

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ



МАТЕРІАЛИ
VII ФОРУМУ
**«Автоматизація, електроніка та
робототехніка. Стратегії розвитку та
інноваційні технології»
AERT-2025**

11 - 12 грудня 2025 р.

Харків 2025



Збірник матеріалів VII форуму «Автоматизація, електроніка та робототехніка. Стратегії розвитку та інноваційні технології» AERT-2025. – Харків, ХНУРЕ, 2025. – 105 стр.

В збірник включені матеріали VII форуму «Автоматизація, електроніка та робототехніка. Стратегії розвитку та інноваційні технології» AERT-2025.



VII форум «Автоматизація, електроніка та робототехніка. Стратегії розвитку та інноваційні технології» AERT-2025 проведено кафедрами:



- мікропроцесорних технологій і систем (MTC),



- комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки (KITAR).

Видання підготоване
кафедрою мікропроцесорних технологій і систем (MTC)
Харківського національного університету радіоелектроніки (ХНУРЕ)

61166 Україна, Харків, просп. Науки, 14

Тел. +38 (057) 755 0220

E-mail:

oleh.zubkov@nure.ua

© Харківський
національний університет
радіоелектроніки (ХНУРЕ), 2025

МОДЕЛЮВАННЯ РЕЄСТРАЦІЇ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В СИСТЕМАХ ОПТИЧНОЇ ЛОКАЦІЇ З УРАХУВАННЯМ УМОВ СПОСТЕРЕЖЕННЯ

Головатенко С.В., Стрілкова Т. О.

e-mail: serhii.holovatenko@nure.ua, tetiana.strilkova@nure.ua

Харківський національний університет радіоелектроніки, кафедра
мікропроцесорних технологій і систем

Abstract. This research focuses on the development of software for simulating the operation of a location system under various observation conditions. The study presents methods for modeling random light objects and analyzes the main challenges associated with registering optical signals on rectangular sensor matrices. Special attention is given to the mismatch between the geometry of diffraction patterns and the structure of rectangular photodetectors. Graphical examples generated by the implemented software are provided, demonstrating the efficiency of the proposed modeling approach.

Ключові слова: оптична локація, фотоприймачі, дифракція.

Оптична локація, на сьогоднішній день, є одним з найефективніших способів спостереження повітряного простору. Даний спосіб локації дозволяє з високою точністю визначати координати повітряних об'єктів [1]. В результаті прийому вторинного або власного випромінювання повітряних об'єктів, відбувається визначення їх координат та параметрів [2, 3]. Однією з основних проблем практичної реалізації оптичних локаційних систем є їх ефективність роботи в різноманітних умовах через вплив зовнішніх факторів, таких як турбулентність атмосфери, рівень завадового фону, умови освітленості простору [4, 5].

Метою роботи є створення інформаційної моделі реєстрації оптичного випромінювання систем оптичної локації на основі хвильової теорії світла.

Аналіз особливостей систем. Фотоприймачі, що застосовуються у сучасних локаційних системах, здебільшого мають прямокутну геометрію та реалізуються у вигляді матриць світлочутливих елементів (елементів роздільної здатності). Така конфігурація обумовлена технологічними особливостями виготовлення напівпровідникових сенсорів, а також зручністю їх інтеграції у цифрові системи обробки сигналів. Прямокутна форма елементів дозволяє ефективно організувати дискретизацію просторової інформації та забезпечує високу щільність розташування пікселів у площині приймання.

Водночас, оптична природа формування зображення накладає певні обмеження. Класична дифракційна пляма, що виникає внаслідок круглої симетрії вихідної апертури, має круглу форму. Це призводить до неузгодженості між геометрією дифракційного зображення та

прямокутною структурою матриці фотоприймача. У результаті частина енергії світлового сигналу розподіляється не оптимально, що може знижувати ефективність реєстрації та погіршувати просторову роздільну здатність системи.

Для усунення зазначеної невідповідності доцільним є введення в оптичну схему спеціальних елементів – прямокутних діафрагм та транспарантів. Їх використання дозволяє трансформувати круглу вхідну апертуру у прямокутну, що забезпечує більш узгоджене співвідношення між формою дифракційної плями та геометрією фотоприймача. Такий підхід сприяє підвищенню ефективності використання світлової енергії, зменшенню втрат інформації та покращенню метрологічних характеристик локаційної системи.

Крім того, застосування прямокутних апертур відкриває можливості для оптимізації алгоритмів цифрової обробки сигналів. Оскільки форма дифракційної плями стає ближчою до прямокутної, зменшується кількість артефактів при дискретизації та реконструкції зображення. Це особливо важливо в умовах спостереження з низьким відношенням сигнал/шум, коли кожна одиниця енергії має критичне значення для точності визначення координат об'єкта.

Методи моделювання. Для моделювання та аналізу роботи локаційної системи в різноманітних умовах спостереження використана хвильова теорія світла, яка дозволяє адекватно описати процеси дифракції. Основним завданням є формування розподілу амплітуди світлового збурення у фокальній площині приймальної оптичної системи. Моделювання ґрунтується на використанні інтегральних співвідношень Френеля та Фраунгофера, які описують поширення хвильових фронтів крізь апертури різної форми. Для прямокутних діафрагм застосовується двовимірне інтегрування по площі апертури, що дозволяє отримати аналітичні вирази для амплітудного розподілу. Формування дифракційної картини у випадку круглої апертури амплітудний розподіл описується функцією Бесселя першого порядку, що формує класичну «Airy pattern». Для прямокутної апертури розподіл визначається добутком синусоїдальних функцій (sinc-функцій) уздовж двох координатних осей, що забезпечує прямокутну симетрію дифракційної плями.

Моделювання роботи локаційної системи в різноманітних умовах спостереження повинно враховувати не лише фізичні параметри середовища та джерела випромінювання, але й геометричну узгодженість між оптичною апертурою та структурою фотоприймача. Введення прямокутних діафрагм та транспарантів є одним із ключових інженерних рішень, що дозволяє підвищити ефективність функціонування системи та забезпечити її адаптивність до широкого спектра експлуатаційних умов.

Модель ґрунтується на використанні прямокутної вхідної апертури. Розподілення амплітуди світлового збурення у фокальній площині є

дифракційною картиною Фраунгофера при дифракції на прямокутному отворі з розмірами a та b . Це розподілення також відомо та має вигляд:

$$E_{\text{фк}}(u, v) \approx E_0 \frac{\sin\left[c(u-u_0)\frac{a}{2}\right]}{c(u-u_0)\frac{a}{2}} \frac{\sin\left[d(v-v_0)\frac{b}{2}\right]}{d(v-v_0)\frac{b}{2}}, \quad (1)$$

де u, v – координати у площині фотоприймача; c, d – коефіцієнти, які відображають параметри оптичної системи.

Для оцінки ефективності реєстрації повітряних об'єктів у різноманітних умовах розроблено комп'ютерну (інформаційну) модель, яка дозволяє генерувати зображення об'єктів на заданій площині з урахуванням дифракційної картини Фраунгофера, а також створювати шуми різної інтенсивності та стохастичними характеристиками.

Для програмної реалізації використано метод Бокса – Мюллера:

$$M[i, j] = \mu + \sigma \sqrt{-2 \ln(u_1)} \cdot \cos(2\pi u_2)$$

де: $u_1, u_2 \sim u(0,1)$ – незалежні рівномірні випадкові числа; μ - середнє (центр розподілення); σ – стандартне відхилення.

Моделювання проводиться для різних сценаріїв умов спостереження: зміна розміру та форми апертури; варіація довжини хвилі випромінювання; вплив шумів та фонових перешкод; різні відстані між об'єктом та приймальною системою. Це дозволяє оцінити адаптивність системи та її здатність зберігати необхідну роздільну здатність у реальних умовах експлуатації.

Результати моделювання. Даний програмний засіб реалізує відображення результатів моделювання у вигляді 3D гістограми, у полі довільного розміру, а також 2D чорно-білого зображення, з можливістю змінювати різноманітні параметри. Яке складається з результатів накладання декількох світлових об'єктів у фокальній площині, а також випадкового шуму.

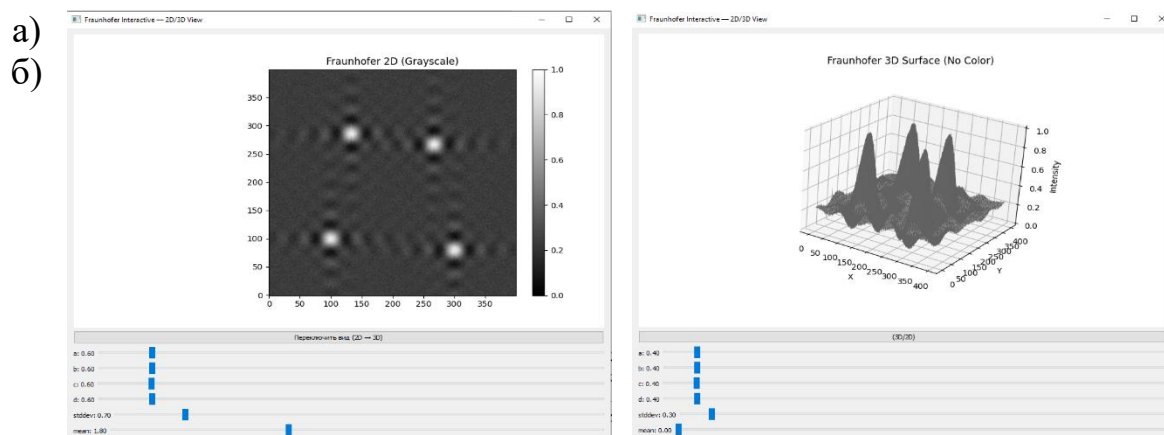


Рисунок 1 Розподілення амплітуди світлового збурення у фокальній площині, яке отримано з використанням хвильової теорії світла.

а) вивід результатів моделювання у вигляді 2D зображення;

б) вивід результатів у вигляді 3D гістограми.

Висновки. Таким чином, методи моделювання базуються на хвильовій теорії світла, поєднують аналітичні та числові підходи, і забезпечують можливість дослідження впливу геометрії апертури та умов спостереження на якість роботи локаційної системи. Розроблений програмний засіб забезпечує наочне відображення результатів моделювання розподілу амплітуди світлового збурення у фокальній площині. Можливість варіювання параметрів моделювання (розмір поля, кількість та конфігурація об'єктів, рівень випадкового шуму) забезпечує гнучкість дослідження та дозволяє адаптувати систему до різноманітних умов спостереження. Врахування випадкового шуму у моделюванні дозволяє наблизити результати до реальних експлуатаційних умов, що підвищує достовірність отриманих висновків та практичну цінність розробленої комп'ютерної моделі. Це забезпечує можливість моделювати сценарії роботи локаційних систем, наближених до реальних умов експлуатації, та створює основу для подальшої оптимізації. Отримані результати мають практичну значущість для розробки високоточних оптичних систем, здатних працювати в широкому спектрі умов спостереження.

Список використаних джерел

1. Стрілкова Т.О., Литюга О.П., Калмиков О.С., Кожушко Я.Н., Неофітний М.В. Оптико-електронні технології супроводження рухомих об'єктів // IX International Conference on Optoelectronic Information Technologies “PHOTONICS-ODS 2020” Ukraine, Vinnytsia, VNTU October 5-7, 2020, pp. 25.
2. Свид І.В. Обод І.І., Головатенко С.В., Дацько С.В. Оцінка якості визначення координат повітряних об'єктів кооперативними радіолокаційними системами спостереження повітряного простору. // Радіотехніка : Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2023. Вип. 214. - С. 102-114. doi: 10.30837/rt.2023.3.214.09.
3. Головатенко С.В., Стрілкова Т. О. Моделювання роботи локаційної системи в різноманітних умовах спостереження / С. В. Головатенко, Т. О. Стрілкова // Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті : Матеріали 29-го Міжнародного молодіжного форуму, 16–19 квітня 2025 р. – Харків : ХНУРЕ, 2025. – Т. 1. – С. 35–37.
4. Strelkova T., Lytyuga A., Kalmykov A., Khoroshun G., Riazantsev A., Ryazantsev O. [Influence of a signal description model on the calculations of the efficiency indicators of optoelectronic systems](#) // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. – 4/5 (106). – pp. 41-50.
5. Strelkova T.A., Lytyuga A.P., Kalmykov A.S. Statistical Characteristics of Optical Signals and Images in Machine Vision Systems Examining Optoelectronics in Machine Vision and Applications in Industry 4.0. 2021, Pages: 134-162. DOI: 10.4018/978-1-7998-6522-3.ch005.