

УДК 621.384.3

Метод визначення ймовірності розпізнавання об'єктів спостереження поляриметричним тепловізором

Колобродов В. Г.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна

E-mail: thermo@ukr.net

Тепловізійні системи спостереження є одним із важливих засобів підвищення ефективності охоронних систем і військових систем спостереження за цілями, так як вони здатні пасивно працювати вдень і вночі, за несприятливих погодних умов спостереження. В багатьох випадках за низького контрасту фоново-цільової обстановки виявити ціль, а тим більше її розпізнати, достатньо складно. Для підвищення ймовірності розпізнавання цілі, а також для зменшення помилкової тривоги, розпочали активно проводити дослідження і розробляти тепловізори, в яких носієм інформації є поляризаційні властивості випромінювання цілі і фону. Метою статті є розробка нового методу визначення ймовірності розпізнавання об'єктів спостереження поляриметричним тепловізором (ПТ), дослідження якого дозволить значно розширити практичне застосування таких тепловізорів. Розроблена фізико-математична модель ПТ і алгоритм отримання поляриметричних зображень за допомогою параметрів Стокса. Встановлена залежність ймовірності розпізнавання цілі P_r від ступеня поляризації P випромінювання цілі, яка розташована на природньому фоні. Розглянуто приклад розрахунку ймовірності виявлення цілі ПТ, який свідчить про те, що ймовірність розпізнавання цілі істотно залежить від ступеня поляризації її випромінювання, за умови, що вона знаходиться на фоні, що має неполяризоване випромінювання. Наприклад, ймовірність розпізнавання дорівнює $P_r = 50\%$, коли ступінь поляризації випромінювання цілі $P = 9\%$. Якщо $P = 16\%$, то $P_r = 90\%$. У випадку відсутності контрасту між природніми випромінюваннями цілі і фону відношення сигнал/шум на виході ПТ буде дорівнювати 1.8, а ймовірність розпізнавання – $P_r = 90\%$. Така особливість роботи ПТ значно підвищує ефективність його застосування.

Ключові слова: поляриметричний тепловізор; ймовірність розпізнавання цілі; відношення сигнал/шум

DOI: [10.20535/RADAP.2022.90.37-41](https://doi.org/10.20535/RADAP.2022.90.37-41)

Вступ

З початку двадцять першого століття тепловізори знайшли широке застосування в різних галузях науки, техніки і промисловості [1–3]. Тепловізійні системи спостереження (ТПСС) є одним із важливих засобів підвищення ефективності охоронних систем і військових систем спостереження за цілями, так як вони здатні пасивно працювати вдень і вночі, за несприятливих погодних умов спостереження. Класичні тепловізори сприймають контраст яскравості (інтенсивності) об'єкта спостереження, що розташований на фоні, і дають можливість вимірювати розподіл температури на поверхні об'єкта. За низького контрасту фоново-цільової обстановки виявити ціль, а тим більше її розпізнати, достатньо складно. Для підвищення ймовірності виявлення і розпізнавання цілі, а також для зменшення помилкової тривоги, розпочали активно проводити дослідження і розробляти тепловізори, в яких носієм інформації

є поляризаційні властивості випромінювання цілі і фону (завад) [4–6].

Однією із головних узагальнених характеристик ТПСС, які визначають ефективність його застосування, є ймовірність розпізнавання об'єкта спостереження (цілі). Розробці і дослідженню методів розрахунку цієї ймовірності для класичних тепловізорів присвячено значну кількість монографій і статей [7–10]. В той же час застосування поляриметричних тепловізорів (ПТ) для розпізнавання цілей знаходиться на початковій стадії, що обумовлено складними фізичними процесами формування і цифрової обробки поляриметричних зображень [11–13].

1 Постановка задачі

Метою статті є розробка нового методу визначення ймовірності розпізнавання об'єктів спостереже-

ння поляриметричним тепловізором, дослідження якого дозволить значно розширити практичне застосування таких тепловізорів.

2 Принципи формування поляризаційного зображення

Поляризаційні характеристики випромінювання, що змінюються під час розповсюдження і відбивання, можна виразити вектором Стокса, вектором Джонса або матрицею Мюллера [14–16]. Вектор Стокса був запропонований для дослідження частково поляризованого, а також для неполяризованого і повністю поляризованого світла. Чотири параметри вектору Стокса $\vec{S} = \{S_0, S_1, S_2, S_3\}$ описують інформацію про стан поляризації випромінювання цілі. Найбільшого розповсюдження отримав метод чотирьох сегментацій модуляції детектора поляризаційним станом випромінювання для вимірювання параметрів вектору Стокса [12, 17, 18].

На Рис. 1 зображена схема, яка пояснює принцип роботи ПТ. Досліджуване частково поляризоване випромінювання з амплітудою \vec{E}_{pp} проходить через поляризатор, четверть хвильову пластину, які можуть змінювати кут поляризації θ і різницю фаз ε між складовими E_x і E_y вектору \vec{E}_{lp} за допомогою механічного обертання, або неперервної періодичної модуляції. Матричний приймач випромінювання (МПВ) формує групу значень інтенсивності вихідного випромінювання $I(\theta, \varepsilon)$, які використовують для отримання чотирьох параметрів вектору Стокса поляризаційного зображення шляхом зміни кутів θ і ε .

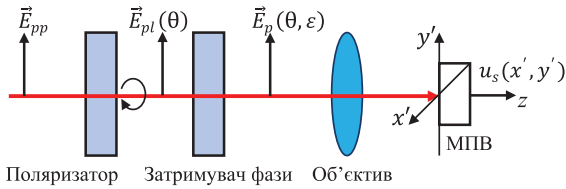


Рис. 1. Оптико-електронна схема поляриметричного тепловізора

Вектори Стокса дозволяють отримати основні параметри поляризації випромінювання: інтенсивність, ступінь поляризації, кут поляризації і еліптичність поляризації. Параметри вектору Стокса, які залежать від кутів $\{\theta, \varepsilon\}$, визначаються рівняннями:

$$S_0 = I_x + I_y = I(0^\circ, 0) + I(90^\circ, 0); \quad (1)$$

$$S_1 = I_x - I_y = I(0^\circ, 0) - I(90^\circ, 0); \quad (2)$$

$$S_2 = 2\sqrt{I_x I_y} \cos \delta = I(45^\circ, 0) - I(135^\circ, 0); \quad (3)$$

$$S_3 = 2\sqrt{I_x I_y} \sin \delta = I(45^\circ, \pi/2) - I(135^\circ, \pi/2). \quad (4)$$

В більшості випадків циркулярно поляризована компонента у випромінненні фоново-цільової обстановки (ФЦО) достатньо мала і тому складова вектору Стокса $S_3 \approx 0$ [15]. Тому будемо розглядати ступінь лінійної поляризації DLP для такого випадку:

$$P = DLP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0}. \quad (5)$$

3 Алгоритм отримання поляриметричних зображень за допомогою параметрів Стокса

Процес обробки відеосигналів МПВ поляриметричного тепловізора можна представити в такій послідовності [12, 19]:

1. Запис інтенсивності (відеосигналу) поляриметричного зображення для кутів поляризації $\chi = 0^\circ, 90^\circ, 45^\circ$. Використовуючи рівняння поляризаційного еліпса, складаємо систему трьох рівнянь для розрахунку параметрів вектору Стокса S_0, S_1, S_2 .

2. Розрахунок лінійно поляризованої і природної компонент випромінювання від цілі за формулами

$$I_{t,p} = \sqrt{S_1^2 + S_2^2} \quad \text{і} \quad I_{t,n} = S_0 - \sqrt{S_1^2 + S_2^2}. \quad (6)$$

3. Розрахунок лінійно поляризованої і природної компонент випромінювання від цілі для напрямку поляризації $\bar{\chi}_p - 90^\circ$, де $\bar{\chi}_p$ – середнє значення кута поляризації.

4. Розрахунок лінійно поляризованої компоненти випромінювання від цілі шляхом віднімання природної компоненти поляризації $I_n(\bar{\chi}_p - 90^\circ) = \frac{1}{2}I_n$ із компонента змінної поляризації $I(\bar{\chi}_p - 90^\circ)$. При цьому лінійно поляризована компонента $I_{p,t}$ від цілі залишається незмінною.

5. Розрахунок відношення сигнал/шум $SNR = I_{p,t}/I_{tp}$, де I_{tp} – інтенсивність, еквівалента шуму МПВ. Це відношення визначає ймовірність виявлення цілі на фоні шумів МПВ.

4 Ймовірності виявлення і розпізнавання поляриметричних зображень об'єктів

Величина відношення сигнал/шум SNR_E , що сприймає оператор, визначає ймовірність розпізнавання зображення об'єкта P_r , яка може бути розрахована за формулою [20]

$$P_r = \frac{(SNR_E)^k}{1 + (SNR_E)^k}, \quad (7)$$

де $k = 2, 7 + 0, 7SNR_E$.

Ефективність роботи поляриметричного тепловізора можна оцінити двома параметрами [19]:

1. Контрастом цілі у вихідному зображенні

$$C = \frac{u_t - u_b}{u_t + u_b}, \quad (8)$$

де $u_t \sim I_{p,t}(\bar{\chi}_p - 90^\circ)$ – електричний відеосигнал, сформований цільовим пікселем; $u_b \sim I_{t,n}(\bar{\chi}_p - 90^\circ) - I_{b,n}(\bar{\chi}_p - 90^\circ)$ – різниця електричних відеосигналів, сформованих цільовим і фоновим пікселями.

2. Відношенням сигнал/шум в поляризаційному зображенні ФЦО

$$SNR = \frac{u_t - u_b}{\sigma_b}, \quad (9)$$

де σ_b – середньоквадратичне значення флуктуацій сигналу від фонових пікселів.

Таким чином, використовуючи систему рівнянь (9) і (7) можна визначити ймовірність розпізнавання об'єкта (цілі).

5 Приклад розрахунку

Розглянемо частково поляризоване випромінювання цілі, яке має такі параметри: інтенсивність I_0 , ступінь поляризації P , кут поляризації ψ , кут еліптичності χ (Рис. 2). Ці параметри визначаються параметрами вектора Стокса (1)–(4):

$$\begin{aligned} I_0 &= S_0; \quad P = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0}; \\ \psi &= \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{S_2}{S_1} \right); \quad \chi = \pm \tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \right). \end{aligned} \quad (10)$$

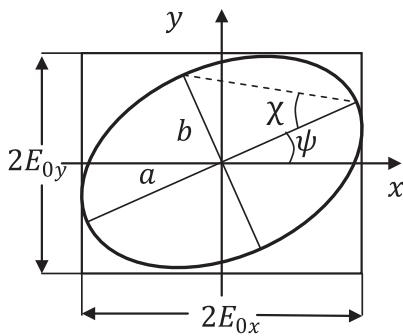


Рис. 2. Поляризаційний еліпс

Розташуємо ПТ так, щоб кут поляризації ψ дорівнював нулю. Тоді із формули (10) для $\psi = 0$ маємо $S_2 = 0$, а формули (10) матимуть вигляд:

$$\begin{aligned} I_0 &= S_0; \quad P = \frac{S_1}{S_0}; \\ \chi &= \pm \tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

Визначимо сигнал на виході МПВ, який утворений частково поляризованим випромінюванням цілі, що має параметри (10):

$$u_t \sim I_{p,t}(P) = |I_{p,t}(0)| = I_{p,t}(0^\circ, 0) = I_{0tp} \quad (12)$$

для середнього значення кута поляризації $\bar{\chi}_p = \psi = 0$.

Для неполяризованої складової випромінювання цілі маємо $I_{t,n}(90^\circ) = \frac{1}{2} I_{0tn}$. Якщо випромінювання фону неполяризоване, то $I_{b,n}(90^\circ) = \frac{1}{2} I_{0bn}$. Тоді електричний відеосигнал, сформований різницею інтенсивності між цільовим і фоновим пікселями буде дорівнювати

$$u_b \sim I_{t,n}(90^\circ) - I_{b,n}(90^\circ) = \frac{1}{2} |I_{0tn} - I_{0bn}|. \quad (13)$$

Підставимо (12) і (13) до (9)

$$SNR = \frac{1}{\sigma_b} \left[I_{0tp} - \frac{1}{2} |I_{0tn} - I_{0bn}| \right]. \quad (14)$$

Встановимо зв'язок між інтенсивністю лінійно поляризованої складової частково поляризованого випромінювання від цілі і ступенем його поляризації, використовуючи співвідношення [14–16]

$$P = \frac{I_{0tp}}{I_{0tp} + I_{0tn}}, \quad (15)$$

де $I_{0tp} + I_{0tn} = I_0$ – загальна інтенсивність частково поляризованого випромінювання.

Із формули (15) маємо:

$$I_{0tp} = I_0 P \quad \text{і} \quad I_{0tn} = I_0(1 - P). \quad (16)$$

Тоді відношення сигнал/шум (14) на виході ПТ буде визначатись співвідношенням

$$\begin{aligned} SNR_E &= \frac{1}{\sigma_b} [I_0 P - 0,5 |I_0(1 - P) - I_{0bn}|] = \\ &= \frac{I_0}{\sigma_b} \left[P - 0,5 \left| 1 - P - \frac{I_{0bn}}{I_0} \right| \right], \end{aligned} \quad (17)$$

де σ_b – середньоквадратичне значення флуктуацій сигналу від фонових пікселів.

На Рис. 3 наведено графік залежності відношення сигнал/шум на виході ПТ від ступеня поляризації випромінювання цілі за умов:

- Неполяризована складова випромінювання цілі $I_{0tn} = 0,5 I_0(1 - P)$.
- Неполяризована складова випромінювання фону $I_{0bn} = 0,99 I_0$.
- Середньоквадратичне значення флуктуацій сигналу від фонових пікселів $\sigma_b = 0,05 I_0$ [21].

Після підстановки наведених умов до рівняння (17) маємо:

$$SNR_E = 20(1,5P + 0,005). \quad (18)$$

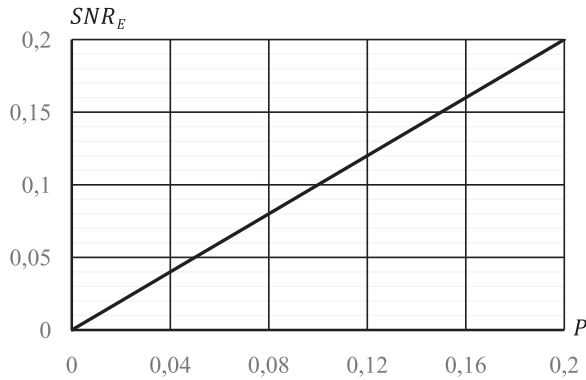


Рис. 3. Залежність відношення сигнал/шум SNR_E на виході поляриметричного тепловізора від ступеня поляризації випромінювання від цілі за умов (18)

Аналіз функцій (17) і (14) дозволяє зробити такі висновки:

1. Відношення сигнал/шум SNR_E залежить від ступеня поляризації випромінювання цілі і фону.

2. Відношення сигнал/шум SNR_E лінійно зростає із збільшенням ступеня поляризації випромінювання цілі і досягає максимального значення, якщо неполяризована складова випромінювання від цілі I_{0tn} дорівнює інтенсивності неполяризованого випромінювання фону I_{0bn} .

3. Якщо в ПТ використовується високоякісна мікроболометрична матриця з малим значенням середньоквадратичних флуктуацій сигналу від пікселів, то відношення сигнал/шум SNR_E також збільшується.

За цих умов із системи рівнянь (17) і (7) отримуємо залежність ймовірності розпізнавання від ступеня поляризації випромінювання від цілі, яка наведена на Рис. 4.

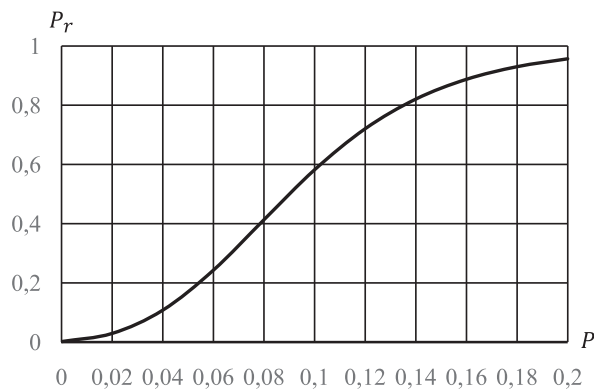


Рис. 4. Залежність ймовірності розпізнавання цілі P_r від ступеня поляризації P випромінювання цілі, яка розташована на природньому фоні

Висновки

Аналіз отриманих результатів свідчить про таке:

1. Ймовірність розпізнавання цілі істотно залежить від ступеня поляризації випромінювання цілі, за умови, що вона знаходиться на фоні, що має неполяризоване випромінювання. Наприклад, ймовірність розпізнавання дорівнює $P_r = 50\%$, коли ступінь поляризації випромінювання цілі $P = 9\%$. Якщо $P = 16\%$, то $P_r = 90\%$.

2. Із формули (14) видно, що у випадку відсутності контрасту між природніми випромінюванням цілі і фону, тобто коли $I_{0tn} = I_{0bn}$, відношення сигнал/шум на виході ПТ буде дорівнювати $SNR_E = 1,8$, а ймовірність розпізнавання – $P_r = 90\%$. Така особливість роботи ПТ значно підвищує ефективність його застосування.

3. Подальший розвиток досліджень слід спрямувати на розробку фізико-математичної моделі поляриметричного тепловізора, яка враховує ступінь поляризації випромінювання фону.

References

- [1] Vollmer M., Mollman K.-P. (2018). *Infrared Thermal Imaging. Fundamentals, Research and Applications. Second Edition*. WileyVCH: Weinheim, Germany, 788 p. ISBN: 978-3-527-41351-5.
- [2] Diakides M., Bronzino J. D., Peterson D. R. (2013). *Medical Infrared Imaging*. Taylor & Francis Group, 620 p. doi:10.1201/b12938.
- [3] Snik F., Craven-Jones J., Escuti M., et al. (2014). An overview of polarimetric sensing techniques and technology with applications to different research fields. *Proc. SPIE 9099, Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing XI*, 90990B. doi: 10.1117/12.2053245.
- [4] Zhao Y., Yi C., Kong S. G., Pan Q., Cheng Y. (2016). *Multi-band Polarization Imaging and Applications*. National Defense Industry Press, Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 194 p. DOI: 10.1007/978-3-662-49373-1.
- [5] Yang B., Wu T., Chen W., Li Y., Knjazihhin J., Asundi A., and Yan L. (2017). Polarization Remote Sensing Physical Mechanism, Key Methods and Application. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Wuhan, China, Vol. XLII-2/W7, pp. 955-960. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W7-955-2017.
- [6] Pye D. (2001). *Polarised Light in Science and Nature*. IOP Publishing Ltd, USA, 124 p.
- [7] Stanag 4347:0. Definition of nominal static range performance for thermal imaging systems (1995). *NATO*.
- [8] Kolobrodov V. G., Lykholit M. I. (2007). *Design of thermal imaging and television surveillance systems [Proektuvannya teploviziynykh i televiziynykh system sposterezhennya]*. K.: NTUU «KPI», 364 p. ISBN 966-622-230-2. [In Ukrainian].
- [9] Driggers R. G., Friedman M. H., Devitt J. W., Furxhi O., Singh A. (2022). *Introduction to Infrared and Electro-Optical Systems*, Third Edition, Artech House, 712 p. ISBN-13: 978-1-63081-832-6.

- [10] Chrzanowski K. (2010). *Testing thermal imagers. Practical guidebook*. Military University of Technology, 00-908 Warsaw, Poland, 164 p. ISBN: 978-83-61486-81-7.
- [11] Kolobrodov V. G., Mykytenko V. I., Pinchuk B. Yu., Sokol B. V., Tiagur V. M. (2021). Computer-Integrated Method of Object Detection by Thermal Polarimetric Imager. *Visnyk NTUU KPI Seriya - Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*, Vol. 85, pp. 21-26. doi: 10.20535/RADAP.2021.85.21-26. [In Ukrainian].
- [12] Karpenko I. V., Kolobrodov V. G., Sokol B. V. (2018). Polarization method of detecting the thermal contrast target against the background of interference. *Scientific Journal Herald of Khmelnytskyi national university. Technical sciences*, Iss. 1, Vol. 257, pp. 33-37. ISSN 2307-5732. [In Ukrainian].
- [13] Lin, S. Z., Wang, D. J., Zhu, X. H., Zhang, S. (2015). Fusion of infrared intensity and polarization images using embedded multi-scale transform. *Optik*, Vol. 126, Iss. 24, pp. 5127-5133. doi:10.1016/j.ijleo.2015.09.154.
- [14] Born M., Wolf E. (1999). *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*, 7th edn. Press, Cambridge: Cambridge University, 950 p. DOI: 10.1017/CBO9781139644181.
- [15] Liao Y. B. (2003). *Polarization optics*. Science Press, Beijing.
- [16] Goldstein D. H. (2011). *Polarized Light. Third edition*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 786 p.
- [17] Gurton K. P., Yuffa A. J., Videen G. W. (2014). Enhanced facial recognition for thermal imagery using polarimetric imaging. *Optics Letters*, Vol. 39, Iss. 13, pp. 3857-3859. doi: 10.1364/OL.39.003857.
- [18] Zhang Y., Shi Z. G., Qiu T. W. (2017). Infrared small target detection method based on decomposition of polarization information. *Journal of Electronic Imaging*, Vol. 26(3), 033004. doi: 10.1117/1.JEI.26.3.033004.
- [19] Yang, F., Wei, H. (2013). Fusion of infrared polarization and intensity images using support value transform and fuzzy combination rules. *Infrared Physics & Technology*, Vol. 60, pp. 235-243. doi: 10.1016/j.infrared.2013.05.008.
- [20] Melamed, R., Yitzhaky, Y., Kopeika, N. S., & Rotman, S. R. (1998). Experimental comparison of three target acquisition models. *Optical Engineering*, Vol. 37, No. 7, pp. 1902-1913. doi: 10.1117/1.602029.
- [21] Zhang J.-H., Zhang Y., Shi Z.-G. (2018). Enhancement of dim targets in a sea background based on long-wave infrared polarization features. *IET Image Process*, Vol. 12, Iss. 11, pp. 2042-2050. doi: 10.1049/iet-ipr.2018.5607.

Method of Determining the Recognition Probability of Objects Observed by Polarimetric Thermal Imaging

Kolobrodov V. G.

Thermal imaging observation systems are one of the important means of increasing the efficiency of security systems and military target observation systems, as they are able to work passively day and night, under adverse weather conditions of observation. In many cases, it is quite difficult to detect the target, and even more so to recognize it, with low background-target contrast. To increase the probability of target recognition, as well as to reduce false alarms, they began to actively conduct research and develop thermal imagers, in which the carrier of information is the polarization properties of target and background radiation.

The purpose of the article is to develop a new method for determining the probability of recognition of observation objects by a polarimetric thermal imager (PTI), the research of which will allow to significantly expand the practical application of such thermal imagers.

The mathematical model of PTI and an algorithm for obtaining polarimetric images using Stokes parameters have been developed. The dependence of the target recognition probability P_r on the degree of polarization P of the radiation of the target, which is located on the natural background, is established. An example of calculating the probability of detection target by PTI is considered, which indicates that the probability of target recognition depends significantly on the degree of polarization of its radiation, provided that it is located on a background with unpolarized radiation.

For example, the probability of recognition is $P_r = 50\%$, when the degree of polarization of target radiation is $P = 9\%$. If $P = 16\%$, then $P_r = 90\%$. If there is no contrast between the natural radiation of the target and the background, the signal-to-noise ratio at the PTI output will be 1.8, and the probability of recognition will be $P_r = 90\%$. This feature of PTI operation significantly increases the efficiency of its use.

Keywords: polarimetric thermal imager; probability of target recognition; signal/noise ratio