

DOI 10.36074/logos-21.06.2024.017

## ХАРАКТЕРИСТИКА ВЛАСТИВОСТЕЙ МАЛОЇ ПОВІТРЯНОЇ ЦІЛІ ЯК ОБ'ЄКТУ, ЩО ВІДОБРАЖАЄ І РОЗСІЮЄ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХВИЛІ

Азаренко Олена Василівна<sup>1</sup>, Гончаренко Юлія Юріївна<sup>2</sup>,  
Дівізінюк Михайло Михайлович<sup>3</sup>, Фаррахов Олександр Володимирович<sup>4</sup>,  
Сівоха Ігор Михайлович<sup>5</sup>

---

1. доктор фізико-математичних наук, професор, заступник керівника  
*Науково-дослідний лабораторно-експериментальний центр «БРАНД ТРЕЙД», УКРАЇНА*  
**ORCID ID: 0000-0003-2927-5545**

2. доктор технічних наук, доцент,  
професор кафедри кібербезпеки та захисту інформації  
*Європейський університет, УКРАЇНА*  
**ORCID ID: 0000-0003-2045-0263**

3. доктор фізико-математичних наук, професор, головний науковий співробітник  
*Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики Національної академії наук України, УКРАЇНА*  
**ORCID ID: 0000-0002-5657-2302**

4. кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник  
*Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики Національної академії наук України, УКРАЇНА*  
**ORCID ID: 0000-0003-4988-126X**

5. науковий співробітник науково-дослідного відділу проблем розвитку та  
впровадження стратегічних комунікацій інституту стратегічних комунікацій  
*Національний університет оборони України, УКРАЇНА*  
**ORCID ID: 0000-0001-5377-2520**

---

**Анотація.** Аналізуються властивості малої повітряної цілі як об'єкта, що відображає і розсіює електромагнітні хвилі. Спочатку розглянуті основні властивості електромагнітних хвиль. Далі надано опис зворотної задачі для гіперболічних диференціальних рівнянь, які зводяться до завдань інтегральної геометрії і дозволяють відновити образ радіолокаційної цілі. Зроблено висновок про п'ять факторів, що формують відображення і розсіюють властивості малої повітряної цілі.



## 섹션 9.

MILITARY SCIENCES, NATIONAL SECURITY AND SECURITY OF THE STATE BORDER

### Вступ

Незалежність держави визначається її здатністю зберігати свою територіальну цілісність та національну безпеку [1]. Одним із аспектів забезпечення незалежності України є захист критичної інфраструктури нашої держави від терористичного впливу. До складу цієї інфраструктури входять атомні, теплові та гідроелектростанції, металургійні та нафтохімічні комбінати, та інші стратегічні об'єкти, що охороняються [2,3]. Однією з головних небезпек цих об'єктів є ударні безпілотні літальні апарати (БПЛА), які систематично атакують об'єкти критичної інфраструктури (ОКІ) [4,5]. Відомо [6-8], що в даний час, основним засобом для виявлення БПЛА та інших повітряних цілей є імпульсні станції радіолокації (РЛС), які забезпечують вирішення завдань охорони та захисту ОКІ. Дослідження властивостей БПЛА – малих повітряних цілей як об'єктів, що відображають і розсіюють електромагнітні хвилі, забезпечить більш ефективну експлуатацію цих РЛС і забезпечить підвищення ступеня забезпечення безпеки ОКІ та інших стратегічних об'єктів, що охороняються.

Мета роботи – дати характеристику властивостей малої повітряної цілі як об'єкта, що відображає і розсіює електромагнітні хвилі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання. Спочатку розглянути основні властивості електромагнітних хвиль. Потім дати опис зворотної задачі для гіперболічних диференціальних рівнянь, які зводяться до завдань інтегральної геометрії та дозволяють відновити образ радіолокаційної цілі. Зробити висновок про п'ять факторів, що формують відображуючи і розсіюючи властивості малої повітряної цілі.

### Викладення основного матеріалу

Електромагнітна, як і будь-яка інша хвиля, випромінювана точковим джерелом, поширюється за сферичним законом. Для опису поширення сферичних хвиль у фізиці використовують променеву теорію. Під променем у ній розуміють лінію, нормальну (перпендикулярну) до хвильової поверхні, а під напрямом поширення хвилі – напрямом променів.

Повітряне середовище, в якому поширюються електромагнітні промені, вважається однорідним та анізотропним. Тому електромагнітні промені, що поширюються у повітряному, середовищі будуть прямими. Тобто прямолінійність поширення у вільному просторі – це перша властивість електромагнітних хвиль. Друге властивість електромагнітних хвиль у тому, що вони поширюються із постійною швидкістю, що дорівнює  $3 \times 10^8$  км/с.

На сферичному фронті електромагнітної хвилі, що розповсюджується, можна побудувати необмежену кількість променів. Розглядаючи поодинокі локальну ділянку фронту сферичної хвилі, слід зазначити, що округлості цієї

ділянки вироджуються, конфігурація його поверхні наближається до плоскої хвилі, і промені стають паралельними прямими. Це третя властивість електромагнітних хвиль [9,10].

Процес опромінення цілі радіолокації плоскою електромагнітною хвилею представлений на рис. 1.

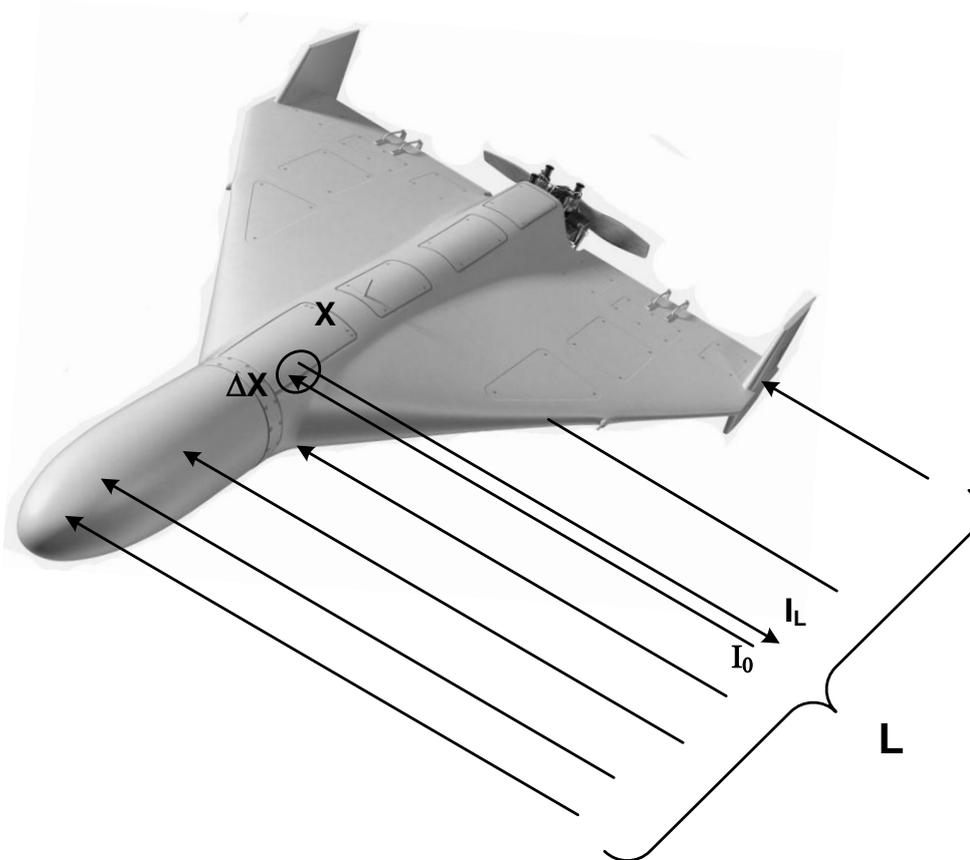


Рис.1. **Схема опромінення радіолокаційної цілі**

Тут функція  $j(x)$  характеризує ступінь поглинання електромагнітних променів ракурсною поверхнею, що відбиває, в деякій точці  $x$  радіолокаційної цілі, а величина  $\Delta I$  описує зміну інтенсивності електромагнітного випромінювання, що відбувається при цьому. Тоді відносно зменшення інтенсивності електромагнітного випромінювання на нескінченно малому відрізку  $\Delta x$  в точці  $x$  складатиме [11,12]:

$$\frac{\Delta I}{I} = j(x)\Delta x. \quad (1)$$

**섹션 9.**

MILITARY SCIENCES, NATIONAL SECURITY AND SECURITY OF THE STATE BORDER

Якщо на радіолокаційну ціль падає  $L$  променів, то справедливо:

$$\frac{I_1}{I_0} = \exp\left\{-\int_L j(x)\Delta x\right\}. \quad (2)$$

де  $I_0$  початкова інтенсивність поодинокого променя,

$I_1$  – його інтенсивність після відображення від радіолокаційної цілі.

В результаті опромінення потоком паралельних електромагнітних променів отримуємо опис відображеного сигналу лінійним інтегралом функції  $j$ , яка описує поглинання електромагнітних хвиль кожною точкою  $x$  поверхні цілі радіолокації. За сукупністю цих інтегралів можна відновити відповідні кожному променю функції  $j$  та отримати відновлений образ радіолокаційної цілі.

Відомо, що обернені завдання для гіперболічних диференціальних рівнянь у деяких випадках можна звести до завдань інтегральної геометрії [13,14].

Розглянемо об'єкт  $R^2$ , що розсіює електромагнітні хвилі. Головний показник об'єкта, що розсіює – це показник заломлення електромагнітних хвиль на його поверхні, яке описується залежністю (3)

$$n(x) = \sqrt{1 + j(x)} \quad (3)$$

Нехай на радіолокаційну ціль падає електромагнітна хвиля виду (4)

$$e^{-ift} u_I(x) \quad (4)$$

де  $f$  – частота хвилі.

З урахуванням розгляду плоских хвиль, які безпосередньо підходять до цілі отримуємо

$$u_I(x) = e^{if\theta \cdot x} \quad (5)$$

де  $\theta \in S^1$  – поодинокий вектор, який визначає напрямок розповсюдження хвилі.

При прямому розсіюванні для заданої функції  $j$  отримуємо розсіяну хвилю виду (6)

$$e^{-ift} u_S(x) \quad (6)$$

яка відповідає умові (7) та задовольняє наведеному хвильовому рівнянню (8)

$$u = u_I + u_S \quad (7)$$

$$\Delta u + f^2(1 + j)u = 0 \quad (8)$$

де  $\Delta$  – лапласіан.

Для розв'язку рівняння (8) у рамках наближення Ритова, прийемо (9)

$$u = u_I e^{fw} \quad (9)$$

Тоді отримуємо вираз (10)

$$f\Delta w + 2if^2\theta \cdot \nabla w + f^2|\nabla w|^2 = -f^2j \quad (10)$$

де  $\Delta$  – градієнт.

Зневажаючи величиною  $|\nabla w|^2$ , отримаємо наближення Ритова  $u_R$  функції  $u$  у вигляді (11)

$$u_R = u_I e^{fw_R} \quad (11)$$

Необхідно відзначити, що в даному випадку наближення Ритова задовольняє рівнянню (12)

$$\Delta w_R + 2if\theta \cdot \nabla w_R = -fj \quad (12)$$

або рівнянню (13)

$$\Delta(u_I w_R) + f^2(u_I w_R) = -fj u_I \quad (13)$$

Диференціальне рівняння (13) розв'язується за допомогою функції Гріна, яка в даному випадку описується функцією Ханкеля першого роду нульового порядку, тобто (14)

$$H_0(f|x|) \quad (14)$$

Тоді її інтегральне уявлення описується залежністю (15)

$$H_0(f|x|) = -\frac{i}{4\pi} \int_{R^1} e^{i(|x_i|a(\sigma) + x_i\sigma)} \frac{d\sigma}{a(\sigma)} \quad (15)$$

де  $a(\sigma) = \sqrt{f^2 - \sigma^2}$ .



## 섹션 9.

MILITARY SCIENCES, NATIONAL SECURITY AND SECURITY OF THE STATE BORDER

Зараз розв'язок рівняння (13), що описує процес відображення електромагнітної хвилі від радіолокаційної цілі в наближенні Ритова набуде вигляду (16)

$$u_I w_R(x) = -f \int_{R^2} H_0(f|x-y|) j(y) u_I(y) dy \quad (16)$$

Аналіз виразу (16) показує, що ключовим параметром малої повітряної цілі як об'єкта, що відображає та розсіює електромагнітні хвилі, є частота зондуючої електромагнітної хвилі. Іншими факторами, що впливають на цей процес (відображення та розсіювання) є розміри та конфігурація радіолокаційної цілі, матеріал, з якого виготовлена поверхня повітряної цілі, а також напрям приходу електромагнітних променів (яке прийнято називати ракурсом зондування цілі радіолокації).

### Висновки

Таким чином, відображаючи властивості малої повітряної цілі як об'єкта, що відображає і розсіює електромагнітні хвилі, визначаються п'ятьма факторами. Перший – частота зондуючої електромагнітної хвилі (робоча частота станції радіолокації). Другий та третій – геометричні розміри та конфігурація повітряної цілі. Четвертий – матеріал, з якого виготовлена поверхня, що покриває повітряну ціль. П'ятий – ракурс зондування малої повітряної цілі.

Знання цих факторів забезпечить точний розрахунок дальності виявлення цілей радіолокації та проведення заходів щодо захисту об'єктів критичної інфраструктури від ударного терористичного впливу.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

- [1] Ключове завдання нашої держави... *Офіційне інтернет-представництво Президента України. Промови та звернення.* (2024). Вилучено з: <https://www.president.gov.ua/news/speeches>
- [2] Дівізінюк М.М., Азаренко О.В., Гончаренко Ю.Ю., Дівізінюк М.М., Шевченко Р.І., Шевченко О.С. (2023). Характеристика об'єктів критичної інфраструктури держави (особливості ядерних та інших стратегічних об'єктів) . *Комунальне господарство міст, том 1, випуск 175.* С.160 – 168
- [3] Портал «Все про бухгалтерський облік». (2024). *Постанова КМУ від 04.03.2015р. № 83 «Про затвердження переліку об'єктів державної власності, що мають стратегічне значення для економіки і безпеки держави».* (Редакція від 26.08.2021р.). Вилучено з: <https://document.vobu.ua/doc/7863>
- [4] «Вікіпедія». (2024). *Перелік атак БПЛА Shahed 136.* Вилучено з: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Перелік\\_атак\\_БПЛА\\_Shahed\\_136](https://uk.wikipedia.org/wiki/Перелік_атак_БПЛА_Shahed_136)
- [5] Дівізінюк М.М., Азаренко О.В., Гончаренко Ю.Ю., Камишенцев Г.В., Фаррахов О.В. (2024). Аналіз деяких аспектів терористичних вплив ударними дронами.

*Theoretical and empirical scientific research: concept and trends: Collection of scientific papers «ΛΟΓΟΣ» with Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference, Oxford, February 2, 2024.* «P.C. Publishing House», United Kingdom. P. 128–133. <https://doi.org/10.36074/logos-02.02.2024.024>

- [6] Азаренко О.В., Гончаренко Ю.Ю., Дівізінюк М.М., Камишенцев Г.В., Фаррахов О.В. (2024). Деякі аспекти класифікації безпілотних літальних апаратів в інтересах захисту об'єктів критичної інфраструктури. *Scientific Collection «InterConf+», 43(193): with the Proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference «Scientific Goals and Purposes in XXI Century» (March 19-20, 2024; Seattle, USA) / comp. by LLC SPC «InterConf». Seattle: ProQuest LLC. С. 624–637.* <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.03.2024.060>
- [7] Електронна версія «Великої Української енциклопедії». (2024). *Радіолокаційна станція*. Вилучено з: [https://vue.gov.ua/Радіолокаційна станція](https://vue.gov.ua/Радіолокаційна_станція)
- [8] Дивізінюк, М.М., Азаренко, Е.В., Гончаренко, Ю.Ю., Лазаренко, С.В., Ожиганова, М.И. (2019). *Информационно-технические методы предотвращения чрезвычайных ситуаций террористического характера на объектах критической инфраструктуры. Часть 1. С использованием активных импульсных радиолокационных средств*. Монографія. Київ: ДУ ІГНС НАН України.
- [9] «Фізика – філософія життя» (2024). *Електромагнітні хвилі*. Вилучено з: <http://physics.zfftt.kpi.ua/mod/book/view.php?id=381&chapterid=599>
- [10] Азаренко Е.В., Бородина Н.А., Гончаренко Ю.Ю., Касаткина Н.В., Лазаренко С.В., Рыбка Е.А. (2017). Разработка математической модели радиолокационного обнаружения и идентификации людей и других опасных целей на подходах к охраняемым объектам критической инфраструктуры в стандартных условиях. *Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах»*. Хмельницький. Хмельницький національний університет. № 4 (60). С.161–165.
- [11] Азаренко Е.В., Гончаренко Ю.Ю., Коноваленко Н.В., Лазаренко С.В. (2016). Методика расчёта энергетической дальности обнаружения радиолокационных целей. *«Телекомунікаційні та інформаційні технології»*. № 6. Київ: ДУІКТ. С.18–29.
- [12] David J. Griffiths. (1998). *Introduction to electrodynamics*. Prentice Hall, Upper Saddle, New Jersey.
- [13] Adams R.A. (1975). *Sobolev Spaces*. New York: Academic Press.
- [14] Тихонов А.Н. (1978). *Математические задачи компьютерной томографии*. Москва. Наука.