УДК 537.32

Колобродов В.Г., *докт. техн. наук, професор*
Тимчик Г.С., *докт. техн. наук, професор*
Микитенко В.І., *докт. техн. наук, доцент*
Колобродов М.С.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна
e-mail: deanpb@kpi.ua

ТЕСТ-ОБ'ЄКТ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИМІРЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЯРИЗАЦІЙНИХ ТЕПЛОВІЗОРІВ

Зростаюча популярність підвищення ефективності дистанційних спостережень за рахунок аналізу ступеню поляризації оптичного випромінювання в інфрачервоному діапазоні спектру вимагає розроблення теоретичних і практичних методів визначення характеристик нового класу оптико-електронних приладів – поляризаційних тепловізорів. На відміну від розрахункових методів питання практичної реалізації вимірювальних стендів наразі опрацьовані недостатньо. В даній статті запропоновано і проаналізовано варіанти структури тест-об'єктів для експериментальних досліджень поляризаційних тепловізорів. Розглянуто металеву пластину, що може нахилятись відносно лінії візування, а також сферичну металеву поверхню, яка не потребує додаткових механічних приводів. В першому випадку ступінь поляризації, еліптичність і поляризаційний кут варіюються шляхом зміни її кутової орієнтації у вертикальній і горизонтальній площині. Сферична поверхня формує фотометричне тіло, в якому випромінювання концентричних зон має певну постійну ступінь поляризації. Такі тест-об'єкти забезпечують вимірювання еквівалентної шуму різниці температур і мінімальної роздільної різниці температур поляризаційних тепловізорів для різних станів поляризації вхідного випромінювання, яке характеризується інтенсивністю, ступенем поляризації, еліптичністю і поляризаційним кутом. Бібл. 17, рис. 9.

Ключові слова: поляризаційний тепловізор, тест-об'єкт, просторове розділення, температурне розділення, вимірювальний стенд

Вступ

Тепловізійні системи спостереження знаходять широке застосування у різних галузях науки і техніки [1 – 3]. Особливо ефективно тепловізори можна застосувати при дослідженні термоелектричних явищ, під якими розуміють сукупність фізичних явищ, які обумовлені взаємозв'язком між тепловими і електричними процесами в металах і напівпровідниках [4]. До термоелектричних явищ відносяться ефекти Зеєбека, Пельтє і Томсона. Для оцінки ефективності термоелектричних перетворювачів необхідно безконтактно вимірювати статичний і динамічний температурний стан перетворювачів [5].

Принцип роботи класичних тепловізорів ґрунтується на перетворенні яскравості (інтенсивності) випромінювання об'єкта спостереження і фону площини предметів в адекватний розподіл яскравості зображення фоно-цільової обстановки (ФЦО) на екрані дисплея. Граничні

характеристики таких тепловізорів визначаються радіаційним контрастом ФЦО. Для істотного покращення цих характеристик в останні роки розробники активно намагаються використовувати поляризаційні властивості випромінювання елементів ФЦО. Як правило, випромінювання від цілі є частково поляризованим, а від фону – природним [3, 6]. Таким чином, поляриметричні зображення за певних умов демонструють суттєве збільшення сигналу від об'єкта і подавлення фонових завад.

Основними характеристиками поляризованого випромінювання є інтенсивність, ступінь поляризації, азимут і еліптичність поляризації [7 – 9]. Для вимірювання цих характеристик в інфрачервоній (ІЧ) області спектру використовують поляризаційні тепловізори (ПТ). В той же час основною характеристикою будь якого класичного тепловізора є енергетичне розділення, яке визначається пороговим радіаційним контрастом об'єкта спостереження, що розташований на фоні.

Для визначення і вимірювання енергетичного (температурного) розділення використовуються тест-об'єкти, які задані відповідними стандартами або методами. Існує значна кількість монографій і статей, присвячених розрахунку і вимірюванню енергетичного розділення класичних тепловізорів [2, 10 – 12]. При цьому практично відсутня науково-технічна інформація стосовно вибору тест-об'єкта для моделювання і вимірювання основних характеристик ПТ. Досить важливим фактором експериментального визначення характеристик ПТ на сучасному етапі також є можливість автоматизації цього процесу, наприклад, в умовах крупносерійного виробництва.

Постановка задачі

Метою цієї статті є обґрунтування вибору тест-об'єкта і розробка методів вимірювання характеристик поляризаційних тепловізорів. Вказані вимірювальні засоби мають враховувати чинні для сучасного теплобачення стандарти та піддаватись автоматизації процесів вимірювання.

Основні характеристики тепловізорів

Узагальненими характеристиками тепловізорів є просторове і температурне розділення, які визначають якість тепловізійного зображення і температурну чутливість. Для вимірювання температурної чутливості використовують еквівалентну шуму різниці температур (ЕШРТ) *NETD* (Noise Equivalent Temperature Difference) [2, 10].

Поляризаційні параметри частково поляризованого випромінювання

Тест-об'єкт повинен забезпечити вимірювання еквівалентної шуму різниці температур *NETD* і мінімальної роздільної різниці температур *MRTD* для різних станів поляризації вихідного випромінювання, яке характеризується інтенсивністю I_0, ступенем поляризації P, еліптичністю χ і поляризаційним кутом θ (рис. 1).

Процес отримання еліптично поляризованого світла було розглянуто в монографіях [13–15]. Узагальнене рівняння цього виду поляризації можна представити у вигляді:

$$\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}-2\frac{x}{a}\frac{y}{b}\cos\Delta\varphi=\sin^2\Delta\varphi, \qquad (1)$$

де $\Delta\varphi$ – різниця фаз між лінійно поляризованими у взаємно перпендикулярних площинах складовими E_{01} і E_{e1} частково поляризованого випромінювання, $x=E_0$; $a=E_{01}$; $y=E_e$; $b=E_{e1}$ – параметри еліпса.

Рівняння (1) являє собою рівняння еліпса, який довільно орієнтований відносно оптичної осі 00 кристала (фазової пластинки) (рис. 1). Орієнтація еліпса визначається поляризаційним кутом θ, а форма еліпса – кутом еліптичності χ. В залежності від цих кутів еліптично поляризоване світло перетворюється в лінійно поляризоване світло, а також в циркулярно поляризоване світле з обертанням результуючого вектору $\vec{E}_r = \vec{E}_0 + \vec{E}_e = \vec{x} + \vec{y}$ вправо або вліво.

В загальному випадку еліпс (1) розташований всередині прямокутника розміром $2E_{01} \times 2E_{e1}$ і дотикається його контуру в чотирьох точках (рис. 1). Якщо третій доданок в рівнянні (1) дорівнює нулю, то осі еліпса є паралельними осям *x* і *y*.

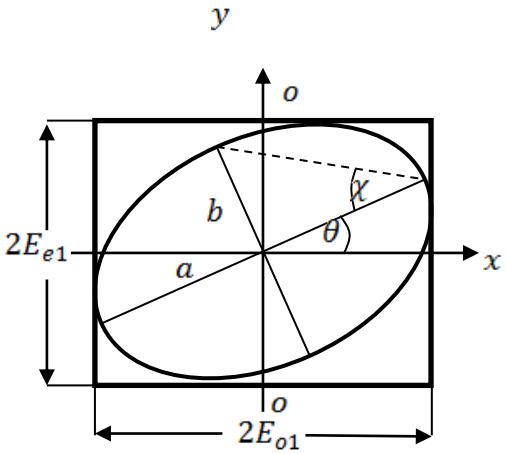

Рис. 1. Траєкторія при еліптичній поляризації

Поляризаційний кут θ – це кут між основною віссю еліпса і горизонтальною віссю x, який визначається компонентами електричного поля світла:

$$tg2\theta = \frac{2E_{0x}E_{0y}\cos\Delta\varphi}{E_{0x}^2 + E_{0y}^2}, \text{ де } 0 < \theta < \pi. \qquad (2)$$

Кут еліптичності χ задається відношенням довжин малої та великої осей еліпса:

$$tg\chi = \frac{\pm b}{a}, \text{ де } -\pi/2 < \chi < \pi/2 \qquad (3)$$

Кут еліптичності χ визначається також компонентами електричного поля світла:

$$tg2\chi = \frac{2E_{0x}E_{0y}\cos\Delta\varphi}{E_{0x}^2 + E_{0y}^2}, \text{ де } 0 < \theta < \pi. \qquad (4)$$

Поляризація теплового випромінювання

Дослідження законів теплового випромінювання нагрітих об'єктів свідчать про те, що металеві поверхні мають більш високу ступінь поляризації випромінювання порівняно з діелектричними і прозорими поверхнями. Найбільша ступінь поляризації спостерігається у випромінюванні полірованих поверхонь при спостереженнях під великим кутом відносно нормалі до поверхні. Це пояснюється законами заломлення випромінювання на межі «метал – повітря».

Згідно до закону Кірхгофа спектральний коефіцієнт випромінювання ε(λ) поверхні об'єкта спостереження, який знаходиться у стані температурної рівноваги, дорівнює коефіцієнту поглинання α(λ) і пов'язаний з коефіцієнтом відбивання *R*(λ) співвідношенням:

$$\varepsilon(\lambda)=\alpha(\lambda)=1-R(\lambda). \tag{7}$$

Амплітуда теплового випромінювання E_t на межі «метал – повітря» є частково поляризованою, в якій паралельна складова $E_{t_\parallel}$ є більшою за перпендикулярну складову $E_{t_\perp}$ (рис. 2). Вісь візування (спостереження) ПТ розташована в площині спостереження *xy*.

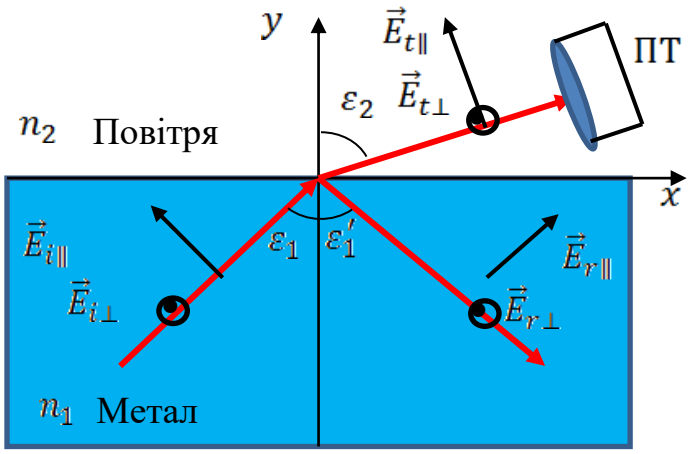

Рис. 2. Випромінювання і відбивання світла, яке падає під похилим куто м ε_1 із метала на межу «метал – повітря»

Використовуючи закон Кірхгофа (7) і формули Френеля для часткових енергетичних коефіцієнтів відбивання $R_\parallel$ і $R_\perp$ [15, 16], отримаємо формули для розрахунку паралельної і перпендикулярної складових (часткових) коефіцієнтів випромінювання

$$\varepsilon_\parallel=\left|\frac{E_{t_\parallel}}{E_{i_\parallel}}\right|^2=\frac{4n_1\cos\varepsilon_2}{\cos\varepsilon_2+2n_1\cos\varepsilon_2+n_1^2+\kappa_1^2}, \tag{8}$$

$$\varepsilon_\perp=\left|\frac{E_{t_\perp}}{E_{i_\perp}}\right|^2=\frac{4n_1\cos\varepsilon_2}{\left(n_1^2+\kappa_1^2\right)\cos\varepsilon_2+2n_1\cos\varepsilon_2+1}, \tag{9}$$

де $n_c=n_1-j\kappa_1$ – комплексний показник заломлення металу; ε_2 – кут заломлення (візування). Результуючий коефіцієнт випромінювання – це середнє значення паралельної і перпендикулярної складових

$$\varepsilon=\frac{1}{2}\left(\varepsilon_\parallel+\varepsilon_\perp\right). \tag{10}$$

Ступінь поляризації випромінювання визначається як

$$DOP(\varepsilon_v)=\frac{\varepsilon_\perp(\varepsilon_v)-\varepsilon_\parallel(\varepsilon_v)}{\varepsilon_\perp(\varepsilon_v)+\varepsilon_\parallel(\varepsilon_v)}, \tag{11}$$

де $\varepsilon_v=\varepsilon_2$ – кут візування.

Залежність часткових коефіцієнтів випромінювання $\varepsilon_\parallel(\varepsilon_v)$ і $\varepsilon_\perp(\varepsilon_v)$ та ступеню поляризації $DOP(\varepsilon_v)$ на межі «алюміній – повітря» від кута візування ε_v наведені на рис. 3 і 4. Для випромінювання поверхні алюмінію перпендикулярна складова є більшою за паралельну складову. Перпендикулярна складова збільшується із збільшенням кута візування до максимального значення біля 0.92, а потім зменшується при великих кутах. Перпендикулярна складова монотонно

зменшується із збільшення кута ε_v. Загальний коефіцієнт випромінювання ε незначно збільшується із збільшення кута ε_v. Ступінь поляризації із збільшенням кута візування зростає до максимального значення 92 % при $\varepsilon_v \approx 90^\circ$. При побудові графіків для врахування шорсткості і окислення поверхні алюмінієвої пластини було використано комплексний показник заломлення $n_c = 4.45 - j3.3$.

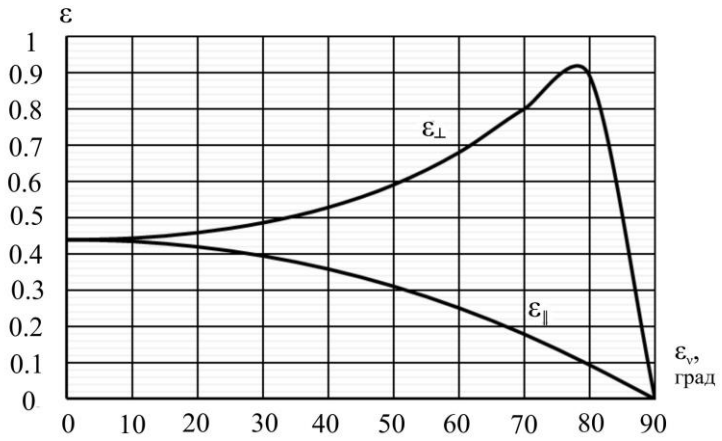

Рис. 3. Залежності часткових коефіцієнтів випромінювання поверхні алюмінію від кута ε_v при $n_c = 4.45 - j3.3$.

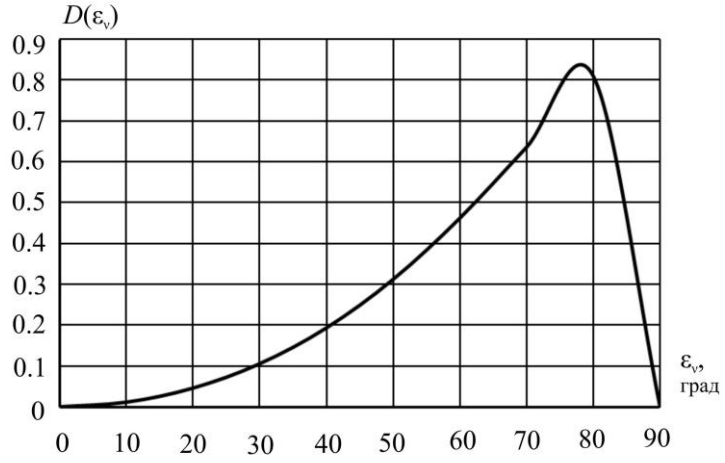

Рис. 4. Залежність ступеня поляризації випромінювання поверхні алюмінію від кута візування ε_v при $n_c = 4.45 - j3.3$.

Навпаки, для межі «діелектрик – повітря» часткові компоненти коефіцієнта випромінювання зменшуються із збільшенням кута візування. Загальний коефіцієнт випромінювання зменшується із збільшенням куту візування пропорційно $\cos\varepsilon_v$. Ступінь поляризації випромінювання поверхні також збільшується із збільшенням кута ε_v, але має менше значення порівняно з випромінювання поверхні металів.

1. Таким чином, аналіз законів теплового випромінювання металевої поверхні свідчить про таке:
2. Випромінювання є частково поляризованим, що обумовлено відмінністю коефіцієнтів випромінювання для лінійно поляризованого світла в площині спостереження $\varepsilon_{\parallel}$ і перпендикулярній до неї площині $\varepsilon_{\perp}$.
3. Паралельна складова лінійно поляризованого випромінювання $E_{\parallel}(\varepsilon_v)$ в площині спостереження із збільшення кута візування монотонно зменшується від 0.44 при $\varepsilon_v = 0°$ до нуля при $\varepsilon_v = 90°$.

4. Перпендикулярна складова лінійно поляризованого випромінювання $E_{\perp}(\varepsilon_v)$ в площині спостереження із збільшення кута візування ε_v збільшується від 0.44 до максимального значення 0.92 при $\varepsilon_v \approx 80°$, а потім зменшується до нуля при $\varepsilon_v = 90°$.
5. Ступінь поляризації $DOP(\varepsilon_v)$ випромінювання поверхні алюмінію із збільшення кута візування ε_v збільшується від нуля до максимального значення 0.83 при $\varepsilon_v \approx 80°$ і зменшується до нуля при $\varepsilon_v = 90°$.
6. Для малих кутів візування $\varepsilon_v < 30°$, що є характерним для типових випадків спостереження, ступінь поляризації не перевищує 10 %, а результуючий коефіцієнт випромінювання складає $\varepsilon \approx \varepsilon_{\parallel} \approx \varepsilon_{\perp} = 0.438$.

Вибір тест-об'єкта

Для експериментальних досліджень класичних тепловізорів і вимірювання їх характеристик використовуються тест-об'єкти, які розташовані на рівномірному фоні [9, 10]. Схема установки для вимірювання характеристик ПТ наведена на рис. 5. На оптичній лаві послідовно розташовані випромінювач фону 1, тест-об'єкт 2 і досліджуваний поляризаційний тепловізор 3 [17].

В якості фону пропонується використовувати металеву (алюмінієву) пластину, покриту чорним лаком, який має коефіцієнт випромінювання близький до одинці. Тому таку пластину будемо розглядати як абсолютно чорне тіло, поверхня якого випромінює за законом Ламберта. Задня (тильна) поверхня фонової пластини закрита термопластом. Між термопластом і пластиною із алюмінію розташований нагрівач, а в чотирьох кутах пластини – термопари для вимірювання температури. Цим забезпечується рівномірний температурний фон.

Нагрівач дозволяє змінювати температуру поверхні пластини в заданому діапазоні. Пластина розміщена перпендикулярно до оптичної осі ПТ. В цьому випадку випромінювання, що надходить до ПТ від фону, буде неполяризованим, тобто $P_b \approx 0$ (рис. 4). Це властиво більшості природніх фонових джерел ІЧ випромінювання.

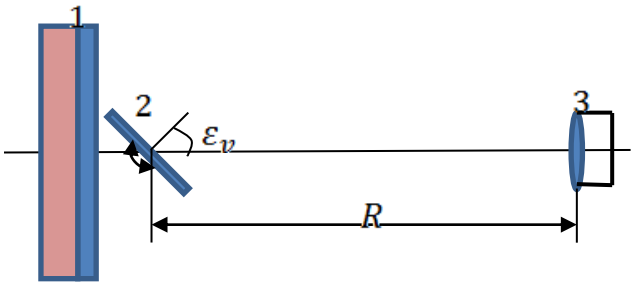

Рис. 5. Схема методу вимірювання ЕШРТ поляризаційного тепловізора (у горизонтальній площині): 1 – фоновий випромінювач; 2 – тест-об'єкт; 3 – поляризаційний тепловізор.

В якості тест-об'єкта 2 пропонується використовувати пластину прямокутної форми, міру Фуко або сферичну поверхню, що виготовлені із алюмінію з комплексним показником заломлення $n_c = n - j\kappa$, які розміщені перпендикулярно до оптичної осі ПТ.

Для вимірювання ЕШРТ будемо використовувати прямокутну пластину, яка може обертатися навколо вертикальної осі на кут візування ε_v відносно оптичної осі ПТ в горизонтальній площині. Зміною кута ε_v досягається зміна ступеня поляризації $P(\varepsilon_v)$ випромінювання, що надходить до ПТ (рис. 4). Тест-об'єкт обертається навколо вертикальної осі в межах від 0^o до 80^o. Температура пластинки дорівнює температурі зовнішнього середовища і вимірюється термодатчиками.

Зміна поляризаційного кута θ досягається нахилом (розворотом) пластинки відносно вертикальної площини оптичної системи (рис. 6).

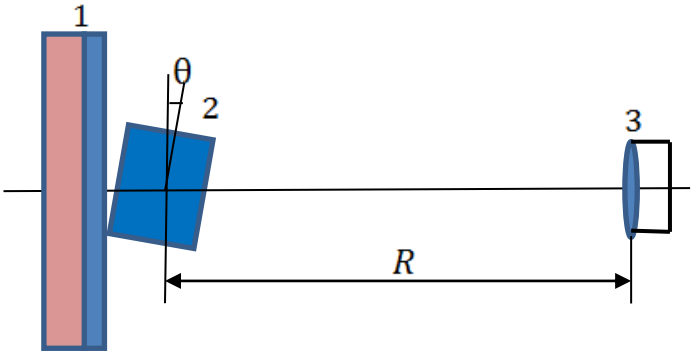

Рис. 6. Схема методу вимірювання ЕШРТ поляризаційного тепловізора при різних кутах поляризації θ (у вертикальній площині): 1 – фоновий випромінювач; 2 – тест-об'єкт; 3 – поляризаційний тепловізор.

Технічна реалізація поворотів тест-об'єкта може бути може бути досить простою і дозволяє автоматизувати процес вимірювань.

Для дослідження залежності ЕШРТ від ступеня поляризації пропонується використовувати півкулю, виготовлену із алюмінію. Певній точці на поверхні півкулі буде відповідати змінний кут ε_v між променем, що надходить до ПТ, і нормаллю до поверхні, тобто кожна точка зображення півкулі має свою ступінь поляризації (рис. 7).

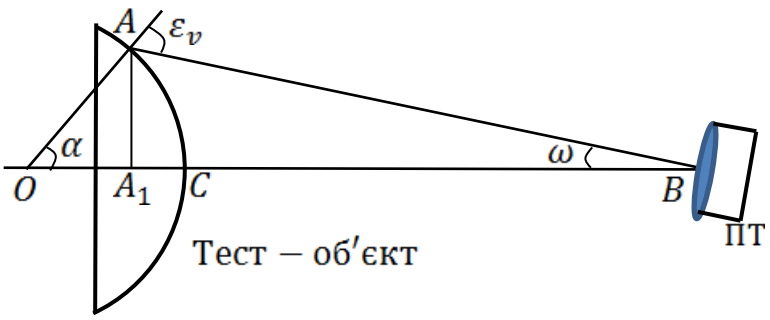

Рис. 7. Схема вимірювання характеристик ПТ за допомогою тест-об'єкта із сферичною поверхнею.

Визначимо залежність кута візування ε_v поверхні тест-об'єкта від кута відхилення ω оптичної осі ПТ від горизонтальної площини, використовуючи рис. 7. Із трикутника ABO маємо $\varepsilon_v = \alpha + \omega \Rightarrow \alpha = \varepsilon_v - \omega$. Із трикутників AA_1O і AA_1B маємо

$$AA_1 = AO\sin\alpha = A_1Btg\omega, \ , \qquad (12)$$

де $AO = r_{th}$ – радіус сферичної поверхні тест-об'єкта; $A_1B = BC + CA_1 = R + + CA$, де $BC = R$ – відстань від ПТ до тест-об'єкта.

Із трикутника AA_1O маємо $OA_1 = r_{th}\cos\alpha$. Тоді $CA_1 = OC = OA_1 = r_{th}(1 - \cos\alpha)$. Підставимо отримані співвідношення до рівності (12)

$$r_{th}\sin\alpha = \left(R + CA_1\right)tg\omega = \left[R + r_{th}\left(1 - \cos\alpha\right)\right]tg\omega \ .$$

Запишемо отримане трансцендентне рівняння у вигляді

$$\sin\alpha = \left[R_n + (1-\cos\alpha)\right] tg\omega, \qquad (13)$$

де $R_n = R/r_{th}$ – нормована відстань від ПТ до тест-об'єкта.

Розв'язком рівняння (13) є залежності кута візування $\varepsilon_v = \alpha + \omega$ від зміни напрямку ω оптичної осі тепловізора для різних значень нормованої відстані від ПТ до тест-об'єкта R_n, які наведені на рис. 8.

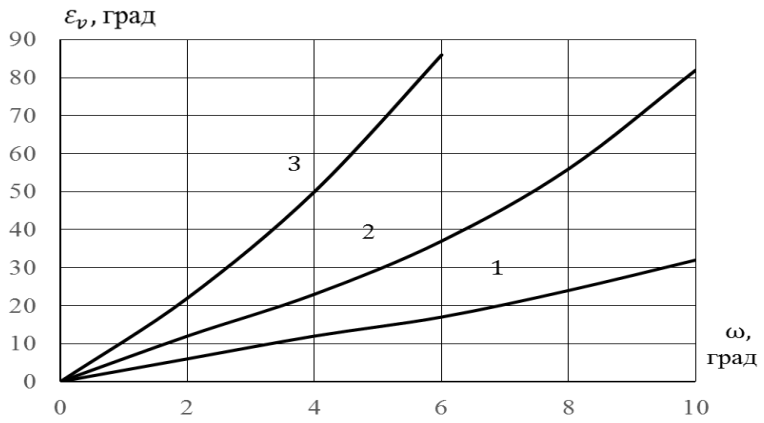

Рис. 8. Залежність кута візування ε_v тепловізором сферичної поверхні тест-об'єкта від кута відхилення ω оптичної осі ПТ від горизонтальної площині для різних значень нормованої відстані від ПТ до тест-об'єкта R/r_{th}: 1- 2; 2 – 5; 3 – 10.

Випромінювач у вигляді сферичної поверхні можна використовувати для формування частко поляризованого випромінювання з різним ступенем поляризації. Ступінь поляризації будемо визначати за формулою (11), графік якої наведено на рис. 4. Кутове положення ω точки на поверхні сфери, якому відповідає певна ступінь поляризації, знаходиться із співвідношення $DOP(\omega) = DOP(\varepsilon_v - \alpha)$.

Залежність кута відхилення ω оптичної осі ПТ від кута ε_v визначимо із рівняння (13), або графіків, що наведені на рис. 8. В свою чергу ступінь поляризації $DOP(\omega)$визначається із графіка, що наведений на рис. 4. Розрахована залежність $DOP(\omega)$наведена на рис. 9.

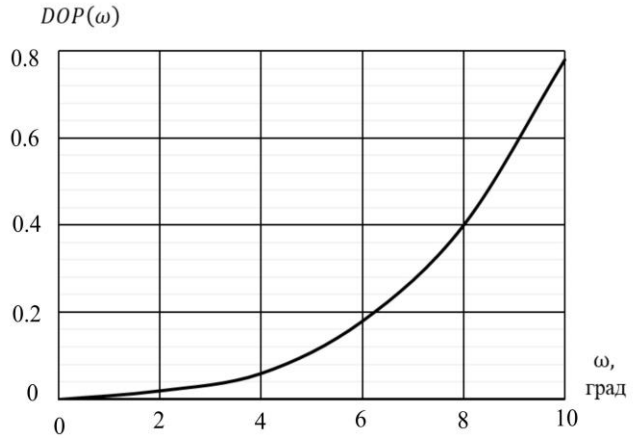

Рис. 9. Залежність ступеня поляризації $DOP(\omega)$ випромінювання сферичної поверхні від кута відхилення ω оптичної осі ПТ для нормованої відстані від ПТ до тест-об'єкта $R/r_{th} = 5$.

Аналіз отриманої залежності свідчить про таке:

1. Якщо оптична вісь ПТ співпадає з оптичною віссю експериментальної установки, тобто, коли $\omega = 0$, ступінь поляризації випромінювання в центрі зображення тест-об'єкта дорівнює нулю.

2. При відхиленні оптичної осі ПТ від оптичної осі установки на кут ω, ступінь поляризації збільшується від нуля до максимального значення 0,83 для нормованої відстані від тест-об'єкта $R/r_{th} = 5$.

Для вимірювання мінімальної роздільної різниці температур ПТ доцільно використовувати в схемі, що зображена на рис. 5, тест-об'єкт у вигляді чотирьох штрихової міри Фуко [6, 7].

Висновки

1. Особливістю тест-об'єкта для вимірювання характеристик поляризаційних характеристик є здатність формування частково поляризованого ІЧ випромінювання із заданими: інтенсивністю, температурним контрастом, ступенем поляризації, еліптичністю і поляризаційним кутом.
2. Запропоновано фізичні моделі тест-об'єкта у вигляді: металевої пластини прямокутної форми для вимірювання ЕШРТ, металевої пластина у вигляді міри Фуко для вимірювання МРРТ і металевої сферичної поверхні.
3. Пластини дозволяють змінювати ступінь поляризації, еліптичність і поляризаційний кут шляхом зміни їх кутової орієнтації у вертикальній і горизонтальній площині.
4. Сферична поверхня дозволяє отримати зображення такої поверхні, концентричні зони якої сформовані випромінюванням, що має певну постійну ступінь поляризації.

Література

1. Dragana Peri´c, Branko Livada , Miroslav Peri´c and Saša Vuji´. Thermal Imager Range: Predictions, Expectations, and Reality / Sensors. – 2019. – 19. – 3313.
2. Norbert Schuster, Valentin G. Kolobrodov. Infrarotthermographie. Zweite, überarbeitete und erweiterte Ausgabe. - WILEY-VCH. - Berlin . - 2004. - 356 p.
3. Vollmer Michael. Infrared Thermal Imaging. Fundamentals, Research and Applications. / Michael Vollmer and Klaus-Peter Mollman. Second Edition. – Wiley – VCH, Weinheim, Germany. – 2018. – pp. 788.
4. Анатичук Л.І. Критерій ефективності термоелектричних перетворювачів енергії, що використовують теплові відходи // Термоелектрика. − № 4. – 2020. – С.59-63.
5. Анатичук Л.І., Вихор Л.М., Коцур М.П., Кобилянський Р.Р., Каденюк Т.Я. Оптимальне керування часовою залежністю температури охолодження в термоелектричних пристроях // Термоелектрика. − № 5. – 2016. – С.5-11.
6. Vollmer M. Identification and Suppression of Thermal Imaging / M. Vollmer, S. Karstadt, K.-P. Mollmann, F. Pinno // InfraMation Proceedings. – University of Applied Sciences, Brandenbueg (Germany). – 2001. – ITC 104 A.
7. Goldstein D.H. Polarized Light. Third edition / Dennis H. Goldstein. – CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group. – London New York. – 2011. – 786 p.
8. Gurton K.P. Enhanced facial recognition for thermal imagery using polarimetric imaging / K.P. Gurton, A.J. Yuffa, Videen G.W. // Optical Society of America. – 2014. – Vol. 39, No. 13. – pp. 3857–3859.
9. Zhang Y. Infrared small target detection method based on decomposition of polarization information / Y. Zhang, Z. G. Shi, T. W. Qiu // Journal of Electronic Imaging. – 2017. – Vol. 33004. – №. 1.
10. Chrzanowski K. Testing thermal imagers. Practical guidebook / Krzysztof Chrzanowski. – Military University of Technology, 00-908 Warsaw, Poland, 2010. – 164 p.

11. Kaplan Herbert. Practical applications of infrared thermal sensing and imaging equipment / Herbert Kaplan. – 3rd ed. – SPIE Press (Washington). – 2007. – 236 p.
12. Chyzh I. Energy resolution of dual-channel opto-electronic surveillance system / Chyzh I., Kolobrodov V., Molodyk A., Mykytenko V., Tymchyk G., Romaniuk R., Kisała P., Kalizhanova A., Yeraliyeva B. // SPIE Proceedings. – 2020. – Vol. 11581, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2020; 115810K.
13. Chipman Russell A. Polarized Light and Optical Systems / Russell A. Chipman, Wai-Sze Tiffany Lam, Garam Young. //Taylor & Francis, CRC Press. – 2019. – 982 p.
14. Collett Edward. Field guide to polarized light / Edward Collett. . – SPIE Press (Washington). – 2005. – 144 p.
15. Born M. Principles of optics, 7th edn. / M. Born, Wolf E. // Cambridge University. – Press, Cambridge. 7th edition. – 2002.
16. Kolobrodov, V.G. Polarization model of thermal contrast observation objects / Kolobrodov, V.G., Mykytenko, V.I., Tymchyk, G.S. // Journal of thermoelectricity. - 2020, 2020(1). – P. 36–49.
17. Short N. J. Effects of surface materials on polarimetric thermal measurements: applications to face recognition / N. J. Short, Yuffa A.J., Videen G. and S. Hu. // Applied Optic. – 2016. – Vol. 55. – No 19. – P. 5226–5233.

Надійшли до редакції: 29.04.2021

Колобродов В.Г., *докт. техн. наук, професор*
Тимчик Г.С., *докт. техн. наук, професор*
Микитенко В.И., *докт. техн. наук, доцент*
Колобродов М.С.

Национальный технический университет Украины
"Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»,
проспект Победы, 37, Киев, 03056, Украина, *e-mail: deanpb@kpi.ua*

ТЕСТ-ОБЪЕКТ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ТЕПЛОВИЗОРОВ

Возрастающая популярность повышения эффективности дистанционных наблюдений за счет анализа степени поляризации оптического излучения в инфракрасном диапазоне спектра требует разработки теоретических и практических методов определения характеристик нового класса оптико-электронных приборов – поляризационных тепловизоров. В отличие от расчетных методов вопросы практической реализации измерительных стендов в настоящее время проработаны недостаточно. В данной статье предложены и проанализированы варианты структуры тест-объектов дляэкспериментальных исследований поляризационных тепловизоров Рассмотрена металлическая пластина, которая может наклоняться относительно линии визирования, а также сферическую металлическую поверхность, не требующая дополнительных механических приводов.В первом случаестепень поляризации, эллиптичность и поляризационный уголварьируютсяпутём изменения ее угловой ориентации в вертикальной и горизонтальной плоскости. Сферическая поверхность формирует фотометрическое тело, в котором излучение концентрических зон имеет определенную постоянную степень поляризации. Такие тест-

объекты обеспечивают измерение эквивалентного шума разности температур и минимального раздельного различия температур поляризационных тепловизоров для разных состояний поляризации входного излучения, характеризующееся интенсивностью, степенью поляризации, эллиптичностью и поляризационным углом. Библ. 17, рис. 9.
Ключевые слова: поляризационный тепловизор, тест-объект,пространственное разделение,температурное разделение, измерительный стенд

Kolobrodov V.G., *doc. techn. sciens, professor*
Tymchyk G.S., *doc. techn. sciences, professor*
Mykytenko V.I., *doc. techn. sciens, docent*
Kolobrodov M.S.

TEST OBJECT FOR AUTOMATED MEASUREMENT OF CHARACTERISTICS OF POLARIZING THERMAL IMAGERS

The growing popularity of increasing the efficiency of remote surveillance by analyzing the degree of polarization of optical radiation in the infrared spectrum requires the development of theoretical and practical methods for determining the characteristics of a new class of optoelectronic devices - polarizing thermal imagers. In contrast to the calculation methods, the issues of practical implementation of measuring benches are currently insufficiently studied. This paper proposes and analyzes options for the structure of test objects for experimental studies of polarizing thermal imagers. A metal plate is considered, which can tilt relative to the line of sight, as well as a spherical metal surface that does not require additional mechanical drives. In the former case, the degree of polarization, ellipticity, and polarization angle are varied by changing its angular orientation in the vertical and horizontal planes. The spherical surface forms a photometric body, in which the radiation of concentric zones has a certain constant degree of polarization. Such test objects provide measurements of the noise equivalent temperature difference NETD and the minimum resolvable temperature difference MRTD of polarizing thermal imagers for different polarization states of the input radiation, which is characterized by the intensity, degree of polarization, ellipticity and polarization angle. Bibl. 17, Figs. 9.
Key words: polarizing thermal imager, test object, spatial resolution, temperature resolution, measuring bench

References

1. Peri´c Dragana, Livada Branko, Peri´c Miroslav and Vuji´ Saša (2019). Thermal imager range: predictions, expectations, and reality. *Sensors*, 19, 3313.
2. Schuster Norbert, Kolobrodov Valentin G. (2004). *Infrarotthermographie*. Zweite, überarbeitete und erweiterte Ausgabe. Berlin: WILEY-VCH.
3. Vollmer Michael and Mollman Klaus-Peter (2018). *Infrared thermal imaging. Fundamentals, research and applications*. 2nd ed. Weinheim: Wiley – VCH.
4. Anatychuk L.I. (2020). Efficiency criterion of thermoelectric energy converters using waste heat. *J.Thermoelectricity*, 4, 59-63.
5. Anatychuk L.I., Vikhor L.M., Kotsur M.P., Kobylianskyi R.R., Kadenyuk T.Ya. (2016). Optimal control of time dependence of cooling temperature in thermoelectric devices. *J.Thermoelectricity*, 5, 5-11.

6. Vollmer M., Karstadt S., Mollmann K.-P., Pinno F. (2001). *Identification and suppression of thermal imaging. InfraMation Proceedings.* Brandenburg: University of Applied Sciences. Brandenburg. – ITC 104 A.
7. Goldstein D.H. (2011). *Polarized light*. Third edition. London New York: CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group.
8. Gurton K.P., Yuffa A.J., Videen G.W. (2014). Enhanced facial recognition for thermal imagery using polarimetric imaging. *Optical Society of America*, 39(13), 3857–3859.
9. Zhang Y., Shi Z.G., Qiu T.W. (2017). Infrared small target detection method based on decomposition of polarization information. *Journal of Electronic Imaging*, 33004, № 1.
10. Chrzanowski K. (2010). *Testing thermal imagers. Practical guidebook.* Military University of Technology, 00-908 Warsaw, Poland.
11. Kaplan Herbert. (2007). *Practical applications of infrared thermal sensing and imaging equipment*. 3d ed. Washington: SPIE Press.
12. Chyzh I., Kolobrodov V., Molodyk A., Mykytenko V., Tymchyk G., Romaniuk R., Kisała P., Kalizhanova A., Yeraliyeva B. (2020). Energy resolution of dual-channel opto-electronic surveillance system. *SPIE Proceedings*, 11581, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2020; 115810K.
13. Chipman Russell A., Tiffany Lam Wai-Sze, Young Garam (2019). *Polarized light and optical systems*. Taylor & Francis, CRC Press.
14. Collett Edward (2005). *Field guide to polarized light*. Washington: SPIE Press.
15. Born M., Wolf E. (2002). *Principles of optics*. 7th ed. Cambridge: Cambridge University.
16. Kolobrodov V.G., Mykytenko V.I., Tymchuk G.S. (2020). Polarization model of thermal contrast observation objects. J.Thermoelectricity, 1, 36–49.
17. Short N. J., Yuffa A.J., Videen G. and Hu S. (2016). Effects of surface materials on polarimetric thermal measurements: applications to face recognition. *Applied Optic*, 55 (19), 5226–5233.

Subminitted: 29.04.2021