

# NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ HỆ THỐNG QUANG HỌC CỦA ỐNG KÍNH ẢNH NHIỆT CÓ TIÊU CỰ THAY ĐỔI NHẢY BẠC

Nguyễn Quang Hiệp<sup>1,\*</sup>, Lê Duy Tuấn<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

DOI: 10.56651/lqdtu.jst.v18.n02.686

## Tóm tắt

Bài báo trình bày việc nghiên cứu thiết kế hệ thống quang học của ống kính ảnh nhiệt có tiêu cự thay đổi nhảy bậc (240 mm, 80 mm và 30 mm) bằng cách thêm vào hệ quang ban đầu (có tiêu cự là 240 mm) các cụm thấu kính khác nhau. Hệ quang được thiết kế có kết cấu đơn giản, chỉ bao gồm 6 thấu kính, trong đó có 3 bề mặt conic. Các thấu kính trong hệ quang được chia thành 3 cụm: Cụm vật kính phía trước, cụm thay đổi tiêu cự và cụm truyền ảnh (relay lens). Tất cả các thấu kính được làm từ một vật liệu duy nhất là Si. Hệ quang có chất lượng tạo ảnh tốt, hàm truyền điều biến (MTF) tại tần số 20 cặp vạch/mm lớn hơn 0,24; méo ảnh không lớn hơn 2,5%, thỏa mãn yêu cầu đặt ra đối với ống kính ảnh nhiệt có làm lạnh hoạt động trong vùng phổ hồng ngoại bước sóng trung.

**Từ khóa:** Ống kính ảnh nhiệt; hệ thống quang học; tiêu cự thay đổi nhảy bậc; hàm truyền điều biến; bề mặt conic.

## 1. Mở đầu

Một trong những đặc điểm nổi bật của ống kính ảnh nhiệt có làm lạnh là độ nhạy nhiệt cao, do đó hệ thống quang học của nó thường được thiết kế để hoạt động ở nhiều mức tiêu cự khác nhau, trong đó tiêu cự dài để nhận dạng và ngắm bắn các mục tiêu ở cự ly xa; tiêu cự ngắn được dùng để mở rộng phạm vi quan sát, sục sạo và kịp thời phát hiện mục tiêu trong vùng thị giới rộng.

Hệ quang có tiêu cự thay đổi được phân thành 2 nhóm chính: thay đổi liên tục và thay đổi rời rạc (theo các nấc) [1-4]. Để thực hiện việc thay đổi tiêu cự theo nấc, thường có hai phương pháp chính. Phương pháp thứ nhất là dịch chuyển một cụm thấu kính dọc theo quang trục (step-motion). Phương pháp thứ hai là sẽ thêm vào hệ quang ban đầu các nhóm thấu kính khác nhau nhằm thay đổi tiêu cự theo các nấc khác nhau (rotate-in).

Phương pháp dịch chuyển thành phần dọc theo quang trục có ưu điểm là không cần các thành phần khác và khoảng không gian dự trữ cho chúng. Hơn nữa, việc dịch chuyển thành phần có thể vừa thực hiện được chức năng thay đổi tiêu cự, vừa thực hiện được chức năng lấy nét (focus) đối với vật ở các cự ly khác nhau và vừa để bù ảnh hưởng của sự thay đổi nhiệt độ. Tuy nhiên, phương pháp này lại có nhược điểm là do có thành phần

---

\* Email: quanghiep.nguyen@lqdtu.edu.vn

chuyển động trong chế độ tiêu cự dài nên mức ổn định của trục quang thấp, dễ gây sai số khi ngắm bắn. Ngoài ra, theo các nghiên cứu đã công bố thì đối với phương pháp này do quang sai dư, đặc biệt là quang sai dọc trục còn lớn, nên khả năng thay đổi tiêu cự là không lớn (thường là 3-5 lần) [5].

Phương pháp thêm thành phần có nhược điểm là cần khoảng không gian dự trữ dẫn đến kích thước ngang của hệ quang và thiết bị ảnh nhiệt tăng lên. Tuy nhiên, phương pháp này có ưu điểm là độ ổn định quang trục cao khi tiêu cự lớn, khả năng khử quang sai tốt, đặc biệt trong chế độ tiêu cự ngắn và khả năng thay đổi tiêu cự lớn (lớn hơn 5 lần) [5].

Hệ thống quang học trong ống kính ảnh nhiệt có tiêu cự thay đổi đã được nghiên cứu [3-7], tuy nhiên, phần lớn các hệ quang thường chỉ có hai mức thay đổi tiêu cự, các thấu kính trong hệ được làm từ các vật liệu khác nhau và trong kết cấu của chúng thường có 2 đến 3 bề mặt phi cầu/nhiều xạ để vừa đảm bảo chất lượng tạo ảnh, vừa đảm bảo yêu cầu về kích thước. Để nâng cao khả năng gia công trong nước, tăng tính tự chủ khi chế tạo ống kính ảnh nhiệt có tiêu cự thay đổi nhảy bậc, đồng thời giảm giá thành bằng cách giảm số vật liệu và số thấu kính được sử dụng mà vẫn đảm bảo chất lượng tạo ảnh, bài báo này sẽ tập trung trình bày việc thiết kế hệ thống quang học cho ống kính ảnh nhiệt hoạt động trong vùng hồng ngoại bước sóng trung có tiêu cự thay đổi nhảy bậc ở 3 mức với tỉ lệ thay đổi là 8 lần, trong đó chỉ sử dụng một vật liệu duy nhất là Silicon (Si) và không sử dụng bề mặt phi cầu/nhiều xạ. Việc thay đổi tiêu cự được thực hiện bằng phương pháp thêm thành phần. Trong quá trình thiết kế có sử dụng phần mềm thiết kế quang học Zemax [8].

## 2. Xác định các thông số bậc nhất của hệ thống quang học

Quá trình thiết kế một hệ thống quang học gồm 2 phần chính: 1) Xác định các thông số bậc nhất cơ bản của hệ thống quang học (hay còn gọi là tính toán kích thước) và 2) Thiết kế quang sai, trong đó phần 2 bao gồm các bước: lựa chọn vật liệu, xác định cấu hình; xác định hệ quang ban đầu và tối ưu hóa hệ quang ban đầu để nhận được hệ quang đảm bảo chất lượng tạo ảnh theo yêu cầu [9].

Các thông số bậc nhất của hệ thống quang học cần thiết kế được lựa chọn và tính toán dựa trên các yêu cầu kỹ thuật của ống kính ảnh nhiệt (Bảng 1) và loại đầu thu được sử dụng trong ống kính (Bảng 2).

Do hệ quang cần thiết kế làm việc với 3 mức tiêu cự nên việc tính toán kích thước hệ quang được thực hiện theo 3 bước sau:

- Bước 1: Tính toán kích thước hệ quang ở chế độ tiêu cự dài (NFOV)
- Bước 2: Tính toán kích thước hệ quang ở chế độ tiêu cự trung bình (MFOV)
- Bước 3: Tính toán kích thước hệ quang ở chế độ tiêu cự ngắn (WFOV)

Ở chế độ tiêu cự dài, hệ quang chỉ gồm có 2 thành phần: vật kính phía trước và hệ truyền ảnh (relay lens) phía sau (Hình 1a). Yêu cầu đối với hệ quang ở chế độ tiêu cự dài là: tiêu cự 240 mm; số khẩu độ  $F/\# = 4$ . Ngoài ra, trong chế độ này, để đảm bảo kích thước của vật kính phía trước là nhỏ nhất thì đồng tử vào của hệ quang sẽ trùng với khung của vật kính phía trước.

Bảng 1. Một số yêu cầu kỹ thuật của ống kính ảnh nhiệt

Yêu cầu kỹ thuật	Giá trị cần đạt
Tiêu cự thay đổi nhảy bậc theo 3 mức	240, 80 và 30 mm
Số khẩu độ hệ quang (F/#)	4,0
Vùng phổ hoạt động	3,5 - 4,7 $\mu\text{m}$
Giá trị MTF đối với điểm nằm trên quang trục, tại tần số 20 cặp vạch/mm	> 20% tại tất cả các vị trí zoom
Méo ảnh	< 10%

Bảng 2. Các thông số chính của đầu thu ảnh nhiệt SCORPIO-MW-K508 [10]

Ký hiệu đầu thu	LEO-MW-K563
Độ phân giải	640 × 480
Kích thước điểm ảnh	15 $\mu\text{m}$
Vùng phổ làm việc	3,7 - 4,8 $\mu\text{m}$
Độ nhạy nhiệt (NETD)	< 22 mK @ F/4,0
Đường kính cửa chắn lạnh (cold shield)	5,18 mm
Khoảng cách từ cold shield đến FPA	20,57 mm

Ở chế độ tiêu cự trung bình (80 mm) và tiêu cự ngắn (30 mm) (Hình 1b và 1c), trong thành phần của hệ quang ban đầu sẽ được thêm vào các cụm thay đổi tiêu cự tương ứng. Bên cạnh đó, cần đảm bảo số khẩu độ  $F/\#$  và mặt phẳng ảnh của hệ quang không đổi.

Cụm thay đổi tiêu cự bao gồm hai thành phần: thành phần âm phía trước và thành phần dương phía sau. Trong đó, thành phần âm sẽ có nhiệm vụ thay đổi tiêu cự, còn thành phần dương sẽ có nhiệm vụ giữ vị trí mặt phẳng ảnh sau vật kính không đổi.

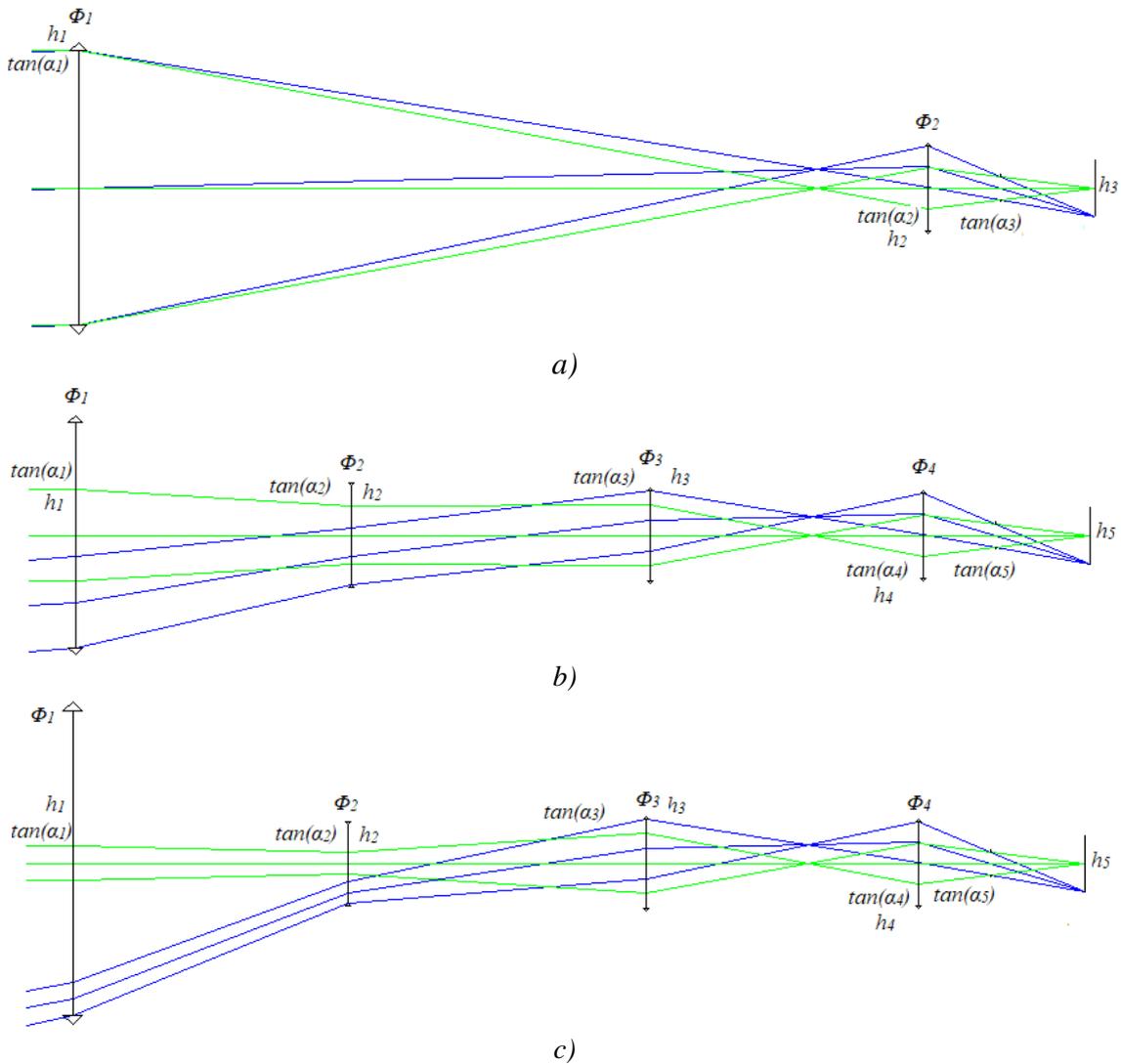
Ở cả 3 mức tiêu cự, để đảm bảo 100% hiệu suất của cửa chắn lạnh trong đầu thu ảnh nhiệt được làm lạnh thì chính nó sẽ đóng vai trò là vòng chắn khẩu độ của hệ thống quang học [1, 3, 4].

Tiêu cự của các thành phần trong hệ quang, đường kính thông quang và khoảng cách giữa chúng được xác định dựa vào phương trình đường truyền tia qua hệ thống quang học lý tưởng như sau [9]:

$$\tan \alpha_{k+1} = \tan \alpha_k + h_k \Phi_k \quad (1)$$

$$h_{k+1} = h_k - d_k \tan(\alpha_{k+1}) \quad (2)$$

trong đó:  $\alpha_k$  và  $\alpha_{k+1}$  là góc hợp bởi tia cận trục với quang trục trước khi đến và sau khi đi ra khỏi thành phần  $k$  của hệ quang;  $h_k$  là chiều cao của tia cận trục đến thành phần  $k$  của hệ quang;  $d_k$  là khoảng cách từ thành phần  $k$  đến thành phần  $k+1$  của hệ quang và  $\Phi_k$  là độ tụ của thành phần  $k$ .



Hình 1. Sơ đồ hệ quang lý tưởng:  
a) Mức tiêu cự dài; b) Mức tiêu cự trung bình; c) Mức tiêu cự ngắn.

Để đảm bảo chiều dài của hệ không quá lớn (tương ứng với yêu cầu về kích thước của thiết bị ảnh nhiệt) và cũng không được quá ngắn (dẫn đến khó khăn trong thiết kế, gia công hệ quang), sau khi lựa chọn, tính toán, các thông số bậc nhất của các thành phần trong hệ quang ở 3 chế độ làm việc được thể hiện trong bảng 3, sơ đồ hệ quang lý tưởng được biểu diễn trên hình 1.

Bảng 3. Các thông số bậc nhất của các thành phần trong hệ thống quang học

Chế độ làm việc		NFOV	MFOV	WFOV
Vật kính trước	$f'$ , mm	159,5	159,5	159,5
	$D_{iq}$ , mm	30	24,795	33,945
	$d$ , mm	183,637	60	60
Cụm thay đổi tiêu cự 1	$f'$ , mm		-93,731	-26,78
	$D_{iq}$ , mm		10,857	8,882
	$d$ , mm		65	65
Cụm thay đổi tiêu cự 2	$f'$ , mm		33,807	25,758
	$D_{iq}$ , mm		9,691	9,691
	$d$ , mm		58,637	58,637
Relay lens	$f'$ , mm	14,5	14,5	14,5
	$D_{iq}$ , mm	8,066	9,243	9,243
	$d$ , mm	15,743	15,743	15,743

### 3. Thiết kế quang sai hệ thống quang học

Thiết kế quang sai hệ thống quang học được bắt đầu bằng việc lựa chọn kết cấu cho từng thành phần trong hệ quang và vật liệu phù hợp để từ đó xác định hệ quang ban đầu.

Vật liệu quang học thường dùng trong vùng phổ hồng ngoại bước sóng trung thường là các tinh thể như Si, Ge, ZnSe và ZnS. Ngoài ra, chúng có thể là các muối Floride của các kim loại kiềm như  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{BaF}_2$  hoặc các hợp chất của Halogen với kim loại như KCl, KBr, CsI,... [11, 12].

Qua nghiên cứu, phân tích các tính chất của các vật liệu quang học trong vùng phổ hồng ngoại bước sóng trung, đặc biệt là các tính chất quang học của chúng, nhận thấy rằng, Silicon (Si) là một trong những vật liệu thường dùng nhất trong vùng phổ hồng ngoại bước sóng trung do nó có hệ số hấp thụ rất nhỏ (chỉ  $0,01 \text{ cm}^{-1}$  @  $3 \mu\text{m}$ ), độ bền hóa cao, không thủy phân, khối lượng riêng nhỏ (nhỏ hơn 2 lần so với Ge), chiết suất khá lớn ( $n = 3,4257$  @  $4 \mu\text{m}$ ), chỉ nhỏ hơn so với Ge. Hơn nữa, xét về độ tán sắc thì Si là vật liệu ít tán sắc nhất trong vùng phổ này (số Abbe của Si là 250, cao nhất so với tất cả các vật

liệu khác) [11, 12]. Hơn nữa, công nghệ sản xuất tinh thể Si cũng đã đạt đến trình độ cao, năng suất lớn nên nguồn cung tinh thể Si trên thị trường khá dồi dào. Do đó, Si được lựa chọn là vật liệu duy nhất được dùng để thiết kế hệ quang. Do chỉ lựa chọn một vật liệu duy nhất nên không thể khử sắc sai [9]. Tuy nhiên, như sẽ thấy trong phần tiếp theo, do độ tán sắc rất thấp của Si trong vùng phổ hồng ngoại bước sóng trung nên lượng sắc sai dư không ảnh hưởng nhiều đến chất lượng tạo ảnh của hệ quang.

Trong sơ đồ nguyên lý của hệ thống quang học cần thiết kế, như trên đã phân tích, bao gồm các cụm vật kính phía trước, cụm truyền ảnh phía sau (trong chế độ tiêu cự dài) và cụm thay đổi tiêu cự (trong chế độ tiêu cự trung bình và tiêu cự ngắn) (Hình 1). Sau đây sẽ phân tích và lựa chọn kết cấu cho từng thành phần trong hệ quang cần thiết kế.

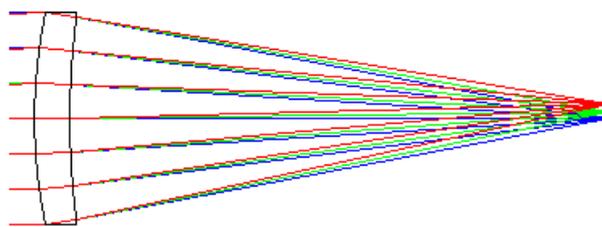
Đối với cụm vật kính phía trước, theo nghiên cứu từ các tài liệu và qua khảo sát hệ thống quang học trong thiết bị ảnh nhiệt POP200, nhận thấy rằng, nó có thể gồm một hoặc không nhiều hơn hai thấu kính, trong đó có một bề mặt phi cầu/nhiều xạ [3, 5, 6, 7, 13]. Để số thấu kính của hệ quang cần thiết kế là nhỏ nhất thì cụm vật kính phía trước của hệ quang cần thiết kế chỉ gồm một thấu kính đơn có một bề mặt conic.

Các thông số kết cấu ban đầu của cụm vật kính phía trước, trong đó các bán kính cong được xác định dựa trên yêu cầu đảm bảo cầu sai bậc 3 là nhỏ nhất [14]:

$$R_1 = \frac{2(n+2)(n-1)}{n(2n+1)} f' \quad (3)$$

$$R_2 = \frac{2(n+2)(n-1)}{n(2n-1)-4} f' \quad (4)$$

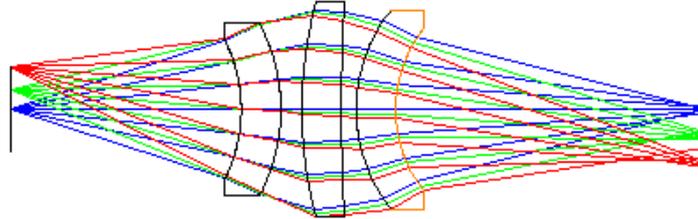
trong đó:  $f'$  là tiêu cự cụm vật kính phía trước;  $n$  là chiết suất của Si. Hệ quang ban đầu của cụm vật kính phía trước được thể hiện trên hình 2.



Hình 2. Hệ quang ban đầu của cụm vật kính phía trước.

Cụm truyền ảnh (relay lens) có chức năng truyền ảnh được tạo bởi vật kính phía trước lên mặt phẳng ma trận nhạy sáng của cảm biến đầu thu. Theo các nghiên cứu đã được công bố và qua khảo sát hệ quang cụm truyền ảnh trong thiết bị ảnh nhiệt POP200 [3, 5, 6, 7, 13], nhận thấy rằng, để đảm bảo chức năng của mình trong toàn bộ hệ thống quang học thì cụm truyền ảnh của hệ quang cần thiết kế sẽ bao gồm 3 thấu kính, trong đó có ít nhất một bề mặt conic. Các thấu kính đều được làm từ một vật liệu duy nhất là Si.

Các thông số kết cấu của hệ quang ban đầu của cụm truyền ảnh được tính toán dựa trên yêu cầu quang sai bậc 3, đặc biệt là méo ảnh, là nhỏ nhất [13]. Hệ quang ban đầu của nó được thể hiện trên hình 3.



Hình 3. Hệ quang ban đầu của cụm truyền ảnh.

Đối với các cụm thay đổi tiêu cự, theo các nghiên cứu đã được công bố và qua khảo sát thiết bị ảnh nhiệt POP200 nhận thấy rằng, chúng được cấu tạo từ 2 thành phần: thành phần âm phía trước và thành phần dương phía sau [3, 5, 6, 7, 13]. Mỗi thành phần đó có thể có một hoặc hai thấu kính và ít nhất một bề mặt trong các thấu kính đó là bề mặt phi cầu hoặc phi cầu/nhiều xạ tùy theo yêu cầu về chất lượng tạo ảnh và yêu cầu về rút ngắn chiều dài của hệ thống quang học nói riêng và của cả thiết bị ảnh nhiệt nói chung. Vật liệu làm các thấu kính trong thành phần thay đổi tiêu cự có thể khác nhau hoặc cùng loại. Do đó, để đảm bảo yêu cầu về số lượng thấu kính có trong hệ quang cần thiết kể nhỏ nhất và đảm bảo chất lượng tạo ảnh thì các cụm thay đổi tiêu cự được thiết kế sẽ chỉ bao gồm 2 thấu kính đơn: thấu kính âm và thấu kính dương, trong đó có một bề mặt conic. Cả 2 thấu kính trong cụm đều được làm từ Si. Các thông số kết cấu của chúng cũng được xác định dựa trên yêu cầu quang sai bậc 3 là nhỏ nhất [13].

Như vậy, kết cấu của hệ quang ban đầu khá đơn giản, chỉ bao gồm nhiều nhất là 6 thấu kính, trong đó có 3 bề mặt conic. Tất cả các thấu kính đều được làm từ một vật liệu duy nhất là Si.

Để nâng cao chất lượng tạo ảnh của hệ quang, tiến hành tối ưu các thông số kết cấu của hệ quang ban đầu. Nguyên lý tối ưu hệ quang là từ các thông số kết cấu của hệ quang ban đầu, thiết lập hàm mục tiêu và xác định các thông số kết cấu của hệ quang sao cho hàm mục tiêu đạt giá trị nhỏ nhất. Hàm mục tiêu được xác định như sau [9]:

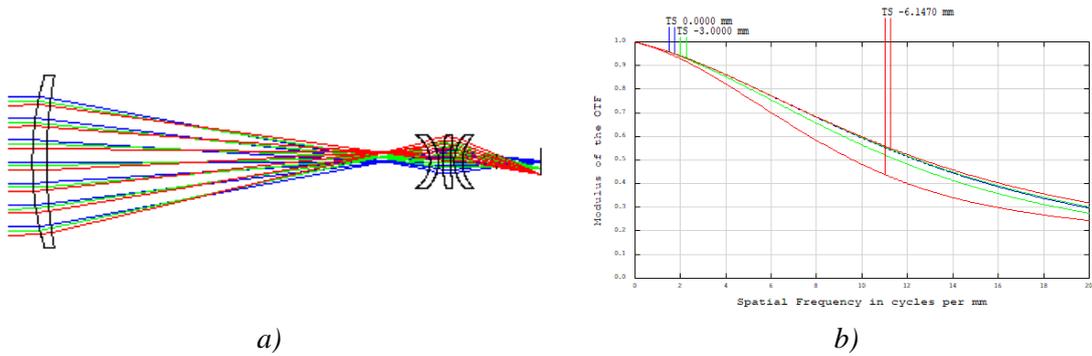
$$MF^2 = \frac{\sum W_i (V_i - T_i)^2}{\sum W_i} \quad (5)$$

trong đó:  $W_i$  là trọng số của toán hạng  $i$ ;  $V_i$  là giá trị hiện tại của toán hạng và  $T_i$  là giá trị cần đạt được của toán hạng đó. Mỗi toán hạng  $i$  trong hàm mục tiêu sẽ có mối liên hệ với chất lượng tạo ảnh của hệ quang.

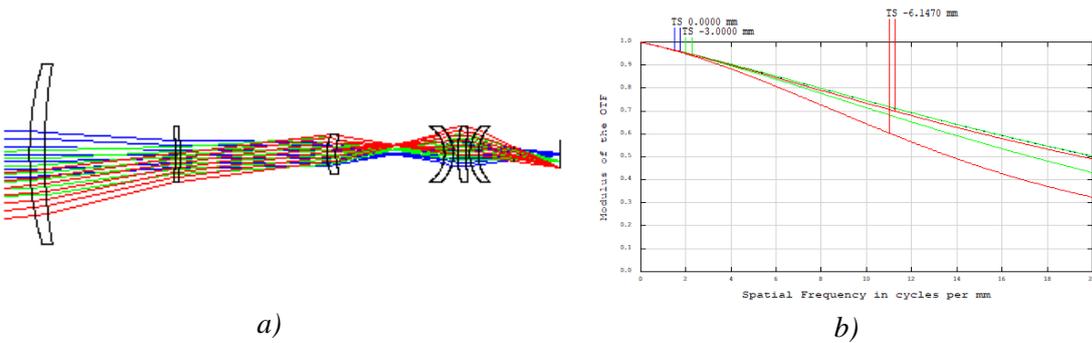
Quá trình tối ưu được thực hiện bằng cách lựa chọn và cho phép các thông số kết cấu của hệ quang thay đổi để hàm mục tiêu đạt giá trị nhỏ nhất có thể. Chất lượng tạo ảnh của hệ thống quang học sau tối ưu sẽ được đánh giá qua giá trị hàm MTF của nó [9].

#### 4. Đánh giá chất lượng tạo ảnh của hệ quang sau thiết kế

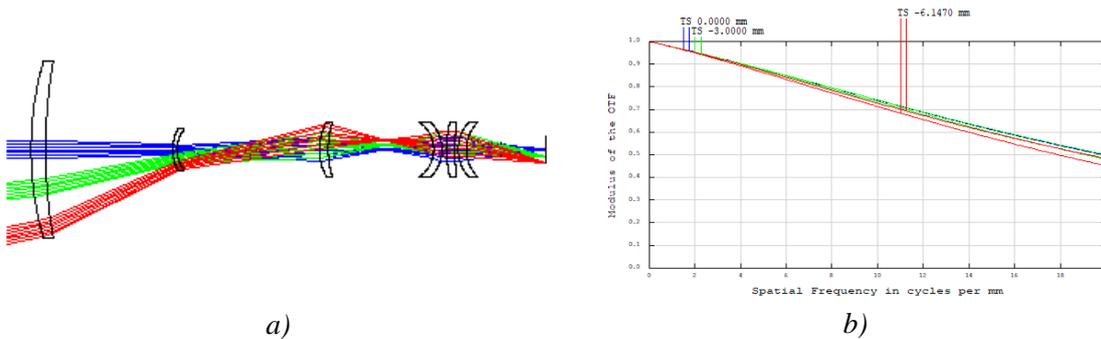
Hệ quang được thiết kế có chức năng chính là tạo ảnh của mục tiêu và phóng nền lên trên bề mặt nhạy sáng của cảm biến đầu thu ma trận. Vì thế, cũng như các hệ thống quang học tạo ảnh khác, chất lượng tạo ảnh của nó sẽ được đánh giá trên tiêu chí cơ bản là hàm truyền điều biến MTF (Hình 4-6).



Hình 4. Hệ quang (a) và hàm MTF (b) của nó tại mức tiêu cự dài (NFOV).



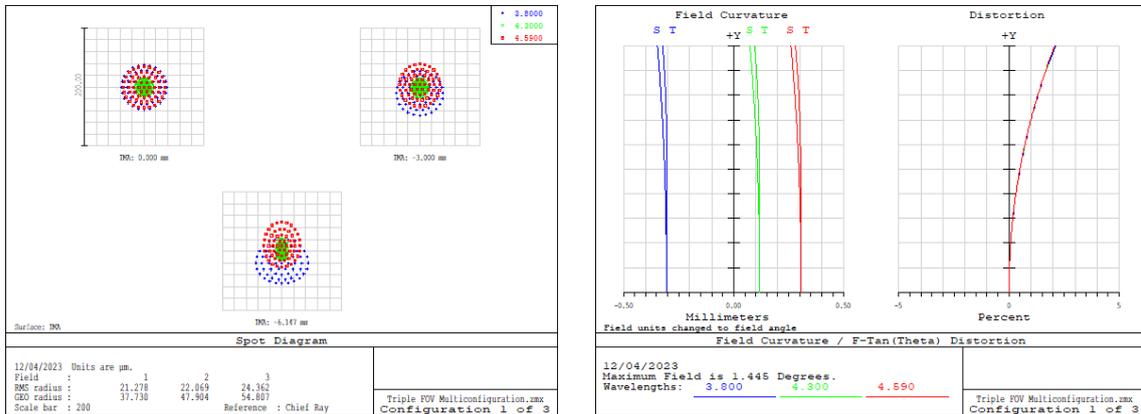
Hình 5. Hệ quang (a) và hàm MTF (b) của nó tại mức tiêu cự trung bình (MFOV).



Hình 6. Hệ quang (a) và hàm MTF (b) của nó tại mức tiêu cự ngắn (WFOV).

Từ 3 đồ thị trên (Hình 4-6) nhận thấy, chất lượng tạo ảnh của hệ thống quang học tại mức tiêu cự ngắn (WFOV) là tốt nhất trong 3 mức làm việc của hệ quang. Điều này thể hiện rõ qua hàm MTF của chúng. Tại mức tiêu cự trung bình (MFOV) và tiêu cự dài (NFOV) hệ quang có chất lượng tạo ảnh thấp hơn, tuy nhiên, tại tần số 20 cặp vạch/mm giá trị hàm MTF của chúng đều đạt trên 0,24. Giá trị này là đạt so với yêu cầu đặt ra.

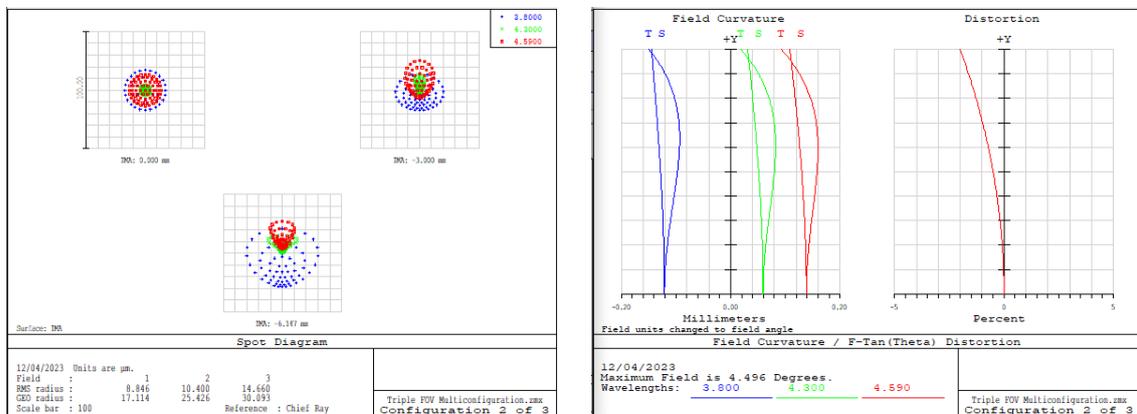
Bên cạnh hàm MTF, chất lượng tạo ảnh của hệ quang đã thiết kế còn có thể được đánh giá thông qua kích thước vết ảnh và mức méo ảnh (Hình 7-9). Đối với kích thước vết ảnh thì tại các mức MFOV và WFOV bình phương trung bình (RMS) vết ảnh lớn nhất là khá nhỏ, tương ứng là 14,307  $\mu\text{m}$  và 12,688  $\mu\text{m}$  (nhỏ hơn kích thước của pixel đầu thu là 15  $\mu\text{m}$ ), còn tại mức NFOV, RMS của vết ảnh còn khá lớn (cỡ 25  $\mu\text{m}$ ). Đối với méo ảnh thì từ 3 đồ thị trên, nhận thấy rằng ở cả 3 mức tiêu cự làm việc, hệ thống quang học có méo ảnh đều không vượt quá 2,5%, đạt yêu cầu đề ra.



a)

b)

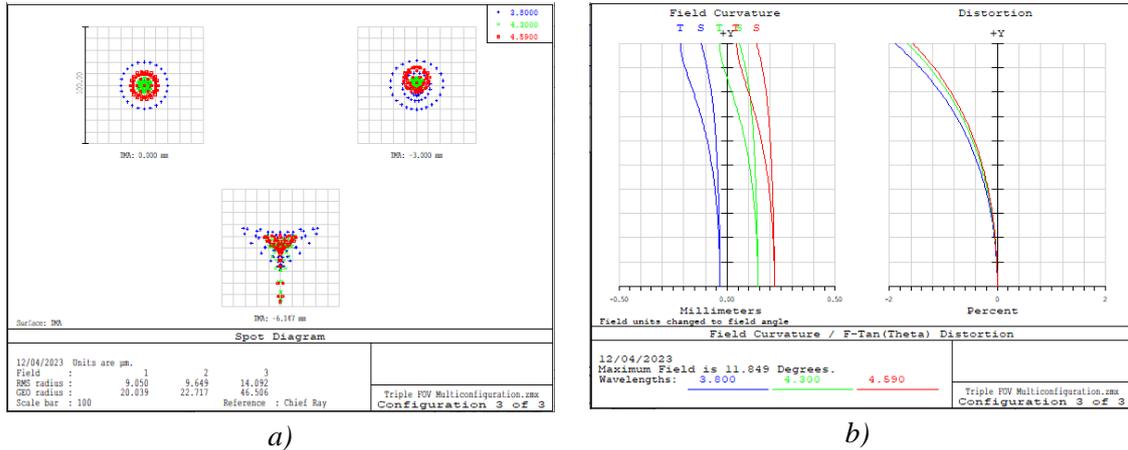
Hình 7. Kích thước vết và méo ảnh của hệ quang tại mức tiêu cự dài (NFOV).



a)

b)

Hình 8. Kích thước vết và méo ảnh của hệ quang tại mức tiêu cự trung bình (MFOV).



Hình 9. Kích thước vết và méo ảnh của hệ quang tại mức tiêu cự ngắn (WFOV).

## 5. Kết luận

Như vậy, hệ quang được thiết kế có kết cấu đơn giản hơn so với các hệ quang đã được thiết kế trước đây [3-6]. Điều này thể hiện ở chỗ số lượng thấu kính được sử dụng là ít nhất có thể (6 thấu kính), trong đó chỉ có 3 bề mặt conic, không có bề mặt nhiễu xạ. Hơn nữa, tất cả các thấu kính trong hệ được làm từ một loại vật liệu duy nhất là Si. Với kết cấu như vậy, hệ quang được thiết kế cho phép tiêu cự thay đổi 8 lần và đảm bảo chất lượng tạo ảnh khá tốt ở cả 3 mức tiêu cự. Trên toàn bộ thị giới, hàm truyền điều biến (MTF) tại tần số 20 cặp vạch/mm lớn hơn 0,24; méo ảnh không lớn hơn 2,5%, thỏa mãn yêu cầu đặt ra đối với ống kính ảnh nhiệt có làm lạnh hoạt động trong vùng phổ hồng ngoại bước sóng trung.

## Lời cảm ơn

Bài báo này được thực hiện trong khuôn khổ đề tài “Thiết kế, chế tạo ống kính ảnh nhiệt tiêu cự thay đổi nhảy bậc” thuộc đề án sản phẩm quốc gia về thiết bị ảnh nhiệt trong quân sự có mã số là TBAN02.

## Tài liệu tham khảo

- [1] Muhammed Nadeem Akram, “Design of a multiple field-of-view imaging system for the 3-5  $\mu\text{m}$  infrared focal plane arrays,” *Opt. Eng.*, 42(6), pp. 1704-1714, June 2003. DOI: 10.1117/1.1572892
- [2] H. S. Kim, C. W. Kim, and S. M. Hong, “Compact mid-wavelength infrared zoom camera with 20:1 range and automatic athermalization,” *Opt. Eng.*, 41, pp. 1661-1667, 2002. DOI: 10.1117/1.1481048
- [3] Muhammed Nadeem Akram, “Design of a dual field-of-view optical system for infrared focal plane arrays,” *Proceedings of SPIE*, Vol. 4767, 2002. DOI: 10.1117/12.451222

- [4] Bai Yu, Xing Tingwen, Lin Wumei, Jiang Yadong, "Design of MWIR step-zoom detection imaging system with a large FPA," *7<sup>th</sup> International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies*, 2014. DOI: 10.1117/12.2069583
- [5] Kucukcebebi Doruk, "Optical design of an athermalised dual field of view step zoom optical system in MWIR," in *Proceedings of SPIE*, Vol. 10375, 2017. DOI: 10.1117/12.2273177
- [6] Yang Zhao, J. Bentley, D. Moore, "Dual FOV afocal zoom system with stationary pupils using single moving group," *International Optical Design Conference 2017*, 2017. DOI: 10.1117/12.2295388
- [7] Prabhakar Gentyala, Sadanandam Malyala, Rajesh Adepu, "Compact four element triple field-of-view MWIR optical module," *Proc. SPIE 11525, SPIE Future Sensing Technologies*, 1152527, 2020. DOI: 10.1117/12.2580337
- [8] <https://www.zemax.com/>
- [9] Malacara D., Malacara Z., *Handbook of Optical Design*, Marcel Dekker, 2004.
- [10] <https://lynred.com/sites/default/files/2019-10/Scorpio-MW-datasheet.pdf>
- [11] Marvin J. Weber, *Handbook of Optical Materials*, CRC Press, 2002.
- [12] M. Herzberger and C. D. Salzberg, "Refractive indices of infrared optical material and color correction of infrared lenses," *J. Opt. Soc. Am.*, 52, 420, 1962. DOI: 10.1364/JOSA.52.000420
- [13] <https://www.iai.co.il>
- [14] Max J. Riedl, "Comments and guidelines for selecting IR objectives for focal plane arrays", *Proceedings of SPIE*, Vol. 1970 Systems-Oriented Optical Design, 1993. DOI: 10.1117/12.155819

## DESIGN OF A TRIPLE FIELD-OF-VIEW OPTICAL SYSTEM FOR MID-WAVELENGTH INFRARED STEP-ZOOM CAMERA

**Abstract:** *The design of a triple field-of-view optical system operating in a mid-wavelength infrared band for thermal imagers is presented in this work. The FOV-changing is done by using different FOV-changing lens-group. The designed optical system has a simple structure, consisting of 6 lenses and made by just one material (Si). They are divided into 3 groups: the front objective, the FOV-changing lens-group and the relay lens, including only three conic surfaces. The designed optical system has relatively high imaging performance: modulation transfer function (MTF) at a frequency of 20 cycles/mm is higher than 0.24, image distortion less than 2.5% and is suitable for mid-wavelength infrared step-zoom camera.*

**Keywords:** Thermal imager; optical system; step-zoom; MTF, conic surface.

*Nhận bài:* 14/02/2023; *Hoàn thiện sau phản biện:* 13/06/2023; *Chấp nhận đăng:* 31/07/2023

