

**МЕТОДИ І СИСТЕМИ ОПТИЧНО-ЕЛЕКТРОННОЇ ТА ЦИФРОВОЇ
ОБРОБКИ СИГНАЛІВ**

DOI: 10.20535/1970.69(1).2025.331757

УДК 621.384.3

АНАЛІЗ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ ПОЛЯРИМЕТРИЧНИХ ТЕПЛОВІЗОРІВ*Голик В. О., Колобродов В. Г.**Національний технічний університет України**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна**E-mail: valeriiaholyk@gmail.com, thermo@ukr.net*

Поляриметричні тепловізори є важливими інструментами в сучасних системах виявлення та спостереження, дозволяючи отримувати зображення об'єктів за рахунок вимірювання поляризаційних характеристик інфрачервоного випромінювання. Це відкриває нові можливості для покращення контрастності та роздільної здатності зображень в умовах низької видимості. Постановка проблеми полягає в тому, що оптимізація оптичних систем таких тепловізорів залишається складним завданням через комплексність фізичних процесів, що вимагає додаткового аналізу та моделювання. Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що багато робіт присвячено застосуванню тепловізорів у системах виявлення та розпізнавання, а також методам оцінки їх роздільної здатності. Зокрема, Колобродов В. Г. підкреслює необхідність покращення оптичних характеристик тепловізорів, Холст Г. С. пропонує методи розрахунку модуляційної передаточної функції (MTF). Деякі дослідження акцентують увагу на моделюванні оптичних систем з використанням сучасних програмних засобів. Проте питання оптимізації оптичних систем поляриметричних тепловізорів залишається актуальним.

Метою роботи є проведення теоретичного аналізу оптичних систем поляриметричних тепловізорів, аналіз математичних моделей, що описують роботу таких систем, виконання моделювання оптичних систем з використанням програмного середовища Python та надання рекомендацій щодо оптимізації оптичних систем для покращення їх характеристик.

Результати дослідження включають розгляд енергетичних та просторових характеристик випромінювання об'єктів та фонів, а також проходження інфрачервоного випромінювання через атмосферу. Викладено математичні моделі, що описують роботу оптичних систем, зокрема формули для розрахунку MTF та мінімальної роздільної різниці температур (MRTD). Проведено моделювання оптичних систем та поляризаційних ефектів за допомогою програмного середовища Python. Результати моделювання представлені у вигляді графіків та таблиць. Висновки свідчать про те, що отримані результати можуть бути використані при розробці нових тепловізійних пристроїв з покращеними характеристиками. Виявлено, що врахування поляризаційних ефектів та оптимізація оптичних компонентів дозволяють підвищити роздільну здатність та чутливість тепловізорів. Перспективи подальших досліджень включають експериментальну перевірку отриманих моделей та розробку алгоритмів обробки зображень з врахуванням поляризаційних характеристик.

Ключові слова: поляриметричні тепловізори; оптичні системи; роздільна здатність; моделювання; Python.

Вступ. Постановка проблеми у загальному вигляді

Поляриметричні тепловізори дозволяють отримувати зображення об'єктів за рахунок вимірювання поляризаційних характеристик інфрачервоного випромінювання [1].

Це відкриває можливості для покращення контрастності та роздільної здатності зображень в умовах низької видимості. Проблема полягає в тому, що оптимізація оптичних систем таких тепловізорів є складним завданням через комплексність фізичних процесів, що вимагає додаткового аналізу та моделювання.

Аналіз досліджень та публікацій

У роботі [2] Колобродов В. Г. розглядає засто-

сування тепловізорів в системах виявлення та розпізнавання, підкреслюючи необхідність покращення їх оптичних характеристик. В [3] Холст Г. С. пропонує методи оцінки та розрахунку модуляційної передаточної функції (MTF) тепловізорів, що є ключовим параметром для оцінки їх роздільної здатності. Дослідження [4, с. 23; 5, с. 467; 6, с. 48] акцентують увагу на моделюванні оптичних систем з використанням сучасних методів та програмних засобів.

Формулювання мети статті

Метою роботи є: теоретичний аналіз оптичних систем поляриметричних тепловізорів та математичних моделей, що описують роботу таких систем, моделювання оптичних систем з використанням програмного середовища Python,

обґрунтування рекомендацій щодо оптимізації оптичних систем для покращення їхніх характеристик.

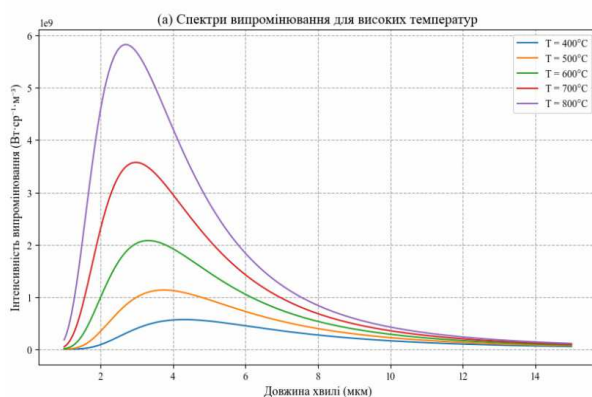
Виклад основного матеріалу

Ефективна робота поляриметричних тепловізорів залежить від низки фізичних явищ, що впливають на формування теплового зображення. Серед основних аспектів – енергетичні характеристики випромінювання, вплив атмосфери та поляризаційні ефекти.

У цьому розділі розглядаються відповідні теоретичні моделі та їх практичне значення для проєктування оптичних систем.

Енергетичні характеристики випромінювання

Закон Планка описує спектральну густину



енергетичної світимості абсолютно чорного тіла [4, с. 23; 7]:

$$M_{\lambda}(T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}, \quad (1)$$

де $M_{\lambda}(T)$ – спектральна густина енергетичної світимості при температурі T ,

h – стала Планка (6.626×10^{-34} Дж·с),

c – швидкість світла у вакуумі (3×10^8 м/с),

λ – довжина хвилі (м),

k – стала Больцмана (1.381×10^{-23} Дж/К).

Рисунок 1 ілюструє залежність спектральної густини енергетичної світимості від довжини хвилі для різних температур.

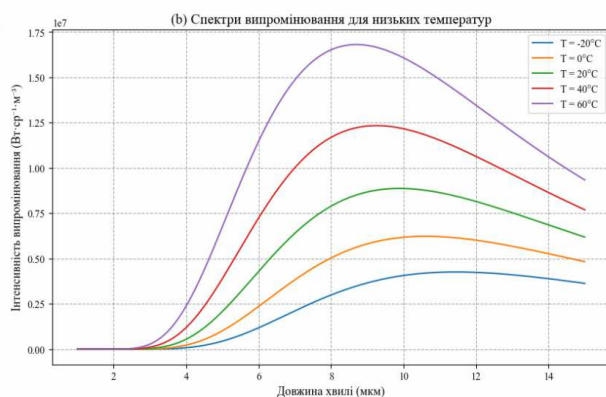


Рис. 1: (а) Спектри випромінювання абсолютно чорного тіла для високих температур (400°C – 800°C); (б) спектри для низьких температур (-20°C – 60°C). Графіки побудовано авторами за формулою Планка [4, с. 23].

Проходження інфрачервоного випромінювання через атмосферу

Ослаблення інфрачервоного випромінювання в атмосфері є важливим фактором, який впливає на дальність виявлення та роздільну здатність тепловізорів [8, с. 74; 9, с. 78].

Закон Бугера-Ламберта-Бера описує зниження інтенсивності випромінювання при його проходженні через атмосферу:

$$I = I_0 e^{-\tau}, \quad (2)$$

де I_0 – початкова інтенсивність випромінювання, I – інтенсивність після проходження атмосфери, τ – оптична товщина атмосфери.

Оптична товщина складається з коефіцієнтів поглинання $\alpha_{\text{пол}}$ та розсіювання $\alpha_{\text{роз}}$ [8, с. 78]:

$$\tau = \alpha_{\text{пол}} L + \alpha_{\text{роз}} L, \quad (3)$$

де L – довжина шляху в атмосфері.

Значення для оптичних систем

Розрахунок впливу атмосфери на інфрачервоне випромінювання дозволяє точніше моделювати передачу сигналу в оптичних системах тепловізорів. Це дозволяє оптимізувати спектральний діапазон роботи тепловізора та

обрати відповідні матеріали для оптичних елементів, які мінімізують поглинання та розсіювання [8, с. 80; 9, с. 82].

Моделювання оптичної системи

Оптична система поляриметричного тепловізора складається з наступних компонентів:

1. Objective – об'єктив, який формує зображення.
2. Imaging optics – оптична система формування зображення.
3. Polarization Filter/Diffractive Optic Array – елемент для розділення каналів поляризації.
4. FPA (Focal Plane Array) – матриця приймача.

Рисунок 2 ілюструє розділення апертури та поляриметричний аналіз через різні канали поляризації (0°, 45°, 90°, 135°) [1, с. 5459; 10 с. 52].

Ця схема містить ключові компоненти, характерні для поляриметричних тепловізорів. Розділення апертури дозволяє одночасно отримувати зображення у різних каналах поляризації, що впливає на швидкість та ефективність збору даних [1, с. 5459].

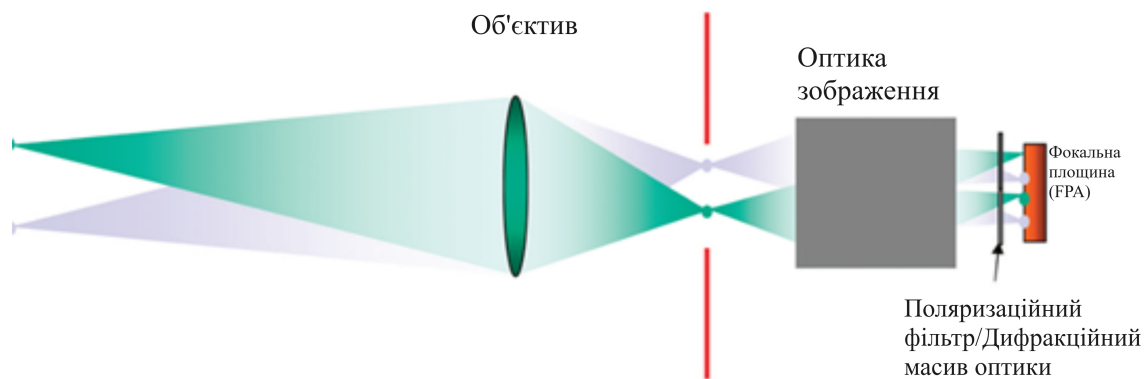


Рис. 2. Схема оптичної системи поляриметричного тепловізора (відтворено за [1]).

Таблиця 1 наводить розрахункові значення MRTD при різних просторових частотах.

Модуляційна передаточна функція (MTF)

MTF оптичної системи описує її здатність передавати контраст об'єкта на різних просторових частотах [3, с. 126]. Вона визначається як модуль нормованого перетворення Фур'є функції розсіювання точки (PSF):

$$MTF(f) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} PSF(x) e^{-2\pi i f x} dx \right|. \quad (4)$$

Моделювання в Python

Для моделювання оптичних систем та розрахунку модуляційної передаточної функції (MTF) можна використовувати стандартні бібліотеки програмного середовища Python та додаткові, такі як NumPy і SciPy [10, с. 380; 11, с. 56].

Було розраховано MTF оптичної системи при різних параметрах з використанням методики з [3, с. 127]. Рисунок 3 показує графік MTF оптичної системи, отриманий за результатами моделювання

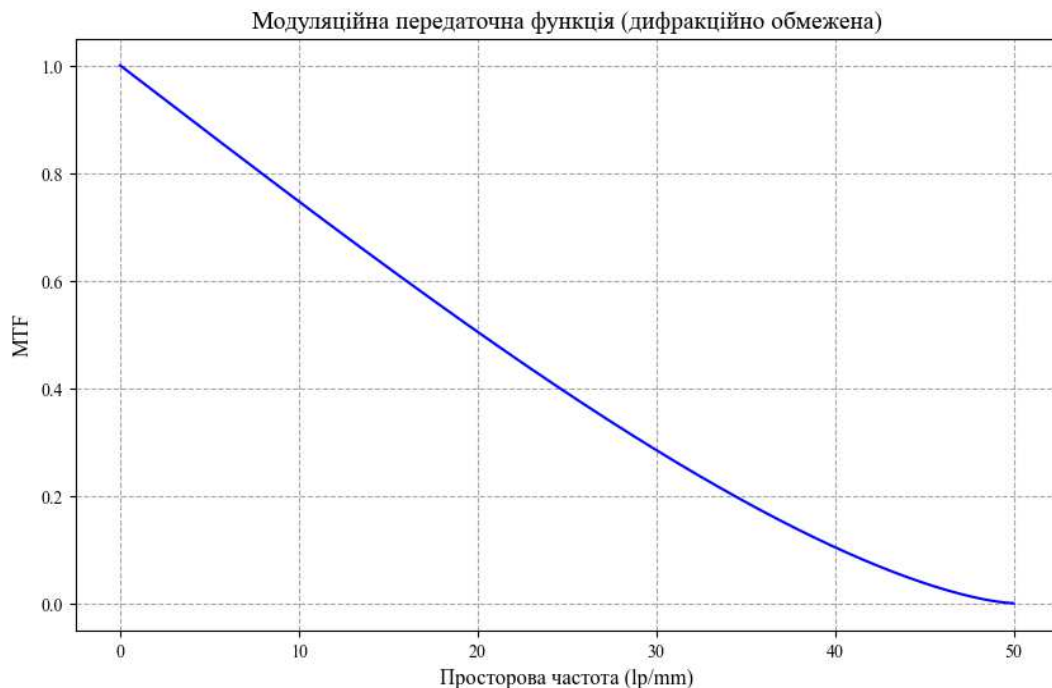


Рис. 3. Модуляційна передаточна функція оптичної системи (результат моделювання в Python).

Розрахунок мінімальної роздільної різниці температур (MRTD)

Мінімальна роздільна різниця температур (MRTD) є важливим параметром для оцінки чутливості та роздільної здатності тепловізора [2, с. 79]. Вона визначає мінімальну різницю температур

між об'єктом і фоном, за якої об'єкт ще можна розрізнити на зображенні. Формула для розрахунку MRTD:

$$MRTD(f) = \frac{NEDT}{MTF(f)}, \quad (5)$$

де $NEDT$ – еквівалентна шуму різниця температур [2, с. 80];

$MTF(f)$ – модуляційна передаточна функція при просторовій частоті f .

Обговорення результатів

З графіка (рис. 3) видно, що MTF зменшується з підвищенням просторової частоти, що відповідає зниженню контрастності для дрібних деталей. Цей

результат узгоджується з теорією дифракційних обмежень оптичних систем [5, с. 467; 10, с. 385].

З таблиці видно, що зі збільшенням просторової частоти значення $MRTD$ зростає. Це означає, що для більш високих просторових частот (тобто для дрібніших деталей) тепловізору потрібно більша різниця температур між об'єктом і фоном, щоб об'єкт був розпізнаний. Це пов'язано з тим, що MTF зменшується при підвищенні просторової частоти, як було продемонстровано в попередньому розділі статті.

Таблиця 1. Розрахунок $MRTD$ при різних просторових частотах (розраховано за методикою з [2, с. 156]).

Просторова частота (lp/mm)	MTF	NEDT (K)	MRTD (K)
10	0.95	0.05	0.0526
20	0.85	0.05	0.0588
30	0.75	0.05	0.0667
40	0.60	0.05	0.0833
50	0.45	0.05	0.1111
60	0.30	0.05	0.1667
70	0.15	0.05	0.3333

Поляризаційні ефекти

Поляризаційний стан електромагнітної хвилі описується параметрами Стокса (I, Q, U, V) [12, с. 65-66]. Ступінь лінійної поляризації P визначається як:

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}, \quad (6)$$

де I – повна інтенсивність випромінювання; Q – різниця між інтенсивностями горизонтальної (0°) та вертикальної (90°) поляризації; U – різниця між інтенсивностями поляризації під кутами 45° та 135° .

При відбитті випромінювання від поверхні виникає часткова поляризація, яка залежить від кута падіння та оптичних властивостей середовищ.

При відбитті електромагнітного випромінювання від межі поділу двох середовищ з різними показниками заломлення n_1 і n_2 , виникають часткові поляризаційні ефекти. Рівняння Френеля описують залежність коефіцієнтів інтенсивності відбиття від кута падіння та поляризації світла [5, с. 40; 13, с. 17]:

- для паралельної компоненти (p -поляризація):

$$r_{\parallel} = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t}, \quad (7)$$

- для перпендикулярної компоненти (s -поляризація):

$$r_{\perp} = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}, \quad (8)$$

де $r_{\parallel}$, $r_{\perp}$ – коефіцієнти відбиття для паралельної та перпендикулярної компонент,

n_1 , n_2 – показники заломлення середовищ,

θ_i – кут падіння,

θ_t – кут заломлення, який визначається за законом Снеліуса [5, с. 31; 14, с. 418]:

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t.$$

Результати моделювання

Для візуалізації залежності інтенсивності відбиття від кута падіння було використано Python. Розрахунки проводилися для переходу світла з повітря ($n_1=1.0$) в скло ($n_2=1.5$) [14, с. 396].

Рисунок 4 демонструє залежність інтенсивності відбитого світла від кута падіння для різних компонент поляризації. З графіка видно, що при куті Брюстера θ_B ($\sim 56^\circ 40'$) коефіцієнт відбиття паралельної компоненти $r_{\parallel}$ дорівнює нулю [10, с. 102]:

$$\theta_B = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right).$$

Це означає, що при цьому куті відбите світло повністю s -поляризоване перпендикулярно до площини падіння.

Перпендикулярна компонента $r_{\perp}$ зростає зі збільшенням кута падіння і досягає максимального значення при $\theta_i = 90^\circ$.

У поляриметричних тепловізорах ці поляризаційні ефекти використовуються для отримання додаткової інформації про об'єкт спостереження. Наприклад, це допомагає:

- підвищувати контрастність зображень;
- виявляти приховані об'єкти;

- аналізувати властивості об'єктів, такі як текстура або склад матеріалу, або розрізняти матеріали з різними оптичними властивостями.

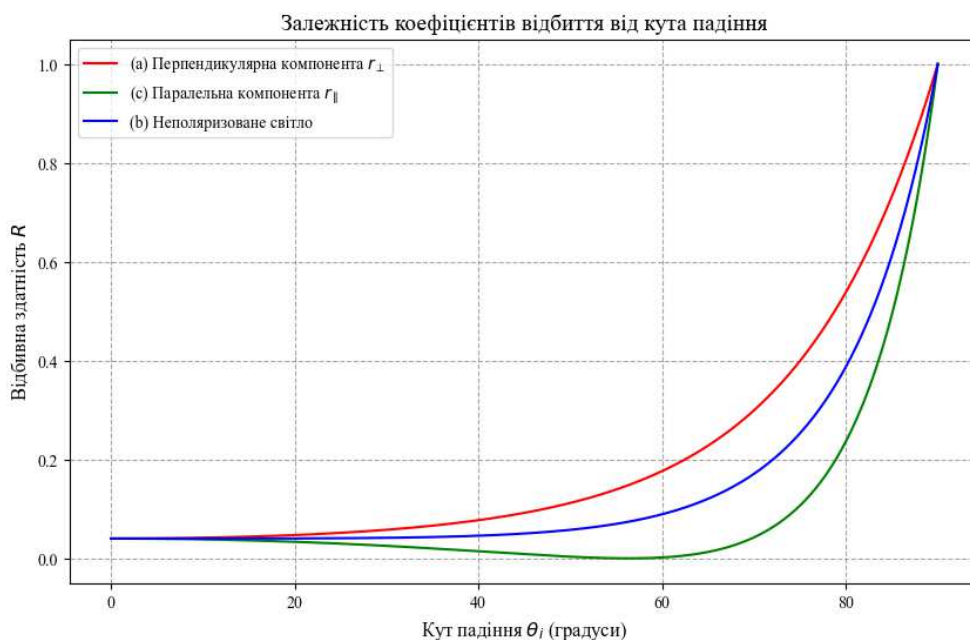


Рис. 4. Залежність коефіцієнтів відбиття від кута падіння для перпендикулярної $r_{\perp}$, паралельної $r_{\parallel}$ компонент та

неполаризованого світла $r_{\text{середнє}} = \frac{r_{\perp} + r_{\parallel}}{2}$ (побудовано авторами на основі рівнянь Френеля [5, с. 40]).

Висновки та майбутні напрямки розвитку

У цій роботі проведено аналіз оптичних систем поляриметричних тепловізорів, зосереджений на їхній роздільній здатності та чутливості. У рамках роботи представлено математичні моделі для оцінки модуляційної передаточної функції (MTF) та мінімальної роздільної різниці температур (MRTD). Ці параметри є основними характеристиками чутливості й роздільної здатності тепловізійних систем. Крім того, проаналізовано поляризаційні ефекти на основі рівнянь Френеля, які можуть сприяти підвищенню контрастності зображень.

Для підтвердження теоретичних результатів було виконано чисельне моделювання в середовищі Python. Моделювання дозволило побудувати графіки залежностей MTF та коефіцієнтів відбиття від кута падіння, що дає можливість візуалізувати вплив різних параметрів на роботу оптичної системи. Встановлено, що зниження MTF на високих просторових частотах обмежує роздільну здатність, що підкреслює необхідність оптимізації оптичних компонентів.

Перспективними напрямками подальших досліджень є розробка алгоритмів обробки зображень з врахуванням поляризаційних ефектів та вивчення впливу атмосферних умов на роботу тепловізорів. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на експериментальну перевірку представлених моделей та інтеграцію їх у програмне забезпечення для проектування оптичних систем.

Література

- [1] J. S. Tyo, D. L. Goldstein, D. B. Chenault, & J. A. Shaw, "Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications", *Applied Optics*, vol. 45, no. 22, pp. 5453–5469, 2006. [Online]. Available: https://www.montana.edu/jshaw/documents/PassiveImagingPolRS_Review_AO2006Aug.pdf Дата звернення: 22.11.2024.
- [2] В. Г. Колобродов, М. М. Луцюк, В. М. Тягун, "Метод розрахунку мінімальної сприйманої різниці температур субдискретних тепловізорів", *Наукові вісті КПІ*, № 2(124), с. 78–82, 2019. DOI: 10.20535/kpi-sn.2019.2.167793
- [3] G. C. Holst, *Common Sense Approach to Thermal Imaging*. JCD Publishing, 2000. [Online]. Available: <https://www.scribd.com/doc/137733055/Common-sense-approach-to-thermal-imaging-pdf> Дата звернення: 22.11.2024.
- [4] M. Vollmer, & K.-P. Möllmann, *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*. Wiley-VCH, 2010. [Online]. Available: https://application.wiley-vch.de/books/sample/3527413510_c01.pdf
- [5] M. Born, & E. Wolf, *Principles of Optics* (7th ed.). Cambridge University Press, 1999. [Online]. Available: http://cdn.preterhuman.net/texts/science_and_technology/physics/Optics/Principles%20of%20Optics%20-%20M.Born.%20E.%20Wolf.pdf

- [6] Dereniak, E. L., & Boreman, G. D. *Infrared Detectors and Systems*. Wiley-Interscience, 1996. 561 pages.
- [7] J. R. Schott, *Remote Sensing: The Image Chain Approach* (2nd ed.). Oxford University Press, 2007. DOI: 10.1093/oso/9780195178173.001.0001
Дата звернення: 04.12.2024.
- [8] K. N. Liou, *An Introduction to Atmospheric Radiation* (2nd ed.). Academic Press, 2002. [Online]. Available: <https://books.google.com.ua/books?id=mQ1DiDpX34UC> Дата звернення: 22.11.2024.
- [9] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics* (3rd ed.). Roberts and Company Publishers, 2005. [Online]. Available: https://books.google.com.ua/books?id=ow5xs_Rtt9AC Дата звернення: 04.12.2024.
- [10] E. Collett, *Field Guide to Polarization*. SPIE Press, 2005. [Online]. Available: <https://www.scribd.com/document/502288891/Field-Guide-to-Polarization>
- [11] Scientific Python Lectures. [Online]. Available: <https://lectures.scientific-python.org/downloads/ScientificPythonLectures-simple.pdf> Дата звернення: 22.11.2024.
- [12] D. H. Goldstein, *Polarized Light* (2nd ed.). Marcel Dekker, 2003. [Online]. Available: <https://books.google.com.ua/books?id=aWX5jj603PoC> Дата звернення: 22.11.2024.
- [13] J. E. Greivenkamp, *Field Guide to Geometrical Optics*. SPIE Press, 2004. [Online]. Available: <https://www.scribd.com/document/381220319/Field-Guide-to-Geometrical-Optics> Дата звернення: 04.12.2024.
- [14] E. Hecht, *Optics* (5th ed.). Pearson, 2017. [Online]. Available: <https://books.google.com.ua/books?id=BhDCDwAAQBAJ>

UDC 621.384.3

Holyk V.O., Kolobrodov V.H.*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine***ANALYSIS OF OPTICAL SYSTEMS OF POLARIMETRIC THERMAL IMAGERS**

Polarimetric thermal imagers are essential tools in modern detection and observation systems, enabling the acquisition of object images by measuring the polarization characteristics of infrared radiation. This opens new opportunities for improving image contrast and resolution under low-visibility conditions. The problem lies in the fact that optimizing the optical systems of such thermal imagers remains a challenging task due to the complexity of the physical processes involved, necessitating additional analysis and modelling. A review of recent studies and publications shows that numerous works are dedicated to the application of thermal imagers in detection and recognition systems, as well as to methods for assessing their resolution. In particular, V. H. Kolobrodov emphasizes the need for improving the optical characteristics of thermal imagers, while G. C. Holst proposes methods for calculating the modulation transfer function (MTF). Some studies focus on modelling optical systems using modern software tools. However, the issue of optimizing the optical systems of polarimetric thermal imagers remains relevant.

The aim of this work is to conduct a theoretical analysis of optical systems of polarimetric thermal imagers, analyse mathematical models describing the operation of such systems, perform modelling of optical systems using the Python programming environment, and provide recommendations for optimizing optical systems to enhance their characteristics. The results include an examination of the energetic and spatial characteristics of object and background radiation, as well as the transmission of infrared radiation through the atmosphere. Mathematical models describing the operation of optical systems are presented, including formulas for calculating the MTF and the minimum resolvable temperature difference (MRTD). Modelling of optical systems and polarization effects was performed using the Python programming environment. The modelling results are presented in the form of graphs and tables. The conclusions indicate that the obtained results can be used in the development of new thermal imaging devices with improved characteristics. It has been determined that accounting for polarization effects and optimizing optical components can enhance the resolution and sensitivity of thermal imagers. Prospects for further research include experimental verification of the proposed models and the development of image processing algorithms that incorporate polarization characteristics.

Keywords: polarimetric thermal imagers; optical systems; resolution; modelling; Python.

*Надійшла до редакції
05 грудня 2024 року*

*Рецензовано
25 березня 2025 року*



© 2025 Copyright for this paper by its authors.
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).