

ПРИЛАДОБУДУВАННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

DOI: 10.20535/kpissn.2020.4.205442

УДК 621.384.3

В.Г. Колобродов, В.П. Налбандова, Б.В. Сокол*

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

*corresponding author: sokolbohdan@ukr.net

МЕТОДОЛОГІЯ ВИЯВЛЕННЯ ТЕПЛОВИХ ВІДБИТТІВ В ІНФРАЧЕРВОНОМУ ДІАПАЗОНІ

Проблематика. Теплові відбиття є поширеним джерелом проблем за інтерпретації інфрачервоних (ІЧ) теплових зображень. Зокрема мокрі чи поліровані поверхні, як-от скло, метали, а також цегла та бетон, можуть легко відбивати інфрачервоне випромінювання, але часто залишаються поза увагою. Якщо їх не помітити, ці теплові відбиття можуть призвести до некоректного виявлення та розпізнавання об'єкта чи неправильної інтерпретації його дійсної температури.

Мета дослідження. Метою теоретичного аналізу між тепловим випромінюванням об'єкта та його відбиттям є розробка методів для можливості приглушення чи принаймні ідентифікації таких відбитків за допомогою оптичних методів.

Методика реалізації. Світло стає поляризованим, коли воно взаємодіє з об'єктом або речовиною за допомогою різних механізмів, як-от розсіювання, відбивання чи пропускання. Однією з можливостей реалізації таких методів є використання інфрачервоних поляризаторів у поєднанні з тепловізійною системою спостереження.

Результати дослідження. Описано фізико-математичну модель виявлення відбитків і можливостей їх усунення. Відбите світло є частково поляризованим, тому основним підходом для його ідентифікації є знаходження параметрів Стокса. Авторами було розглянуто 3 основних методи для аналізу стану поляризації: використання обертового поляризатора перед системою спостереження, спеціальна матриця з розташованими поверх кожного пікселя поляризаторами під певними кутами та метод, який ґрунтується на діленні амплітуди в поляриметри, що поділяє весь потік на 4 канали, в яких визначають повний вектор Стокса.

Висновки. Виявлено переваги та недоліки методів дослідження стану поляризації. Визначено основні особливості конструкцій, які необхідні для кожного методу, і вартість їх реалізації задля їх подальшого використання при розробці поляризаційної тепловізійної камери для безпілотних літальних апаратів.

Ключові слова: тепловізор; поляризація; теплові відбитки; вектор Стокса; стан поляризації; виявлення відбитків.

Вступ

Основними фізичними величинами, пов'язаними з оптичним випромінюванням, є інтенсивність, довжина хвилі, когерентність і поляризація. Звичайні поліхроматичні камери вимірюють інтенсивність оптичного випромінювання в певному діапазоні [1]. Довгохвильові ІЧ (LWIR) приймачі випромінювання успішно використовуються у різноманітних сферах життєдіяльності, наприклад, у комплексах нічного бачення (виявлення та розпізнавання об'єктів), спостереженні за погодою тощо. Однак, системи спостереження LWIR часто мають труднощі з виявленням у місцях, де дзеркальні поверхні можуть відбивати світло в їх робочому діапазоні. Відбивання може легко спотворити форму реальних об'єктів, тому для покращення ефективності розпізнавання та виявлення об'єктів необхідно мінімізувати відбивання від таких поверхонь.

Відбивання від об'єкта можна виявити за 2-ма унікальними характеристиками поляризації: різницею 2-х ортогональних поляризованих компонентів (E_p й E_s) і кута поляризації. Поляризація світла – фізична характеристика оптичного випромінювання, яка описує поперечну анізотропію світлових хвиль, тобто нееквівалентність різних напрямків у площині, перпендикулярній світловому променю. Для електромагнітної хвилі вектори напруженості електричного \vec{E} , магнітного \vec{H} полів і швидкості світла \vec{v} завжди ортогональні, тобто утворюють праву трійку декартової системи координат. Вектор \vec{v} збігається з напрямком розповсюдження променя світла, а орієнтація вектора \vec{E} визначає вид поляризації [2].

У цій роботі представлений метод виявлення відбивання, що ґрунтується на поляризаційних властивостях відбивання. Цей метод дає змогу виявити та вилучити відбите випромінювання від об'єктів у зображеннях LWIR.

Світло стає поляризованим, коли воно взаємодіє з речовиною за допомогою різних механізмів, як-от розсіювання, відбивання чи пропускання та несе набір інформації ортогональних складників: E_p й E_s . Різниця між цими складниками допомагає знайти ділянки відбитого зображення, а нерівномірність кута поляризації в області відбивання створює сильне обмеження для його виявлення [3]. Також деякі складнощі при усуненні областей відбивання дає те, що відбите світло лише частково поляризоване. Далі у статті будуть розглянуті можливі аспекти усунення недоліків виявлення відбитків й основна фізико-математична модель самого процесу.

Постановка задачі

Розробити фізико-математичну модель явища теплового відбиття. Ця модель дасть змогу розробити методику для ідентифікації та приглушення відбиття в ІЧ діапазоні випромінювання, що зменшить похибки при виявленні теплоконтрастних цілей.

Формування методу

У [4] було описано, як від латунної пластини з великою шорсткістю відбувається відбивання в ІЧ діапазоні 8–14 мкм. Цей ефект можна спостерігати на рис. 1.

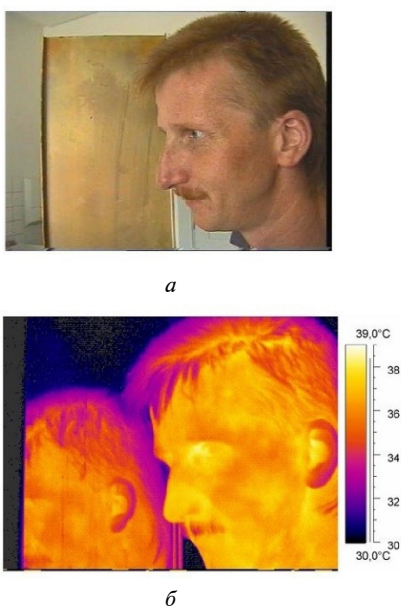


Рис. 1. Зображення відбитого випромінювання у видимому (а) й ІЧ (б) діапазонах [4]

Ця пластина являє собою шорстку поверхню, тому у видимій області спектра прямого відбиття не спостерігається. При дослідженні за допомогою ІЧ камери LW у діапазоні довжин хвиль 8–14 мкм одразу ж можна побачити відбиток від пластини. Очевидно, що пластина є поганим дзеркалом у видимому, але хорошим дзеркалом в ІЧ діапазоні.

Така поведінка зумовлена відношенням шорсткості поверхні до довжини хвилі випромінювання λ . Якщо λ менша чи дорівнює величині шорсткості поверхні, світло розсіюється дифузно, тобто хорошого дзеркального зображення не видно. Для довжин хвиль, значно більших за розміри шорсткості, випромінювання відбивається дзеркально, як від дзеркала. Класична аналогія: футбольний м'яч буде відбитий від сітчастого дроту найімовірніше згідно з законом відбивання, якщо розмір сітки набагато менший за діаметр м'яча. Тепер уявімо, що відбувається, якщо будуть використані менші кульки.

Також автори [4] провели статистичний аналіз шорсткості інших матеріалів і з'ясували, що саме мікроструктура поверхні (шорсткість) впливає на перехід від дзеркального до дифузного відбивання. Плоскі та поліровані поверхні можуть легко призвести до дзеркального відбивання ІЧ випромінювання, навіть якщо вони не відбивають у видимому діапазоні. Тому під час будь-якого аналізу ІЧ теплових зображень необхідно враховувати можливості теплового відбивання.

Якщо їх не помітити, теплові відбитки можуть бути виявлені хибно, як джерела тепла на поверхнях досліджуваних тіл. Існує безліч можливих джерел тепла, які можуть провокувати відбивання, наприклад: сонце, нерухомі джерела, люди тощо.

Фізико-математична модель

Загальновідомим є те, що плоскі поліровані поверхні відбивають певну частину падаючого на них світла, тоді як інша частина заломлюється в матеріал і поглинається ним (рис. 2).

Залежно від природи матеріалу, відбиття може бути:

- направленим (дзеркальним);
- направлено розсіяним;
- рівномірно розсіяним (рівномірно дифузним).

Для ідеальних дифузно розсіювальних поверхонь кутовий розподіл інтенсивності відпо-

відає закону Ламберта, тому таку поверхню можна вважати джерелом Ламберта.

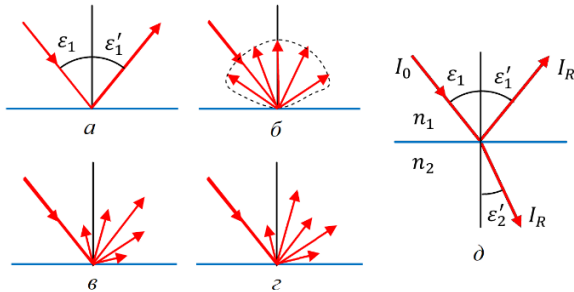


Рис. 2. Відбивання та заломлення світла. Види відбивання: *a* – дзеркальне; *b* – дифузне; *c* – дифузне направлене; *z* – змішане; *d* – загальний принцип закону заломлення

Залежно від кількості відбитого світла визначають коефіцієнт відбивання R , наприклад, для дзеркал R повинен бути близько 100 % (1,00). Із закону відбивання знаходиться напрям відбитого від поверхні світла (кут ϵ'_1), після чого з рівнянь Френеля [2] обчислюється значення коефіцієнта відбивання R .

Відповідно до законів відбивання та заломлення, на основі електромагнітної теорії світла загальний коефіцієнт відбиття R складається з 2-х часткових енергетичних коефіцієнтів відбивання: коли вектор плоскополяризованої хвилі, площина поляризації якої паралельна R_p і перпендикулярна R_s площині падіння променя (рис. 3).

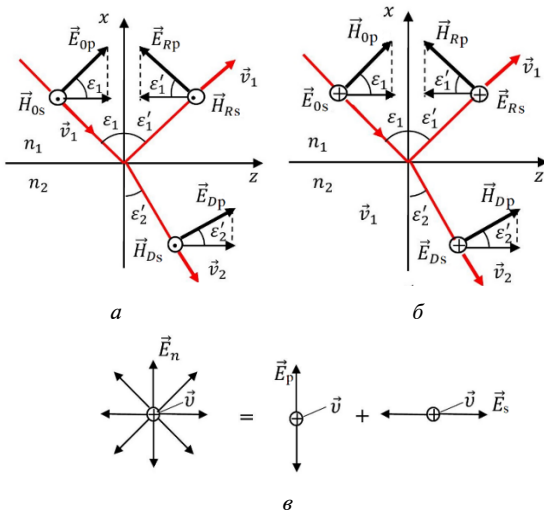


Рис. 3. Променева схема для плоскополяризованої хвилі: *a* – для паралельного складника E_p ; *b* – для перпендикулярного складника E_s ; *c* – модель природнього світла

Отже, згідно з рис. 3, формули Френеля для часткових і загального коефіцієнтів відбиття будуть записані так:

$$R = \frac{1}{2}(R_p + R_s) = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\operatorname{tg}(\epsilon_1 - \epsilon'_2)}{\operatorname{tg}(\epsilon_1 + \epsilon'_2)} \right)^2 + \left(\frac{\sin(\epsilon_1 - \epsilon'_2)}{\sin(\epsilon_1 + \epsilon'_2)} \right)^2 \right]. \quad (1)$$

При нормальному падінні світла, коли $\epsilon'_1 \rightarrow 0$, отримуємо з (1) загальновідому формулу Френеля:

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2.$$

Основним вхідним параметром є показник заломлення. Наприклад, для прозорих матеріалів залежність коефіцієнта відбивання світла, що падає з повітря на скло, що характеризується показником заломлення $n_2 = 1,52$, наведена на рис. 4. Коефіцієнт відбивання залежить від поляризації падаючого світла, яка визначається як орієнтація вектора електричного поля електромагнітної хвилі відносно площини падіння.

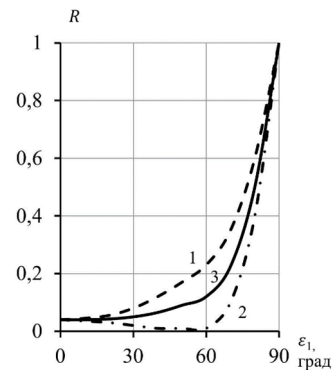


Рис. 4. Залежність коефіцієнтів відбиття від кута падіння ϵ_1 : 1 – R_s ; 2 – R_p ; 3 – R

При падінні променя під кутом Брюстера $\epsilon_1 = \epsilon_B$ частковий коефіцієнт відбивання R_p стає рівним нулю, паралельного складника у відбитій хвилі немає. Відбита хвиля в цьому разі буде плоскополяризованою в площині, перпендикулярній до площини падіння. Заломлена хвиля буде частково поляризованою з найбільшим ступенем поляризації. Як видно з формули (1), $R_p = 0$, коли $\epsilon_1 + \epsilon'_2 = 90^\circ$, тобто коли відбитий і заломлений промені взаємно перпен-

дикулярні (рис. 5). Цей ефект використовується в фотографії: значні відбивання від дзеркальних поверхонь можуть бути легко приглушені за допомогою поляризаційних фільтрів.

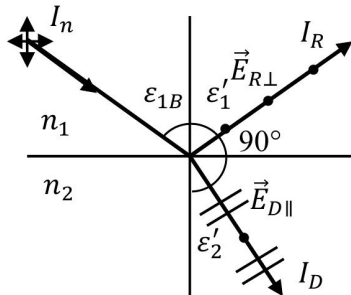


Рис. 5. Визначення кута Брюстера

Коефіцієнт відбивання може бути розрахований не тільки для прозорих тіл, а й для поглинаючих матеріалів, як-от, наприклад, металів. Теорія дає аналогічні результати, а основна відмінність полягає в тому, що такі матеріали характеризуються комплексним показником заломлення: $n_c = n - jnk_c$. Отримані залежності коефіцієнтів відбивання виглядають аналогічно тим, що й для прозорих матеріалів, але мінімальний коефіцієнт відбивання зазвичай не досягає нуля. Відбите світло тільки частково поляризоване, а поляризаційні фільтри можуть бути корисні лише для його часткового приглушення. Схожа ситуація відбувається й при переході від видимого діапазону спектра до ІЧ області.

Визначення стану поляризації через параметри Стокса

Найбільш поширений підхід для опису стану поляризації випромінюваного чи відбитого світла полягає у вимірюванні параметрів Стокса: S_0 , S_1 , S_2 і S_3 [5]. Параметри Стокса визначаються вимірюванням інтенсивності випромінювання, яке проходить через пару поляризатор/ хвильова пластина, орієнтовану під різними кутами, для вимірювання величини конкретного стану поляризації:

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

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

$$S_2 = I(45^\circ) + I(-45^\circ);$$

$$S_3 = I_R + I_L,$$

де $I(\alpha)$ – виміряна інтенсивність випромінювання лінійних станів під кутом α до вертикалі, а I_R (I_L) – праве (ліве) спрямоване циркулярно поляризоване випромінювання. Для повного чи частково поляризованого випромінювання може бути визначено ступінь повної поляризації (DoP) як

$$\text{DoP} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0}. \quad (2)$$

Проте, для більшості застосувань параметр $S_3 \approx 0$, який визначає циркулярну поляризацію [6]. В цьому випадку рівняння (2) набуває вигляду:

$$\text{DoLP} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0},$$

де DoLP зазвичай називають ступенем лінійної поляризації.

Методи дослідження стану поляризації

В останні роки були розроблені методи для фільтрації й аналізу стану поляризації в ІЧ діапазоні, одним з яких є використання конструкції матриці з поділом фокальної площини (DoFP) [7]. Пристрої DoFP виготовлені на основі мікроболометричних матриць із нанесенням на кожен піксель поляризатора як дифракційної ґратки, що забезпечує декілька переваг, порівнюючи з традиційними поляризаторами. Масив цих ґраток називають мікрополяризаторами (МРА), що формують зображення у фокальній площині матриці (ФРА), як показано на рис. 6. Цей принцип схожий із шаблоном кольорної візуалізації Байєра, за винятком того, що шаблон має різні стани поляризації, а не основні кольори. Це дає можливість зображенню МРА містити повний набір вимірів інтенсивності поляризації для отримання параметрів Стокса в кожній області зображення [8].

Ще один із часто використовуваних підходів – це обертання поляризаційних елементів перед об'єктивом камери. Цей підхід привабливий, оскільки є відносно простим як у дизайні системи, так й у відновленні даних. Однак очевидним недоліком є те, що за такої умови об'єкт спостереження та тепловізор повинні бути нерухомими, щоб уникнути руху між кадрами. На рис. 7 наведено приклад загального поляриметра, що обертається. У цьому типі поляриметра обертання поляризаційних елементів спричиняє

модуляцію поляризованого світла, що падає на фокальну площину з місця спостереження. На основі отриманої інформації з пікселів створюються зображення Стокса, які можна використовувати для отримання зображень ступеня лінійної поляризації, ступеня кругової поляризації чи інших похідних величин, як-от орієнтації чи еліптичності.

Найчастіше в поляриметрах обертається поляризатор. У цьому підході виявляються лише стани лінійної поляризації. До того ж швидкість обертання надто повільна для досягнення звичних частот кадрів [9].

Наступний метод ґрунтується на діленні амплітуди в поляриметрі. Цей тип поляриметра складається з 4-х окремих масивів приймачів випромінювання. Ця система складається з 4-х окремих камер, встановлених так, що єдиний об'єкт використовується з набором поляризаційних дільників променів, хвильових пластин й об'єктивів для отримання поляриметричного зображення (рис. 8). Жорсткі механічні кріплення використовуються для фіксації камер у положеннях, що виходять на 4 виходи кубиків-дільників. Блок із поляризаційними кубиками, що розділяє пучок, використовується для збалансування вимірювань лінійних і кругових складників поляризації випромінювання. Камери одночасно фіксують 4 зображення, необхідні для обчислення повного зображення Стокса, усуваючи помилкові ефекти поляризації завдяки зміні кадру під час процесу їх комбінування.

У цьому прикладі поляриметричний блок ділення пучка розроблений для вимірювання повного вектора Стокса. Блок пучка містить 3 дільники променя: 1 поляризаційний кубик 80/20 і 2 поляризаційних кубики 50/50, а також чвертьхвильову та напівхвильову пластини [10].

У таблиці наведені переваги та недоліки різних методів дослідження стану поляризації.

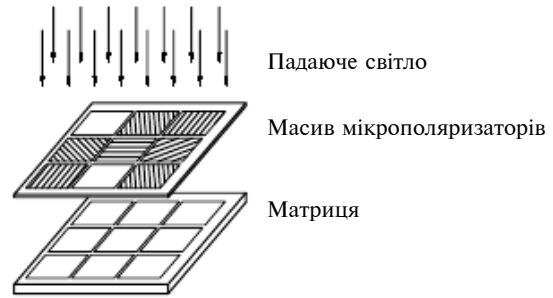


Рис. 6. Конструкція матриці з поділом фокусної площини (DoFP)

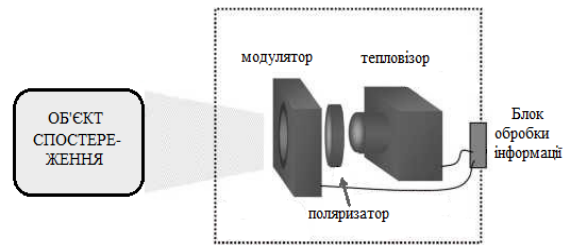


Рис. 7. Визначення стану поляризації випромінювання поляриметром, в якому обертається фазова пластинка

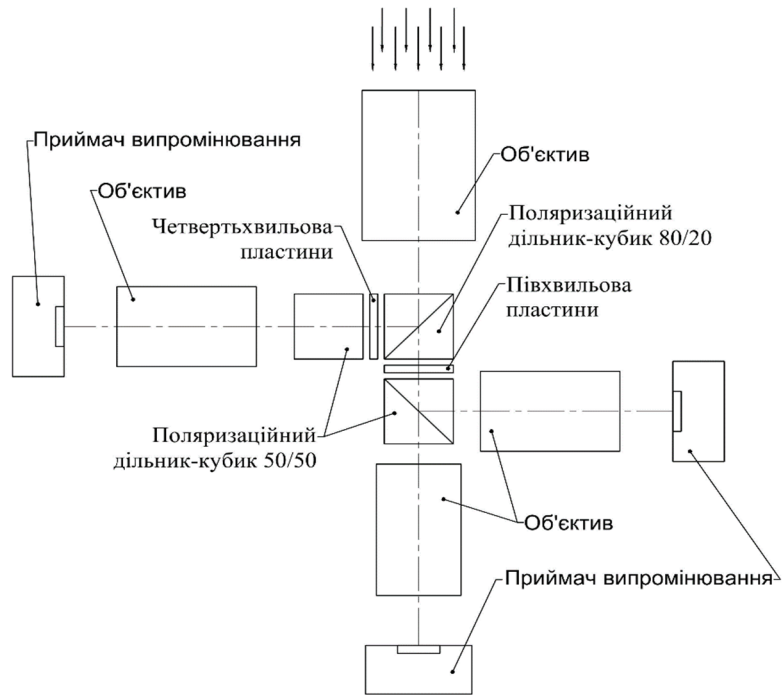


Рис. 8. Поляриметр із діленням амплітуди випромінювання. Четверта камера знаходиться поза площиною сторінки, розташованої за блоком поляризаційного дільника-куба після чвертьхвильової пластини

Таблиця. Порівняльна таблиця методів дослідження стану поляризації

№	Метод	Особливості дизайну	Виготовлення. Вартість.	Недоліки
1	Обертвий елемент	<ul style="list-style-type: none"> Є рухомі елементи. Відносно невеликий розмір. 	<ul style="list-style-type: none"> Найпростіший у виконанні. Недорогий. 	<ul style="list-style-type: none"> Неможливість спостерігати динамічні сцени.
2	Розділ фокальної площини (FPA)	<ul style="list-style-type: none"> Міцний. Малі розміри. 	<ul style="list-style-type: none"> Складність у виготовленні. Висока вартість. 	<ul style="list-style-type: none"> Зменшення просторового розділення. Вимагає інтерполяції.
3	Ділення амплітуди (кілька FPA)	<ul style="list-style-type: none"> Великий розмір системи. Потрібна висока механічна жорсткість. 	<ul style="list-style-type: none"> Складність юстування. Висока вартість. 	<ul style="list-style-type: none"> Потрібно зареєструвати кілька зображень. Синхронізація 4-х каналів.

Висновки

Проблема теплових відбитків створює неточності під час виявлення та розпізнавання об'єктів у зображенні. Для вирішення цієї проблеми проаналізовано поляриметричні методи усунення теплових відбитків. Аналогічно з вилученням відбитків у видимій області спектра, за допомогою формул Френеля аналізується коефіцієнт відбивання випромінювання в ІЧ області спектра. Усунувши чи мінімізувавши це випромінювання, що поляризоване перпендикулярно до площини падіння, можна позбутися

фантомних об'єктів на зображенні. Розглянуті методи частково допоможуть вирішити цю проблему. Переваги та недоліки методів наведені в таблиці.

Наступним кроком буде синтез цих методів задля розробки конструкції тепловізійної камери для безпілотних літальних апаратів, об'єкт спостереження якої знаходиться на нерівномірному фоні [11]. Особливості використання тепловізорів на безпілотних літальних апаратах досліджені в [12].

References

- [1] K.P. Gurton *et al.*, “Enhanced facial recognition for thermal imagery using polarimetric imaging,” *Optic. Letter.*, vol. 39, no. 13, pp. 3857–3859, 2014. doi: 10.1364/OL.39.003857
- [2] V.G. Kolobrodov, *Wave optics. Part 1. Electromagnetic theory of light and interference*, Kyiv, Ukraine: Igor Sikorsky KPI, 2017.
- [3] N. Li *et al.*, “Removal of reflections in LWIR image with polarization characteristics,” *Optic. Expr.*, vol. 26, no. 13, pp. 16488–16504, 2018. doi: 10.1364/OE.26.016488
- [4] S. Henke *et al.*, “Identification and suppression of thermal reflections in infrared thermal imaging,” in *Proc. InfraMation*, 2004, vol. 5, pp. 287–298.
- [5] M. Born *et al.*, *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*, 7th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. doi: 10.1017/CBO9781139644181
- [6] Y.-Q. Zhao *et al.*, “Object detection by spectropolarimetric imagery fusion,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 46, no. 10, pp. 3337–3345, 2008. doi: 10.1109/TGRS.2008.920467
- [7] B. Behzadnezhad *et al.*, “Angle sensing LWIR detectors using coupled nano-antenna arrays,” in *Proc. 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2016. doi: 10.1109/EuCAP.2016.7481117
- [8] Y. Zhao *et al.*, “Multi-band Polarization Imaging,” in *Multi-band Polarization Imaging and Applications. Advances in Computer Vision and Pattern Recognition*. Heidelberg, Berlin: Springer, 2016. doi:10.1007/978-3-662-49373-1_3
- [9] J.S. Tyo *et al.*, “Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications,” *Appl. Optic.*, vol. 45, no. 22, pp. 5453–5469, 2006. doi: 10.1364/AO.45.005453
- [10] C.A. Farlow *et al.*, “Imaging polarimeter development and applications,” in *Proc. Polarization Analysis and Measurement IV*, San Diego, CA, United States, 2002, vol. 4481. doi:10.1117/12.452880

- [11] I. Karpenko *et al.*, "Polarization method for detecting a heat-contrast target against the background of interference," *Visnyk KHNU. Techn. Sci.*, no. 1, pp. 33–37, 2018.
- [12] V. Kolobrodov *et al.*, "Features of use of thermal imager on unmanned aerial vehicles," *Bulletin KPI. Ser. Instrum. Making*, no. 58 (2), pp. 9–15, 2019. doi: 10.20535/1970.58(2).2019.189249

В.Г. Колобродов, В.П. Налбандова, Б.В. Сокол

МЕТОДОЛОГИИ ОБНАРУЖЕНИЯ ТЕПЛООВОГО ОТРАЖЕНИЯ В ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ

Проблематика. Тепловое отражение являются распространенным источником проблем при интерпретации инфракрасных (ИК) тепловых изображений. В частности, мокрые или полированные поверхности, такие как стекло, металлы, а также кирпич и бетон, могут легко отражать инфракрасное излучение, но они часто остаются без внимания. Если их не заметить, то это тепловое отражение могут привести к некорректному обнаружению и распознаванию объекта или неправильной интерпретации его действительной температуры.

Цель исследования. Целью теоретического анализа между тепловым излучением объекта и его отражением является разработка методов для возможности подавления или, по крайней мере, идентификации таких отражений с помощью оптических методов.

Методика реализации. Свет становится поляризованным, когда он взаимодействует с объектом или веществом с помощью различных механизмов, таких как рассеяние, отражение или пропускание. Одной из возможностей реализации таких методов является использование инфракрасных поляризаторов в сочетании с системой теплового наблюдения.

Результаты исследования. Описана физико-математическая модель выявления отражений и возможностей их устранения. Отраженный свет является частично поляризованным, поэтому основным подходом для его идентификации является нахождение параметров Стокса. Авторами были рассмотрены 3 основных метода для анализа состояния поляризации: использование вращающегося поляризатора перед системой наблюдения, специальная матрица с расположенными поверх каждого пикселя поляризаторами под определенными углами и метод, основанный на делении амплитуды в поляриметре, что разделяет весь поток на 4 канала, в которых определяют полный вектор Стокса.

Выводы. Выявлены преимущества и недостатки методов исследования состояния поляризации. Определены основные особенности конструкций, которые необходимы для каждого метода, и стоимость их реализации с целью их последующего использования при разработке поляризационной тепловизионной камеры для беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: тепловизор; поляризация; тепловые отражения; вектор Стокса; состояние поляризации; обнаружения отражений.

V.H. Kolobrodov, V.P. Nalbandova, B.V. Sokol

METHODOLOGY OF DETECTION OF THERMAL REFLECTIONS IN THE INFRARED RANGE

Background. Thermal reflections are a common source of problems in the interpretation of infrared (IR) thermal images. In particular, wet or polished surfaces, such as glass, metals, as well as brick and concrete, can easily reflect infrared radiation but are often overlooked. If left unchecked, these thermal reflections can lead to incorrect detection and recognition of the object or misinterpretation of its actual temperature.

Objective. The purpose of a theoretical analysis between the thermal radiation of an object and its reflection is to develop methods for the possibility of attenuation or at least identification of such prints using optical methods.

Methods. Light becomes polarized when it interacts with an object or matter through various mechanisms, such as scattering, reflection, or transmission. One of the possibilities of implementing such methods is the use of IR polarizers in combination with thermal imaging surveillance system.

Results. Article describes the physical and mathematical model of fingerprint detection and the possibilities of their elimination. The reflected light is partially polarized, so the main approach to its identification is to find the Stokes parameters. The authors considered three main methods for analyzing the state of polarization: the use of a rotating polarizer in front of the observation system, a special matrix with polarizers located on top of each pixel at certain angles, and a method based on dividing the amplitude in the polarimeter. full Stokes vector.

Conclusions. The advantages and disadvantages of the considered methods were revealed. The main features of structures and the cost of their implementation, which are necessary for each method, were determined, with the further purpose of their use in the development of a polarizing thermal imaging camera for unmanned aerial vehicles.

Keywords: thermal imager; polarization; thermal prints; Stokes vector; polarization state; fingerprint detection.

Рекомендована Радою
приладобудівного факультету
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
14 червня 2020 року

Прийнята до публікації
10 грудня 2020 року