

УДК 537

Колобродов В.Г., докт. техн. наук, професор
Микитенко В.І., докт. техн. наук, доцент
Тимчик Г.С. докт. техн. наук, професор
Сокол Б.В.

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

ТЕМПЕРАТУРНЕ РОЗДІЛЕННЯ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОГО ПОЛЯРИЗАЦІЙНОГО ТЕПЛОВІЗОРА

Робота присвячена розробці методу визначення енергетичного (температурного) розділення поляризаційного тепловізора. Запропоновано використовувати для цього величину еквівалентної шуму різниці температур NETD (Noise Equivalent Temperature Difference). Розроблено фізико-математичну модель оптико-електронної системи поляризаційного тепловізора, яка дозволяє обраховувати її функцію передачі сигналу. На основі цієї функції розроблено методуку обчислення NETD. Отримано формулу, що описує функціональну залежність температурного розділення поляризаційного тепловізора від кутової орієнтації поляризатора відносно оптичної осі фазової пластини при заданому ступені поляризації. Виконано дослідження впливу ступеня поляризації випромінювання тест-об'єкта на температурне розділення поляризаційного тепловізора, який містить лінійний поляризатор і фазову пластину.

Ключові слова: поляризаційний тепловізор, енергетичне розділення, еквівалентна шуму різниця температур, ступень поляризації

Вступ

Поляризація є однією із чотирьох параметрів електромагнітного поля випромінювання, а три інші – це інтенсивність, довжина хвилі і когерентність [1, 2]. Поляриметрія вимірює векторний характер випромінювання і дозволяє отримати важливу інформацію про орієнтацію поверхні об'єкта, його форму і якість поверхні. Поляризаційні властивості випромінювання від об'єктів спостереження відрізняється від випромінювання фонів і не корельовані з їх інтенсивністю і спектром. Як правило, випромінювання від об'єкта є частково поляризоване, а від фону – природне [3, 4]. Таким чином поляриметричні зображення дуже корисні для збільшення сигналу від об'єкта і пригнічення фонових завад.

Основними характеристиками поляризованого випромінювання є інтенсивність, ступінь поляризації, еліптичність і кут поляризації [5, 6]. Для вимірювання цих характеристик в інфрачервоній (ІЧ) області спектру використовують поляризаційні

тепловізори (ПТ) [7, 8]. Основними характеристиками любого тепловізора, який використовується для дослідження термоелектричних явищ та пристроїв є енергетичне (температурне), просторове і часове розділення, які залежать від коефіцієнта пропускання його оптичної системи, чутливості приймача випромінювання і характеристик електронної системи обробки відеосигналів [9 – 11]. Існує значна кількість стандартів, монографій і статей, присвячених моделюванню, розрахунку і вимірюванню температурного розділення тепловізорів, під яким будемо розуміти мінімальний радіаційний контраст між об'єктом і фоном, що може виявити тепловізор [12 – 14]. В той же час практично відсутня науково-технічна інформація стосовно методів розрахунку температурного розділення ПТ.

Постановка задачі

Метою даної статті є розробка і дослідження методу визначення температурного (енергетичного) розділення поляризаційного тепловізора.

Модель поляризаційного тепловізора

Поляризаційний тепловізор можна розглядати як лінійну систему, яка перетворює яскравість площини спостереження із ІЧ області спектру в яскравість зображення об'єкта і фону на екрані дисплея у видимій області спектру. Процес такого перетворення можна дослідити за допомогою узагальненої схеми системи «об'єкт спостереження – атмосфера – тепловізор – спостерігач» [12, 13].

Випромінювання (власне або відбите) від об'єкта спостереження і фону проходить через атмосферу і потрапляє в оптичну систему тепловізора, яка формує зображення об'єкта і фону в площині матричного приймача випромінювання (МПВ). Приймач випромінювання перетворює потік випромінювання, що формує зображення, в електричний відеосигнал, який після підсилення надходить до пристроїв аналогової та цифрової обробки. Після необхідних перетворень відеосигнал надходить до дисплея, на екрані якого формується видимий аналог об'єкта та фону, що сприймаються спостерігачем.

Розглянемо оптико-електронну систему ПТ, яка складається із оптичної системи і МПВ (рис. 1). В свою чергу оптична система складається із послідовно розташованих на оптичній осі ІЧ поляризатора, четвертьхвильової пластини (quarter-wave retarder) і ІЧ об'єктива тепловізора.

Однією із важливих характеристик тепловізора є *функція передачі сигналу* (Signal Transfer Function – $SiTF$) $u_s(L_t)$ – це залежність електричного сигналу на виході електронного блоку тепловізора від яскравості об'єкта спостереження L_t . Для отримання функціональної залежності $u_s(L_t)$ розглянемо рис. 1. Нехай об'єкт спостереження має рівномірну за площею спектральну яскравість $L_t(\lambda)$ а його кутові розміри $\xi_{tx} \times \xi_{ty}$ значно перевищують миттєве поле зору тепловізора, що розміщений на відстані R від об'єкта

спостереження. Вважатимемо, що поверхня об'єкта і фону випромінює за законом Ламберта.

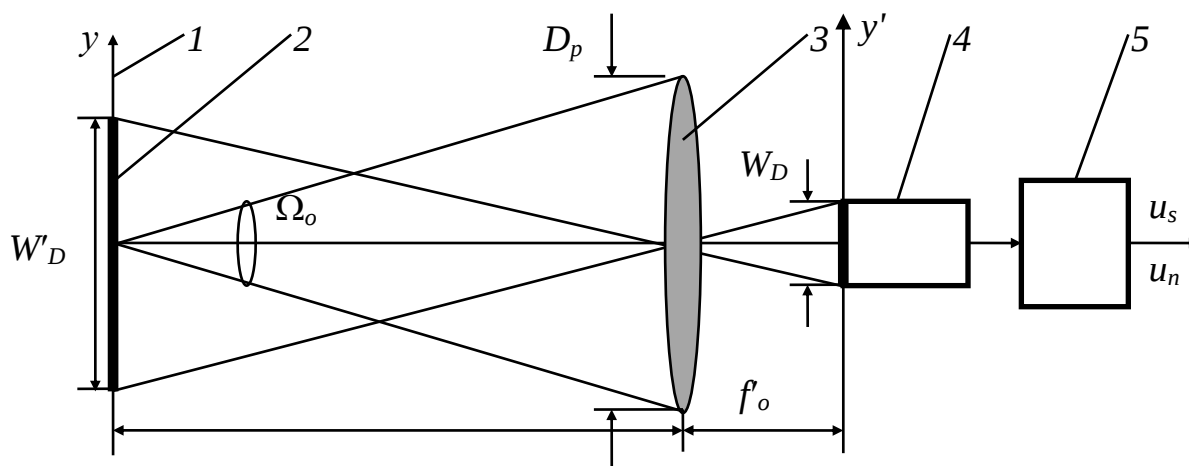


Рис. 1. До розрахунку функції передачі сигналу тепловізора:

1 – площина об'єкта випромінювання; 2 – миттєве лінійне поле зору;
3 – оптична система; 4 – МПВ; 5 – відео підсилювач

Тоді спектральна яскравість поверхні об'єкта визначають за формулою як

$$L_t(\lambda) = \frac{1}{\pi} \varepsilon_t(\lambda) M_\lambda(\lambda, T_t), \quad (1)$$

де $\varepsilon_t(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт випромінювання поверхні об'єкта; $M_\lambda(\lambda, T_t)$ – функція Планка.

Якщо нормаль до поверхні об'єкта розміщена під кутом φ до оптичної осі спостереження, то до вхідної зіниці об'єктива надходить спектральний потік випромінювання

$$\Phi_\lambda(\lambda) = \tau_A(\lambda, R) L_{\lambda t}(\lambda) \Omega_0 A_t \cos \varphi, \quad (2)$$

де $\tau_A(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт пропускання атмосфери; A_t – площа об'єкта, що перебуває у межах миттєвого поля зору тепловізора; $\Omega_0 = A_p/R^2$ – тілесний кут, у межах якого випромінювання від об'єкта надходить до вхідної зіниці об'єктива площею A_p .

Сигнал на виході МПВ із спектральною чутливістю $R_D(\lambda)$ дорівнюватиме

$$u_s = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_\lambda(\lambda) \tau_o(\lambda) R_D(\lambda) d\lambda = A_t \frac{A_p}{R^2} \cos \varphi \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) L_{\lambda t}(\lambda) \tau_o(\lambda) R_D(\lambda) d\lambda. \quad (3)$$

Під час вимірювання функції $SiTF$ вважають, що тест-об'єкт розміщений на невеликій відстані від тепловізора, тобто $\tau_A(\lambda) \approx 1$, а спектральний коефіцієнт пропускання оптичної системи у межах робочого спектрального діапазону має середнє значення τ_0 . Тоді функція $SiTF$ (3) тепловізора з урахуванням коефіцієнта підсилення електронного блоку C_{EI} та співвідношень $A_p = \pi D_p^2/4$ і $A_t/R^2 = A_D/f_0'^2$ які впливають із рис. 1, матиме вигляд

$$u_s(L_t) = \frac{\pi}{4} C_{EI} A_D \left(\frac{D_p}{f_0'} \right)^2 \tau_0 \cos \varphi \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_t(\lambda) R_D(\lambda) d\lambda. \quad (4)$$

Функція $u_s(L_t)$ має складний вигляд, який залежить, перш за все, від робочого спектрального діапазону та спектральної чутливості МПВ, що ускладнює вимірювання істинної яскравості об'єкта. Формула (4) не враховує спектральний склад електричного сигналу, який визначається системою зчитування. Крім того, на величину сигналу u_s впливає коефіцієнт підсилення C_{EI} та шуми системи.

Як видно із формул (1) – (4), величина тепловізійного сигналу $u_s(x', y')$ на виході МПВ залежить від абсолютної температури T_t поверхні об'єкта і її спектральних коефіцієнтів випромінювання $\varepsilon_t(\lambda, T)$. Крім того, відеосигнал $u_s(x', y')$ залежить від коефіцієнта пропускання атмосфери $\tau_A(\lambda, R)$, характеристик оптичної системи D_p, f_0', τ_0 і МПВ $R_D(\lambda), \lambda_1 \dots \lambda_2, A_D$, а також від модуляційних передавальних функцій окремих елементів оптико-електронної системи тепловізора.

Визначення температурного розділення ПТ

В якості температурного розділення ПТ будемо використовувати класичний параметр, що називається еквівалентною шуму різницею температур (ЕШРТ) $NETD$ (Noise Equivalent Temperature Difference). Під параметром $NETD$ розуміють різницю температур між стандартним тест-об'єктом і фоном, що випромінюють як абсолютно чорне тіло (АЧТ), за якої відношення пікового значення сигналу на виході стандартного еталонного фільтра тепловізора, яка розглядає тест-об'єкт, до шуму дорівнює одиниці [15, 16]. Тест-об'єкт повинен мати кутові розміри, які у декілька разів перевищують кутовий розмір чутливої площадки пікселя МПВ $\alpha_D \times \beta_D$, щоб вилучити вплив просторового розділення на результати вимірювань.

Щоб отримати формули для розрахунку $NETD$ розглянемо функцію передачі сигналу тепловізора (4). Додатково зробимо низку припущень:

1. Тест-об'єкт розміщений на незначній відстані від тепловізора. Тоді можна вважати, що випромінювання мало поглинається під час проходження через атмосферу, тобто в робочому спектральному діапазоні $\tau_A(\lambda) \approx 1$.

- Електронна система тепловізора має ефективну шумову смугу пропускання Δf .
- Тест-об'єкт великих розмірів розміщений на рівномірному фоні і має температурний контраст ΔT . Тест-об'єкт і фон випромінюють як АЧТ.

Оскільки об'єкт завжди міститься на фоні, то корисний (інформативний) сигнал виникає за наявності температурного контрасту між об'єктом і фоном, тобто

$$u_s = u_{st} - u_{sb}, \quad (5)$$

де u_{st} і u_{sb} – сигнали, утворені об'єктом і фоном відповідно.

Якщо об'єкт і фон випромінюють згідно із законом Ламберта, то формулу (5) з урахуванням (4) за умови, що коефіцієнт підсилення $C_{EI} = 1$, представимо у вигляді

$$\begin{aligned} u_s &= \frac{1}{\pi} A_t \frac{A_p}{R^2} \tau_o \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_D(\lambda) [M_\lambda(\lambda, T_b + \Delta T) - M_\lambda(\lambda, T_b)] d\lambda = \\ &= \frac{1}{\pi} A_t \frac{A_p}{R^2} \tau_o \cdot \Delta T \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_D(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T_b)}{\partial T} d\lambda, \end{aligned} \quad (6)$$

де τ_o – середній коефіцієнт пропускання оптичної системи.

Спектральну чутливість $R_D(\lambda)$ МПВ виразимо через питому виявлену здатність $D^*(\lambda)$ згідно формули [13]

$$R_D(\lambda) = D^*(\lambda) \frac{u_n}{\sqrt{A_D \Delta f}}, \quad (7)$$

де A_D і u_n – площа і шумовий сигнал пікселя МПВ відповідно.

Підставивши формулу (7) у (6) знайдемо відношення сигнал/шум на виході еталонного фільтра

$$SNR = \frac{u_s}{u_n} = \frac{1}{\pi} A_t \tau_o \frac{A_o}{R^2} \frac{\Delta T}{\sqrt{A_D \Delta f}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T_b)}{\partial T} d\lambda. \quad (8)$$

Формулу для розрахунку $NETD$ знаходимо з (8), вважаючи, що $SNR = 1$. Тоді

$$NETD = \Delta T = \frac{\pi R^2 \sqrt{A_D \Delta f}}{A_t \tau_o A_p \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T_b)}{\partial T} d\lambda}. \quad (9)$$

Отримана формула найзагальніша для розрахунку $NETD$. Представимо рівняння (9) в іншому вигляді, користуючись рис. 1. Очевидно, що $A_p = \pi D_p^2/4$ і $A_t/R^2 = A_D/f_0^2$. Тоді

$$NETD = \frac{4k_o^2}{\tau_o \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T_b)}{\partial T} d\lambda} \sqrt{\frac{\Delta f}{A_D}}, \quad (10)$$

де $k_o = f'_o / D_p$ – діафрагмове число об'єктива.

Користуючись співвідношенням (10), визначимо такі шляхи зменшення параметра $NETD$:

1. Використання світлосильних об'єктів з малим діафрагмовим числом $k_o = f'_o / D_p$ і високим коефіцієнтом пропускання τ_o . Це найефективніший спосіб, тому що $NETD \sim k_o^2$.
2. Використання МПВ з великою питомою виявлювальною здатністю $D^*(\lambda)$.
3. Зменшення ефективної шумової смуги Δf еталонного фільтра. Однак для отримання високого просторового розділення цю смугу потрібно збільшувати [15]. Тому Δf обирають з компромісу між просторовим та температурним розділеннями.

Отримана формула (10) для енергетичного розділення справедлива для випадку, коли тепловізор перетворює яскравість об'єкта спостереження із ІЧ області спектру в його зображення на екрані дисплея у видимій області спектру. Іншими словами, в класичному тепловізорі відбувається перетворення інтенсивності випромінювання. Поляризаційний тепловізор реєструє поляризаційні характеристики об'єкта і фону за рахунок зміни кутової орієнтації поляризатора і фазової пластини в оптичній системі. Коефіцієнт пропускання τ_o оптичної системи ПТ при такій зміні кутової орієнтації буде різним, що згідно формули (10) призведе до різної величини енергетичного розділення тепловізора.

В статті [16] досліджено метод розрахунку енергетичного коефіцієнта пропускання оптичної системи поляризаційного тепловізора для частково поляризованого випромінювання в залежності від кутової орієнтації поляризатора і фазової пластинки. В ПТ характеристики поляризаційного зображення визначаються за допомогою параметрів Стокса, які вимірюються для кутів α між площиною пропускання поляризатора і оптичною віссю четвертьхвильової пластини рівних 0° , 90° , 45° і 135° .

Результати цих досліджень свідчать про те, що нормований коефіцієнт пропускання оптичної системи ПТ $\tau_{os,n} = \tau_{os} / \tau_p \tau_{hp} \tau_o$, де τ_p , τ_{hp} і τ_o – коефіцієнти пропускання, що обумовлені френелівськими втратами на входній та вихідній поверхнях оптичних елементів і поглинанням в оптичному середовищі поляризатора і фазової пластини відповідно; τ_o – коефіцієнти пропускання ІЧ об'єктива:

1. Для природнього випромінювання коефіцієнт пропускання не залежить від кутової орієнтації фазової пластини і дорівнює 0.5.

2. Для частково поляризованого випромінювання коефіцієнт пропускання залежить від кута α . Для кутів α рівних 0° , 90° , 45° і 135° нормований коефіцієнт пропускання $\tau_{os,n}$ для ступеня поляризації 0.5 дорівнює 0.75, 0.25, 0.5 і 0.5 відповідно. Таку особливість оптичної системи ПТ будемо враховувати при розрахунках температурного розділення тепловізора.

Метод розрахунку температурного розділення ПТ

Важливим етапом при визначення ЕШРТ є вибір тест-об'єкта, який необхідно використовувати при розрахунках і вимірюваннях температурного розділення ПТ. При цьому слід врахувати:

1. Поляризаційні характеристики об'єкта спостереження: інтенсивність, ступінь поляризації і поляризаційний кут.
2. Енергетичні параметри об'єкта спостереження (тест-об'єкта) і фону, які визначаються температурою, коефіцієнтами випромінювання і відбивання поверхні об'єкта і фону.
3. Орієнтацію поверхні тест-об'єкта і фону відносно оптичної осі тепловізора.

Врахування цих особливостей потребує детального дослідження, що виходить за рамки цієї статті. За основу досліджень візьмемо стандарт НАТО 4347 для сухопутних сил «Визначення номінальних характеристик статичної дальності для систем інфрачервоного спостереження» [17].

Тому в цій статті у формулі енергетичного розділення класичних тепловізорів (10) будемо додатково враховувати таке:

1. Параметри тест-об'єкта і фону:
 - 1.1. Поверхні об'єкта і фону мають рівномірний розподіл температури T_t і T_b , коефіцієнтів випромінювання ε_t і ε_b і відбивання R_t і R_b . Температура фону $T_b = 288$ К.
 - 1.2. Ступінь поляризації випромінювання від тест-об'єкта дорівнює P_t , а від фону – $P_b = 0$.
2. Коефіцієнт пропускання оптичної системи $\tau_{os}(\alpha) = \tau_{os,n}(\alpha)(\tau_p \tau_{hp} \tau_0)$, залежить від кутової орієнтації α поляризатора відносно оптичної осі фазової пластини.
3. Приймач випромінювання – мікроболометрична матриця (МБМ), яка має температурну чутливість $NETD_D$, формат $p_D \times q_D$, розмір пікселя $V_D \times W_D$, частоту кадрів f_f

Питома виявлювальна здатність D_{th}^* теплового приймача випромінювання, якою є МБМ, не залежить від довжини хвилі випромінювання, і тому її в формулі (10) можна винести за інтеграл. Для визначення $NETD$ як параметра МБМ у формулі (10) вважають, що [18]:

– діафрагмове число оптичної системи $k_0 = 1$;

– ефективна шумова смуга $\Delta f = 1/(2t_i)$, де t_i – час інтегрування матриці, який може дорівнювати постійній часу пікселя t_D .

У разі таких допущень параметр МБМ $NETD_D$ розраховують за формулою

$$NETD_D = \frac{4}{\sqrt{2A_D t_i} \cdot D_{th}^* \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T_{th})}{\partial T} d\lambda}, \quad (11)$$

де T_{th} – температура тест-об'єкта, за якої відбувається визначення параметра $NETD_D$.

Із формули (11) визначаємо питому виявлену здатність D_{th}^* і підставляємо до (10)

$$NETD = NETD_D \frac{k_o^2}{\tau_{os}(\alpha) \varepsilon_t} k_D(T_{th}, T_b), \quad (12)$$

де $k_D(T_{th}, T_b)$ – коефіцієнт, який враховує відмінність диференціальної світності поверхні тест-об'єкта при температурі T_{th} , за якої вимірювалась питома виявлювальна здатність МБМ, від реальної температури T_b фону при тестуванні ПТ,

$$k_D(T_{th}, T_b) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T_{th})}{\partial T} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T_b)}{\partial T} d\lambda}. \quad (13)$$

Формула (12) справедлива за умови, що коефіцієнти випромінювання тест-об'єкта ε_t і фону ε_b мають близькі значення, тобто $\varepsilon_t \approx \varepsilon_b$. Вплив ступеня поляризації P частково поляризованого світла від тест-об'єкта враховано в коефіцієнті пропускання $\tau_{os}(\alpha)$ оптичної системи ПТ. В статті [16] було встановлено, що коефіцієнт пропускання $\tau_{os}(\alpha)$ визначається функцією:

$$\tau_{os}(\alpha) = \tau_p \tau_{hp} \tau_o \left[\frac{1}{2} (1 - P) + P \cos^2 \alpha \right]. \quad (14)$$

Таким чином, отримана формула (12) дозволяє розрахувати енергетичне розділення поляризаційного тепловізора.

Приклад розрахунку температурного розділення ПТ

Розглянемо приклад розрахунку температурного розділення ПТ за таких умов:

1. Параметри тест-об'єкта:

- Температура фону $T_b = 288 \text{ К}$.
- Температурний контраст $\Delta T = 2 \text{ К}$.
- Коефіцієнт випромінювання поверхні тест-об'єкта $\varepsilon_t = 1$.
- Кутове положення нормалі до поверхні відносно осі спостереження $\varphi = 85^\circ$
- Ступінь поляризації $P = 0.5$.
- Поляризаційний кут $\psi = 0^\circ$.

2. Інтегральний коефіцієнт пропускання атмосфери в спектральному діапазоні

$$\lambda_1 \dots \lambda_2 = 8 \dots 14 \text{ мкм} \quad \tau_A = 1.$$

3. Параметри оптичної системи:

- Діаметр вхідної зіниці і фокусна відстань ІЧ об'єктива – $D_p = 50 \text{ мм}$ і $f_o = 50 \text{ мм}$.
- Інтегральні коефіцієнти пропускання окремих елементів оптичної системи:
 - поляризатора $\tau_p = 0.9$;
 - фазової пластини $\tau_{hp} = 0.9$;
 - ІЧ об'єктива $\tau_0 = 0.85$.

4. Параметри приймача випромінювання – мікроболометричної матриці GWIR 0304X2A, яка має параметри:

- Робочий спектральний діапазон $\lambda_1 \dots \lambda_2 = 8 \dots 14 \text{ мкм}$.
- Температурна чутливість $NETD_D = 0.05 \text{ К}$.
- Формат матриці $p_D \times q_D = 640 \times 512$ пікселів.
- Розмір пікселя $V_D \times W_D = 17 \times 17 \text{ мкм}$.
- Частота кадрів $f_f = 50 \text{ Гц}$.

Для розрахунку температурного розділення ПТ використаємо формулу (12), в якій за умовою прикладу відомими є:

1. Еквівалентна шуму різниця температур МБМ $NETD_D = 0.05 \text{ К}$.
2. Коефіцієнт випромінювання поверхні тест-об'єкта $\varepsilon_t = 1$.
3. Діафрагмове число оптичної системи $k_o = D_p / f_o = 1$.

Коефіцієнт МБМ $k_D(T_{th}, T_b)$ для температур $T_{th} = 300 \text{ К}$ і $T_b = 288 \text{ К}$ розраховуємо за формулою (13) [13]:

$$k_D(T_{th}, T_b) = \frac{\int_8^{14} \frac{\partial M_\lambda(\lambda, 300)}{\partial T} d\lambda}{\int_8^{14} \frac{\partial M_\lambda(\lambda, 288)}{\partial T} d\lambda} = \frac{232 \frac{\text{мкВт}}{\text{см}^2 \text{К}}}{263 \frac{\text{мкВт}}{\text{см}^2 \text{К}}} = 0.88.$$

Визначення коефіцієнта пропускання $\tau_{os}(\alpha)$ оптичної системи ПТ в залежності від кутової орієнтації α поляризатора відносно оптичної осі фазової пластини детально досліджено в статті [16]. Для частково поляризованого випромінювання коефіцієнт пропускання залежить від кута α . Для кутів α рівних 0° , 90° , 45° і 135° нормований коефіцієнт пропускання $\tau_{os,n}$ для ступеня поляризації $P = 0.5$ дорівнює 0.75, 0.25, 0.5 і 0.5 відповідно. Таку особливість оптичної системи ПТ будемо враховувати при розрахунках температурного розділення тепловізора.

Підставимо наведені вище параметри ПТ до формули (12) і розрахуємо температурне розділення для різних значень кута α :

$$NETD(\alpha = 0^\circ) = 0.05 \cdot \frac{1}{0.9 \cdot 0.9 \cdot 0.85 \cdot 0.75 \cdot 1} \cdot 0.88 = 0.085 \text{ K};$$

$$NETD(\alpha = 90^\circ) = 0.26 \text{ K}; \quad NETD(\alpha = 45^\circ) = 0.13 \text{ K}; \quad NETD(\alpha = 135^\circ) = 0.13 \text{ K}$$

Встановимо залежність температурного розділення ПТ від ступеня поляризації P частково поляризованого випромінювання, який впливає на коефіцієнт пропускання $\tau_{os}(P)$ оптичної системи тепловізора. В статті [16] було встановлено, що для кутів $\alpha = 45^\circ$ і 135° нормований коефіцієнт пропускання не залежить від ступеня поляризації і дорівнює $\tau_{os}(P) = 0.5$. Для кутів $\alpha = 0^\circ$ і 90° відповідно маємо:

$$\tau_{os}(P, \alpha = 0^\circ) = \frac{1}{2} \tau_p \tau_{ph} \tau_o (1 + P); \quad (15)$$

$$\tau_{os}(P, \alpha = 90^\circ) = \frac{1}{2} \tau_p \tau_{ph} \tau_o (1 - P). \quad (16)$$

Після підстановки (15) і (16) в рівняння (12) отримаємо залежність температурного розділення ПТ від ступеня поляризації випромінювання тест-об'єкта. Графік цієї залежності для обраних раніше параметрів тепловізора наведено на рис. 1.

$$NETD(P, \alpha = 0^\circ) = NETD_D \frac{2k_o^2}{\tau_p \tau_{ph} \tau_o (1 + P) \varepsilon_t} k_D(T_{th}, T_b); \quad (17)$$

$$NETD(P, \alpha = 90^\circ) = NETD_D \frac{2k_o^2}{\tau_p \tau_{ph} \tau_o (1 - P) \varepsilon_t} k_D(T_{th}, T_b). \quad (18)$$

Важливо також було встановити залежність температурного розділення ПТ для довільного кута α орієнтації фазової пластини відносно площини пропускання поляризатора. В статті [16] була отримана залежність коефіцієнта пропускання оптичної системи від кута α і ступеня поляризації P :

$$\tau_{os}(\alpha, P) = \tau_p \tau_{hp} \tau_o [0.5(1 - P) + P \cos^2 \alpha]. \quad (19)$$

Після підстановки (19) в рівняння (12) отримаємо залежність температурного розділення ПТ від кутової орієнтації α поляризатора відносно оптичної осі фазової пластини при заданому ступені поляризації P .

$$NETD(\alpha, P) = NETD_D \frac{1}{0.9 \cdot 0.9 \cdot 0.85 \cdot [0.5(1 - P) + P \cos^2 \alpha]} 0.88. \quad (20)$$

Графіки цієї залежності для обраних раніше параметрів тепловізора наведено на рис. 2 і 3.

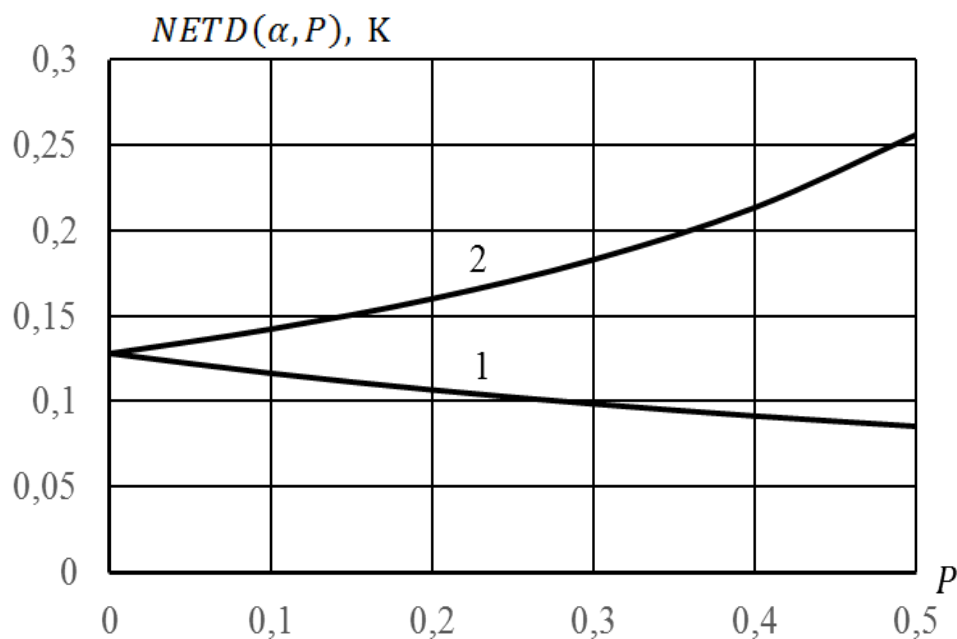


Рис. 2. Залежність температурного розділення поляризаційного тепловізора від ступеня поляризації P випромінювання тест-об'єкта для кутової орієнтації α поляризатора відносно оптичної осі фазової пластини, яка дорівнює: 1 – 0° ; 2 – 90° .

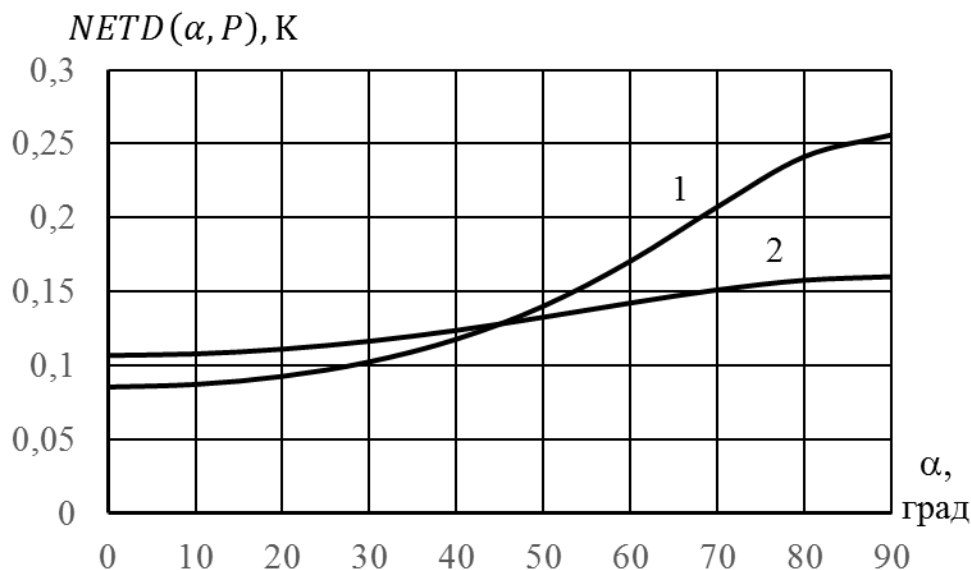


Рис. 3. Залежність температурного розділення поляризаційного тепловізора від кутової орієнтації α поляризатора відносно оптичної осі фазової пластини для ступеня поляризації: 1 – $P=0.5$; 2 – $P=0.2$.

Аналіз отриманих теоретичних результатів моделювання дозволяє зробити такі висновки:

1. Із збільшенням ступеня поляризації P температурне розділення ПТ для складової випромінювання, що поляризоване в площині спостереження ($\alpha = 0^\circ$), зменшується, а для перпендикулярної складової ($\alpha = 90^\circ$) – збільшується.
2. Для неполяризованого випромінювання ($P = 0$) коефіцієнт пропускання оптичної системи не залежить від кута α , тому температурне розділення залишається незмінним при довільній орієнтації поляризатора відносно осі фазової пластини.
3. Для повністю поляризованого випромінювання ($P = 1$) температурне розділення залежить від кута α і змінюється по закону $NETD(\alpha, P=1) \sim \cos^2 \alpha$. Якщо $\alpha = 0^\circ$, то ПТ має найменше температурне розділення (найбільшу роздільну здатність).
4. Якщо оптична вісь фазової пластини утворює з площиною поляризатора кут $\alpha = 45^\circ$, то температурне розділення ПТ не залежить від ступеня поляризації P і дорівнює 0,13 К.

Висновки

Запропонована фізико-математична модель оптико-електронної системи поляризаційного тепловізора, яка складається із послідовно розташованих на оптичній осі поляризатора, четвертьхвильової пластини і об'єктива, дозволила розробити метод визначення температурного (енергетичного) розділення тепловізора. Дослідження цього методу дало можливість:

1. Отримати рівняння для функції передачі сигналу тепловізора, яке було використано для визначення температурного розділення тепловізора.
2. В якості температурного розділення поляризаційного тепловізора запропоновано використовувати класичний параметр – еквівалентну шуму різницю температур *NETD* і стандарт NATO 4347 [17 – 19].
3. Отримати рівняння для розрахунку параметра *NETD*, яке враховує залежність коефіцієнта пропускання оптичної системи від кутової орієнтації поляризатора і фазової пластини. Дослідження цього рівняння показало, що
 - 3.1 Поляризаційний тепловізор реєструє поляризаційні характеристики тест-об'єкта і фону шляхом зміни кутової орієнтації поляризатора і фазової пластини в оптичній системі. Коефіцієнт пропускання τ_0 оптичної системи ПТ при такій зміні кутової орієнтації буде різним, що призводить до різної величини температурного розділення тепловізора [19].
 - 3.2 Температурне розділення залежить від ступеня поляризації досліджуваного випромінювання. Для неполяризованого випромінювання температурне розділення залишається незмінним при довільній орієнтації поляризатора відносно осі фазової пластини.
 - 3.3 Найменше температурне розділення (найбільша роздільна здатність) буде у випадку, коли оптична вісь фазової пластини утворює з площиною поляризатора кут $\alpha = 0^\circ$.

Отримані результати необхідно враховувати при розробці електронної системи обробки відеосигналів з матричного приймача випромінювання. В подальших дослідженнях важливо, також, розробити модель тест-об'єкта із заданими поляризаційними характеристиками ІЧ випромінювання такими як ступінь, еліптичність і азимут поляризації.

Література

1. 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.
2. Born M. Principles of optics, 7th edn. / M. Born, Wolf E. // Cambridge University. – Press, Cambridge. 7th edition. – 2002.
3. Yanga Bin. Polarization remote sensing physical mechanism, key methods and application / Bin Yanga, Taixia Wub, Wei Chenc, Yanfei Lic, Juri Knjazihhind, Anand Asundie, Lei Yan // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2017. – Volume XLII-2/W7, Wuhan, China. – P. 955–960.
4. 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. – T. 33004. – №1.

5. Физический энциклопедический словарь / Гл. ред. А. М. Прохоров. – М. : Сов. энциклопедия, 1984. – 944 с.
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. Zhao Yongqiang. Multi-band Polarization Imaging and Applications / Yongqiang Zhao, Chen Yi, Seong G. Kong, Quan Pan, Yongmei Cheng. // National Defense Industry Press, Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 2016. – 194 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. – 3857–3859 pp.
9. Сивухин Д. В. Общий курс физики. — Изд. 4-е. — Физматлит; изд-во МФТИ, 2004. — 656 с.
10. Анатичук Л.І., Вихор Л.М., Коцур М.П., Кобилянський Р.Р., Каденюк Т.Я. Оптиміальне керування часовою залежністю температури охолодження в термоелектричних пристроях // *Термоелектрика*. – № 5. – 2016. – С. 5-11.
11. Kolobrodov V.H., Mykytenko V.I., Tymchyk H.S. (2020) Polaryzatsiina model teplokontrastnykh ob'ektiv sposterezhenia [Polarization model of heat-contrast objects of observation], *Termoelektryka*, pp. 36-52.
12. Vollmer Michael. Infrared Thermal Imaging. Fundamentals, Research and Applications. / Michael Vollmer and Klaus-Peter Mollman. Second Edition. – Wiley – VCH, Weinheim, Germany. – 2018. – pp. 788.
13. Колобродов В.Г. Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження / В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 364 с.
14. Chrzanowski K. Testing thermal imagers. Practical guidebook / Krzysztof Chrzanowski. – Military University of Technology, 00-908 Warsaw, Poland, 2010. – 164 p.
15. Ллойд Дж. Системы тепловидения: Пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 416 с.
16. Kolobrodov V.G. Determination of Transmittance of Optical System of Polarizing Thermal Imager / V.G. Kolobrodov // *Visnyk NTUU KPI Serii A – Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*. – 2020. – Iss. 78. – pp. 78–85.
17. NATO Military Agency for standardization, “Definition of nominal static range performance for thermal imaging systems,” 1995.
18. Хребтов И. А. Неохлаждаемые тепловые матричные приемники ИК излучения / И. А. Хребтов, В. Г. Маляров // *Оптический журнал*. – 1997. – № 6. – С. 3–17.
19. Tymchik G.S., Kolobrodov V. H., Kolobrodov M. S., Anatoliy S. Vasyura, Paweł Komada, Zhanar Azeshova "The output signal of a digital optoelectronic processor". - *Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*, 108080W (1 October 2018)

Надійшла до редакції 28/08/2020

Колобродов В.Г., докт. техн. наук, професор
Микитенко В.И., докт. техн. наук, доцент
Тимчик Г.С., докт. техн. наук, професор
Сокол Б.В.

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

ТЕМПЕРАТУРНОЕ РАЗРЕШЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНО- ИНТЕГРИРОВАННЫХ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ТЕПЛОВИЗОРОВ

Работа посвящена разработке метода определения энергетического (температурного) разделения. Предложено использовать для этого величину эквивалентной шумовой разности температур NETD (Noise Equivalent Temperature Difference). Разработана физико-математическая модель оптико-электронной системы поляризационного тепловизора, которая позволяет вычислять ее функцию передачи сигнала. На основе этой функции разработана методика вычисления NETD. Получена формула, описывающая функциональную зависимость температурного разделения поляризационного тепловизора от угловой ориентации поляризатора относительно оптической оси фазовой пластины при заданной степени поляризации. Выполнено исследование влияния степени поляризации излучения тест-объекта на температурное разделение поляризационного тепловизора, содержащего линейный поляризатор и фазовую пластину. Был. 19, рис. 3.

Ключевые слова: поляризационный тепловизор, энергетическое разделение, эквивалентная шумовая разность температур, степень поляризации.

V.G. Kolobrodov, doc. techn. sciens, professor
V.I. Mykytenko, doc. techn. sciences, assist professor
G.S. Tymchyk, doc. techn. sciens, professor
Sokol B.V.

National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
37 Peremohy Ave., Kyiv, 03056, Ukraine
e-mail: deanpb@kpi.ua

TEMPERATURE RESOLUTION OF COMPUTER- INTEGRATED POLARIZATION THERMAL IMAGER

The work is devoted to the development of a method for determining the energy (temperature) resolution of a polarization thermal imager, which contains a linear polarizer and a phase plate. For this purpose it is proposed to use the noise equivalent temperature difference (NETD). A physico-mathematical model of an optoelectronic system of the polarization thermal imager has been developed, which allows one to calculate its signal transmission function. Based on this function, a method for calculating NETD has been developed. The formula describing functional dependence of a polarization thermal imager temperature resolution on the angular orientation of the polarizer relative to the optical axis of the phase plate at a given degree of polarization is obtained. A study of the impact of a test object radiation degree of polarization on the polarization thermal imager temperature resolution was performed.

Key words: polarization thermal imager, energy resolution, noise equivalent temperature difference, degree of polarization

References

1. Goldstein D.H. (2011). *Polarized light*. 3d ed. London - New York: CRC Press.
2. Born M., Wolf E. (2002). *Principles of optics*, 7th ed. Cambridge University.
3. Yanga Bin, Wub Taixia, Chenc Wei, Lic Yanfei, Knjazihhind Juri, Asundie Anand, Yan Lei (2017). Polarization remote sensing physical mechanism, key methods and application. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XLII-2/W7, Wuhan, China.
4. Zhang Y., Shi Z.G., Qiu T.W. (2017). Infrared small target detection method based on decomposition of polarization information. *J.of Electronic Imaging*, T 33004, №1.
5. *Fizicheskii entsyklopedicheskii slovar' [Physical encyclopedic dictionary]* (1984). A.M.Prokhorov (Ed.). Moscow: Soviet Encyclopedia [in Russian].
6. Vollmer M., Karstadt S., Mollman K.-P., Pinno F. (2001). Identification and suppression of thermal imaging. *InfraMation Proceedings*. University of Applied Sciences, Brandenburg (Germany). ITC 104 A.
7. Zhao Yongqiang, Yi Chen, Kong Seong G., Pan Quan, Cheng Yongmei (2016). *Multi-band polarization imaging and applications*. National Defense Industry Press, Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
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. Sivukhin D.V. (2004). *Obshchii kurs fiziki [General physics course]*. 4th ed. Moscow: MFTI [in Russian].
10. Anatychuk L.I., Vikhor L.M., Kotsur M.P., Kobylanskyi R.R., Kadenyuk T.Ya. (2016).

Optimal control of time dependence of cooling temperature in thermoelectric devices. *J.Thermoelectricity*, 5, 5-11.

11. Kolobrodov V.H., Mykytenko V.I., Tymchyk H.S. (2020) Poliaryzatsiina model teplokontrastnykh ob'ektiv sposterezhenia [Polarization model of heat-contrast objects of observation]. *J.Thermoelectricity*, 1, 36-52.
12. Vollmer Michael, Mollman Klaus-Peter (2018). *Infrared thermal imaging. fundamentals, research and applications*. 2nd ed. Weinheim: Wiley – VCH.
13. Kolobrodov V.G., Lykholit M.I. (2007). *Proektuvannia teploviziinykh i televiziinykh system sposterezhenia* [Design of thermal imaging and television surveillance systems]. Kyiv: KPI [in Ukrainian].
14. Chrzanowski K. (2010). *Testing thermal imagers. Practical guidebook*. Military University of Technology, 00-908 Warsaw, Poland.
15. Lloyd G. (1978). *Thermal imaging systems*. Moscow: Mir [Russian transl].
16. Kolobrodov V.G. (2020). Determination of transmittance of optical system of polarizing thermal imager. *Visnyk NTUU KPI Seriia – Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*, 78, 78–85.
17. NATO Military Agency for standardization (1995). *Definition of nominal static range performance for thermal imaging systems*.
18. Khrebtov I.A., Maliarov V.G. (1997). Neokhlazhdaemye teplovyie metricnyie priiomyiki IK izlucheniia [Uncooled thermal array IR detectors]. *Soviet Journal of Optical Technology*, 6, 3–17 [in Russian].
19. Tymchik G.S., Kolobrodov V. H., Kolobrodov M. S., Vasyura Anatoliy S., Komada Paweł, Azeshova Zhanar. (2018). The output signal of a digital optoelectronic processor. *Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*, 108080W (1 October 2018).

Submitted 28.08.2020