

РОЗРОБКА ЛАНЦЮГОВИХ МОДЕЛЕЙ НЕРЕГУЛЯРНИХ ПРОТИРАДІОЛОКАЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ

Валерій Козловський, Віталій Павлов,
Діана Козловська, Станіслава Кудренко

Зараз для захисту та скритності роботи різної приймально-передавальної апаратури (наприклад антенних систем, розташованих на дахах будинків), антен літальних апаратів (ЛА) від радіолокаційного виявлення широко використовуються протирадіолокаційні покриття (ПРАП), за допомогою яких можна зменшити ефективну площу розсіювання (ЕПР) різних об'єктів [1]. При визначенні поля дифракції складним є визначення дотичної складової поля на об'єкті дифракції. Дане поле визначається виходячи з фізичних міркувань або з рішення інтегральних рівнянь [1-5]. У першому випадку, через помилки у фізичних уявленнях, точність визначення поля в дальній зоні, а, отже, і ЕПР, може бути досить низкою. При використанні інтегральних рівнянь одержати аналітичні рішення, як правило, не вдається. Тому результати, одержані чисельними методами, в основному, є частковими і не дозволяють повною мірою проаналізувати розсіяне поле.

Для вирішення завдання визначення дотичної складової поля на межі нерегулярного ПРАП пропонується використовувати теорію двополосників і чотириполосників [6].

У статті розроблена ланцюгова модель нерегулярного плоскошарового середовища завдяки якій були визначені ЕПР нерегулярних шарів. Визначені обмеження, що накладаються на розташування частотних областей поглинання ПРАП, які дозволяють визначити закономірність розташування резонансних частот діелектричних шарів ПРАП. Одержані формули, які дозволяють визначити елементи матриці опорів широкого класу нерегулярних діелектричних шарів і використовувати їх при розрахунку нерегулярних ПРАП. Отримані результати дозволяють проектувати плоскошарові середовища, які мають підвищені поглинальні властивості електромагнітних хвиль в порівнянні з існуючими покриттями.

Ключові слова: плоскошарове середовище, електромагнітне поле, рівняння Максвелла, ТЕ (ГМ) хвилі, хвильовий опір, час затримки, поверхневий опір, чотириполосники, ефективна площа розсіювання, протирадіолокаційне покриття.

Постановка проблеми. Зменшення ЕПР ЛА та зниження коефіцієнта відбиття від покриття є одним з важливих напрямків боротьби з радіоелектронними системами противника та індустріальними перешкодами.

Зниження помітності в радіо, інфрачервоному, оптичному діапазонах дозволить зменшити імовірність виявлення ЛА засобами протиповітряної оборони (ППО) противника. В існуючих системах ППО основним засобом виявлення цілей на великих дальностях є РЛС. Тому, при розробці малопомітних ЛА першочергову увагу приділяють зниженню радіолокаційної помітності.

Зараз існує три основні способи зниження радіолокаційної помітності ЛА: вибір форми ЛА, застосування протирадіолокаційних покриттів та керування розсіюванням радіохвиль.

Теоретично та практично встановлено, що різке зменшення розсіювання радіохвиль характерно для тіл, що мають малі розміри, малі радіуси викривлення поверхні, та які не мають різких зломів поверхні [7-10]. Відомо, що чим краще аеродинамічна форма ЛА, тим менше його ЕПР. Однак у сучасних ЛА, незважаючи на удосконалену аеродинамічну форму, ЕПР встеж так чи залишається достатньо високою. Подальше зменшення ЕПР досягається застосуванням

протирадіолокаційних покриттів, основою яких є радіопоглинаючі матеріали.

Значні швидкості польоту літаків обумовили необхідність винаходу протирадіолокаційних матеріалів, які спроможні при відносно малій вазі витримувати високі аеродинамічні навантаження, котрі мають місце при польоті літака в щільних шарах атмосфери. Радіопоглинаючі матеріали, які розроблені за кордоном для цієї мети та для маскуванню наземних об'єктів, являють собою металеві та керамічні матеріали, а також пластичні маси різних типів [11-15].

Найбільш складним питанням при розробці матеріалів є задача синтезу для отримання найменшого коефіцієнту відбиття у заданому діапазоні частот при мінімальній товщині матеріалу. Визначення електромагнітних параметрів складових частин композиційних матеріалів, розподіл їх по товщині структури, забезпечення оптимальних радіотехнічних характеристик та можливостей фізичної реалізації сумішів для поглинаючих покриттів входять в задачу синтезу при заданому частотному діапазоні та максимально допустимому коефіцієнту відбиття.

Не дивлячись на різноманіття різних типів поглиначів електромагнітних хвиль, до теперішнього часу проблема створення радіопоглинаючих покриттів з необхідними

масогабаритними характеристиками в широкому діапазоні частот у повному обсязі не вирішена. Крім того при аналізі відбитих і які пройшли через покриття електромагнітних хвиль виникають труднощі з аналізованою математичною моделлю, яка заснована на вирішенні рівнянь Максвелла, точне рішення яких відоме для окремих випадків.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Аналіз останніх публікацій [1-20] показав, що основним напрямом розробки діелектричних шарів для захисних покриттів є використання нових матеріалів зі спеціально підбраною зміною діелектричної проникності від товщини шару. При цьому розподілені параметри шару можуть бути незмінними або залежати від товщини. У разі як математичної моделі щодо характеристик покриття можуть бути використані результати оберненої задачі теорії розсіювання.

В роботах [2-3] розглянут вплив поверхневого натягу на характеристики слоя. Виявляється, що одним з основних факторів, що впливають на механічну та електричну поведінку матеріалів є поверхневий натяг. У цій статті розглядаємо плоску деформацію анізотропного середовища, що містить спочатку еліптичний отвір, наділений поверхневим натягом. Розглянуто вплив порошков карбонільного заліза як поглинального матеріала для екранування від мікрохвильових перешкод.

Встановлено, що захист від електромагнітних перешкод досягає 130 дБ за допомогою гнучкого графіту. Показано, що захист від електромагнітних перешкод (ЕМП) стає все більш необхідним через зростання поширеності та чутливості електроніки, зокрема радіочастотних пристроїв, які схильні створювати перешкоди для цифрових пристроїв. Екрануючий матеріал повинен бути електричним провідником, хоча електропровідність не обов'язково має бути дуже високою. Через скін-ефект (тобто явище, коли високочастотне електромагнітне випромінювання взаємодіє лише з поверхневою областю провідника), бажаною є велика площа поверхні провідника. Наприклад, полімерно-матричний композит, що містить провідний наповнювач невеликого розміру, є бажаним для екранування, оскільки тонкість наповнювача призводить до появи площі поверхні провідника, яка набагато більша, ніж у об'ємного провідника. Хоча було проведено багато робіт з розробки полімерно-матричних композитів (включаючи ті, що містять вуглецеві волокна та сажу) для екранування електромагнітних

перешкод раніше не було проведено робіт з гнучкого графіту для екранування.

Зі швидким розвитком сучасних інформаційних технологій, різноманітні електронні пристрої принесли велику зручність у життя людини. На жаль, небезпека електромагнітного випромінювання також стала серйозною для здоров'я людини та навколишнього середовища [1], [2]. Тому терміново потрібні високопродуктивні поглиначі електромагнітних хвиль (EMX) з широкою смугою поглинання, високою інтенсивністю поглинання, тонкою узгоджувальною товщиною та низькою щільністю для усунення несприятливих EMX [3], [4].

Відновлений оксид графену (RGO) розглядається як потенційний кандидат для поглинання EMX завдяки таким перевагам, як двовимірна шарувата структура, висока питома поверхня та значні діелектричні втрати [5]-[11]. Однак, один RGO, що використовується як поглинач EMX, страждає від поганого узгодження імпедансу та слабких втрат на затухання [10], [11]. Багато досліджень показали, що комплексоутворення матеріалів з діелектричними втратами (ZnO, MnO₂, Co₃O₄ та ZnSnO₃ тощо) з RGO може, очевидно, покращити характеристики поглинання електромагнітних хвиль (EMX) RGO [12]-[15].

Як одна з найважливіших напівпровідникових сполук n-типу, діоксид олова (SnO₂) має такі переваги, як легкий синтез, добра хімічна стабільність та діелектричні втрати, що широко використовується як поглинач EMX [16]-[21]. Зовсім недавно також повідомлялося про властивості поглинання EMX композитів відновленого оксиду графену/оксиду олова (RGO/SnO₂) [22], [23]. Хоча отримані композити RGO/SnO₂ демонструють сильну інтенсивність поглинання EMX, такі недоліки, як велика товщина відповідності, вузька смуга пропускання поглинання та високий вміст наповнювача, значно обмежують їх практичне застосування.

Аерогель – це вид синтетичних пористих матеріалів, що мають унікальні тривимірні (3D) пористі мережі, велику питому поверхню та дуже низьку видиму густину [24], [25]. Нещодавні дослідження показали, що аерогелі RGO можуть бути використані як легкі поглиначі електромагнітного випромінювання (EMX) в галузі поглинання EMX [26], [27]. Натхненні попередніми дослідженнями, 3D-леговані азотом композитні аерогелі на основі відновленого оксиду графену/оксиду олова (NRGO/SnO₂) були легко отримані за

допомогою двоступеневої стратегії, тобто гідротермального процесу та подальшої ліофілізаційної обробки. У цій роботі 3D-провідні мережі та легування азотом були інтегровані в композити RGO/SnO₂, що не тільки зменшило об'ємну густину та оптимізувало узгодження імпедансу, але й посилило втрати провідності та поляризації. Була досліджена кореляція між структурою, морфологією та характеристиками ослаблення EMX отриманих композитних аерогелів NRGO/SnO₂. Результати показали, що отримані композитні аерогелі продемонстрували відмінні характеристики поглинання електромагнітних хвиль з широкою смугою пропускання, сильним поглинанням, надтонкою відповідною товщиною та низьким вмістом наповнювача. Крім того, параметри електромагнітних хвиль та здатність до їх ослаблення можна ефективно регулювати шляхом регулювання об'ємів додавання етилендіаміну (EDA). Крім того, були виявлені можливі механізми ослаблення електромагнітних хвиль.

Основні продукти, які ми постачаємо: текстиль з активованим вугіллям, колеманіт, кордієрит, пентаборид дивольфраму, польовий шпат, графен, гематит, гексагональний нітрид бору, волокна кінолу, магнетит, дисульфід молібдену, наноцелюлозні волокна, нанооксиди металів, нанопорошки, нанооксид цинку, оксид поліетилену, поліетиленові воски, титанат калію, спечений муліт, титанат натрію, порошки губчастого заліза, трикальцій фосфат, карбід вольфраму, дисульфід вольфраму, оксид вольфраму, порошки вольфраму, діоксид цирконію.

Новий тип композитного поглинача, тобто композити Fe₂O₃/Fe₃O₄/MWCNTs (0%, 1,7% та 5% MWCNTs), з властивостями мікрохвильового поглинання, був успішно виготовлений простим гідротермальним методом. Підготовлені наночастинки α -Fe₂O₃/Fe₃O₄ мали стрижнеподібну морфологію. Комплексна діелектрична проникність та проникність композитів Fe₂O₃/Fe₃O₄/MWCNTs помітно збільшилися, крім того, з введенням MWCNTs композити Fe₂O₃/Fe₃O₄/MWCNTs продемонстрували високі характеристики мікрохвильового поглинання з сильним поглинанням та широкою смугою поглинання. Зокрема, для композиту Fe₂O₃/Fe₃O₄/1,7% MWCNTs з товщиною поглинача 2,5 мм втрати на відбиття (RL) досягли мінімуму -44,1 дБ на частоті 10,4 ГГц, а ефективна смуга пропускання поглинання

(RL < -10 дБ) охоплювала 3,3 ГГц. Підвищені показники поглинання мікрохвиль композитами Fe₂O₃/Fe₃O₄/MWCNT пояснюються високими діелектричними втратами та покращеним узгодженням імпедансу, що тісно пов'язано зі стрижнеподібною морфологією Fe₂O₃, Fe₃O₄ та введенням MWCNT.

Пористу структуру зазвичай розробляють для балансування узгодження імпедансу та здатності вуглецевого поглинача мікрохвиль до ослаблення, що, як було досліджено, є ефективним способом отримання високих характеристик поглинання мікрохвиль, таких як висока поглинальна здатність та широка ефективна смуга пропускання. Досі мало що відомо про відповідне значення площі поверхні для такої пористої структури. У цій роботі макропористі композити C/Co були успішно виготовлені шляхом карбонізації *in situ* прекурсорів ZIF-67@SiO₂ та подальшого видалення SiO₂ діаметром ~60 нм, а площа поверхні BET (Брунауєра-Еммета-Теллера) оптимізована шляхом додавання кількості SiO₂. Коли площа поверхні BET становить ~340 м²г⁻¹, отриманий макропористий композит C/Co демонструє найкращі характеристики поглинання мікрохвиль, а максимум (втрати на відбиття RL) становить -56,2 дБ з надширокою ЕАВ (ефективною смугою пропускання) 9,0 ГГц (9,0–18,0 ГГц) при наднизькому завантаженні наповнювача лише 10 %. В статтях [20-25] надані необхідні та достатні умови існування та єдиності розв'язку оберненої задачі Штурма-Ліувіля, де одна гранична умова включає довільну цілу функцію. У статті представлено конструктивний алгоритм знаходження розв'язку, а також демонстровано локальну розв'язність та стійкість задачі при використанні даних Коші. Результати робіт з теорії зворотних спектральних завдань [20-25] забезпечує необхідні та достатні умови унікальності. У статтях встановлені точні умови для спектральних даних (підспектру), які гарантують унікальне рішення задачі. Розроблено метод для явної побудови потенціалу та функцій граничних умов на основі заданої спектральної інформації.

Формулювання цілей статті. Для вирішення завдання визначення дотичної складової поля на межі нерегулярного протирадіолокаційного покриття пропонується використовувати теорію дво полюсників і чотириполюсників [6].

Виклад основного матеріалу дослідження. Припустимо, що на межу розділу

двох середовищ (рис.1) під кутом ϕ_0 падає плоска однорідна хвиля. Електромагнітне поле, що змінюється в часі по гармонійному закону $\exp(j\omega t)$, описується рівнянням Максвелла [1]

$$\text{rot}\vec{H} = j\omega\epsilon\vec{E}, \quad \text{rot}\vec{E} = -j\omega\mu\vec{H}. \quad (1)$$

Для ТЕ хвиль, що розповсюджуються уздовж осі, маємо

$$E_x = U(z)e^{-j\beta y}H_z = F(z)e^{-j\beta y}. \quad (2)$$

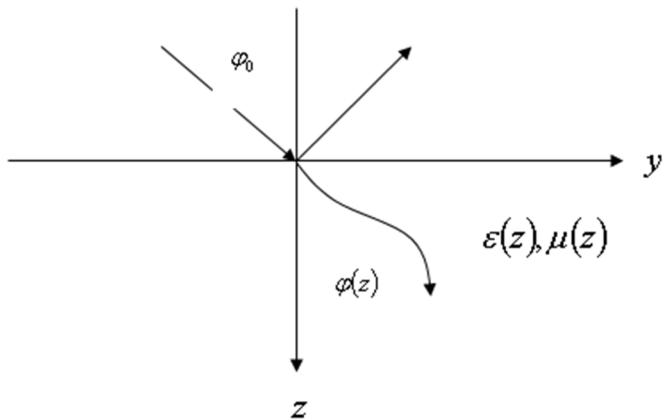


Рис.1. Проходження хвилі через нерегулярне середовище

Функції $U(z), V(z), F(z)$, як випливає з (1) та (2), зв'язані телеграфними рівняннями:

$$-\frac{dU}{dz} = j\omega\mu V, \quad -\frac{dV}{dz} = \left(j\omega\mu + \frac{\beta^2}{j\omega\mu} \right) U, \quad (3)$$

$$\beta U + \omega\mu F = 0. \quad (4)$$

Даним рівнянням може бути складений розподілений ланцюг у вигляді лінії передачі [8] з хвильовим опором

$$Z_{TE} = \frac{\omega\mu}{\sqrt{k^2 - \beta^2}} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \sqrt{1 - \frac{\beta^2}{k^2}}, \quad k = \omega\sqrt{\epsilon\mu} \quad (5)$$

і часом затримки

$$\tau_\beta = \frac{1}{\omega} \int_0^z \sqrt{k^2 - \beta^2} dz \quad (6)$$

При розгляді ТМ хвилі $H_y = H_z = 0$. В цьому випадку у всіх співвідношеннях для ТЕ хвиль необхідно зробити заміну на ϵ на μ і компоненти полів замінити відповідно на H . При цьому функції $U(z), V(z), F(z)$ задовольняють рівнянням

$$\frac{dU}{dz} = j\omega\epsilon V, \quad \frac{dV}{dz} = \left(j\omega\mu + \frac{\beta^2}{j\omega\epsilon} \right) U, \quad (7)$$

$$\beta U - \omega\mu F = 0. \quad (8)$$

Рівнянням (7) відповідає лінія з хвильовим опором

$$Z_{TM}^e = \frac{1}{\omega\epsilon\sqrt{k^2 - \beta^2}} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \sqrt{1 - \frac{\beta^2}{k^2}}. \quad (9)$$

Час затримки при цьому визначається точно також як і для ТЕ хвиль, формулою (.6). Постійна розповсюдження визначається законом Снелліуса [1,7]

$$\beta = k_0 \sin \phi_0 = k(z) \sin \phi(z) = \text{const}. \quad (10)$$

Для визначення поверхневого опору нерегулярного шару представимо даний шар у вигляді сукупності однорідних (регулярних) шарів з постійним хвильовим опором як показано на рис.2, де Z_1, Z_2, \dots, Z_M - поверхневі опори з боку відповідного шару, Z_i - поверхневий опір межуючого середовища. У загальному випадку абсолютні діелектричні і магнітні проникності ϵ_i, μ_i є комплексними величинами.

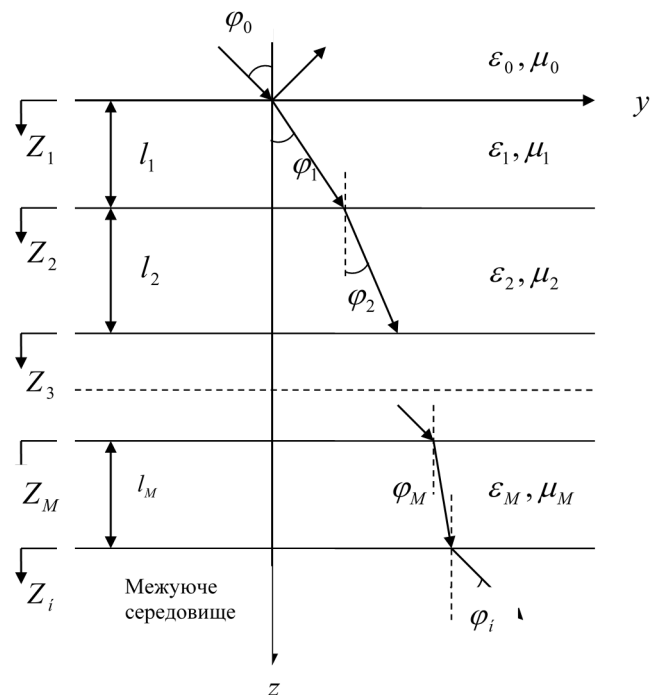


Рис.2. Багатошарове середовище

Оскільки кожен шар можна представити у вигляді однорідного відрізка лінії передачі, то для визначення поверхневого опору шаруватой структури можна скористатися теорією чотириполісників [6], згідно якої поверхневий опір можна обчислити за рекурентною формулою

$$Z_i = Z_{i11} - \frac{Z_{i12}^2}{Z_{i22} + Z_{i+1}}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, M \quad (11)$$

Під поверхневим опором при падінні ТЕ хвилі, згідно рівнянням (3), розумітимемо вхідний опір лінії передачі [8]:

$$Z_{TE} = \frac{U}{V} = \frac{E_x}{H_y}.$$

При розгляді ТМ хвилі, згідно рівнянням (.7), вхідний опір лінії передачі (поверхневий опір) дорівнює:

$$Z_{TM} = -\frac{V}{U} = -\frac{E_y}{H_x}.$$

Елементи матриці опорів однорідного шару визначаються відомим виразом для регулярних довгих ліній [8]:

$$Z_{i11} = Z_{i22} = -jZ_{viTE, TM} \operatorname{ctg} \omega t \beta_i, \quad (12)$$

$$Z_{i12} = -jZ_{viTE, TM} \frac{1}{\sin \omega t \beta_i}. \quad (13)$$

Хвильові опори і часи затримок окремих шарів обчислюються згідно формул (5) (6) (9) (10):

$$Z_{viTE} = \sqrt{\frac{\mu_i}{\varepsilon_i}} \sqrt{1 - \frac{\varepsilon_0 \mu_0}{\varepsilon_i \mu_i} \sin^2 \phi_0}^{-1}, \quad (14)$$

$$Z_{viTM} = \sqrt{\frac{\mu_i}{\varepsilon_i}} \sqrt{1 - \frac{\varepsilon_0 \mu_0}{\varepsilon_i \mu_i} \sin^2 \phi_0}, \quad (15)$$

$$t_{\beta i} = l_i \sqrt{\mu_i \varepsilon_i} \sqrt{1 - \frac{\varepsilon_0 \mu_0}{\varepsilon_i \mu_i} \sin^2 \phi_0}, \quad (16)$$

де l_i - товщина шару з номером i (рис.2). У виразі (11) при $i = M$ $Z_{M+1} = Z_i$ описує поверхневий опір межуючого середовища, а при $i=1$ функція Z_1 рівна поверхневому опору нерегулярного шару. Очевидно, що при $M \rightarrow \infty$ функція Z_1 прагне до поверхневого опору нерегулярного шару. З вищевикладеного виходить, що визначати поверхневий опір слід, починаючи з шару з номером M . Далі слідує шар з номером $M - 1$ і т.п.

Таким чином, плоскошарові середовища можна розраховувати за допомогою теорії чотириполіусників [9]. При цьому середовищу, показаному на рис.2, відповідає каскадне з'єднання чотириполіусників рис.3.

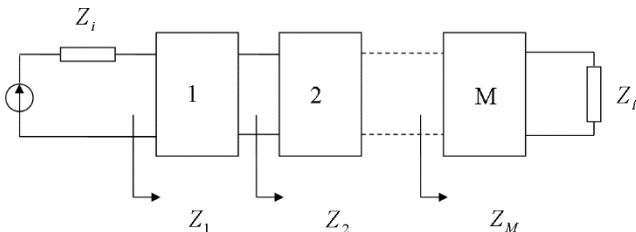


Рис.3. Еквівалентна схема шаруватого середовища

Опори Z_i і Z_H $i=1,2,\dots,M$, знаходяться з виразів для ТЕ хвиль.

$$Z_i = \frac{\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}}{\cos \phi_0}, Z_H = \sqrt{\frac{\mu_H}{\varepsilon_H}} \sqrt{1 - \frac{\varepsilon_0 \mu_0}{\varepsilon_H \mu_H} \sin^2 \phi_0}^{-1}. \quad (17)$$

Для ТМ хвиль

$$Z_i = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \cos \phi_0,$$

$$Z_H = \sqrt{\frac{\mu_H}{\varepsilon_H}} \sqrt{1 - \frac{\varepsilon_0 \mu_0}{\varepsilon_H \mu_H} \sin^2 \phi_0} \quad (18)$$

Елементи матриці опорів окремих чотириполіусників визначаються за формулами (.12) – (.14).

Як приклад знайдемо поверхневий опір плоскої металевої пластини, розміри якої набагато більше довжини хвилі. На поверхню пластини нанесено два шари покриття з комплексними проникностями $\varepsilon_1, \mu_1, \varepsilon_2, \mu_2$ (рис.4).

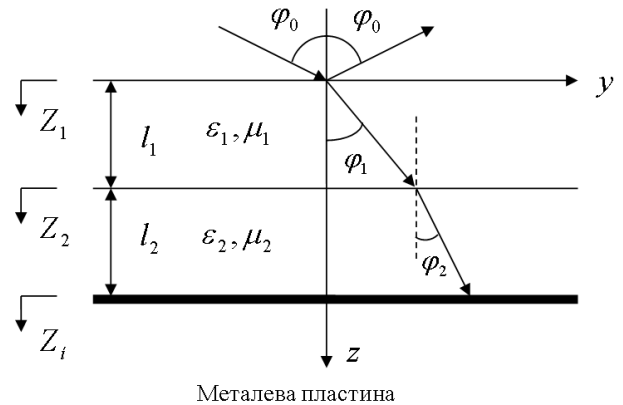


Рис.4. Металева пластинка з двошаровим покриттям

Якщо товщина пластини перевищує глибину скин-шару, то поверхневий опір визначається комплексним хвильовим опором металу і дорівнює [7]

$$Z_s = \sqrt{\frac{\mu_3 \omega}{2\sigma}} + j \sqrt{\frac{\mu_3 \omega}{2\sigma}}, \quad (19)$$

де σ - питома провідність металу пластини.

Для металів абсолютна магнітна проникність є комплексною величиною і відповідно може бути виражена через тангенс кута діелектричних втрат [7]

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_3' - j\varepsilon_3'' = \varepsilon_3'(1 - jt g \delta). \quad (20)$$

При $t g \delta \gg 1$ вираз (20) спрощується і приймає вигляд [7]:

$$\varepsilon_3 = -j \frac{\sigma}{\omega}. \quad (21)$$

Враховуючи вирази (14), (15), (19), (1) поверхневий опір металу при похилому падінні хвилі матиме наступний вигляд:

$$Z_{\text{ВТЕ}} = (1 + j) \sqrt{\frac{\mu_3 \omega}{2\sigma}} \sqrt{1 - j \frac{\varepsilon_0 \mu_0 \omega}{\mu_3 \sigma} \sin^2 \phi_0}^{-1} \quad (22)$$

$$Z_{\text{ВТМ}} = (1 + j) \sqrt{\frac{\mu_3 \omega}{2\sigma}} \sqrt{1 - j \frac{\varepsilon_0 \mu_0 \omega}{\mu_3 \sigma} \sin^2 \phi_0} \quad (23)$$

Висновки. Основним підсумком виконаних досліджень є розробка ланцюгових моделей протирадіолокаційних покриттів і отримання на їх основі аналітичних виразів для поверхневого опору. Одержані формули можна використовувати в наближенні фізичної оптики при визначенні ЕПР складних об'єктів. В цьому випадку слід об'єкт представити у вигляді сукупності пластин і здійснити розрахунок ЕПР одним з відомих методів. Перевагою отриманих результатів є можливість використання методів добре розробленої класичної теорії ланцюгів і теорії довгих ліній для вирішення електродинамічних завдань. Дана обставина дозволяє вирішувати задачу визначення розподілених параметрів шарів пластин по заданій ЕПР об'єкту. У тих випадках, коли обмеження фізичної оптики не дотримуються, рішення, одержані методами теорії ланцюгів, можна використовувати як перше наближення для вирішення інтегральних рівнянь електродинаміки.

Перспективи подальших досліджень. Ланцюгова модель багатошарових покриттів може бути використана для аналізу проходження електромагнітних хвиль через покриття зі складним законом зміни діелектричної та магнітної проникності. При аналізі складно профільованих у просторі покриттів отримані результати можуть бути використані як перше наближення для вирішення задачі дифракції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. С.П.Новосядлий, В.І.Мандзюк, "Техніка і електроніка НВЧ" — Івано-Франківськ: Видавництво Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, 2013, с.524.
2. О.Є.Видалко, Ф. Ф. Дубровка, "Чисельне дослідження характеристик ФАР на основі друкованих квазі-Ягі випромінювальних елементів" Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. № 51, 2012, с. 13—24.
3. Y.Wu, S.Tan, Y.Zhao, L.Liang, "Broadband multispectral compatible absorbers for radar, infrared and visible stealth application". Prog. Mater. Sci. 2023, 135, 101088.
4. K.S.Sista, S.Dwarapudi, D.Kumar, "Carbonyl iron powders as absorption material for

microwave interference shielding": A review. J. Alloy. Compd. 2021, 853, 157251.

5. X. Luo, D.D.L. Chung, "Electromagnetic interference shielding reaching 130 dB using flexible graphite". Carbon, 34, 1996, pp.1293–1294.
6. Ю.О.Коваль, І.О.Милютченко, А.М.Олейніков, В.М.Шокало, "Основи теорії кіл, сигналів та процесів в системах технічного захисту інформації":— Харків: НТМТ, –2011, с.544.
7. L.Deng, J.Zhang, R.Shu, "Fabrication of three-dimensional nitrogen-doped reduced graphene oxide/tin oxide composite aerogels as high-performance electromagnetic wave absorbers". Colloid Interface Sci. 2021, 602, pp.282–290.
8. X.Shu, S.Yan, B.Fang, Y.Song, "A 3D multifunctional nitrogen-doped RGO-based aerogel with silver nanowires assisted self-supporting networks for enhanced electromagnetic wave absorption". Chem. Eng. J. 2023, 451, 138825.
9. L.Huang, X.Liu, R.Yu, "Enhanced microwave absorption properties of rod-shaped Fe₂O₃/Fe₃O₄/MWCNTs composites", Prog. Nat. Sci. Mater. Int. 2018, 28, pp.288–295.
10. Y. Zhou, H. Xie, W. Zhou, Z. Ren, "Enhanced antioxidation and microwave absorbing properties of SiO₂-coated flaky carbonyl iron particles". J. Magn. Magn. Mater. 2018, 446, pp.143–149.
11. Y. Xia, J. Fang, P. Li, B. Zhan, H.Yao, "Solution-processed highly superparamagnetic and conductive PEDOT:PSS/Fe₃O₄ nanocomposite films with high transparency and high mechanical flexibility". ACS Appl. Mater. Interfaces 2017, 9, pp.19001–19010.
12. S. Sankaran, K. Deshmukh, M.B. Ahamed, S.K. Khadheer Pasha, "Recent advances in electromagnetic interference shielding properties of metal and carbon filler reinforced flexible polymer composites". A review. Compos. Part A Appl. Sci. Manuf. 2018, 114, pp.49–71.
13. S.P. Pawar, S. Biswas, G.P. Kar, S. Bose, "High frequency millimetre wave absorbers derived from polymeric nanocomposites". Polymer 2016, 84, pp.398–419.
14. I.R. Ibrahim, K.A. Matori, I. Ismail, Z. Awang, "A Study on Microwave Absorption Properties of Carbon Black and Ni_{0.6}Zn_{0.4}Fe₂O₄ Nanocomposites by Tuning the Matching-Absorbing Layer Structures". Sci. Rep. 2020, 10, 3135.
15. S.H.Raad, Z. Atlasbaf, C.J. Zapata, "Broadband absorption using all-graphene grating-coupled nanoparticles on a reflector". Sci. Rep. 2020, 10, 19060.

16. A.L.Adenot-Engelvin, C.Dudek, P.Toneguzzo, O.Acher, "Microwave properties of ferromagnetic composites and metamaterials". *J. Eur. Ceram. Soc.* 2007, 27, pp.1029–1033.
17. W.Przybył, A.Januszko, N.Radek, M.Szczepaniak, K.A.Bogdanowicz, "Microwave absorption properties of carbonyl iron-based paint coatings for military applications". *Def. Technol.* 2022.
18. J.J.More, "The Levenberg-Marquardt Algorithm: Implementation and Theory". In *Numerical Analysis*; Berlin/Heidelberg, Germany, 1977; pp. 105–116.
19. D.Yuping, W.Guangli, G.Shuchao, L.Shuqing, "Study on microwave absorbing properties of carbonyl-iron composite coating based on PVC and Al sheet". *Appl. Surf. Sci.* 2012, 258, pp.5746–5752.
20. V.A.Marchenko "Sturm-liouville operators and applications. Revised Edition". American Mathematical Society. Printed in the United States of America. 2011, pp.390.
21. *Inverse Sturm-Liouville Problems and Their Applications* UK ed. Edition by G. Freiling (Author), V. Yurko (Author). Nova Science Pub Inc; UK ed. edition (January 1, 2001). 305 pages.
22. Inverse Sturm-Liouville problem with analytical functions in the boundary condition. N. Bondarenko *Mathematics Mathematical Methods in the Applied Sciences* 2020. DOI:10.1515/math-2020-0188 Corpus ID: 219982049.
23. Local solvability and stability of inverse problems for Sturm-Liouville operators with a discontinuity. Chuan-Fu Yang, N. Bondarenko. *Mathematics Journal of Differential Equations.* 2020.
24. Partial Inverse Sturm-Liouville Problems by Natalia P. Bondarenko, *Mathematics* 2023, 11(10), 2408; <https://doi.org/10.3390/math11102408>.
25. Mehmet Acil and Ali Konuralp. Reconstruction of potential function in inverse Sturm-Liouville problem via partial data. *An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications* ISSN:2146-0957 eISSN:2146-5703 Vol.11, No.2, pp.186-198 (021) <http://doi.org/10.11121/ijocta.01.2021.01090>.
- на основі друкованих квазі-Ягі випромінювальних елементів" *Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування.* № 51, 2012, с. 13—24.
2. O.E. Vydalko, F. F. Dubrovka, "Numerical study of the characteristics of the phased array based on printed quasi-Yagi radiating elements" *Bulletin of NTUU "KPI". Series Radio Engineering. Radio Equipment Manufacturing.* No. 51, 2012, pp. 13—24.
3. Y.Wu, S.Tan, Y.Zhao, L.Liang, "Broadband multispectral compatible absorbers for radar, infrared and visible stealth application". *Prog. Mater. Sci.* 2023, 135, 101088.
4. K.S.Sista, S.Dwarapudi, D.Kumar, "Carbonyl iron powders as absorption material for microwave interference shielding": A review. *J. Alloy. Compd.* 2021, 853, 157251.
5. X. Luo, D.D.L. Chung, "Electromagnetic interference shielding reaching 130 dB using flexible graphite". *Carbon*, 34, 1996, pp.1293–1294.
6. Yu.O. Koval, I.O. Mylyutchenko, A.M. Oleinikov, V.M. Shokalo, "Fundamentals of the theory of circuits, signals and processes in technical information protection systems":—Kharkiv: NTMT, —2011, p.544.
7. L.Deng, J.Zhang, R.Shu, "Fabrication of three-dimensional nitrogen-doped reduced graphene oxide/tin oxide composite aerogels as high-performance electromagnetic wave absorbers". *Colloid Interface Sci.* 2021, 602, pp.282–290.
8. X.Shu, S.Yan, B.Fang, Y.Song, "A 3D multifunctional nitrogen-doped RGO-based aerogel with silver nanowires assisted self-supporting networks for enhanced electromagnetic wave absorption". *Chem. Eng. J.* 2023, 451, 138825.
9. L.Huang, X.Liu, R.Yu, "Enhanced microwave absorption properties of rod-shaped Fe₂O₃/Fe₃O₄/MWCNTs composites", *Prog. Nat. Sci. Mater. Int.* 2018, 28, pp.288–295.
10. Y. Zhou, H. Xie, W. Zhou, Z. Ren, "Enhanced antioxidation and microwave absorbing properties of SiO₂-coated flaky carbonyl iron particles". *J. Magn. Magn. Mater.* 2018, 446, pp.143–149.
11. Y. Xia, J. Fang, P. Li, B. Zhan, H.Yao, "Solution-processed highly superparamagnetic and conductive PEDOT:PSS/Fe₃O₄ nanocomposite films with high transparency and high mechanical flexibility". *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2017, 9, pp.19001–19010.
12. S. Sankaran, K. Deshmukh, M.B. Ahamed, S.K. Khadheer Pasha, "Recent advances in electromagnetic interference shielding properties of metal and carbon filler reinforced

REFERENCE

1. S.P. Novosyadlyi, V.I. Mandziuk, "Microwave Technology and Electronics" — Ivano-Frankivsk: Publishing House of the Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, 2013, p.524. О.Є.Видалко, Ф. Ф. Дубровка, "Чисельне дослідження характеристик ФАР

- flexible polymer composites”. A review. Compos. Part A Appl. Sci. Manuf. 2018, 114, pp.49–71.
13. S.P. Pawar, S. Biswas, G.P. Kar, S. Bose, “High frequency millimetre wave absorbers derived from polymeric nanocomposites”. Polymer 2016, 84, pp.398–419.
 14. I.R. Ibrahim, K.A. Matori, I. Ismail, Z. Awang, “A Study on Microwave Absorption Properties of Carbon Black and Ni_{0.6}Zn_{0.4}Fe₂O₄ Nanocomposites by Tuning the Matching-Absorbing Layer Structures”. Sci. Rep. 2020, 10, 3135.
 15. S.H.Raad, Z. Atlasbaf, C.J. Zapata, “Broadband absorption using all-graphene grating-coupled nanoparticles on a reflector”. Sci. Rep. 2020, 10, 19060.
 16. A.L.Adenot-Engelvin, C.Dudek, P.Toneguzzo, O.Acher, “Microwave properties of ferromagnetic composites and metamaterials”. J. Eur. Ceram. Soc. 2007, 27, pp.1029–1033.
 17. W.Przybył, A.Januszko, N.Radek, M.Szczepaniak, K.A.Bogdanowicz, “Microwave absorption properties of carbonyl iron-based paint coatings for military applications”. Def. Technol. 2022.
 18. J.J.More, “The Levenberg-Marquardt Algorithm: Implementation and Theory”. In Numerical Analysis; Berlin/Heidelberg, Germany, 1977; pp. 105–116.
 19. D.Yuping, W.Guangli, G.Shuchao, L.Shuqing, “Study on microwave absorbing properties of carbonyl-iron composite coating based on PVC and Al sheet”. Appl. Surf. Sci. 2012, 258, pp.5746–5752.
 20. V.A.Marchenko “Sturm-liouville operators and applications. Revised Edition”. American Mathematical Society. Printed in the United States of America. 2011, pp.390.
 21. Inverse Sturm-Liouville Problems and Their Applications UK ed. Edition by G. Freiling (Author), V. Yurko (Author). Nova Science Pub Inc; UK ed. edition (January 1, 2001). 305 pages.
 22. Inverse Sturm-Liouville problem with analytical functions in the boundary condition. N. Bondarenko Mathematics Mathematical Methods in the Applied Sciences 2020. DOI:10.1515/math-2020-0188 Corpus ID: 219982049.
 23. Local solvability and stability of inverse problems for Sturm-Liouville operators with a discontinuity. Chuan-Fu Yang, N. Bondarenko. Mathematics Journal of Differential Equations. 2020.
 24. Partial Inverse Sturm-Liouville Problems by Natalia P. Bondarenko, Mathematics 2023, 11(10), 2408; <https://doi.org/10.3390/math11102408>.
 25. Mehmet Acil and Ali Konuralp. Reconstruction of potential function in inverse Sturm-Liouville problem via partial data. An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications ISSN:2146-0957 eISSN:2146-5703 Vol.11, No.2, pp.186-198 (021) <http://doi.org/10.11121/ijocta.01.2021.01090>.

VALERIY KOZLOVSKY, VITALIY PAVLOV. DEVELOPMENT OF CHAIN MODELS OF IRREGULAR ANTI-RADIOLOCATION COATINGS. Currently, anti-radiation coatings (ARCCs) are widely used to protect and conceal the operation of various receiving and transmitting equipment (for example, antenna systems located on the roofs of buildings) and aircraft antennas from radar detection, with the help of which it is possible to reduce the effective scattering area (ESA) of various objects. When determining the diffraction field, it is difficult to determine the tangential component of the field on the diffraction object. This field is determined based on physical considerations or by solving integral equations. In the first case, due to errors in physical representations, the accuracy of determining the field in the far zone, and, consequently, the EPR, can be quite low. When using integral equations, it is usually not possible to obtain analytical solutions. Therefore, the results obtained by numerical methods are mainly partial and do not allow a full analysis of the scattered field. To solve the problem of determining the tangential component of the field at the boundary of an irregular PRLP, it is proposed to use the theory of two-pole and four-pole. The article develops a chain model of an irregular flat-layer medium, thanks to which the EPRs of irregular layers were determined. The restrictions imposed on the location of the frequency regions of absorption of PRLPs have been determined, which allow us to determine the regularity of the location of the resonant frequencies of the dielectric layers of PRLPs. Formulas have been obtained that allow us to determine the elements of the resistance matrix of a wide class of irregular dielectric layers and use them in the calculation of irregular PRLPs. The results obtained allow us to design flat-layer media that have increased absorption properties of electromagnetic waves in comparison with existing coatings. Keywords: flat-layer medium, electromagnetic field, Maxwell's equations, TE (TM) waves, wave resistance, delay time, surface resistance, quadrupoles, effective scattering area, anti-radar coating.

Козловський Валерій Вікторович, доктор технічних наук, професор, професор спеціальної кафедри №3, Інститут спеціального

зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, м.Київ, Україна, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0234-415X>, valerey@ukr.net

Kozlovsky Valeriy Viktorovych, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Special Department №3, Institute of Special Communications and Information Protection of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0234-415X>, valerey@ukr.net

Павлов Віталій Павлович, кандидат технічних наук, доцент, доцент спеціальної кафедри №4, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, м. Київ, Україна, ORCID <https://orcid.org/0009-0003-6701-2305>, petrovka097@gmail.com

Pavlov Vitaliy Pavlovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Special Department №4, Institute of Special Communications and Information Protection, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute,” Kyiv, Ukraine, ORCID <https://orcid.org/0009-0003-6701-2305>, petrovka097@gmail.com

Козловська Діана Валеріївна, студентка факультету комп'ютерних наук та технологій, Державного некомерційного підприємства «Державний університет «Київський авіаційний інститут», м. Київ, Україна.

Diana Kozlovska, Student of the Faculty of Computer Science and Technologies of the State non-commercial company state university «Kyiv aviation institute», Kyiv, Ukraine. E-mail: vvkzeos@gmail.com. ORCID ID: 0009-0004-6223-0319.

Кудренко Станіслава Олексіївна, к.т.н., доцент, доцент технічного захисту інформації, Державного некомерційного підприємства «Державний університет «Київський авіаційний інститут», м.Київ, Україна.

Stanislava Kudrenko, Candidate of Technical Sciences, associate professor of the Department of Department of Technical Information Protection of the State noncommercial company state university «Kyiv aviation institute», Kyiv, Ukraine. E-mail: stanislava.kudrenko@npp.nau.edu.ua. ORCID ID: 0000-0002-0759-3908