

УДК 621.384.3

Комп'ютерно-інтегрований метод виявлення об'єктів поляризаційним тепловізором

Колобродов В. Г.¹, Микитенко В. І.¹, Пінчук Б. Ю.², Сокол Б. В.³, Тягун В. М.²

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

²Казенне підприємство «Конструкторське бюро спеціального приладобудування "Арсенал" »

³Державне підприємство «Укрметртестстандарт»

E-mail: v.mykyt@ukr.net

Досліджено спрощену математичну модель перетворення і аналізу інфрачервоного випромінювання фоно-цільової обстановки різного ступеня поляризації в тепловізорах. Розглядається монохроматичне випромінювання, яке містить природню та лінійно поляризовану компоненти. Модель поляризованого оптичного сигналу є адитивною. Стан поляризації об'єктів описується параметрами вектора Стокса. Розглянуто принципи формування поляризаційних зображень та їх аналізу з використанням обертових поляризатора і фазової пластинки. На виході оптичної системи встановлено матричний приймач випромінювання. Він перетворює двовимірний розподіл інтенсивності випромінювання в електричний відеосигнал. Таке поєднання поляриметричного та відео каналів утворює поляризаційний тепловізор, який сформував нову перспективну нішу технічних засобів дистанційного зондування. Запропоновано алгоритм обробки сигналів в поляризаційних тепловізорах за умови того, що у випромінюванні цілі лінійно поляризована компонента є більш вираженою, ніж у випромінюванні фону. На етапі аналізу поляризації сумарного сигналу, що надходить від фоно-цільової обстановки, визначається напрям переважної поляризації всього зображення. У випадку спостереження малорозмірних цілей він співпадає з напрямом поляризації фону. За рахунок вирізання оптичними засобами вказаної поляризаційної компоненти сигналу із загальної суміші, велика частина фонового зображення усувається, а повністю поляризована компонента випромінювання цілі залишається значною мірою збереженою. Контраст кінцевого зображення цілі на фоні суттєво зростає, збільшується ймовірність правильного виявлення цілі.

Ключові слова: дистанційне спостереження; тепловізор; інфрачервона поляриметрія

DOI: [10.20535/RADAP.2021.85.21-26](https://doi.org/10.20535/RADAP.2021.85.21-26)

Вступ

Тепловізори широко використовуються для виявлення і розпізнавання цілей на основі реєстрації теплового радіаційного контрасту яскравості (інтенсивності) між об'єктом і фоном [1–3]. За низького контрасту фоново-цільової обстановки (ФЦО) виявити ціль, а тим більше її розпізнати, достатньо складно. Для підвищення ймовірності виявлення і розпізнавання цілі, а також для зменшення ймовірності помилкової тривоги, у світі розпочались активні дослідження і розробки тепловізорів, в яких носієм основним інформації про стан ФЦО є поляризаційні властивості випромінювання цілі і фону (завад) [4–6].

В інфрачервоному (ІЧ) діапазоні спектру поляризаційне випромінювання утворюється як за рахунок власного теплового випромінювання об'єкта, так і в результаті відбивання об'єктом випромінювання від зовнішніх джерел. Як правило, випромінювання від об'єкта є частково поляризованим,

а від фону – природним, неполяризованим [1, 7]. Основними характеристиками поляризованого випромінювання є інтенсивність, ступінь поляризації, азимут і еліптичність поляризації [7, 8]. Для вимірювання цих характеристик в інфрачервоній області спектру використовують поляризаційні тепловізори [6]. Основною характеристикою будь-якого тепловізора є енергетичне розділення. Воно визначається пороговим радіаційним контрастом об'єкта спостереження, що розташований на рівномірному фоні. Поляриметричні тепловізійні методи спостереження штучних об'єктів на природних фонах в ряді випадків забезпечують значно більший радіаційний контраст, ніж звичайні тепловізійні спостереження. Існує значна кількість монографій і статей, присвячених розрахунку і вимірюванню енергетичного розділення класичних тепловізорів [9–11]. В той же час практично відсутня науково-технічна інформація стосовно моделювання поляризаційних тепловізорів для визначення їх основних характеристик.

Метою роботи є дослідження одного із методів виявлення теплоконтрастної цілі за допомогою тепловізора, де інформація про стан об'єкта міститься у відмінностях в поляризаційних параметрах випромінювання цілі і фону.

1 Принципи формування та аналізу поляризаційних зображень

Поляризаційні характеристики випромінювання, що змінюються під час розповсюдження і відбивання, найчастіше описують вектором Стокса, вектором Джонса або матрицею Мюллера [12]. Вектор Стокса був запропонований для дослідження частково поляризованого, а також неполяризованого і повністю поляризованого світла. Чотири параметри вектора Стокса $\vec{S} = \{S_0, S_1, S_2, S_3\}$ описують інформацію про стан поляризації цілі. Найбільшого розповсюдження отримав метод чотирьох сегментацій модуляції детектора поляризаційним станом випромінювання для вимірювання вектора Стокса [6, 13–15].

На рис. 1 зображена схема, яка пояснює принцип роботи такого поляризаційного тепловізора. Досліджуване частково поляризоване випромінювання з амплітудою \vec{E}_{pp} проходить через поляризатор і фазову пластину, які можуть змінювати кут поляризації θ і різницю фаз ε між складовими E_x і E_y вектора \vec{E}_{lp} при механічному обертанні, або неперервній періодичній модуляції. Об'єктив формує зображення на матричному приймачі випромінювання (МПВ), який перетворює двовимірний розподіл оптичного сигналу в одновимірний електричний сигнал. На виході блоку МПВ утворюється сигнал, на основі якого отримують значення чотирьох параметрів вектора Стокса поляризаційного зображення.

Параметри Стокса дозволяють визначити основні параметри поляризованого випромінювання: інтенсивність, ступінь поляризації, кут поляризації і еліптичність поляризації.

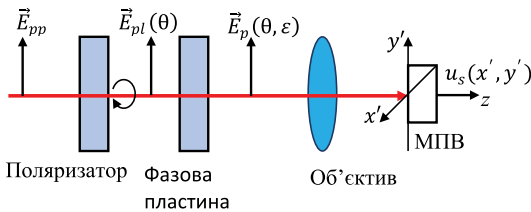


Рис. 1. Принцип роботи поляризаційного тепловізора

Для спрощення дослідження будемо вважати, що розглядається монохроматичне випромінювання [13].

Нехай частково поляризоване випромінювання з інтенсивністю I_0 і частотою ω розповсюджується

уздовж осі z . Електричне поле з напруженістю \vec{E}_{pp} розкладемо на дві плоскі хвилі $E_x(t)$ і $E_y(t)$, що поляризовані уздовж осей x і y :

$$E_x(t) = E_{x0}(t) \exp[j(\varphi_x(t) - \omega t)];$$

$$E_y(t) = E_{y0}(t) \exp[j(\varphi_y(t) - \omega t)],$$

де $E_{x0}(t)$ і $E_{y0}(t)$ – амплітуди складових електричного поля уздовж осей x і y , що мають фази $\varphi_x(t)$ і $\varphi_y(t)$, відповідно.

Хвилі $E_x(t)$ і $E_y(t)$ проходять через поляризатор з площиною поляризації, яка орієнтована під кутом θ відносно осі x , і фазову пластинку, що забезпечує фазовий кут ε між хвилями $E_x(t)$ і $E_y(t)$. Тому на виході фазової пластини формується електричне поле, яке описується функцією

$$E(t, \theta, \varepsilon) = E_x \cos \theta + E_y \exp(j\varepsilon) \sin \theta.$$

Тоді інтенсивність результуючої хвилі

$$\begin{aligned} I(\theta, \varepsilon) &= \langle EE^* \rangle = \langle E_x E_x^* \rangle \cos^2 \theta + \langle E_y E_y^* \rangle \sin^2 \theta + \\ &+ \langle E_x E_y^* \rangle \cos \theta \exp(-j\varepsilon) \sin \theta + \\ &+ \langle E_x^* E_y \rangle \cos \theta \exp(j\varepsilon) \sin \theta = \\ &= I_x \cos^2 \theta + I_y \sin^2 \theta + 2\sqrt{I_x I_y} \cos \theta \sin \theta \cos(\delta - \varepsilon), \end{aligned} \quad (1)$$

де $\delta = \varphi_x - \varphi_y$ – фазовий кут між комплексними амплітудами E_x і E_y .

Рівняння (1) дозволяє отримати чотири параметри вектора Стокса, які залежать від кутів $\{\theta, \varepsilon\}$:

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

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

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

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

Частково поляризоване випромінювання можна подати у вигляді двох незалежних складових: неполяризованого (природнього) випромінювання з інтенсивністю I_n і лінійно поляризованого випромінювання (повністю поляризованого) з інтенсивністю I_p . Відповідно параметри Стокса частково поляризованого випромінювання можна виразити через дві складові:

$$S_{pp} = S_n + S_p, \quad (2)$$

де S_n і S_p – вектори Стокса для природнього і поляризованого випромінювання.

Ступінь поляризації визначається як

$$P = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0},$$

а поляризаційна еліптичність визначається як

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{S_3}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}} \right).$$

В більшості випадків циркулярно поляризована компонента у випромінюванні ФЦО є малою і тому

складова вектора Стокса $S_3 = 0$ [16,17]. На практиці, зазвичай, розглядається ступінь лінійної поляризації $DoLP$, кут поляризації (орієнтації) θ_p та інші параметри для такого випадку:

$$P = DoLP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0}; \quad \theta_p = \tan^{-1} \left(\frac{S_2}{S_1} \right).$$

2 Поляризаційний метод виявлення цілі

З появою ІЧ маскувальної технології та ІЧ завод традиційні методи виявлення цілі, що засновані на візуалізації інтенсивності ІЧ випромінювання, стикаються з великими проблемами. В останній час, технологія виявлення поляризації випромінювання в ІЧ діапазоні спектру була розроблена для декількох застосувань. Розроблені методи дозволяють отримати диференціальну інформацію про поляризацію ІЧ випромінювання від цілі і фону. Ця технологія ґрунтується на таких характеристиках як ступінь поляризації, кут поляризації, різниця між горизонтальними та вертикальними компонентами поляризації, різниця між 45° та -45° компонентами поляризації, тощо. Через вказані вище особливості та переваги, технологія детектування ІЧ зображення поляризації стала ефективним методом для вирішення проблем при виявленні і розпізнаванні цілі.

При вивченні механізмів поляризації ІЧ випромінювання було встановлено, що випромінювання багатьох цілей є частково поляризованим і може бути розкладено на суму лінійно поляризованих компонентів і компонентів природного випромінювання (рис. 2) [12, 18]. Отже компоненти природного випромінювання від цілі і фону можна вилучити, а далі для виявлення цілі і сегментації використовуються тільки лінійно поляризовані компоненти. На цій ідеї засновано ряд методів виявлення цілі і сегментації [6, 19], в яких використовуються вектор Стокса для аналізу випромінювання від цілі і фону з метою подавлення фону, усунення випадкового шуму і поліпшення поляризаційних характеристик цілі.

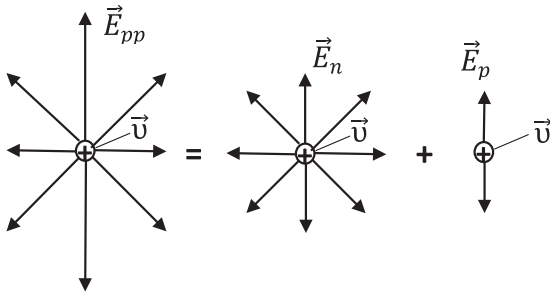


Рис. 2. Векторна модель частково поляризованого випромінювання цілі $\vec{E}_{pp} = \vec{E}_n + \vec{E}_p$

Результуюча інтенсивність ІЧ випромінювання ФЦО у відповідності до формули (2) розглядається як суперпозиція інтенсивності поляризованого I_p і неполяризованого світла (природного випромінювання) I_n , тобто

$$I_{pp} = I_p + I_n.$$

Після проходження поляризатора (рис. 1), інтенсивність буде залежати від кута орієнтації θ_p частково поляризованого випромінювання відносно осі x та кута спостереження (вимірювання) φ . Згідно з законом Малюса маємо

$$I_{pp}(\varphi) = I_n(\varphi) + I_p(\varphi) = \frac{1}{2}I_n + I_p \cos^2(\varphi - \theta_p), \quad (3)$$

де $\frac{1}{2}I_n$ – природна компонента; $I_p \cos^2(\varphi - \theta_p)$ – лінійно поляризована компонента.

Ступінь поляризації визначимо за класичною формулою

$$P = \frac{I_{\parallel} - I_{\perp}}{I_{\parallel} + I_{\perp}}, \quad (4)$$

де I_{\parallel} і I_{\perp} – компоненти інтенсивності двох взаємно перпендикулярних компонентів поляризації, які отримуємо із формули (3):

$$I_{\parallel}(\varphi) = I(\theta_p) = I_n(\theta_p) + I_p(\theta_p) = \frac{1}{2}I_n + I_p. \quad (5)$$

$$I_{\perp}(\varphi) = I\left(\theta_p + \frac{\pi}{2}\right) = I_n\left(\theta_p + \frac{\pi}{2}\right) + I_p\left(\theta_p + \frac{\pi}{2}\right) = \frac{1}{2}I_n. \quad (6)$$

З рівнянь (4)–(6) отримаємо ступінь поляризації випромінювання на пікселях приймача, що відповідають цілі, та на фонових пікселях

$$P = \frac{I_p}{I_n + I_p} = \frac{I_p}{I_{pp}}.$$

Використовуючи формулу (3), визначимо інтенсивність випромінювання, яке потрапляє на окремі (i, j) пікселі МПВ від цілі і фону в довільному напрямку поляризації:

$$I_{t;ij}(\varphi) = I_{t;n;i,j}(\varphi) + I_{t;p;i,j}(\varphi), \quad (7)$$

де $I_{t;ij}(\varphi)$ – інтенсивність випромінювання в напрямку поляризації φ , яке надходить від цілі на піксель i, j ; $I_{t;n;i,j}$ і $I_{t;p;i,j}$ – природний і лінійно поляризований компоненти цього випромінювання, відповідно.

Аналогічно визначаємо інтенсивність випромінювання, яке надходить від фону:

$$I_{b;ij}(\varphi) = I_{b;n;i,j}(\varphi) + I_{b;p;i,j}(\varphi). \quad (8)$$

Із системи рівнянь (3), (4) і (7), (8) отримуємо модель поляризаційного тепловізора, яка визначає інтенсивність випромінювання, яке надходить до МПВ від цілі і фону в довільному напрямку поляризації:

$$I_{t;ij}(\varphi) = I_{t;ij} \left[\frac{1}{2}(1 - P_{t;ij}) + P_{t;ij} \cos^2(\varphi - \theta_{pt;ij}) \right]; \quad (9)$$

$$I_{b;ij}(\varphi) = I_{b;ij} \left[\frac{1}{2} (1 - P_{b;ij}) + P_{b;ij} \cos^2(\varphi - \theta_{pb;ij}) \right]. \quad (10)$$

Рівняння (9) і (10) дозволяють побудувати поляризаційні еліпсоїди, в яких еліптичність відображає ступінь поляризації, більша вісь еліпса вказує напрямком поляризації θ_p , а вписане в еліпс коло відповідає природній складовій випромінювання. Лінійно поляризовані компоненти в напрямку кута поляризації θ_p є найбільшими, а в перпендикулярному напрямку дорівнюють нулю, як показано на рис. 3. Відповідно різниці між кутами поляризації фону і цілі, знаходимо різницю інтенсивностей $I(\theta_{pb;ij} - \frac{\pi}{2}) = I_{t;ij} - I_{b;ij}$ в перпендикулярному напрямку до напрямку поляризації $\theta_{pb;ij}$ фону, яка є інтенсивністю поляризаційної карти ФЦО. Ця карта містить частково поляризаційне випромінювання цілі та природного фону. Під час обробки сигналів з МПВ, напрямком кута поляризації фону може бути замінений на середнє значення кута поляризації у межах всього зображення.

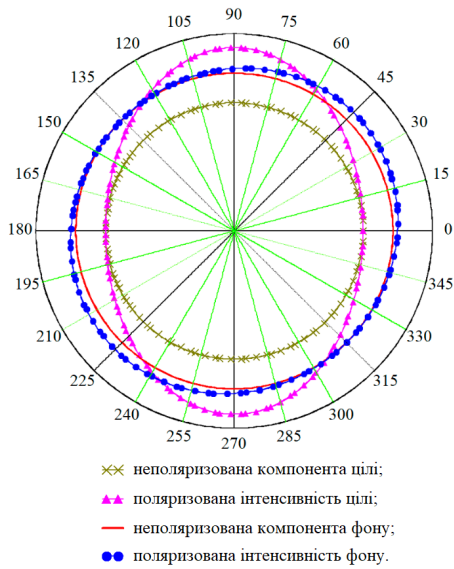


Рис. 3. Залежності інтенсивності поляризованого випромінювання цілі та фону від напрямку поляризації φ [6, 19]

Отже, в основу поляризаційного методу виявлення цілі доречно покласти засоби визначення напрямку оптимального кута поляризації випромінювання, що проходить на МПВ, такі, що зберігають якомога більше інформації про поляризацію цілі, і наскільки можливо більше затримують інформацію про поляризацію фону. При спостереженні цілі малого розміру середнє значення кута поляризації θ_{pb} фонового випромінювання можна апроксимувати середнім кутом поляризації $\bar{\theta}_p$ всього зображення. Потім обчислюється змінна складова поляризації $I(\bar{\theta}_p - \frac{\pi}{2})$ в напрямку перпендикулярному до кута поляризації фону. Тоді фонові інформація може

бути практично повністю вилучена із сигналу і збережеться тільки повністю поляризований компонент інтенсивності цілі $I_{p,t}(\varphi)$, який визначається як різниця між поляризованою і неполяризованою компонентами $\frac{1}{2}I_n$ сигналу в кожному пікселі МПВ

$$I_{p,t}(\bar{\theta}_p - \frac{\pi}{2}) = I(\bar{\theta} - \frac{\pi}{2}) - \frac{1}{2}I_n.$$

Таким чином, значна частина фонового зображення усувається, повністю поляризовані компоненти випромінювання цілі будуть збережені. Контраст цілі на фоні суттєво зростає.

3 Алгоритм обробки поляризаційного зображення

Процес обробки відеосигналів МПВ поляризаційного тепловізора для підвищення відношення сигнал/шум можна представити в такій послідовності (рис. 4) [19].

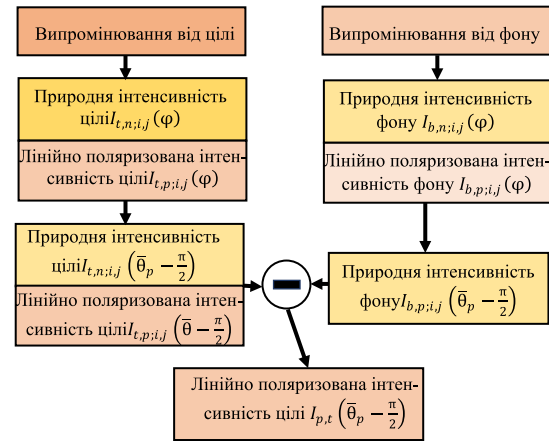


Рис. 4. Послідовність обробки оптичного сигналу в поляризаційному тепловізорі

Алгоритм обробки містить 5 етапів:

1. Отримують три кадри тепловізійного зображення для трьох напрямків поляризації $I(\varphi_1)$, $I(\varphi_2)$, $I(\varphi_3)$. Використовуючи рівняння

$$I(\varphi_i) = \frac{1}{2}(S_0 + S_1 \cos 2\varphi_i + S_2 \sin 2\varphi_i) \quad (11)$$

обчислюють параметри Стокса S_0, S_1, S_2 .

2. Для частково поляризованого випромінювання від цілі знаходять складові: лінійно поляризовану $I_{t,p} = \sqrt{S_1^2 + S_2^2}$ і природню $I_{t,n} = S_0 - \sqrt{S_1^2 + S_2^2}$.

3. Обчислюють лінійно поляризовану складову для напрямку поляризації $\bar{\theta}_p - \frac{\pi}{2}$, перпендикулярному до середнього значення кута поляризації $\bar{\theta}_p$, за допомогою рівняння (11).

4. Отримують значення лінійно поляризованої складової випромінювання від пікселів цілі, вилучаючи природний компонент поляризації $I_n(\bar{\theta}_p - \frac{\pi}{2}) = \frac{1}{2}I_n$ із компонента змінної поляризації $I(\bar{\theta}_p - \frac{\pi}{2})$, зберігаючи при цьому лінійно поляризовану складову $I_{p,t}(\bar{\theta}_p - \frac{\pi}{2})$ від пікселів цілі.

5. Після перетворення в блоці МПВ отриманого значення інтенсивності в електричний сигнал порівнюють його з пороговим значенням для забезпечення виявлення цілі на фоні завад з заданою ймовірністю.

Ефективність роботи поляризаційного тепловізора можна оцінити двома параметрами:

— контрастом цілі у вихідному зображенні, який зручно визначити на виході МПВ як

$$C = \frac{u_t - u_b}{u_t + u_b},$$

де $u_t \sim I_{p,t}(\bar{\theta}_p - \frac{\pi}{2})$ – електричний відеосигнал, сформований пікселем цілі; $u_b \sim I_{t,n}(\bar{\theta}_p - \frac{\pi}{2}) - I_{b,n}(\bar{\theta}_p - \frac{\pi}{2})$ – електричний відеосигнал, сформований пікселями цілі і фону (з урахуванням шумів МПВ);

— відношенням сигнал/шум в поляризаційному зображенні ФЦО

$$\mu = \frac{u_t - u_b}{\sigma_b}, \quad (12)$$

де σ_b – середньоквадратичне значення флуктуацій сигналу від фонових пікселів.

Причому, якщо перша характеристика – контраст – дає скоріш якісну оцінку процесу перетворення сигналів в поляризаційному тепловізорі, то друга дозволяє безпосередньо обчислити ймовірнісні характеристики виявлення. Наприклад, ймовірність правильного виявлення в методі однократного відліку визначиться на основі формули (12) як

$$P_d = 1 - L(p[(\ln \Lambda_{th} - 0, 5\mu)/\sqrt{\mu}]),$$

де $L(p(u))$ – функція Лапласа (інтеграл ймовірностей); Λ_{th} – порогове відношення правдоподібності.

Висновки

Одним із шляхів підвищення ймовірності виявлення і розпізнавання цілей в ІЧ діапазоні спектру при невеликих теплових контрастах є використання відмінності в поляризації випромінювання від цілі і фону. Розглянута і досліджена математична модель поляризаційного тепловізора, яка використовує частково поляризоване випромінювання від цілі і природне випромінювання від фону, що дозволило:

1. Проаналізувати процес перетворення випромінювання від цілі і фону в оптичній системі тепловізора, яка складається із поляризатора, фазової пластини, ІЧ об'єктива і МПВ. В основі цього аналізу лежить модель частково поляризованого випромінювання цілі, що містить природню і лінійно поляризовану компоненти.

2. Дослідити алгоритм вилучення із сигналу фоново-цільової обстановки природніх складових цілі і фону. Результатом є формування на МПВ зображення, яке містить тільки лінійно поляризовану

складову випромінювання від цілі. Це призводить до значного підвищення контрасту ФЦО, а отже і до збільшення ймовірності виявлення цілі.

3. Недоліками розглянутого алгоритму є:

- певна невизначеність у вимірюваннях кута поляризації $\bar{\theta}_p$ випромінювання фону;
- повне вилучення сигналу фону можливе лише при рівності природніх складових випромінювання від цілі і фону;
- не враховується лінійно поляризована складова фону.

4. Незважаючи на наведені недоліки розглянутого алгоритму обробки сигналів, такий поляризаційний тепловізор дозволяє значно підвищити ймовірність виявлення і розпізнавання цілі.

References

- [1] Vollmer M., Mollman K.-P. (2018). *Infrared Thermal Imaging. Fundamentals, Research and Applications. Second Edition*. WileyVCH: Weinheim, Germany, 788 p. ISBN: 978-3-527-41351-5.
- [2] Vollmer M., Henke S., Karstadt S., Mollmann K.-P., Pino F. (2004). Identification and Suppression of Thermal Reflections in Infrared Thermal Imaging. *InfraMation Proceedings*, Vol. 5, pp. 287-298.
- [3] Peri'c D., Livada B., Peri'c M. and Vuji'c S. (2019). Thermal Imager Range: Predictions, Expectations, and Reality. *Sensors*, Vol. 19(15), 3313, pp. 1–23. DOI:10.3390/s19153313.
- [4] Tooley R. D. (1990). Man-Made Target Detection Using Infrared Polarization. *Proc. SPIE, Polarization considerations for optical systems II*, Vol. 1166, pp. 52-60. DOI:10.1117/12.962878.
- [5] Sadjadi F. A., Chun C. S. L. (2003). Automatic detection of small objects from their infrared state-of-polarization vectors. *Optics letters*, Vol. 28, No. 7, pp. 531-533. DOI:10.1364/OL.28.000531.
- [6] Zhang Y., Shi Z. G., Qiu T. W. (2017). Infrared small target detection method based on decomposition of polarization information. *Journal of Electronic Imaging*, Vol. 26, No. 3. DOI: 10.1117/1.JEI.26.3.033004.
- [7] Jian Gong, Liang Liu, Youjin He. (2018). The infrared polarization characteristics of ship-target in marine environment. *Optical Sensing and Imaging Technologies and Applications*, 108460W, pp. 1-10. DOI:10.1117/12.2504055.
- [8] Goldstein D. H. (2011). *Polarized Light. Third edition*. CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group. London New York, 786 p. DOI: 10.1201/b10436.
- [9] Schuster N., Kolobrodov V. G. (2004). *Infrared Thermography*. Zweite, überarbeitete und erweiterte Ausgabe. WILEYVCH. Berlin, 354 p. ISBN: 978-3-527-40509-1.
- [10] Chrzanowski K. (2010). *Testing thermal imagers. Practical guidebook*. Military University of Technology, 00-908 Warsaw, Poland, 164 p. ISBN: 978-83-61486-81-7.
- [11] Kaplan H. (2007). *Practical Applications of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment. 3rd ed.* SPIE Press (Washington), 192 p. ISBN: 9780819467232.

- [12] Born M., Wolf E. (1999). *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light, 7th edn.* Press, Cambridge: Cambridge University, 950 p. DOI: 10.1017/CBO9781139644181.
- [13] Zhao Y., Yi C., Kong S. G., Pan Q., Cheng Y. (2016). *Multi-ban Polarization Imaging and Applications, Part of the Advances in Computer Vision and Pattern Recognition.* National Defense Industry Press, Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 194 p. DOI: 10.1007/978-3-662-49373-1.
- [14] Gurton K. P., Yuffa A. J., Videen G. W. (2014). Enhanced facial recognition for thermal imagery using polarimetric imaging. *Optics Letters*, Vol. 39, No. 13, pp. 3857-3859. DOI: 10.1364/OL.39.003857.
- [15] Kolobrodov V. G., Lykholit M. I. (2007). *Proektuvannya teplovizyynykh i televizyynykh system sposterezheniya [Design of thermal imaging and television surveillance systems]*. K.: NTUU «KPI», 364 p. ISBN 966-622-230-2. [In Ukrainian].
- [16] Liu M., Zhang X., Liu T., Shi G., et al. (2019). On-Orbit Polarization Calibration for Multichannel Polarimetric Camera. *Applied Science*, Vol.9, No.7. DOI: 10.3390/app9071424.
- [17] Zhao Y., Gong P., Pan Q. (2008). Object Detection by Spectropolarimetric Imagery Fusion. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 46, No. 10, pp. 3337-3345. DOI: 10.1109/TGRS.2008.920467.
- [18] Kolobrodov V. G., Mykytenko V. I., Tymchik G. S. (2020). Polyaryzatsiyna model' teplokontrastnykh ob'ektiv sposterezheniya [Polarization model of thermal contrast objects of observation]. *Termoelektryka*, No. 1, pp. 36-52. ISSN 1726-7714. [In Ukrainian].
- [19] Karpenko I. V., Kolobrodov V. G., Sokol B. V. (2018). Polyaryzatsiynnyy metod vyyavlennya teplo kontrastnoyi tsili na foni zavrad [Polarization method for detecting heat contrast target against the background of interference]. *Visnyk KhNU, seriya: Tekhnichni nauky*, No.1, pp. 33-37. ISSN 2307-5732. [In Ukrainian].

Компьютерно-интегрированный метод обнаружения объектов поляризационным тепловизором

Колобродов В. Г., Микитенко В. И., Пинчук Б. Ю., Сокол Б. В., Тягур В. М.

Исследована упрощенная математическая модель преобразования и анализа инфракрасного излучения фоно-целевой обстановки разной степени поляризации в тепловизорах. Рассматривается монохроматическое излучение, которое содержит естественную и линейно поляризованную компоненты. Модель поляризованного оптического сигнала является аддитивной. Состояние поляризации объектов описывается параметрами вектора Стокса. Рассмотрены принципы формирования поляризационных изображений и их анализа с использованием вращающихся поляризатора и фазовой пластинки. На выходе оптической системы установлен матричный приемник излучения. Он превращает двумерное распределение интенсивности излучения в электрический видеосигнал. Такое сочетание поляриметрического и видео каналов образует поляризационный тепловизор, который сформировал новую перспективную нишу технических средств дистанционного зондирования.

Предложен алгоритм обработки сигналов в поляризационных тепловизорах при условии, что в излучении цели линейно поляризованная компонента является более выраженной, чем в излучении фона. На этапе анализа поляризации суммарного сигнала, поступающего от фоно-целевой обстановки, определяется преобладающее направление поляризации всего изображения. В случае наблюдения малоразмерных целей оно совпадает с направлением поляризации фона. За счет вырезания оптическими средствами указанной поляризационной компоненты сигнала из общей смеси, большая часть фонового изображения устраняется, а полностью поляризована компонента излучения цели остается в значительной степени сохранной. Контрастность конечного изображения цели на фоне существенно возрастает, увеличивается вероятность правильного обнаружения цели.

Ключевые слова: дистанционное наблюдение; тепловизор; инфракрасная поляриметрия

Computer-Integrated Method of Object Detection by Thermal Polarimetric Imager

Kolobrodov V. G., Mykytenko V. I., Pinchuk B. Yu., Sokol B. V., Tiagur V. M.

Introduction. A simplified mathematical model of infrared radiation transformation and analysis in thermal imagers for different degrees of polarization target environment has been studied.

Theoretic results. Monochromatic radiation, which contains natural and linearly polarized components, is considered. The polarized optical signal model is additive. The state of radiation polarization is described by Stokes vectors. The principles of polarization image formation and their analysis using a rotating polarizer and a phase plate are considered. A matrix radiation detector is installed at the output of the optical system. It converts two-dimensional distribution of radiation intensity into an electrical video signal. This combination of polarimetric and video channels forms a polarimetric thermal imager, which has formed a new promising niche of technical means for remote sensing. An algorithm for signal processing in polarimetric thermal imagers is proposed. It is supposed, that linearly polarized component is more pronounced in the target radiation than in the background radiation. At the stage of analysis of the polarization of the total signal coming from the target environment, the direction of the predominant polarization of the whole image is determined. In the case of observing small targets, this direction coincides with the direction of background polarization. Due to the optical means of cutting the specified polarization component of the signal from the total mixture, most of the background image is eliminated, and the fully polarized component of the target radiation remains largely preserved.

Conclusions. The contrast of the final image of the target on the background increases significantly, the probability of correct detection of the target increases.

Key words: remote sensing; thermal imager; infrared polarimetry