

Phát hiện và theo dõi mục tiêu di động hồng ngoại nhỏ bằng thuật toán Top-hat theo hướng

Nguyễn Văn Thu¹, Đặng Anh Tuấn¹, Lê Văn Thế¹, Nguyễn Mạnh Thắng^{2*}

¹Viện Vật lý kỹ thuật/Viện Khoa học và Công nghệ quân sự; 17 Hoàng Sâm, Nghĩa Đô, Cầu Giấy, Hà Nội;

²Viện Khoa học và Công nghệ quân sự; 17 Hoàng Sâm, Nghĩa Đô, Cầu Giấy, Hà Nội.

*Email: thangnm@jmsst.info

Nhận bài: 10/7/2023; Hoàn thiện: 20/9/2023; Chấp nhận đăng: 10/10/2023 ; Xuất bản: 25/10/2023.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.90.2023.110-118>

TÓM TẮT

Các mục tiêu nhỏ được thể hiện trên bức ảnh hồng ngoại như một đốm sáng nhỏ, không mang bất cứ đặc trưng nào của mục tiêu, khó bị phát hiện, nhưng lại là đối tượng của các thiết bị trinh sát, phát hiện, theo dõi tầm xa. Trên cơ sở các đặc điểm của mục tiêu hồng ngoại nhỏ và thuật toán Top-hat, đưa ra phương pháp sử dụng bộ lọc Top-hat theo hướng để loại bỏ nhiễu nền và tăng cường mục tiêu. Lợi dụng lượng thông tin phong phú trong các bức ảnh liên tiếp của một video và sự thay đổi vị trí chậm chạp giữa các khung hình, sử dụng phương pháp tìm kiếm từ các vùng lân cận vị trí mục tiêu ở khung hình trước để xác nhận mục tiêu, qua đó, hạn chế bỏ lọt đối tượng đang theo dõi. Kết quả thử nghiệm cho thấy, thuật toán Top-hat theo hướng rất hiệu quả trong việc phát hiện mục tiêu nhỏ trong nhiễu nền phức tạp, kết hợp với thuật toán xác nhận mục tiêu của các khung hình liên tiếp nhau, cho phép theo dõi chính xác mục tiêu quan tâm.

Từ khóa: Mục tiêu hồng ngoại nhỏ; Top-hat; Theo dõi; trinh sát.

1. MỞ ĐẦU

Mục tiêu nhỏ là những mục tiêu khi tạo ảnh trên ma trận cảm biến hồng ngoại chỉ có kích thước khoảng 9 x 9 (điểm ảnh) trở xuống [1]. Phát hiện mục tiêu nhỏ hồng ngoại là một kỹ thuật quan trọng trong các hệ thống phát hiện, theo dõi và dẫn đường, được ứng dụng rộng rãi trong trinh sát trên không, dẫn đường chính xác, cảnh báo sớm, trinh sát và tìm kiếm mặt đất, trên biển,... Tuy nhiên, các mục tiêu nhỏ này chỉ được thể hiện ở dạng mục tiêu là một điểm nhỏ trên một bức ảnh chụp ở cự li xa, không chứa các đặc trưng của mục tiêu như biên dạng và các đường nét để có thể bị phát hiện một cách dễ dàng [2]. Trong thực tế, các ứng dụng sử dụng thuật toán phát hiện mục tiêu nhỏ thường đối mặt với thách thức như nhiễu nền của bức ảnh thay đổi nhanh, như tên lửa chống tàu chiến, máy bay chiến đấu bay với tốc độ cao, đôi khi nhiễu nền thay đổi liên tục trong khi mục tiêu hầu như không thay đổi trong hầu hết thời gian [3]. Trong một số ứng dụng khác, như tìm kiếm mục tiêu trên mặt biển, mặc dù nhiễu nền không thay đổi nhiều, tuy nhiên, dưới sự chiếu xạ của ánh nắng mặt trời, đỉnh của các con sóng tạo ra nhiều vùng sáng có những đặc trưng như của các mục tiêu nhỏ [4]. Đặc điểm ít thông tin về đường nét và độ tương phản thấp [5], nhiễu nền, nhiễu cảm biến hồng ngoại cũng gây khó khăn cho việc phát hiện mục tiêu. Do đó, các phương pháp truyền thống dùng để phát hiện các mục tiêu lớn hầu như không có tác dụng trong việc phát hiện các mục tiêu nhỏ. Những năm gần đây, rất nhiều phương pháp được phát triển để khắc phục những thách thức này, có thể phân ra làm 4 loại phương pháp:

Phương pháp dựa trên đặc tính thị giác dựa trên mô phỏng cách thức phát hiện của hệ thống thị giác con người (HVS). Các phương pháp dựa trên đặc tính thị giác sử dụng các đại lượng biểu trưng cho thị giác và các cơ chế thị giác như độ tương phản cục bộ, bản đồ độ nổi bật trực quan, trộn tổng hợp đa đặc trưng, đa độ phân giải được đưa vào phát hiện mục tiêu nhỏ hồng ngoại [6]. Các phương pháp này mặc dù hiệu quả cao, nhưng tốc độ xử lý chậm.

Thuật toán phát hiện dựa trên cấu trúc dữ liệu hình ảnh sử dụng tính tự tương quan không cục bộ của nền trong hình ảnh hồng ngoại và các đặc điểm thừa thớt của mục tiêu. Các phương pháp điển hình dựa trên cấu trúc dữ liệu hình ảnh chủ yếu bao gồm mô hình khối ảnh hồng ngoại (IPI)

và phân tích thành phần chính mạnh mẽ (RPCA). Các phương pháp này cho hiệu quả xử lý tốt, nhưng do việc biến đổi ma trận tiêu tốn nhiều thời gian và tài nguyên máy tính, không thích hợp tính toán trong thời gian thực.

Các thuật toán phát hiện dựa trên kỹ thuật học sâu có thể trích xuất các đặc trưng trung và cao cấp thông qua quá trình huấn luyện để biểu thị mục tiêu nhằm cải thiện tính mạnh mẽ của việc phát hiện mục tiêu [7, 8]. Nhưng mục tiêu hồng ngoại nhỏ có kích thước quá nhỏ, không có hoa văn và đường nét, thiếu đặc trưng về kết cấu, không thể trích xuất ra các đặc trưng hữu ích cho mô hình, khiến cho hiệu quả phát hiện không cao. Khả năng xử lý trong thời gian thực kém và khó thực thi trên các hệ thống mạch điện FPGA hoặc DSP.

Các phương pháp dựa trên kỹ thuật lọc nhiễu mặc dù ra đời sớm nhất nhưng đến hiện tại vẫn được ứng dụng nhiều nhất, sử dụng các bộ lọc được xây dựng dựa trên các thống kê về quy luật phân bố của nhiễu nền và mục tiêu để giảm thiểu sự ảnh hưởng của nhiễu nền và làm nổi bật mục tiêu [9]. Xuất phát từ đặc điểm mục tiêu có độ sáng trội hơn xung quanh, phương pháp sử dụng bộ lọc Top-hat (đỉnh mũ) chỉ với thuật toán tính toán đơn giản nhưng cho hiệu quả rất tốt [10]. Tính toán đến đặc tính của mục tiêu nhỏ có độ sáng trội hơn nhiễu nền theo mọi hướng mà thuật toán Top-hat chưa lợi dụng, Suyog D. Deshpande đưa ra phương pháp phát hiện mục tiêu nhỏ bằng bộ lọc “max – mean và max – median” [11], tuy nhiên, thuật toán này yêu cầu sử dụng nhiều bộ lọc, khó phát hiện mục tiêu có độ sáng thay đổi đột ngột và tốc độ xử lý chậm.

Trong các phương pháp trên, phương pháp sử dụng bộ lọc Top-hat với độ phức tạp không cao, thực thi dễ dàng, có thể xử lý thời gian thực, đáp ứng được yêu cầu của phát hiện và theo dõi các mục tiêu vận động hồng ngoại nhỏ. Trên cơ sở thuật toán Top-hat đối xứng, bài báo đưa ra các thống kê về mục tiêu và nhiễu nền, từ đó, cải tiến bộ lọc Top-hat để chỉ lọc theo các phương hướng đơn lẻ với mục tiêu lợi dụng tính chất trội hơn nhiễu nền về mọi hướng của mục tiêu nhỏ, loại bỏ tối đa các đối tượng không phải mục tiêu hồng ngoại nhỏ ra khỏi bức ảnh. Ngoài ra, lợi dụng lượng thông tin lớn trong video, sử dụng phương pháp xác nhận mục tiêu bằng video, qua đó hạn chế bỏ sót mục tiêu đang theo dõi.

2. CẢI THIỆN BỘ LỌC TOP-HAT VÀ XÁC NHẬN MỤC TIÊU TRÊN DỮ LIỆU ĐA KHUNG HÌNH

2.1. Các đặc tính của mục tiêu hồng ngoại nhỏ và nhiễu nền

Một bức ảnh hồng ngoại chứa mục tiêu nhỏ có thể coi được cấu thành bởi 3 thành phần gồm: mục tiêu nhỏ, nhiễu nền và nhiễu. Và có thể được biểu thị bởi công thức:

$$f(x, y) = f_T(x, y) + f_B(x, y) + f_N(x, y) \quad (1)$$

Trong đó, f , f_T , f_B và f_N lần lượt biểu thị ảnh hồng ngoại gốc, ảnh mục tiêu nhỏ, ảnh nhiễu nền và ảnh nhiễu, (x, y) là vị trí của điểm ảnh trên bức ảnh. Các thuật toán được sử dụng để phát hiện mục tiêu hồng ngoại nhỏ thường lợi dụng vào sự khác biệt giữa các đặc tính của mục tiêu nhỏ f_T và nhiễu nền f_B . Các đặc tính được xét đến bao gồm độ chói, hình dáng và sự dịch chuyển. Sự khác biệt của mục tiêu và nhiễu nền được tăng cường để khiến cho mục tiêu dễ dàng bị nhận ra trong nhiễu nền.

Mục tiêu nhỏ thường là mục tiêu ở xa, do đó, nó bị ảnh hưởng bởi sự tán xạ và hấp thụ của không khí. Ngoài ra, cũng như các mục tiêu khác, quá trình tạo ảnh mục tiêu nhỏ cũng bị ảnh hưởng bởi hiện tượng méo ảnh của vật kính, lệch tiêu của cảm biến, khiến cho mục tiêu nhỏ thường là một đốm sáng nhỏ có kích thước khoảng từ 2×2 đến 9×9 điểm ảnh, với độ chói phân bố tuân thủ theo công thức phân bố Gaussian:

$$f_T(x, y) = A_p \times \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\left(\frac{x - x_0}{\sigma_x} \right)^2 + \left(\frac{y - y_0}{\sigma_y} \right)^2 \right) \right\} \quad (2)$$

Trong đó, (x_0, y_0) là tâm của mục tiêu, A_p là độ chói lớn nhất, σ_x và σ_y là độ mở rộng tính từ tâm của mục tiêu theo phương dọc và phương ngang. Mục tiêu nhỏ thường là một điểm nổi trội so với phong nền, khi so sánh với phong nền, mục tiêu nhỏ có các đặc điểm sau:

Đặc điểm 1: Mục tiêu nhỏ có độ chói lớn hơn hoặc nhỏ hơn phong nền ở mọi hướng.

Đặc điểm 2: Mục tiêu nhỏ có thể coi là đối xứng do đặc tính phân bố Gaussian, độ chênh lệch độ rọi của mục tiêu so với phong nền có thể coi là bằng nhau trên mọi hướng.

Đặc điểm 3: Mục tiêu nhỏ dịch chuyển chậm và liên tục trên ảnh hồng ngoại.

2.2. Thuật toán Top-hat điển hình để phát hiện mục tiêu hồng ngoại nhỏ.

Thuật toán Top-hat cổ điển có hiệu quả cao trong việc phát hiện ra các đối tượng nhỏ trong một bức ảnh ngày đen trắng, nhưng tỏ ra ít hiệu quả hơn trong việc phát hiện mục tiêu nhỏ trong ảnh hồng ngoại do nhiều phong nền lớn. Do đó, Bai và cộng sự đã đưa ra thuật toán cải tiến [12] và được sử dụng rộng rãi trong lĩnh vực này, coi mục tiêu nhỏ là các đốm sáng hơn phong nền, công thức của thuật toán Top-hat như sau:

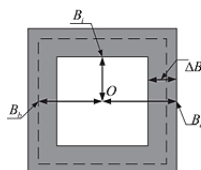
$$NTH(x, y) = f(x, y) - f * B_{oi}(x, y) \quad (3)$$

Trong đó, B_{oi} là đơn nguyên lựa chọn kết cấu đôi (SEs) gồm B_o là kết cấu ngoài (outer SE), còn B_i là kết cấu trong (inner SE). Phép toán $f * B_{oi}$ trong công thức (3) được định nghĩa như sau:

$$f * B_{oi}(x, y) = (f \oplus \Delta B) \ominus B_b(x, y) \quad (4)$$

$$f \square B_{oi}(x, y) = (f \ominus \Delta B) \oplus B_b(x, y) \quad (5)$$

Ở đây, B_b là kết cấu đôi có kích thước từ B_i đến B_o , $\Delta B = B_o - B_i$, phép toán \oplus là phép toán giãn nở ảnh, \ominus là phép toán ăn mòn ảnh. Kích thước và mối tương quan của B_i , B_o , B_b , ΔB được thể hiện trên hình 1.



Hình 1. Quan hệ của các kết cấu trong thuật toán Top-hat.

Trong thuật toán Top-hat, đầu tiên sử dụng phép toán giãn nở ảnh, điền giá trị mức xám mới cho cấu trúc trung tâm (hình 1-vùng ở giữa màu trắng) bằng mức xám lớn nhất trong khu vực lân cận ΔB , bằng cách này có thể loại bỏ các loại nhiễu với biên độ âm của mục tiêu. Tiếp theo, ảnh sau khi giãn nở được ăn mòn bởi phép toán ăn mòn, điền giá trị mức xám của điểm ảnh trung tâm cấu trúc bằng giá trị mức xám nhỏ nhất trong toàn khu vực B_b , bằng cách này có thể loại bỏ các loại nhiễu mang biên độ dương của mục tiêu. Tiếp theo thực hiện phép toán $f - f * B_{oi}$, có thể tách được mục tiêu ra khỏi phong nền, đồng thời loại bỏ được sự ảnh hưởng của nhiễu đến hiệu quả phát hiện mục tiêu.

Tuy nhiên, bất kể thuật toán Top-hat truyền thống hay thuật toán Top-hat cải tiến đều không lợi dụng các đặc tính thứ 2 và thứ 3 của mục tiêu nhỏ, do đó khó phát hiện ra các mục tiêu khi nó có độ sáng chênh lệch không lớn so với phong nền, đặc biệt là các phong nền có nhiều đường nét.

2.3. Thuật toán Top-hat theo hướng phát hiện mục tiêu hồng ngoại nhỏ

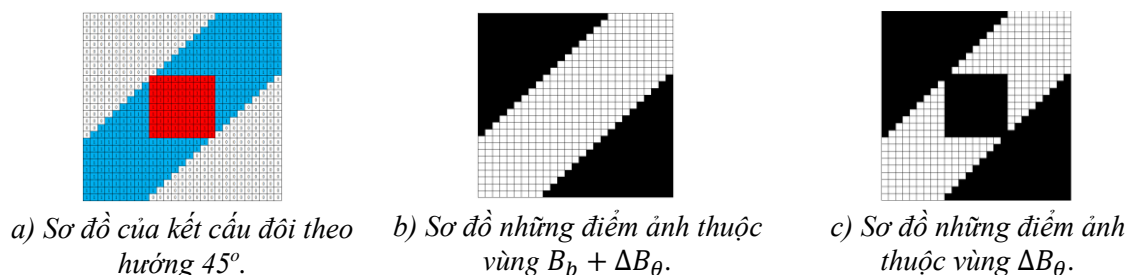
Mục tiêu nhỏ có thể coi là đối xứng do đặc tính phân bố Gaussian, độ chênh lệch độ rọi của mục tiêu so với phong nền có thể coi là bằng nhau trên mọi hướng, do đó, khi lấy giá trị xám của mục tiêu trừ đi giá trị xám của mỗi vùng lân cận mục tiêu ta luôn có giá trị gần như không đổi.

Còn đối với phong nền phức tạp chứa nhiều vùng sáng có đường nét, hiệu của giá trị xám của vùng trung tâm và mỗi vùng lân cận đều có sự khác biệt lớn. Điều này cũng dẫn đến, nếu thuật toán top-hat không sử dụng tất cả dữ liệu của các điểm ảnh lân cận đơn nguyên trung tâm, mà chỉ

tính toán dựa trên các điểm ảnh nằm trên một hướng nào đó, thì kết quả của phép tính không thay đổi nhiều nếu vùng dữ liệu cần tính có chứa mục tiêu, ngược lại giá trị này sẽ thay đổi nhiều nếu vùng dữ liệu cần tính là nhiễu tạp. Lợi dụng đặc tính này, đưa ra mô hình Top-hat theo hướng, có công thức như sau:

$$f * B_{\theta}(x, y) = (f \oplus \Delta B_{\theta}) \ominus (B_b + \Delta B_{\theta})(x, y) \tag{6}$$

$$f \square B_{oi}(x, y) = (f \ominus \Delta B_{\theta}) \oplus (B_b + \Delta B_{\theta})(x, y) \tag{7}$$



Hình 2. Bộ lọc Top-hat theo hướng 45°.

Trong đó, B_{θ} (hình 2a, các điểm màu đỏ) là đơn nguyên trung tâm (gồm nhiều điểm ảnh trong một hình vuông), ΔB_{θ} là tập hợp các điểm ảnh bao quanh đơn nguyên trung tâm theo hướng θ ($\theta = 0^{\circ}; 45^{\circ}; 90^{\circ}; \dots$), thí dụ trong hình mô tả thuật toán theo hướng $\theta = 45^{\circ}$. Theo công thức $f * B_{\theta}(x, y)$, đầu tiên sử dụng thuật toán giãn nở $f \oplus \Delta B_{\theta}$ để thay thế tất cả các điểm ảnh ở vùng trung tâm (màu đỏ) bằng giá trị xám cao nhất của tất cả các điểm ảnh theo hướng θ (vùng xanh da trời). Sau đó, phép toán $\ominus (B_b + \Delta B_{\theta})$ thay thế tất cả các điểm ảnh ở vùng trung tâm bằng giá trị nhỏ nhất của vùng $B_b + \Delta B_{\theta}$. Kết quả của phép toán $f * B_{\theta}(x, y)$ là thay thế tất cả các điểm ảnh ở vùng trung tâm bằng các điểm ảnh của vùng thông nền theo hướng θ . Do đó, nếu xuất phát từ đơn nguyên trung tâm theo hướng θ là một đường biên, kết quả đường biên vẫn được giữ nguyên, nếu chỉ có trung tâm trội hơn thông nền, vùng trung tâm sẽ bị xóa đi vì bị thay thế bởi thông nền trên hướng θ . Từ đó, lấy kết quả của phép toán $f - f * B_{\theta}(x, y)$, thông nền và các mục tiêu có đường biên sáng sẽ bị triệt tiêu, chỉ còn lại các mục tiêu nhỏ.

Từ đó, công thức sau được sử dụng để loại bỏ thông nền và giữ lại các mục tiêu nhỏ:

$$DMF_{\theta} = f - f * B_{\theta}(x, y) \tag{8}$$

Trong đó, DMF_{θ} là giá trị sai khác giữa ảnh gốc và ảnh sau khi sử dụng bộ lọc Top-hat theo hướng θ .

Theo công thức (6), mặc dù bộ lọc Top-hat theo hướng sẽ khiến cho độ xám của mục tiêu nhỏ trên bức ảnh ban đầu bằng với giá trị lớn nhất theo hướng của bộ lọc (hướng θ), nhưng đồng thời nó cũng khiến cho các điểm xung quanh mục tiêu hồng ngoại nhỏ và một số điểm đầu hoặc cuối của các đường biên có mức xám cao bằng mức xám của mục tiêu nhỏ. Tại các điểm như vậy sẽ có $f * B_{\theta}(x, y) > f$, dẫn đến $DMF_{\theta} < 0$. Do đó, ta thêm điều kiện cho công thức (8) để trong bức ảnh cuối không xuất hiện các giá trị âm. Khi đó, công thức (8) chuyển thành dạng:

$$DMF_{\theta} = \max((f - f * B_{\theta}(x, y)), 0) \tag{9}$$

Với việc đặt một giá trị ngưỡng hợp lý, có thể dễ dàng tách rời các mục tiêu ra khỏi thông nền từ DMF_{θ} . Trên một số hướng θ sau khi tách mục tiêu, ngoài mục tiêu hồng ngoại nhỏ còn xuất hiện thêm một số nhiễu tạp từ bối cảnh, tuy nhiên, do tính đối xứng của mục tiêu nhỏ và tính bất đối xứng của nhiễu tạp, khi kết hợp kết quả tính toán DMF các hướng θ , DMF_{θ} của mục tiêu nhỏ gần như không đổi, còn DMF_{θ} của nhiễu tạp trên một số hướng sẽ rất nhỏ và một số hướng sẽ rất lớn. Do đó, đưa ra công thức sau để loại bỏ nhiễu tạp:

$$DMF = \min_{\theta=0^{\circ};45^{\circ};90^{\circ};135^{\circ}}(DMF_{\theta}) \tag{10}$$

Trong đó, DMF là giá trị nhỏ nhất của DMF_{θ} trên các hướng $\theta = 0^{\circ}; 45^{\circ}; 90^{\circ}; 135^{\circ}$.

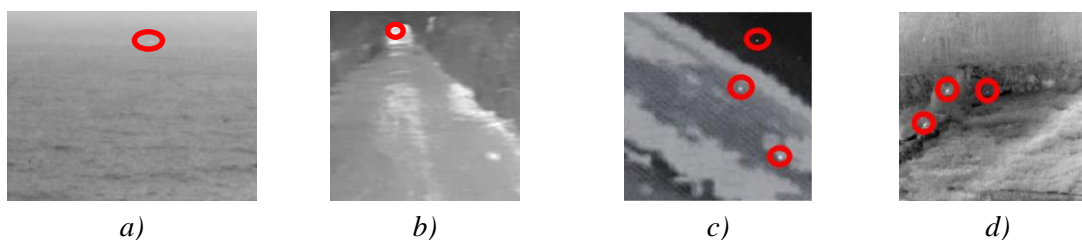
2.4. Xác nhận mục tiêu dựa trên dữ liệu video

Khi ở cự li xa, mục tiêu cần di chuyển với vận tốc rất lớn mới khiến cho vị trí ảnh của nó thay đổi đáng kể trên ma trận cảm biến. Vận tốc này lớn hơn đa số các mục tiêu hồng ngoại thông thường, vì vậy, có thể coi vị trí của vật thể thay đổi rất ít trên 2 frame liền nhau. Khi đã xác định được vị trí chính xác của mục tiêu ở một frame nào đó, nếu có nhiều nhiễu tạp dẫn đến khó phán đoán đâu mới là mục tiêu ở frame tiếp theo, chỉ cần tính khoảng cách từ vị trí của mục tiêu trong frame trước đến các vị trí có khả năng có mục tiêu hiện tại, khoảng cách nào nhỏ nhất chính là khoảng cách đến mục tiêu ở frame hiện tại.

3. ĐÁNH GIÁ VÀ THỬ NGHIỆM

3.1. Dữ liệu

Để đánh giá hiệu quả của thuật toán, lấy tùy ý 5 bức ảnh trong bộ dữ liệu về mục tiêu hồng ngoại nhỏ do Học viện Hàng không lục quân Trung Quốc thu thập để làm dữ liệu đầu vào. Bộ dữ liệu chứa các mục tiêu hồng ngoại nhỏ của các loại mục tiêu di chuyển trong nhiều điều kiện phong nền và đã được nhiều bài báo có hệ số trích dẫn cao sử dụng để đánh giá hiệu quả thuật toán. Trong hình, các mục tiêu nhỏ đã biết trước được khoanh trong đường tròn màu đỏ.



Hình 3. Hình ảnh được sử dụng để đánh giá hiệu quả thuật toán.

Ngoài ra, để kiểm chứng khả năng phát hiện của hệ thống đang sử dụng, bao gồm camera hồng ngoại bước sóng ngắn và máy tính, một đèn pha hồng ngoại với dải phổ phát sáng trong vùng $0,4 \sim 12 \mu\text{m}$; đỉnh phổ ở bước sóng $1,5 \mu\text{m}$ được chọn làm mục tiêu hồng ngoại nhỏ. Đèn phát được đặt trong một số phong nền thành phố và rừng núi, hình ảnh của đèn chiếu hồng ngoại thu bởi camera hồng ngoại bước sóng ngắn, dải phổ làm việc $0,9 \sim 1,7 \mu\text{m}$, đỉnh phổ ở $1,5 \mu\text{m}$.

3.2. Đánh giá hiệu quả của thuật toán

Để đánh giá hiệu quả của thuật toán, sử dụng đại lượng định lượng khả năng loại bỏ phong nền của thuật toán (BSF) và tín/tạp (SCRG) đã được sử dụng nhiều trong một số bài báo [9, 13-15]:

$$BSF = \frac{C_{in}}{C_{out}}, \quad SCRG = \frac{SCR_{out}}{SCR_{in}} \quad (11)$$

Trong đó, C và SCR là độ lệch chuẩn và tín/tạp của ảnh, in và out biểu thị bức ảnh trước và sau khi xử lý. Thông thường các đại lượng BSF và SCRG có giá trị càng lớn thì mục tiêu nhỏ càng dễ được tách rời khỏi phong nền. Để xem xét hiệu quả của thuật toán, so sánh các tham số trên của thuật toán Top-hat theo hướng với thuật toán Top-hat thường và thuật toán AdMD [15].

Để kiểm chứng hiệu quả của thuật toán Top-hat theo hướng cho hệ phát hiện đèn pha hồng ngoại. Đèn pha hồng ngoại được cố định trên giá 3 chân, có thể mang vác để bố trí ở các vị trí. Camera được đặt cố định ở trạm quan sát. Tiến hành lấy hình ảnh thử nghiệm ở các điểm khác nhau. Đối với phong nền đô thị, trong phong nền có một số thiết bị chiếu sáng nhân tạo, nhưng độ sáng nhỏ hơn đèn pha và kích thước đa dạng. Một số đồ vật cũng phản xạ ánh sáng mặt trời mạnh hơn xung quanh. Trong môi trường đồi núi, một số vùng đất đá hoặc vật liệu nhân tạo khi bị ánh sáng mặt trời chiếu xạ trực tiếp cũng phản xạ mạnh bức xạ ở vùng nhạy sáng của camera.

Đèn pha được bật theo hiệu lệnh để xác định vị trí thủ công, vị trí này được dùng để xác nhận độ chính xác của thuật toán. Máy tính xử lý trực tiếp hình ảnh thu được và hiển thị kết quả trên màn hình.

3.3. Kết quả thử nghiệm và bình luận

BSF và SCRG của các thuật toán trên các bức ảnh khác nhau được tính toán và liệt kê trong bảng 1. Để cho dễ quan sát hiệu quả tính toán một cách trực quan, các bức ảnh sau khi xử lý được chuyển thành dạng dữ liệu 3D trên hình.

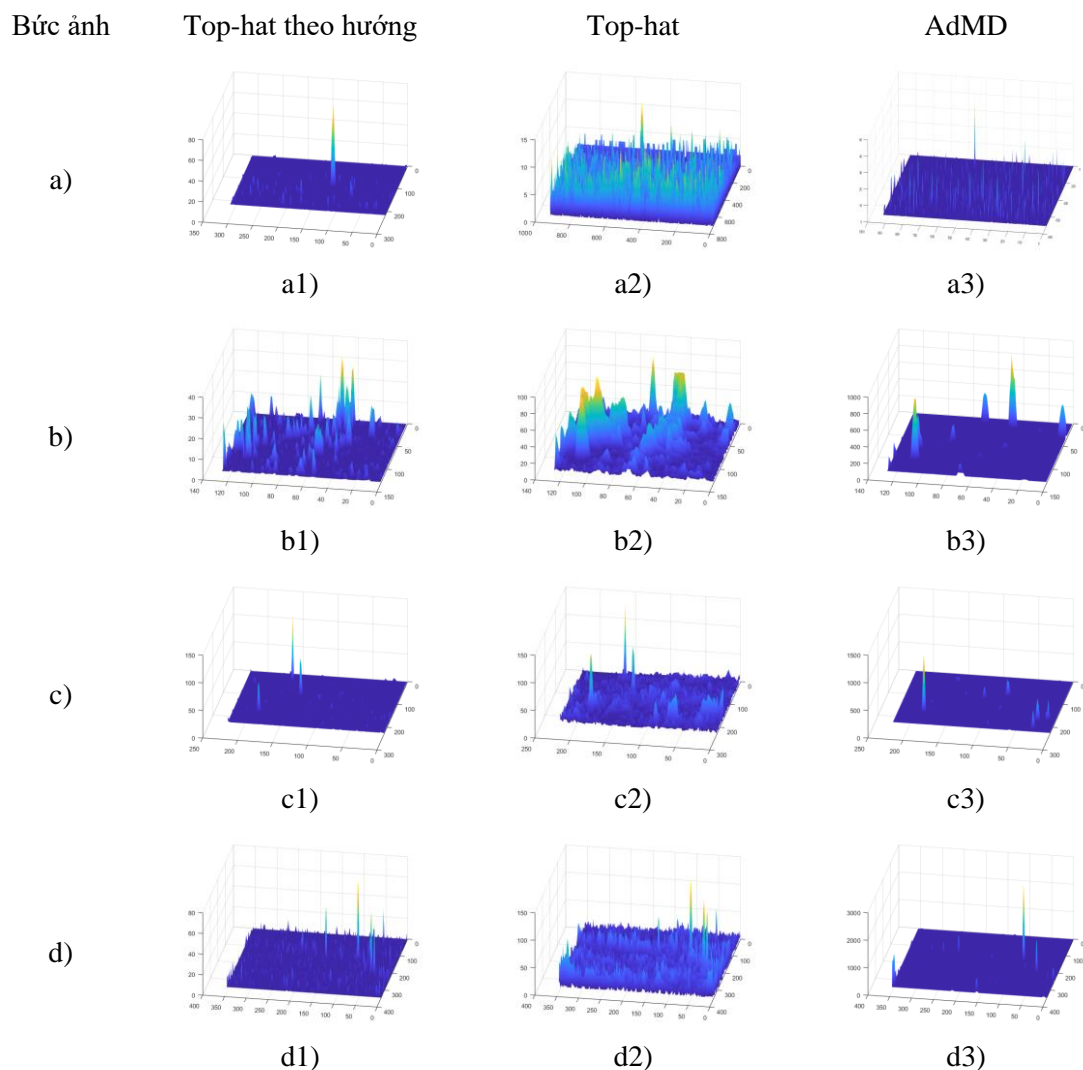
Bảng 1. BSF và SCRG của các thuật toán.

Bức ảnh	Ảnh a)		Ảnh b)		Ảnh c)		Ảnh d)		Ảnh e)	
	BSF	SCRG	BSF	SCRG	BSF	SCRG	BSF	SCRG	BSF	SCRG
Top-hat theo hướng	32.93	1,8	361	5,8	54	2,5	139	1,2	123,5	∞
Top-hat	8.79	0,9	164	3,2	46	1,4	81	1,7	34,3	5,6
AdMD	32.02	1,25	448	8	73	1	225	0,86	93	4,3

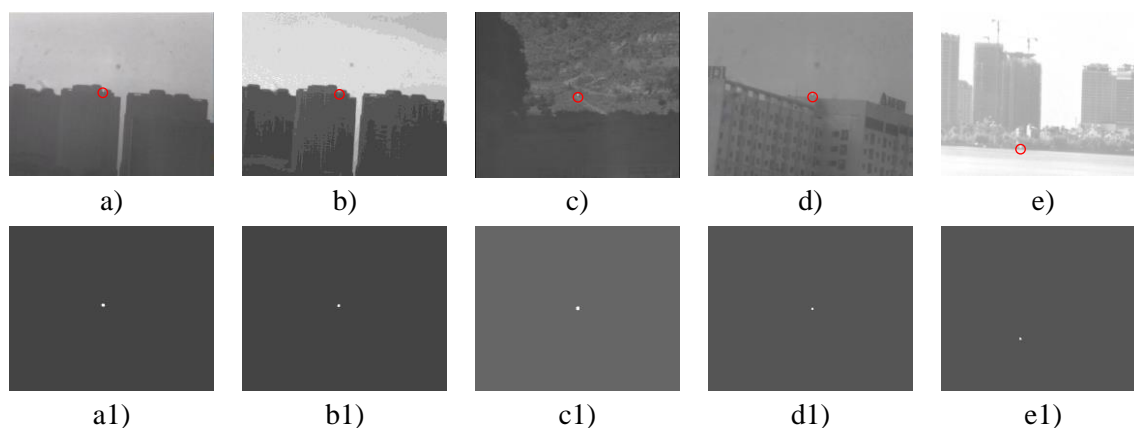
Theo kết quả bảng 1, BSF của thuật toán Top-hat theo hướng và AdMD đối với ảnh a) gần bằng nhau, tuy nhiên, trong trường hợp này SCRG của thuật toán Top-hat theo hướng lại cao hơn AdMD. Đối với ảnh b), BSF và SCRG của thuật toán Top-hat theo hướng nhỏ hơn rất nhiều so với thuật toán AdMD nhưng lại cao hơn rất nhiều so với Top-hat thường. Với ảnh c, Top-hat thường biểu hiện không tốt, AdMD có BSF cao hơn nhiều so với Top-hat theo hướng nhưng lại có SCRG kém hơn Top-hat theo hướng. Trong ảnh d) BSF và SCRG của thuật toán Top-hat theo hướng tốt hơn rất nhiều so với AdMD, BSF của thuật toán Top-hat theo hướng cũng tốt hơn thuật toán Top-hat thường, nhưng lại kém hơn về SCRG. Trong ảnh e), thuật toán Top-hat theo hướng biểu hiện tốt hơn hẳn 2 thuật toán còn lại.

Trên hình 4 đa số các trường hợp (ảnh a, b, c) thuật toán Top-hat thường cho hiệu quả phát hiện kém hơn 2 thuật toán còn lại. Trên hình 4a1 có thể thấy, sau khi sử dụng bộ lọc Top-hat theo hướng, độ xám tại vị trí mục tiêu cao hơn rất nhiều so với phông nền và nhiễu tạp, trong khi đó trên hình 4a2 sau khi sử dụng bộ lọc Top-hat thường, các nhiễu tạp không được khử tốt, rất nhiều nhiễu tạp có cường độ cao gần bằng mục tiêu; trên hình 4a3 mặc dù nhiễu tạp đã khử phần lớn, nhưng cũng chỉ tốt hơn trên hình 4a2, một số nhiễu tạp có cường độ rất cao. Trong hình 4b1, mặc dù thuật toán Top-hat theo hướng loại bỏ phông nền không tốt bằng thuật toán AdMD (hình 4b3), tuy nhiên Top-hat theo hướng đã tăng cường để độ xám mục tiêu cao hơn nhiễu tạp, ngược lại AdMD mặc dù loại bỏ phông nền rất tốt, nhưng cũng đã tăng cường cho một số vị trí nhiễu tạp có cường độ cao gần bằng mục tiêu. Trên hình 4c, hiệu quả tăng cường mục tiêu và loại bỏ phông nền của Top-hat theo hướng tốt hơn hẳn 2 thuật toán còn lại, trong khi đó thuật toán AdMD trong trường hợp này biểu hiện kém khi chỉ làm nổi bật được 1 mục tiêu và bỏ lọt hẳn 2 mục tiêu còn lại, đồng thời có 5 vị trí nhiễu tạp được tăng cường cường độ. Trong hình 4d, thuật toán Top-hat theo hướng mặc dù không loại bỏ thực sự tốt phông nền, nhưng cường độ của ba mục tiêu cũng đã được tăng cường; thuật toán Top-hat thường cũng đã tăng cường được cường độ cho 3 mục tiêu, nhưng có 2 mục tiêu không cao hơn nhiễu so với nhiễu tạp; thuật toán AdMD cho hiệu quả loại bỏ phông nền rất tốt, nhưng cũng đã loại bỏ mất 1 mục tiêu, 1 mục tiêu khác có cường độ lớn nhưng lại ngang bằng với 1 nhiễu tạp khác đã bị tăng cường.

Như vậy, qua hình 4 có thể thấy, hiệu quả của thuật toán Top-hat theo hướng tốt hơn hẳn so với thuật toán Top-hat thường; hiệu quả loại bỏ phông nền của thuật toán Top-hat theo hướng kém hơn so với thuật toán AdMD, tuy nhiên, thuật toán Top-hat theo hướng lại không bỏ lọt mục tiêu và ít tăng cường cường độ cho các nhiễu tạp hơn AdMD rất nhiều.



Hình 4. Kết quả phân tách mục tiêu và phong nền của các thuật toán.



Hình 5. Hình ảnh thử nghiệm.

Ảnh a đến e là ảnh đầu vào của thuật toán, vị trí của mục tiêu được khoanh trong vòng tròn màu đỏ, a1 đến e1 là ảnh binary chứa mục tiêu được làm nổi bật sau xử lý.

Khi kiểm chứng hiệu quả của hệ thống ở ngoài thực địa. Các hình ảnh a, d và e mục tiêu không dễ dàng được phát hiện bởi mắt người nhưng dễ dàng được tách ra khỏi phong nền cả khi tách ngưỡng tự động và đặt một ngưỡng thủ công rất thấp, do khi này mục tiêu sáng hơn phong nền và các nhiễu tạp thường có đường nét dài hoặc diện tích lớn. Ảnh đầu vào b, chụp tại vị trí của ảnh a nhưng vào lúc trời đang nắng gắt, rất khó để nhận ra đâu là mục tiêu bằng mắt người, nhưng với thuật toán top-hat theo hướng, mục tiêu được tách ra khỏi phong nền bằng ngưỡng tự động, nếu đặt ngưỡng thủ công, nhỏ hơn ngưỡng tự động một giá trị hơi lớn một chút, cả đèn pha và một số nhiễu tạp khác đều bị coi là mục tiêu, trong trường hợp này độ sáng đèn pha quá nhỏ, chênh lệch không đáng kể so với phong nền đặc biệt là các vật thể phản xạ mạnh bức xạ mặt trời. Hình ảnh e có quá nhiều nhiễu tạp, DMF_{θ} với tất cả các hướng vẫn còn nhiều vùng nổi bật, nhưng khi tính toán DMF và đặt ngưỡng thủ công cao hơn một chút so với ngưỡng tự động (khoảng 5%), kết quả là thuật toán đã tách mục tiêu một cách hoàn hảo ra khỏi phong nền.

Sau khi đã phát hiện được mục tiêu, hạ công suất đèn phát bằng biến trở và hạ ngưỡng thủ công của thuật toán xuống mức thấp để bức ảnh sau xử lý của thuật toán xuất hiện thêm 2 đến 3 mục tiêu giả. Khi này, kết hợp với việc xác nhận mục tiêu bằng cách tính cự li nhỏ nhất đến mục tiêu ở frame trước đó, mục tiêu thật được bám chính xác 100%, không xuất hiện lỗi bám.

4. KẾT LUẬN

Lợi dụng các đặc tính thống kê về mục tiêu hồng ngoại nhỏ luôn có độ sáng trội hơn phong nền ở mọi hướng, khác với nhiễu tạp trong phong nền có độ sáng chênh lệch so với phong nền rất khác biệt trên các hướng. Bộ lọc Top-hat theo hướng được thiết kế đã loại bỏ rất tốt các nhiễu tạp hồng ngoại trong phong nền và làm nổi bật mục tiêu hồng ngoại nhỏ. Đặc tính chuyển động chậm của mục tiêu do ở cự li xa cũng được lợi dụng để xác nhận mục tiêu dựa trên thông tin về vị trí của mục tiêu ở frame trước đó. Kết hợp giữa thuật toán Top-hat theo hướng và xác nhận mục tiêu trên video cho phép phát hiện và theo dõi mục tiêu với mức độ tin cậy cao và ổn định.

Sử dụng thuật toán kết hợp này cho phép thông qua các thiết bị trinh sát phát hiện sớm các mục tiêu xâm nhập từ xa, hoặc để trinh sát từ xa các đối tượng khó tiếp cận. Trong kỹ thuật điều khiển tên lửa, thuật toán được sử dụng để phát hiện, bám và xác định độ lệch của đèn đuôi tên lửa so với mục tiêu, từ đó cho phép theo dõi và tiêu diệt mục tiêu hoàn toàn tự động, thay thế cho các hệ thống điều khiển thủ công đã lạc hậu. Tuy nhiên, trong phong nền phức tạp, chứa nhiều đối tượng gần giống mục tiêu cần theo dõi, cần có thêm các thống kê khác về mục tiêu và phong nền để xác định được đâu là mục tiêu cần theo dõi.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Rawat, S.S., S.K. Verma, and Y. Kumar, "Review on recent development in infrared small target detection algorithms". *Procedia Computer Science*. **167**: p. 2496-2505, (2020).
- [2]. Zhou, F., et al., "Graph-Regularized Laplace Approximation for Detecting Small Infrared Target Against Complex Backgrounds". *IEEE Access*. **7**: p. 85354-85371, (2019).
- [3]. Gao, C., et al., "Infrared patch-image model for small target detection in a single image". *IEEE Trans Image Process*. **22**(12): p. 4996-5009, (2013).
- [4]. Yang, L., J. Yang, and K. Yang, "Adaptive detection for infrared small target under sea-sky complex background". *Electronics Letters*. **40**(17), (2004).
- [5]. Lopez-Alonso, J.M., J. Alda, and E. Bernabeu, "Principal-component characterization of noise for infrared images". *Appl Opt*. **41**(2): p. 320-31, (2002).
- [6]. Kim, S., et al., "Small Target Detection Utilizing Robust Methods of the Human Visual System forIRST". *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. **30**(9): p. 994-1011, (2009).
- [7]. Fan, J., et al., "IRSDT: A Framework for Infrared Small Target Tracking with Enhanced Detection". *Sensors (Basel)*. **23**(9), (2023).
- [8]. Bai, Y., et al., "Cross-Connected Bidirectional Pyramid Network for Infrared Small-Dim Target Detection". *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. **19**: p. 1-5, (2022).

-
- [9]. Li, Y., et al., "Infrared Small Target Detection Based on Gradient-Intensity Joint Saliency Measure". IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. **15**: p. 7687-7699, (2022).
- [10]. Zhang, F., C. Li, and L. Shi, *Detecting and tracking dim moving point target in IR image sequence*. Infrared Physics & Technology. **46**(4): p. 323-328, (2005).
- [11]. Deshpande, S., et al., "Max-mean and max-median filters for detection of small targets". SPIE's International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation. Vol. 3809. (1999).
- [12]. Bai, X. and F. Zhou, "Analysis of new top-hat transformation and the application for infrared dim small target detection". Pattern Recognition. **43**(6): p. 2145-2156, (2010).
- [13]. Li, Y., et al., "Infrared maritime dim small target detection based on spatiotemporal cues and directional morphological filtering". Infrared Physics & Technology. **115**, (2021).
- [14]. Wang, X., et al., "A sparse representation-based method for infrared dim target detection under sea-sky background". Infrared Physics & Technology. **71**: p. 347-355, (2015).
- [15]. Moradi, S., P. Moallem, and M.F. Sabahi, "Fast and robust small infrared target detection using absolute directional mean difference algorithm". Signal Processing. **177**, (2020).

ABSTRACT

Detection and tracking of small infrared motion targets using directional Top-hat algorithm

Small targets are shown on the infrared image as small bright spots, do not carry any characteristics of the target, are difficult to detect, but are the object of reconnaissance and detection equipment, according to long-range tracking. On the basis of the characteristics of the small infrared target and the Top-hat algorithm, a method of using the directional Top-hat filter is proposed to remove the background and enhance the target. Taking advantage of the rich information in consecutive shots of a video and the slow change in position between frames, using the search method from the vicinity of the target position in the previous frame to determine the target, thereby limiting the missing object being tracked. The test results show that the directional Top-hat algorithm is effective in detecting small targets in complex backgrounds, combined with the target recognition algorithm of consecutive frames, allowing precise tracking of the target of interest.

Keywords: Small infrared target; Top-hat; Tracking; Reconnaissance.