

Nghiên cứu, thiết kế hệ thống quang học ảnh nhiệt hai trường nhìn ứng dụng trong khí tài quan sát hỗn hợp ngày đêm

Hoàng Anh Tú^{1*}, Nguyễn Quang Hiệp², Nguyễn Văn Thu¹, Nguyễn Văn Linh¹

¹Viện Vật lý Kỹ thuật, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự;

²Bộ môn Khí Tài quang, Trường Đại học Lê Quý Đôn.

*Email: hoanganhtuvt@gmail.com

Nhận bài: 29/3/2023; Hoàn thiện: 01/6/2023; Chấp nhận đăng: 08/8/2023; Xuất bản: 25/8/2023.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.89.2023.117-123>

TÓM TẮT

Bài báo đưa ra giải pháp tính toán, thiết kế hệ thống quang học ảnh nhiệt hai trường nhìn vùng phổ (8-14) μ m chỉ với ba thấu kính và một vật liệu Germanium. Hệ quang có kết cấu đơn giản, chất lượng tạo ảnh tại hai trường nhìn gần đạt giới hạn nhiễu xạ. Cấu hình và kích thước hệ quang được thiết kế phù hợp ứng dụng trong các khí tài quan sát hỗn hợp ngày đêm.

Từ khoá: Ống kính ảnh nhiệt; Hệ thống quang học hai trường nhìn.

1. MỞ ĐẦU

Khí tài quan sát hỗn hợp ngày đêm ngày càng trở lên phổ biến và ứng dụng rộng rãi trong cả dân sự và quân sự, việc tích hợp cùng lúc 2 tính năng quan sát trên cùng một sản phẩm (quan sát ngày và đêm) làm sản phẩm trở nên đa dụng và hiệu quả hơn trong tác chiến. Đặc biệt, kênh đêm hoạt động theo nguyên lý ảnh nhiệt giúp nâng cao khả năng quan sát, phát hiện mục tiêu trong mọi điều kiện. Trong nước, bên cạnh các khí tài thiết kế mới, xu thế cải tiến các khí tài cũ quan sát ngày, đêm độc lập thành khí tài hỗn hợp ngày đêm ngày càng được quan tâm. Giải pháp thiết kế vật kính đêm cho kính trường xe BMP-1 thành kính hỗn hợp ngày đêm [1], trong đó, kênh đêm hoạt động theo nguyên lý khuếch đại ánh sáng yếu. Tuy nhiên, khả năng quan sát đêm tối trong mọi điều kiện thời tiết còn hạn chế.

Hiện nay, xe tăng T54B, T55 được trang bị rất nhiều trong Quân đội, trong đó trường xe được trang bị kính quan sát ngày và đêm độc lập, yêu cầu cải tiến thành kính hỗn hợp ngày đêm với kênh đêm hoạt động theo nguyên lý ảnh nhiệt đang được đặt ra. Kính trường xe cải tiến ngoài yêu cầu về kích thước giới hạn, cần có trường quan sát và cự ly quan sát xa để phát hiện và sục sạo mục tiêu tốt hơn. Để thực hiện được các yêu cầu này, hệ quang kênh đêm ảnh nhiệt trong kính trường xe cải tiến có thể thay đổi trường nhìn với kết cấu đơn giản.

Phương pháp thay đổi trường nhìn bằng cách thêm thành phần thấu kính [2, 3] với ưu điểm dễ thiết kế, nhược điểm của phương pháp này là độ ổn định quang trục không cao, đặc biệt cần khoảng không gian lớn để đảm bảo gá lắp cơ khí, số lượng thấu kính lớn (lớn hơn 5), kết cấu có 2 đến 3 bề mặt phi cầu/nhiều xạ. Phương pháp thay đổi trường nhìn bằng dịch chuyển các thành phần dọc theo quang trục (step-motion) [4], ưu điểm không cần khoảng không gian dự trữ quá lớn, độ ổn định quang trục cao, phù hợp khi sử dụng trong các thiết bị có hệ quang bị giới hạn. Tuy nhiên, kết cấu của chúng khá phức tạp, trong đó, phần lớn các hệ quang sử dụng 2 loại vật liệu, với 6 thấu kính, kích thước hệ thống lớn.

Nghiên cứu [2-4] về hệ quang ảnh nhiệt hai trường nhìn trên chỉ đúng về nguyên lý, chưa đáp ứng được yêu cầu cụ thể về kích thước giới hạn, kết cấu quang học sử dụng cho kính trường xe cải tiến. Vì vậy, bài báo sẽ tập trung vào việc thiết kế hệ thống quang học ảnh nhiệt hai trường nhìn với kích thước, kết cấu đơn giản, phù hợp ứng dụng cho kính trường xe hỗn hợp ngày đêm trên xe tăng T54B, T55.

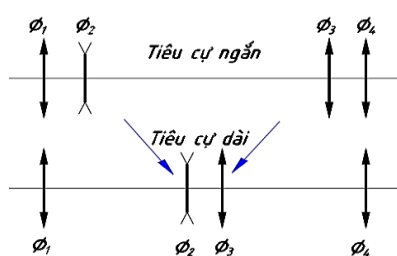
2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT HỆ THỐNG QUANG HỌC CÓ TRƯỜNG NHÌN THAY ĐỔI

Trong một hệ thống quang học khi khoảng cách giữa các thành phần của hệ quang thay đổi

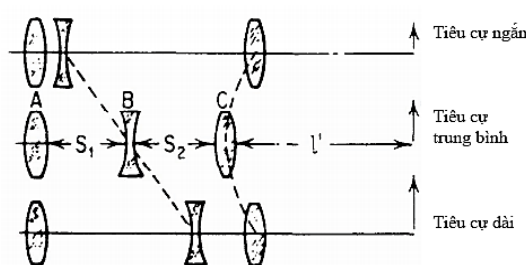
thì tiêu cự của hệ quang cũng thay đổi, dẫn đến trường nhìn của hệ thay đổi khi kích thước đầu thu cố định. Do vậy, thực chất của việc thay đổi trường nhìn là thay đổi tiêu cự làm việc của hệ thống quang học.

Theo phương pháp dịch chuyển thành phần trong hệ quang, có hai cách để thay đổi trường nhìn [5]:

- Dịch chuyển đồng thời 2 thành phần trong hệ quang (hình 1). Khi đó, hệ quang gồm 4 thành phần, trong đó thành phần thứ nhất và thành phần cuối cố định, thành phần 2 và 3 dịch chuyển theo cùng quy luật. Ưu điểm của phương pháp này là kết cấu cơ khí đơn giản, độ ổn định trực quang tốt hơn, tuy nhiên, mặt phẳng ảnh bị dịch chuyển [5].



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý dịch chuyển 2 thành phần đồng thời cùng quy luật [5].



Hình 2. Sơ đồ nguyên lý dịch chuyển 2 thành phần không cùng quy luật [5].

- Dịch chuyển một thành phần trong hệ quang, khoảng dịch chuyển của mặt phẳng ảnh được bù lại bằng cách dịch chuyển một trong các thành phần còn lại của hệ quang (hình 2). Với phương pháp này hệ quang chỉ gồm 3 thành phần, trong đó thành phần thứ nhất cố định, thành phần 2 dịch chuyển để thay đổi tiêu cự, thành phần thứ 3 dịch chuyển để bù lại khoảng dịch chuyển của mặt phẳng ảnh. Hai thành phần này dịch chuyển không cùng quy luật.

Kính trường xe hỗn hợp ngày đêm ảnh nhiệt trên xe tăng T54B, T55 với 2 tính năng trên cùng một sản phẩm (quan sát ngày và đêm ảnh nhiệt), đòi hỏi kết cấu hệ quang đơn giản, nhỏ gọn. Do vậy, hệ quang lựa chọn gồm 3 thành phần (hình 2), trong đó, thành phần 2 (B) dịch chuyển để thay đổi tiêu cự, các thành phần khác (A, C) và mặt phẳng ảnh cố định. Theo lý thuyết hệ thống quang học [5], tiêu cự của hệ quang được xác định như sau:

$$f = f_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 \tag{1}$$

Trong đó: f_1 là tiêu cự của thành phần thứ nhất; β_2 và β_3 là độ phóng đại ngang của thành phần 2 và 3 tương ứng. Do f_1 và β_3 không đổi, tiêu cự của hệ quang sẽ nhận hai giá trị khác nhau tương ứng với 2 vị trí khác nhau của thành phần 2.

3. TÍNH TOÁN, THIẾT KẾ QUANG HỌC ẢNH NHIỆT HAI TRƯỜNG NHÌN

3.1. Các yêu cầu khi thiết kế

Với yêu cầu thay thế hai kính quan sát ngày đêm riêng biệt cho trường xe trên xe tăng T54B, T55 bằng một kính quan sát hỗn hợp ngày đêm, trong đó, kênh đêm theo nguyên lý ảnh nhiệt làm việc ở 2 trường nhìn và gá lắp tại vị trí kính ngày TPKU-2B nguyên bản. Vì vậy, hệ quang kênh ảnh nhiệt phải đảm bảo các yêu cầu về cự ly quan sát, đường kính thông quang, kích thước giới hạn,... Bên cạnh đó, nó phải đảm bảo các yêu cầu về chất lượng tạo ảnh và tỷ lệ thay đổi trường nhìn (bảng 1)

Bảng 1. Một số yêu cầu đối với kính trường xe hỗn hợp ngày đêm T54B, T55.

Yêu cầu về kích thước	Chỉ tiêu cần đạt
Kích thước cửa quang vào, không lớn hơn, mm	62
Khoảng cách từ cửa quang vào đến hệ quang, mm	62 ÷ 70

Chiều dài hệ quang, không lớn hơn, mm	100
Đường kính thông quang các thấu kính trong khung lăng kính đầu máy, không lớn hơn, mm	56
Yêu cầu về chất lượng tạo ảnh	
Giá trị MTF đối với tất cả các điểm trong 2 trường nhìn tại tần số Nyquist	>20%
Méo ảnh	< 5%
Cự ly nhận dạng mục tiêu xe (2,3m x 2,3m) trường nhìn hẹp, m	1800
Yêu cầu về tỷ lệ hai trường nhìn, không nhỏ hơn, lần	2

3.2. Tính toán kích thước hệ quang ảnh nhiệt hai trường nhìn

Để đảm bảo được cự ly nhận dạng mục tiêu xe tăng (2,3x2,3)m khi kích thước hệ quang bị giới hạn cần lựa chọn đầu thu ảnh nhiệt có kích thước điểm ảnh nhỏ. Qua tìm hiểu, phân tích loại đầu thu được lựa chọn là Boson của Flir [6] (bảng 2).

Bảng 2. Các thông số chính của đầu thu ảnh nhiệt Boson Flir [6].

Thông số	Chỉ tiêu kỹ thuật
Độ phân giải	640 x 512
Kích thước điểm ảnh	12 μm
Vùng phổ làm việc	8 – 14 μm
Độ nhạy nhiệt (NETD)	< 40 mK

Bảng 3. Các thông số bậc nhất chính của hệ quang trong kênh ảnh nhiệt.

Trường nhìn (rộng và hẹp)	(11,7° x 9,4°; 5,8° x 4,6°)
Tiêu cự (rộng và hẹp)	37 mm và 75 mm
F number (rộng và hẹp)	1,0 và 1,4

Từ yêu cầu về cự ly nhận dạng, theo tiêu chuẩn Johnson [7], các thông số bậc nhất của hệ quang được tính toán, lựa chọn và thể hiện trong bảng 3.

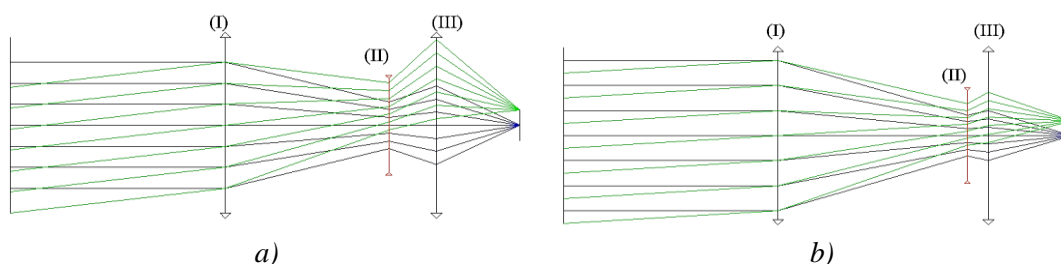
Tiêu cự của các thành phần trong hệ quang, đường kính thông quang và khoảng cách giữa chúng được xác định dựa vào phương trình đường truyền tia qua hệ thống quang học lý tưởng như sau [8]:

$$\tan \alpha_{k+1} = \tan \alpha_k + h_k \Phi_k \quad (2)$$

$$h_{k+1} = h_k - d_k \tan(\alpha_{k+1}) \quad (3)$$

Trong đó: α_k và α_{k+1} là góc hợp bởi tia cận trục với quang trục trước và sau thành phần k của hệ quang; h_k là chiều cao của nó đến thành phần k; d_k là khoảng cách từ thành phần k đến thành phần k+1 hệ quang và Φ_k là độ tụ của thành phần k.

Sơ đồ hệ quang (hình 4) gồm 3 thành phần, thành phần thứ nhất (I) và thứ ba (III) đứng yên, thành phần thứ hai (II) dịch chuyển để thay đổi trường nhìn. Để đảm bảo yêu cầu trong bảng 1, sau khi lựa chọn, tính toán, các thông số bậc nhất của các thành phần trong hệ quang ở 2 trường nhìn được thể hiện trong bảng 4.



Hình 4. Sơ đồ hệ quang lý tưởng: a) Trường nhìn rộng; b) Trường nhìn hẹp.

Bảng 4. Các thông số bậc nhất của các thành phần trong hệ thống quang học.

Thông số bậc nhất	Trường nhìn rộng	Trường nhìn hẹp
Thành phần 1	f	78,246 mm
	D _{tq}	55 mm
	D	48,916 mm
Thành phần 2	f	-12,379 mm
	D _{tq}	16,5 mm
	D	14,292 mm
Thành phần 3	f	14,706 mm
	D _{tq}	56 mm
	D	25 mm

3.3. Thiết kế quang sai hệ thống quang học

Vật liệu quang học thường dùng trong vùng phổ hồng ngoại bước sóng dài thường là các tinh thể như Ge, ZnSe và ZnS [9, 10],... Quan nghiên cứu, nhận thấy rằng Ge là vật liệu có chiết suất lớn nhất (4,00384 ở bước sóng 10,6 μm) trong toàn bộ vùng phổ hồng ngoại, ảnh nhiệt. Về độ tán sắc, trong vùng phổ 8 -14 μm thì Ge có độ tán sắc thấp nhất, hệ số Abbe của nó là 850 – lớn nhất và lớn hơn nhiều so với một số vật liệu khác như ZnSe hay ZnS. Do đó, Ge được lựa chọn để thiết kế hệ thống quang học trong vùng phổ LWIR.

Các thông số kết cấu sơ bộ của thấu kính thứ nhất cần đảm bảo yêu cầu cầu sai bậc ba là nhỏ nhất, trong đó các bán kính cong của nó được xác định như sau [4]:

$$R_1 = \frac{2(n+2)(n-1)}{n(2n+1)} f \tag{4}$$

$$R_2 = \frac{2(n+2)(n-1)}{n(2n-1)-4} f \tag{5}$$

Trong đó, f là tiêu cự thấu kính thứ nhất hệ quang; n là chiết suất của Ge.

Các thông số kết cấu sơ bộ của thấu kính thứ hai, thứ ba trong hệ quang được lựa chọn để đảm bảo tiêu cự của chúng. Trên phần mềm ZEMAX, việc tối ưu hệ quang là thiết lập các hàm mục tiêu và tối ưu đồng thời cả 2 cấu hình hệ quang:

$$MF^2 = \frac{\sum W_i (V_i - T_i)^2}{\sum W_i} \tag{6}$$

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 trong hàm mục tiêu có mối liên hệ với chất lượng tạo ảnh của hệ quang và yêu cầu về kích thước được cho trong bảng 1.

Để nâng cao chất lượng tạo ảnh cần phải sử dụng bề mặt phi cầu. Tuy nhiên, việc sử dụng bề mặt phi cầu chỉ có thể hiệu chỉnh các loại quang sai đơn sắc do hệ quang chỉ sử dụng Ge. Vì vậy, cần sử dụng thêm bề mặt nhiễu xạ để hiệu chỉnh sắc sai còn dư trong hệ quang. Để không tăng mức độ khó khi gia công thấu kính có bề mặt nhiễu xạ thì thông thường bề mặt nhiễu xạ sẽ được thiết kế trên bề mặt phi cầu. Phương trình sự thay đổi pha theo bán kính thông quang của bề mặt đó được biểu diễn có dạng đa thức sau đây [11]:

$$\Phi(\rho) = M \sum_{i=1}^N S_i \rho^{2i} \tag{7}$$

Trong đó: M là bậc nhiễu xạ; N là hệ số của đa thức; S_i là hệ số tương ứng của biểu thức bậc $2i$ của ρ ; ρ là bán kính chuẩn hóa của bề mặt đó.

Bảng 5. Các thông số kết cấu của hệ quang sau tối ưu trên ZEMAX.

TT	Bán kính, mm	Chiều dày, mm	Vật liệu	Đường kính thông quang, mm
1	Kính bảo vệ	32	Ge	62
2	Gương	30		82
3	Thành phần 1	45,243	Ge	26,5
4		46,189	T ₁	Không khí
5	Thành phần 2	-143,618	Ge	16,5
6		192,543	T ₂	Không khí
7	Thành phần 3	67,269	Ge	31,5
8		-321,702	37,2	Không khí

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. Hệ quang sau tối ưu ở hai mức trường nhìn được thể hiện trên hình 5. Bảng 5 thể hiện các thông số kết cấu của nó, trong đó, T₁ và T₂ lần lượt là khoảng cách từ thành phần thứ nhất đến thành phần thứ hai và từ thành phần thứ hai đến thành phần thứ ba trong hệ quang. Các khoảng cách này tương ứng với hai trường nhìn được thể hiện trong bảng 6.

Bảng 6. Các khoảng cách tương ứng với hai trường nhìn.

	Trường nhìn rộng	Trường nhìn hẹp
T ₁ , mm	16,8	34,1
T ₂ , mm	20,8	3,5

Các hệ số phi cầu và nhiễu xạ được thể hiện trong các bảng 7 và bảng 8.

Bảng 7. Các hệ số phi cầu của bề mặt 7.

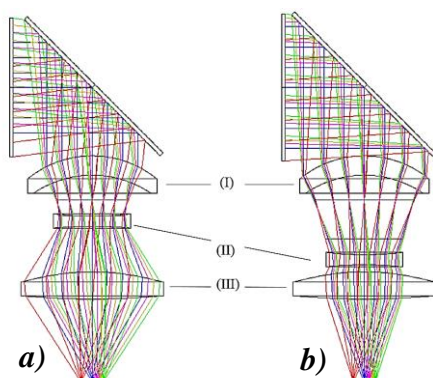
K	A4	A6
0	9,118E-7	-1,508E-10

Bảng 8. Các hệ số phi cầu và nhiễu xạ của bề mặt 8.

K	A2	A4	M	S1
0	-2,278E-3	-1,1E-6	1	-37,672

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

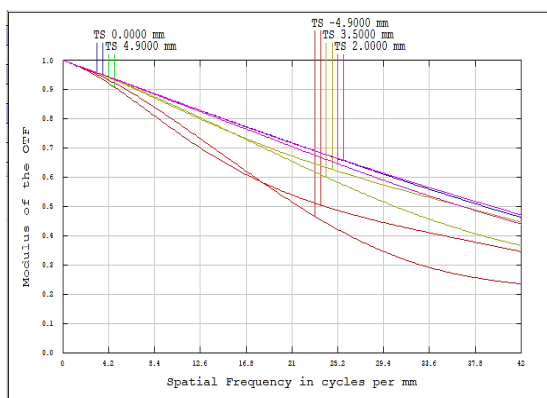
Hệ quang được thiết kế có chức năng tạo ảnh của mục tiêu và phóng nền trên đầu thu. Vì thế, chất lượng tạo ảnh của nó sẽ được đánh giá trên tiêu chí cơ bản là hàm truyền điều biến MTF và giản đồ kích thước vết, méo ảnh [8],...



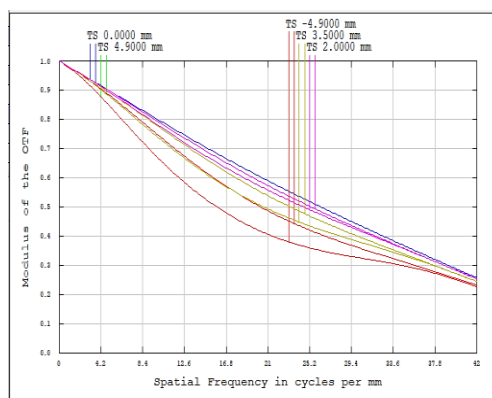
Hình 5. Sơ đồ hệ quang tại 2 trường nhìn:

a) Trường nhìn rộng $f = 37$ mm; b) Trường nhìn hẹp $f = 75$ mm.

Hình 5 thể hiện thấu kính I, III cố định, thấu kính II dịch chuyển thay đổi trường nhìn.

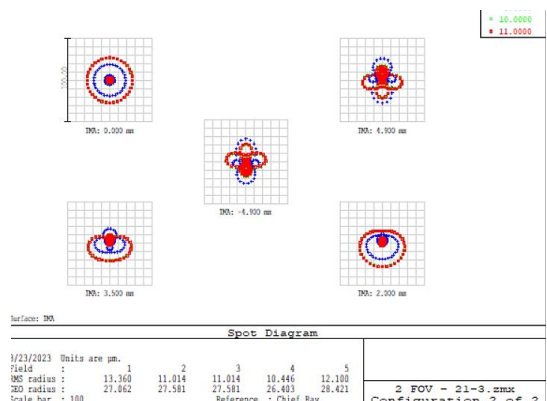


a) MTF trường nhìn rộng.

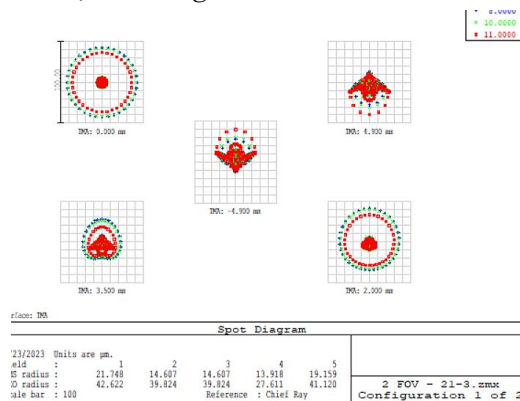


b) MTF trường nhìn hẹp.

Hình 6. Hàm MTF của vật kính tại 2 trường nhìn.

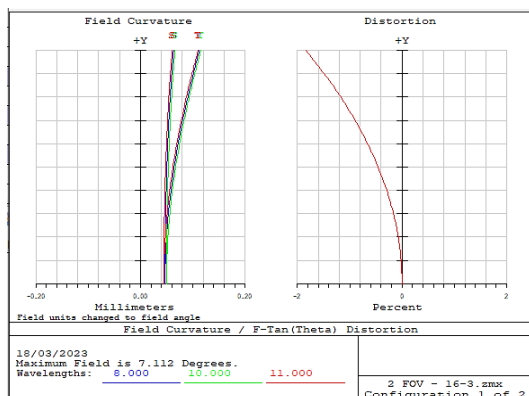


a) Kích thước vết trường nhìn rộng.

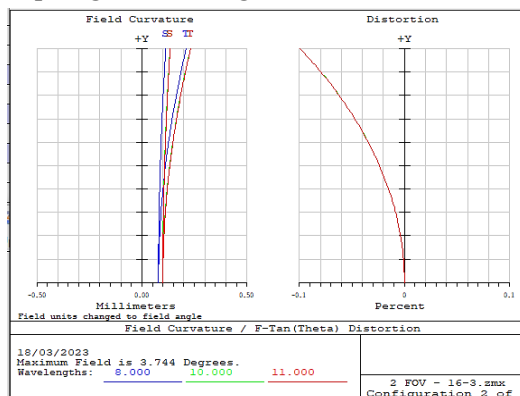


b) Kích thước vết trường nhìn hẹp.

Hình 7. Kích thước vết của hệ quang tại 2 trường nhìn.



a) Méo ảnh trường nhìn rộng.



b) Méo ảnh trường nhìn hẹp.

Hình 8. Méo ảnh của hệ quang tại 2 trường nhìn.

Từ 2 đồ thị hàm MTF (hình 6) trên nhận thấy, tại tần số Nyquist 42 cặp vạch/mm giá trị hàm MTF của hệ quang đều đạt trên 0,2 đối với tất cả các điểm trong 2 trường nhìn. Đối với kích thước vết ảnh (hình 7), bình phương trung bình (RMS) các vết ảnh cỡ 12 μm tương đương với kích thước pixel, ở mép thị giới trường nhìn hẹp đạt 23 μm . Đối với méo ảnh (hình 8) ở cả hai mức trường nhìn, hệ thống quang học có méo ảnh đều không vượt quá 2%. Theo các tiêu chuẩn đánh giá [12], vật kính ảnh nhiệt được thiết kế có chất lượng tốt bảo đảm bài toán năng lượng cũng như chất lượng ảnh thu được.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã đưa ra tính toán thiết kế hệ quang ảnh nhiệt hai trường nhìn với chất lượng tạo ảnh gần với giới hạn nhiễu xạ với kích thước nhỏ gọn, kết cấu đơn giản. Đặc biệt, số lượng thấu kính ít nhất có thể (3 thấu kính) với 1 vật liệu Ge, chỉ sử dụng 1 bề mặt phi cầu/nhiều xạ và một bề mặt phi cầu. Ngoài ra, vật kính ảnh nhiệt được thiết kế thỏa mãn các yêu cầu đặt ra về kích thước giới hạn, phù hợp cho ứng dụng kênh ảnh nhiệt trong kính trường xe hỗn hợp ngày đêm cho xe tăng T54B và T55.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được thực hiện nhờ sự hỗ trợ kinh phí của Đề tài cấp Nhà nước trong đề án sản phẩm Quốc gia: “Thiết bị ảnh nhiệt dùng trong Quân sự” số 50/2021/HĐKHCN ngày 30/12/2021.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Phạm Đình Quý, Nguyễn Thu Cầm, Phạm Đức Tuân, Nguyễn Vĩnh Sừ, Trần Tiến Bảo, “*Tính toán, thiết kế quang học vật kính đêm cho kính trường xe hỗn hợp ngày đêm trên xe chiến đấu bộ binh BMP-1*”, Tạp chí Nghiên cứu KH&CN QS, số đặc san FEE, (2019).
- [2]. Zhang Jian-Ping, Wang Ling-Jie, and Zhang Xin, “*Design of dual-FOV refractive/diffractive LWIR optical system*,” Proc. SPIE Vol. 6722, (2007)
- [3]. Dun Xiong, Meng Jun-he, Zhang Zhen , “*Althermalised dual FOV telescope*,” Journal of Applied Optics, Vol. 32, No. 4, (2011).
- [4]. Muhammed Nadeem Akram, Muhammed Hammad Asghar, “*Step-zoom dual-field-of-view infrared telescope*,” App. Optics. 42(13), (2003).
- [5]. Allen Mann, “*Infrared Optics and zoom lenses*,” 2nd edition, SPIE, Bellingham, Washington, (2009).
- [6]. <https://www.flir.asia/products/boson/>
- [7]. Tracy A. Sjaardema, Collin S. Smith, and Gabriel C. Birch, “*History and revolution of the Johnson criteria*,” Sandia National Laboratories, (2015).
- [8]. Malacara D., Malacara Z., “*Handbook of Optical Design*,” Marcelu ekkerin, (2004).
- [9]. 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).
- [10]. Marvin J. Weber, “*Handbook of Optical Materials*,” CRC Press, (2002).
- [11]. Optical Design Program User's Manual, 19/8/2014, Zemax.
- [12]. Kidger, “*M. Fundamental Optical Design*”, SPIE Press, Bellingham, WA, pp 25-68, (2002).

ABSTRACT

Designing the compact dual FOV infrared optical system for the application in a mixed day and night observation equipment

The article presents how to calculate and design the compact dual FOV infrared optical system in the spectral region (8 - 14) μm with only three lenses and a germanium material. The optical system has a fairly simple structure, and the imaging quality of the optical system at the two fields of view is very good, close to the diffraction limit. In particular, with its compact size, the optical system is designed to be suitable for the application of improving mixed day and night observation equipment.

Keywords: Thermal imager; Step-zoom optical system.