

ПОЛЯРИЗАЦІЙНИЙ МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ ТЕПЛОКОНТРАСТНОЇ ЦІЛІ НА ФОНІ ЗАВАД

У даній статті розглянуто проблеми виявлення теплоконтрастних цілей на фоні завад, в яких приділяється увага повному усуненню поляризаційних складових фону при повному збереженні поляризованих складових цілі. Даний метод реалізується розкладанням інтенсивності випромінювання на складові та визначенням ступеня поляризації під час зміни кута поляризації, що дозволяє виділити повністю поляризаційну компоненту, яка ідентифікує ціль.

Ключові слова: тепловізор, поляризація, теплоконтрастна ціль, фонові завади.

I.V. KARPENKO, V.G. KOLOBRODOV, B.V. SOKOL

National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

POLARIZATION METHOD OF DETECTING THE THERMAL CONTRAST TARGET AGAINST THE BACKGROUND OF INTERFERENCE

In this article the problems of detection of thermal contrast objects in the background of obstacles are considered, in which the attention is paid to the complete elimination of the polarization background components with full preservation of the polarized component goals. This method allows you to split the information from the image into constituents, and highlight a target size of several pixels. In fact, the direction of the background polarization angle can be replaced by the average value throughout the image polarization angle. Thus, the basic principle of the method is as follows: based on the difference between the target polarization angle and the background polarization angle, the method of optimizing the direction of full polarization is used to preserve as much information as possible of the target polarization, eliminating as much background polarization information as possible, if possible. The methodology is based on the difference between the target polarization angle and the background polarization angle, which uses full polarization to maintain as much information as possible of the target polarization and eliminate as much background polarization information as possible. We also considered the decomposition of polarization light using the Stokes parameters.

Keywords: thermal imager, polarization, heat-coagulation target, background noise.

Вступ

Використання оптичних систем для виявлення цілей застосовується довгий час. Ранні спроби виявлення цілей передбачали наявність завад, в порівнянні з піксельним полем зору, де цілі були невеликими, а тому дана проблема є невирішеною. Малі цілі, що займають декілька пікселів, часто губляться в інфрачервоних зображеннях фонів. Це в свою чергу ускладнює виявлення цілі. При виявленні цілі традиційними методами, що базуються на візуалізації інтенсивності інфрачервоного випромінювання, стикаються з рядом проблем, тому почали використовувати технології з виявлення поляризації інфрачервоного випромінювання. Дана технологія дозволяє отримати інформацію стосовно поляризації інфрачервоного випромінювання цілі з інтенсивністю інфрачервоного випромінювання на основі поляризаційних характеристик, а саме, ступінь та кут поляризації, різниця між горизонтальними та вертикальними складовими поляризації тощо. З середини минулого століття вчені проводять дослідження в області інфрачервоної поляризації з метою виявлення та розпізнавання цілі. У роботі Річарда Тоулі [1] досліджується можливість імітованого виявлення цілі з використанням поляризації інфрачервоного випромінювання та запропоновано метод подавлення фону. Саджад [2] та Чун [3] виокремлюють статистичні характеристики цілі із застосуванням інтенсивності інфрачервоного випромінювання, ступеня поляризації, кута поляризації, що використовується для виявлення малих цілей. Хоча методи з використанням інформації про поляризацію дозволяють виявити імітовані цілі на фоні завад, однак здатність до завадостійкості та зменшення шуму може бути поліпшена, якщо механізм поляризації буде вивчений ретельніше. При дослідженні принципу поляризації інфрачервоного випромінювання виявляється, що поляризаційний стан цілі частково поляризований і може бути розкладений на суму лінійно поляризованих компонентів та компоненти природного світла. Отже, якщо компоненти природного світла можна розкласти, тоді можливо використати суму лінійно поляризованих компонентів, що дозволяє виявляти цілі. В даній статті запропоновано метод виявлення цілі з використанням поляризації інфрачервоного випромінювання. Даний метод дозволяє виявити невелику ціль в інфрачервоному діапазоні та продемонструвати ефективність та надійність запропонованого методу.

Фізико-математична модель

Інфрачервоне випромінювання від об'єкта, в якому світлова хвиля розглядається як частково поляризоване світло, складається з суперпозиції поляризованого і природного світла [4]. Після проходження через поляризатор, що обертається навколо оптичної осі, та об'єктива (рис. 1), випромінювання від цілі потрапляє до пристрою виявлення – приймача випромінювання, який представлений у вигляді мікроболометричної матриці, яка розміщена на платі та має захисне скло.

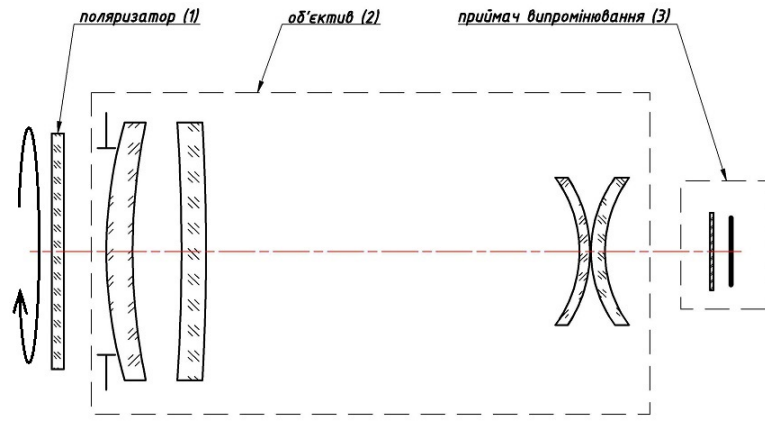


Рис. 1. Оптична схема поляризаційного тепловізора

Позначимо інтенсивність природного світла через I_H , а лінійно поляризоване світло через I_n . Оскільки ми маємо справу з пасивним зображенням, можна ігнорувати циркулярно поляризовані компоненти. Таким чином, випромінювана інтенсивність може бути розкладена на складові:

$$I = I_H + I_n \tag{1}$$

Відповідно до закону Малюса, інтенсивність природної складової, після проходження поляризатора в напрямку θ , становитиме $I_H(\theta) = I_H/2$, а лінійно-поляризована складова – $I_n(\theta) = I_n \cdot \cos^2(\theta - \varphi)$, де φ – кут поляризації падаючого променем (рис. 2).

$$I(\theta) = I_H(\theta) + I_n(\theta) = I_H/2 + I_n \cdot \cos^2(\theta - \varphi) \tag{2}$$

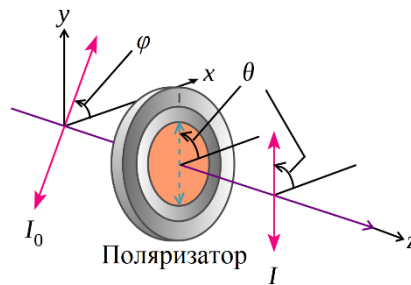


Рис. 2. Поляризація

Визначимо ступень поляризації як [5]:

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{I_{//} - I_{\perp}}{I_{//} + I_{\perp}}, \tag{3}$$

де $I_{\max} = I_{//} = |E_{//}|^2$ і $I_{\min} = I_{\perp} = |E_{\perp}|^2$ – інтенсивності двох взаємно перпендикулярних складових поляризації.

Розкладаючи $I_{//}$ як поляризаційну складову інтенсивності в напрямку поляризації φ по формулі (2) отримуємо:

$$I_{//}(\varphi) = I(\varphi) = I_H(\varphi) + I_n(\varphi) = \frac{1}{2} I_H + I_n, \tag{4}$$

аналогічно з рівняння (2) отримуємо:

$$I_{\perp}(\varphi) = I(\varphi + \pi/2) = I_H(\varphi + \pi/2) + I_n(\varphi + \pi/2) = \frac{1}{2} I_H \tag{5}$$

Підставивши (4) та (5) в (3) отримаємо ступінь поляризації пікселів [5]:

$$P = \frac{I_{//} - I_{\perp}}{I_{//} + I_{\perp}} = \frac{\frac{1}{2} I_H + I_n - \frac{1}{2} I_H}{\frac{1}{2} I_H + I_n + \frac{1}{2} I_H} = \frac{I_n}{I_H + I_n} = \frac{I_n}{I} \tag{6}$$

Для інфрачервоних поляризованих зображень отриманих поляризацією в довільному напрямку поляризації θ , значення інтенсивності цільових і фонових пікселів визначаються наступним чином:

$$\begin{cases} I_y(x, y, \theta) = I_{y,n}(x, y, \theta) + I_{y,n}(x, y, \theta) + \omega, \\ I_\phi(x', y', \theta) = I_{\phi,n}(x', y', \theta) + I_{\phi,n}(x', y', \theta) + \omega, \end{cases} \quad (7)$$

де (x, y) лежать в площині цілі, а (x', y') – в площині фону, $I_y(x, y, \theta)$ – поляризована інтенсивність світла цільових пікселів в напрямку поляризації θ , $I_{y,n}(x, y, \theta)$ – природна світлова складова цільових пікселів, $I_{y,n}(x, y, \theta)$ – лінійно поляризована складова цільових пікселів, ω – шум пікселя. Аналогічно розшифровуються і складові параметрів фонових пікселів. Підставивши формули (2), (6) в (7) отримаємо інфрачервону інформаційну поляризовану модель, що виглядає наступним чином:

$$\begin{cases} I_y(x, y, \theta) = I_y(x, y) \left\{ \frac{1}{2} [1 - P_y(x, y)] + P_y(x, y) \cos^2[\theta - \varphi_y] \right\} + \omega, \\ I_\phi(x', y', \theta) = I_\phi(x', y') \left\{ \frac{1}{2} [1 - P_y(x', y')] + P_y(x', y') \cos^2[\theta - \varphi_\phi] \right\} + \omega, \end{cases} \quad (8)$$

де $I_y(x, y)$ та $I_\phi(x, y)$ – це інфрачервоні інтенсивності значення цільових та фонових пікселів, відповідно.

Принцип поляризаційного розкладу

У рівнянні (8), без урахування шуму ω , спостерігається зміна кривої інфрачервоної поляризації пікселів цілі та фону у напрямку поляризації θ еліпса. Еліптичність – це ступінь поляризації P в напрямку довгої осі еліпса, що відповідає напрямку кута поляризації, а тому вписане коло в еліпс є природним світлом. Таким чином, очевидно, що поляризована інтенсивність випромінювання складається з компонентів природного та лінійно поляризованого світла. Лінійно поляризовані складові в напрямку кута поляризації є найбільшими, а лінійно поляризовані складові в напрямку перпендикулярному куту поляризації – найменшими.

Як показано на рис. 3, що через різницю між кутом фонові поляризації та кутом цільові поляризації, якщо обчислити інтенсивність поляризованого світла в напрямку перпендикулярному до фонові поляризації кутового напрямку, отримаємо інтенсивність поляризаційного зображення $I(\varphi - \pi/2)$. Це зображення містить частково поляризаційне світло, об'єкти та природний фон світла, що є лінійно поляризованою складовою світла без фону. Фактично, напрямку кута поляризації фону може бути замінений на середнє значення по всьому куту поляризації зображення [4].

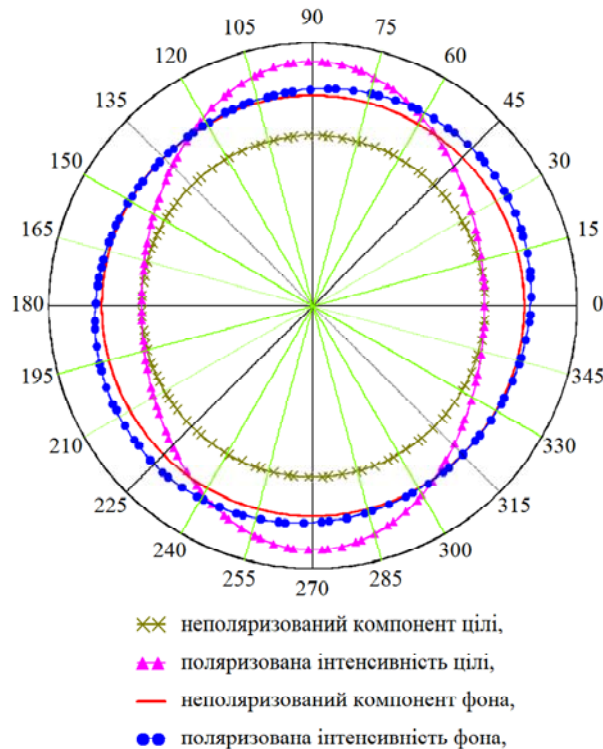


Рис. 3. Варіаційні криві інтенсивності поляризованого світла цілей та фону в залежності від напрямку поляризації [4]

Таким чином, основний принцип методу буде наступним: на основі різниці між кутом цільові поляризації та кутом фонові поляризації, метод оптимізації напрямку повної поляризації використовується, щоб зберегти якомога більше інформації цільові поляризації, усуваючи якомога більше фонові поляризаційної інформації, якщо це можливо. Для невеликої цілі беручи невелику кількість пікселів середнє

значення кута фонової поляризації $\bar{\varphi}_\phi = \bar{\varphi}$ може бути апроксимоване за допомогою середнього кута поляризації всього зображення [4], далі обчислюється змінна складова поляризації $I(\bar{\varphi} - \pi/2)$ в напрямку перпендикулярному до кута фонової поляризації. Отже, повністю поляризовані складові фону можуть бути усунені, а повністю поляризовані складові цілі можуть бути збережені.

Для точкової цілі, яка розташована на сильно захарашуваному фоні, велика частина інформації щодо інтенсивності не може бути використана для ідентифікації цілі та фону. Тому використовуючи розкладання повністю поляризованої складової, природна складова світла $I_H(\bar{\varphi} - \pi/2) = I_H/2$, в поляризаційному компоненті $I(\bar{\varphi} - \pi/2)$, може бути видалено.

$$I_{ц.н}(\bar{\varphi} - \pi/2) = I(\bar{\varphi} - \pi/2) - \frac{1}{2}I_H \tag{9}$$

Таким чином, фонові інформація може бути повністю усунена, зберігши тільки повністю поляризований компонент $I_{ц.н}(\bar{\varphi} - \pi/2)$ цілі, як в рівнянні (9). На рис. 4 показана схема принципу виявлення цілі запропонованого методу.

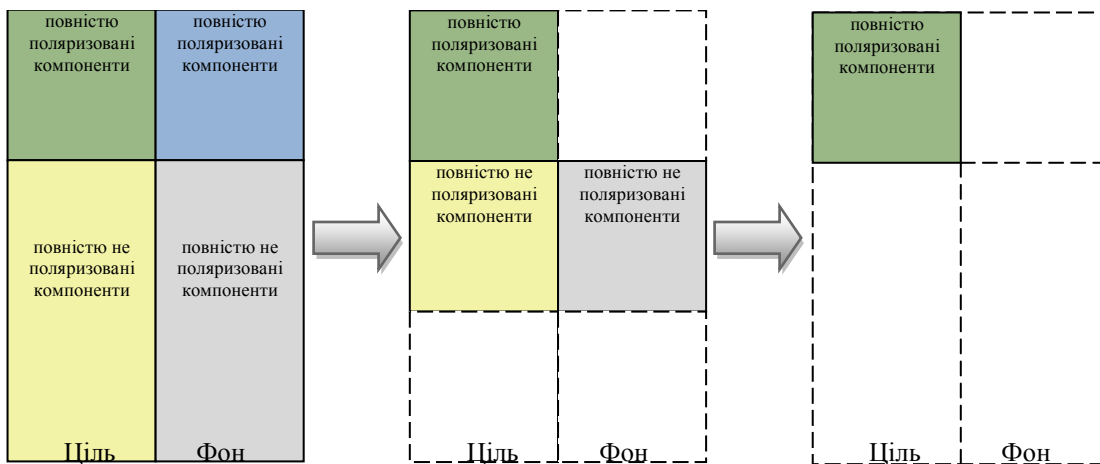


Рис. 4. Схема принципу виявлення точкових цілей на основі розкладання інформації про поляризацію [4]

Процес реалізації

Набір поляриметричного зображення, яке має принаймні три напрямки поляризації подається в алгоритмі (рис. 5). Процес виглядає наступним чином [4]:

Розрахунок стану поляризації для цільової сцени: довільне інфрачервоне поляризоване світло може бути виражено з використанням вектора Стокса. Після отримання поляризованої інтенсивності світла ($I(\theta_1)$, $I(\theta_2)$) та $I(\theta_3)$) більш ніж в трьох напрямках поляризації, можна обчислити кожен параметр Стокса I , Q та U за допомогою наведеного нижче рівняння:

$$I(\theta) = I \frac{1}{2}(I + Q \cos(2\theta) + U \sin(2\theta)) \tag{10}$$

Розкладання поляризації для цільової сцени: стан поляризації цільової сцени, частіше за все частково поляризований і може бути розкладений на суму лінійно поляризованих і природних складових. Таким чином, отримуємо інтенсивності лінійно поляризованої складової $I_n = \sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}$ та інтенсивності природної складової світла $I_H = I - \sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}$,

Обчислити зміну поляризаційної складової $I(\bar{\varphi} - \pi/2)$: розглядаючи напрямком поляризації θ як $\bar{\varphi} - \pi/2$, складова $I(\bar{\varphi} - \pi/2)$ може бути отримано перпендикулярно до напрямку середнього значення кута поляризації $\bar{\varphi}$ за допомогою рівняння (10). Таким чином, лінійно поляризована складова світла фонових пікселів $I_{ф.н}(\bar{\varphi} - \pi/2)$, зменшується.

Отримання лінійно поляризованої складової світла зі зміни поляризаційної складової: використовуючи розрахункові результати з наведених вище двох стадій, формули (4) та (5), видаляючи природний компонент поляризації світла $I_H(\bar{\varphi} - \pi/2) = I_H/2$ від компонента змінної поляризації $I_H(\bar{\varphi} - \pi/2)$, зберігаючи при цьому лінійно поляризовану складову світла $I_{ц.н}(\bar{\varphi} - \pi/2)$ з цільових пікселів.

Повне виявлення цілі: визначення порогу виявлення з використанням відповідного порогу

$$I_{\varphi,n}(\bar{\varphi} - \pi/2).$$

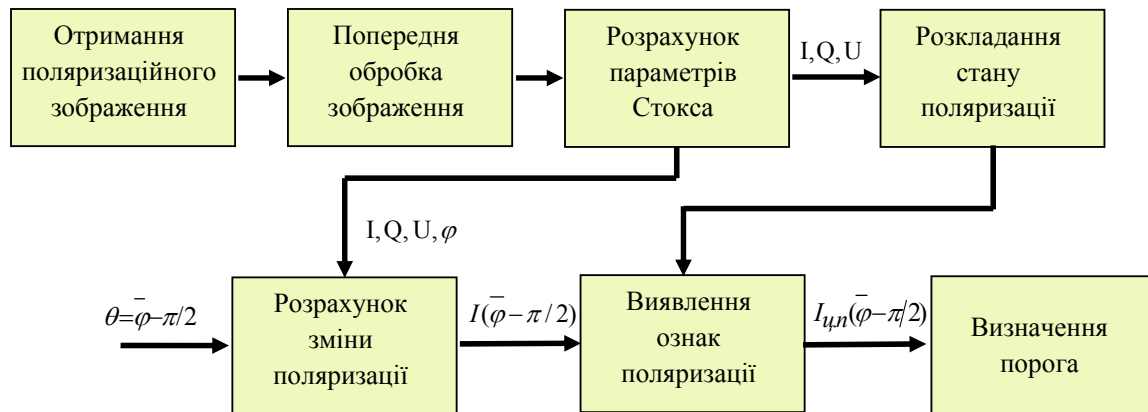


Рис. 5. Структурна схема алгоритму виявлення цілей [4]

Висновок

Незважаючи на всі складнощі виявлення невеликих цілей на фоні завад, даний метод з використанням поляризаційних складових дозволяє виявити невелику ціль в інфрачервоному діапазоні. Основний принцип розглянутого методу базується на основі різниці між кутом цільової поляризації та кутом фонові поляризації, в якому використовується повна поляризація в напрямку θ , щоб зберегти якомога більше інформації цільової поляризації та усуваючи якомога більше фонові поляризаційної інформації. Для невеликої цілі, беручи невелику кількість пікселів середнє значення кута фонові поляризації може бути апроксимоване за допомогою середнього кута поляризації всього зображення, далі обчислюється змінна складова поляризації в напрямку, перпендикулярному до кута фонові поляризації. Таким чином, повністю поляризовані складові фону можуть бути усунені, а повністю поляризовані складові цілі – збережені, що дозволяє виявити ціль розміром у декілька пікселів на значному фоні перешкод.

Література

1. Tooley R. D. Man-made target detection using infrared polarization / R. D. Tooley // Polarization considerations for optical systems II. – International Society for Optics and Photonics, 1990. – Т. 1166. – P. 52–60.
2. Sadjadi F. A. New experiments in the use of infrared polarization in the detection of small targets / F. A. Sadjadi, C. S. L. Chun // Proc. SPIE. – Т. 4379. – P. 145.
3. Sadjadi F. A. Automatic detection of small objects from their infrared state-of-polarization vectors / F. A. Sadjadi, C. S. L. Chun // Optics letters. – 2003. – Т. 28. – №. 7. – P. 531–533.
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. – Т. 33004. – № 1.
5. Венгринович Р. Д. Фізика / Р. Д. Венгринович, М. О. Стасик. – Чернівці : Друк Арт, 2017. – 736 с.

References

1. Tooley R. D. Man-made target detection using infrared polarization / R. D. Tooley // Polarization considerations for optical systems II. – International Society for Optics and Photonics, 1990. – Т. 1166. – P. 52–60.
2. Sadjadi F. A. New experiments in the use of infrared polarization in the detection of small targets / F. A. Sadjadi, C. S. L. Chun // Proc. SPIE. – Т. 4379. – P. 145.
3. Sadjadi F. A. Automatic detection of small objects from their infrared state-of-polarization vectors / F. A. Sadjadi, C. S. L. Chun // Optics letters. – 2003. – Т. 28. – №. 7. – P. 531–533.
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. – Т. 33004. – № 1.
5. Venhrynovych R. D. Fizyka / R. D. Venhrynovych, M. O. Stasyk. – Chernivtsi : Druk Art, 2017. – 736 s.

Рецензія/Peer review : 27.11.2017 р.

Надрукована/Printed : 30.01.2018 р.

Рецензент: к.т.н., доцент Микитенко І.В.