). P. 4457-4472.
102. Xu F., Ma L., Huo Q., Gan M., Tang J. Microwave absorbing properties and structural design of microwave absorbers based on polyaniline and polyaniline/magnetite nanocomposite. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2015. 374. P. 311-316.
103. Kaur R., Aul G. D. Review on microwave absorbing material using different carbon composites. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2014. 3(5).
104. Seman F. C., Cahill R. Performance enhancement of Salisbury screen absorber using resistively loaded spiral FSS. *Microwave and Optical Technology Letters*. 2011. 53(7). P. 1538-1541.
105. Kuyucuoglu F. A novel approach to the design of multi section ultra-wideband Jaumann absorber. *Optik*. 2023. 287. 171152.
106. Liu Y., Zhang X. Metamaterials: a new frontier of science and technology. *Chemical Society Reviews*. 2011. 40(5). P. 2494-2507.
107. Derov J. S., Crisman E. E., Drehman A. J. Metamaterials and Their RF Properties. *AFRL-RY-HS-TR-2008-0026 Volume I*. 2008. 176.
108. Seddon N., Bearpark T. Observation of the inverse Doppler effect. *Science*. 2003. 302(5650). P. 1537-1540.
109. Brookner E. Metamaterial advances for radar and communications. In: *2016 CIE International Conference on Radar (RADAR)*. IEEE. October. 2016. P. 1-8.
110. Viaene S., Ginis V., Danckaert J., Tassin P. Transforming two-dimensional guided light using nonmagnetic metamaterial waveguides. *Physical Review B*. 2016. 93(8). 085429.
111. Liu H., Webb K. J. Nanoimaging-Bilayer metamaterial lens breaks the diffraction limit-The quest for subwavelength imaging through anisotropic metamaterials has produced a design for a bilayer lens that can restore a nearly perfect image. *Laser Focus World*. 2009. 45(9). 35.
112. Hao J., Wang J., Liu X., Padilla W. J., Zhou L., Qiu M. High performance optical absorber based on a plasmonic metamaterial. *Applied Physics Letters*. 2010. 96(25).
113. Johnson M. C., Brunton S. L., Kundtz N. B., Kutz J. N. Sidelobe canceling for reconfigurable holographic metamaterial antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2015. 63(4). P. 1881-1886.
114. Rhee J. Y., Yoo Y. J., Kim K. W., Kim Y. J., Lee Y. P. Metamaterial-based perfect absorbers. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 2014. 28(13). P. 1541-1580.
115. La Spada L., Vegni L. Metamaterial-based Wideband Electromagnetic Wave Absorber. *Opt Express*. 2016. 24(6). 5763. doi:10.1364/oe.24.005763.
116. Yang J., Xu C., Qu S., Ma H., Wang J., Pang Y. Optical Transparent Infrared High Absorption Metamaterial Absorbers. *J Adv Dielect*. 2018. 08(01). 1850007. doi:10.1142/s2010135x18500078.
117. Sharma S., Tripathi C. C., Rishi R. Impedance Matching Techniques for Microstrip Patch Antenna. *Indian J Sci Technol*. 2017. 10(28). P. 1–16. doi:10.17485/ijst/2017/v10i28/97642.
118. Gang Q., Jia-Fu W., Ming-Bao Y., Wei C., Hong-Ya C., Yong-Feng L. Lowering Plasma Frequency by Enhancing the Effective Mass of Electrons: A Route to Deep Sub-wavelength Metamaterials. *Chin Phys B*. 2013. 22(8). 87302. doi:10.1088/1674-1056/22/8/087302.
119. Abdulkarim Y. I., Mohanty A., Acharya O. P., Appasani B., Khan M. S., Mohapatra S. K., et al. A review on

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

metamaterial absorbers: Microwave to optical. *Frontiers in Physics*. 2022. 10. 893791.
120. Landy N. I., Sajuyigbe S., Mock J. J., Smith D. R., Padilla W. J. Perfect Metamaterial Absorber. *Phys Rev Lett*. 2008. 100(20). P. 207402–1.–4. doi: 10.1103/physrevlett.100.207402.
121. Verma A., Meena O. P. A review of metamaterial absorber and its absorption techniques. In: *2023 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS)*. IEEE. February. 2023. P. 1-6.
122. Aytaç A., İpek H., Aztekin K., Aytav E., Çanakçı B. A review of the radar absorber material and structures. *Scientific Journal of the Military University of Land Forces*. 2020. 52.
123. Sun L., Cheng H., Zhou Y., Wang J. Broadband metamaterial absorber based on coupling resistive frequency selective surface. *Optics express*. 2012. 20(4). P. 4675-4680.
124. Huang L., Chen H. Multi-band and polarization insensitive metamaterial absorber. *Progress In electromagnetics research*. 2011. 113. P. 103-110.
125. Vinoy K. J., Jha R. M. Trends in radar absorbing materials technology. *Sadhana*. 1995. 20(5). P. 815-850.

References (transliterated)

1. Cha J. H., JangHuang Y., Chen G., Wang X. *et al*. Advances in radar/infrared compatible stealth materials. *J Mater Sci: Mater Electron*, 2025, 36, 278, doi:10.1007/s10854-025-14314-z.
2. Shirke N., Ghase V., Jamdar V. Recent advances in stealth coating. *Polymer Bulletin*, 2024, 81(11), pp. 9389-9418.
3. Yao H., Yang J., Li H., Xu J., Bi K. Optimal design of multilayer radar absorbing materials: a simulation-optimization approach. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2023, 6(1), 43.
4. Zohuri B. Radar-absorbent material and radar Cross section. In: *Radar energy warfare and the challenges of stealth technology*. Cham: *Springer International Publishing*, 2020, pp. 147-203.
5. Yenilmez F., Mutlu I. Production of metamaterial-based radar absorbing material for stealth technology. *Brazilian Journal of Physics*, 2024, 54(2), 60.
6. Kostishin V. G., Isaev I. M., Salogub D. V. Radio-absorbing magnetic polymer composites based on spinel ferrites: a review. *Polymers*, 2024, 16(7), 1003.
7. Meng X., Xu W., Ren X., Zhu M. Progress and challenges of ferrite matrix microwave absorption materials. *Materials*, 2024, 17(10), 2315.
8. Sierra Redondo I. P. Estudi de l'estructura del F-117A Nighthawk i reproducció d'una maqueta a escala 1: 12 (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya), 2024.
9. Sun H. T., Song L. W., Wang J., Chu Z. T., Zhu R. C., Jia Y. X., *et al*. Multispectral Wideband Microwave Meta-absorber with Optically Transparency and Infrared Camouflage. In: *2024 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*. *IEEE*. April, 2024, pp. 1-8.
10. Nam J., Chang I., Lim J. S., Yun M., Cho H. H. Multispectral pattern camouflage materials based on PU/Al-flake composite: A CNN-based evaluation. *Applied Surface Science*, 2025, 680, 161436.
11. Yang Y., Wang L., Zhao G., Cheng C. Influence of Target Dynamic RCS Characteristics on Active Cancellation. *Engineering Letters*, 2025, 33(4).
12. Ryu S. H., Jo S. J., Myong R. S. Effects of cross-sectional shape on the low observability of double serpentine nozzles. *Aerospace Science and Technology*, 2024, 155, 109593.
13. Jeong H., Choi B., Kweon I., Choi S., Kim H. IR signature characteristics of a turbine engine plume with a 2D nozzle. *Infrared Physics & Technology*, 2025, 105968.
14. Fu W., Ma T. A Study of Radar Anti-jamming Based on Deep Convolutional Blind Separation Network. *IEEE Sensors Journal*, 2024.
15. Conte C., Verini Supplizi S., de Alteriis G., Mele A., Rufino G., Accardo D. Using Drone Swarms as a Countermeasure of Radar Detection. *J. Aerosp. Inf. Syst*, 2023, 20, pp. 70–80.
16. Bildik E., Tsourdos A., Perrusquía A., Inalhan G. Decoys deployment for missile interception: A multi-agent reinforcement learning approach. *Aerospace*, 2024, 11(8), 684.
17. Deutschmann B., Winkler G., Kastner P. Impact of electromagnetic interference on the functional safety of smart power devices for automotive applications. *Elektrotechnik und Informationstechnik*, 2018, 135(4-5), pp. 352-359.
18. Mathur P., Raman S. Electromagnetic interference (EMI): measurement and reduction techniques. *Journal of Electronic Materials*, 2020, 49, pp. 2975-2998.
19. EMBZohuri B. *Radar energy warfare and the challenges of stealth technology*. Berlin: *Springer*, 2020, pp. 310.
20. Khan A. S. *Microwave engineering: concepts and fundamentals*. *CRC press*, 2014.
21. Perez F. R., Estrada S. L., Briones F. C., García U. P. Invisibilidad al radar: de la ficción a la realidad, *Av. y Perspect, CINVESTAV*, 2021.
22. IEEE Aerospace and Electronic Systems Society IEEE Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands IEEE Std 521-2019 (Revision IEEE Std 521-2002), 2020, pp. 1-15, doi:10.1109/IEEESTD.2020.8999849.
23. Bruder J. A. IEEE Radar standards and the radar systems panel. *IEEE Aero. Electron. Syst. Mag*, 2013, 28, pp. 19-22, doi:10.1109/MAES.2013.6559377.
24. Eaves J. L., Reedy E. K. Introduction to radar. *Princ. Mod. Radar (first ed.)*. *Chapman & Hall*., 1987, pp. 1-29, doi:10.1007/978-1-4613-1971-9.
25. Skolnik M. An introduction and overview of radar. *Radar Handb (third ed.)*. *McGraw-Hill*, 2008, pp. 1.1-1.22.
26. Wolff C. Algunos radares y su banda de frecuencias. 2009. Available at: https://www.radartutorial.eu/07.waves/pic/radars.jpg.
27. Knott E. F., Schaeffer J. F., Tulley M. T. *Radar cross section*. *SciTech Publishing*, 2004.
28. Shim H. B., Seo M. K., Park S. J. Thermal conductivity and mechanical properties of various cross-section types carbon fiber-reinforced composites. *Journal of materials science*, 2002, 37(9), pp. 1881-1885.
29. Youssef N. N. Radar cross section of complex targets. *Proceedings of the IEEE*., 1989, 77(5), pp. 722-734.
30. Cha J. H., Jang W. H., Noh J. E., Choi W. H., Kim C. G. A space stealth and cosmic radiation shielding composite: polydopamine-coating and multi-walled carbon nanotube grafting onto an ultra-high-molecular-weight polyethylene/hydrogen-rich benzoxazine composite. *Composites Science and Technology*, 2022, 230, 109711.

31. Lee W. J., Lee J. W., Kim C. G. Characteristics of an electromagnetic wave absorbing composite structure with a conducting polymer electromagnetic bandgap (EBG) in the X-band. *Composites Science and Technology*, 2008, 68(12), pp. 2485-2489.
32. Wang Y. L., Zhao P. Y., Liang B. L., Chen K., Wang G. S. Carbon nanotubes decorated Co/C from ZIF-67/melamine as high efficient microwave absorbing material. *Carbon*, 2023, 202, pp. 66-75.
33. Bian R., He G., Zhi W., Xiang S., Wang T., Cai D. Ultralight MXene-based aerogels with high electromagnetic interference shielding performance. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, 7(3), pp. 474-478.
34. Park S. J., Seo M. K., Nah C. Influence of surface characteristics of carbon blacks on cure and mechanical behaviors of rubber matrix compoundings. *Journal of colloid and interface science*, 2005, 291(1), pp. 229-235.
35. Wang L., Ma Z., Qiu H., Zhang Y., Yu Z., Gu J. Significantly enhanced electromagnetic interference shielding performances of epoxy nanocomposites with long-range aligned lamellar structures. *Nano-Micro Letters*, 2022, 14(1), 224.
36. Ruiz-Perez F., López-Estrada S. M., Tolentino-Hernández R. V., Caballero-Briones F. Carbon-based radar absorbing materials: A critical review. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 2022, 7(3), 100454.
37. Cao M. S., Chen H., Wang X. X., Zhang M., Zhang Y. L., Shu J., *et al*. Graphene nanohybrid: excellent electromagnetic properties for electromagnetic wave absorbing and shielding. *J. Mater. Chem. C*, 2018, 6(17), pp. 4586-4602.
38. Baseghi S., Garmabi H., Gavgani J. N., Adelnia H. Lightweight high-density polyethylene/carbonaceous nanosheets microcellular foams with improved electrical conductivity and mechanical properties. *J. Mater. Sci*, 2015, 50, pp. 4994-5004, doi:10.1007/s10853-015-9048-3.
39. Munalli D., Dimitrakis G., Chronopoulos D., Greedy S., Long A. Electromagnetic shielding effectiveness of carbon fibre reinforced composites. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 173, 106906.
40. Park D. H., Lee Y. K., Park S. S., Lee C. S., Kim S. H., Kim W. N. Effects of hybrid fillers on the electrical conductivity and EMI shielding efficiency of polypropylene/conductive filler composites. *Macromolecular Research*, 2013, 21, pp. 905-910.
41. Al-Ghamdi A. A., Al-Hartomy O. A., El-Tantawy F., Yakuphanoglu F. Novel polyvinyl alcohol/silver hybrid nanocomposites for high performance electromagnetic wave shielding effectiveness. *Microsystem Technologies*, 2015, 21, pp. 859-868.
42. Wanasinghe D., Aslani F., Ma G., Habibi D. Review of polymer composites with diverse nanofillers for electromagnetic interference shielding. *Nanomaterials*, 2020, 10(3), 541.
43. Jiang D., Murugadoss V., Wang Y., Lin J., Ding T., Wang Z., *et al*. Electromagnetic interference shielding polymers and nanocomposites-a review. *Polymer Reviews*, 2019, 59(2), pp. 280-337.
44. Portes R. C., Lopes B. H. K., do Amaral Junior M. A., Florez-Vergara D. E., Quirino S. F., Baldan M. R. Effect of granulometric distribution on electromagnetic shielding effectiveness for polymeric composite based on natural graphite. *Science and Engineering of Composite Materials*, 2019, 26(1), pp. 531-539.
45. Paul C. R., Scully R. C., Steffka M. A. *Introduction to electromagnetic compatibility*. *John Wiley & Sons*, 2022.
46. Al-Saleh M. H., Saadeh W. H., Sundararaj U. EMI shielding effectiveness of carbon based nanostructured polymeric materials: a comparative study. *Carbon*, 2013, 60, pp. 146-156.
47. Shukla V. Review of electromagnetic interference shielding materials fabricated by iron ingredients. *Nanoscale Advances*, 2019, 1(5), pp. 1640-1671.
48. Wang Z., Wei R., Gu J., Liu H., Liu C., Luo C., *et al*. Ultralight, highly compressible and fire-retardant graphene aerogel with self-adjustable electromagnetic wave absorption. *Carbon*, 2018, 139, pp. 1126-1135.
49. Zhu J., Gu H., Luo Z., Haldolaarachige N., Young D. P., Wei S., Guo Z. Carbon nanostructure-derived polyaniline metacomposites: electrical, dielectric, and giant magnetoresistive properties. *Langmuir*, 2012, 28(27), pp. 10246-10255.
50. Yaman M. D. Thin film coating of glass fabrics for radar absorbing composites (Master's thesis, Izmir Institute of Technology (Turkey)), 2015.
51. Meng F., Wang H., Huang F., Guo Y., Wang Z., Hui D., Zhou Z. Graphene-based microwave absorbing composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 137, pp. 260-277.
52. González M., Pozuelo J., Baselga J. Electromagnetic shielding materials in GHz range. *The Chemical Record*, 2018, 18(7-8), pp. 1000-1009.
53. Liu Y., Zhang Y., Zhang C., Huang B., Li Y., Lai W., *et al*. Low temperature preparation of highly fluorinated multiwalled carbon nanotubes activated by Fe3O4 to enhance microwave absorbing property. *Nanotechnology*, 2018, 29(36), 365703.
54. Kumar P., Narayan Maiti U., Sikdar A., Kumar Das T., Kumar A., Sudarsan V. Recent advances in polymer and polymer composites for electromagnetic interference shielding: review and future prospects. *Polymer Reviews*, 2019, 59(4), pp. 687-738.
55. Zaker R., Sadeghzadeh A. Passive techniques for target radar cross section reduction: A comprehensive review. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2020, 30(11), e22411.
56. Ashraf R., Tabassum S. T., Hossam-E-Haider M. Analytical study of Bi-static radar cross section with a comparison at S band and X band of F-117 Nighthawk stealth aircraft. In: *2018 4th International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (iCEEiCT)*. *IEEE*. September, 2018, pp. 406-410.
57. Mahafza B. R. *Radar systems analysis and design using MATLAB*. *Chapman and Hall/CRC*, 2005.
58. Cook C. *Radar signals: An introduction to theory and application*. *Elsevier*, 2012.
59. Jain A., Patel I. Dynamic imaging and RCS measurements of aircraft. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 31(1), pp. 211-226.
60. Lee S. K., Lee S., Back J., Shin T. A new method for active cancellation of engine order noise in a passenger car. *Applied Sciences*, 2018, 8(8), 1394.
61. Marcum J. A statistical theory of target detection by pulsed radar. *IRE Transactions on Information Theory*., 1960, 6(2), pp. 59-267.
62. Swerling P. Radar probability of detection for some additional fluctuating target cases. *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems*, 2002, 33(2), pp. 698-709.

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

63. Karkera H., Shettigar S. K., Katagi N. N. A Comparative Study of Two Wavelet-Based Numerical Schemes for the Solution of Nonlinear Boundary Value Problems. *IAENG International Journal of Applied Mathematics*, 2024, 54(9).
64. Weinstock W. W. *Target cross section models for radar systems analysis*. *University of Pennsylvania*., 1964.
65. Heidbreder G. R., Mitchell R. L. Detection probabilities for log-normally distributed signals. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*., 1967, (1), pp. 5-13.
66. Xu X., Huang P. A new RCS statistical model of radar targets. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*., 1997, 33(2), pp. 710-714.
67. Semenikhin A. I., Chernokolpakov A. I. Active cancellation of radar cross section of large aircraft using conformai 2-port magnetic T-shaped antenna. In: *2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*. *IEEE*. June, 2017, pp. 181-184.
68. Schindler J. K., Mack R. B., Blacksmith P. The control of electromagnetic scattering by impedance loading. *Proceedings of the IEEE*, 2005, 53(8), pp. 993-1004.
69. Khan J., Duan W., Sherbaz S. Radar cross section prediction and reduction for naval ships. *Journal of Marine science and application*, 2012, 11(2), pp. 191-199. Iqbal.
70. Ertuş E. B. Production, characterization and industrial applications of radar absorbing materials (Master's thesis, Dokuz Eylul Universitesi (Turkey)), 2014.
71. Neo C. P., Varadan V. K. Optimization of carbon fiber composite for microwave absorber. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2004, 46(1), pp. 102-106.
72. Saville P. *Review of radar absorbing materials*. *Defence Research & Development Canada, Defence R & D Canada-Atlantic*, 2005.
73. Chung D. D. *Carbon materials: science and applications*. Vol. 3. *World Scientific*, 2019.
74. Chung D. D. L. A review of exfoliated graphite. *Journal of materials science*, 2016, 51(1), pp. 554-568.
75. Luo X., Chung D. D. L. Electromagnetic interference shielding reaching 130 dB using flexible graphite. *MRS online proceedings library*., 1996, 445(1), pp. 235-238.
76. Wu J., Chung D. D. L. Increasing the electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon fiber polymer–matrix composite by using activated carbon fibers. *Carbon*, 2002, 40(3), pp. 445-447.
77. Zhang D., Yang H., Pan J., Lewis B., Zhou W., Cai K., *et al*. Multi-functional CNT nanopaper polyurethane nanocomposite fabricated by ultrasonic infiltration and dip soaking processes. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 182, 107646.
78. Lan C., Guo M., Li C., Qiu Y., Ma Y., Sun J. Axial alignment of carbon nanotubes on fibers to enable highly conductive fabrics for electromagnetic interference shielding. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(6), pp. 7477-7485.
79. Wan C., Jiao Y., Li X., Tian W., Li J., Wu Y. A multi-dimensional and level-by-level assembly strategy for constructing flexible and sandwich-type nanoheterostructures for high-performance electromagnetic interference shielding. *Nanoscale*, 2020, 12(5), pp. 3308-3316.
80. Kim T., Chung D. D. L. Mats and fabrics for electromagnetic interference shielding. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2006, 15(3), pp. 295-298.
81. Shui X., Chung D. D. L. 0.4 μm diameter nickel-filament silicone-matrix resilient composites for electromagnetic interference shielding., 1997.
82. Luo X., Chung D. D. L. Electromagnetic interference shielding using continuous carbon-fiber carbon-matrix and polymer-matrix composites. *Composites Part B: Engineering*., 1999, 30(3), pp. 227-231.
83. Bhardwaj P., Kaushik S., Gairola P., Gairola S. P. Exceptional electromagnetic radiation shielding performance and dielectric properties of surfactant assisted polypyrrole-carbon allotropes composites. *Radiation Physics and Chemistry*, 2018, 151, pp. 156-163.
84. Sastry D. N., Revanasiddappa M., Suresh T., Kiran Y. R., Raghavendra S. C. Electromagnetic shielding effectiveness studies on polyaniline/CSA-WO3 composites at Ku Band frequencies. In: *AIP Conference Proceedings*. Vol. 1953, № 1. *AIP Publishing LLC*. May, 2018, pp. 090067.
85. Kaur G., Adhikari R., Cass P., Bown M., Gunatillake P. Electrically conductive polymers and composites for biomedical applications. *Rsc Advances*, 2015, 5(47), pp. 37553-37567.
86. Suetake K. Application of ferrite to electromagnetic wave absorber and its characteristics. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*., 1971, 19(1), pp. 65-72.
87. Poddar A. K., Patel S. S., Patel H. D. Synthesis, characterization and applications of conductive polymers: A brief review. *Polymers for Advanced Technologies*, 2021, 32(12), pp. 4616-4641.
88. Fang Z., Cao X., Li C., Zhang H., Zhang J., Zhang H. Investigation of carbon foams as microwave absorber: Numerical prediction and experimental validation. *Carbon*, 2006, 44(15), pp. 3368-3370.
89. Zhang Z., Li T., Jing D., Zhuang Q. Fabrication and optimization of radar absorbing structures composed of glass/carbon fibers/epoxy laminate composites filled with carbon nanotubes. In: *2008 Conference on Optoelectronic and Microelectronic Materials and Devices*. *IEEE*. July, 2008, pp. 209-212.
90. Veselago V. G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of and. *Usp. fiz. nauk*., 1967, 92(3), pp. 517-526.
91. Dubey A., Shami T. C. Metamaterials in electromagnetic wave absorbers. *Defence Science Journal*, 2012, 62(4), pp. 261-268.
92. Iqbal M. N., Abd Malek M. F. B., Ronald S. H., Mezan M. S. B., Juni K. M., Chat R. A study of the EMC performance of a graded-impedance, microwave, rice-husk absorber. *Progress In Electromagnetics Research*, 2012, 131, pp. 19-44.
93. Kartini K., Mahmud H. B., Hamidah M. S. Absorption and permeability performance of Selangor rice husk ash blended grade 30 concrete. *Journal of engineering science and technology*, 2010, 5(1), pp. 1-16.
94. Yaman M. D. Thin film coating of glass fabrics for radar absorbing composites (Master's thesis, Izmir Institute of Technology (Turkey)), 2015.
95. MIRTAHERI S. A., Yin J., Seki H., Mizumoto T., Naito Y. The characteristics of electromagnetic wave absorber composed of rubber, carbon and ferrite. *IEICE TRANSACTIONS (1976-1990)*., 1989, 72(12), pp. 1447-1452.
96. Koledintseva M., Drewniak J., Zhang Y., Lenn J., Thoms M. Modeling of ferrite-based materials for shielding

enclosures. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2009, 321(7), pp. 730-733.
97. Yeng Seng L., Ping Jack S., Kok Yeow Y., Fwen Hoon W., Chia Yew L., Hong Seng G., Malek F. Enhanced microwave absorption of rice husk-based pyramidal microwave absorber with different lossy base layer. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2020, 14(3), pp. 215-222.
98. Pell R., Whattoff P., Lindsay J. Climate impact of graphite production. *Minviro: London, UK*, 2021.
99. Fallahi A., Enayati A. Modeling pyramidal absorbers using the fourier modal method and the mode matching technique. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2016, 58(3), pp. 820-827.
100. Nv A. a. C. *Emerson & Cuming Anechoic Chambers*. Available at: https://www.ecanechoicchambers.com/.
101. Ahmad H., Tariq A., Shehzad A., Faheem M. S., Shafiq M., Rashid I. A., *et al*. Stealth technology: Methods and composite materials—A review. *Polymer Composites*, 2019, 40(12), pp. 4457-4472.
102. Xu F., Ma L., Huo Q., Gan M., Tang J. Microwave absorbing properties and structural design of microwave absorbers based on polyaniline and polyaniline/magnetite nanocomposite. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, 374, pp. 311-316.
103. Kaur R., Aul G. D. Review on microwave absorbing material using different carbon composites. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2014, 3(5).
104. Seman F. C., Cahill R. Performance enhancement of Salisbury screen absorber using resistively loaded spiral FSS. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2011, 53(7), pp. 1538-1541.
105. Kuyucuoglu F. A novel approach to the design of multi section ultra-wideband Jaumann absorber. *Optik*, 2023, 287, 171152.
106. Liu Y., Zhang X. Metamaterials: a new frontier of science and technology. *Chemical Society Reviews*, 2011, 40(5), pp. 2494-2507.
107. Derov J. S., Crisman E. E., Drehman A. J. Metamaterials and Their RF Properties. *AFRL-RY-HS-TR-2008-0026 Volume I*, 2008, 176.
108. Seddon N., Bearpark T. Observation of the inverse Doppler effect. *Science*, 2003, 302(5650), pp. 1537-1540.
109. Brookner E. Metamaterial advances for radar and communications. In: *2016 CIE International Conference on Radar (RADAR)*. *IEEE*. October, 2016, pp. 1-8.
110. Viaene S., Ginis V., Danckaert J., Tassin P. Transforming two-dimensional guided light using nonmagnetic metamaterial waveguides. *Physical Review B*, 2016, 93(8), 085429.
111. Liu H., Webb K. J. Nanoimaging-Bilayer metamaterial lens breaks the diffraction limit-The quest for subwavelength imaging through anisotropic metamaterials has produced a design for a bilayer lens that can restore a nearly perfect image. *Laser Focus World*, 2009, 45(9), 35.
112. Hao J., Wang J., Liu X., Padilla W. J., Zhou L., Qiu M. High performance optical absorber based on a plasmonic metamaterial. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(25).
113. Johnson M. C., Brunton S. L., Kundtz N. B., Kutz J. N. Sidelobe canceling for reconfigurable holographic metamaterial antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(4), pp. 1881-1886.
114. Rhee J. Y., Yoo Y. J., Kim K. W., Kim Y. J., Lee Y. P. Metamaterial-based perfect absorbers. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2014, 28(13), pp. 1541-1580.
115. La Spada L., Vegni L. Metamaterial-based Wideband Electromagnetic Wave Absorber. *Opt Express*, 2016, 24(6), 5763, doi:10.1364/oe.24.005763.
116. Yang J., Xu C., Qu S., Ma H., Wang J., Pang Y. Optical Transparent Infrared High Absorption Metamaterial Absorbers. *J Adv Dielect*, 2018, 08(01), 1850007, doi:10.1142/s2010135x18500078.
117. Sharma S., Tripathi C. C., Rishi R. Impedance Matching Techniques for Microstrip Patch Antenna. *Indian J Sci Technol*, 2017, 10(28), pp. 1–16, doi:10.17485/ijst/2017/v10i28/97642.
118. Gang Q., Jia-Fu W., Ming-Bao Y., Wei C., Hong-Ya C., Yong-Feng L. Lowering Plasma Frequency by Enhancing the Effective Mass of Electrons: A Route to Deep Sub-wavelength Metamaterials. *Chin Phys B*, 2013, 22(8), 87302, doi:10.1088/1674-1056/22/8/087302.
119. Abdulkarim Y. I., Mohanty A., Acharya O. P., Appasani B., Khan M. S., Mohapatra S. K., *et al*. A review on metamaterial absorbers: Microwave to optical. *Frontiers in Physics*, 2022, 10, 893791.
120. Landy N. I., Sajuyigbe S., Mock J. J., Smith D. R., Padilla W. J. Perfect Metamaterial Absorber. *Phys Rev Lett*, 2008, 100(20), pp. 207402–1. –4, doi:10.1103/physrevlett.100.207402.
121. Verma A., Meena O. P. A review of metamaterial absorber and its absorption techniques. In: *2023 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS)*. *IEEE*. February, 2023, pp. 1-6.
122. Aytaç A., İpek H., Aztekin K., Aytav E., Çanakçı B. A review of the radar absorber material and structures. *Scientific Journal of the Military University of Land Forces*, 2020, 52.
123. Sun L., Cheng H., Zhou Y., Wang J. Broadband metamaterial absorber based on coupling resistive frequency selective surface. *Optics express*, 2012, 20(4), pp. 4675-4680.
124. Huang L., Chen H. Multi-band and polarization insensitive metamaterial absorber. *Progress In electromagnetics research*, 2011, 113, pp. 103-110.
125. Vinoy K. J., Jha R. M. Trends in radar absorbing materials technology. *Sadhana*, 1995, 20(5), pp. 815-850.

Відомості про авторів (About authors)

Даник Юрій Григорович – доктор технічних наук, професор, професор, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0001-6990-8656; e-mail: y.danik@gmail.com

Danyk Yurii - Doctor of Science in Technical Sciences, Professor, Professor, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky", Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-6990-8656; e-mail: y.danik@gmail.com

ISSN 2079-5459 (print)
ISSN 2413-4295 (online)

Стогній Вадим Сергійович **–** кандидат технічних наук, ДУ "Інститут досліджень науково-технічного потенціалу та історії науки ім. Д.М. Доброва НАН України, м. Київ, Україна, ORCID: 0009-0001-1117-1070; e-mail: y.danik@gmail.com

Stogniy Vadim **-** PhD of Technical Sciences, State Institution "Institute for Research of Scientific and Technical Potential and History of Science named after D.M. Dobrov, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0009-0001-1117-1070; e-mail: y.danik@gmail.com

Барсуков В'ячеслав Зіновійович – доктор хімічних наук, професор, Інститут Сорбції та Проблем Ендоекології НАН України, завідувач лабораторії "Лабораторія 5/1 літій-іонних акумуляторів і спеціальних покриттів" відділу нанорозмірних вуглецевих матеріалів для акумулювання енергії; м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0002-3041-2474; e-mail: v-barsukov@i.ua.

Barsukov Vyacheslav **-** Doctor of Science in Chemical Sciences, Professor, Department of Nanoscale Carbon Materials for Energy Storage, Institute for Sorption and Problems of Endoecology, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-3041-2474; e-mail: v-barsukov@i.ua.

Курилтя Ярослав Анатолійович – кандидат технічних наук, Інституту Сорбції та Проблем Ендоекології НАН України, старший науковий співробітник "Лабораторії 5/1 літій-іонних акумуляторів і спеціальних покриттів" відділу нанорозмірних вуглецевих матеріалів для акумулювання енергії; м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0001-6181-644X; e-mail: yarik_lg@ukr.net.

Kuriptya Yaroslav **-** PhD of Technical Sciences, Department of Nanoscale Carbon Materials for Energy Storage, Institute for Sorption and Problems of Endoecology, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-6181-644X; e-mail: yarik_lg@ukr.net.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Даник Ю. Г., Стогній В.С., Барсуков В. З., Курилтя Я. А. Методика аналізу особливостей та основних трендів розвитку засобів зменшення помітності озброєння та військової техніки. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2025. № 3 (25). С. 57-82. doi:10.20998/2413-4295.2025.03.07.

Please cite this article as:

Danyk Yu., Stogniy V., Barsukov V., Kuriptya Ya. Methodology for analysing the features and main trends in the development of means of reducing the visibility of weapons and military equipment. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2025, no. 3(25), pp. 57–82, doi:10.20998/2413-4295.2025.03.07.

Надійшла (received) 20.08.2025
Прийнята (accepted) 24.09.2025