

МЕТОДИ І СИСТЕМИ ОПТИЧНО-ЕЛЕКТРОННОЇ ТА ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

DOI: 10.20535/1970.71(1).2026.361578

УДК 621.384.3

ДВОКАНАЛЬНИЙ ТЕПЛОВІЗОР З ПОЛЯРИМЕТРИЧНИМ КАНАЛОМ ДЛЯ РОБОТИЗОВАНИХ КОМПЛЕКСІВ

*Микитенко В. І.**Національний технічний університет України**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна**E-mail: v.mykytenko@kpi.ua*

Широке впровадження автономних систем у складі роботизованих комплексів потребує нових рішень, в тому числі в напрямку збільшення ефективності оптико-електронних засобів спостереження оточуючого середовища. Сучасні вимоги до підвищення ймовірності цілодобового виявлення малоконтрастних цілей зумовлюють необхідність використання багатоканальних підходів, зокрема поєднання тепловізійного та поляриметричного каналів.

Стаття присвячена деяким питанням розрахунку та проектування двоканальних тепловізійних систем, орієнтованих на автоматичне виявлення об'єктів у складних умовах спостереження. Розроблено методику визначення енергетичного розділення двоканального тепловізора з поляриметричним каналом. Узагальненим показником енергетичної чутливості обох інформаційних каналів тепловізора є еквівалентна шуму різниця температур NETD, яка дозволяє оцінити мінімальний температурний контраст, що може бути зареєстрований системою. Проведено аналіз двох варіантів технічної реалізації поляриметричного каналу. Перший варіант базується на використанні чвертьхвильової фазової пластинки і обертового лінійного поляризатора, другий - на застосуванні одиночного обертового лінійного поляризатора, встановленого перед мікроболометричною матрицею. Порівняльні дослідження показали, що другий підхід забезпечує вищу чутливість до поляризаційних параметрів при відносно простішій конструктивній реалізації. Показано, що об'єднання інформації в каналах тепловізора потребує попередньої обробки і має відбуватись на рівні релевантних ознак. Такий підхід дозволяє підвищити інформативність результуючого зображення та забезпечити більш надійне автоматичне виявлення об'єктів на фоні природних завад.

Отримані результати можуть бути використані при розробці перспективних автономних тепловізійних систем спостереження з покращеними характеристиками виявлення.

Ключові слова: автономна система, роботизований комплекс, тепловізор, багатоканальна система спостереження, виявлення об'єктів.

Вступ

Покращення якості дистанційних спостережень і в першу чергу - ймовірнісних характеристик виявлення об'єктів – завжди є актуальним завданням дотичних галузей науки і техніки. Суттєвий вплив на способи вирішення цього завдання має зміст поточних задач дистанційного спостереження. Наразі важлива група задач є пов'язаною з виявленням певних штучних об'єктів на природних фонах. Наприклад, виявлення наземних мін. За останні десятиріччя запропоновано і досліджено багато засобів виявлення. Серед них значна частина стосується застосування оптико-електронних систем [1, 2, 3], які забезпечують низький рівень хибних тривог за наявності великої кількості металевих предметів в ґрунті порівняно з металодетекторами. Російська агресія в Україні показала, що для розмінування величезних територій необхідне використання автоматичних або автоматизованих

засобів, які здатні працювати цілодобово. Традиційними оптико-електронними системами цілодобового спостереження є тепловізори. Але специфіка використання звичайних тепловізорів полягає в тому, що формування релевантних ознак наявності штучних об'єктів на природних фонах відбувається або за наявності власних джерел енергії на об'єктах, або при добовій зміні температури оточуючого середовища (зазвичай вранці або ввечері) [4]. Останніми роками багато уваги приділяється розробленню поляриметричних тепловізорів, які не мають таких обмежень [5, 6]. Параметри поляризації випромінювання від об'єктів відрізняються від випромінювання фонів і не є корельованими з їх інтенсивністю та спектром. Зазвичай випромінювання від об'єктів є частково поляризованим, а випромінювання від фону – неполяризованим [7]. Отже аналіз стану поляризації випромінювання фоно-цільової обстановки дає додаткову інформа-

цію про наявність штучних об'єктів в полі зору. Логічним рішенням у розширенні функціональності і покращенні ймовірнісних характеристик виявлення об'єктів є об'єднання традиційного тепловізора з тепловізійною поляриметричною системою. Таке рішення запропоновано, наприклад у [8, 9]. Автори запропонували схемотехнічні рішення, які дозволяють крім основного тепловізійного зображення отримувати також поляриметричне зображення. Можна відмітити, що майже всі публікації стосуються схемотехнічних/технологічних або програмістських (наприклад, спосіб комплексування сигналів каналів) рішень. Теоретичне забезпечення розробок розрахунковими методами, які дозволяють оцінювати ефективність конкретних технічних рішень тепловізорів з додатковим поляриметричним каналом, наразі є недосить повним. В контексті області застосування створюваного двоканального комплексу основними його характеристиками є енергетичне та просторове розділення. Для тепловізорів такими стандартними характеристиками є мінімальна виявлювальна різниця температур і мінімальна роздільна різниця температур [10, 11]. Натомість основними характеристиками поляризованого випромінювання є інтенсивність, ступінь поляризації, еліптичність і кут поляризації [6, 12], які не відображають безпосередньо енергетичне або просторове розділення. Розрахунку енергетичного та просторового розділення тепловізорів присвячено велику кількість досліджень [13, 14]. Також запропоновані методики оцінювання поляриметричних характеристик і енергетичного розділення поляризаційних тепловізорів [15]. Але розробка двоканальних систем з комплексуванням каналів вимагає наявності єдиної методики розрахунку енергетичного розділення. Рівень досліджень у галузі розрахункових методик для двоканальних тепловізорів з поляриметричним інформаційним каналом наразі є недостатнім і потребує нових розробок.

Постановка задачі

Мета статті полягає в розробці методів розрахунку енергетичного розділення, а також схемотехнічних рішень двоканальних тепловізорів з поляриметричним інформаційним каналом, які дозволяють аналізувати та синтезувати такі системи залежно від параметрів фоно-цільової обстановки. При цьому має бути враховано те, що комплекс встановлюється на роботизованій платформі, яка функціонує без участі оператора як центру прийняття рішень при оцінюванні фоно-цільової обстановки. Задача спостереження полягає у виявленні штучного об'єкту на природньому фоні.

2. Формування сигналу в двоканальному тепловізорі

Розглянемо формування інформації в двоканальних тепловізорах. Зважаючи на те, що в сучасних тепловізорах як приймач випромінювання

застосовується недорога мікроболометрична матриця (МБМ), а спостереження фоно-цільової обстановки має бути максимально оперативним, безальтернативним схемотехнічним рішенням є використання двох окремих тепловізорів, в одному з яких перед МБМ встановлено блок аналізу поляризації. З практичних міркувань доцільним є використання ідентичних за комплектацією тепловізійних каналів. Сигнал з кожного каналу після попередньої обробки та комплексування подається у центр прийняття рішень, де виходячи з заданого критерію приймається рішення про наявність або відсутність об'єкту в полі зору. Для адаптивного вибору методу комплексування залежно від змін зовнішніх умов спостереження доцільно забезпечити зворотній зв'язок між центром прийняття рішень і блоком комплексування. Розглянемо процес формування інформаційного сигналу в такій системі [16, 17].

2.1. Формування сигналу в тепловізійному каналі

Інфрачервоне (ІЧ) випромінювання (як власне, так і відбите) від об'єкта спостереження та фону проходить крізь атмосферу й потрапляє на об'єкти тепловізора. Об'єкти формують теплове зображення у фокальній площині МБМ. Далі приймач перетворює потік випромінювання, що несе інформацію про сцену, на електричний відеосигнал. Після підсилення цей сигнал обробляється аналоговими та цифровими засобами і надходить у блок комплексування зображень.

Оскільки в автоматизованих тепловізорах оператор не бере участі у виявленні та розпізнаванні об'єктів, а інформаційний сигнал знімається безпосередньо з виходу МБМ, то як критерій роздільної здатності таких систем використовується параметр *NETD* (Noise Equivalent Temperature Difference) - еквівалентна шуму різниця температур. Параметр *NETD* визначається як така різниця температур між стандартним тестовим об'єктом і фоном (обидва розглядаються як абсолютно чорні тіла), за якої відношення сигнал/шум (*SNR*) на виході еталонного фільтра дорівнює одиниці [13]. Тестовий об'єкт повинен мати кутові розміри, що у кілька разів перевищують розміри чутливого елемента матриці, щоб виключити вплив просторової роздільної здатності на результати вимірювань. Для уніфікації результатів обчислень застосовують стандартний еталонний фільтр з ефективною шумовою смугою пропускання Δf .

Із пласкої площадки об'єкта, перпендикулярної до оптичної осі спостереження, у вхідну зніццю об'єктива тепловізора потрапляє спектральний потік випромінювання

$$\Phi_{\lambda}(\lambda) = \tau_A(\lambda, R) L_{\lambda t}(\lambda) \Omega_o A_t, \quad (1)$$

де $\tau_A(\lambda, R)$ – спектральний коефіцієнт пропускання атмосфери на відстані R ; $L_{\lambda t}$ – спектральна

яскравість поверхні площадки; A_f – площа площадки; $\Omega_o = A_p / R^2$ – тілесний кут, у межах якого випромінювання від об'єкта надходить до вхідної зіниці об'єктива площею A_p .

На виході МБМ із спектральною чутливістю $R_D(\lambda)$ формується сигнал

$$u = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_\lambda(\lambda) \tau_{os}(\lambda) R_D(\lambda) d\lambda = A_f \frac{A_p}{R^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) L_{\lambda f}(\lambda) \tau_{os}(\lambda) R_D(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

де $\tau_{os}(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт пропускання оптичної системи.

Оскільки об'єкт завжди міститься на певному фоні, то інформативний сигнал є різницею

$$u_s = u_{st} - u_{sb}, \quad (3)$$

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

Об'єкт і фон як абсолютно чорні тіла є ламбертівськими випромінювачами. Також при обчисленні $NETD$ спектральний коефіцієнт пропускання оптичної системи в межах робочого спектрального діапазону вважають сталим із середнім значенням τ_{os} . Тоді інформативний сигнал визначається як

$$u_s = \frac{1}{\pi} A_f \frac{A_p}{R^2} \tau_{os} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_D(\lambda) [M_\lambda(\lambda, T_b + \Delta T) - M_\lambda(\lambda, T_b)] d\lambda = \frac{1}{\pi} A_f \frac{A_p}{R^2} \tau_{os} \times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_D(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T_b)}{\partial T} d\lambda. \quad (4)$$

де $M_\lambda(\lambda, T)$ – функція Планка; ΔT – перевищення температури об'єкта над температурою фону T_b .

Спектральну чутливість $R_D(\lambda)$ МБМ визначають із питомої виявлювальної здатності $D^*(\lambda)$ приймача випромінювання як

$$R_D(\lambda) = D^*(\lambda) \frac{u_n}{\sqrt{A_D \Delta f}}, \quad (5)$$

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

Підставивши формулу (5) у (4) знайдемо відношення сигнал/шум на виході еталонного фільтра

$$SNR = \frac{u_s}{u_n} = \frac{1}{\pi} A_f \tau_{os} \frac{A_o}{R^2} \frac{\Delta T}{\sqrt{A_D \Delta f}} \times$$

$$\times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T_b)}{\partial T} d\lambda. \quad (6)$$

За визначенням $NETD$ є такою різницею температур між об'єктом і фоном, за якої $SNR = 1$:

$$NETD = \Delta T = \frac{\pi R^2 \sqrt{A_D \Delta f}}{A_f \tau_{os} A_p \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T_b)}{\partial T} d\lambda}. \quad (7)$$

Цей вираз можна дещо спростити. По-перше, МБМ є тепловим приймачем випромінювання і має досить рівномірну спектральну характеристику чутливості $D^*(\lambda) = D^*$; по-друге, вхідна зіниця тепловізорів є зазвичай круглою, тому $A_p = \pi D_p^2 / 4$; по-третє, при фокусній відстані об'єктиву f_o' очевидно, що $A_f / R^2 = A_D / f_o'^2$. Тоді для великого об'єкту, розмір W_f якого перевищує величину проекції пікселя МБМ в просторі об'єктів,

$$W_f > R \cdot 2W_D / f_o',$$

де W_D – розмір пікселя МБМ.

Остаточно маємо:

$$NETD = \frac{4k_o^2}{\tau_{os} D^* \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T_b)}{\partial T} d\lambda} \sqrt{\frac{\Delta f}{A_D}}, \quad (8)$$

де $k_o = f_o' / D_p$ – діафрагмове число об'єктива; D_p – діаметр вхідної зіниці об'єктива; D^* – питома виявлювальна здатність МБМ; $M_\lambda(\lambda, T_b)$ – функція Планка; $[(\lambda)_1 \dots (\lambda)_2]$ – робочий спектральний діапазон; Δf – ефективна шумова смуга електронної системи; A_D – площа пікселя.

Для оцінки власних характеристик МБМ за формулою (8) зазвичай приймають ідеалізовані умови: діафрагмове число об'єктива дорівнює одиниці, коефіцієнт пропускання об'єктива також приймається рівним одиниці, а ефективна шумова смуга визначається через час t_i інтегрування матриці $\Delta f = 1/2t_i$. За цих припущень отримують спрощений вираз для параметра $NETD$ МБМ:

$$NETD_D = \frac{4}{D^* \cdot \sqrt{2A_D t_i} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda}. \quad (9)$$

При аналізі характеристик тепловізорів дистанційного спостереження у реальних умовах необхідно враховувати втрати випромінювання в

атмосфері, які описуються законом Бугера-Ламберта-Бера. Коефіцієнт пропускання атмосфери τ_A експоненційно зменшується зі зростанням відстані R до об'єкта та залежить від умов спостереження:

$$\tau_A(R) = \exp(-k_A R), \quad (10)$$

де k_A – показник ослаблення атмосфери; за сприятливих умов пропускання $k_A = 0,2 \text{ км}^{-1}$, а за несприятливих умов $k_A = 1 \text{ км}^{-1}$.

З урахуванням атмосферного ослаблення формулу (9) для всієї тепловізійної системи подамо у вигляді:

$$NETD_S(R) = NETD_D \frac{k_o^2 K_D}{\tau_{os}} \sqrt{2t_i \Delta f} \exp(-k_A R), \quad (11)$$

$$\text{де } K_D = \frac{\lambda_2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T_{td})}{\partial T} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T_b)}{\partial T} d\lambda} - \text{коефіцієнт викорис-}$$

тання МБМ, T_{td} – температура тест-об'єкта при паспортизації параметра МБМ $NETD_D$; T_b – температура фону, на якому знаходиться об'єкт спостереження.

Прийнявши $\Delta f = 1/2t_i$, з врахуванням коефіцієнту використання K_D МБМ, який визначається співвідношенням інтегральних характеристик випромінювання тестового об'єкта та фону і відображає відмінність між умовами калібрування та реального спостереження, маємо:

$$NETD_S(R) = NETD_D \frac{k_o^2 \cdot K_D}{\tau_{os}} \exp(-k_A R). \quad (12)$$

2.2. Формування сигналу в поляриметричному каналі

Визначення енергетичного розділення поляриметричного каналу також має здійснюватись на основі параметру $NETD$. Виходячи з прийнятої схемної конфігурації двоканального тепловізору, очевидним є те, що процес формування сигналу в поляриметричному каналі відрізняється від тепловізійного каналу тільки наявністю додаткових перетворень сигналу в блоці аналізу поляризації. Оскільки розглядається енергетичне розділення, то відмінність двох інформаційних каналів полягає в наявності додаткового множника при обрахунку коефіцієнту пропускання оптичної системи.

Можливі дві схеми побудови поляриметричних тепловізійних каналів. В одному випадку блок аналізу поляризації виконано у вигляді матриці фокальних мікрополяризаторів, розміщеної безпосередньо перед МБМ [18]. В іншому випадку блок

аналізу поляризації є окремим пристроєм, розміщеним між об'єктивом та МБМ. Зазвичай такий пристрій містить обертовий лінійний поляризатор [19]. На практиці здебільшого використовується саме друге рішення оскільки тепловізори з мікрополяризаторами мають високу вартість і мало поширені на ринку. Розглянемо два варіанти побудови блоку аналізу поляризації з обертовим лінійним поляризатором. Перший варіант передбачає послідовне розміщення на оптичній осі об'єктиву чвертьхвильової фазової пластинки та лінійного поляризатора. Ця класична схема дає можливість вимірювати всі параметри вектору Стокса і визначити поляризацію будь-якого типу. За другим варіантом перед об'єктивом встановлюється тільки обертовий лінійний поляризатор. При цьому кругову або еліптичну поляризацію визначити неможливо, а лінійно поляризоване випромінювання викликає амплітудну модуляцію сигналу на виході поляризатора при його обертанні.

Якщо блок аналізу поляризації складається з розміщених послідовно фазової пластинки та лінійного поляризатора, то коефіцієнт пропускання τ_{os} оптичної системи тепловізору з поляриметричним каналом залежить від кута α між площиною пропускання поляризатора і оптичною віссю чвертьхвильової пластинки, ступеня поляризації P і кута ν нахилу лінійно поляризованої компоненти частково поляризованого випромінювання. Також необхідно врахувати коефіцієнти пропускання: ІЧ об'єктива τ_o , френелівські втрати на першій і останній поверхнях оптичних елементів τ_p і поглинання в оптичному середовищі поляризатора і фазової пластинки τ_{hp} . Остаточо маємо:

$$\tau_{os}(\alpha) = \tau_o \tau_p \tau_{hp} [0,5(1-P) + P \cos^2(\alpha - \nu)]. \quad (13)$$

За другим варіантом коефіцієнт пропускання τ_{os} оптичної системи тепловізору залежить від кута φ між оптичною віссю поляризатора і напрямом поляризації випромінювання та описується законом Малюса [20]

$$\tau_{os}(\varphi) = \tau_o \tau_p \cos^2 \varphi. \quad (14)$$

Ця формула є справедливою для лінійно поляризованого випромінювання. Оскільки об'єкт випромінює частково поляризовані хвилі, то необхідно також взяти до уваги неполяризовану складову, для якої $\tau_{os} = 0,5$. Тоді з врахуванням ступеня поляризації P об'єкту для другого варіанту отримуюмо формулу аналогічну (13)

$$\tau_{os}(\varphi) = \tau_o \tau_p [0,5(1-P) + P \cos^2 \varphi]. \quad (15)$$

Оскільки напрям поляризації випромінювання об'єкту заздалегідь невідомий, то при моделюванні зручно вимірювати кут φ від вертикального відносно оптичної осі об'єктиву напрямку.

3. Розрахунок енергетичного розділення в двоканальних тепловізорах

Визначимо енергетичне розділення двоканальної оптико-електронної системи спостереження, що включає тепловізійний і поляриметричний канали. Для розрахунків використаємо умови спостереження, що задані стандартом STANAG 4347 [21]. Тестовий об'єкт розміром $V_{tp} \times W_{tp} = (2,3 \times 2,3) \text{ м}^2$ має температурний контраст $\Delta T_{tp} = 2 \text{ К}$ на фоні з температурою $T_b = 288 \text{ К}$. Об'єкт і фон є абсолютно чорними тілами.

3.1. Тепловізійний канал

Припустимо, що тепловізійний канал характеризується такими параметрами:

- об'єкт має фокусну відстань $f'_o = 50 \text{ мм}$, діаметр вхідної зіниці $D_p = 50 \text{ мм}$, інтегральний коефіцієнт пропускання $\tau_o = 0,75$;
- мікроболометрична матриця фірми RTX Corporation, США [22] має кількість стовпців та рядків $p_D \times q_D = 640 \times 480$ з розміром пікселя K_D і $NETD_D = 50$ при $k_o = 1$, $T_{td} = 300 \text{ К}$. Кадрова частота становить $f_f = 50 = 50 \text{ Гц}$.

В формулу (12) підставимо $k_o = 1$, $\tau_o = 0,75$, $NETD_D = 50 \text{ мК}$. Коефіцієнт використання K_D МБМ визначається для робочого спектрального діапазону (і при $T_b = 288 \text{ К}$ і $T_{td} = T_b + \Delta T_{td} = 300 \text{ К}$). В результаті розрахунку маємо $K_D = 237 / 263 = 1,1$.

Остаточна аналітична залежність для дослідження енергетичного розділення тепловізійного каналу набуде вигляду

$$NETD_s(R) = \exp(-k_{\Delta} R) \cdot 50 \frac{1}{0,75} \exp(-k_{\Delta} R) \cdot 1,1 = \\ = 73,3 \exp(-k_{\Delta} R) \text{ мК}.$$

На невеликих відстанях $\exp(-k_{\Delta} R) = 1$ і $NETD_s(0) = 73,3$.

3.2. Поляриметричний канал

В цьому випадку до характеристик об'єкту та фону додається ступінь поляризації їх випромінювання. Вважатимемо, що для об'єкту $P = P_{ob}$, а для фону - $P = P_{\phi} = 0$. Характеристики об'єктиву вважатимемо такими ж, як в тепловізійному каналі. Інтегральні коефіцієнти пропускання елементів блоку аналізу поляризації: для поляризатора $\tau_p = 0,9$, для фазової пластинки $\tau_{hp} = 0,9$.

Аналіз стану поляризації випромінювання здійснюється шляхом визначення нормованих величин оптичного сигналу на вході МБМ:

- в першому варіанті схеми блоку аналізу поляризації при куті повороту α поляризатора відносно оптичної осі фазової пластини на $\alpha = 0^\circ$, $\alpha = 45^\circ$, $\alpha = 90^\circ$ і $\alpha = 135^\circ$. Слід врахувати два окремих випадки: коли $\alpha = 45^\circ$ або $\alpha = 135^\circ$ випромінювання стає циркулярно поляризованим. При цьому коефіцієнт пропускання блоку аналізу поляризації дорівнює $0,5\tau_o\tau_p\tau_{hp}$ і не залежить від ступеня поляризації досліджуваного випромінювання;
- в другому варіанті схеми блоку аналізу поляризації при куті повороту φ поляризатора відносно вертикального напрямку на 0° , 45° , 90° і 135° .

Отримаємо $NETD_{pD1}$ поляриметричного

каналу за першим варіантом шляхом підстановки вхідних параметрів у формулу (12) з урахуванням невеликої дальності спостереження ($\exp(-k_{\Delta} R) = 1$) і того, що загальний коефіцієнт пропускання оптичної системи має бути розрахованим за формулою (13):

$$NETD_{pD1} = \frac{1,1 \cdot NETD_D}{0,75 \cdot 0,9 \cdot 0,9} \times \\ \times \frac{1}{[0,5(1 - P_{ob}) + P_{ob} \cos^2(\alpha - \nu)]} = \\ = \frac{90,5}{[0,5(1 - P_{ob}) + P_{ob} \cos^2(\alpha - \nu)]}.$$

Отримаємо $NETD_{pD2}$ поляриметричного

каналу за другим варіантом шляхом підстановки вхідних параметрів у формулу (12) з урахуванням того, що загальний коефіцієнт пропускання оптичної системи має бути розрахованим за формулою (15). Для частково поляризованого випромінювання маємо:

$$NETD_{pD2} = \frac{1,1 \cdot NETD_D}{0,75 \cdot 0,9} \times \\ \times \frac{1}{[0,5(1 - P_{ob}) + P_{ob} \cos^2 \varphi]} = \\ = \frac{81,5}{[0,5(1 - P_{ob}) + P_{ob} \cos^2 \varphi]}.$$

Залежність енергетичного розділення для першого та другого варіантів побудови блоку аналізу поляризації від кута α і кута φ при різних величинах ступеня поляризації P_{ob} об'єкту наведено в табл. 1. В першому варіанті прийнято $\nu = 0^\circ$.

Таблиця 1. Енергетичне розділення поляриметричного каналу

$P_{об} = 0,2$				
α , град	0°	45°	90°	135°
$NETD_{pD1}$, мК	151	181	226	181
φ , град	0°	45°	90°	135°
$NETD_{pD2}$, мК	136	163	204	163
$P_{об} = 0,5$				
α , град	0°	45°	90°	135°
$NETD_{pD1}$, мК	121	181	362	181
φ , град	0°	45°	90°	135°
$NETD_{pD2}$, мК	109	163	326	163
$P_{об} = 0,9$				
α , град	0°	45°	90°	135°
$NETD_{pD1}$, мК	95	181	1810	181
φ , град	0°	45°	90°	135°
$NETD_{pD2}$, мК	86	163	1630	163

4. Обговорення результатів

Слід зазначити, що всі перетворення сигналів в об'єктиві та за рахунок умов функціонування МБМ в енергетичному домені в розглянутій моделі фактично описуються добутком $\frac{k_o^2 \cdot K_D}{\tau_{os}}$ в (12).

Цей спрощений підхід є достатньо адекватним для тепловізійного каналу, де кожний кадр по-суті є інформативним сигналом, а також для поляриметричних тепловізорів з матричними фокальними мікрополяризаторами. Натомість в поляриметричному каналі з обертовим поляризаційним фільтром інформація має бути обрахована за кількома кадрами при різних положеннях фільтру. Для такого поляриметричного каналу отримані результати відображають ідеалізовану статичну картину, коли обертовий поляризатор миттєво змінює кут нахилу своєї оптичної осі на 45°. Тобто запропонована методика дозволяє визначити потенційну чутливість поляриметричного каналу.

Енергетичне розділення тепловізійного каналу за вибраних вхідних даних становить 73,3 мК, що є значно меншим, ніж в поляриметричному каналі, побудованому як за першим, так і за другим варіантом. В поляриметричному каналі сигнал модулюється за амплітудою, а в тепловізійному – ні. Це дає підстави стверджувати, що комплексування зображень на рівні пікселів не буде ефективним в двоканальному тепловізорі. Очевидно, що об'єднання інформації має відбуватись після попередньої обробки в інформаційних каналах на рівні релевантних ознак.

Для традиційних тепловізорів на етапі виявлення об'єкту основною релевантною ознакою є енергетична яскравість (амплітуда сигналу). В поляриметричному каналі основна інформація міс-

титься в амплітудній модуляції сигналу. Оскільки $NETD$ пов'язана з відношенням сигнал/шум, то за сталого значення шуму ця величина визначає глибину амплітудної модуляції сигналу. Із таблиці видно, що глибина модуляції сигналу за наявності або відсутності в оптичній схемі чвертьхвильової пластинки змінюється незначно. Присутність пластинки погіршує енергетичне розділення (збільшує $NETD$). Отже у випадку, коли релевантною ознакою наявності штучного об'єкту на природньому фоні є часткова лінійна поляризація випромінювання, доцільно блок аналізу поляризації виконати у вигляді обертового лінійного поляризатора.

Розраховані значення $NETD$ дозволяють в разі потреби визначити дальність виявлення об'єктів в різних каналах тепловізора за формулою (12). Але це не дає можливості встановити реальні характеристики виявлення при використанні комплексування. По-перше, має бути визначений алгоритм обробки сигналу в поляриметричному каналі для вилучення релевантних ознак. По-друге, на жаль на відміну від достатньо опрацьованих розрахункових методик для двоканального комплексування на рівні пікселів, математичне моделювання на рівні релевантних ознак потребує суттєвого доопрацювання.

Висновки

Розглянуто питання проектування і схемотехніки тепловізійної системи, призначеної для автоматичного виявлення об'єктів у складі роботизованого комплексу. Розроблена методика визначення енергетичного розділення двоканального тепловізора з поляриметричним каналом. Показником енергетичного розділення обох інформаційних каналів тепловізора є еквівалентна шуму різниця температур $NETD$. Досліджено два варіанти технічної реалі-

зації поляриметричного каналу і встановлено, що для практичного застосування найбільш доцільним є встановлення перед мікроболометричною матрицею обертового лінійного поляризатора. Показано, що об'єднання інформації в каналах тепловізора потребує попередньої обробки і має відбуватись на рівні релевантних ознак. Для визначення таких споживчих характеристик двоканального тепловізора, як дальність виявлення об'єктів, необхідне подальше доопрацювання методів обробки поляриметричних тепловізійних зображень і розрахункового інструментарію для оцінювання комплексування на рівні релевантних ознак.

Література

- [1] A., Linderhed, S. Sjökvist, O. Steinvall, et al. "MOMS: multi-optical mine detection system: project overview", *Proc. SPIE 6395, Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications III*, 639503, 2006. DOI: 10.1117/12.690379.
- [2] I. Schwaetzer, "Electro-Optical Land Mine Detection", in: H. Schubert, A. Kuznetsov, Eds. *Detection of Explosives and Landmines*. NATO Science Series, vol. 66, 2002. Springer, Dordrecht. DOI: 10.1007/978-94-010-0397-1_5
- [3] H. Kasban, O. Zahran, S. M. Elaraby, et al. "A Comparative Study of Landmine Detection Techniques", *Sensing and Imaging*, vol. 11, no. 3, pp. 89-112, 2010. DOI: 10.1007/s11220-010-0054-x
- [4] G. M. Koretsky, J. F. Nicoll, M. S. Taylor, *A Tutorial on Electro-Optical/Infrared (EO/IR) Theory and Systems*. Institute for Defense Analyses. 2013.
- [5] M. Yang, W. Xu, Z. Sun, et al. "Mid-wave infrared polarization imaging system for detecting moving scene", *Opt. Lett.* 45, pp. 5884-5887, 2020. DOI: 10.1364/OL.400872
- [6] L. Yan, B. Yang, F. Zhang, et al. *Polarization Remote Sensing Physics*. Peking University Press and Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2020. DOI: 10.1007/978-981-15-2886-6
- [7] W. Jong, F. Cremer, K. Schutte, J. Storm, "Usage of polarization features of land mines for improved automatic detection", *Proc SPIE*. 2000. DOI: 10.1117/12.396250.
- [8] H. Shi, Y. Liu, C. He, et al. "Analysis of infrared polarization properties of targets with rough surfaces", *Opt. Laser Technol.* 151, 108069, 2022.
- [9] X. Liu, Z. Jiang, C. Niu, et al. "Infrared Imaging System with a Local Polarization Channel for Target Detection", *Appl. Sci.* 2024, 14, 10659. DOI: 10.3390/app142210659
- [10] R. G. Driggers, M. H. Friedman, J. W. Devitt, *Introduction to Infrared and Electro-Optical Systems*, Third Edition. Norwood: Artech House. 2022.
- [11] B. P. Teaney, D. P. Haefner, "Evaluating the performance of an IR imaging system: a tutorial", *Proc. SPIE 10625, Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXIX*, 106250K (26 April 2018). <https://doi.org/10.1117/12.2303975>
- [12] V. G. Kolobrodov, G. S. Tymchik, V. I. Mykytenko, et al. "Technology of Infrared Radiation Polarizer", *Proceedings of SPIE, Optical Fibers and Their Applications*, vol. 11456, 2020. DOI: 10.1117/12.2569786
- [13] G. C. Holst, *Electro-Optical Imaging System Performance*, Fifth Edition. JCD Publishing, 2008.
- [14] V. G. Kolobrodov, V. I. Mykytenko, "Refinement of thermal imager minimum resolvable temperature difference calculating method", *Proceedings of SPIE*. 9809, 2015, 98090C.
- [15] Q. Fu, Y. Zhang, Y., et al. "Analysis of infrared polarization imaging characteristics based on long wave infrared zoom system", *Front. Phys.* 11:1224726, 2023. DOI: 10.3389/fphy.2023.1224726.
- [16] V. G. Kolobrodov, V. I. Mykytenko, G. S. Tymchik, B. V. Sokol, "Temperature resolution of computerintegrated polarization thermal imager", *Journal of Thermoelectricity*, 2020(4), pp. 22–37, 2020. DOI: 10.63527/1607-8829-2022-1-64-81
- [17] I. G. Chyzh, V. G. Kolobrodov, A. V. Molodyk, V. I. Mykytenko, G. S. Tymchik, et al. "Energy resolution of dual-channel optoelectronic surveillance system", *Proc. SPIE 11581, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments*, 2020, 115810K. DOI: 10.1117/12.2580338.
- [18] Snapshot Polarimetric Imaging in the Infrared. [Online]. Available: <https://www.sandia.gov/app/uploads/sites/145/2021/11/Science-Matters-Jan-2008-Photonics-Snapshot-Polarimetric-Imaging.pdf>.
- [19] В. Г. Колобродов, В. І. Микитенко, Б. Ю. Пінчук, Б. В. Сокол і В. М. Тягур, "Комп'ютерно-інтегрований метод виявлення об'єктів поляризаційним тепловізором", *Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаробудування*, (85), с. 21-26, 2021. DOI: 10.20535/RADAP.2021.85.21-26.
- [20] Є.А. Оберемок, *Прикладна фізика. Лазерна поляриметрія: Методичний посібник до лабораторного практикуму*. Київ, Україна: Київський національний університет ім. Тараса Шевченка, 2014.
- [21] STANAG 4347. Definition of Nominal Static Range Performance for Thermal Imaging Systems. NATO, 18 July 1995.
- [22] 3rd GEN FLIR. [Online]. Available: <https://www.rtx.com/raytheon/what-we-do/land/flir>

UDC 621.384.3

Volodymyr Mykytenko*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute," Kyiv, Ukraine***DUAL-CHANNEL THERMAL IMAGER WITH A POLARIMETRIC CHANNEL FOR ROBOTIC SYSTEMS**

The widespread implementation of autonomous systems within robotic complexes requires new solutions, including improvements in the efficiency of optoelectronic environmental surveillance systems. Modern requirements for increasing the probability of round-the-clock detection of low-contrast targets necessitate the use of multi-channel approaches, in particular the combination of thermal imaging and polarimetric channels.

This paper addresses certain issues related to the calculation and design of dual-channel thermal imaging systems intended for automatic object detection under challenging observation conditions. A methodology for determining the energy resolution of a dual-channel thermal imager with a polarimetric channel has been developed. The generalized indicator of the energy sensitivity of both information channels of the thermal imager is the noise equivalent temperature difference (NETD), which makes it possible to estimate the minimum temperature contrast detectable by the system.

An analysis of two technical implementations of the polarimetric channel has been carried out. The first approach is based on the use of a quarter-wave phase plate and a rotating linear polarizer, while the second employs a single rotating linear polarizer placed in front of a microbolometer matrix. Comparative studies have shown that the second approach provides higher accuracy in measuring polarization parameters with a relatively simpler design.

It is shown that information fusion from the thermal imager channels requires preliminary processing and should be performed at the level of relevant features. This approach increases the informativeness of the resulting image and ensures more reliable automatic detection of objects against background interference.

The obtained results can be used in the development of advanced autonomous thermal imaging surveillance systems with improved detection performance.

Keywords: autonomous system, robotic complex, thermal imager, multi-channel surveillance system, object detection.

*Надійшла до редакції
25 березня 2026 року*

*Рецензовано
16 квітня 2026 року*



© 2026 Copyright for this paper by its authors.
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).