

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2025-42-04>

УДК 537.8

М.М. ЛЕГЕНЬКИЙ, к.ф.-м.н., доцент

e-mail: mlegenkiy@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5945-4002>

М.А. БУГАЙ, аспірант

e-mail: maksym.buhai@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5897-1705>

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4

ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗСІЯННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ НА СКЛАДНИХ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ОБ'ЄКТАХ

Актуальність. Нині постає питання моделювання ефективної поверхні розсіяння (ЕПР) реальних цілей. Експериментальне вимірювання є складним для реалізації, а існуючі методи теоретичного обчислення зазвичай потребують багато часу. Тому необхідно розробити нові методи збору й обробки експериментальних даних та теоретичного моделювання, що дозволить пришвидшити оцінку ЕПР різних об'єктів. Важливою наразі задачею є створення радару, який буде добре помічати навіть гарно замасковані цілі. З іншого боку, постає необхідність замаскувати власні об'єкти. Враховуючи новітні тенденції з використання малопомітних цілей, відбитий сигнал від яких може бути майже на рівні шуму, необхідно навчитися виділяти його з поміж сигналів інших об'єктів. Таким чином, актуальною наразі задачею є створення ефективних методів для прогнозування розсіяння на типових радіолокаційних цілях, використання яких не буде потребувати дуже багато часу на моделювання.

Мета роботи. Отримання рівняння для обчислення ефективної поверхні розсіяння системи яскравих точкових відбивачів із різною діаграмою спрямованості.

Методи і методологія. Використання методів фізичної та геометричної оптики для отримання рівняння ефективної поверхні розсіяння систем яскравих точкових відбивачів. Застосування мови програмування Python, а також бібліотек до неї NumPy та Matplotlib для обчислень та побудови графіків.

Результати. Отримано рівняння для обчислення ефективної поверхні розсіяння системи яскравих точкових відбивачів для випадків ізотропної та різної кутової залежності ефективної поверхні розсіяння. Побудовано графіки для випадків, коли ЕПР кожного розсіювача постійна та змінюється за певними законами.

Висновки. Отримано кінцеву формулу для обчислення ЕПР системи яскравих точкових відбивачів, а також знайдено закономірності для різних значень ЕПР відбивачів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ефективна поверхня розсіяння, ЕПР, система яскравих точок, радіолокація, помітність цілі, інтерференція.

Як цитувати: Легенький М.М., Бугай М.А. Прогнозування розсіяння електромагнітних хвиль на складних великогабаритних об'єктах. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2025;42,38-46. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2025-42-04>

In cites: Legenkiy MM, Buhai MA. Prediction of electromagnetic waves scattering on complex shape large objects. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, Series "Radiophysics and Electronics". 2025;42,38-46 (In Ukrainian). <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2025-42-04>

ВСТУП

Основою активної радіолокації є відбиття електромагнітних хвиль від перешкод (об'єктів) або неоднорідностей - області простору, магнітні та електричні властивості яких суттєво відрізняються від властивостей середовища, в якому поширюється хвиля. Падаюча електромагнітна хвиля викликає вимушені коливання вільних і зв'язаних зарядів, когерентні до коливань падаючого випромінювання. Вони створюють вторинне поле всередині і ззовні об'єкту. В результаті цього енергія падаючого випромінювання розсіюється у всіх напрямках, в тому числі і в напрямку до радіолокаційної станції. Випромінювання, яке створюється через розсіяння енергії електромагнітної хвилі на неоднорідностях, перешкодах чи об'єктах, називається вторинним випромінюванням, а об'єкти називаються пасивними вторинними випромінювачами. Параметрами неоднорідностей можуть бути діелектрична проникність ϵ та магнітна проникність μ . Якщо вони не співпадають із параметрами середовища, то відбувається випромінювання вторинних хвиль. Поле вторинного випромінювання залежить від поляризації та частоти електромагнітної хвилі, а також від параметрів самого середовища та об'єкта, на якому розсіюється хвиля. Відбитий ціллю сигнал – відбита хвиля, яка прийшла назад у напрямку до радару. Інтенсивність такої хвилі залежить від дальності до цілі, її геометричного розміру а також форми відбиваючої поверхні. Для оцінки енергетичних властивостей вторинного випромінювання вводиться поняття ефективної поверхні

розсіяння (ЕПР). Для розрахунку параметрів радіолокаційних станцій і визначення їх можливостей щодо виявлення цілей значну роль відіграє знання властивостей вторинного випромінювання [4].

Зазвичай радіолокаційні властивості об'єктів визначаються для дальньої зони, тобто для відстаней, на яких випромінено (якщо мова йде про дальню зону для випромінювача) або розсіяну (якщо мова йде про дальню зону для розсіювача) хвилю можна вважати плоскою. Саме для такого випадку сформульоване наведене нижче визначення ЕПР[3].

В даній роботі отримано формули для сумарної ЕПР системи із таких розсіювачів, які розташовані в різних просторових точках у дальній зоні відносно передавача та приймача. Завдяки цьому сумарна ЕПР системи точок залежить лише від відстані між ними та різниці фаз хвиль, відбитих від цих розсіювачів. Із простих геометричних міркувань вдається отримати цю різницю та виключити із отриманих формул відстані до передавача та приймача.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Поняття ефективної поверхні розсіяння (ЕПР) широко використовується в у різних областях фізики: розсіяння світла, когерентна оптика тощо.

ЕПР – характеристика тіла, що розсіює. За допомогою неї визначають здатність тіла розсіювати падаючу хвилю.

Необхідно знайти формулу, за якою можна буде визначити ефективну поверхню розсіяння (ЕПР) системи точкових розсіювачів з урахуванням інтерференції хвиль. Вважати, що розсіювачі розташовані поблизу початку координат, а приймальна та передавальна антени на нескінченній відстані від нього, тобто в дальній зоні. Врахувати, що ЕПР кожного розсіювача є функцією від кутів сферичної системи координат.

Необхідно розрахувати ЕПР:

- системи двох ізотропних розсіювачів за різних довжин хвилі λ ;
- системи двох вищевказаних розсіювачів, за умови що ЕПР кожного змінюється за законом

$$\sigma(\varphi) = \cos^2(\varphi), \quad \sigma(\varphi) = \cos^2(2\varphi), \quad \sigma(\varphi) = \cos^2(3\varphi).$$

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ

Для обчислення ЕПР використано методи фізичної та геометричної оптики. [1,4-5]

Для чисельних обчислень застосовано мову програмування Python, а також бібліотеки NumPy та Matplotlib [10-11].

ЕПР СИСТЕМИ ЯСКРАВИХ ТОЧОК

Поняття ЕПР

Ефективна поверхня розсіяння (ЕПР) – характеристика тіла, яка визначає його здатність розсіювати випромінювання. Розсіяна хвиля має певну поляризацію та поширюється у напрямі до приймача. В такому випадку ЕПР пропорційна відношенню інтенсивності розсіяного поля біля приймача до інтенсивності падаючого поля на об'єкт (Рис. 1). Для бістатичного випадку передавач і приймач розділені, на рисунку β – кут між напрямом від передавача до тіла і напрямом від тіла до приймача, R – відстань до них. Для моностатичного випадку приймач і передавач знаходяться близько один до одного або об'єднані, тобто кут $\beta = 0$.

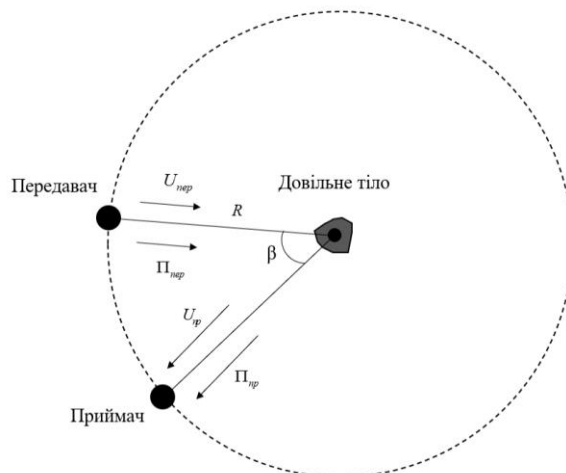


Рис. 1. Довільне тіло, що розсіює.

Fig. 1. Arbitrary scattering body.

Нехай як тіло, що розсіює виступає ідеальне ізотропне тіло. В такому випадку енергія буде розсіюватися в усіх напрямках однаково. Вважаючи, що відстань R достатньо велика, щоб вважати, що падаюча хвиля плоска, можна обчислити потужність, яку розсіює таке тіло:

$$P_{np} = \lim_{R_{nep} \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \Pi_{np}, \quad (1)$$

де Π_{np} – густина потоку потужності хвилі, яку випромінює передавач. З іншого боку:

$$P_{np} = \sigma \Pi_{nep}, \quad (2)$$

де σ – ЕПР – площа поверхні ідеального ізотропного тіла, Π_{nep} – густина потоку потужності хвилі, яка прийшла до приймача. Із рівнянь (1) та (2) випливає, що:

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{\Pi_{np}}{\Pi_{nep}} = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \left(\frac{U_{nep}}{U_{np}} \right)^2. \quad (3)$$

Рівняння (3) справедливе для великих значень R , де густини потоків падаючої і розсіяної хвиль Π_{nep} та Π_{np} пропорційні квадратам амплітуд падаючої та відбитої хвиль U_{nep} та U_{np} [8].

Із наведених розрахунків зрозуміло, що ЕПР (σ) представляє собою площу такого ідеального ізотропного розсіювача, який, у випадку його розташування за місцем знаходження цілі, при падінні на нього густини потоку потужності 1 Вт/м^2 створить у точці, де знаходиться приймальна антена, таку ж густину потоку потужності, що і реальна ціль [3-4].

ЕПР системи яскравих точок

Нехай задано систему з N точок. Відстань від початку координат до передавальної антени становить R_1 , а до приймальної – R_2 . $\vec{n}_1$ і $\vec{n}_2$ – одиничні вектори, які задають напрями від початку координат до передавальної і приймальної антени, відповідно. Координати кожної точки задаються відповідними радіус-векторами $\vec{r}_i$, а їх ЕПР – σ_i (Рис. 2).

Вважаємо, що кожна із вказаних точок однаково розсіює падаючу на неї електромагнітну енергію в усіх напрямках, тобто є так званим ізотропним розсіювачем. Через це падаючий та відбитий сигнал для кожної із таких точок пов'язані один із одним співвідношенням (3).

Нижче отримаємо ЕПР для системи із таких розсіювачів, тобто співвідношення між сигналом, що падає на такі розсіювачі та сумарним сигналом, що потрапляє до приймальної антени від кожного із таких розсіювачів, з урахуванням інтерференції відбитих від кожного із розсіювачів сигналів.

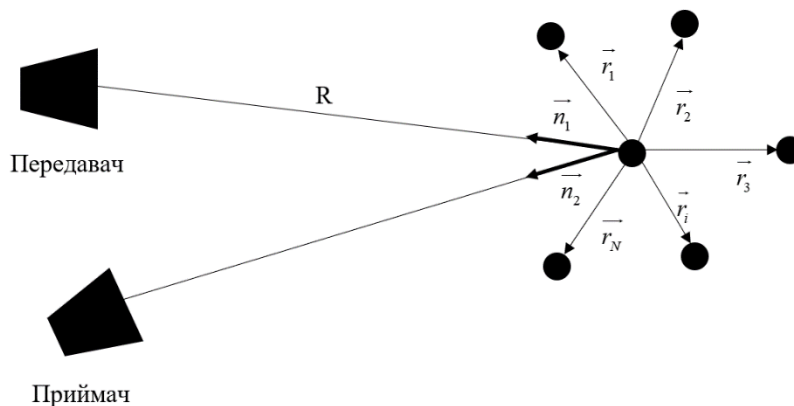


Рис. 2. Система розсіювачів.

Fig. 2. System of scatters.

Для дальньої зони можна вважати, що $R_1 \rightarrow \infty$ та $R_2 \rightarrow \infty$. Тому промені від розсіювача до приймальної антени та від розсіювача до передавальної антени можна вважати паралельними і різниця між ними буде проявлятися лише поблизу початку координат через різні напрямки на приймач та розсіювач. Аналогічним

чином і фаза сигналу в приймачі буде залежати лише від різниці ходу променя між двома точками вздовж напрямку на передавальну й приймальну антени.

Вважатимемо, що різниця ходу від передавача до i -го розсіювача становить ΔR_{1i} , а до приймача – ΔR_{2i} . Їх можна виразити через скалярні добутки радіус-вектору i -го розсіювача та одиничних векторів, які задають напрямок від початку координат та передавача і приймача.

$$\Delta R_{1i} = \vec{n}_1 \vec{r}_i, \quad (4)$$

$$\Delta R_{2i} = \vec{n}_2 \vec{r}_i. \quad (5)$$

Нехай на вході приймача отримуємо гармонічний сигнал:

$$U_{\text{вх}} = U_{m\Sigma} \cos(\omega t - \varphi_\Sigma - \varphi_0), \quad (6)$$

де $U_{m\Sigma}$ – сумарна амплітуда випромінювання, що відбилася від всіх розсіювачів. Застосувавши до рівняння (6) формулу для косинуса різниці, отримуємо:

$$U_{\text{вх}} = U_{m\Sigma} \cos(\omega t - \varphi_0) \cos(\varphi_\Sigma) + U_{m\Sigma} \sin(\omega t - \varphi_0) \sin(\varphi_\Sigma). \quad (7)$$

Будемо вважати, що у дальній зоні набіг фази для кожного розсіювача $\omega t = \text{const}$ та $\varphi_0 = \text{const}$, тоді $U_{\text{вх}}$ буде залежати лише різниці фаз від φ_Σ , яка зумовлена взаємним розташуванням розсіювачів:

$$U_{m\Sigma}^2 \cos^2 \varphi_\Sigma = \left(\sum_i^N \cos \Delta \varphi_i \right)^2 = \sum_i^N \cos \Delta \varphi_i \sum_j^N \cos \Delta \varphi_j, \quad (8)$$

$$U_{m\Sigma}^2 \sin^2 \varphi_\Sigma = \left(\sum_i^N \sin \Delta \varphi_i \right)^2 = \sum_i^N \sin \Delta \varphi_i \sum_j^N \sin \Delta \varphi_j. \quad (9)$$

Враховуючи геометричні міркування, описані вище, різниця фаз $\Delta \varphi_i$ у рівняннях (8) та (9) може бути записана у наступному вигляді:

$$\Delta \varphi_i = \frac{2\pi}{\lambda} (\Delta R_{1i} + \Delta R_{2i}) = \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{n}_1 \vec{r}_i + \vec{n}_2 \vec{r}_i). \quad (10)$$

Тоді квадрат амплітуди сумарного сигналу в приймальній антені становитиме:

$$U_{m\Sigma}^2 = \sum_{i,j}^N (U_{mi} U_{mj} \cos \Delta \varphi_i \cos \Delta \varphi_j + U_{mi} U_{mj} \sin \Delta \varphi_i \sin \Delta \varphi_j). \quad (11)$$

Враховуючи, що амплітуда сигналу пов'язана з ЕПР розсіювача як $\sigma = U^2$, рівняння (11) матиме наступний вигляд:

$$\sigma_{m\Sigma} = \sum_{i,j}^N (\sqrt{\sigma_i \sigma_j} \cos \Delta \varphi_i \cos \Delta \varphi_j + \sqrt{\sigma_i \sigma_j} \sin \Delta \varphi_i \sin \Delta \varphi_j). \quad (12)$$

Після підстановки (10) в (12) отримуємо формулу для визначення сумарної ЕПР системи розсіювачів:

$$\sigma_{m\Sigma} = \sum_{i,j}^N \left(\sqrt{\sigma_i \sigma_j} \cos \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{n}_1 \vec{r}_i + \vec{n}_2 \vec{r}_i) \cos \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{n}_1 \vec{r}_j + \vec{n}_2 \vec{r}_j) + \sqrt{\sigma_i \sigma_j} \sin \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{n}_1 \vec{r}_i + \vec{n}_2 \vec{r}_i) \sin \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{n}_1 \vec{r}_j + \vec{n}_2 \vec{r}_j) \right). \quad (13)$$

Спростивши рівняння (13) за допомогою формули для косинуса різниці, отримуємо:

$$\sigma_{m\Sigma} = \sum_{i,j}^N \sqrt{\sigma_i \sigma_j} \cos \frac{2\pi}{\lambda} [(\vec{n}_1 + \vec{n}_2)(\vec{r}_i - \vec{r}_j)]. \quad (14)$$

Таким чином, отримана формула дозволяє обчислити ЕПР систем точок. При цьому може бути задана різна їх кількість, а також враховано вплив положення точок та значення ЕПР кожної точки на сумарну ЕПР системи.

Ефективна поверхня розсіювачів у формулі (14) може не залежати від кута падіння та спостереження (ізоτροпні розсіювачі), а може бути функцією від них. Це може бути корисно при моделюванні реальних об'єктів за допомогою систем яскравих точок (як простих, таких як пластини різної форми, так і складніших, як поверхні вищих порядків, а також реальні радіолокаційні цілі).

Нижче наведено приклади обчислень ЕПР системи двох розсіювачів, ЕПР яких залежить або не залежить від кута спостереження за різного їх положення у просторі.

ЧИСЕЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДЛЯ ДЕЯКИХ СИСТЕМ ТОЧОК

ЕПР системи двох ізотропних розсіювачів

За допомогою формули (14) можна обчислити ЕПР системи двох ізотропних розсіювачів за різних відношень довжини хвилі до відстані між точками $\frac{\lambda}{d}$ (Рис. 3- 6). Для спрощення порівняння ЕПР кожної точки $\sigma_{1,2} = 1$, значення сумарної ЕПР на рисунках нормоване, розсіювачі знаходяться на початку координат, а передавач та приймач - на нескінченній відстані від нього.

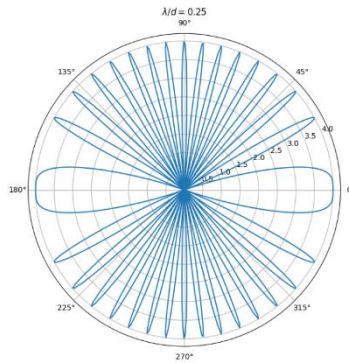


Рис. 3. ЕПР системи двох ізотропних розсіювачів для відношення $\frac{\lambda}{d} = 0.25$.

Fig. 3. RCS of the system of two scatterers at the ratio $\frac{\lambda}{d} = 0.25$.

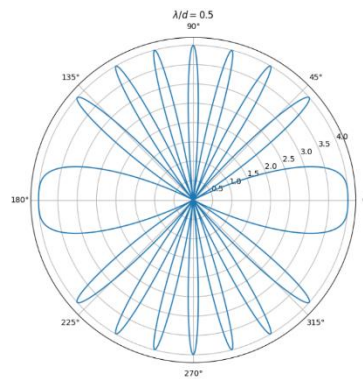


Рис .4. ЕПР системи двох ізотропних розсіювачів для відношення $\frac{\lambda}{d} = 0.5$

Fig. 4. RCS of the system of two scatterers at the ratio $\frac{\lambda}{d} = 0.5$.

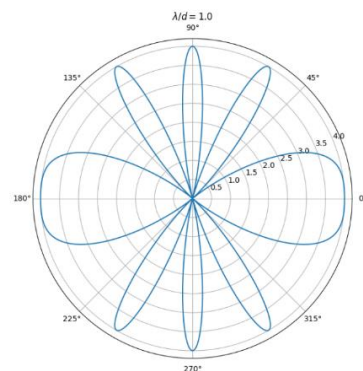


Рис .5. ЕПР системи двох ізотропних розсіювачів для відношення $\frac{\lambda}{d} = 1$.

Fig. 5. RCS of the system of two scatterers at the ratio $\frac{\lambda}{d} = 1$.

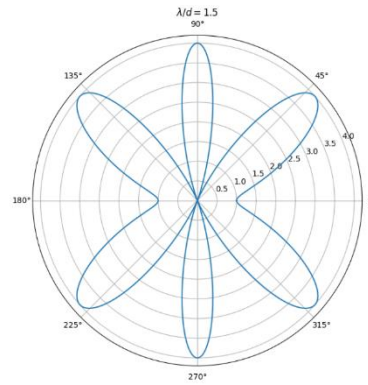


Рис .6. ЕПР системи двох ізотропних розсіювачів для відношення $\frac{\lambda}{d} = 1.5$.

Fig. 6. RCS of the system of two scatters at the ratio $\frac{\lambda}{d} = 1.5$.

Із аналізу Рис. 3-6 можна зробити висновок, що при збільшенні відношення $\frac{\lambda}{d}$ зменшується кількість бокових пелюсток, а ширина головних поступово збільшується, доки вони не розділяються на декілька пелюсток.

ЕПР системи двох точок зі змінною ЕПР

Для знаходження ЕПР системи двох розсіювачів, для яких ЕПР змінюється за певним законом, можна скористатися рівнянням (14). Для спрощення максимальна сумарна ЕПР системи точок нормована, розсіювачі знаходяться на початку координат, а приймач та передавач на нескінченній відстані від нього (тобто у дальній зоні).

Нехай ЕПР точок залежить від азимутального кута φ як:

$$\sigma = \cos^2(\varphi), \quad (15)$$

$$\sigma = \cos^2(2\varphi), \quad (16)$$

$$\sigma = \cos^2(3\varphi). \quad (17)$$

Після підстановки (15), (16) та (17) у (14) отримано наступні результати для різних відношень довжини хвилі до відстані між точками $\frac{\lambda}{d}$ (Рис. 7- 10):

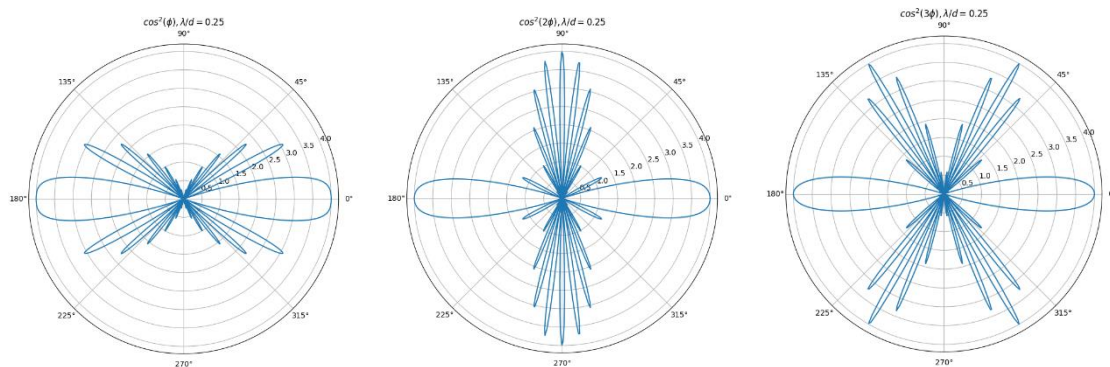


Рис. 7. ЕПР системи трьох розсіювачів, зміна ЕПР яких відбувається за формулами (15), (16) та (17) для відношення

$$\frac{\lambda}{d} = 0.25 .$$

Fig. 7. RCS of systems of three scatters, whose RCS changes by equations (15), (16) та (17) at the ratio $\frac{\lambda}{d} = 0.25$.

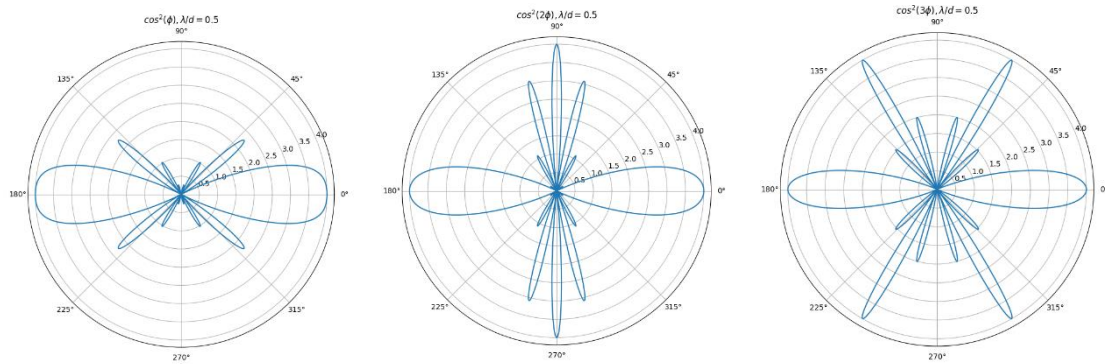


Рис. 8. ЕПР систем трьох розсіювачів, зміна ЕПР яких відбувається за формулами (15), (16) та (17) для відношення $\frac{\lambda}{d} = 0.5$.

Fig. 8. RCS of systems of three scatterers, whose RCS changes by equations (15), (16) та (17) at the ratio $\frac{\lambda}{d} = 0.5$.

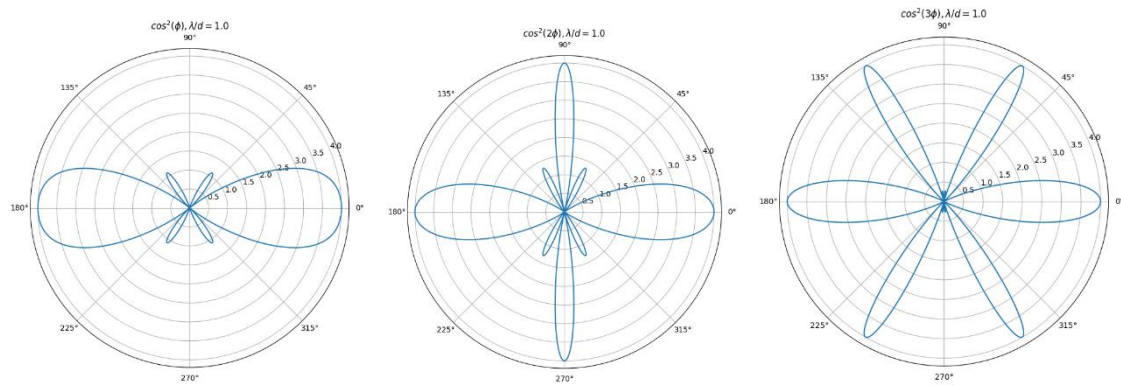


Рис. 9. ЕПР системи трьох розсіювачів, зміна ЕПР яких відбувається за формулами (15), (16) та (17) для відношення $\frac{\lambda}{d} = 1$.

Fig. 9. RCS of systems of three scatterers, whose RCS changes by equations (15), (16) та (17) at the ratio $\frac{\lambda}{d} = 1$.

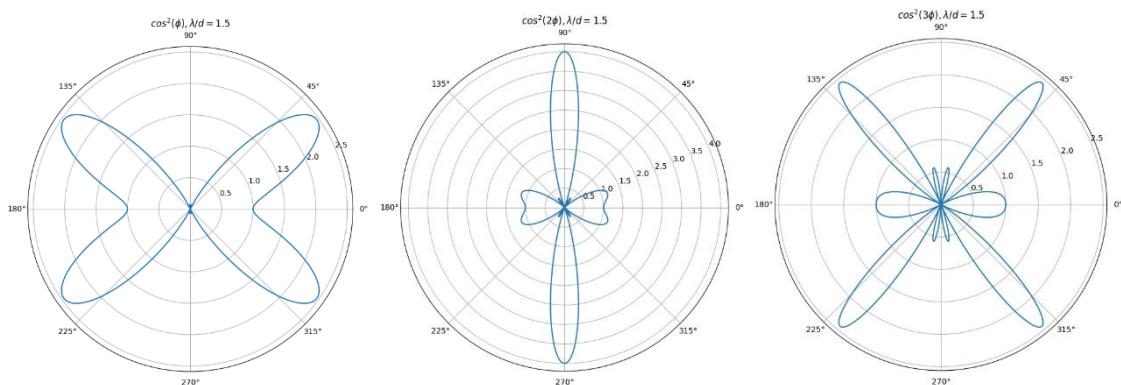


Рис. 10. ЕПР системи трьох розсіювачів, зміна ЕПР яких відбувається за формулами (15), (16) та (17) для відношення $\frac{\lambda}{d} = 1.5$.

Fig. 10. RCS of systems of three scatterers, whose RCS changes by equations (15), (16) та (17) at the ratio $\frac{\lambda}{d} = 1.5$.

Отже, при збільшенні відношення $\frac{\lambda}{d}$ зменшується кількість бічних пелюсток, а головні пелюстки при цьому поступово розділяються на декілька. Також при зміні кутової залежності для ЕПР кожного

розсіювача спостерігається зміна напрямку і кількості бічних пелюсток. Діаграма ЕПР, яка визначається рівняннями (15) та (17), має 4 основні зони із бічними пелюстками, а також вони знаходяться ближче до основних пелюсток. Для ЕПР, яка визначається рівнянням (16) спостерігаються лише дві основні зони із бічними пелюстками, які знаходяться посередині між основними пелюстками.

ВИСНОВКИ

Для ефективного створення радіолокаційних систем необхідно, зокрема, знати ефективну поверхню розсіювання цілей, які вона має виявляти. Але найчастіше такі об'єкти мають складну, велику порівняно з довжиною хвилі, форму поверхні, що призводить до збільшення складності обчислень ЕПР, яка має багатопелюсткову форму, а також залежить від поляризації, частоти хвилі та інших факторів. Таким чином моделювання розсіювання електромагнітних хвиль на реальних об'єктах стає складною задачею.

Для спрощення обчислень ЕПР реальних об'єктів пропонується використовувати модель у вигляді низки яскравих розсіювачів, які можуть бути ізотропними чи анізотропними (по різному розсіювати хвилі в різних напрямках). За різного положення таких точок у просторі, а також зміни ЕПР самих точок сумарна поверхня розсіювання має стати близькою або аналогічною до ЕПР реальних об'єктів.

Задля виконання поставленої задачі було досліджено зв'язок між ЕПР системи та її параметрами, такими як розташування їх у просторі та ЕПР кожної точки. Зокрема було отримано діаграми ЕПР для двох розсіювачів в залежності від відношення $\frac{\lambda}{d}$ (Рис. 3-6), а також ЕПР системи розсіювачів для ізотропних точок та точок зі змінною ЕПР. Моделювання для таких систем показало, що діаграми зворотного розсіювання мають складну кутову залежність та багатопелюстковий характер. При цьому, для всіх випадків при наближенні відстані між точками до довжини хвилі кількість бічних пелюсток зменшувалася, а дві головні пелюстки збільшувалися в ширині, потім розділялися на декілька. При цьому для випадку зміни ЕПР точок за закономірностями (15), (16) та (17) при збільшенні коефіцієнта в закономірності зміни ЕПР точки при φ^2 також спостерігалася змінення положення зон із бічними пелюстками (для непарних коефіцієнтів 4 зони, наближених до основних пелюсток, та для парних коефіцієнтів - 2 зони посередині між основними пелюстками).

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bassem R. Mahafza. Introduction to Radar Analysis. 2nd Edition. New York: Chapman and Hall/CRC. 2017. 460 с.
2. Mirabel Cerqueira Rezende, Malmonge Martin, Roselena Faez, Marcelo Alexandre Souza Miacci, Evandro Luis Nohara. Radar Cross Section Measurements (8-12 GHz) of Magnetic and Dielectric Microwave Absorbing Thin Sheets. Revista de Física Aplicada e Instrumentação, vol. 15, no. 1, December, 2002
3. Сайт «radartutorial.eu» - Режим доступу: <https://www.radartutorial.eu/01.basics/Radar%20Cross%20Section.en.html>. 21.09.
4. Eugene F. Knott, John F. Shaeffer ; Michael T. Tuley. Radar Cross Section (2nd Edition). 2004. 626 с.
5. Eugene F. Knott . Radar cross-section measurements. New York: Springer New York. 2012. 546 с.
6. Andreas Wessling. Radar Target Modelling Based on RCS Measurements. Linköping 2002-05-17.
7. Merrill I. Skolnik. Radar handbook – 2nd ed. 1990
8. E.F. Knott. A progression of high-frequency RCS prediction techniques. Proceedings of the IEEE. vol. 73, no. 2, February 1985
9. Oleg I. Sukharevsky. Electromagnetic Wave Scattering by Aerial and Ground Radar Objects. 2014. 337 с.
10. Сайт “NumPy” – Режим доступу: - <https://numpy.org>
11. Сайт “Matplotlib” – Режим доступу: - <https://matplotlib.org>

REFERENCES

1. Bassem R. Mahafza. Introduction to Radar Analysis. 2nd Edition. New York: Chapman and Hall/CRC. 2017. 460 с.
2. Mirabel Cerqueira Rezende, Malmonge Martin, Roselena Faez, Marcelo Alexandre Souza Miacci, Evandro Luis Nohara. Radar Cross Section Measurements (8-12 GHz) of Magnetic and Dielectric Microwave Absorbing Thin Sheets. Revista de Física Aplicada e Instrumentac, ao, vol. 15, no. 1.Dec., 2002
3. Website «radartutorial.eu» - Access mode: <https://www.radartutorial.eu/01.basics/Radar%20Cross%20Section.en.html>. 21.09.
4. Eugene F. Knott, John F. Shaeffer ; Michael T. Tuley. Radar Cross Section (2nd Edition). 2004. 626 с.
5. Eugene F. Knott . Radar cross-section measurements. New York: Springer New York. 2012. 546 с.
6. Andreas Wessling. Radar Target Modelling Based on RCS Measurements. Linköping 2002-05-17.
7. Merrill I. Skolnik. Radar handbook – 2nd ed. 1990
8. E.F. Knott. A progression of high-frequency RCS prediction techniques. Proceedings of the IEEE. vol. 73, no. 2, February 1985
9. Oleg I. Sukharevsky. Electromagnetic Wave Scattering by Aerial and Ground Radar Objects. 2014. 337 с.
10. Website “NumPy” – Access mode: - <https://numpy.org>
11. Website “Matplotlib” – Access mode: - <https://matplotlib.org>

Стаття надійшла до редакції: 5 березня 2025 р.

Рекомендовано до друку: 23 квітня 2025 р.

PREDICTION OF ELECTROMAGNETIC WAVES SCATTERING ON COMPLEX LARGE OBJECTS

M.M.LEGENKIY, M.A.BUHAI

V. N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine, 61022, Kharkiv, Svoboda Square, 4

Relevance. Currently, the question radar cross-section (RCS) modelling of real targets arises. Experimental measurement is difficult to implement, and existing methods of theoretical calculation usually require a lot of time. Therefore, it is necessary to develop new methods of collecting and processing experimental data and theoretical modeling, which will allow to speed up the assessment of the RCS of various objects. An important task now is to create a radar that will be able to detect even well-camouflaged targets. On the other hand, there is a need to mask one's own objects. Given the latest trends in the use of low-visibility targets, the reflected signal from which can be almost at the noise level, it is necessary to learn how to distinguish it from the signals of other objects. Thus, the current task is to create effective methods for predicting scattering on typical radar targets, the use of which will not require a lot of time for modeling.

Objective Obtaining an equation for calculating the effective scattering surface of a system of bright point reflectors with different radiation patterns.

Methods. Using physical and geometric optics methods to obtain the equation of the radar cross-section of bright point reflector systems. Using the Python programming language, as well as its libraries NumPy and Matplotlib for calculations and plotting.

Results. An equation for calculating the radar cross-section of bright point reflector systems has been obtained for the cases of isotropic reflectors and different angular dependence of the effective scattering surface. Graphs have been constructed for cases where the RCS of each scatter is constant and varies according to certain laws.

Conclusions. The final formula for calculating the RCS of bright point reflector systems was obtained, and regularities were found for different RCS values of the reflectors.

KEY WORDS: radar cross-section, RCS, bright point system, radiolocation, target visibility, interference.

The article was received by the editors: March 5 2025

The article is recommended for printing: April 23 2025