

TÍNH TOÁN ẢNH HƯỞNG CỦA HIỆU ỨNG NARCISSUS TRONG CÁC THIẾT BỊ ẢNH NHIỆT CÓ LÀM LẠNH

Nguyễn Quang Hiệp*

Tóm tắt: Bài báo trình bày cơ sở lý thuyết và cách tính toán ảnh hưởng của hiệu ứng Narcissus tới chất lượng tạo ảnh của thiết bị ảnh nhiệt (TBAN) có làm lạnh. Dựa trên đại lượng hiệu nhiệt độ do hiệu ứng Narcissus gây lên (NITD - Narcissus induced temperature difference) và ứng dụng phần mềm Zemax ở chế độ non-sequential, ảnh hưởng của hiệu ứng Narcissus đã được tính toán định lượng cho từng bề mặt và toàn hệ quang. Kết quả tính toán cho một hệ quang tiêu biểu cho thấy NITD đạt tới cỡ 280 mK, lớn gấp nhiều lần độ nhạy của đầu thu, làm ảnh hưởng lớn tới chất lượng ảnh của TBAN. Phương pháp tính toán này cho phép phân tích ảnh hưởng của hiệu ứng Narcissus ngay trong quá trình thiết kế TBAN.

Từ khóa: Thiết bị ảnh nhiệt có làm lạnh; Hệ thống quang học; Hiệu ứng Narcissus; NITD.

1. MỞ ĐẦU

Ngày nay, thiết bị ảnh nhiệt (TBAN) nói chung và TBAN được làm lạnh nói riêng được sử dụng ngày càng nhiều trong các lĩnh vực khác nhau, đặc biệt là trong các hoạt động quân sự do các ưu điểm đặc biệt của chúng như: Tăng khả năng phát hiện các mục tiêu có độ chênh lệch nhiệt độ nhỏ; Tăng cự ly quan sát mục tiêu trong các điều kiện khác nhau như đêm tối, sương mù, khói bụi,...; Tăng độ chính xác ngắm bắn,... Bên cạnh các ưu điểm đó, do trong kết cấu của mình, các TBAN có làm lạnh sử dụng đầu thu bức xạ hồng ngoại được làm lạnh (nhiệt độ làm việc trong khoảng từ 70 K đến 110 K) nên hiệu ứng Narcissus xuất hiện làm giảm chất lượng tạo ảnh của chúng. Hiệu ứng Narcissus là hiện tượng trên đầu thu bức xạ quang học có sự phân bố không đồng đều của bức xạ do chính đầu thu và khung vật kính bức xạ ra và được phản xạ trên các bề mặt quang học trong hệ thống quang học của TBAN quay trở lại đầu thu [1-4]. Điều này dẫn đến trên màn hình hiển thị của TBAN xuất hiện sự chênh lệch nhiệt độ giả (không tương thích với thực tế) giữa các vùng khác nhau trong thị giới, thường được gọi là hiệu nhiệt độ do hiệu ứng Narcissus gây ra (NITD). Hiệu ứng này cần phải được kiểm soát và hạn chế nhằm đảm bảo chất lượng tạo ảnh của TBAN có làm lạnh. Hiệu ứng Narcissus và các phương pháp xác định NITD đã được các tác giả ngoài nước nghiên cứu [1-5]. Tuy nhiên, chúng được trình bày khá sơ lược, một số phương pháp chỉ xác định một cách định tính ảnh hưởng của hiệu ứng Narcissus [3], một số phương pháp tính khác khá phức tạp, cần có phần mềm bổ sung trong Code V [5]. Hơn nữa, ở trong nước hiện chưa có công bố nào về hiệu ứng này. Bài báo này sẽ trình bày cụ thể cơ sở tính toán và cách dùng phần mềm thiết kế quang học Zemax ở chế độ non-sequential để xác định thông số đặc trưng của hiệu ứng là NITD.

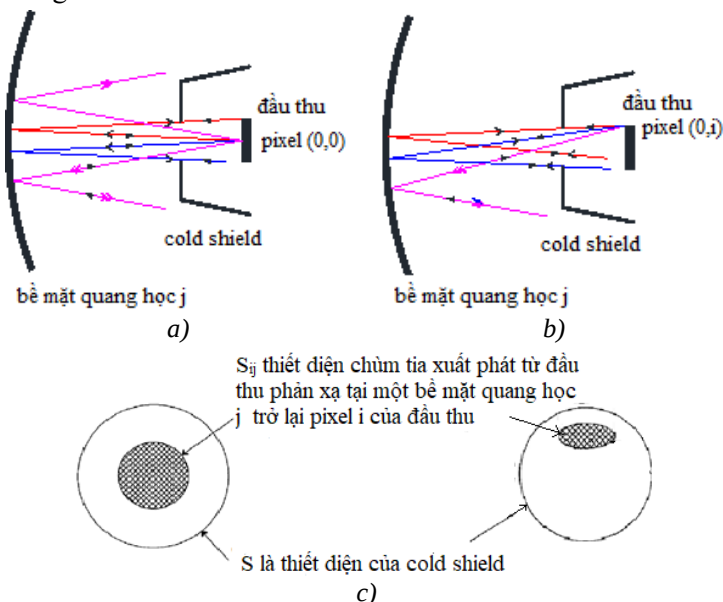
2. TÍNH TOÁN ẢNH HƯỞNG CỦA HIỆU ỨNG NARCISSUS

2.1. Cơ sở tính toán ảnh hưởng của hiệu ứng Narcissus

Như chúng ta đã biết, bất kỳ bề mặt nào có nhiệt độ lớn hơn 0 K đều phát ra bức xạ. Trên hình 1 thể hiện chùm bức xạ từ pixel trung tâm (hình 1a) và từ pixel ngoài rìa đầu thu bức xạ (hình 1b) sau khi đi qua thiết diện của cold shield (S trên hình 1c) và đi về phía các bề mặt quang học trong hệ thống quang học của vật kính ảnh nhiệt và được phản xạ tại một bề mặt quang học nào đó. Sau khi phản xạ, một phần chùm tia đó có thể quay lại bề mặt đầu thu (phần này đi qua thiết diện S_{ij} (hình 1c)), phần còn lại sẽ đến các bề mặt khác, ở đây là khung vật kính (housing).

Nếu quan sát các chùm bức xạ được phát ra từ khung vật kính là nơi có nhiệt độ cao, giả sử, bằng với nhiệt độ môi trường làm việc của TBAN (cỡ 300 K) và từ đầu thu bức xạ (detector) là nơi có nhiệt độ rất thấp (cỡ 77 K) thấy rằng, với các pixel có vị trí khác nhau trên mặt phẳng đầu

thu, lượng bức xạ đến từ đầu thu và từ khung vật kính, sau khi phản xạ tại một bề mặt quang học nào đó, sẽ khác nhau. Tại các pixel trung tâm, tỷ lệ bức xạ nhận được từ đầu thu sẽ lớn hơn so với các pixel ngoài rìa, đồng thời với đó, tỷ lệ lượng bức xạ nhận được từ khung vật kính sẽ nhỏ hơn so với các pixel ngoài rìa.



Hình 1. Sự phản xạ của chùm tia bức xạ từ đầu thu và khung vật kính trên một bề mặt quang học trong hệ quang.

Như vậy, tương ứng với các pixel khác nhau trên bề mặt đầu thu, lượng bức xạ do đầu thu và khung vật kính bức xạ ra sau đó được phản xạ trên các bề mặt quang học và quay trở lại đầu thu là khác nhau. Do sự chênh lệch nhiệt độ rất lớn giữa đầu thu và khung vật kính (so với hiệu nhiệt độ giữa phòng nền và mục tiêu cần phát hiện) nên dẫn đến sự khác nhau về thông lượng bức xạ mà các pixel ở các vị trí khác nhau trên mặt phẳng đầu thu sẽ nhận được, tức là gây nên sự phân bố không đồng đều về lượng bức xạ thu được trên mặt phẳng đầu thu. Điều này dẫn đến sự xuất hiện tín hiệu về hiệu nhiệt độ giả giữa các vùng thị giới tương ứng với các vùng tạo ảnh khác nhau trên đầu thu. Tín hiệu về hiệu nhiệt độ giả này có thể lớn hơn và che lấp đi tín hiệu về hiệu nhiệt độ thực tế giữa mục tiêu và phòng nền nếu chúng nằm chung trong vùng thị giới của khí tài. Đây chính là căn nguyên của hiệu ứng Narcissus và hiệu nhiệt độ giả đó thường được đặc trưng bởi đại lượng hiệu nhiệt độ do hiệu ứng Narcissus gây nên. Điều này cũng giải thích vì sao hiệu ứng Narcissus xuất hiện một cách rõ nét trong các TBAN được làm lạnh. Đối với các TBAN không làm lạnh, do sự chênh lệch nhiệt độ giữa đầu thu và khung vật kính là không đáng kể và độ nhạy nhiệt nhỏ (giá trị lớn) nên hiệu ứng Narcissus hoàn toàn có thể bỏ qua.

Như phân tích ở trên (hình 1), S là thiết diện của cold shield, S_{ij} thể hiện phần thiết diện của cold shield được điền đầy bởi chùm tia xuất phát từ đầu thu sau khi phản xạ trên một bề mặt quang học j của hệ thống quang học quay trở lại đến được pixel i của đầu thu. Phần thiết diện còn lại của cold shield ($S - S_{ij}$) được điền đầy bởi chùm tia xuất phát từ khung vật kính sau khi phản xạ trên bề mặt quang học j của hệ thống quang học đến được pixel i trên mặt phẳng đầu thu.

Thông lượng bức xạ tới pixel thứ i của đầu thu được tính theo công thức:

$$\Phi_{ij} = \Phi_{ijd} + \Phi_{ijh} \quad (1)$$

Trong đó: Φ_{ijd} - Thông lượng bức xạ từ đầu thu sau khi phản xạ trên bề mặt quang học j đến được pixel i; Φ_{ijh} - Thông lượng bức xạ từ khung vật kính sau khi phản xạ trên bề mặt quang học j đến được pixel i.

Chúng được xác định theo các công thức sau [6]:

$$\Phi_{ijd} = \tau_j^2 \rho_j k S_{ij} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T_d) d\lambda; \quad \Phi_{ijh} = \tau_j^2 \rho_j k (S - S_{ij}) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T_h) d\lambda \quad (2)$$

Trong đó: τ_j là hệ số truyền qua trung bình tính từ đầu thu đến bề mặt quang học j; ρ_j là hệ số phản xạ trung bình trên bề mặt quang học j; k là hằng số phụ thuộc vào khoảng cách từ cold shield đến mặt phẳng đầu thu và kích thước pixel của đầu thu; T_d và T_h là nhiệt độ của đầu thu và nhiệt độ của khung vật kính; $L(\lambda, T_d)$ và $L(\lambda, T_h)$ là mật độ phổ độ chói năng lượng của đầu thu và khung vật kính (coi chúng là các vật đen tuyệt đối); $\lambda_1 \div \lambda_2$ là vùng phổ làm việc của đầu thu bức xạ quang học.

Từ đó, thay (2) vào (1) ta được:

$$\Phi_{ij} = \tau_j^2 \rho_j k S_{ij} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [L(\lambda, T_d) - L(\lambda, T_h)] d\lambda + \tau_j^2 \rho_j k S \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T_h) d\lambda \quad (3)$$

Nhận thấy rằng, số hạng thứ hai trong công thức trên là thành phần không đổi, tương ứng với thông lượng bức xạ đến pixel mà tại đó chỉ nhận các bức xạ từ khung vật kính phát ra và phản xạ trên bề mặt quang học. Các pixel này là các pixel ở mép thị giới. Do sự phân bố thông lượng bức xạ này là đồng đều nên sau khi hiệu chỉnh sẽ không còn gây ra hiệu nhiệt độ giả. Hiệu nhiệt độ giả chỉ được tạo ra bởi sự chênh lệch giữa thông lượng bức xạ đến các pixel trung tâm thị giới và thông lượng bức xạ đến các pixel ở mép thị giới. Do đó, thông lượng bức xạ gây ra tín hiệu giả (hiệu nhiệt độ giả) tại pixel i được xác định theo công thức sau:

$$\Delta \Phi_{ij} = \tau_j^2 \rho_j k S_{ij} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [L(\lambda, T_d) - L(\lambda, T_h)] d\lambda \quad (4)$$

Sự chênh lệch về thông lượng bức xạ đến các pixel khác nhau do hiệu ứng Narcissus gây nên tương đương với sự thay đổi của thông lượng bức xạ từ mục tiêu khi nhiệt độ của nó thay đổi một lượng $\Delta T_{ij \text{ Nar}}$ (hoặc khi giữa phòng nền và mục tiêu có sự sai khác nhiệt độ là $\Delta T_{ij \text{ Nar}}$), hay còn gọi là hiệu nhiệt độ do hiệu ứng Narcissus gây nên tại pixel i NITD_{ij}. Do đó, $\Delta \Phi_{ij}$ được xác định như sau [6]:

$$\Delta \Phi_{ij} = k S \tau \Delta T_{ij \text{ Nar}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial L(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda = k S \tau \text{NITD}_{ij} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial L(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda \quad (5)$$

Trong đó: τ là hệ số truyền qua trung bình của cả hệ thống quang học; T là nhiệt độ trung bình của phòng nền và mục tiêu.

Từ đó, suy ra hiệu nhiệt độ tương đương do hiệu ứng Narcissus tạo ra tại pixel i do sự phản xạ trên bề mặt quang học j được xác định theo công thức sau:

$$\text{NITD}_{ij} = \frac{\tau_j^2 \rho_j S_{ij} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [L(\lambda, T_d) - L(\lambda, T_h)] d\lambda}{\tau S \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial L(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda} \quad (6)$$

Hiệu nhiệt độ tương đương do hiệu ứng Narcissus gây ra tại pixel i do sự phản xạ trên tất cả các bề mặt quang học trong hệ quang được xác định theo công thức sau:

$$NITD_i = \frac{(\sum_j \tau_j^2 \rho_j S_{ij}) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [L(\lambda, T_d) - L(\lambda, T_h)] d\lambda}{\tau S \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial L(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda} \quad (7)$$

Tỷ lệ S_{ij} / S được tính gần đúng bằng cách sử dụng một lưới các tia sáng có số lượng lớn cách đều nhau trong không gian cosin chỉ phương, phát xạ ra từ pixel i trên đầu thu điện đầy thiết diện của cold shield đến bề mặt phản xạ j đang xét và xác định số lượng các tia được phản xạ trở lại qua cold shield đến bề mặt đầu thu. Gọi M là tổng số tia từ pixel i trên đầu thu phát ra và điện đầy thiết diện của cold shield; m_{ij} là số lượng tia (trong tổng số M tia ban đầu) sau khi phản xạ trên bề mặt quang học j đi qua cold shield quay trở lại đến đầu thu. Khi đó $S_{ij} / S \approx m_{ij} / M$. M có giá trị càng lớn thì độ chính xác của tỷ lệ này sẽ càng cao. Việc tính toán tỷ số này có thể được thực hiện theo đường truyền tia cận trục hay tia thực [2, 4, 5]. Trong bài báo này, tỷ số trên được xác định bằng cách dùng phần mềm Zemax trong chế độ non-sequential.

Như vậy, công thức trên được viết lại như sau:

$$NITD_i = \frac{(\sum_j \tau_j^2 \rho_j m_{ij}) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [L(\lambda, T_d) - L(\lambda, T_h)] d\lambda}{\tau M \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial L(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda} \quad (8)$$

Nhận thấy rằng, NITD tại mặt phẳng đầu thu sẽ tỷ lệ thuận với sự chênh lệch về nhiệt độ giữa khung vỏ vật kính và mặt phẳng đầu thu. Điều này giải thích vì sao hiệu ứng Narcissus thể hiện rõ nét ở TBAN có làm lạnh, còn trong các TBAN không làm lạnh hiệu ứng này hoàn toàn có thể bỏ qua. Bên cạnh đó, NITD cũng tỷ lệ thuận với hệ số phản xạ trên từng bề mặt và tỷ số giữa số lượng tia bức xạ từ đầu thu sau khi phản xạ trên các bề mặt quang học quay trở lại đến bề mặt đầu thu và tổng số lượng tia bức xạ do đầu thu bức xạ ra và điện đầy thiết diện cold shield. Tỷ số này phụ thuộc vào các thông số kết cấu của hệ thống quang học, đặc biệt là vị trí và bán kính cong của các bề mặt quang học trong hệ quang.

2.2. Xác định hiệu nhiệt độ do hiệu ứng Narcissus gây nên

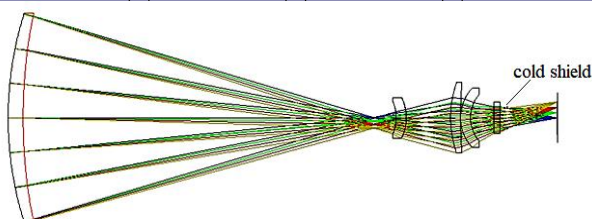
Để khảo sát ảnh hưởng của hiệu ứng Narcissus, ta sẽ thực hiện tính toán NITD do sự phản xạ tại từng bề mặt trên hệ quang gây ra và NITD do toàn bộ hệ thống quang học gây ra đối với một hệ quang cụ thể trong TBAN có làm lạnh. Thông số kết cấu của hệ quang và hình dạng của nó được thể hiện trong bảng 1, bảng 2 và hình 2 [7]. Cho rằng, hệ quang làm việc trong điều kiện: nhiệt độ khung vật kính và nhiệt độ môi trường $T_h = T = 300$ K, nhiệt độ đầu thu $T_d = 77$ K, hệ số phản xạ trung bình tại mỗi bề mặt quang học là 0,5%, bỏ qua sự hấp thụ trong các thấu kính, vùng phổ làm việc của hệ quang là $(3 \div 5 \mu\text{m})$. Đầu thu và khung vật kính được coi là các vật đen tuyệt đối. Trong chế độ non-sequential của Zemax, từ một pixel i nhất định tính từ trung tâm đầu thu theo phương hướng tâm trên mặt phẳng đầu thu phát ra M tia (Analysis Rays) được phân bố đều theo các hướng khác nhau và điện đầy thiết diện cold shield S ; m_{ij} là tổng số tia quay trở lại đầu thu và được Zemax tự động xác định (Detector Viewer – Total Hits). Số lượng tia M được lựa chọn bằng cách tăng dần đến khi sai lệch tỷ số m_{ij} / M giữa các M liên tiếp khác nhau nhỏ hơn $10^{-3}\%$. Do chiều cao các bậc của các mặt binary chỉ cỡ vài micromet và số lượng bậc không nhiều trên toàn bề mặt thấu kính nên ta có thể lấy gần đúng các bề mặt đó theo biên dạng đường bao của chúng. Theo các điều kiện trên, kết quả tính toán NITD được thể hiện trên hình 3.

Bảng 1. Thông số kết cấu của hệ thống quang học trong TBAN có làm lạnh.

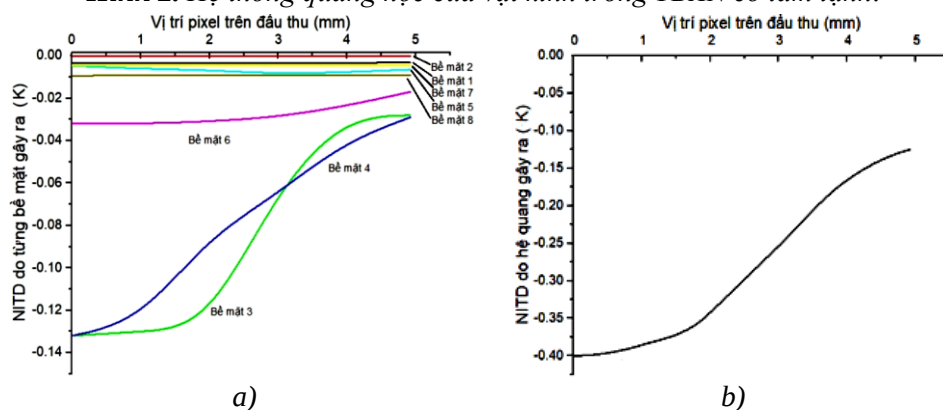
Surf>Type	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Conic	Diffract Order
OBJ	Standard	Infinity	Infinity	Infinity	0.000000	
1	Standard	128.210000	6.000000	SILICON	40.288465	0.000000
2	Binary 2	194.711000	149.687000		39.487652	0.616428
3	Standard	-14.429000	4.000000	SILICON	6.300924	0.000000
4	Standard	-17.273000	17.760000		7.844410	0.000000
5	Binary 2	37.940000	4.000000	SILICON	13.594847	-1.268600
6	Standard	159.010000	0.000000		13.214544	0.000000
7	Standard	16.214000	4.000000	SILICON	11.422756	0.000000
8	Standard	13.332000	9.319000		9.110315	0.000000
9	Standard	Infinity	2.500000	GERMANIUM	6.108527	0.000000
10	Standard	Infinity	3.000000		5.817907	0.000000
STO	Standard	Infinity	19.775000		3.750000	U
12	Standard	Infinity	0.300000	GERMANIUM	6.148983	0.000000
13	Standard	Infinity	0.000000		6.168006	0.000000
IMA	Standard	Infinity	-		9.480000	U

Bảng 2. Thông số của 2 bề mặt binary trong hệ thống quang học.

Surf>Type	Maximum Term #	Norm Radius	Coeff. on p ²	Coeff. on p ⁴	Coeff. on p ⁶
OBJ	Standard				
1	Standard				
2	Binary 2	3	50.000	-97.056	13.679
3	Standard				
4	Standard				
5	Binary 2	3	25.000	-197.100	63.299



Hình 2. Hệ thống quang học của vật kính trong TBAN có làm lạnh.



Hình 3. NITD do sự phản xạ trên từng bề mặt (a) và do cả hệ thống quang học (b) gây nên tại mặt phẳng đầu thu.

Từ đồ thị (hình 3a) ta thấy, NITD do cả hệ thống quang học gây nên tại bề mặt đầu thu chủ yếu là do sự phản xạ trên các bề mặt 3 và 4. NITD do các bề mặt này gây ra có giá trị lớn nhất và phân bố không đồng đều nhất trên mặt phẳng đầu thu. Sau khi hiệu chỉnh nhiễu nền bằng phương

pháp điện tử hoặc kỹ thuật số để loại bỏ (quy không) NITD tại các pixel vùng biên thị giới thì giá trị lớn nhất NITD do hệ thống quang học gây ra vào khoảng 280 mK và chủ yếu tập trung tại các pixel vùng trung tâm đầu thu, tức là tại trung tâm thị giới (hình 3b). Giá trị này lớn hơn rất nhiều so với độ nhạy nhiệt (NETD) của các đầu thu được làm lạnh (khoảng $20 \div 25$ mK). Do đó, hiệu nhiệt độ giả do hiệu ứng Narcissus trong TBAN sẽ làm giảm chất lượng tạo ảnh, giảm khả năng phát hiện của TBAN, đặc biệt trong vùng trung tâm thị giới của nó.

3. KẾT LUẬN

Bằng cách sử dụng phần mềm ZEMAX để tính toán hiệu ứng Narcissus cho một hệ quang cụ thể trong TBAN có làm lạnh, thấy rằng, sau khi đã hiệu chỉnh thì NITD do hệ quang đó gây ra ở trung tâm thị giới là 280 mK, lớn hơn rất nhiều so với độ nhạy nhiệt của TBAN đó (25 mK). Như vậy, hiệu ứng Narcissus ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng tạo ảnh của hệ thống quang học và đến khả năng phát hiện của TBAN, đặc biệt là các TBAN được làm lạnh. Việc xác định NITD dựa vào chế độ non-sequential trong Zemax không quá phức tạp và có thể dùng để đánh giá hiệu ứng này ngay trong giai đoạn thiết kế hệ thống quang học. Đây là điều rất cần thiết nhằm kiểm soát và đưa ra các phương án thay đổi bản thiết kế để hạn chế ở mức tối đa ảnh hưởng của nó.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Anthony S. Lau. "The narcissus effect in infrared optical scanning systems". SPIE Vol 107 Stray Light Problems in Optical Systems, 1977.
- [2]. S. J. Dobson, A. Cox, and K. Lu. "Calculation and optimization of Narcissus using paraxial ray tracing". Applied Optics, Vol. 35, No. 16, 1996.
- [3]. James W. Howard and Irving R. Abel. "Narcissus: reflections on retroreflections in thermal imaging systems". Applied Optics, Vol. 21, No. 18, 1982.
- [4]. Lawrence M. Scherr, Harold J. Orlando. "Narcissus considerations in optical design for infrared staring arrays". SPIE, Vol. 2864, 1996.
- [5]. Yang Liu, Xiaobing Zhong, Ning Zhong, Changseng Zheng, and Lizhan Wen. "Accurate and fast narcissus calculation based on sequential ray trace". Applied Optics, Vol. 52, No. 33, 2012.
- [6]. J. M. Lloyd. "Thermal Imaging Systems". Plenum, 1975.
- [7]. M. Nadeem Akram. "Simulation and control of narcissus phenomenon using nonsequential ray tracing. I. Staring camera in $3 \div 5 \mu\text{m}$ waveband". Applied Optics, Vol. 49, No. 6, 2010.

ABSTRACT

CALCULATION OF THE INFLUENCE OF NARCISSUS EFFECT IN COOLED THERMAL IMAGING DEVICES

In this paper the theoretical basics and the calculation method of the influence of Narcissus effect in cooled thermal imaging devices are presented. This effect was calculated quantitatively for each surface and the whole optical system based on the NITD parameter and Zemax software application working in the non-sequential mode. Calculation results for a typical optical system show that the spurious temperature difference is about 280 mK, many times greater than the sensitivity of the detector, greatly affecting the image quality of cooled thermal imaging devices. This calculation method allows to analyze the influence of the Narcissus effect during the design of the cooled thermal imaging devices.

Keywords: Cooled thermal imaging device; Optical system; Narcissus effect; NITD

Nhận bài ngày 31 tháng 5 năm 2021

Hoàn thiện ngày 26 tháng 7 năm 2021

Chấp nhận đăng ngày 10 tháng 10 năm 2021

Địa chỉ: Bộ môn Khí tài quang học, Học viện Kỹ thuật quân sự.

**Email:* quanghiepktq@gmail.com.