

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ QUỐC PHÒNG

HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ

TRẦN ANH QUANG

**NGHIÊN CỨU PHƯƠNG PHÁP VÀ XÂY DỰNG MÔ HÌNH
THIẾT BỊ ĐÁNH GIÁ CHẤT LƯỢNG TẠO ẢNH
CỦA HỆ THỐNG QUANG HỌC LÀM VIỆC
TRONG VÙNG HỒNG NGOẠI 8-12 μm**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

HÀ NỘI - NĂM 2023

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ QUỐC PHÒNG

HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ

TRẦN ANH QUANG

**NGHIÊN CỨU PHƯƠNG PHÁP VÀ XÂY DỰNG MÔ HÌNH
THIẾT BỊ ĐÁNH GIÁ CHẤT LƯỢNG TẠO ẢNH
CỦA HỆ THỐNG QUANG HỌC LÀM VIỆC
TRONG VÙNG HỒNG NGOẠI 8-12 μm**

Ngành: Kỹ thuật cơ khí

Mã số : 9 52 01 03

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:

1. TS LÊ DUY TUẤN
2. PGS. TS LÊ HOÀNG HẢI

HÀ NỘI - NĂM 2023

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi. Các số liệu, kết quả trong luận án là trung thực và chưa từng được công bố trong bất kỳ một công trình luận văn hay luận án nào.

Tác giả luận án

Trần Anh Quang

LỜI CẢM ƠN

Trong quá trình học tập và nghiên cứu tại Học viện Kỹ thuật Quân sự, để hoàn thành luận án này, tác giả đã nhận được nhiều sự giúp đỡ và đóng góp quý báu của các thầy cô, các nhà khoa học, các nhà quản lý và các đồng nghiệp.

Đầu tiên, tôi xin chân thành cảm ơn tập thể cán bộ hướng dẫn: TS Lê Duy Tuấn và PGS. TS Lê Hoàng Hải, HVKTQS, đã tận tình chỉ dẫn tôi thực hiện và hoàn thành luận án của mình.

Tôi xin cảm ơn Bộ môn Khí tài quang học, Khoa Vũ Khí, HVKTQS đã luôn tạo điều kiện thuận lợi nhất cho tôi trong quá trình học tập và tiến hành thực nghiệm.

Tôi xin cảm ơn Trường Sĩ quan Kỹ thuật Quân sự, Hệ quản lý học viên sau đại học, Phòng sau đại học – HVKTQS luôn quan tâm và động viên tôi trong thời gian học tập tại HVKTQS.

Cuối cùng, tác giả xin bày tỏ lòng cảm ơn đến gia đình, bạn bè, các đồng nghiệp đã luôn động viên, giúp đỡ tác giả vượt qua khó khăn trong suốt quá trình làm luận án.

Xin trân trọng cảm ơn!

Nghiên cứu sinh

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN	i
LỜI CẢM ƠN	ii
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU VÀ CHỮ VIẾT TẮT	vi
DANH MỤC BẢNG BIỂU	viii
DANH MỤC HÌNH VẼ VÀ ĐỒ THỊ	ix
MỞ ĐẦU	1
1. Tính cấp thiết của luận án	1
2. Mục tiêu và nội dung nghiên cứu.....	3
3. Đối tượng nghiên cứu.....	3
4. Phạm vi nghiên cứu.....	4
5. Phương pháp nghiên cứu.....	4
6. Ý nghĩa khoa học và ý nghĩa thực tiễn.....	4
7. Các đóng góp mới của luận án	5
8. Bố cục luận án	5
Chương 1: TỔNG QUAN VỀ THIẾT BỊ ẢNH NHIỆT VÀ VẤN ĐỀ ĐÁNH GIÁ CHẤT LƯỢNG TẠO ẢNH CỦA HỆ THỐNG QUANG HỌC LÀM VIỆC TRONG VÙNG PHỔ HỒNG NGOẠI	7
1.1. Tổng quan về thiết bị ảnh nhiệt.....	7
1.1.1. Quá trình phát triển	7
1.1.2. Nguyên lý hoạt động của thiết bị ảnh nhiệt	10
1.2. Các phương pháp đánh giá chất lượng ảnh của HTQH ảnh nhiệt.	11
1.2.1. Hàm nhòe điểm	13
1.2.2. Hàm nhòe đường.....	16
1.2.3. Hàm nhòe cạnh.....	17
1.2.4. Hàm truyền điều biến MTF.....	19
1.3. Một số thiết bị đánh giá chất lượng ảnh của HTQH làm việc trong vùng hồng ngoại 8 -12 μm	20

1.4. Lựa chọn phương án xây dựng mô hình thiết bị đánh giá chất lượng ảnh của HTQH ảnh nhiệt.	23
1.5. Yêu cầu đối với các thành phần trong hệ thống đánh giá chất lượng ảnh của HTQH hồng ngoại.	25
1.6. Kết luận	33
Chương 2: PHƯƠNG PHÁP TÍNH ẢNH HƯỞNG CỦA KẾT CẤU GÁ LẮP ĐẾN QUANG SAI MẶT SÓNG CỦA LINH KIỆN QUANG HỌC	35
2.1. Sự ảnh hưởng của kết cấu gá lắp đến quang sai mặt sóng của linh kiện quang học.	35
2.2. Phương pháp xác định biên dạng bề mặt và quang sai mặt sóng của các linh kiện quang học sau khi biến dạng.....	36
2.2.1. Quy trình tính toán.....	36
2.2.2. Xác định biên dạng bề mặt	37
2.2.3. Xác định quang sai mặt sóng	46
2.3. Mô hình hóa và thực nghiệm đánh giá quang sai mặt sóng của gương cầu khi biến dạng bởi lực gá kẹp	47
2.3.1. Mô hình gá lắp gương trên phần mềm ANSYS.....	47
2.3.2. Kết cấu thực nghiệm gá lắp gương	47
2.3.3. Mô hình thiết bị đo quang sai mặt sóng.....	48
2.4. Kết quả tính quang sai mặt sóng của gương cầu.....	49
2.4.1. Kết quả chuyển vị tính trên phần mềm ANSYS.....	49
2.4.2. Tính toán quang sai mặt sóng trên Zemax.....	49
2.4.3. Quang sai mặt sóng của gương đo bằng giao thoa kế Zygo.....	51
2.4.4. So sánh quang sai mặt sóng lý thuyết và thực nghiệm.....	52
2.5. Kết luận	53
Chương 3: XÂY DỰNG MÔ HÌNH THIẾT BỊ ĐÁNH GIÁ CHẤT LƯỢNG TẠO ẢNH CỦA HỆ THỐNG QUANG HỌC LÀM VIỆC TRONG VÙNG PHỔ HỒNG NGOẠI 8-12 μm.....	55

3.1. Thiết kế, chế tạo hệ chuẩn trực làm việc trong vùng hồng ngoại.....	55
3.1.1. Thiết kế hệ quang hệ chuẩn trực.....	55
3.1.2. Thiết kế kết cấu cơ khí hệ chuẩn trực.....	62
3.1.3. Cụm gương thứ cấp.....	67
3.1.4. Lắp ráp và hiệu chỉnh.....	67
3.1.5. Kết quả đo kiểm các thông số của ống chuẩn trực.....	70
3.2. Thiết kế, chế tạo vật kính hiển vi.....	71
3.2.1. Thiết kế hệ quang vật kính hiển vi.....	71
3.2.2. Chế tạo vật kính hiển vi.....	77
3.3. Kết luận.....	80
Chương 4: CÁC KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM.....	82
4.1. Kết quả hoạt động thực nghiệm của hệ chuẩn trực.....	82
4.1.1. Đo quang sai mặt sóng của gương chuẩn trực.....	82
4.1.2. Kết quả thu nhận ảnh của lỗ tạo bởi vật kính ảnh nhiệt.....	83
4.2. Kết quả thử nghiệm hoạt động của vật kính hiển vi.....	85
4.2.1. Kiểm tra độ phóng đại của vật kính hiển vi.....	85
4.2.2. Kết quả thu nhận ảnh của lỗ tạo bởi vật kính hiển vi.....	86
4.3. Ứng dụng mô hình thiết bị đo hàm LSF, MTF của một số mẫu vật kính ảnh nhiệt.....	87
4.3.1. Đo tiêu cự của vật kính ảnh nhiệt.....	88
4.3.2. Đo hàm nhòe đường LSF, hàm truyền điều biến MTF.....	91
4.4. Kết luận.....	101
KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN CỦA LUẬN ÁN.....	102
1. Kết quả luận án.....	102
2. Hướng phát triển của luận án.....	103
DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ.....	104
TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	105
PHỤ LỤC.....	111

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU VÀ CHỮ VIẾT TẮT

1. Danh mục các ký hiệu

TT	Ký hiệu	Diễn giải	Đơn vị
1	R	Bán kính của linh kiện quang học	mm
3	d	Chiều dày dọc trục	mm
4	f'	Tiêu cự	mm
5	D	Đường kính thông quang	mm
6	ω	Góc thị giới	Độ
7	β	Độ phóng đại	Lần
8	λ	Bước sóng	μm
9	A_j	Hệ số của đa thức Zernike Standard	
10	$M_j(\rho, \theta)$	Đa thức Zernike Standard	
11	γ	Hệ số hiệu chỉnh Gamma	
12	Φ_{in}	Tín hiệu đầu vào	Độ xám
13	V_{out}	Tín hiệu đầu ra	Độ xám
14	F	Lực tác dụng	N
15	P	Trọng lượng	N
16	V	Miền khảo sát	
17	V_e	Miền con	
18	$\{q\}_e$	Nút phần tử	
19	$[m]_e$	Ma trận khối lượng	
20	$[c]_e$	Ma trận cản	
21	$[k]_e$	Ma trận độ cứng	
22	$\{f\}_e$	Véc tơ lực phần tử	
23	$[M]$	Ma trận khối lượng tổng thể.	
24	$[C]$	Ma trận cản tổng thể.	
25	$[K]$	Ma trận độ cứng tổng thể.	
26	$\{F\}$	Véc tơ lực tổng thể	

2. Danh mục chữ viết tắt

Chữ viết tắt	Nguồn gốc	Dịch nghĩa
PSF	Point Spread Function	Hàm nhòe điểm
LSF	Line Spread Function	Hàm nhòe đường
ESF	Edge Spread Function	Hàm nhòe cạnh
OTF	Optical Transfer Function	Hàm truyền quang học
MTF	Modulation Transfer Function	Hàm truyền điều biến
CCD	Charge Coupled Device	Cảm biến
SWIR	Short Wavelength Infrared	Phổ hồng ngoại bước sóng ngắn
MWIR	Medium Wavelength Infrared	Phổ hồng ngoại bước sóng trung bình
LWIR	Long Wavelength Infrared	Phổ hồng ngoại bước sóng dài
PV	Peak to Valley	Giá trị đỉnh đáy
RMS	Root Mean Squared	Giá trị bình phương trung bình
NA	Numerical Aperture	Khẩu độ số
HTQH		Hệ thống quang học
TBAN		Thiết bị ảnh nhiệt

DANH MỤC BẢNG BIỂU

Bảng 2.1. So sánh quang sai mặt sóng PV giữa lý thuyết và thực nghiệm dưới các lực tác dụng khác nhau	52
Bảng 2.2. So sánh quang sai mặt sóng RMS giữa lý thuyết và thực nghiệm dưới các lực tác dụng khác nhau	52
Bảng 3.1. Các thông số kết cấu tối ưu của vật kính hiển vi.....	76
Bảng 3.2. Kết quả đo kiểm thông số kích thước của các thấu kính.....	78
Bảng 3.3. Kết quả đo sai số hình dạng các mặt của các thấu kính	79
Bảng 3.4. Quy đổi sai số hình dạng sang bước sóng trung tâm trong vùng phổ làm việc của vật kính ($\lambda_{IR} = 10,6 \mu\text{m}$)	80
Bảng 4.1. Bảng các thông số kỹ thuật chính của laser CO ₂	89
Bảng 4.2. Thông số của các mẫu vật kính cần kiểm tra.....	96

DANH MỤC HÌNH VẼ VÀ ĐỒ THỊ

Hình 1.1. Độ truyền qua của khí quyển theo bước sóng ở vùng hồng ngoại ...	9
Hình 1.2. Sơ đồ nguyên lý của thiết bị ảnh nhiệt.....	10
Hình 1.3. Sơ đồ nguyên lý tạo ảnh của một HTQH.....	12
Hình 1.4. Mối quan hệ giữa hàm MTF và các hàm PSF, LSF, ESF.....	13
Hình 1.5. Hàm nhòe điểm khi không có quang sai.....	13
Hình 1.6. Ảnh hưởng của quang sai đối với hàm nhòe điểm	14
Hình 1.7. Hàm nhòe đường LSF	17
Hình 1.8. Phân bố cường độ sáng trên vật và ảnh	18
Hình 1.9. Mía dạng cạnh.....	18
Hình 1.10. Thiết bị đo ống kính ảnh nhiệt LensCheck LWIR.....	21
Hình 1.11. Sơ đồ đánh giá chất lượng ảnh của HTQH bằng thiết bị ORI.....	22
Hình 1.12. Thiết bị ImageMaster Universal	23
Hình 1.13. Sơ đồ nguyên lý đo hàm nhòe đường LSF	24
Hình 1.14. Mô hình thiết bị của hệ thống kiểm tra HTQH hồng ngoại.....	24
Hình 1.15. Sơ đồ hoạt động của hệ chuẩn trực	26
Hình 1.16. Hình dạng các loại mục tiêu hồng ngoại.....	31
Hình 2.1. Quy trình tính quang sai mặt sóng của một linh kiện quang học.....	37
Hình 2.2. Mô hình minh họa sự biến dạng của phần tử trên bề mặt gương. ..	41
Hình 2.3. Mô hình gương cầu trên ANSYS.....	47
Hình 2.4. Sơ đồ của các lực tác dụng lên gương cầu và kết cấu gá lắp cụ thể.	48
Hình 2.5. Mô hình thiết bị đo quang sai mặt sóng của gương cầu.	48
Hình 2.6. Sơ đồ chuyển vị của các điểm nút trên bề mặt gương với lực tác dụng 200 N.	49
Hình 2.7. Giao diện phần mềm tính các hệ số của đa thức Zernike Standard	50
Hình 2.8. Quang sai mặt sóng của gương được tính với bước sóng 0,6328 μm	50
Hình 2.9. Quang sai mặt sóng của gương đo bằng giao thoa kế Zygo.	51

Hình 2.10. Quang sai mặt sóng PV và RMS dưới các lực tác dụng khác nhau.	53
Hình 3.1. Hệ chuẩn trực phản xạ trên trục dùng vật kính gương.....	56
Hình 3.2. Hệ chuẩn trực phản xạ ngoài trục dùng vật kính gương.....	57
Hình 3.3. Chùm khẩu độ đi vào hệ chuẩn trực	59
Hình 3.4. Chùm thị giới đi vào hệ chuẩn trực.....	59
Hình 3.5. Mối quan hệ giữa chiều cao và vị trí của gương thứ cấp.....	61
Hình 3.6. Quang sai và sai sóng của hệ chuẩn trực	61
Hình 3.7. Quy trình tính toán, hiệu chỉnh kết cấu gá lắp gương.....	62
Hình 3.8. Cơ cấu gá lắp và mô hình lực tác dụng.....	63
Hình 3.9. Kết quả phân tích mô hình chịu lực của gương.	65
Hình 3.10. Kết cấu cụm gương cải tiến	66
Hình 3.11. Kết quả phân tích mô hình gá lắp cải tiến.....	66
Hình 3.12. Cụm gương thứ cấp.....	67
Hình 3.13. Sơ đồ hiệu chỉnh gương cầu.....	68
Hình 3.14. Sơ đồ hiệu chỉnh cụm gương thứ cấp	69
Hình 3.15. Sơ đồ gá lắp ống chuẩn trực.....	69
Hình 3.16. Sơ đồ nguyên lý đo tiêu cự bằng kính kinh vĩ	70
Hình 3.17. Các điểm aplanat của mặt khúc xạ đơn.....	72
Hình 3.18. Thấu kính aplanat.....	73
Hình 3.19. Sơ đồ tạo ảnh của vật kính hiển vi	74
Hình 3.20. Sơ đồ xác định khoảng cách vật.....	75
Hình 3.21. Thông số vật kính tối ưu trên phần mềm Zemax	76
Hình 3.22. Sơ đồ HTQH và quang sai của vật kính.....	77
Hình 4.1. Bản đồ sai sóng của ống chuẩn trực đo bằng giao thoa kế Zygo....	83
Hình 4.2. Sơ đồ và mô hình thiết bị thu nhận ảnh của vật kính FLIR.....	84
Hình 4.3. Kết quả đo kiểm vật kính ảnh nhiệt	84
Hình 4.4. Sơ đồ đo kiểm hoạt động của vật kính hiển vi hồng ngoại.....	85
Hình 4.5. Ảnh của lỗ nhỏ có đường kính 0,3175 mm	86

Hình 4.6. Hình ảnh quan sát các lỗ nhỏ	87
Hình 4.7. Sơ đồ đo tiêu cự của vật kính ảnh nhiệt và ảnh của mia chữ H.....	88
Hình 4.8. Sơ đồ và mô hình thử nghiệm hoạt động của hệ thống	91
Hình 4.9. Ảnh của vật mẫu.....	92
Hình 4.10. Quy trình xử lý kết quả đo hàm LSF, MTF	93
Hình 4.11. Mô tả phương pháp lọc nhiễu của ảnh	94
Hình 4.12. Minh họa mối quan hệ giữa hàm LSF và hàm MTF	95
Hình 4.13. Ảnh của vật mẫu khi thử nghiệm với vật kính thứ nhất	96
Hình 4.14. Kết quả thực nghiệm đo hàm LSF, MTF của vật kính thứ nhất. ..	96
Hình 4.15. Hàm MTF theo công bố của nhà sản xuất	97
Hình 4.16. Ảnh hưởng của phạm vi đo PSF đến kết quả đo hàm MTF	98
Hình 4.17. Ảnh của lỗ nhỏ có đường kính 10 μm	99
Hình 4.18. Ảnh của vật mẫu khi thử nghiệm với vật kính thứ hai	99
Hình 4.19. Hàm LSF và MTF lý thuyết và thực nghiệm.	100

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của luận án

Ngày nay, các thiết bị quang điện tử đã trở nên phổ biến trong hầu hết các lĩnh vực, cả trong và ngoài quân đội nhằm phục vụ các mục đích khác nhau như: Quan sát, đo đạc, ngắm bắn mục tiêu trong các điều kiện tác chiến khác nhau. Trong đó, thiết bị ảnh nhiệt (TBAN) đang là xu thế công nghệ kỹ thuật quân sự trên thế giới, được coi là thiết bị tiên tiến nhất hiện nay. Chúng làm việc ở vùng hồng ngoại bước sóng trung (MWIR, 3 – 5 μm) và bước sóng dài (LWIR, 8 – 12 μm). Nhờ độ nhạy cao với bức xạ nhiệt phát ra từ bản thân đối tượng và khả năng phân biệt được sự chênh lệch nhiệt độ nhỏ tới cỡ vài chục mili-Kelvin mà TBAN có một số ưu điểm nổi bật như sau:

- TBAN có khả năng ngụy trang tốt: Có thể làm việc trong điều kiện đêm tối hoàn toàn, khó bị đối phương trinh sát và gây nhiễu bằng chiếu sáng.
- TBAN có khả năng thích ứng tốt: Có thể làm việc trong mọi điều kiện thời tiết, làm việc cả ban ngày lẫn ban đêm, sương mù, màn khói, trong môi trường và địa hình phức tạp.
- TBAN có khả năng nhận biết tốt: Có thể phát hiện bức xạ nhiệt phát ra từ mục tiêu nên đã nâng cao rõ rệt khả năng phát hiện mục tiêu.
- Cụ ly quan sát của thiết bị tương đối lớn: Các TBAN cầm tay để quan sát, ngắm bắn có cự ly hoạt động 1000-2000 m; các thiết bị nhìn đêm được trang bị trên các tàu tác chiến mặt nước có cự ly hoạt động của chúng khoảng 2000-5000 m.

Từ những ưu điểm nổi bật nêu trên mà TBAN đã được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực, đặc biệt là trong quân sự. Đây là một trong những thiết bị được các nhà khoa học kỹ thuật trong và ngoài nước đặc biệt quan tâm, luôn tìm hướng phát triển về kỹ thuật và công nghệ chế tạo.

Hiện nay trên thế giới, việc thiết kế, chế tạo TBAN hầu hết tập trung tại một số nước có nền khoa học công nghệ phát triển cao như Mỹ, Pháp, Anh... điều này là do TBAN hoạt động ở vùng hồng ngoại, nên các thành phần chức năng của TBAN có các đặc tính rất khác biệt và đòi hỏi những công nghệ chế tạo đặc biệt.

Đối với tình hình trong nước, TBAN luôn được coi là một loại trang thiết bị kỹ thuật hiện đại, công nghệ cao rất cần thiết cho Quân đội ta. Năng lực thiết kế quang học ở nước ta trong thời gian qua đã có bước phát triển đáng kể, đó là khả năng làm chủ công tác thiết kế, chế tạo các loại khí tài quang ban ngày, khí tài quang nhìn đêm hoạt động theo nguyên lý khuếch đại ánh sáng yếu. Tuy vậy, đến nay vẫn chưa có công bố nào trong việc thiết kế, chế tạo TBAN tại Việt Nam.

Song song với sự phát triển của TBAN, một vấn đề cũng quan trọng không kém đó là phát triển các thiết bị đo lường ảnh nhiệt. Thiết bị đo được chia làm hai loại: Thứ nhất, là các thiết bị đo kiểm các thông số của camera ảnh nhiệt. Thứ hai, là các thiết bị đo kiểm các thông số của thấu kính hoặc ống kính ảnh nhiệt.

Ở trong nước hiện nay, một số đơn vị như Cục TC-ĐL-CL, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự... đã được trang bị một số hệ thống đo kiểm ảnh nhiệt. Tuy nhiên, các thiết bị này chỉ dùng để đo các thông số của camera ảnh nhiệt, chưa đo được các thông số như tiêu cự, độ phân giải... của các thấu kính hay ống kính ảnh nhiệt. Trên thế giới, đã có các thiết bị đánh giá chất lượng ảnh của ống kính ảnh nhiệt được thương mại hóa bởi một số hãng nổi tiếng như: Optikos, Trioptics... có chất lượng tốt, kết quả đo tin cậy, tuy nhiên, giá thành rất cao. Cho đến hiện tại, chưa có phòng thí nghiệm, các trung tâm nghiên cứu hay nhà máy sản xuất quang học nào trong nước được trang bị thiết bị đo ống kính ảnh nhiệt. Để nghiên cứu, xây dựng và phát triển công nghệ ảnh nhiệt

ở trong nước thì yêu cầu đầu tiên là cần phải có đủ máy móc, trang thiết bị để sản xuất, chế tạo cũng như đo kiểm. Vì vậy, ngoài việc được trang bị các thiết bị đo kiểm các thông số của camera ảnh nhiệt để kiểm tra một thiết bị ảnh nhiệt hoàn chỉnh thì việc phải trang bị thêm các thiết bị đo kiểm các thông số của ống kính để phục vụ cho gia công, chế tạo hay tích hợp hệ thống là một vấn đề cấp bách trong tình hình hiện nay.

Do vậy, “*Nghiên cứu phương pháp và xây dựng mô hình thiết bị đánh giá chất lượng tạo ảnh của hệ thống quang học làm việc trong vùng hồng ngoại 8-12 μm* ” là luận án hết sức cần thiết, có ý nghĩa khoa học và thực tiễn cao.

2. Mục tiêu và nội dung nghiên cứu

Mục tiêu nghiên cứu:

Xây dựng giải pháp và mô hình thiết bị nhằm đánh giá chất lượng tạo ảnh của hệ thống quang học (HTQH) ảnh nhiệt làm việc trong vùng phổ hồng ngoại 8-12 μm .

Nội dung nghiên cứu:

- Các phương pháp đánh giá chất lượng ảnh của hệ quang ảnh nhiệt để lựa chọn phương pháp nghiên cứu của luận án.
- Nghiên cứu ảnh hưởng của cơ cấu gá lắp cơ khí đến quang sai mặt sóng của linh kiện quang học phục vụ cho thiết kế, chế tạo các thành phần.
- Xây dựng mô hình thiết bị đánh giá chất lượng tạo ảnh của HTQH làm việc trong vùng phổ hồng ngoại 8-12 μm .
- Nghiên cứu thuật toán xác định hàm LSF, MTF của HTQH ảnh nhiệt cần kiểm tra.
- Các yếu tố ảnh hưởng đến kết quả đo của mô hình thiết bị.

3. Đối tượng nghiên cứu

Mô hình thiết bị đánh giá chất lượng tạo ảnh của HTQH làm việc trong vùng hồng ngoại 8-12 μm .

4. Phạm vi nghiên cứu

Tập trung nghiên cứu HTQH làm việc trong vùng phổ hồng ngoại 8-12 μm .

5. Phương pháp nghiên cứu

Luận án sử dụng phương pháp nghiên cứu tính toán lý thuyết kết hợp với thực nghiệm.

Phương pháp lý thuyết:

- Nghiên cứu cơ sở lý thuyết của các phương pháp đo.
- Nghiên cứu giải pháp thiết kế, chế tạo các thành phần xây dựng mô hình thiết bị.
- Nghiên cứu thuật toán xử lý ảnh để xác định hàm LSF, MTF.

Phương pháp thực nghiệm:

- Thiết kế, chế tạo cụm giá lắp cơ khí đối với gương cầu để kiểm chứng phương pháp tính ảnh hưởng của lực giá lắp đối với quang sai mặt sóng của linh kiện quang học.
- Chế tạo, gia công các thành phần trong mô hình thiết bị đánh giá chất lượng ảnh của HTQH làm việc trong vùng hồng ngoại.
- Thử nghiệm hoạt động của các thành phần, từ đó ứng dụng mô hình thiết bị vào thực nghiệm kiểm tra, đánh giá chất lượng của một số vật kính ảnh nhiệt mẫu.

6. Ý nghĩa khoa học và ý nghĩa thực tiễn

Ý nghĩa khoa học:

- Luận án có ý nghĩa khoa học cao cho quá trình thiết kế, chế tạo các thành phần của mô hình thiết bị có tính đến ảnh hưởng của cơ cấu giá lắp đến quang sai mặt sóng của linh kiện quang học. Điều này rất hữu ích cho các nhiệm vụ thiết kế, chế tạo các cụm cơ khí quang học sau này.

- Luận án cung cấp cơ sở tính toán các thành phần của hệ thống để xây dựng một hệ thống có khả năng đánh giá chất lượng ảnh của hệ quang ảnh nhiệt một cách rõ ràng, tường minh.

Ý nghĩa thực tiễn:

- Kết quả của luận án khẳng định khả năng chế tạo trong nước một thiết bị đo kiểm hệ quang ảnh nhiệt với chất lượng tốt, đáp ứng yêu cầu đo kiểm quang học.

- Mô hình thiết bị được chế tạo có thể được sử dụng trong các trung tâm nghiên cứu, đo lường, nhà máy sản xuất hệ quang ảnh nhiệt, đáp ứng yêu cầu cấp thiết trong tình hình ở Việt Nam chưa có thiết bị nào có thể kiểm tra, đánh giá được chất lượng của hệ quang làm việc trong vùng phổ hồng ngoại.

7. Các đóng góp mới của luận án

- Đã cung cấp một phương pháp luận khoa học để tính ảnh hưởng của cơ cấu gá lắp đến quang sai mặt sóng của linh kiện quang học và đã được các nhà khoa học trên thế giới công nhận đây là đóng góp mới, có ý nghĩa thực tiễn cao. Đây là phương pháp không chỉ áp dụng trong thiết kế hệ chuẩn trực dùng gương cầu mà còn áp dụng được đối với các linh kiện khác như thấu kính, gương phẳng... phục vụ cho các nghiên cứu tiếp theo.

- Đã xây dựng được giải pháp và mô hình thiết bị đo kiểm HTQH làm việc trong vùng hồng ngoại 8-12 μm .

- Đã xây dựng phần mềm xử lý ảnh xác định hàm LSF, MTF của HTQH cần kiểm tra.

8. Bố cục luận án

Bố cục luận án bao gồm các thành phần chính sau:

Mở đầu

Chương I: Tổng quan về thiết bị ảnh nhiệt và vấn đề đánh giá chất lượng tạo ảnh của hệ thống quang học làm việc trong vùng phổ hồng ngoại.

Chương này trình bày một số vấn đề chung về TBAN; các phương pháp đánh giá chất lượng ảnh của hệ thống quang học ảnh nhiệt; ưu, nhược điểm của từng phương pháp; nguyên lý hoạt động và các yêu cầu đối với các thành phần của hệ thống đánh giá chất lượng ảnh của một hệ thống quang học ảnh nhiệt; ảnh hưởng của cơ cấu gá lắp đến chất lượng hoạt động của hệ thống.

Chương II: Phương pháp tính ảnh hưởng của kết cấu gá lắp đến quang sai mặt sóng của linh kiện quang học.

Chương này đề xuất một phương pháp tính ảnh hưởng của cơ cấu gá lắp cơ khí đến quang sai mặt sóng của một linh kiện quang học. Bằng cách sử dụng phần mềm ANSYS để tính chuyển vị của các điểm nút trên bề mặt của linh kiện, kết hợp với làm khớp biên dạng bề mặt linh kiện để tính các hệ số của đa thức Zernike Standard, từ đó xác định quang sai mặt sóng của linh kiện bằng phần mềm Zemax.

Chương III: Xây dựng mô hình thiết bị đánh giá chất lượng tạo ảnh của HTQH làm việc trong vùng phổ hồng ngoại 8 -12 μm

Chương này trình bày các bước thiết kế, chế tạo, hiệu chỉnh và tối ưu hóa từng thành phần của hệ thống đánh giá chất lượng ảnh đó là hệ chuẩn trực và vật kính hiển vi, trong đó có tính đến yếu tố ảnh hưởng của cơ cấu gá lắp đến quang sai mặt sóng của linh kiện quan trọng là gương cầu trong hệ chuẩn trực.

Chương IV: Các kết quả thực nghiệm

Chương này trình bày thử nghiệm hoạt động của các thành phần và toàn hệ thống mô hình thiết bị. Đồng thời, đề cập đến thuật toán xử lý kết quả đo hàm LSF, MTF của HTQH ảnh nhiệt cần kiểm tra; phân tích, đánh giá kết quả và yếu tố ảnh hưởng đến kết quả đo.

Kết luận chung và hướng phát triển của luận án.

Chương 1

TỔNG QUAN VỀ THIẾT BỊ ẢNH NHIỆT VÀ VẤN ĐỀ ĐÁNH GIÁ CHẤT LƯỢNG TẠO ẢNH CỦA HỆ THỐNG QUANG HỌC LÀM VIỆC TRONG VÙNG PHỔ HỒNG NGOẠI

Chương này trình bày một số vấn đề chung về TBAN; các phương pháp đánh giá chất lượng ảnh của hệ thống quang học ảnh nhiệt; nguyên lý hoạt động và các yêu cầu đối với các thành phần của hệ thống đánh giá chất lượng ảnh của một hệ thống quang học ảnh nhiệt; ảnh hưởng của cơ cấu gá lắp đến chất lượng hoạt động của hệ thống.

1.1. Tổng quan về thiết bị ảnh nhiệt

1.1.1. Quá trình phát triển

Hệ thống ảnh nhiệt là thiết bị dùng để quan sát vật theo khả năng bức xạ riêng của vật và sự khác biệt về khả năng bức xạ riêng giữa chúng. Nguyên lý hoạt động của TBAN được xây dựng trên cơ sở biến đổi bức xạ nhiệt trong không gian vật không nhìn thấy bằng mắt thường thành tín hiệu điện, sau đó tái tạo trên màn hình để quan sát.

Vào những năm 50, TBAN đầu tiên sử dụng phương pháp quét cơ khí chỉ có một phần tử (đầu thu một phần tử nhạy cảm) và ảnh được ghi bằng phim ảnh đã được chế tạo và thường được gọi là camera ảnh nhiệt. Giai đoạn 1956-1960 được sự hỗ trợ và đặt hàng của quân đội Mỹ bắt đầu thời kỳ phát triển rất mạnh của camera ảnh nhiệt. Thời gian này do chưa chế tạo được đầu thu có độ nhạy cao và hằng số thời gian nhỏ (thời gian đáp ứng) nên chưa chế tạo được camera nhiệt quét nhanh và chưa thu được ảnh theo thời gian thực. Nhờ thành công trong việc chế tạo được quang trở có hằng số thời gian nhỏ Indi-Antimoan (InSb) và Giécmanni-Thủy ngân (Ge-Hg) nên sau đó đã tích hợp hệ ảnh nhiệt có khả năng quét nhanh và thu ảnh theo thời gian thực. Cho tới nay các TBAN đã trải qua ba thế hệ phát triển:

Thế hệ I là thế hệ khi mà bộ phận thu chỉ có một số phần tử thu (sensor) ghép với nhau thành dãy. Để tạo thành ảnh phải dùng các hệ quét cơ khá phức tạp. Các TBAN chỉ thực sự được phát triển mạnh từ cuối những năm 60 đầu những năm 70 của thế kỉ XX dựa trên những tiên bộ mới của công nghệ điện tử, bán dẫn... Công nghệ này chứa một số phần tử thu nhất định và kĩ thuật quét ảnh cơ khí làm cho TBAN còn khá phức tạp, kích thước lớn và giá thành cao.

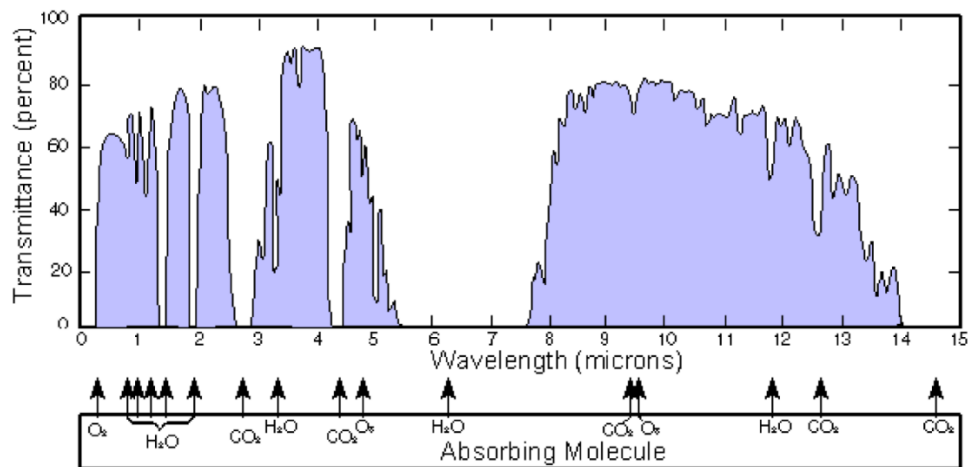
Vào những năm cuối thập niên 70 người ta bắt đầu nghiên cứu công nghệ chế tạo ma trận thu cỡ nhỏ kết hợp với công nghệ xử lý tín hiệu ngay trên phần tử thu SPRITE (Signal Processing In The Element) và mạch tích điện tích CDD (Charge-Coupled Device) nên đã tạo được thế hệ ảnh nhiệt có chất lượng cao hơn và bộ quét cơ quang cũng đơn giản hơn. Để giảm chi phí và đáp ứng từng mục đích sử dụng, xu hướng phổ biến lúc đó là chế tạo các TBAN trên cơ sở các môđun tiêu chuẩn chung. Đó là các khối chế tạo sẵn dùng để lắp lẫn cho nhiều chủng loại thành các hệ thống theo các kỹ thuật khác nhau. Giai đoạn này là thời kì của TBAN thế hệ II.

Sang thế hệ II các máy thu có số phần tử nhiều hơn, tới hàng ngàn phần tử, nên phần quét cơ quang vẫn cần thiết nhưng đã đơn giản hơn rất nhiều. Giải pháp công nghệ mấu chốt được áp dụng ở đây là sử dụng các đầu thu (detector) kết hợp với bộ đọc và xử lý tín hiệu trên bán dẫn không cần dây dẫn. TBAN thế hệ II đã có nhiều tính năng được nâng cao nên chất lượng ảnh, tầm hoạt động, kích thước và trọng lượng máy đã được cải tiến đáng kể. Tuy nhiên các máy thu thế hệ II có số lượng các phần tử thu chưa đủ để loại bỏ hệ thống quét cơ.

Khoảng cuối những năm 80 nhờ những tiên bộ vượt bậc trong công nghệ bán dẫn, người ta đã chế tạo những ma trận có kích thước lớn, do đó có thể loại bỏ được hoàn toàn nhu cầu quét cơ khí, nhờ đó kích thước thiết bị được thu nhỏ, trọng lượng giảm nhiều và chất lượng ảnh cũng được cải thiện hơn... Thời kỳ này đánh dấu sự ra đời của thế hệ thứ III của TBAN.

Thế hệ thứ III là thế hệ ảnh nhiệt không phải dùng đến hệ quét cơ quang, bộ phận thu là ma trận kiểu mạng phẳng hội tụ có đến hàng vạn phần tử thu (pixel) với nhiều cấu hình khác nhau: 128x128, 256x256, 320x240... Các chuyên gia tính rằng phải có số phần tử lớn như vậy thì mới tạo được ảnh chất lượng. Cái khó ở đây là phải đạt được sự đồng đều về độ nhạy cho tất cả các phần tử thu. Trong thế hệ đầu thu này các phần tử thu và các đầu đọc, xử lý tín hiệu được chế tạo liền khối bằng kỹ thuật CCD, công nghệ này cho phép xử lý một số lượng lớn thông tin trong thời gian thực và đạt sự đồng đều độ nhạy cho tất cả các đầu thu. Tuy nhiên, do áp dụng công nghệ đặc biệt nên việc chế tạo rất tốn kém. Các nghiên cứu ngoài việc hoàn thiện các tính năng cho thiết bị còn đi theo hướng giảm chi phí hạ giá thành sản phẩm.

TBAN thế hệ III cho mục đích quân sự thường bị kiểm soát chặt chẽ với các chính sách cấm xuất khẩu ngặt nghèo sang các nước khác. Hiện nay, các hệ thống TBAN phục vụ mục đích trinh sát ngày càng được hoàn thiện, rất hiện đại và tính đa năng cao.



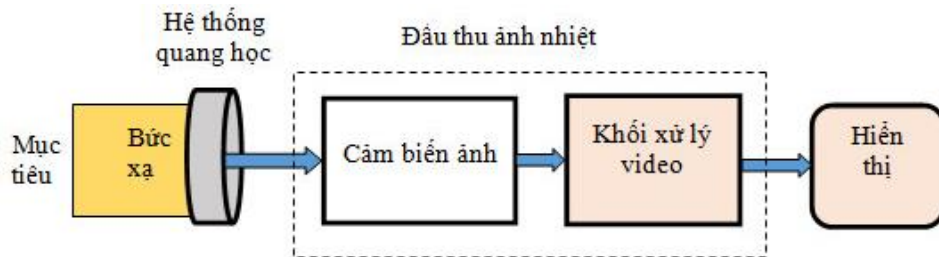
Hình 1.1. Độ truyền qua của khí quyển theo bước sóng ở vùng hồng ngoại

Hiện nay, trên thế giới người ta tập trung nghiên cứu và phát triển TBAN hoạt động chủ yếu ở vùng hồng ngoại sóng trung (3-5 μ m) và hồng ngoại sóng dài (8-14 μ m) do đây chính là hai “cửa sổ quang” của bầu khí quyển (Hình 1.1).

Tùy theo đặc điểm của mục tiêu cần quan sát như nhiệt độ của mục tiêu, điều kiện quan sát, cự ly mục tiêu mà người ta nghiên cứu thiết kế TBAN làm việc ở vùng bước sóng nào.

1.1.2. Nguyên lý hoạt động của thiết bị ảnh nhiệt

Tương tự như camera thông thường, về nguyên lý làm việc và cấu tạo chung, một TBAN cơ bản gồm hai thành phần chính là đầu thu ảnh nhiệt (còn gọi là core ảnh nhiệt) và ống kính tạo ảnh, cho phép thu nhận bức xạ nhiệt do mục tiêu phát ra và dựng lại phân bố nhiệt độ thành hình ảnh (ảnh nhiệt) mà mắt người có thể nhìn được [3, 4].



Hình 1.2. Sơ đồ nguyên lý của thiết bị ảnh nhiệt

Hoạt động của TBAN có thể được mô tả sơ lược thông qua sơ đồ nguyên lý trên hình 1.2. Thành phần quang học của hệ là một vật kính có tác dụng tạo ảnh của mục tiêu cần quan sát lên mặt nhạy sáng của cảm biến ảnh nhiệt. Cảm biến ảnh, gồm nhiều các phần tử thu ảnh được sắp xếp theo dạng ma trận, sẽ biến đổi ảnh quang học thành các tín hiệu điện tử, khối xử lý video là một mạch điện chuyên dụng, thực hiện các thuật toán chỉnh sửa để loại bỏ các lỗi của cảm biến sao cho tại đầu ra sẽ nhận được ảnh điện tử của mục tiêu với chất lượng tốt nhất, ảnh này sẽ được tái tạo lại thành ảnh quang học trên màn hình hiển thị để mắt người có thể quan sát. Thông thường cảm biến ảnh và mạch xử lý video sẽ được đóng gói với nhau tạo thành đầu thu ảnh nhiệt hoàn chỉnh (core ảnh nhiệt), hình ảnh cung cấp từ đầu ra của core ảnh nhiệt là tín hiệu video theo các chuẩn kết nối thông thường như AV, camera link, IP...

Từ nguyên lý cấu tạo và hoạt động như trên, có thể thấy rằng để tạo ra TBAN cần phải có 2 thành phần chính là core ảnh nhiệt và ống kính quang học.

Trong đó, core ảnh nhiệt là thành phần rất quan trọng, được các hãng sản xuất chế tạo dưới dạng mô-đun. Core ảnh nhiệt thực sự là một sản phẩm công nghệ cao, hiện nay chỉ có một số ít các nước tiên tiến chế tạo được (Mỹ, Pháp,...). Vì vậy, để chế tạo TBAN chúng ta phải nhập khẩu thành phần này. Có 2 chủng loại đầu thu ảnh nhiệt là loại có làm lạnh và không làm lạnh. Đầu thu làm lạnh có giá thành cao, nhưng có độ nhạy cao hơn nên không cần hệ quang có khẩu độ lớn như đối với đầu thu không làm lạnh, đồng thời độ nhạy nhiệt cũng tốt hơn (25 mK so với 50 mK), điều này cho phép tạo ra thiết bị có tầm quan sát xa với hình ảnh mục tiêu rõ nét hơn.

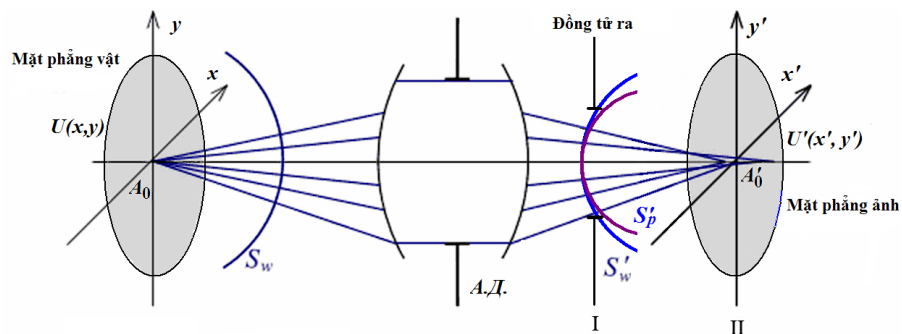
Đền vật kính của TBAN, đây cũng là thành phần rất quan trọng của hệ thống, có chức năng hội tụ chùm tia bức xạ tới từ vật lên đầu thu, đảm bảo năng lượng bức xạ đó tập trung đủ lớn có thể gây ra phản ứng của đầu thu để tạo tín hiệu đầu có chất lượng tốt nhất. Chất lượng tạo ảnh của vật kính sẽ ảnh hưởng rất lớn đến các tiêu chí đặc trưng cho chất lượng của TBAN như: hiệu nhiệt độ tương đương nhiễu, hiệu nhiệt độ phân giải nhỏ nhất.

Với mục tiêu xây dựng giải pháp và mô hình thiết bị đánh giá chất lượng ảnh HTQH ảnh nhiệt, trước hết luận án phải nghiên cứu các phương pháp đánh giá chất lượng ảnh của HTQH ảnh nhiệt hiện nay và một số thiết bị thương mại hiện có trên thị trường, từ đó lựa chọn phương pháp phù hợp để thực hiện các bước thiết kế, chế tạo tiếp theo.

1.2. Các phương pháp đánh giá chất lượng ảnh của HTQH ảnh nhiệt.

Sử dụng quan điểm sóng để xét vấn đề tạo ảnh của một HTQH [5]. Trong môi trường đồng nhất và đẳng hướng, sóng ánh sáng phát ra từ một điểm được lan truyền đến HTQH dưới dạng mặt sóng cầu. Nhiệm vụ của HTQH là biến đổi mặt sóng cầu trong không gian vật thành mặt sóng cầu trong không gian

ảnh. Nếu mặt sóng ra khỏi HTQH là mặt sóng cầu thì ảnh của một điểm trong không gian vật sẽ là một điểm. Tuy nhiên, HTQH không làm được nhiệm vụ đó một cách hoàn hảo, nó chỉ tạo ra được mặt sóng gần với mặt sóng cầu, tức là khi đó mặt sóng ra khỏi HTQH không còn là mặt cầu nữa mà nó bị biến dạng. Tại đồng tử ra của HTQH người ta tạo một mặt sóng lý tưởng để xác định sự sai khác với mặt sóng đó. Và độ biến dạng này người ta gọi là sai sóng (Hình 1.3).



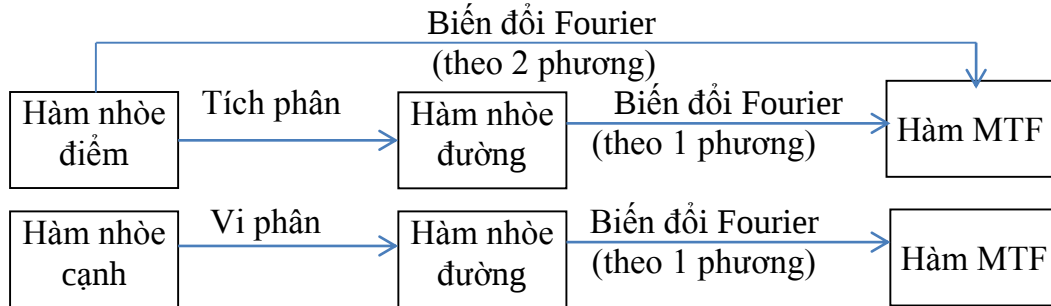
Hình 1.3. Sơ đồ nguyên lý tạo ảnh của một HTQH

Hiện nay, để đánh giá chất lượng ảnh của một HTQH ảnh nhiệt người ta chia làm 04 phương pháp chính, bao gồm:

- Phương pháp đo hàm nhòe điểm (PSF)
- Phương pháp đo hàm nhòe đường (LSF)
- Phương pháp đo hàm nhòe cạnh (ESF)
- Phương pháp đo hàm truyền điều biến (MTF)

Đây là các hàm đặc trưng để đánh giá chất lượng ảnh của một HTQH ảnh nhiệt. Tuy nhiên, để kiểm tra, đánh giá chất lượng của một HTQH một cách chính xác và trực quan nhất người ta thường đánh giá thông qua hàm truyền điều biến MTF và chúng được đo gián tiếp thông qua các phương pháp đo hàm PSF, LSF, ESF (Hình 1.4). Do vậy, các phương pháp đo hàm PSF, hàm LSF, hàm ESF thực chất cuối cùng đều đưa về tính hàm truyền MTF để đánh giá

chất lượng ảnh. Các hàm này có mối quan hệ với nhau thông qua các mối quan hệ toán học như sau [6-9]:

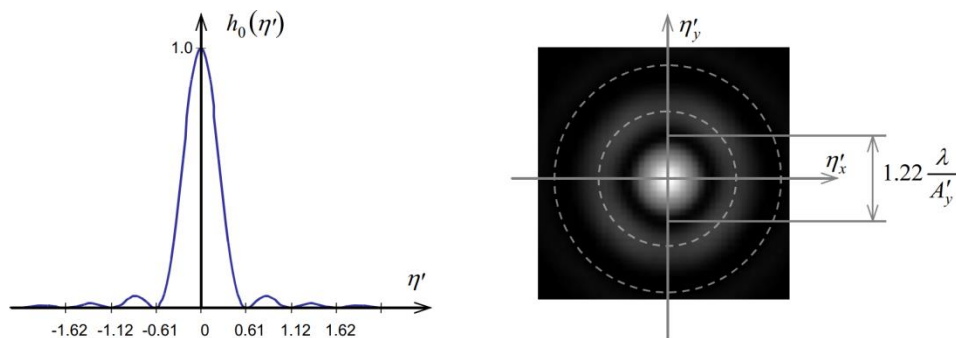


Hình 1.4. Mối quan hệ giữa hàm MTF và các hàm PSF, LSF, ESF
Các phương pháp đo được trình bày cụ thể như sau:

1.2.1. Hàm nhòe điểm

Theo quan điểm quang hình học lý tưởng, ảnh của một điểm sẽ là một điểm. Theo quan điểm nhiễu xạ, ảnh của một điểm sẽ là một vết nhòe. Vết nhòe được gọi là hàm nhòe điểm. Hàm nhòe điểm, $h(x', y')$, mô tả sự phân bố cường độ trong mặt phẳng ảnh cho một điểm ảnh trong không gian vật. Hàm nhòe điểm phụ thuộc vào hàm đồng tử [5, 10]. Hàm nhòe điểm trong hệ tọa độ quy đổi được tính theo công thức:

$$h(\eta'_x, \eta'_y) = |F^{-1}[f(\rho'_x, \rho'_y)]|^2 \quad \text{với } f(\rho'_x, \rho'_y) \text{ là hàm đồng tử.}$$



a) Mặt cắt

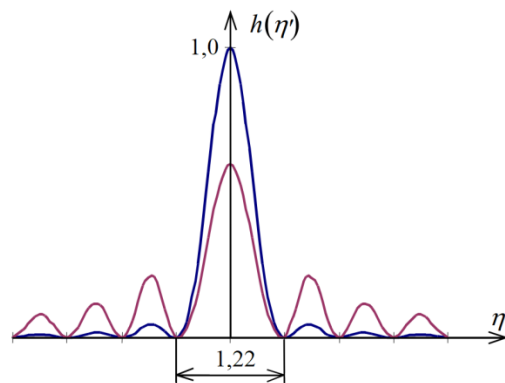
b) Dạng chung của phân bố cường độ sáng

Hình 1.5. Hàm nhòe điểm khi không có quang sai

Khi HTQH không có quang sai: Đồ thị của hàm nhòe điểm (Hình 1.5) bao gồm cực đại trung tâm có đường kính 1,22 đơn vị quy đổi và các cực đại bên với bước xấp xỉ 0,5 đơn vị quy đổi. Hàm nhòe điểm khi đó đối xứng so với trục quang. Cực đại trung tâm chiếm 83,8% toàn bộ năng lượng, vòng thứ nhất chiếm 7,2%, vòng thứ 2 chiếm 2,8%, vòng thứ 3 chiếm 1,4%, vòng bốn chiếm 0,9%.

Cực đại trung tâm của hàm PSF được gọi là đĩa Airy, đường kính của đĩa trên mặt phẳng ảnh theo tọa độ thực là: $D = \frac{1,22\lambda}{A'_0}$, trong đó A'_0 là khẩu độ của chùm tia trên trục. Trong trường hợp tổng quát, đĩa Airy có thể không phải là hình tròn nếu A'_y và A'_x không bằng nhau.

Khi HTQH có quang sai: Ảnh hưởng của các quang sai lên hàm nhòe điểm được thể hiện ở chỗ phân bố cường độ sẽ bị thay đổi. Hình 1.6 mô tả phân bố cường độ khi có quang sai mặt sóng mà ở đó một phần năng lượng từ cực đại trung tâm sẽ chuyển sang các vòng xung quanh. Kết quả là năng lượng tại cực đại trung tâm chỉ còn 60-70% thay vì 84%, ngoài ra kích thước của cực đại trung tâm được bảo toàn, còn cường độ thì giảm.



Hình 1.6. Ảnh hưởng của quang sai đối với hàm nhòe điểm

Như vậy, hàm nhòe điểm cho ta biết HTQH tạo ảnh của một điểm ở không gian vật như thế nào. Nếu biết hàm nhòe điểm ta có thể tìm được ảnh của bất kỳ vật nào qua HTQH.

Xét một vật có quy luật phân bố năng lượng $I(x,y) = a.\cos(2\pi\frac{x-b}{T})$, hệ thống thiết bị quan sát ảnh nhiệt có hàm nhòe điểm là $h(x',y')$, ta đi tìm quy luật phân bố cường độ năng lượng của ảnh I' .

Ta có tín hiệu thu được xác định như sau [11, 12]:

$$I'(x',y') = I(x,y)*h(x',y') = \iint_{-\infty}^{+\infty} I(x,y)h(x' - Vx, y' - Vy)dx dy \quad (1.1)$$

Trong đó: V là độ phóng đại của hệ thống.

Biểu diễn quy luật biến đổi của phân bố năng lượng của vật theo tọa độ phức, tín hiệu lúc này ký hiệu là $\tilde{I}(x)$:

$$\begin{aligned} \tilde{I}(x,y) &= a.\cos(2\pi\frac{x-b}{T}) + i.[a.\sin(2\pi\frac{x-b}{T})] \\ &= a.\cos[2\pi v(x-b)] + i.[a.\sin 2\pi v(x-b)] \end{aligned} \quad (1.2)$$

Trong đó $v = \frac{1}{T}$ là tần số không gian của vật, từ đó ta có:

$$\tilde{I}(x,y) = a.e^{2i\pi v(x-b)} = a.e^{-i2\pi vb}.e^{2i\pi vx} = u.e^{2i\pi vx} \quad (1.3)$$

Trong đó u là hệ số phức.

Như vậy phân bố năng lượng của ảnh thu được như sau :

$$\tilde{I}'(x',y') = \iint_{-\infty}^{+\infty} u.e^{i2\pi vx}h(x' - Vx, y' - Vy)dxdy \quad (1.4)$$

Để đơn giản, ta cho $V = 1$. Vậy ta có :

$$\tilde{I}'(x',y') = \iint_{-\infty}^{+\infty} u.e^{i2\pi vx}h(x' - x, y' - y)dx dy$$

$$\text{Đặt } \begin{cases} x' - x = X \\ y' - y = Y \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} dx = -dX \\ dy = -dY \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \tilde{I}'(x',y') &= \iint_{-\infty}^{+\infty} u.e^{i2\pi v(x'-X)}h(X,Y)dX dY \\ &= \iint_{-\infty}^{+\infty} u.e^{i2\pi vx'}.e^{-i2\pi vX}h(X,Y)dXdY \\ &= \iint_{-\infty}^{+\infty} u.e^{i2\pi vx'}.e^{-i2\pi vX}h(X,Y)dXdY \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= u \cdot e^{i2\pi vx'} \cdot \iint_{-\infty}^{+\infty} e^{-i2\pi vx} h(x, y) dx dy \\
&= u \cdot e^{i2\pi vx'} \cdot OTF(v) = u' \cdot e^{i2\pi vx'} \quad (1.5)
\end{aligned}$$

Như vậy, $u' = u \cdot OTF(v)$ với $OTF(v)$ là hàm truyền quang học của hệ thống. Ta thấy rằng, độ lớn của tín hiệu thu được bị thay đổi do hệ thống tạo ảnh, mà đặc trưng của nó là $OTF(v) = \iint_{-\infty}^{+\infty} e^{-i2\pi vx} h(x, y) dx dy$, đây chính là biến đổi Fourier của hàm nhòe điểm.

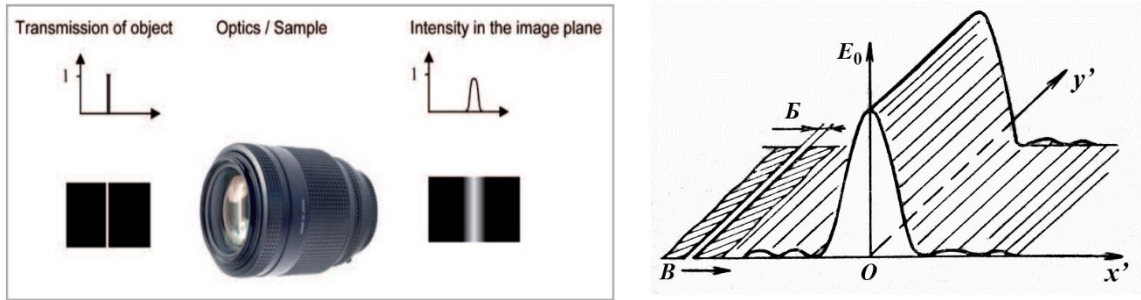
Như vậy, sự truyền cấu trúc từ vật sang ảnh được mô tả bởi hàm nhòe điểm hoặc hàm truyền quang học, các hàm này liên hệ với nhau thông qua biến đổi Fourier và nếu xác định được hàm nhòe điểm thì ta hoàn toàn có thể đánh giá được chất lượng của một HTQH.

Về mặt lý thuyết, phương pháp đo hàm PSF là lý tưởng nhất vì hàm PSF mang gần như toàn bộ thông tin về HTQH. Tuy nhiên, việc đo hàm PSF rất khó để thực hiện nên người ta ít dùng phương pháp này trong các thiết bị đánh giá chất lượng ảnh. Lý do là khi đo hàm PSF ta phải dùng vật mẫu là một điểm, nghĩa là người ta dùng nguồn bức xạ chiếu qua một lỗ nhỏ cỡ μm , do vậy năng lượng bức xạ bị suy giảm rất nhiều khi qua HTQH. Từ đó, yêu cầu đối với đầu thu phải có chất lượng rất cao, rất đắt tiền. Thêm vào đó, các phép đo PSF bị giới hạn bởi tần số lấy mẫu Nyquist, tuy nhiên có thể xử lý bằng cách lấy trung bình nhiều mẫu để khắc phục vấn đề này [13,14,15]. Hơn nữa, ảnh hưởng nhiều của các đầu thu ảnh và hệ thống điện tử khi đo hàm PSF khó xử lý hơn so với các đặc tính truyền khác của hệ thống [16].

1.2.2. Hàm nhòe đường

Thực chất, hàm nhòe đường LSF chính là tích phân của hàm nhòe điểm theo một phương, chúng được biểu diễn như sau:

$$A_l(x') = \int_{-\infty}^{\infty} h(x', y' - y) dy \quad (1.6)$$



Hình 1.7. Hàm nhòe đường LSF

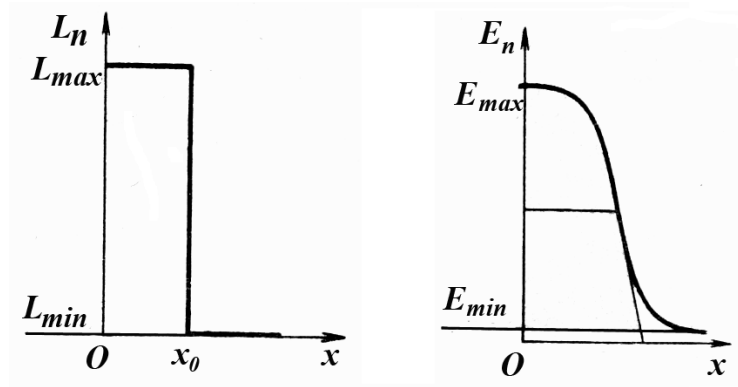
Trong phương pháp đo này, vật mẫu là một đường thẳng sáng, nó là tập hợp của vô số điểm sáng nên về mặt năng lượng sẽ tốt hơn rất nhiều so với phương pháp đo hàm nhòe điểm. Đã có nhiều nghiên cứu về phương pháp đo hàm LSF [17-21], tuy nhiên, cần lưu ý rằng tồn tại sai số trong quá trình đo hàm LSF khoảng 3-4% trong vùng tần số cao [22], sai số xuất hiện bởi hệ thống đo và sự sai khác về pha của hàm LSF. Vì vậy, phương pháp trung bình nhiều bức ảnh [23, 24] được dùng để giảm sai số hệ thống, và hiệu chỉnh pha để giảm sự sai khác pha của hàm LSF [25].

Hình 1.7 chỉ ra phân bố năng lượng của một mĩa qua một HTQH, phân bố dạng nhọn ở đỉnh và hai bên bị nhòe dần đi do suy giảm tín hiệu. Bên cạnh đó, hàm LSF chỉ đánh giá chất lượng ảnh theo được một phương. Đây là phương pháp được sử dụng khá phổ biến để đánh giá chất lượng ảnh của hệ thống quang học làm việc trong vùng phổ nhìn thấy và hồng ngoại [61, 62].

1.2.3. Hàm nhòe cạnh

Hàm nhòe cạnh có quy luật biểu diễn như sau:

$$L(x) = \begin{cases} L_{\max} = 1, & \text{khi } x \leq x_0 \\ L_{\min} = 0, & \text{khi } x \geq x_0 \end{cases} \quad E_n = \int_0^{\infty} A_l(x' - x) dx \quad (1.7)$$



Hình 1.8. Phân bố cường độ sáng trên vật và ảnh

Theo mối quan hệ toán học đã trình bày ở trên, thực chất của phương pháp đo hàm nhòe cạnh ESF là cuối cùng cũng đưa về xác định hàm LSF (vi phân hàm ESF), do vậy nó phải qua một bước trung gian, sai số tính toán sẽ tăng lên, độ chính xác sẽ giảm đi. Tuy nhiên, do việc tạo ra vật mẫu này tương đối đơn giản (mĩa nửa sáng, nửa tối - Hình 1.9) nên người ta vẫn dùng phương pháp này trong một số thiết bị, đặc biệt là thiết bị đánh giá chất lượng ảnh của hệ thống ảnh nhiệt [26, 59].



Hình 1.9. Mĩa dạng cạnh

Bên cạnh đó, còn có phương pháp đo hàm nhòe cạnh nghiêng với vật mẫu ban đầu dạng cạnh nhưng bị nghiêng đi một góc nhất định [27]. Phương pháp này là một phương pháp khá hiệu quả, quá trình thực hiện đơn giản, đã được nêu trong tiêu chuẩn ISO 12233 [28]. Tuy nhiên, vẫn tồn tại một số nhược điểm: Thứ nhất, khó thu chính xác ảnh của vật mẫu dưới ảnh hưởng của nhiễu [29]. Thứ hai, việc làm khớp hàm ESF dựa trên cơ sở các hàm xấp xỉ dựa trên thực tế hình dạng của chúng gần tương tự như hình dạng ESF (hàm Bentzen

[30], hàm Gaussian và hàm mũ được đề xuất bởi Yin, và hàm Femi được đề xuất bởi Tzannes [31]). Do vậy, sẽ có sai số trong quá trình làm khớp hàm ESF, độ chính xác của phép đo sẽ bị ảnh hưởng.

1.2.4. Hàm truyền điều biến MTF

Hàm MTF là một tiêu chuẩn dùng để đánh giá khả năng của hệ thống có thể truyền được tín hiệu chất lượng hay không chất lượng. Nghĩa là độ tương phản của ảnh so với độ tương phản của vật bị giảm đi bao nhiêu. Chính sự suy giảm độ tương phản của ảnh thu được là nguyên nhân của sự giảm độ phân giải của hệ thống. Về thực tế, mỗi một hệ thống khi tín hiệu đi qua chúng đều bị biến đổi theo quy luật nào đó, làm cho tín hiệu thu được không hoàn toàn như tín hiệu đi vào, quy luật biến đổi đó được gọi là hàm truyền của hệ thống. Hơn nữa, khi tín hiệu thu được bị thay đổi làm cho độ tương phản giảm. Do vậy, việc đánh giá độ phân giải của hệ thống chúng ta chỉ cần quan tâm tới sự thay đổi của độ lớn. Và MTF chính là một tiêu chuẩn đánh giá về sự thay đổi về độ lớn của tín hiệu truyền qua hệ thống hay MTF là cơ sở để đánh giá chất lượng của một HTQH [7].

Trong hầu hết các hệ thống ảnh hưởng của hàm truyền pha PTF không đáng kể, vì vậy ta luôn giả thiết rằng OTF bằng MTF. Như vậy, hàm truyền điều biến MTF bằng biến đổi Fourier của hàm nhòe điểm (theo hai phương) hoặc hàm nhòe đường (theo một phương). Một hệ thống quang học hoàn hảo sẽ có MTF bằng 1 cho tất cả các tần số và PTF bằng 0 tại tất cả các tần số không gian. Trong hệ thống ảnh thực tế, MTF luôn luôn giảm tới 0 tại tần số không gian nào đó. Dạng của MTF cho thông tin chính xác về khả năng của hệ thống tạo ảnh để tạo ra ảnh sắc nét. Tuy nhiên, việc đo trực tiếp được hàm truyền của hệ thống là điều không thể, do vậy hàm MTF luôn được tính thông qua các hàm PSF, LSF, ESF như mối quan hệ ở hình 1.4.

*** Tình hình nghiên cứu trong nước về lĩnh vực đánh giá chất lượng ảnh của HTQH hồng ngoại:**

Liên quan đến lĩnh vực đánh giá chất lượng ảnh của HTQH ở trong nước cũng có công bố một phương pháp đánh giá- đó là phương pháp isophotometric. Phương pháp này được xây dựng nhằm mục đích mở rộng dải động của camera để thu được tín hiệu đầy đủ thông tin nhất, khi đó độ chính xác của phép đo sẽ tăng lên [1]. Tuy nhiên, phương pháp này được áp dụng với HTQH làm việc trong vùng phổ nhìn thấy.

Qua tìm hiểu, ở nước ta hiện nay vẫn chưa có công trình nghiên cứu nào về đánh giá chất lượng ảnh của HTQH làm việc trong vùng phổ hồng ngoại, nghiên cứu của luận án này là nghiên cứu đầu tiên ở trong nước.

Trên cơ sở lý thuyết của những phương pháp đánh giá chất lượng ảnh của HTQH ảnh nhiệt, đã có một số hãng trên thế giới thiết kế, chế tạo thành công các thiết bị có khả năng đánh giá chất lượng của HTQH hồng ngoại có độ chính xác cao, chủ yếu tập trung ở những hãng lớn, có công nghệ chế tạo hiện đại.

Để lựa chọn một phương pháp phù hợp để xây dựng mô hình thiết bị, tiếp theo luận án sẽ tiến hành nghiên cứu, tìm hiểu một số thiết bị đánh giá chất lượng ảnh của HTQH ảnh nhiệt hiện nay.

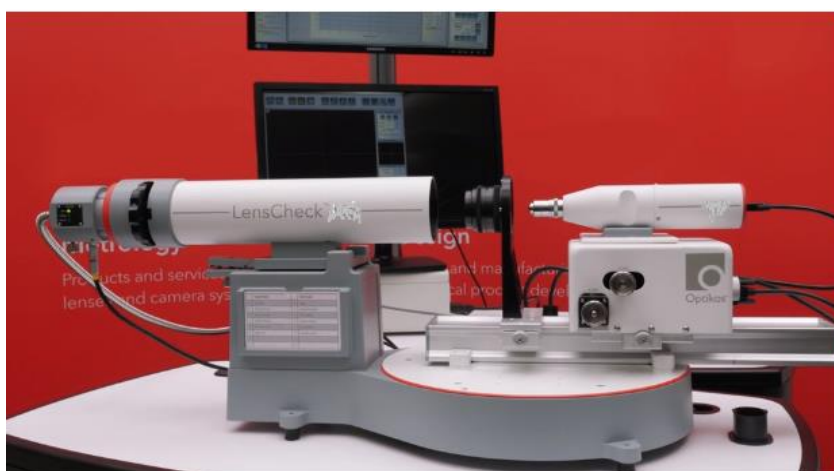
1.3. Một số thiết bị đánh giá chất lượng ảnh của HTQH làm việc trong vùng hồng ngoại 8 -12 μm .

1.3.1. Thiết bị *LensCheck LWIR*

LensCheck™ *LWIR* là một thiết bị đo HTQH ảnh nhiệt vùng phổ 8-12 μm của hãng Optikos với hơn 30 năm kinh nghiệm trong việc sản xuất và phát triển các sản phẩm đo lường quang học [61].

Cấu trúc cơ bản của thiết bị đo bao gồm: Nguồn sáng; ống chuẩn trực; ống quan sát và camera; máy tính và phần mềm (Hình 1.10). Trong đó ống chuẩn trực là một trong những thành phần quan trọng nhất của thiết bị. Ống

chuẩn trực được làm theo sơ đồ ống chuẩn trực khúc xạ và dùng vật kính thấu kính. Đây là một sơ đồ cơ bản của các hệ thống chuẩn trực, ưu điểm của sơ đồ này là dễ gá lắp và hiệu chỉnh. Tuy nhiên nó thường được sử dụng nhiều trong các thiết bị làm việc với ánh sáng nhìn thấy do hạn chế về vật liệu.



Hình 1.10. Thiết bị đo ống kính ảnh nhiệt LensCheck LWIR

LensCheck TM LWIR là một thiết bị đo đa năng có thể sử dụng để thực hiện các phép đo khác nhau như: MTF, tiêu cự, cong trường... với độ chính xác cao. Thiết bị dùng phương pháp đo hàm LSF để xác định hàm MTF. Đặc biệt thiết bị được tích hợp công nghệ video MTF đã được cấp bằng sáng chế để đo MTF trong thời gian thực.

Giới hạn đo của thiết bị được quyết định chủ yếu bởi ống chuẩn trực, do hạn chế về mặt vật liệu làm vật kính chuẩn trực nên các ống chuẩn trực theo sơ đồ ống chuẩn trực khúc xạ làm việc trong dải hồng ngoại thường có khẩu độ nhỏ.

1.3.2. Thiết bị ORI

Thiết bị ORI được sản xuất bởi công ty Inframet – Ba Lan [59]. Thiết bị này cho phép đo các thông số quan trọng như: Hàm MTF, độ phân giải, tiêu cự, méo ảnh, cong trường, quang sai... của các HTQH hoạt động trong tất cả các dải phổ điện hình: VIS, NIR, SWIR, MWIR và LWIR.



Hình 1.11. Sơ đồ đánh giá chất lượng ảnh của HTQH bằng thiết bị ORI

Thiết bị được đặt trên một bàn quang học (Hình 1.11), mìa gắn cố định vào một tấm phẳng, được đặt tại mặt phẳng tiêu diện của ống chuẩn trực và được chiếu bởi nguồn bức xạ nhiệt phát ra từ vật đen tuyệt đối. HTQH ảnh nhiệt cần kiểm tra được đặt tại đầu ra của ống chuẩn trực.

Thiết bị ORI dùng phương pháp đo hàm nhòe cạnh ESF để đánh giá chất lượng ảnh của HTQH ảnh nhiệt. Các thành phần của thiết bị đòi hỏi yêu cầu cao về độ chính xác cao, độ nhạy... Vì vậy, từ việc thiết kế, chế tạo đến gia công đòi hỏi công nghệ cao nên thiết bị có giá thành rất đắt.

Một trong những thành phần quan trọng của thiết bị là ống chuẩn trực, chúng có tác dụng tạo ra chùm tia song song trước khi vào HTQH cần kiểm tra. Yêu cầu đối với quang sai mặt sóng nhỏ hơn $\lambda/10$. Trong thiết bị ORI, ống chuẩn trực được chế tạo gồm hai gương phản xạ: Một gương parabol và một gương phẳng. Người ta lựa chọn ống chuẩn trực dạng phản xạ để chế tạo vì chi phí chế tạo ống kính chuẩn trực khúc xạ hồng ngoại kích thước lớn rất cao; ống chuẩn trực phản xạ không có sắc sai và dải phổ làm việc rộng.

1.3.3. Thiết bị *ImageMaster Universal*

Thiết bị ImageMaster Universal được sản xuất bởi công ty Trioptics của Đức [62]. Thiết bị dùng phương pháp đo hàm nhòe đường LSF để đo hàm MTF của HTQH trong toàn bộ dải quang phổ UV-VIS-NIR-SWIR-MWIR-LWIR với độ chính xác và linh hoạt cao. Thiết bị có dạng mô-đun và có thể nâng cấp để cho phép cấu hình tùy chỉnh khi các yêu cầu thử nghiệm thay đổi (Hình 1.12).



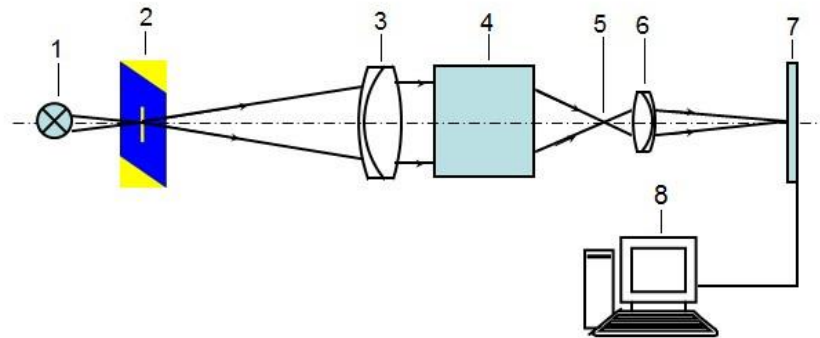
Hình 1.12. Thiết bị ImageMaster Universal

Kết cấu của thiết bị được gắn theo chiều ngang tạo điều kiện thuận lợi cho việc thử nghiệm các ống kính lớn, mang lại độ chính xác cao và độ ổn định tối đa. Cấu hình và nguyên lý hoạt động của thiết bị cơ bản giống thiết bị ORI của hãng Inframet.

1.4. Lựa chọn phương án xây dựng mô hình thiết bị đánh giá chất lượng ảnh của HTQH ảnh nhiệt.

Như vậy, căn cứ vào nghiên cứu về ưu, nhược điểm từng phương pháp đến các thiết bị đã được thương mại hóa trong lĩnh vực đánh giá chất lượng ảnh của HTQH ảnh nhiệt cùng với khả năng thực hiện trong điều kiện ở trong nước, luận án quyết định lựa chọn phương án xây dựng mô hình thiết bị đánh giá chất lượng tạo ảnh của HTQH ảnh nhiệt như sau:

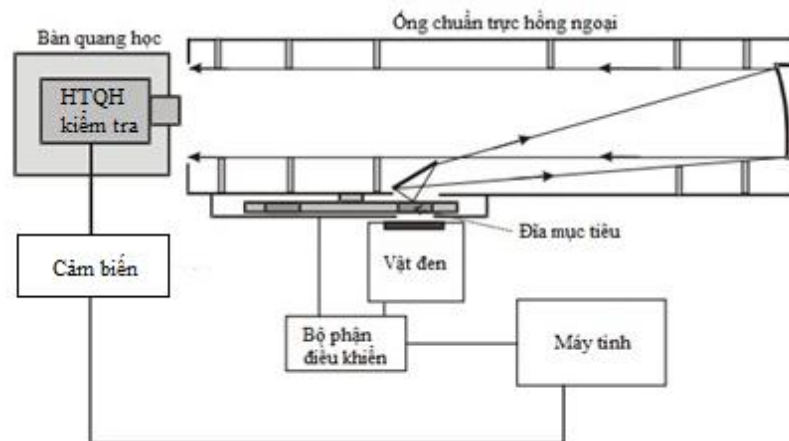
- Về phương pháp: Luận án chọn phương pháp đo hàm nhòe đường LSF để đánh giá chất lượng tạo ảnh của HTQH ảnh nhiệt. Sơ đồ nguyên lý hoạt động được thể hiện ở hình 1.13. Vật mẫu (2) là một khe hẹp được chiếu bởi nguồn bức xạ (1) và ảnh của nó được đưa ra vô cùng xa nhờ hệ chuẩn trực (3). Sau khi qua HTQH cần kiểm tra (4), ảnh này sẽ nằm tại vị trí (5) và được phóng đại nhờ vật kính hiển vi (6). Ảnh này thực chất chính là phân bố cường độ sáng trên cảm biến (7) của camera. Từ đó, camera ghi lại ảnh vết bức xạ cần đo thông qua các mức năng lượng của các điểm ảnh trên cảm biến. Sau đó, máy tính tiến hành tính các hàm LSF, MTF để đánh giá chất lượng tạo ảnh của hệ thống.



Hình 1.13. Sơ đồ nguyên lý đo hàm nhòe đường LSF

1. Nguồn bức xạ, 2. Khe hẹp, 3. Vật kính chuẩn trực, 4. Vật kính cần kiểm tra, 5. Mặt phẳng ảnh của vật kính kiểm tra, 6. Vật kính hiển vi, 7. Cảm biến, 8. Máy tính.

- Về mô hình thiết bị: Luận án lựa chọn mô hình dùng hệ chuẩn trực phản xạ vì ưu điểm rất lớn của hệ này đó là dải phổ làm việc rộng, không có sắc sai, giá thành hợp lý và phù hợp với điều kiện công nghệ ở Việt Nam. Bên cạnh đó, cũng cần phải thiết kế, chế tạo một vật kính hiển vi phóng đại để phóng đại ảnh sau khi qua HTQH lên cảm biến để thu nhận đầy đủ thông tin của ảnh.



Hình 1.14. Mô hình thiết bị của hệ thống kiểm tra HTQH hồng ngoại.

Sơ đồ mô hình thiết bị của hệ thống kiểm tra HTQH hồng ngoại được thể hiện tại hình 1.14. Hệ thống này có nhiệm vụ tạo ra ảnh của một số mục tiêu có hình dạng, kích thước đã biết. HTQH được kiểm tra tạo ra các bản sao có sự

sai khác về hình dạng so với ảnh của mục tiêu ban đầu. Các ảnh này sau khi thu nhận sẽ được phân tích, đánh giá để xác định các đặc tính quan trọng HTQH được kiểm tra.

Cách bố trí vị trí các thành phần được thể hiện tại sơ đồ hình 1.14: Vật đen tuyệt đối chiếu bức xạ vào mục tiêu được đặt ở đầu vào của ống chuẩn trực (mặt phẳng tiêu diện) và gắn cố định trên bánh xe. Bằng cách xoay bánh xe thông qua bộ phận điều khiển, có thể thay đổi mục tiêu nhanh chóng. HTQH cần kiểm tra được đặt ở đầu ra của ống chuẩn trực hồng ngoại.

Thiết bị kiểm tra có cấu hình như trên có thể được coi là các hệ thống cổ điển để kiểm tra HTQH, chúng hầu hết được sử dụng trong điều kiện phòng thí nghiệm với đặc điểm là độ ổn định và chính xác cao. Bất kỳ HTQH nào cũng có thể lấy nét ở khoảng cách vô cực được tạo ra bởi ống chuẩn trực. Do đó, tất cả các loại HTQH đều có thể được kiểm tra bằng cách sử dụng các hệ thống kiểm tra này.

Bên cạnh đó, một thiết bị đo luôn đòi hỏi phải có chất lượng rất cao vì chúng quyết định độ chính xác của phép đo. Và để chúng có chất lượng tốt thì các thành phần trong hệ thống phải thỏa mãn các yêu cầu nhất định.

Vì vậy, để xây dựng mô hình thiết bị đánh giá chất lượng ảnh thì luận án cần nắm chắc các yêu cầu kỹ thuật đối với từng thành phần trong hệ thống để xây dựng thiết bị có độ chính xác cao, đáp ứng được yêu cầu đo kiểm HTQH ảnh nhiệt.

1.5. Yêu cầu đối với các thành phần trong hệ thống đánh giá chất lượng ảnh của HTQH hồng ngoại.

Các thành phần và yêu cầu đối với thiết bị kiểm tra HTQH ảnh nhiệt được công bố trong các tiêu chuẩn quốc tế [32-35]. Tuy nhiên, giá trị thực của thông tin này khá hạn chế, thiếu nhiều chi tiết quan trọng. Thông tin hữu ích hơn có thể được tìm thấy trong một số nguồn tài liệu chuyên ngành như tài liệu

[36, 37]. Thông tin có giá trị nhất về thiết bị đo kiểm có thể nhận được từ việc phân tích các hệ thống thực tế do các nhà sản xuất cung cấp [57-62]. Tuy nhiên, không có sự khác biệt cơ bản trong các thiết bị từ các nhà sản xuất khác nhau, chỉ khác những chi tiết kỹ thuật nhỏ. Tất cả các hệ thống đo kiểm hoạt động tốt, độc lập với nhà sản xuất, phải tạo ra các kết quả đo giống nhau. Do đó, thông tin về thiết bị đo kiểm HTQH được trình bày trong chương này có giá trị chung cho tất cả các hệ thống đo kiểm hiện có trên thị trường quốc tế.

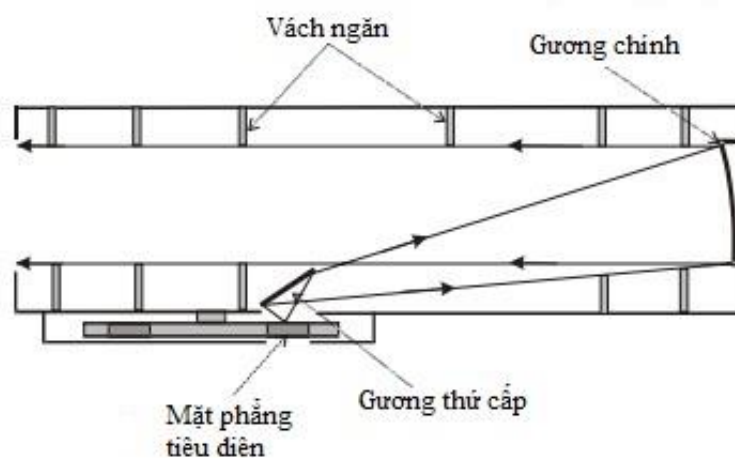
Công dụng và yêu cầu kỹ thuật đối với các thành phần của hệ thống cụ thể như sau:

1.5.1. Hệ chuẩn trực

Hệ chuẩn trực là thành phần rất quan trọng của hệ thống kiểm tra, đánh giá HTQH ảnh hưởng với chức năng tạo ra chùm chia có độ song song cao.

a) Cấu trúc hệ chuẩn trực

Thông thường hệ chuẩn trực sử dụng hệ thống hai gương phản xạ được chế tạo bằng cách sử dụng một gương chính lệch trục và một gương phẳng thứ cấp có kích thước nhỏ hơn để đổi hướng chùm tia. Các hệ chuẩn trực phản xạ như hình 1.15 chiếm ưu thế trên thị trường bởi giá thành thấp, không tồn tại quang sai đa sắc và có dải phổ hoạt động rộng.



Hình 1.15. Sơ đồ hoạt động của hệ chuẩn trực

b) Yêu cầu

A. Độ phân giải:

Nhiệm vụ của hệ chuẩn trực là tạo ra một hình ảnh nhiệt gần giống với sự phân bố nhiệt độ của mục tiêu nằm ở mặt phẳng tiêu điểm của ống chuẩn trực. Một ống chuẩn trực lý tưởng sẽ có khả năng tạo ra một ảnh bức xạ giống như sự phân bố nhiệt độ thực của mục tiêu. Tuy nhiên, chất lượng như vậy là không thể đạt được. Ống chuẩn trực có chất lượng quá thấp có thể trở thành nguồn gây ra sai số đo lường đáng kể; ống chuẩn trực chất lượng quá cao có thể làm tăng chi phí của hệ thống kiểm tra một cách không cần thiết. Do vậy, độ phân giải không gian của ống chuẩn trực phải tốt hơn nhiều lần so độ phân giải không gian của HTQH cần kiểm tra.

Bên cạnh đó, một số yếu tố khác cũng phải thỏa mãn để đảm bảo chất lượng của ống chuẩn trực đó là:

Thứ nhất, độ chính xác gia công bề mặt của quá trình chế tạo gương chính nhỏ hơn $\lambda/10$ [37, 38]. Quang sai của ống chuẩn trực phải nhỏ hơn đáng kể so với quang sai của hệ thống được thử nghiệm. Người ta đề xuất rằng điều kiện này thường được đáp ứng khi tiêu cự của ống chuẩn trực lớn hơn ít nhất gấp năm lần tiêu cự của HQTH cần kiểm tra.

Tuy nhiên, bề mặt gương được gia công tốt không có nghĩa là hệ chuẩn trực tạo ra ảnh hoàn hảo. Cần có sự căn chỉnh chính xác giữa hai gương chuẩn trực này để đạt được hiệu suất hoạt động tối đa.

B. Khẩu độ / Độ dài tiêu cự:

Khẩu độ của ống chuẩn trực là đường kính của chùm tia cực đại có thể được tạo ra bởi hệ chuẩn trực khi sử dụng nguồn điểm. Điều kiện là khẩu độ của ống chuẩn trực phải lớn hơn ít nhất 10% so với khẩu độ của hệ quang ảnh nhiệt cần kiểm tra.

Khẩu độ của các HTQH hiện đại rất khác nhau: Từ các vật kính có đường kính 10-30 mm thường được sử dụng trong các camera ảnh nhiệt thương mại cho đến các vật kính có đường kính 200-250 mm được sử dụng trong một số camera ảnh nhiệt quan sát tầm xa. Do đó, chỉ những ống chuẩn trực lớn có khẩu độ khoảng 300 mm mới có thể được sử dụng để kiểm tra tất cả các HTQH ảnh nhiệt hiện có trên thị trường. Tuy nhiên, ống chuẩn trực lớn hơn cũng có nghĩa là dụng cụ đắt tiền hơn, cồng kềnh hơn. Đồng thời, chúng ta cần chú ý rằng HTQH ảnh nhiệt có khẩu độ trên 130 mm là rất hiếm (không quá 1% thị trường). Do đó, các ống chuẩn trực có khẩu độ khoảng 100-200 mm là một lựa chọn tối ưu. Các ống chuẩn trực như vậy cho phép kiểm tra hầu hết các HTQH ảnh nhiệt hiện có trên thị trường.

Khẩu độ tương đối (số F - tỷ lệ độ dài tiêu cự trên khẩu độ) của gương chuẩn trực được sử dụng trong hệ chuẩn trực thay đổi từ khoảng 5 (số F thấp) đến khoảng 12 (số F cao). Điều này có nghĩa là độ dài tiêu cự của các ống chuẩn trực có cùng khẩu độ nhưng khác số F sẽ khác nhau đáng kể. Ví dụ, trong trường hợp ống chuẩn trực khẩu độ 150 mm có số F thay đổi từ 5 đến 12, độ dài tiêu cự thay đổi từ 750 mm đến 1800 mm.

Có những ưu điểm và nhược điểm của cả hai loại chuẩn trực: Các hệ chuẩn trực số F thấp được đặc trưng bởi kích thước nhỏ cho phép giảm kích thước của hệ thống kiểm tra. Tuy nhiên, độ ổn định nhiệt của ống chuẩn trực số F thấp thấp hơn so với trường hợp ống chuẩn trực số F cao. Tiếp theo, độ chính xác của việc chế tạo gương thường tốt hơn trong trường hợp gương có số F cao. Tuy nhiên, nhược điểm quan trọng nhất của hệ chuẩn trực số F thấp là quang sai lớn đối với các điểm ngoài trục.

Tóm lại, nếu kích thước và khối lượng nhỏ là quan trọng thì nên ưu tiên các ống chuẩn trực số F thấp có tiêu cự ngắn. Nếu chất lượng ảnh được tạo bởi ống chuẩn trực trong toàn bộ trường nhìn là quan trọng thì nên dùng các ống

chuẩn trực số F cao có tiêu cự dài. Tuy nhiên, trong hầu hết các trường hợp khi yêu cầu về độ phân giải không gian không cao thì cả hai ống chuẩn trực số F thấp và ống chuẩn trực số F cao có thể tạo ảnh có chất lượng đủ lớn và kết quả thử nghiệm nhận được khi sử dụng cả hai loại ống chuẩn trực là như nhau.

C. Dải quang phổ:

Hệ chuẩn trực hồng ngoại khi chiếu bức xạ nhiệt phải nằm trong phạm vi dải phổ hoạt động của HTQH cần kiểm tra. Điều này có nghĩa là dải phổ của hệ chuẩn trực hồng ngoại phải bao phủ ít nhất ba dải phổ được sử dụng trong ảnh nhiệt: dải SWIR (1-3 μm), dải MWIR (3-5 μm) và dải LWIR (8-14 μm). Do đó, chúng ta có thể kết luận rằng để kiểm tra HTQH ảnh nhiệt, chúng ta cần các ống chuẩn trực có dải phổ bao phủ ít nhất vùng từ 1 μm đến 15 μm .

1.5.2. Vật đen tuyệt đối

Vật đen tuyệt đối là một vật thể lý tưởng hấp thụ hoàn toàn toàn bộ năng lượng bức xạ xung quanh nó và do đó, nó có màu đen hoàn hảo ở tất cả các bước sóng. Bức xạ do một vật thể như vậy phát ra khi bị đốt nóng được gọi là bức xạ nhiệt. Nhìn chung, có hai phương pháp để thiết kế các vật đen như sau:

Phương pháp đầu tiên là tạo một khoang trong một khối vật liệu có tính dẫn nhiệt cao (chủ yếu là hợp kim kim loại) và điều chỉnh nhiệt độ của khối này bằng cách sử dụng bộ phận làm nóng / làm mát. Khả năng phát xạ của các khoang đen thường trên 0,995 ngay cả khi độ phát xạ của các thành khoang thấp hơn nhiều (khoảng 0,5-0,8). Hầu hết các vật đen nhiệt độ trung bình hoặc cao đều được thiết kế bằng cách sử dụng khái niệm khoang. Các vật đen dạng khoang có sẵn trên thị trường điển hình có đặc điểm là khẩu độ phát xạ tương đối nhỏ, khẩu độ khoảng 1 inch và quán tính thời gian khá cao.

Phương pháp thứ hai là đặt một lớp vật liệu có độ phát xạ cao lên trên một phần tử kim loại phẳng có nhiệt độ được điều chỉnh. Một số loại sơn đen đặc biệt có độ phát xạ bằng 0,97 được phủ lên trên bộ phát xạ của vật đen. Có

thể sử dụng phương pháp thứ hai để đạt được các khẩu độ phát ra lớn hơn phương pháp thứ nhất. Các vật đen này cũng được đặc trưng bởi quán tính thời gian thấp hơn so do khối lượng nhỏ hơn. Tuy nhiên, do thiếu các lớp phủ có độ phát xạ cao nên nó chỉ có thể được sử dụng ở nhiệt độ thấp (không quá 400°C).

Diện tích phát xạ của vật đen được sử dụng trong hệ thống kiểm tra TBAN phải lớn hơn mục tiêu. Điều này tạo ra yêu cầu rằng diện tích phát xạ thường ít nhất phải bằng khoảng 50 mm. Tiếp theo, vật đen dùng cho hệ thống phải mô phỏng các vật thể có nhiệt độ khá thấp cho phù hợp điều kiện quan sát điện hình. Hơn nữa, cần có cả chênh lệch nhiệt độ dương và âm (giữa mục tiêu và vật đen) trong quá trình kiểm tra TBAN. Do những yêu cầu này, các vật đen nhiệt điện chiếm ưu thế trong số các vật đen được sử dụng trong các hệ thống kiểm tra TBAN. Vật đen nhiệt điện là vật đen sử dụng phân tử Peltier để kiểm soát nhiệt độ của phân tử phát ra. Phân tử Peltier là một linh kiện điện tử dựa trên chất bán dẫn có chức năng như một máy bơm nhiệt nhỏ. Bằng cách đặt nguồn điện một chiều điện áp thấp vào phân tử Peltier (thường được gọi là TEC) nhiệt sẽ được chuyển qua phân tử từ mặt này sang mặt khác. Một mặt của phân tử sẽ được làm mát trong khi mặt đối diện đồng thời được làm nóng. Do đó, một phân tử nhiệt điện có thể được sử dụng để sưởi ấm và làm mát bằng cách đảo ngược cực (thay đổi hướng của dòng điện được đặt vào). Khả năng này làm cho TEC rất phù hợp cho các ứng dụng điều khiển nhiệt độ chính xác và có độ tin cậy cao.

Có một vài ưu điểm quan trọng của các loại vật đen này khiến chúng trở thành lựa chọn lý tưởng để kiểm tra, đánh giá các HTQH hiện đại:

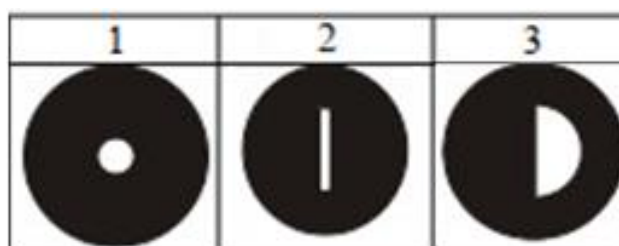
Đầu tiên, phạm vi nhiệt độ tiêu chuẩn của các vật thể đen từ khoảng -25°C đến $+75^{\circ}\text{C}$ trùng với phạm vi nhiệt độ cần thiết trong quá trình kiểm tra.

Thứ hai, bằng cách thiết kế có thể tạo ra các vật đen có độ phân giải nhiệt độ rất tốt (0,1 mK), độ ổn định (1 mK) và tính đồng nhất (10 mK).

Thứ ba, các vật đen này được đặc trưng bởi khối lượng nhỏ và quán tính thời gian thấp.

1.5.3. Mục tiêu

Các mục tiêu để kiểm tra, đánh giá HTQH ảnh nhiệt được sản xuất bằng cách tạo ra các mục tiêu dạng lỗ, khe hoặc bán nguyệt có kích thước rất nhỏ nhằm mục đích đo hàm nhòe điểm, nhòe đường hoặc nhòe cạnh của HTQH cần kiểm tra (Hình 1.16).



Hình 1.16. Hình dạng các loại mục tiêu hồng ngoại

1.5.4. Mô-đun thu nhận / phân tích hình ảnh; Máy tính; Bộ lấy khung hình; Phần mềm kiểm tra.

Mô-đun thu thập / phân tích hình ảnh được xây dựng từ các khối sau: PC, bộ lấy khung hình và phần mềm. Trên thực tế, nó là một PC chuyên dụng để thực hiện các nhiệm vụ cần thiết trong việc kiểm tra HTQH ảnh nhiệt. Mô-đun phải cho phép thu được tín hiệu đầu ra từ HTQH, phân tích các hình ảnh và xác định các đặc tính quan trọng của HTQH.

Máy tính cho phép xử lý dữ liệu đầu vào từ HTQH, đồng thời tính toán và xác định các đặc tính của HTQH. Trên thực tế, tất cả các PC hiện đại đều có thể xử lý các tác vụ như vậy.

Bộ lấy khung hình: Nhiệm vụ của bộ lấy khung hình (thẻ video) là chụp các chuỗi hình ảnh được tạo ra bởi HTQH được kiểm tra. Tiếp theo, điều quan trọng là không được có sự suy giảm đáng kể về chất lượng hình ảnh do bộ lấy khung hình gây ra. Mỗi thiết bị lấy khung hình phải cung cấp một trình điều khiển phần mềm thích hợp, trình điều khiển này phải chứa các quy trình tương

thích với một trong các API hiện có. Chức năng chính của mô-đun phần mềm thu nhận hình ảnh là lấy hình ảnh từ thiết bị dưới dạng các khung hình riêng biệt hoặc trong hầu hết các trường hợp ở dạng chuỗi video. Việc thu thập dữ liệu hình ảnh như vậy có thể được chuyển để xử lý và phân tích thêm.

Phần mềm kiểm tra được sử dụng trong hệ thống kiểm tra HTQH dùng để thu nhận các hình ảnh đầu ra do TBAN tạo ra và đo các thông số quan trọng của HTQH ảnh nhiệt.

Như vậy, các thành phần của hệ đo kiểm đã trình bày ở trên đều có vai trò, chức năng và yêu cầu riêng, chúng ảnh hưởng lớn đến chất lượng hoạt động của toàn hệ thống. Trong quá trình thiết kế, chế tạo cần chú ý các yêu cầu này để hệ thống có độ chính xác cao, đáp ứng yêu cầu đo kiểm.

Tuy nhiên, còn một yếu tố có ảnh hưởng lớn đến chất lượng hoạt động của một HTQH nhưng hiện nay trên thế giới và Việt Nam vẫn chưa có sự quan tâm nghiên cứu và phương pháp khoa học để tính toán sự ảnh hưởng của kết cấu gá lắp đến quang sai mặt sóng của các linh kiện quang học trong hệ thống. Như chúng ta đã biết, một HTQH thường được cấu thành từ các thành phần cơ bản như thấu kính, tấm phẳng, gương... và cơ cấu gá lắp chúng thành một hệ thống hoàn chỉnh. Để hệ thống hoạt động tốt, các linh kiện phải được gia công với độ chính xác cao, đồng thời các kết cấu cơ khí gá lắp phải đảm bảo không gây biến dạng đáng kể đến bề mặt làm việc của các linh kiện. Đây là yếu tố khó tính toán và đo lường trong khi nó ảnh hưởng đáng kể ngay cả khi lực gá kẹp nhỏ. Thực tế, khi bề mặt linh kiện bị biến dạng, các phần tử trên bề mặt chuyển vị với giá trị chỉ vài trăm nano mét cũng đã ảnh hưởng đến chất lượng hoạt động của toàn hệ thống. Vì vậy, việc tính toán ảnh hưởng của cơ cấu gá cơ khí đến quang sai mặt sóng của linh kiện là bài toán rất quan trọng, làm cơ sở cho tính toán, thiết kế cơ khí phù hợp đối với toàn hệ thống.

Để giải quyết vấn đề này, trên thế giới từ năm 1954, Schwesinger [39] đã có một số nghiên cứu ban đầu đối với gá lắp gương có kích thước lớn. Tiếp theo đó, A. J. Malvick [40] phân tích biến dạng đàn hồi của gương có đường kính 230 mm và 154 mm trong các sơ đồ gá lắp khác nhau. Tuy nhiên, đó chỉ là những nghiên cứu ban đầu, việc tính toán tương đối lớn, mất khá nhiều thời gian. Năm 1985, A. E. Hatheway [41] đã xây dựng một mô hình sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn để tính toán các biến dạng của gương cầu được gắn bởi một cấu trúc cụ thể. Xu Rongwei, Liu Liren, Luan Zhu, Liu Hongzhan [42] phân tích ảnh hưởng của lực gá lắp trong các phương án bố trí khác nhau đối với gương dùng trong giao thoa kế. Chia-Yen Chan, Zhen-Ting You, Ting-Ming Huang, Yi-Cheng Chen và Fong-Zhi Chen [43] phân tích và thử nghiệm để điều chỉnh biến dạng bề mặt gương trục chuẩn có kích thước 620 mm.

Tuy nhiên, đối với những nghiên cứu này hầu hết chỉ đưa ra kết quả tính toán mà chưa trình bày phương pháp tính toán cụ thể, đồng thời cũng chưa có kết quả thực nghiệm để đối chứng với tính toán lý thuyết.

Căn cứ vào những phân tích ở trên, để xây dựng được mô hình thiết bị đo kiểm hệ quang ảnh nhiệt có chất lượng tốt thì đòi hỏi luận án cần nghiên cứu, đề xuất một phương pháp tính toán ảnh hưởng của cơ cấu gá cơ khí đến quang sai mặt sóng của linh kiện làm cơ sở cho tính toán, thiết kế cơ khí phù hợp đối với toàn hệ thống, đây là nội dung rất quan trọng sẽ được trình bày cụ thể ở chương 2.

1.6. Kết luận

Như vậy, ở chương một của luận án đã nghiên cứu, tìm hiểu một số vấn đề về TBAN. Đồng thời, phân tích ưu, nhược điểm từng phương pháp đánh giá chất lượng ảnh của HTQH ảnh nhiệt, từ đó lựa chọn phương pháp đo hàm nhòe đường LSF để xây dựng mô hình thiết bị của mình.

Về mặt thiết bị, tác giả đã lựa chọn mô hình thiết bị dùng hệ chuẩn trục phản xạ làm phương án xây dựng mô hình. Bên cạnh đó, một số yêu cầu đối

với các thành phần của hệ thống đo kiểm ảnh nhiệt phục vụ cho việc thiết kế, chế tạo các thành phần cũng được nghiên cứu, tìm hiểu để nâng cao chất lượng của hệ thống.

Cuối cùng, tác giả đã chỉ ra một yếu tố ảnh hưởng đáng kể đến chất lượng tạo ảnh của HTQH nhưng chưa được quan tâm đúng mức và cũng chưa phương pháp tính toán khoa học nào được công bố cụ thể đó chính là ảnh hưởng của kết cấu gá lắp đến quang sai mặt sóng của một linh kiện quang học nói riêng và toàn hệ thống nói chung. Đây là nội dung quan trọng đòi hỏi luận án cần giải quyết để xây dựng mô hình thiết bị có chất lượng cao hơn.

Mục tiêu nghiên cứu của luận án là xây dựng mô hình thiết bị đánh giá chất lượng ảnh của HTQH làm việc trong vùng hồng ngoại 8-12 μm chứ chưa phải là một thiết bị thương mại hoàn chỉnh. Do vậy, trong luận án chưa đề cập đến nội dung nghiên cứu, chế tạo kết cấu gá lắp các thành phần với nhau như thiết bị thương mại. Nội dung nghiên cứu tiếp theo NCS tập trung thiết kế, chế tạo từng thành phần quan trọng của hệ thống như hệ chuẩn trực, vật kính hiển vi. Còn những thành phần khác như: vật đen tuyệt đối, cảm biến... có sẵn ở phòng thí nghiệm được NCS sử dụng để gá lắp vào thành mô hình thiết bị. Nếu muốn chế tạo thành thiết bị như các thiết bị Lencheck của Optikos và ORI của Inframet... thì cần nhiều thời gian nghiên cứu và tính ảnh hưởng phần kết cấu này đến chất lượng hoạt động của thiết bị – Đây cũng là hướng phát triển sau này của luận án.

Chương 2

PHƯƠNG PHÁP TÍNH ẢNH HƯỞNG CỦA KẾT CẤU GÁ LẮP ĐẾN QUANG SAI MẶT SÓNG CỦA LINH KIỆN QUANG HỌC

Chương này đề xuất một phương pháp tính ảnh hưởng của cơ cấu gá lắp cơ khí đến quang sai mặt sóng của một linh kiện quang học. Bằng cách sử dụng phương pháp phân tử hữu hạn tính chuyển vị của các điểm nút trên bề mặt của linh kiện, kết hợp với làm khớp biên dạng bề mặt linh kiện để tính các hệ số của đa thức Zernike Standard. Từ đó, xác định quang sai mặt sóng của linh kiện, làm cơ sở cho thiết kế, chế tạo hệ chuẩn trực trong hệ đo kiểm ảnh nhiệt.

2.1. Sự ảnh hưởng của kết cấu gá lắp đến quang sai mặt sóng của linh kiện quang học.

Chương 1 luận án đã đề cập sơ bộ đến lý do tại sao phải nghiên cứu ảnh hưởng của cơ cấu gá lắp các thành phần đến quang sai mặt sóng của chúng. Về mặt lý thuyết, quang sai mặt sóng phụ thuộc vào các yếu tố như quang sai, sai số gia công, biến dạng bề mặt do cơ cấu gá lắp các linh kiện gây ra, tất cả các yếu tố này đều có ảnh hưởng lớn đến chất lượng tạo ảnh của HTQH. Trong đó, quang sai có thể xác định được khi thiết kế hệ thống, sai số gia công cũng có thể đo được trực tiếp các linh kiện sau khi chế tạo. Yếu tố cuối cùng là biến dạng bề mặt hiện nay chưa có phương pháp để xác định. Đặc biệt, đối với những hệ thống có kích thước lớn và kết cấu khá công kênh như hệ chuẩn trực mà luận án đang tiến hành xây dựng, để đảm bảo chắc chắn khi hoạt động thì chúng cần một lực gá kẹp lớn. Nếu lực gá kẹp quá lớn có thể gây biến dạng bề mặt linh kiện ảnh hưởng đến quang sai mặt sóng của linh kiện nói riêng và chất lượng hoạt động của toàn hệ thống nói chung. Vì vậy, luận án cần giải quyết và đề xuất một phương pháp khoa học làm cơ sở cho tính toán, thiết kế các thành phần của toàn hệ thống.

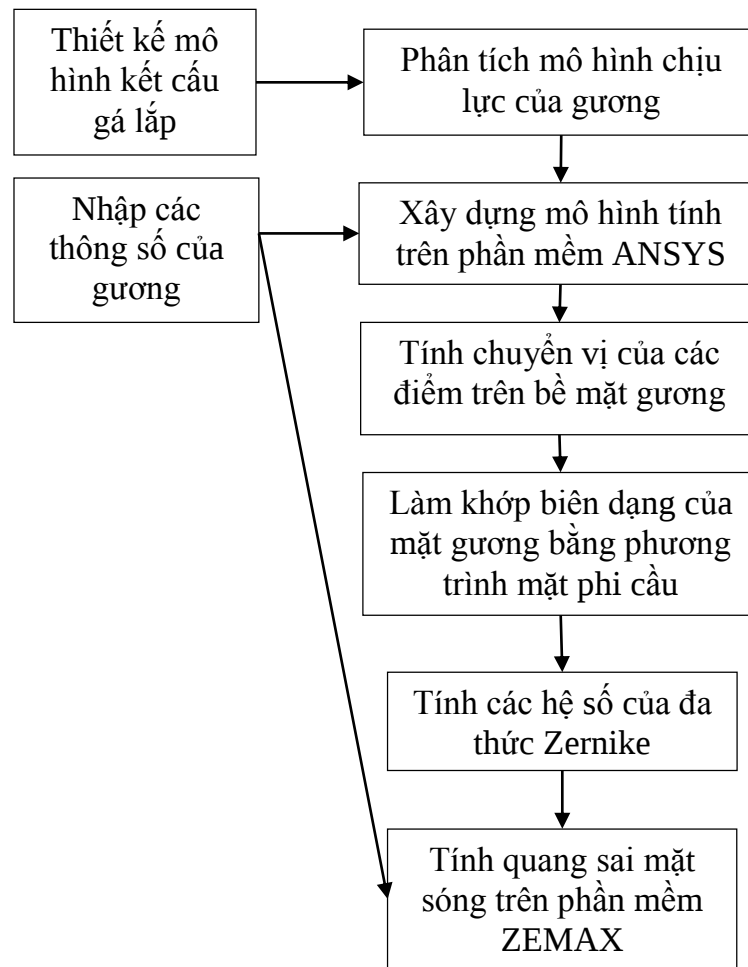
Ngoài ra, việc triển khai các thông số biến dạng vào phần mềm Zemax để tính quang sai mặt sóng vẫn chưa tài liệu hay công bố nào đề cập đến. Với phần mềm Zemax cho phép xác định quang sai mặt sóng không chỉ một thành phần mà còn cả hệ thống quang học chứa nhiều thành phần khi chúng chịu tác dụng bởi lực gá kẹp.

Ở đây, nghiên cứu sinh đề xuất một phương pháp tường minh để tính quang sai mặt sóng của nhiều thành phần quang học trong hệ thống như gương, thấu kính và tấm phẳng... dưới các lực kẹp khác nhau. Phương pháp này dựa trên sự kết hợp của phần mềm ANSYS, Delphi và Zemax. Để chứng minh tính chính xác của phương pháp này, luận án chọn một gương cầu làm linh kiện quang học điển hình để thực hiện, và phép đo thực nghiệm cho thấy sự nhất quán, tương đồng với tính toán lý thuyết. Trong thiết kế các hệ thống quang học đòi hỏi độ chính xác cao, đây là nội dung rất cần thiết để thiết kế các cơ cấu gá lắp phù hợp nhằm tối ưu hóa hiệu quả hoạt động của hệ thống.

2.2. Phương pháp xác định biên dạng bề mặt và quang sai mặt sóng của các linh kiện quang học sau khi biến dạng

2.2.1. Quy trình tính toán

Thuật toán của phương pháp được trình bày trong hình 2.1. Nhìn chung, có ba bước chính: Thứ nhất, sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (phần mềm ANSYS) để tính toán chuyển vị của các phần tử trên bề mặt của thành phần quang học khi nó chịu lực gá kẹp. Thứ hai, làm khớp bề mặt biến dạng với đa thức Zernike Standard để xác định các hệ số của đa thức Zernike Standard. Cuối cùng, xác định quang sai mặt sóng của linh kiện bằng phần mềm Zemax với các tham số đầu vào là hệ số của Zernike và các thông số của linh kiện quang học.



Hình 2.1. Quy trình tính quang sai mặt sóng của một linh kiện quang học.

2.2.2. Xác định biên dạng bề mặt

2.2.2.1. Khái niệm về phương pháp phân tử hữu hạn

Phương pháp phân tử hữu hạn là một phương pháp số đặc biệt có hiệu quả để tìm dạng gần đúng của một hàm chưa biết trong miền xác định V của nó [44]. Tuy nhiên, phương pháp này không tìm dạng xấp xỉ của hàm cần tìm trên toàn miền V mà chỉ trong từng miền con V_e (phần tử) thuộc miền xác định V . Do đó, phương pháp thích hợp với hàng loạt bài toán vật lý và kỹ thuật trong đó hàm cần tìm được xác định trên những miền phức tạp gồm nhiều vùng nhỏ có đặc tính hình học, vật lý khác nhau, chịu những điều kiện biên khác nhau.

Trong phương pháp phân tử hữu hạn, miền V được chia thành một số hữu hạn các miền con, gọi là phần tử. Các phần tử này được nối kết với nhau

tại các điểm định trước trên biên phần tử, gọi là nút. Trong phạm vi mỗi phần tử đại lượng cần tìm được xấp xỉ dưới dạng một hàm đơn giản được gọi là các hàm xấp xỉ (approximation function) hoặc các hàm dạng (shape functions). Các hàm xấp xỉ này được biểu diễn qua các giá trị của hàm tại các điểm nút trên phần tử. Các giá trị này được gọi là các bậc tự do của phần tử và là các ẩn số cần tìm của bài toán.

Với bài toán cơ học vật rắn biến dạng và cơ học kết cấu, tùy theo ý nghĩa vật lý của hàm xấp xỉ, có thể phân chia bài toán theo ba loại mô hình như sau:

- Trong mô hình tương thích, chuyển vị được coi là đại lượng cần tìm trước và hàm xấp xỉ biểu diễn gần đúng dạng phân bố của chuyển vị trong phần tử. Các ẩn số được xác định từ hệ phương trình thiết lập trên cơ sở nguyên lý thế năng toàn phần dừng, hay nguyên lý biến phân Lagrange.

- Theo mô hình cân bằng, hàm xấp xỉ biểu diễn gần đúng dạng phân bố của ứng suất hay nội lực trong phần tử. Các ẩn số được xác định từ hệ phương trình lập trên cơ sở nguyên lý năng lượng hệ toàn phần dừng hay nguyên lý biến phân về ứng suất (nguyên lý Castigliano).

- Theo mô hình hỗn hợp, coi các đại lượng chuyển vị và ứng suất là hai yếu tố độc lập. Các hàm xấp xỉ biểu diễn gần đúng dạng phân bố của cả chuyển vị lẫn ứng suất trong phần tử. Các ẩn số được xác định từ hệ phương trình thiết lập trên cơ sở nguyên lý biến phân Reissner.

Sau khi tìm được các ẩn số bằng việc giải một hệ phương trình đại số vừa nhận được thì tìm được các xấp xỉ biểu diễn đại lượng cần tìm trong tất cả các phần tử. Và từ đó cũng tìm được các đại lượng còn lại. Trong 3 mô hình trên, mô hình tương thích được sử dụng rộng rãi hơn cả.

2.2.2.2. *Trình tự phân tích bài toán theo phương pháp phần tử hữu hạn*

Bước 1: Rời rạc hóa miền khảo sát:

Trong bước này, miền khảo sát V được chia thành các miền con V_e hay thành các phần tử có dạng hình học thích hợp.

Với bài toán cụ thể số phần tử, hình dạng hình học của phần tử cũng như kích thước của các phần tử được xác định rõ. Số điểm nút của mỗi phần tử không được lấy một cách tùy tiện mà tùy thuộc vào hàm xấp xỉ lựa chọn.

Bước 2: Chọn hàm xấp xỉ thích hợp:

Vì đại lượng cần tìm là chưa biết, nên ta giả thuyết dạng xấp xỉ của nó sao cho đơn giản đối với tính toán bằng máy tính nhưng phải thỏa mãn các tiêu chuẩn hội tụ. Các hàm xấp xỉ này thường được chọn ở dạng đa thức. Sau đó, biểu diễn hàm xấp xỉ theo tập hợp giá trị và có thể theo các đạo hàm của nó tại các nút phần tử $\{q\}_e$.

Bước 3: Xây dựng phương trình phần tử (thiết lập các ma trận khối lượng $[m]_e$, ma trận cản $[c]_e$, ma trận độ cứng $[k]_e$ và véc tơ lực phần tử $\{f\}_e$):

Có thể thiết lập theo nhiều cách như sử dụng phương pháp năng lượng hoặc sử dụng nguyên lý biến phân... Kết quả nhận được có thể biểu diễn một cách hình thức như một phương trình phần tử:

$$[m]_e \cdot \{\ddot{q}\}_e + [c]_e \cdot \{\dot{q}\}_e + [k]_e \cdot \{q\}_e = \{f\}_e \quad (2.1)$$

Bước 4: Ghép nối các phần tử trên cơ sở mô hình tương thích nhận được hệ phương trình:

$$[M] \cdot \{\ddot{q}\} + [C] \cdot \{\dot{q}\} + [K] \cdot \{q\} = \{F\} \quad (2.2)$$

Trong đó:

$[M]$, $[C]$, $[K]$ là các ma trận khối lượng, ma trận cản và ma trận độ cứng tổng thể.

$\{\ddot{q}\}$, $\{\dot{q}\}$, $\{q\}$ là các véc tơ chuyển vị nút tổng thể, đạo hàm bậc nhất theo thời gian và đạo hàm bậc hai theo thời gian của véc tơ chuyển vị nút.

$\{F\}$ là véc tơ lực tổng thể.

Sau khi áp điều kiện biên của bài toán, kết quả là nhận được hệ phương trình sau:

$$[M^*].\{\ddot{q}^*\} + [C^*].\{\dot{q}^*\} + [K^*].\{q^*\} = \{F^*\} \quad (2.3)$$

Đây là phương trình hệ thống hay còn gọi là hệ phương trình để giải.

Bước 5: Giải hệ phương trình đại số:

Với bài toán tuyến tính việc giải hệ phương trình đại số (2.3) là không khó khăn. Kết quả là tìm được các chuyển vị của nút, đạo hàm bậc một và bậc hai của chuyển vị nút theo thời gian ở tại mỗi bước thời gian.

Nhưng với bài toán phi tuyến thì nghiệm sẽ đạt được sau một chuỗi các bước lặp tại mỗi bước thời gian.

Bước 6: Xử lý kết quả:

Từ kết quả tìm được ở trên, các đại lượng khác sẽ được tính toán và biểu diễn dưới dạng các bảng biểu hoặc đồ thị.

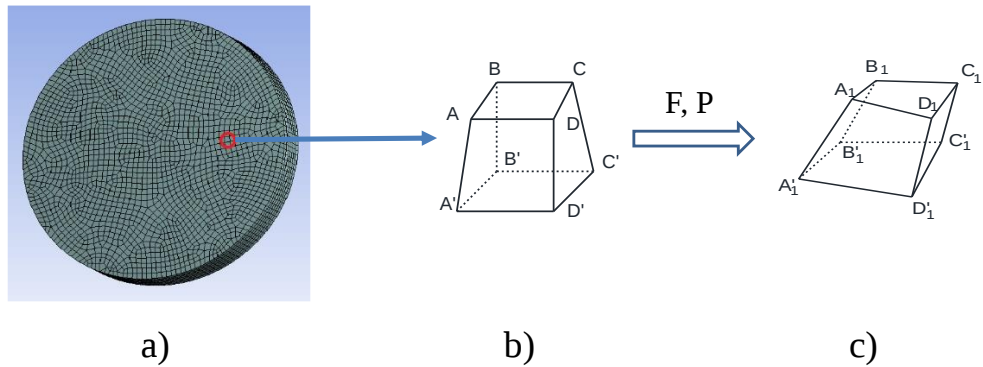
2.2.2.3. Sử dụng phần mềm phân tích phần tử hữu hạn để mô phỏng, tính toán

ANSYS (Analysis Systems) là một gói phần mềm phân tích phần tử hữu hạn hoàn chỉnh dùng để mô phỏng, tính toán thiết kế công nghiệp, đã và đang được sử dụng trên thế giới trong hầu hết các lĩnh vực kỹ thuật kết cấu, nhiệt, dòng chảy, điện, điện từ tương tác giữa các môi trường, giữa các hệ vật lý. Phần mềm ANSYS có hai môi trường xử lý và tính toán là ANSYS APDL và ANSYS WorkBench, trong đó ANSYS WorkBench hỗ trợ nhiều về đồ họa và câu lệnh trong phân tích kết cấu.

Luận án sử dụng phần mềm ANSYS WorkBench để phân tích biến dạng của gương cầu khi chịu tác dụng bởi lực gá kẹp. Dưới tác dụng của lực kẹp, các phần tử trên bề mặt gương bị dịch chuyển sang vị trí mới và giá trị chuyển vị này có thể được tính bằng phần mềm ANSYS WorkBench [45, 46]. Phần mềm này được trang bị những thuật toán mạnh mẽ, cho phép tính toán nhanh chóng, chính xác với hàng chục nghìn phần tử. Đặc biệt, ANSYS có khả năng mô tả

chính xác đối tượng theo mô hình 3D, kết quả tính toán được cung cấp dưới dạng bảng hoặc đồ thị trực quan, rất thuận tiện trong các phân tích tiếp theo.

Hình 2.2a cho thấy mô hình 3D của một linh kiện quang học trên phần mềm ANSYS. Linh kiện được chia thành nhiều phần tử, mỗi phần tử có dạng khối với sáu mặt và tám điểm nút, trong đó bốn nút (A, B, C, D) nằm trên bề mặt làm việc của linh kiện (Hình 2.2b). Dưới tác động của ngoại lực, bao gồm trọng lực (P) và lực kẹp (F), linh kiện sẽ bị biến dạng. Kết quả là các nút A, B, C, D, A', B', C', D' sẽ di chuyển đến các vị trí A₁, B₁, C₁, D₁, A'₁, B'₁, C'₁, D'₁ tương ứng (Hình 2.2c) và bề mặt linh kiện bây giờ không còn là hình cầu nữa.



Hình 2.2. Mô hình minh họa sự biến dạng của phần tử trên bề mặt gương.
a) Sơ đồ phân chia một gương cầu thành nhiều phần tử, b) và c) Minh họa của một phần tử điển hình không bị biến dạng và bị biến dạng.

Do sự biến dạng, các điểm nút trên bề mặt của linh kiện đã chuyển sang tọa độ mới được xác định bởi giá trị chuyển vị theo các phương Ox, Oy và Oz. Tọa độ của các điểm nút sau khi chuyển vị sẽ được tính bằng tổng tọa độ ban đầu và giá trị chuyển vị của điểm nút theo phương Ox, Oy, Oz, nghĩa là:

$$A_i(x_i, y_i, z_i) \xrightarrow{(F, P)} A'_i(x_i + \Delta x_i, y_i + \Delta y_i, z_i + \Delta z_i)$$

Trong đó: $A_i(x_i, y_i, z_i)$, $A'_i(x_i + \Delta x_i, y_i + \Delta y_i, z_i + \Delta z_i)$ là tọa độ điểm nút trước và sau khi biến dạng, $(\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i)$ là lượng chuyển vị theo các phương Ox, Oy, Oz. Bộ số liệu chuyển vị này là thông số đầu vào rất quan trọng trong việc xác định biên dạng bề mặt gương cầu sau khi biến dạng.

Khi bị biến dạng, biên dạng bề mặt gương sẽ được làm khớp với biên dạng mặt phi cầu [47] được biểu diễn:

$$Z = R - \sqrt{R^2 - (X^2 + Y^2)} + \sum_{j=1}^{37} A_j M_j(\rho, \theta) \quad (2.4)$$

Trong đó:

X_i, Y_i, Z_i : Là tọa độ của điểm nút thứ i sau khi gương bị biến dạng, với

$X_i = x_i + \Delta x_i, Y_i = y_i + \Delta y_i, Z_i = z_i + \Delta z_i; i = \overline{1, n}$; n là số điểm nút trên bề mặt gương.

ρ, θ : Tọa độ cực của các điểm nút; R : Bán kính của mặt cầu.

A_j : Hệ số thứ j của đa thức Zernike Standard, $j = \overline{1, 37}$

$M_j(\rho, \theta)$: Là đa thức Zernike bậc j , được tính theo tọa độ cực (ρ, θ) như sau:

Xét trong vòng tròn đơn vị với hai biến: biến bán kính $0 \leq \rho \leq 1$ và biến góc θ biểu thị sự quay tròn với chu kỳ 2π .

Xét biểu thức tổng quát của đa thức Zernike như sau [48]:

$$M_n^m(\rho, \theta) = N_n^m R_n^{|m|}(\rho) e^{im\theta} = \begin{cases} N_n^m R_n^{|m|}(\rho) \cos(m\theta) & : m \geq 0 \\ -N_n^m R_n^{|m|}(\rho) \sin(m\theta) & : m < 0 \end{cases} \quad (2.5)$$

trong đó N_n^m , là hệ số chuẩn hóa xác định bởi:

$$N_n^m = \left[\frac{2(n+1)}{1 + \delta_{mn}} \right]^{1/2} \quad (2.6)$$

δ_{ij} là hàm delta Kronecker $\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & : i = j \\ 0 & : i \neq j \end{cases}$

n số tự nhiên, m là số nguyên thuộc đoạn $[-n; n]$ sao cho $(n - |m|)$ là số chẵn.

$R_n^{|m|}(\rho)$ là đa thức hướng tâm bậc n của ρ xác định theo công thức:

$$R_n^{|m|}(\rho) = \sum_{s=0}^{(n-|m|)/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! \left(\frac{n+|m|}{2} - s \right)! \left(\frac{n-|m|}{2} - s \right)!} \rho^{n-2s} \quad (2.7)$$

Đa thức hướng tâm $R_n^{[m]}(\rho)$ là hàm chẵn hoặc lẻ theo ρ tùy thuộc vào n (hay m) là chẵn hoặc lẻ. Đa thức này có các tính chất sau:

$$R_n^m(1)=1; \quad R_n^n(\rho)=\rho^n \text{ và } R_n^m(0)=\begin{cases} \delta_{m0} & : n/2=2k \\ -\delta_{m0} & : n/2=2k+1 \end{cases}, \quad k \in N \quad (2.8)$$

Từ biểu thức (2.5) ta thấy mỗi đa thức Zernike gồm ba phần: hệ số chuẩn hóa; đa thức hướng tâm bậc n ; hàm điều hòa (hàm sin hoặc cosin) có tần số góc m .

Từ các công thức (2.5) – (2.8) tùy theo hệ tọa độ Đề các hay tọa độ cực ta có thể khai triển đa thức Zernike theo các cách sau:

* *Khai triển trong tọa độ cực dạng hai chỉ số Z_n^m*

$$\text{Từ công thức (2.6) ta có } N_n^m = \left[\frac{2(n+1)}{1+\delta_{m0}} \right]^{1/2} = \begin{cases} \sqrt{n+1} & : m=0 \\ \sqrt{2(n+1)} & : m \neq 0 \end{cases}$$

Như vậy ta từ công thức (2.5) ta có:

$$M_n^m(\rho, \theta) = \begin{cases} \sqrt{2(n+1)} \sum_{s=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! \left(\frac{n+m}{2} - s\right)! \left(\frac{n-m}{2} - s\right)!} \rho^{n-2s} \cos(m\theta) : \text{ khi } m > 0 \\ \sqrt{(n+1)} \sum_{s=0}^{n/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! \left(\frac{n}{2} - s\right)! \left(\frac{n}{2} - s\right)!} \rho^{n-2s} : \text{ khi } m = 0 \\ -\sqrt{2(n+1)} \sum_{s=0}^{(n+m)/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! \left(\frac{n+m}{2} - s\right)! \left(\frac{n-m}{2} - s\right)!} \rho^{n-2s} \sin(m\theta) : \text{ khi } m < 0 \end{cases} \quad (2.9)$$

* *Khai triển trong tọa độ cực dạng một chỉ số Z_j*

$$\text{Theo tiêu chuẩn ANSI, } j = \frac{n(n+2)+m}{2}$$

Do với mỗi bậc n có tối đa $(n+1)$ đa thức nên tổng số đa thức có bậc tới n là:

$$T = \sum_{i=0}^n (i+1) = \frac{(n+1)(n+2)}{2}$$

Như vậy từ chỉ số j để xác định ra hai chỉ số n, m phải thỏa mãn:

$$\begin{cases} j = \frac{n(n+2) + m}{2} \\ \frac{n(n+1)}{2} < j \leq \frac{(n+1)(n+2)}{2} \end{cases}$$

Có thể xác định n như sau:

Gọi n_1 là nghiệm dương của phương trình:

$$\frac{n(n+1)}{2} = j+1 \Rightarrow n^2 + n - 2(j+1) = 0$$

$n = [n_1]$ nếu n_1 không phải là số nguyên; $n = n_1 - 1$ nếu n_1 là số nguyên;

$$m = 2j - n(n+2).$$

Thay n, m tính được vào công thức (2.9) ta được biểu thức của Z_j .

* Khai triển trong tọa độ Đề các theo dạng hai chỉ số Z_n^m

Khi $m > 0$

$$\begin{aligned} M_n^m &= \sqrt{2(n+1)} \sum_{s=0}^{\frac{n-m}{2}} \sum_{p=0}^{\frac{n-m}{2}-s} \sum_{q=0}^{\frac{m}{2}} \frac{(-1)^{(s+q)}(n-s)!}{s! \left(\frac{n+m}{2} - s\right)! \left(\frac{n-m}{2} - s\right)!} \times \\ &\times \frac{\left(\frac{n-m}{2} - s\right)!}{\left(\frac{n-m}{2} - s - p\right)! p!} \frac{m!}{(m-2q)!(2q)!} x^{n-2(s+p+q)} y^{2(p+q)} \end{aligned} \quad (2.10)$$

Khi $m < 0$

$$\begin{aligned} M_n^m &= \sqrt{2(n+1)} \sum_{s=0}^{\frac{n-|m|}{2}} \sum_{p=0}^{\frac{n-|m|}{2}-s} \sum_{q=0}^{\frac{|m|-1}{2}} \frac{(-1)^{(s+q)}(n-s)!}{s! \left(\frac{n+|m|}{2} - s\right)! \left(\frac{n-|m|}{2} - s\right)!} \times \\ &\times \frac{\left(\frac{n-|m|}{2} - s\right)!}{\left(\frac{n-|m|}{2} - s - p\right)! p!} \times \frac{|m|!}{(|m|-2q)!(2q)!} x^{n-2(s+p+q)-1} y^{2(p+q)+1} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Khi $m = 0$

$$M_n^m = \sqrt{2(n+1)} \sum_{s=0}^{\frac{n}{2}} \sum_{p=0}^{\frac{n}{2}-s} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! \left(\frac{n}{2}-s\right)! \left(\frac{n}{2}-s\right)! \left(\frac{n}{2}-s-p\right)! p!} \left(\frac{n}{2}-s\right)! x^{n-2(s+p)} y^{2p} \quad (2.12)$$

* Khai triển trong tọa độ Đề các theo dạng một chỉ số Z_j

Tương tự như trong tọa độ cực từ chỉ số j ta tính ra các chỉ số n , m và thay vào một trong các công thức (2.10), (2.11) hoặc (2.12) ta được biểu thức của Z_j .

Từ đó, áp dụng vào phương trình (2.4), $M_j(\rho, \theta)$ là đa thức Zernike được tính theo tọa độ cực (ρ, θ) . Vì vậy, để xác định các giá trị M_j ta sử dụng công thức khai triển trong tọa độ cực dạng một chỉ số M_j , kết quả cụ thể như sau:

$$M_1 = 1$$

$$M_2 = 2\rho \cos(\theta)$$

$$M_3 = 2\rho \sin(\theta)$$

$$M_4 = \sqrt{3}(2\rho^2 - 1)$$

$$M_5 = \sqrt{6}(\rho^2 \sin 2\theta)$$

.....

.....

$$M_{37} = 3(70\rho^8 - 140\rho^6 + 90\rho^4 - 20\rho^2 + 1)$$

Từ phương trình (2.1) ta thấy rằng, các thông số (X_i, Y_i, Z_i) và M_j đã biết, để xác định phương trình biến dạng Z , ta phải tính các hệ số A_j . Số lượng hệ số A_j càng nhiều thì biên dạng bề mặt càng chính xác, độ chính xác của kết quả càng cao. Ta có:

$$Z - R + \sqrt{R^2 - (X^2 + Y^2)} = \sum_{j=1}^{37} A_j M_j(\rho, \theta) \quad (2.13)$$

$$\text{Suy ra:} \quad \sum_{j=1}^{37} A_j M_j(\rho, \theta) = f(X, Y) \quad (2.14)$$

$$(f(X, Y) = Z - R + \sqrt{R^2 - (X^2 + Y^2)})$$

Phương trình (3) được biểu diễn dưới dạng ma trận như sau:

$$\begin{bmatrix} M_1(\rho_1, \theta_1) & M_2(\rho_1, \theta_1) & \dots & M_{37}(\rho_1, \theta_1) \\ M_1(\rho_2, \theta_2) & M_2(\rho_2, \theta_2) & \dots & M_{37}(\rho_2, \theta_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ M_1(\rho_n, \theta_n) & M_2(\rho_n, \theta_n) & \dots & M_{37}(\rho_n, \theta_n) \end{bmatrix} X \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ A_{37} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(X_1, Y_1) \\ f(X_2, Y_2) \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ f(X_n, Y_n) \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Phương trình trên được viết gọn như sau: $M \times A = F$

Đây là hệ phương trình gồm n ($n > 37$) phương trình nhưng chỉ có 37 ẩn. Do đó, ta phải giải gần đúng bằng phương pháp bình phương tối thiểu [49], tức là tìm giá trị nhỏ nhất của biểu thức $\|F - M.A\|^2$

Hệ này được giải bằng phương pháp giải tích theo công thức:

$$A = B.F, \text{ trong đó ma trận } B \text{ là: } B = (M^T.M)^{-1}.M^T$$

Như vậy, các hệ số A_j của đa thức Zernike Standard được xác định là các hệ số của trong ma trận A .

Với các bước trên, luận án đã xây dựng chương trình tính các giá trị A_j trên phần mềm Delphi với các thông số đầu vào là chuyển vị của các điểm trên bề mặt gương. Như vậy, phương trình biên dạng bề mặt gương sau khi biến dạng đã được xác định. Đây là bước rất quan trọng để xác định quang sai mặt sóng của gương cầu.

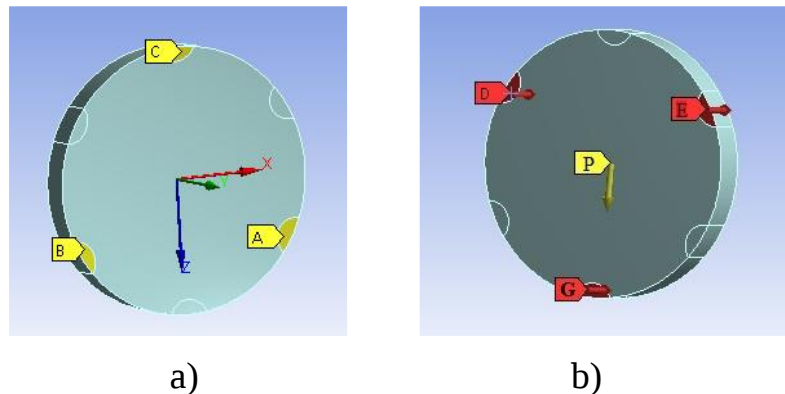
2.2.3. Xác định quang sai mặt sóng

Ta nhận thấy, các hệ số A_j ảnh hưởng trực tiếp đến biên dạng bề mặt, từ đó ảnh hưởng lớn đến quang sai mặt sóng của gương. Để xác định quang sai mặt sóng của gương ta cần biết các thông số: kích thước, vật liệu và các hệ số A_j . Từ đó, nhập các thông số đầu vào này vào phần mềm thiết kế quang học Zemax cho phép ta xác định quang sai mặt sóng của gương khi bị biến dạng.

2.3. Mô hình hóa và thực nghiệm đánh giá quang sai mặt sóng của gương cầu khi biến dạng bởi lực gá kẹp

2.3.1. Mô hình gá lắp gương trên phần mềm ANSYS

Với mục đích dễ quan sát và dự báo được biến dạng của gương khi chịu tác dụng bởi ngoại lực, luận án xây dựng mô hình kết cấu gá lắp gương như hình 2.3. Mặt trước của gương (bề mặt làm việc) được đỡ bởi ba gối đỡ A, B, C, phân bố đều trên chu vi của gương (Hình 2.3a). Ngoại lực tác dụng lên mặt sau của gương tại các vị trí D, E, G so le với các vị trí A, B, C (Hình 2.3b).

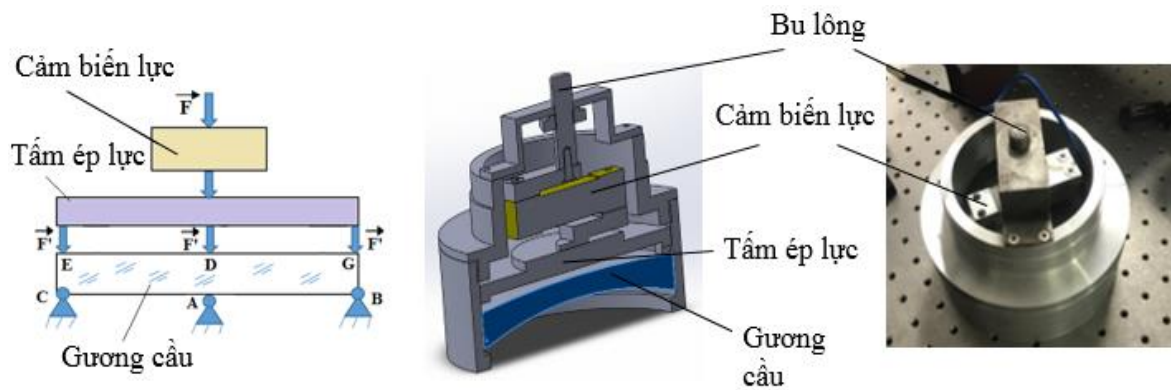


Hình 2.3. Mô hình gương cầu trên ANSYS. a) Mặt trước, b) Mặt sau.

2.3.2. Kết cấu thực nghiệm gá lắp gương

Mô hình thực nghiệm được trình bày ở hình 2.4. Một lực F được tác động lên một tấm ép lực thông qua một cảm biến để theo dõi giá trị lực. Giá trị lực F tác dụng có thể được thay đổi bằng cách siết chặt bu lông vào cảm biến lực, cảm biến này có giới hạn lực 400 N và độ chính xác 0,1 N. Lực chính F chia thành ba lực F' ($F' = F/3$), tác dụng trực tiếp lên mặt sau của gương tại các vị trí D, E và G. Với cách sắp xếp này, mép gương sẽ võng xuống tại các vị trí D, E và G, đồng thời tại các vị trí A, B và C mép gương sẽ cong lên, làm tăng hiệu ứng khi khảo sát biến dạng của gương.

Dựa trên kết cấu đề xuất, chúng tôi đã thiết kế và chế tạo cụm cơ khí để lắp gương cầu (Hình 2.4). Thành phần kết cấu là nhôm và sắt, đảm bảo độ cứng và ổn định trong quá trình thí nghiệm.



Hình 2.4. Sơ đồ của các lực tác dụng lên gương cầu và kết cấu gá lắp cụ thể.

2.3.3. Mô hình thiết bị đo quang sai mặt sóng

Mô hình thực nghiệm để đo quang sai mặt sóng của gương cầu được thể hiện trong hình 2.5.



Hình 2.5. Mô hình thiết bị đo quang sai mặt sóng của gương cầu.

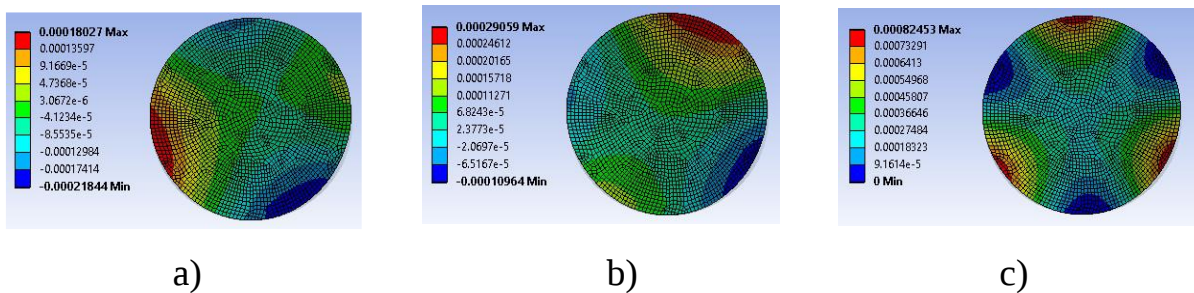
Cụm gương được đặt trước một giao thoa kế Zygo. Chùm sáng có bước sóng $\lambda = 0,6328 \mu\text{m}$ từ giao thoa kế được chiếu tới bề mặt chuẩn, tại đó một phần ánh sáng bị phản xạ, và phần còn lại truyền tới gương. Kết quả là giao thoa kế sẽ nhận được hai mặt sóng, một mặt phản xạ từ bề mặt chuẩn và một mặt phản xạ từ gương cầu. Sự sai khác giữa hai mặt sóng được tính toán và cho kết quả sai số hình dạng hiển thị trên máy tính. Bề mặt gương bị biến dạng càng lớn thì giá trị sai số hình dạng càng lớn, điều này được thực hiện qua việc thay đổi độ lớn lực tác dụng vào gương thông qua bu lông và giá trị độ lớn của lực được hiển thị trên màn hình cảm biến lực.

2.4. Kết quả tính quang sai mặt sóng của gương cầu

2.4.1. Kết quả chuyển vị tính trên phần mềm ANSYS

Gương cầu trong phần mềm ANSYS được mô phỏng dựa trên gương thực tế đã được chế tạo làm bằng kính K8 với đường kính 150 mm. Các thông số khác bao gồm bán kính cong của $R_1 = 342,5$ mm, $R_2 = \infty$ và độ dày $d = 10$ mm.

Khi đó, bề mặt gương được chia thành 7529 điểm nút. Cần lưu ý rằng càng nhiều điểm nút, thời gian tính toán càng nhiều và độ chính xác càng cao. Tác giả nhận thấy rằng, các giá trị quang sai mặt sóng PV và RMS gần giống nhau khi số lượng điểm nút lớn hơn 2811. Đối với số điểm nút nhỏ hơn (xuống 107), PV và RMS giảm gần 10%, cho sai số đáng kể. Do vậy, luận án chọn 7529 điểm nút trên mặt gương để tính toán. Giá trị này đảm bảo cả kết quả chính xác và thời gian tính toán hợp lý.



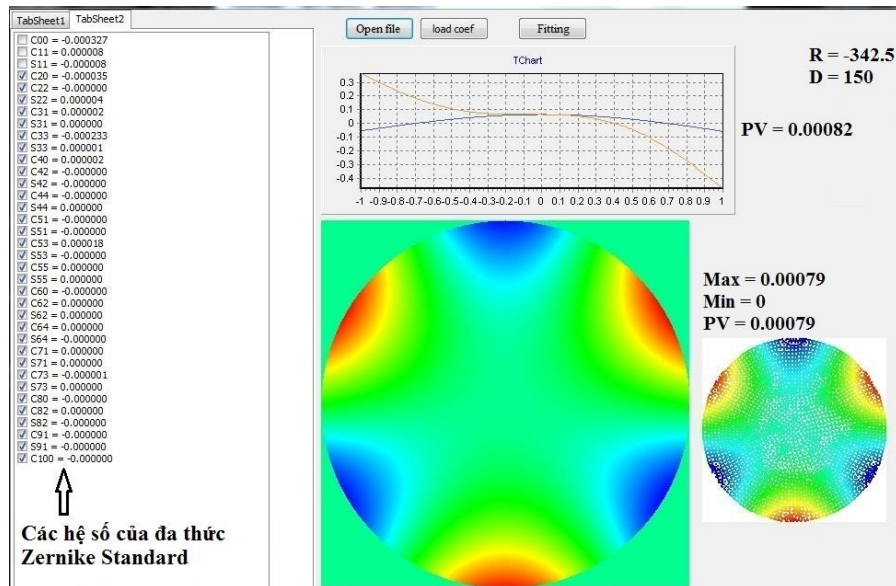
Hình 2.6. Sơ đồ chuyển vị của các điểm nút trên bề mặt gương với lực tác dụng 200 N. a), b), c) Chuyển vị theo phương Ox, Oy, Oz tương ứng.

Hình 2.6a-2.6c trình bày sơ đồ chuyển vị của các điểm nút theo 3 phương Ox, Oy, Oz với lực tác dụng là 200 N. Có thể thấy trong hình 2.6c, tại những vị trí lực tác dụng vuông góc từ sau ra trước thì mặt gương cong lên (màu đỏ-vàng) tương ứng với chuyển vị cực đại vào khoảng $0,82 \mu\text{m}$.

2.4.2. Tính toán quang sai mặt sóng trên Zemax

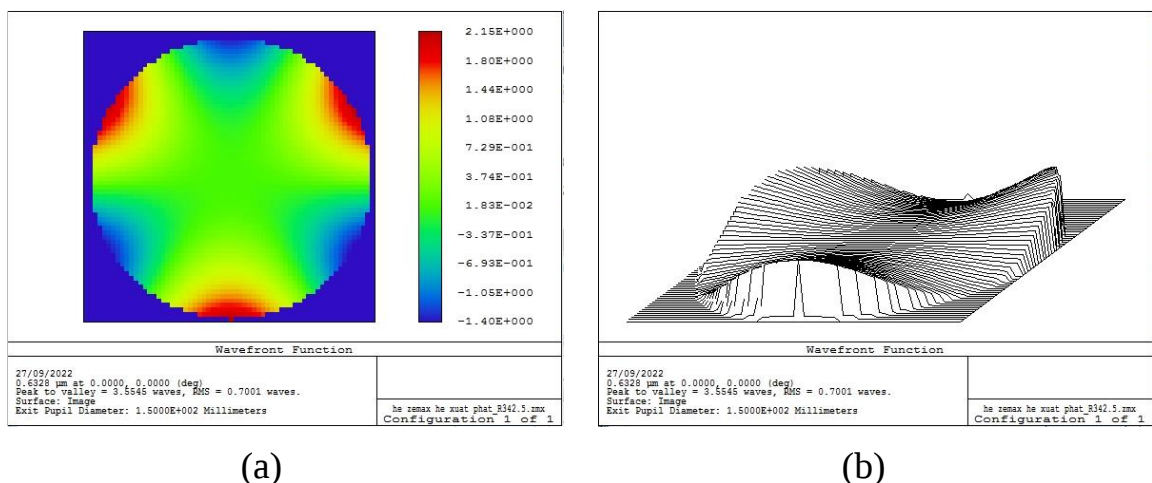
Dữ liệu chuyển vị từ ANSYS sẽ nhập vào phần mềm được viết trên Delphi để tính toán các hệ số của đa thức Zernike Standard. Bề mặt biến dạng được làm khớp với một bề mặt phi cầu như trong hình 2.7. Sau khi làm khớp,

chuyển vị lớn nhất của bề mặt là $0,79 \mu\text{m}$, rất gần với giá trị ban đầu của ANSYS là $0,82 \mu\text{m}$. Kết quả này chỉ ra rằng bề mặt được làm khớp khá sát với bề mặt biến dạng thực tế. Từ đó, các hệ số của đa thức Zernike Standard được tính và hiển thị ở phía bên trái của giao diện phần mềm.



Hình 2.7. Giao diện phần mềm tính các hệ số của đa thức Zernike Standard

Các hệ số của đa thức Zernike Standard và thông số của gương được nhập vào phần mềm Zemax để tính quang sai mặt sóng. Kết quả quang sai mặt sóng được tính toán với trường hợp $F = 200$ N được thể hiện tại hình 2.8.



Hình 2.8. Quang sai mặt sóng của gương được tính với bước sóng $0,6328 \mu\text{m}$.

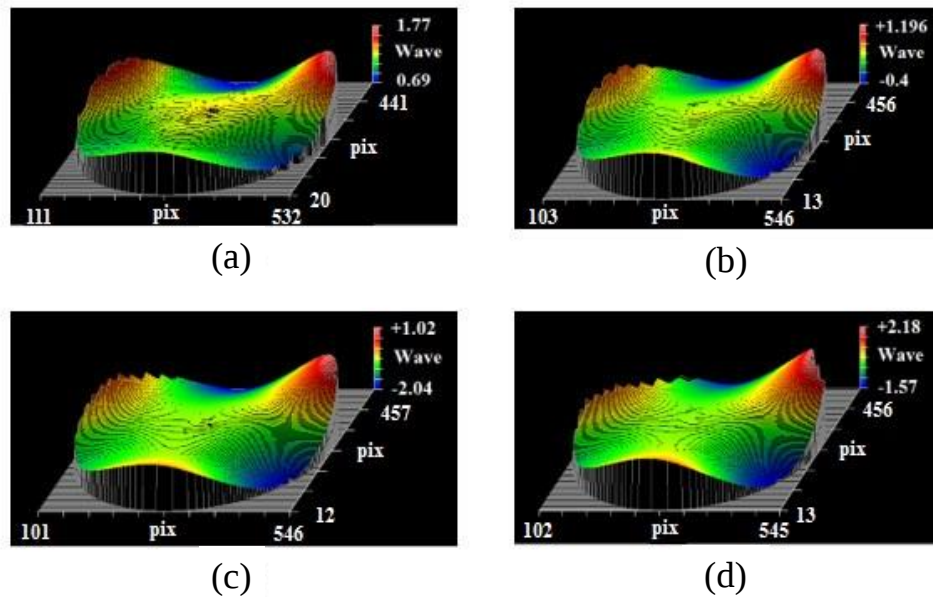
a) và b) là quang sai mặt sóng dạng 2D và 3D.

Có thể thấy sự giống nhau về hình dạng và màu sắc (được biểu thị bằng khu vực biến dạng) giữa mặt sóng 2D (Hình 2.8a) và biến dạng bề mặt (Hình 2.7). Riêng vùng màu đỏ và xanh lam chỉ phản ánh sự lồi lên và lõm xuống của gương phù hợp với sự phân bố chuyển vị của các điểm trên mặt gương. Quang sai mặt sóng cũng có thể được biểu diễn dưới dạng 3D để phản ánh một cách trực quan hơn về biến dạng bề mặt của gương cầu (Hình 2.8b).

Quang sai mặt sóng lý thuyết PV_T và RMS_T đối với các lực tác dụng khác nhau ở bước sóng $\lambda = 0,6328 \mu\text{m}$ được chỉ ra trong Bảng 2.1. Có thể thấy rằng quang sai mặt sóng tăng tuyến tính tương ứng với sự tăng của các lực tác dụng.

2.4.3. Quang sai mặt sóng của gương biến dạng đo bằng giao thoa kế Zygo

Kết quả thực nghiệm đo quang sai mặt sóng của gương khi chịu các lực tác dụng khác nhau được thể hiện trong hình 2.9.



Hình 2.9. Quang sai mặt sóng của gương đo bằng giao thoa kế Zygo.

a), b), c), d) tương ứng với các lực tác dụng là 55, 78, 150 và 200 N.

Quang sai mặt sóng thực nghiệm PV_E được tính bằng cách trừ đi giá trị lớn nhất đến giá trị nhỏ nhất trên vạch chia và RMS_E được tính là bình phương trung bình của các điểm trên bề mặt. Có thể thấy biến dạng bề mặt của gương khi thực nghiệm khá tương đồng so với lý thuyết ở hình 2.8b.

2.4.4. So sánh quang sai mặt sóng lý thuyết và thực nghiệm

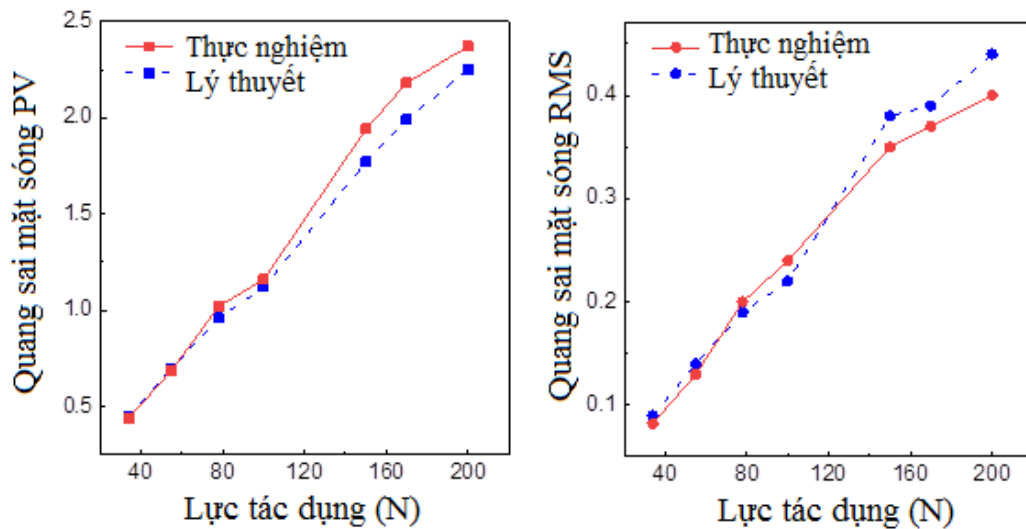
Các kết quả đo giữa quang sai mặt sóng lý thuyết và thực nghiệm với các giá trị lực tác dụng khác nhau được thể hiện ở Bảng 2.1, Bảng 2.2 và hình 2.10.

Bảng 2.1. So sánh quang sai mặt sóng PV giữa lý thuyết và thực nghiệm dưới các lực tác dụng khác nhau

Lực tác dụng (N)	PV _T (μm)	PV _E (μm)	Sai số (%)
34	0,45	0,44	2,2
55	0,70	0,69	1,4
78	0,96	1,02	6,2
100	1,12	1,16	3,6
150	1,77	1,94	9,6
170	1,99	2,18	9,5
200	2,25	2,37	5,3

Bảng 2.2. So sánh quang sai mặt sóng RMS giữa lý thuyết và thực nghiệm dưới các lực tác dụng khác nhau

Lực tác dụng (N)	RMS _T (μm)	RMS _E (μm)	Sai số (%)
34	0,09	0,082	8,9
55	0,14	0,13	7,1
78	0,19	0,20	5,3
100	0,22	0,24	9,1
150	0,38	0,35	7,9
170	0,39	0,37	5,1
200	0,44	0,40	9,1



Hình 2.10. Quang sai mặt sóng PV và RMS dưới các lực tác dụng khác nhau.

Kết quả được trình bày trong Bảng 2.1, Bảng 2.2 cho thấy quang sai mặt sóng tăng lên theo lực tác dụng và mối quan hệ này gần như tuyến tính. Nhìn chung, sự sai khác nhỏ hơn 10%, sai số nhỏ nhất chỉ là 1,4% khi lực tác dụng là 55 N và sai số đáng kể nhất là 9,6% khi lực tác dụng là 150 N. Nguyên nhân có sự sai số nhỏ giữa giá trị lý thuyết và thực nghiệm có thể do sai số gia công, như: gương ban đầu không có mặt cầu hoàn toàn và có thể kể đến một yếu tố khác như sai số của cảm biến lực.

Từ các kết quả ở trên ta nhận thấy, sự đồng nhất giữa quang sai mặt sóng lý thuyết và thực nghiệm của gương được nghiên cứu khẳng định tính chính xác của phương pháp luận án đề xuất. Do đó, đây là nội dung có ý nghĩa trong việc thiết kế các kết cấu gá lắp phù hợp để tối ưu hóa hiệu quả của HTQH.

2.5. Kết luận

Bằng sự kết hợp giữa phương pháp phần tử hữu hạn và phương pháp bình phương tối thiểu, chương 2 luận án đã đề xuất một phương pháp toàn diện để xác định quang sai mặt sóng của các linh kiện quang học bị biến dạng dưới tác dụng của ngoại lực. Phương pháp này cho phép xác định quang sai mặt sóng không chỉ một thành phần mà còn cả hệ thống quang học chứa nhiều thành phần khi chúng chịu tác dụng bởi lực gá kẹp.

Độ chính xác của phương pháp này đã được kiểm chứng bởi quá trình thực nghiệm đối với gương cầu. Phép đo thực nghiệm cho thấy sự phù hợp tốt với tính toán lý thuyết, kết quả sai số dao động ở mức nhỏ hơn 10%.

Để tính quang sai mặt sóng trong chương này, tác giả chọn giới hạn lực đặt $F \leq 200$ N (Hình 2.8) căn cứ vào giới hạn đo của cảm biến lực là $F = 400$ N. Đồng thời, nếu lực F nhỏ thì hiệu ứng biến dạng của gương khó quan sát, nếu lực F lớn thì dễ xảy ra phá hủy gương. Các giá trị lực khảo sát ở bảng 2.1 được lựa chọn chia thành các lực từ 34 N đến 200 N để dễ quan sát sự thay đổi các đại lượng sai sóng và tìm hiểu xem khi lực tăng thì quang sai mặt sóng của gương thay đổi như thế nào, sai số lớn nhất của quang sai mặt sóng giữa lý thuyết và thực nghiệm lớn nhất là bao nhiêu. Mỗi phép đo tương ứng với mỗi lực tác dụng được lặp lại khoảng 10 lần để đảm bảo kết quả đo.

Kết quả nghiên cứu ở chương 2 rất quan trọng phục vụ cho việc thiết kế các hệ thống quang học yêu cầu độ chính xác cao, giúp tối ưu kết cấu gá lắp để đảm bảo hệ thống quang học chắc chắn nhưng vẫn có chất lượng tốt.

Chương 3

XÂY DỰNG MÔ HÌNH THIẾT BỊ ĐÁNH GIÁ CHẤT LƯỢNG TẠO ẢNH CỦA HỆ THỐNG QUANG HỌC LÀM VIỆC TRONG VÙNG PHỔ HỒNG NGOẠI 8-12 μm

Để xây dựng mô hình thiết bị đánh giá chất lượng tạo ảnh của HTQH ảnh nhiệt theo phương pháp đo hàm nhòe đường LSF theo sơ đồ nguyên lý trên hình 1.13 chúng ta phải có đầy đủ các thành phần trong hệ thống. Trong phạm vi nghiên cứu của luận án, có một số thành phần có sẵn đó là: Nguồn bức xạ, vật mẫu, cảm biến, máy tính. Vì vậy, để có một hệ thống hoàn chỉnh thì chương 3 luận án tiến hành xây dựng giải pháp thiết kế, chế tạo các thành phần còn lại đó là hệ chuẩn trực và vật kính hiệu vi làm việc trong vùng hồng ngoại. Bên cạnh đó, với chức năng là một hệ thống đo kiểm quang học yêu cầu mô hình thiết bị phải có chất lượng cao, do vậy luận án cần áp dụng phương pháp tính toán ở chương 2 để tính ảnh hưởng của cơ cấu gá lắp đến quang sai mặt sóng của hệ chuẩn trực.

3.1. Thiết kế, chế tạo hệ chuẩn trực làm việc trong vùng hồng ngoại.

3.1.1. Thiết kế hệ quang hệ chuẩn trực

** Phân tích lựa chọn sơ đồ hệ chuẩn trực:*

Hệ chuẩn trực là một hệ thống có chức năng tạo ra chùm tia với độ song song rất cao. Cấu trúc cơ bản của hệ chuẩn trực gồm một nguồn sáng và một vật kính chuẩn trực.

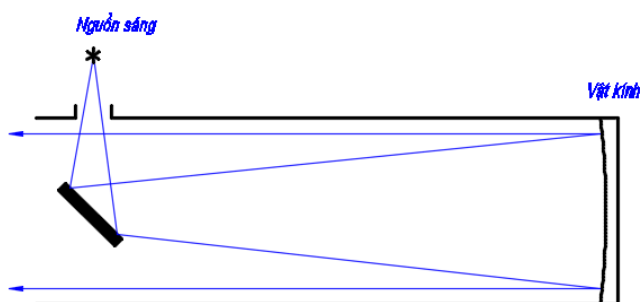
Dựa vào kết cấu của vật kính người ta còn chia hệ chuẩn trực thành 2 loại: Hệ chuẩn trực khúc xạ và hệ chuẩn trực phản xạ. Hệ chuẩn trực khúc xạ dùng vật kính thấu kính còn hệ chuẩn trực phản xạ dùng vật kính gương.

Đối với vật kính gương có thể dùng gương parabol tạo nên mặt sóng phẳng lý tưởng khi đặt nguồn sáng điểm tại tiêu cự gương parabol. Tuy nhiên, việc chế tạo gương parabol chất lượng cao là một bài toán khó hơn việc chế tạo

gương cầu. Gương cầu cũng được sử dụng để làm vật kính ống chuẩn trực, có đường kính lớn hơn. Ưu điểm chính của vật kính loại này là cấu trúc đơn giản và hoàn toàn không có sắc sai; có khả năng làm việc với dải phổ rộng nên chúng được ứng dụng rất rộng rãi, từ đo kiểm các thiết bị hồng ngoại đến các thiết bị làm việc với ánh sáng nhìn thấy. Nhược điểm chính là có sự che chắn ở trung tâm hoặc ở mép khẩu độ.

Các hệ chuẩn trực khúc xạ do hạn chế về dải phổ làm việc nên thường chỉ dùng để đo kiểm các thiết bị làm việc với ánh sáng nhìn thấy. Bên cạnh đó, việc chế tạo một vật kính có khẩu độ lớn, làm việc trong dải hồng ngoại đòi hỏi một chi phí lớn vì giá thành vật liệu rất cao. Do đó, để đảm bảo về mặt công nghệ chế tạo, kinh phí cũng như để tăng giới hạn đo thiết bị, luận án sẽ sử dụng sơ đồ hệ chuẩn trực phản xạ với vật kính chuẩn trực là vật kính gương.

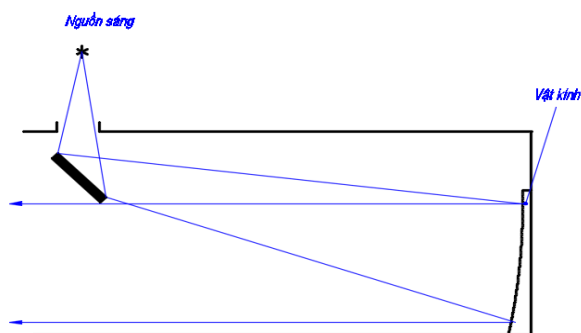
Hệ chuẩn trực dùng vật kính gương thường có kết cấu phức tạp, khó gá lắp. Tuy nhiên, hệ này lại cho chất lượng hệ thống tốt hơn. Trong hệ chuẩn trực phản xạ cũng được chia làm hai loại cơ bản: Hệ chuẩn trực trên trục và hệ chuẩn trực ngoài trục.



Hình 3.1. Hệ chuẩn trực phản xạ trên trục dùng vật kính gương

Hệ chuẩn trực trên trục có ưu điểm là dễ gá lắp hơn hệ chuẩn trực ngoài trục và chi phí để xây dựng ít hơn hệ ngoài trục. Nhưng hệ này lại có một vùng bị chắn ở trung tâm khẩu độ của hệ do vị trí gá gương lái chùm tia (Hình 3.1). Điều này là hạn chế rất lớn của hệ vì làm mất đi một phần quan trọng khẩu độ của thiết bị cần đo, sẽ ảnh hưởng trực tiếp đến kết quả đo.

Hệ chuẩn trực phản xạ ngoài trục có khẩu độ không bị che khuất vì gương thứ cấp được đặt ngoài khẩu độ của ống chuẩn trực (Hình 3.2). Tuy nhiên, nó cũng sẽ có kết cấu phức tạp, khó xây dựng hơn và đắt hơn hệ chuẩn trực phản xạ trên trục.



Hình 3.2. Hệ chuẩn trực phản xạ ngoài trục dùng vật kính gương

Thông thường, để xây dựng hệ chuẩn trực phản xạ ngoài trục người ta sẽ dùng gương parabol. Hệ chuẩn trực loại này có ưu điểm cấu trúc đơn giản, không có quang sai. Nhược điểm chính là việc chế tạo gương parabol đòi hỏi những trang thiết bị công nghệ rất phức tạp và khó đảm bảo yêu cầu chất lượng cao. Do trong nước hiện nay chưa có cơ sở nào có thể gia công được loại gương này, nên để đạt mục tiêu gia công hoàn toàn trong nước và hạ giá thành sản phẩm, luận án sử dụng gương cầu thay cho gương parabol, trong trường hợp này gương cầu phải quay một góc α so với mặt phẳng thẳng đứng đảm bảo cho ống chuẩn trực không bị chắn ở trung tâm khẩu độ. Phương án này có nhược điểm là hệ thống quang học sẽ có quang sai đơn sắc, nhưng bù lại gương cầu rất dễ gia công, có thể đạt độ chính xác cao hơn nhiều so với gương parabol. Nếu kết hợp với việc gá lắp, hiệu chỉnh vị trí các chi tiết quang học thật chính xác, ta có thể gần như loại bỏ sai số gia công, lúc này sai số của ống chuẩn trực chỉ là quang sai do gương cầu gây ra. Để đảm bảo quang sai của gương cầu nằm trong giá trị cho phép, ta thực hiện tính toán hệ thống quang học theo

các thông số đầu vào. Sau đó nhập kết quả vào phần mềm thiết kế quang học ZEMAX để kiểm tra quang sai.

3.1.1.1. *Tính toán, thiết kế kích thước*

Các HTQH ảnh nhiệt phổ biến trên thị trường hiện nay thường có đường kính khẩu độ nhỏ hơn 100 mm, F1.2. Vì vậy, để đảm bảo mô hình thiết bị có thể đo kiểm được hầu hết các HTQH ảnh nhiệt trên thị trường thì ống chuẩn trực có khẩu độ hiệu dụng phải lớn hơn 100 mm. Từ đó, luận án lựa chọn thông số đầu vào của ống chuẩn trực như sau:

- Đường kính đồng tử vào: $D = 140 \text{ mm}$;
- Tiêu cự: $f' = 1500 \text{ mm}$;
- Thị giới: $\omega = 0,5^\circ$.

Các thông số cần tính toán bao gồm: Bán kính cong của gương chính; đường kính thông quang của gương chính; đường kính gá lắp của gương chính; góc nghiêng của các gương, độ lớn và vị trí của gương thứ cấp.

Bài toán thiết kế kích thước được thực hiện qua các bước sau:

1. Bán kính cong của vật kính chuẩn trực: $R = 2.f' = 3000 \text{ mm}$ (3.1)

2. Đường kính thông quang của vật kính chuẩn trực:

Đường kính thông quang của vật kính chuẩn trực bằng đường kính của đồng tử vào: $D_{VK} = D = 140 \text{ mm}$ (3.2)

3. Đường kính của toàn bộ vật kính: $D_{TVK} = D_{VK} + 10 = 150 \text{ mm}$ (3.3)

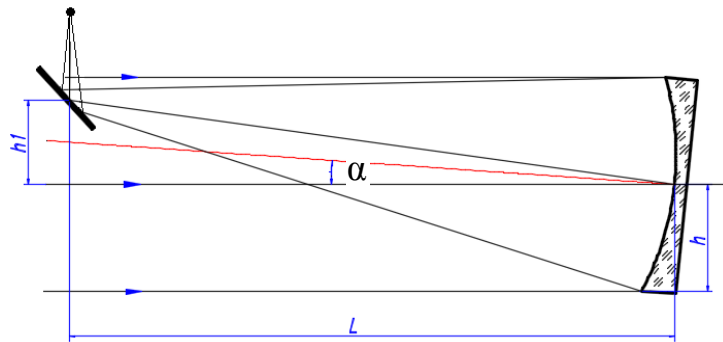
4. Độ lớn và vị trí của gương thứ cấp:

- α là góc quay của gương so với mặt phẳng thẳng nằm ngang;
- β là góc quay của gương thứ cấp so với mặt phẳng thẳng đứng;
- Gọi L là khoảng cách từ gương cầu đến vị trí đặt gương thứ cấp;
- Gọi L_1 là khoảng cách từ gương cầu đến mép dưới của gương thứ cấp;
- h_1 là độ cao tính từ tâm gương thứ cấp đến quang trục;

- h'_1 là độ cao từ mép dưới của gương thứ cấp (giao điểm giữa tia phản xạ của tia b và gương thứ cấp) tới tia khẩu độ phía dưới.

Ta có: Góc lệch giữa trục phụ của gương cầu đi qua vị trí $h = -70$ mm với quang trục là:

$$\gamma = \alpha + \frac{70.180}{3000.3,14} = \alpha + 1,34 \quad (3.4)$$



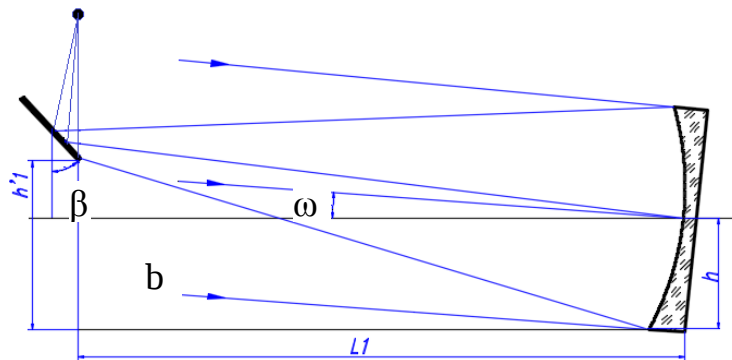
Hình 3.3. Chùm khẩu độ đi vào hệ chuẩn trực

Góc lệch của tia b so với trục của gương cầu đi qua vị trí $h = -70$ mm là:

$$\delta = \gamma - \omega = \alpha + 0,84 \quad (3.5)$$

Góc giữa tia phản xạ của tia b với với quang trục là:

$$\varphi = \gamma + \delta = 2.\alpha + 2,18 \quad (3.6)$$



Hình 3.4. Chùm thị giới đi vào hệ chuẩn trực

Ta có mối liên hệ giữa L_1 và h'_1 :

$$h'_1 = L_1.\tan(\varphi) = L_1.\tan(2.\alpha + 2,18) \quad (3.7)$$

Theo phân tích ở trên, để đảm bảo yêu cầu đo được hầu hết các vật kính ảnh nhiệt thì khẩu độ hiệu dụng của ống chuẩn trực phải lớn hơn 100 mm, do vậy:

$$\begin{aligned} h'_1 > 100 &\Leftrightarrow L_1 \cdot \tan(2\alpha + 2,18) > 100 \\ \Rightarrow L_1 \cdot \tan(2\alpha + 2,18) &> 100 \end{aligned} \quad (3.8)$$

Chọn $\alpha = 1^\circ$ và $h'_1 = 108$ mm. Khi đó: $L_1 = 1471$ mm.

Khi gương cầu lệch một góc $\alpha = 1^\circ$ thì sau khi phản xạ ở gương cầu quang trục của hệ sẽ lệch góc $2\alpha = 2^\circ$. Để quang trục của hệ sau gương thứ cấp vuông góc với quang trục của hệ phía trước gương cầu thì góc lệch β của gương thứ cấp so với mặt phẳng thẳng đứng phải thỏa mãn:

$$\beta = \frac{90 - 2\alpha}{2} = 44^\circ \quad (3.9)$$

Khi đó chiều cao h_1 và khoảng cách L của gương thứ cấp so với gương cầu sẽ được tính theo hệ phương trình dưới đây.

$$\begin{cases} h_1 = L \cdot \tan(2\alpha) \\ L - L_1 = \left(h_1 - h'_1 + \frac{D}{2} \right) \cdot \tan(\beta) \end{cases} \quad (3.10)$$

Giải hệ phương trình trên ta được: $\begin{cases} h_1 = 52 \text{ mm} \\ L = 1491 \text{ mm} \end{cases}$

- Vị trí của gương thứ cấp cách gương cầu một khoảng $L = 1491$ mm.

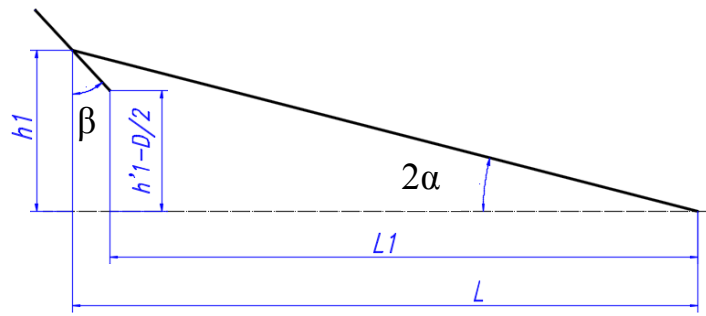
- Trục lớn của elip gương thứ cấp được xác định theo công thức:

$$y = \frac{2 \cdot (L - L_1)}{\sin(\beta)} = \frac{2 \cdot (1491 - 1471)}{\sin 44^\circ} = 57 \text{ mm}$$

- Trục bé của elip gương thứ cấp được tính gần đúng theo công thức sau:

$$x = 2 \cdot L \cdot \tan(\omega) = 2 \cdot 1491 \cdot \tan(0,5) = 26 \text{ mm} \quad (3.11)$$

Kích thước thực của gương sẽ được tăng thêm lượng dư gá lắp từ 3÷5 mm.

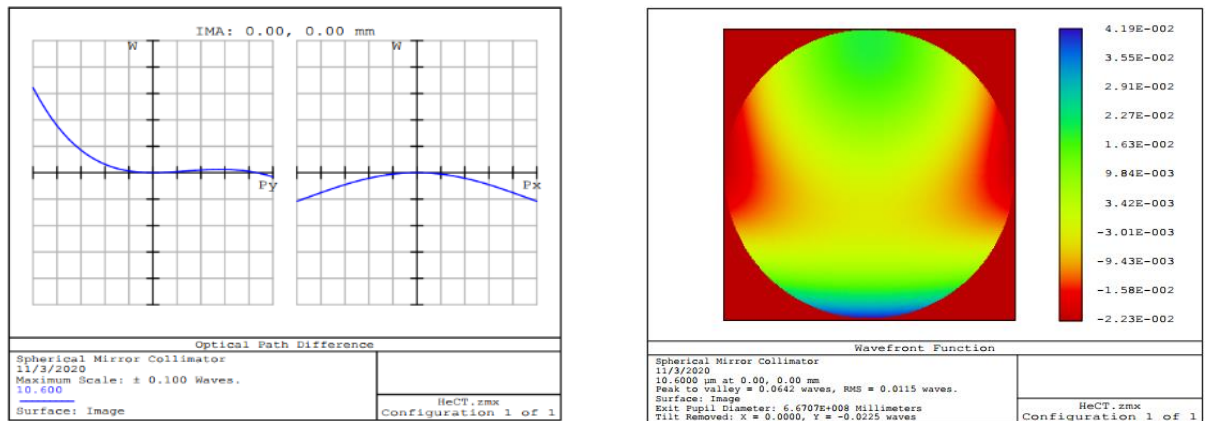


Hình 3.5. Mối quan hệ giữa chiều cao và vị trí của gương thứ cấp

Như vậy, ta có thông số kết cấu của hệ chuẩn trực: Bán kính mặt gương chính: $R_1 = 3000$ mm; đường kính gương chính $D_1 = 150$ mm; góc nghiêng của gương chính so với quang trục $\alpha = 1^\circ$; gương thứ cấp: $R_2 = \infty$; kích thước x, y là: 30 mm, 60 mm; khoảng cách giữa hai gương $L_1 = 1471$ mm.

3.1.1.2. Kiểm tra chất lượng ảnh của hệ

Sử dụng phần mềm Zemax để kiểm tra chất lượng ảnh của hệ đã được thiết kế ở trên, ta được kết quả của hệ như sau:



a) Quang sai

b) Sai sóng

Hình 3.6. Quang sai và sai sóng của hệ chuẩn trực

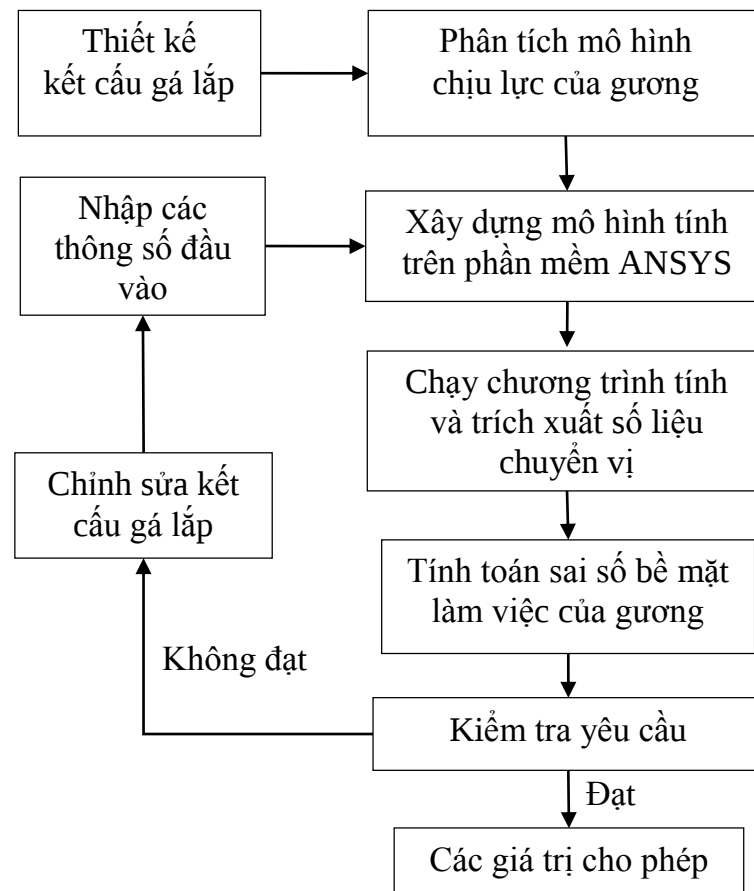
Tại bước sóng $\lambda = 10,6$ μm , quang sai: $C = 0,06\lambda$, sai sóng: $PV = 0,0642\lambda < \lambda/10$ [50], như vậy về mặt thiết kế, hệ chuẩn trực đạt yêu cầu sử dụng làm thiết bị đo kiểm, đánh giá chất lượng của ống kính ảnh nhiệt.

3.1.2. Thiết kế kết cấu cơ khí hệ chuẩn trực

3.1.2.1. Quy trình tính toán, hiệu chỉnh kết cấu gá lắp gương

Thành phần quan trọng và đòi hỏi độ chính xác cao nhất trong ống chuẩn trực là cụm gương cầu. Khi bị kẹp bởi kết cấu gá lắp cơ khí, gương cầu sẽ chịu tác dụng của lực liên kết làm cho bề mặt gương tại mỗi điểm bị biến dạng một lượng ΔZ . Độ biến dạng này sẽ gây ra biến dạng mặt sóng ánh sáng khi phản xạ trên gương là $\Delta W_d = 2\Delta Z$, tức là làm tăng quang sai tổng của cả hệ. Để giảm thiểu sai số này cần lựa chọn cơ cấu gá lắp hợp lý và tính toán chính xác lực kẹp sao cho biến dạng của gương không đáng kể.

Áp dụng phương pháp tính ảnh hưởng của cơ cấu gá lắp đến biến dạng của gương cầu đã trình bày ở chương 2, luận án tiến hành thiết kế cụm gá lắp được thực hiện theo quy trình tại hình 3.7.

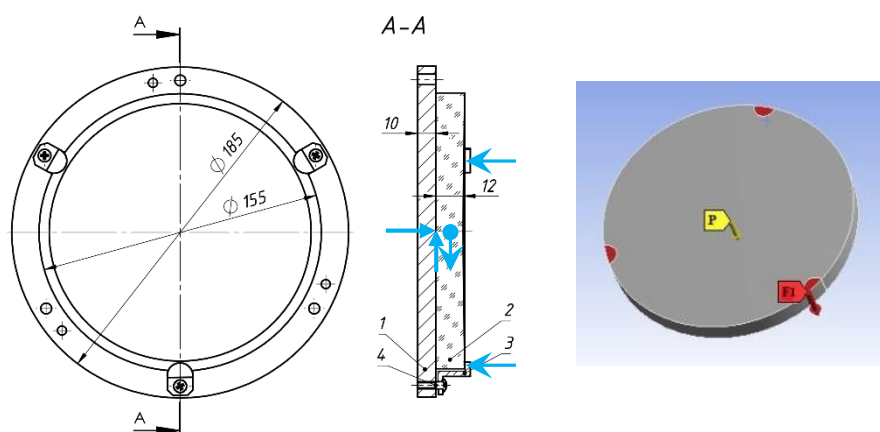


Hình 3.7. Quy trình tính toán, hiệu chỉnh kết cấu gá lắp gương

Trước hết, kết cấu cụm gương chính được thiết kế sơ bộ theo kinh nghiệm hoặc theo các kết cấu điển hình. Từ kết cấu này sẽ phân tích tìm hệ ngoại lực tác dụng vào gương và xây dựng mô hình tính trong ANSYS. Từ đó, ta sẽ nhận được bộ số liệu chuyển vị của các từng phần tử. Các số liệu này được sử dụng để tính toán độ biến dạng của mặt gương. Nếu sự biến dạng gây ra quang sai mặt sóng vượt quá giá trị cho phép, ta có thể nghiên cứu biểu đồ chuyển vị để phát hiện các khu vực có độ biến dạng lớn và tìm cách khắc phục, chỉnh sửa kết cấu gá lắp ban đầu.

3.1.2.2. Thiết kế kết cấu gá lắp gương.

Qua nghiên cứu một số kết cấu gá lắp gương có kích thước lớn đã được trình bày trên một số công bố trên thế giới [51, 52], chúng tôi lựa chọn một phương án gá lắp điển hình để minh họa cho phương pháp tính toán như hình 3.8:



Hình 3.8. Cơ cấu gá lắp và mô hình lực tác dụng.

a) Bản vẽ kết cấu gá lắp gương, b) Mô hình trong ANSYS

Phương án gá lắp gương chính với các thông số: Đường kính $D = 150$ mm, $R_1 = 3000$ mm, $R_2 = \infty$; Chiều dày $d = 12$ mm; Vật liệu: Thủy tinh K8. Gương chính (2) được đặt lên đĩa phẳng bằng kim loại (hợp kim nhôm 6061) đóng vai trò là đế (1) của cả cụm, đế này sẽ liên kết với thân của ống chuẩn trực. Mặt sau của gương không làm việc được mài phẳng sẽ tiếp xúc với mặt

đế. Gương được cố định lên đế bằng ba mẫu hình chữ Z (3) phân bố đều trên chu vi của gương. Khi xiết vít 4, các mẫu này sẽ ép chặt gương vào đế kim loại, nhờ đó gương được gá lắp đảm bảo chắc chắn trong quá trình hoạt động. Lực ép của mẫu tác dụng vào gương có thể được điều chỉnh thông qua lực vặn vít.

Với phương án này, hệ ngoại lực tác dụng lên gương gồm ba lực $\vec{F}$ tại các mẫu chữ Z vuông góc với mặt gương; trọng lực $\vec{P}$; phản lực $\vec{F}'$ của đế; lực ma sát $\vec{F}_{ms}$ giữa đế và gương. Phản lực của đế sẽ cân bằng với lực ép, lực ma sát sẽ cân bằng với trọng lực. Để giữ cho gương chắc chắn thì tổng lực ép tại các mẫu liên kết phải tạo ra lực ma sát lớn hơn trọng lượng của gương:

$$F_{ms} = k \cdot F > P \quad (k = 0,5-0,7 \text{ là hệ số ma sát}).$$

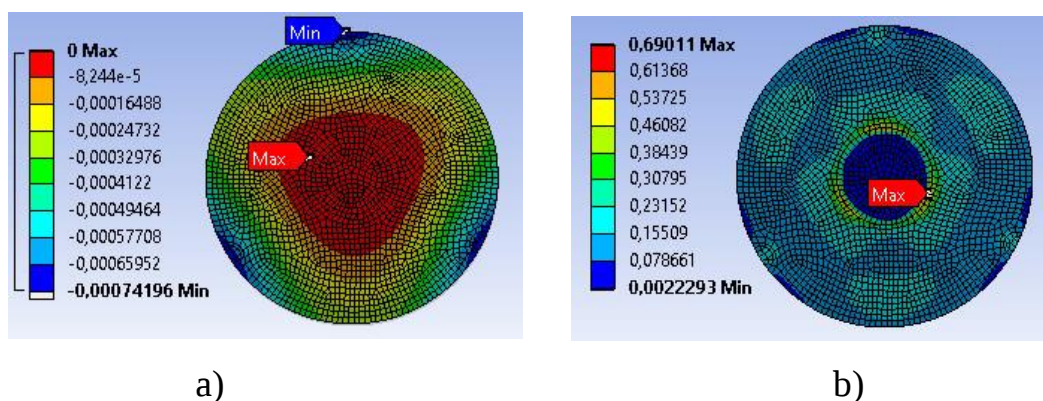
Bên cạnh đó, việc tính toán hệ cơ cấu trong trạng thái tĩnh nên để đảm bảo an toàn trong trường hợp có rung động nhẹ ta tính đến hệ số an toàn $s = 10$, từ đó ta có:

$$k \cdot F = s \cdot P \Rightarrow F = s \cdot P / k = s \cdot m \cdot g / k = 145,2 \text{ N}$$

- Giá trị của lực ép tại các mẫu liên kết: $F_1 = F_2 = F_3 = F/3 = 48,4 \text{ N}$.

Khi mặt sau của gương được ép chặt vào đế kim loại, về mặt lý thuyết đây là tiếp xúc mặt, tuy nhiên trên thực tế, do có lỗi gia công nên sẽ xuất hiện các khu vực lồi lõm, hai chi tiết sẽ tiếp xúc nhau tại các điểm lồi nhất. Phản lực của đế và lực ma sát tác dụng vào gương sẽ xuất hiện tại các vị trí này. Các lực liên kết và phản lực sẽ làm cho cả hai chi tiết bị biến dạng, nhưng ở đây đối tượng xem xét đang là chi tiết gương, vì vậy ta coi các điểm tiếp xúc thuộc đế là các gối đỡ. Nếu các gối đỡ và điểm đặt lực không trùng nhau, gương sẽ bị uốn làm biến dạng bề mặt làm việc. Độ biến dạng của gương đạt cực đại khi các điểm tiếp xúc cách xa điểm đặt lực nhất, đó là trường hợp bề mặt lắp ghép bị lồi, điểm tiếp xúc nằm ở tâm gương.

Mô hình của gương trong phần mềm ANSYS được thể hiện trên hình 3.9, trong phần mềm này, ta chỉ cần mô tả các lực liên kết tác dụng vào gương, khu vực cố định nằm tại tâm gương. Các lực ma sát, và phản lực của đế tác dụng vào gương sẽ được phần mềm tự động tính toán theo các phương trình tĩnh học.



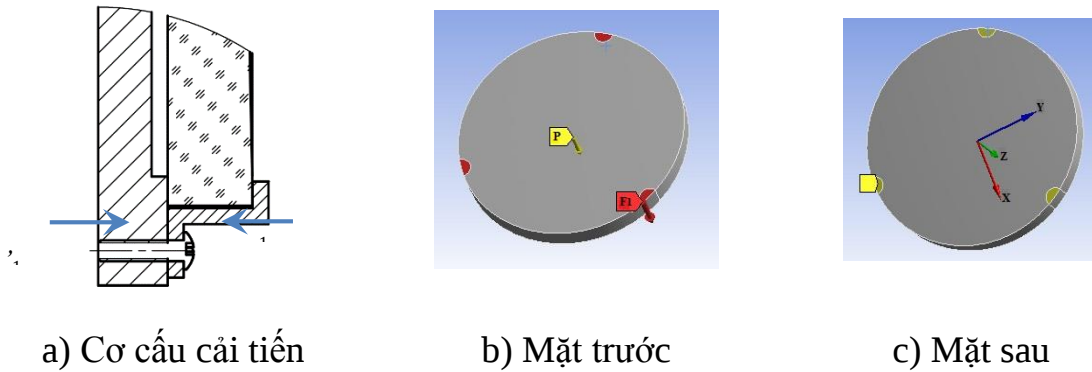
Hình 3.9. Kết quả phân tích mô hình chịu lực của gương.

a) Biểu đồ biến dạng bề mặt gương theo phương Z, b) Biểu đồ ứng suất.

Kết quả phân tích mô hình chịu lực của gương được thể hiện thông qua biểu đồ biến dạng (Hình 3.9a) và ứng suất (Hình 3.9b). Do có sự tiếp xúc ở khu vực giữa mặt sau gương và đế nên mô men uốn xuất hiện làm bề mặt gương bị biến dạng mạnh. Mô men uốn cũng làm cho ứng suất xuất hiện trên toàn bộ gương và tăng cục bộ tại khu vực tiếp xúc giữa gương và đế. Giá trị biến dạng lớn nhất là $\Delta Z_{max} = 0,741 \mu\text{m}$, lớn hơn nhiều so với giá trị cho phép, như vậy cần phải sửa lại kết cấu của cụm gá lắp gương.

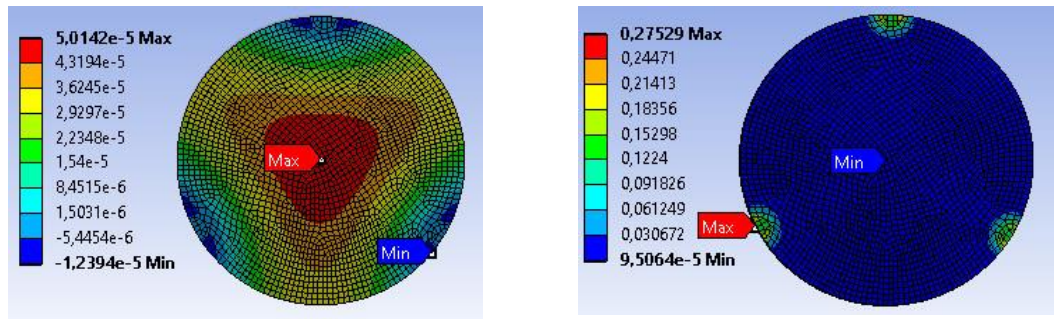
Để loại bỏ các điểm tiếp xúc gây mô men uốn mặt gương, cần chủ động đưa các điểm đỡ gương về vị trí đối diện với điểm đặt lực. Trên bề mặt đế, ta tạo thêm ba mẫu tì tương ứng vị trí của các mẫu ép chữ Z (Hình 3.10a). Các mẫu này đóng vai trò là gối đỡ gương, khi lắp ráp lực liên kết ép xuống gương sẽ được truyền thẳng xuống đế tại các vị trí này (Hình 3.10c), như vậy sẽ không gây ra mô men uốn. Tuy nhiên, việc tạo các mẫu tỳ cũng dẫn tới tăng ứng suất

tại các điểm lắp ghép. Vì vậy, cần phải kiểm tra ứng suất tại các vị trí này để đảm bảo ứng suất không vượt quá giá trị cho phép gây nứt mẻ gương.



Hình 3.10. Kết cấu cụm gương cải tiến

Với kết cấu gá lắp mới, mô hình của chịu lực của gương trong ANSYS được thay đổi lại như trên hình 3.10. Các điểm móc cố định được dịch chuyển về vị trí của điểm đặt lực. Kết quả tính biến dạng ứng suất của gương được thể hiện trên hình 3.11.



Hình 3.11. Kết quả phân tích mô hình gá lắp cải tiến

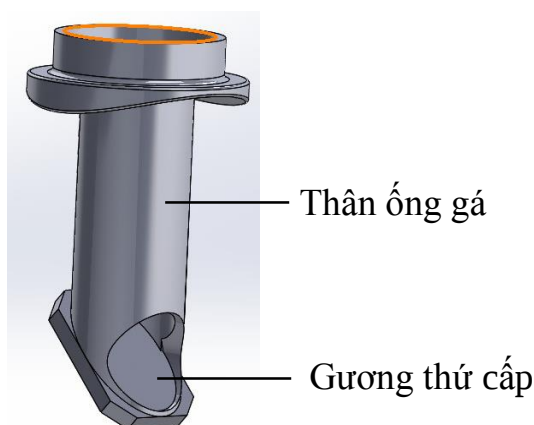
Từ biểu đồ biến dạng ta nhận thấy, giá trị biến dạng của mặt gương đã được giảm rất nhiều so với phương án ban đầu, sai lệch lớn nhất trên toàn bộ mặt gương thể hiện qua giá trị đỉnh-đáy: $PV = 5,0142 \cdot 10^{-5} + 1,2394 \cdot 10^{-5} = 6,25 \cdot 10^{-5} \text{ mm} = 0,0625 \text{ } \mu\text{m}$, nhỏ hơn 9,6 lần so với phương án ban đầu. Độ biến dạng này hoàn toàn thỏa mãn yêu cầu.

Ngoài ra, từ biểu đồ ứng suất (Hình 3.11b) cũng có thể thấy, ứng suất trên toàn bộ mặt gương cơ bản đã được loại trừ, chỉ tập trung vào các mẫu liên kết với giá trị lớn nhất là 0,275 MPa. Đối chiếu với độ bền nén của thủy tinh quang học đạt khoảng 600 Mpa [2], có thể thấy ứng suất này còn cách rất xa ngưỡng an toàn, không thể gây hại cho gương.

Như vậy, kết cấu gá lắp được cải tiến hoàn toàn thỏa mãn yêu cầu về độ biến dạng và ứng suất. Giá trị lực kẹp $F = 48,4 \text{ N}$ có thể kiểm soát thông qua mô men vặn vít ép số 4 (Hình 3.8a).

3.1.3. *Cụm gương thứ cấp*

Cụm gương thứ cấp có tác dụng thay đổi đường truyền của chùm tia trước khi đi vào cụm gương chính. Cụm này bao gồm một gương phẳng mạ bạc, có kích thước 30 x 60 mm được dán lên thân ống gá có một đầu được vát góc 44° đảm bảo gương thứ cấp nghiêng một góc $\beta = 44^\circ$ so với mặt phẳng thẳng đứng như thiết kế (Hình 3.12). Toàn bộ cụm gương được gá lên thân ống chuẩn trục và có khả năng dịch chuyển dọc trục ống chuẩn trục để hiệu chỉnh vị trí chính xác của nó.



Hình 3.12. Cụm gương thứ cấp

3.1.4. *Lắp ráp và hiệu chỉnh*

Hệ chuẩn trục được chia thành hai cụm cơ bản là cụm gương cầu và cụm gương thứ cấp, các cụm này được lắp lên thân ống chuẩn trục. Thân ống được

làm bằng ống nhựa PVC cứng có đường kính ngoài 200 mm, độ dày 5 mm. Độ dày này sẽ đảm bảo cho việc gá lắp các cụm gương một cách chắc chắn. Mặt khác, do hệ số giãn nở nhiệt của nhựa PVC là khá thấp nên thân ống ít bị biến dạng bởi nhiệt độ trong quá trình sử dụng.

Hệ chuẩn trực là thiết bị đòi hỏi yêu cầu độ chính xác cao, vì vậy khi lắp các thành phần để tạo thành một hệ hoàn chỉnh cần thực hiện các bước sau:

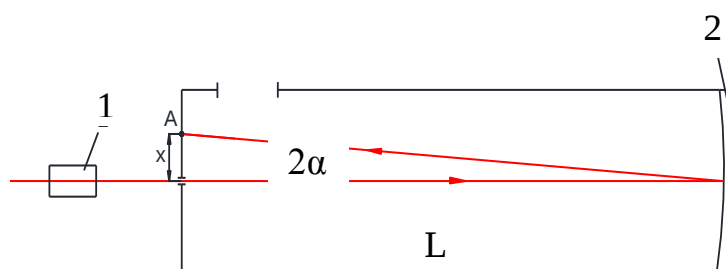
- Bước 1: Hiệu chỉnh góc nghiêng của gương cầu:

Đặt nguồn laser He – Ne nằm trên quang trục của hệ và chiếu vào tâm gương cầu. Khi đó, tia phản xạ sẽ giao với mặt phẳng tại vị trí đầu ống chuẩn trực và cách quang trục một đoạn x (hình 3.13).

Trong đó: $x = L \cdot \tan(2\alpha) = 1500 \cdot \tan(2^\circ) = 52,4 \text{ mm}$

Như vậy, để hiệu chỉnh góc nghiêng của trục gương $\alpha = 1^\circ$, ta dùng một tờ giấy hình tròn đường kính 200 mm dán vào đầu ống chuẩn trực, trên đó có đánh dấu vị trí điểm A cách tâm 52,4 mm theo phương thẳng đứng. Khoét một lỗ nhỏ tại tâm tờ giấy để chùm laser có thể đi vào gương cầu.

Chiếu chùm laser và tiến hành hiệu chỉnh gương bằng cách vặn ba vít hiệu chỉnh phía sau đế gương. Gương sẽ đạt chính xác góc nghiêng là 1° khi tia phản xạ rơi vào đúng vị trí điểm A, khi đó ta cố định gương cầu bằng ba vít ở phía sau.

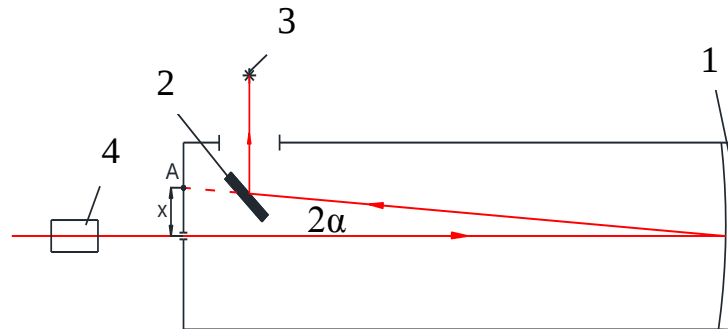


Hình 3.13. Sơ đồ hiệu chỉnh gương cầu

1. Nguồn laser; 2. Gương cầu

- Bước 2: Hiệu chỉnh cụm gương thứ cấp:

Lắp cụm gương thứ cấp vào lỗ trên thân ống chuẩn trực (hình 3.14), dịch chuyển cụm gương trên thân ống sao cho chùm tia sau khi phản xạ qua gương thứ cấp đi qua tâm của ống gá cụm gương. Sau đó, ta cố định cụm gương thứ cấp bằng ba vít lên thân ống.

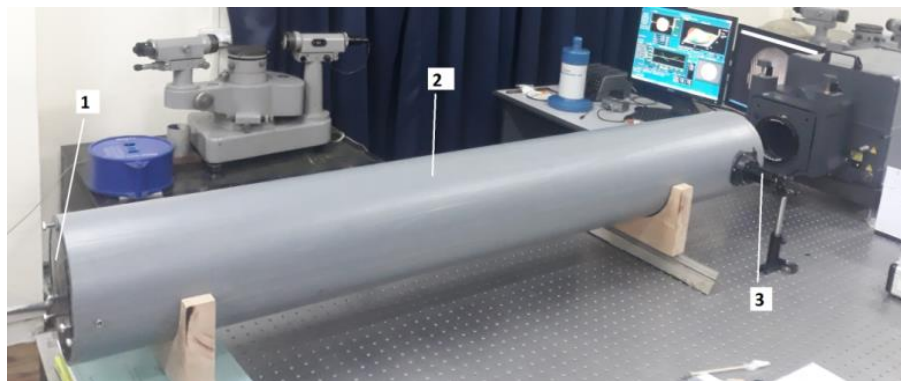


Hình 3.14. Sơ đồ hiệu chỉnh cụm gương thứ cấp

1. Gương cầu; 2. Gương thứ cấp;

3. Tiêu điểm; 4. Nguồn laser

Như vậy, cụm gương cầu và gương thứ cấp đã nằm đúng vị trí thiết kế, ta nhận được hệ chuẩn trực hoàn chỉnh như hình 3.15.



Hình 3.15. Sơ đồ gá lắp ống chuẩn trực

1. Cụm gương cầu; 2. Thân ống chuẩn trực; 3. Cụm gương thứ cấp

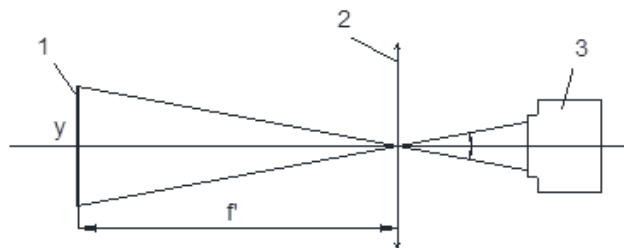
3.1.5. Kết quả đo kiểm các thông số của ống chuẩn trực

3.1.5.1. Đo tiêu cự của ống chuẩn trực

Tiêu cự của ống chuẩn trực được đo theo phương pháp đo góc. Sử dụng một vật mẫu có chiều cao $y = 18,6 \text{ mm}$ đặt tại tiêu diện trước của ống chuẩn trực. Sử dụng máy kinh vĩ đo kích thước góc φ của ảnh mục tiêu do ống chuẩn trực tạo ra, khi đó tiêu cự của ống chuẩn trực sẽ là $f'_c = y / \tan \varphi$.

Khi thực nghiệm tác giả sử dụng máy kinh vĩ 3T2KP có độ chính xác $2''$. Giá trị trung bình của φ sau 10 lần đo là: $\varphi = 40'20'' \pm 2''$.

Từ đó xác định được tiêu cự của ống chuẩn trực $f'_c = 1510 \pm 2 \text{ mm}$. Giá trị tiêu cự của ống chuẩn trực bị lệch so với thiết kế 10 mm. Tuy nhiên, sai số này hoàn toàn không ảnh hưởng đến hoạt động của ống chuẩn trực vì ta sẽ lấy giá trị đo $f'_c = 1510 \text{ mm}$ là thông số cuối cùng của ống chuẩn trực, sử dụng trong các phép đo kiểm tiếp theo.



Hình 3.16. Sơ đồ nguyên lý đo tiêu cự bằng kính kinh vĩ

1. Mía; 2. Vật kính; 3. Kính kinh vĩ

3.1.5.2. Đo bán kính gương cầu chuẩn trực

Phép được thực hiện bằng thiết bị Super Spherotronic HR:

Kết quả trung bình sau 10 lần đo: $R \approx 3014 \text{ mm}$, sai số: 0,93%, do đó: $f' = R/2 = 1507 \text{ mm}$.

Ở hai phép đo trên, do có sai số của thiết bị đo nên tiêu cự của ống chuẩn trực có giá trị lần lượt là 1507 mm, 1511 mm, vì vậy ta chọn $f' = 1510 \text{ mm}$ làm giá trị tiêu cự của ống chuẩn trực để tính toán sau này.

3.2. Thiết kế, chế tạo vật kính hiển vi

Với sơ đồ nguyên lý của phương pháp đo hàm LSF đã trình bày ở chương 1, ta nhận thấy: Vật mẫu khi được chiếu bởi nguồn bức xạ sẽ tạo ảnh tại vị trí mặt phẳng ảnh của vật kính cần kiểm tra. Tuy nhiên, ảnh này thường có kích thước rất nhỏ, tương đương kích thước của một vài điểm ảnh trên cảm biến ảnh nhiệt, vì vậy không thể dùng các cảm biến này để trực tiếp ghi phân bố năng lượng của ảnh này. Do đó, cần sử dụng vật kính hiển vi để phóng đại ảnh lên nhiều lần, như vậy cảm biến có thể ghi đầy đủ các thông tin và việc đánh giá chất lượng tạo ảnh của hệ quang được kiểm tra sẽ chính xác, tin cậy hơn.

Do vậy, vật kính hiển vi là một trong những thành phần rất quan trọng trong sơ đồ đánh giá chất lượng ảnh của HTQH. Các vật kính hiển vi dùng trong hệ thống đo kiểm cần phải có chất lượng cao với yêu cầu về quang sai mặt sóng nhỏ hơn $\lambda/10$ [50] để không ảnh hưởng đến độ chính xác của kết quả đo.

Đối với vùng phổ nhìn thấy, có thể dễ dàng tìm được các vật kính thỏa mãn yêu cầu như vậy từ các kính hiển vi có chất lượng cao. Tuy nhiên, các vật kính hiển vi hoạt động trong vùng phổ hồng ngoại 8-12 μm không có sẵn và không được các nhà sản xuất chú ý tới vì nó có độ phân giải không gian thấp hơn nhiều so với vùng phổ nhìn thấy. Vì vậy, để phát triển thiết bị đánh giá chất lượng ảnh của HTQH ảnh nhiệt, luận án thiết kế và chế tạo một vật kính hiển vi có chất lượng cao hoạt động trong vùng phổ hồng ngoại.

3.2.1. Thiết kế hệ quang vật kính hiển vi

3.2.1.1. Các yêu cầu về thông số đối với vật kính hiển vi

Để phục vụ cho mục đích đo kiểm chất lượng ảnh của ống kính ảnh nhiệt, vật kính hiển vi cần có các thông số sau:

- Vùng phổ làm việc từ 8÷12 μm .
- Quang sai mặt sóng nhỏ hơn $\lambda/10$.
- Độ phóng đại ngang $\beta = 10^x$.

- Số khẩu độ (NA) của vật kính hiển vi trong không gian vật phải lớn hơn số khẩu độ của vật kính cần kiểm tra trong không gian ảnh, thông thường các ống kính ảnh nhiệt có $F/\# \leq 1.0$, tương ứng với $NA \leq 0,45$, vì vậy nếu vật kính hiển vi có $NA = 0,45$ sẽ đảm bảo đo được tất cả các ống kính thông thường.

Khi tính toán vật kính hiển vi, vì chùm tia đi vào có góc khẩu độ lớn nên phương pháp tính toán thông thường theo quang sai Saidel không còn phù hợp, thay vào đó, chúng tôi sử dụng phương pháp tính ứng dụng các điểm aplanat của bề mặt, tại những vị trí đặc biệt này mặt cầu sẽ không gây quang sai.

Theo ý tưởng này, vật kính hiển vi sẽ được chia thành 2 thành phần:

- Thành phần thứ nhất: Là một thấu kính aplanat, nhờ thấu kính này khẩu độ của chùm tia đi qua được giảm một cách đáng kể mà không bị quang sai.

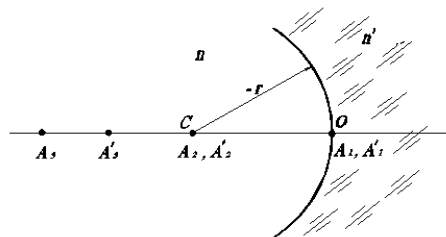
- Thành phần thứ hai: Là thấu kính thường, có tác dụng tạo ra ảnh thật để hiển thị lên cảm biến ảnh hồng ngoại. Do khẩu độ của chùm tia đi tới thấu kính này đã được giảm bớt nên quang sai do nó gây ra nhỏ và có thể khử được bằng cách phối hợp với thành phần thứ nhất. Thao tác khử quang sai được thực hiện trên phần mềm ZEMAX thông qua công cụ tối ưu.

3.2.1.2. Tính toán kích thước sơ bộ các thành phần của vật kính hiển vi.

* Tính toán thành phần thứ nhất.

Trước tiên, ta đi xét đặc điểm các điểm aplanat để lựa chọn kết cấu của thấu kính thứ nhất phù hợp với yêu cầu đề ra.

Về mặt quang học, một mặt khúc xạ đơn có ba điểm aplanat đặt vật cho cầu sai, coma bằng không như hình vẽ dưới.



Hình 3.17. Các điểm aplanat của mặt khúc xạ đơn.

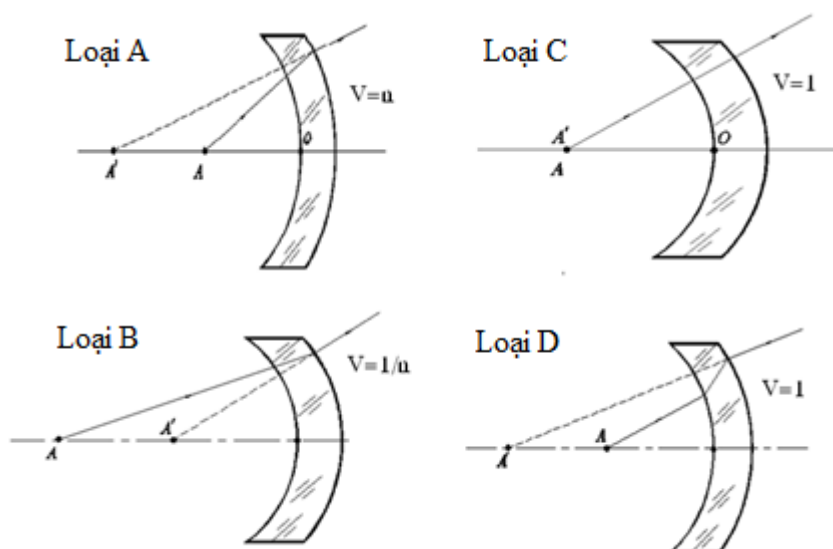
- Khi vật đặt tại điểm A_1 (trùng với đỉnh mặt cong) cho ảnh tại điểm A_1' trùng với A_1 , đối với điểm aplanat loại này cầu sai, coma và loạn thị được khử.

- Khi vật đặt tại điểm A_2 và cho ảnh A_2' trùng với A_2 tại tâm mặt cong C . Tại điểm này cầu sai, coma được khử nhưng loạn thị khác không.

- Khi vật đặt tại điểm A_3 và tạo ảnh tại A_3' , mối quan hệ giữa khoảng cách đến đỉnh mặt cong, bán kính cong và chiết suất có dạng:

$$\left. \begin{aligned} s &= r \cdot \left(1 + \frac{n'}{n}\right) \\ s' &= r \cdot \left(1 + \frac{n}{n'}\right) \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

Điểm aplanat loại này cũng như cặp điểm A_1 và A_1' không gây cầu sai, coma và loạn thị. Sử dụng các đặc tính nói trên của các điểm aplanat và mối tương quan giữa chúng có thể tạo lên 4 loại thấu kính aplanat được thể hiện trên hình.



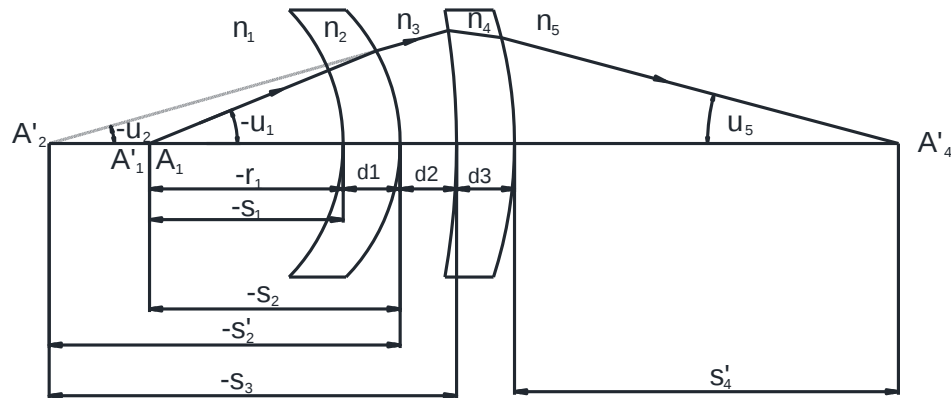
Hình 3.18. Thấu kính aplanat

Ở thấu kính loại B có bề mặt thứ nhất là mặt aplanat loại 3, còn mặt thứ hai là loại 2, độ phóng đại ngang $V=1/n$ nên thấu kính loại này làm tăng khẩu độ chùm tia. Thấu kính loại C cả hai mặt đều là mặt aplanat loại 2. Thấu kính

loại D cả hai bề mặt đều là mặt aplanat loại 3, độ phóng đại ngang của thấu kính loại C và loại D là $V=1$ nên không làm thay đổi khẩu độ chùm tia vào.

Thấu kính loại A có bề mặt thứ nhất là mặt aplanat loại 2 còn mặt thứ hai là mặt aplanat loại 3. Với thấu kính loại này khoảng cách làm việc bằng với bán kính cong mặt thứ nhất và có độ phóng đại ngang tương đối lớn $V=n$ nên khẩu độ chùm tia vào sau khi đi qua vật kính được giảm đi đáng kể. Nhược điểm của thấu kính loại này là bề mặt thứ nhất gây loạn thị và sắc sai. Nhưng do điểm cần quan sát qua vật kính hiển vi coi là vật điểm trên trục nên loạn thị ảnh hưởng không đáng kể, do đó chỉ có sắc sai. Do đó, ta chọn thấu kính thứ nhất là thấu kính aplanat loại A để tính toán, thiết kế.

Sơ đồ tạo ảnh của hệ hiển vi sử dụng thấu kính aplanat như sau:



Hình 3.19. Sơ đồ tạo ảnh của vật kính hiển vi

Dựa vào tính chất của các điểm aplanat, ta xây dựng công thức tính các thông số kết cấu của thành phần thứ nhất như sau:

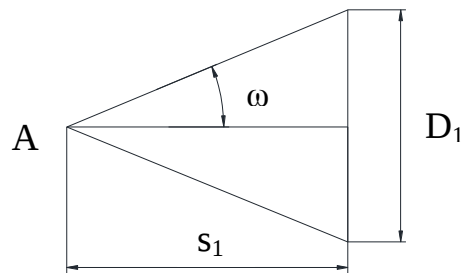
$$\left. \begin{aligned} r_1 &= -s_1; & r_2 &= \frac{1 - n_2}{n_2 \cdot S_{IV} + \frac{1 - n_2}{r_1}} \\ s_2 &= r_2 \cdot \frac{(1 + n_2)}{n_2}; & d_1 &= r_1 - s_2 \\ s'_2 &= n_2 \cdot s_2; & \beta_1 &= n_2 \end{aligned} \right\} \quad (3.13)$$

Trong đó: r_1, r_2 là các bán kính cong; d_1 là chiều dày dọc trục.

n_2 là chiết suất của thấu kính, với vật liệu là Germanium, có chiết suất $n_2 = 4,0038$.

s_1, s_2, s'_2 là khoảng cách từ vật đến các mặt khúc xạ; S_{IV} là hệ số petzval, $S_{IV} \approx 0$; β_1 là độ phóng đại ngang.

- Từ các thông số đã chọn: $NA = 0,45$, khoảng cách đặt vật s_1 được xác định theo hình 3: $s_1 = D_1/2 * \cotg \omega$. Trong đó: $D_1 = 9 \text{ mm}$, $NA = 1 * \sin \omega = 0,45 \rightarrow s_1 = 9 \text{ mm}$.



Hình 3.20. Sơ đồ xác định khoảng cách vật.

Ta tính được thông số của thấu kính thứ nhất như sau:

$$r_1 = r_2 = -9 \text{ mm}; d_1 = 2,248 \text{ mm}; n_2 = 4,0038; \beta_1 = 4,0038; s'_2 = -45,034 \text{ mm}$$

* *Tính toán thành phần thứ hai.*

Thành phần thấu kính thứ hai tạo ảnh thật đối với vật đặt cách thấu kính một khoảng $s_3 = s'_2 - d_2 = -46,034 \text{ mm}$ và có độ phóng đại ngang:

$$\beta_2 = \frac{\beta}{\beta_1} = \frac{-10}{4} = -2,5$$

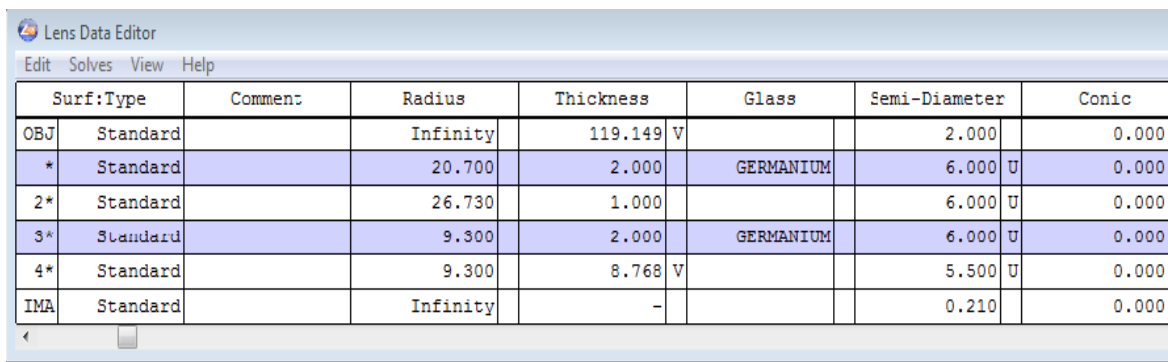
- Các công thức tính kích thước sơ bộ như sau:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{f'_2} &= \frac{1}{s'_3} - \frac{1}{s_3} \\ s_3 &= s'_2 - d_2 \\ \frac{s'_3}{s_3} &= \beta_2 = \frac{\beta}{\beta_1} = \frac{-10}{4} = -2,5 \\ n_4 &= n_2 = 4,0038 \end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

$$\frac{1}{f_2'} = (n_4 - 1) \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) + \frac{(n_4 - 1)^2 \cdot d_3}{n_4 \cdot r_3 \cdot r_4} \quad (3.15)$$

- Chọn các thông số: $d_2 = 1\text{mm}$; $d_3 = 2\text{mm}$, ta xác định được thông số của thấu kính thứ 2: $r_3 = -26,0\text{mm}$; $r_4 = -22,0\text{mm}$

Tối ưu các thông số của vật kính hiển vi trên phần mềm Zemax: Nhập các thông số vào phần mềm Zemax và chạy chương trình tối ưu, khi đó các thông số của 2 thấu kính sẽ được thay đổi một lượng nhỏ để bù trừ quang sai cho nhau, kết quả ta sẽ được HTQH của vật kính tối ưu thể hiện tại hình 3.21 và bảng 3.1.



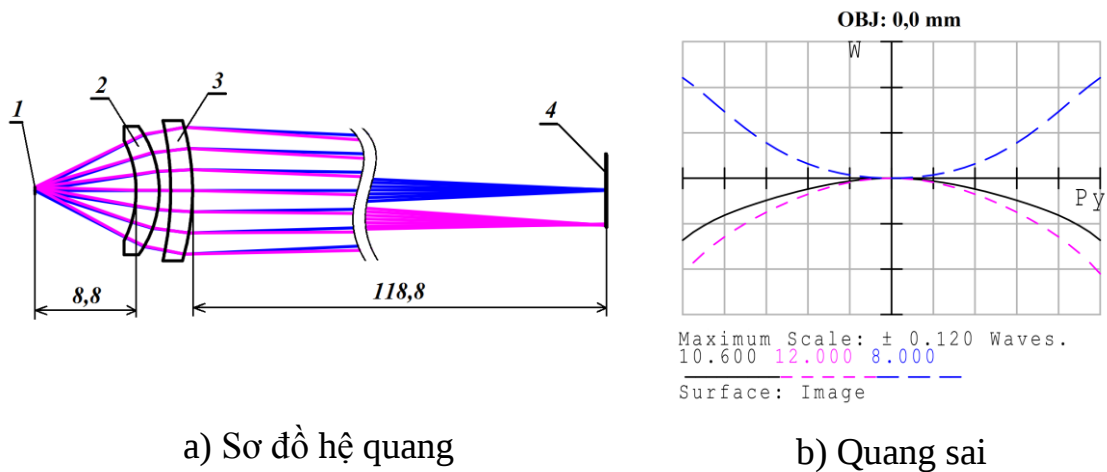
Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Conic
OBJ	Standard		Infinity	119.149	V	2.000	0.000
*	Standard		20.700	2.000	GERMANIUM	6.000	0.000
2*	Standard		26.730	1.000		6.000	0.000
3*	Standard		9.300	2.000	GERMANIUM	6.000	0.000
4*	Standard		9.300	8.768	V	5.500	0.000
IMA	Standard		Infinity	-		0.210	0.000

Hình 3.21. Thông số vật kính tối ưu trên phần mềm Zemax

Bảng 3.1. Các thông số kết cấu tối ưu của vật kính hiển vi

STT	Bán kính (mm)	Chiều dày (mm)	Vật liệu
Vật	Vô cùng	8,8	
1	- 9,3	2	Germanium
2	- 9,3	1	
3	- 26,73	2	Germanium
4	- 20,70	118,86	
Ảnh	Vô cùng		

Từ đó, kết quả tại hình 3.22 tính trên Zemax cho thấy quang sai của vật kính hiển vi có giá trị nhỏ hơn $0,1\lambda$, đạt yêu cầu đề ra. Từ các thông số này, luận án tiến hành dựng bản vẽ kỹ thuật và chế tạo vật kính hiển vi.



Hình 3.22. Sơ đồ HTQH và quang sai của vật kính

3.2.2. Chế tạo vật kính hiển vi

Trong những năm gần đây, công nghệ gia công quang học ở Việt Nam đã có những bước tiến bộ đáng kể, tuy nhiên việc gia công các vật liệu tinh thể thường dùng trong hệ thống quang học hồng ngoại như Ge, Si, ZnSe.. chưa được chú ý. Tại nhà máy chưa có quy trình chuẩn để gia công vật liệu làm việc trong vùng phổ hồng ngoại như Germanium. Vì vậy, để không chế được sai số gia công ở mức thấp nhất, tác giả tiến hành gia công từng thấu kính, sau đó thực hiện các phép đo để xác định thông số của thấu kính. Tiếp theo sẽ nhập kích thước thực của thấu kính này vào phần mềm thiết kế để điều chỉnh lại thông số của các thấu kính còn lại. Các sai số hình dạng của từng bề mặt làm việc của thấu kính được đo kiểm trên máy giao thoa kế ZYGO để đảm bảo không ảnh hưởng đến biến dạng mặt sóng của chùm bức xạ đi qua vật kính. Quy trình gia công các chi tiết quang học được thực hiện như sau:

- Bước 1: Gia công thấu kính thứ nhất.
- Bước 2: Đo kiểm, đánh giá các thông số từng mặt của nó sau khi gia công.
- Bước 3: Nhập thông số của thấu kính thứ nhất đã gia công vào phần mềm Zemax và tiếp tục tối ưu để xác định các thông số của thành phần thứ hai.
- Bước 4: Gia công thấu kính thứ hai.

Áp dụng quy trình trên, ta có kết quả đo các thông số của từng thấu kính sau khi gia công như sau:

** Kết quả đo các thông số của thấu kính thứ nhất:*

- Thông số kích thước là bán kính r và chiều dày d được đo trên thiết bị Super Spherotronic HR. Kết quả: $r_1 = 9,305 \text{ mm}$, $r_2 = 9,309 \text{ mm}$, $d_1 = 2,016 \text{ mm}$.

- Kết quả đo sai số gia công các mặt của thấu kính bằng thiết bị Zygo được tổng hợp ở bảng 3.3.

Ta nhận thấy, các thông số kích thước của thấu kính thứ nhất sau khi gia công có sai số nhỏ hơn 0,8%, sai số gia công các mặt nhỏ hơn $\lambda/10$.

Sau khi nhập các thông số kích thước thấu kính thứ nhất trước và sau khi đo vào phần mềm Zemax ta thấy quang sai của hệ thống hầu như không đổi. Do vậy, ta sẽ lấy các thông số kích thước của thấu kính thứ hai tiếp tục gia công ($r_3 = -26,73 \text{ mm}$, $r_4 = -20,7 \text{ mm}$, $d_3 = 2 \text{ mm}$).

** Kết quả đo các thông số của thấu kính thứ hai:*

- Kết quả đo bán kính và chiều dày: $r_3 = 26,735 \text{ mm}$, $r_4 = 20,711 \text{ mm}$, $d_2 = 2,014 \text{ mm}$.

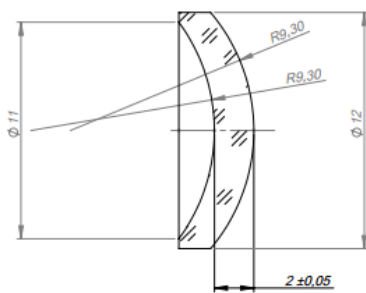
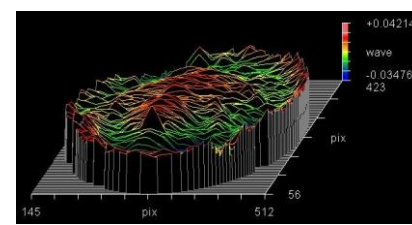
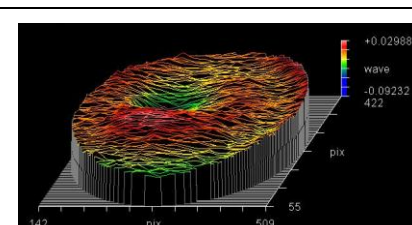
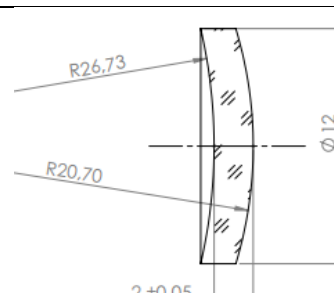
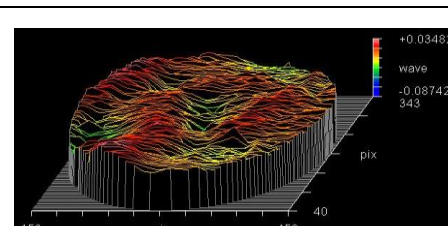
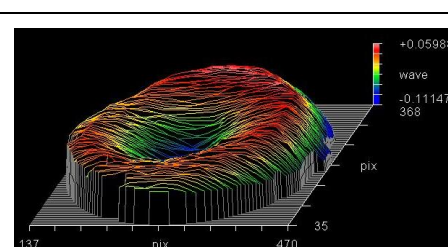
- Kết quả đo sai số gia công các mặt được thể hiện ở bảng 3.3.

Như vậy, ta có bảng tổng hợp kết quả các thông số của các thấu kính:

Bảng 3.2. Kết quả đo kiểm thông số kích thước của các thấu kính

STT	Bán kính (mm)			Chiều dày (mm)		
	Theo thiết kế	Thực tế đạt được	Sai số (%)	Theo thiết kế	Thực tế đạt được	Sai số (%)
Thấu kính 1	- 9,3	- 9,305	0,03%	2	2,016	0,8%
	- 9,3	- 9,309	0,1%			
Thấu kính 2	- 26,73	- 26,735	0,02%	2	2,014	0,7%
	- 20,70	- 20,711	0,05%			

Bảng 3.3. Kết quả đo sai số hình dạng các mặt của các thấu kính
(Đo trên giao thoa kế Verifire XP/D –ZYGO, bước sóng $\lambda_M = 632,8 \text{ nm}$)

Thấu kính thứ nhất			
		 Mặt lõm: PV = $0,077\lambda$; RMS = $0,012\lambda$	
		 Mặt lồi: PV = $0,122\lambda$; RMS = $0,013\lambda$	
Thấu kính thứ hai			
		 Mặt lõm: PV = $0,122\lambda$; RMS = $0,014\lambda$	
		 Mặt lồi: PV = $0,171\lambda$; RMS = $0,032\lambda$	

Để đánh giá ảnh hưởng của sai số hình dạng đến hoạt động của hệ thống quang học, cần đổi kết quả đo sang đơn vị bước sóng làm việc của hệ thống ảnh nhiệt $\lambda_{IR} = 10,6 \mu\text{m}$, theo công thức $PV_{IR} = PV_M \cdot \lambda_M / \lambda_{IR}$ (Bảng 3.4), trong đó PV_{IR} – ứng với bước sóng làm việc của hệ quang; PV_M – giá trị đo được từ giao thoa kế.

Bảng 3.4. Quy đổi sai số hình dạng sang bước sóng trung tâm trong vùng phổ làm việc của vật kính ($\lambda_{IR} = 10,6 \mu\text{m}$)

Bề mặt	Thấu kính 1		Thấu kính 2	
	PV (λ_{IR})	RMS (λ_{IR})	PV (λ_{IR})	RMS (λ_{IR})
Mặt lõm	0,0046	0,00072	0,0073	0,00084
Mặt lồi	0,0073	0,00078	0,010	0,00191

Kết quả ở bảng 3.2 cho thấy sai số hình dạng của các thấu kính tương đối nhỏ, ngoài ra sai số của thấu kính 1 đã được loại trừ nhờ hiệu chỉnh lại các thông số thiết kế của thấu kính 2.

Kết quả ở bảng 3.3, 3.4 cho thấy sai số hình dạng của các mặt khúc xạ của thấu kính nhỏ hơn 10 lần so với quang sai dư do quá trình thiết kế chưa khử hết. Vì vậy, có thể kết luận vật kính được thiết kế, chế tạo có sai số gia công hầu như không ảnh hưởng đến chất lượng hoạt động của chúng.

3.3. Kết luận

Chương 3 luận án đã thực hiện hai nội dung chính với kết quả như sau:

Luận án đã thiết kế, chế tạo thành công hệ chuẩn trực hoạt động trong vùng phổ $8\div 12 \mu\text{m}$ với các thông số: tiêu cự $f' = 1510 \text{ mm}$, đường kính đồng tử vào $D = 140 \text{ mm}$, quang sai mặt sóng của vật kính chuẩn trực nhỏ hơn $\lambda/10$ đáp ứng yêu cầu đo kiểm hệ thống quang học. Trong đó, tác giả đã sử dụng phương pháp tính ảnh hưởng của cơ cấu gá lắp đến quang sai mặt sóng của

gương cầu chuẩn trực để tối ưu kết cấu gá lắp và lực kẹp cụm gương đảm bảo chắc chắn nhưng chất lượng vẫn đạt yêu cầu sử dụng trong hệ đo kiểm.

Đồng thời, luận án đưa ra một quy trình mới, kết hợp giữa thiết kế, gia công, đo kiểm và hiệu chỉnh trong quá trình gia công để kiểm soát và hạn chế ảnh hưởng của sai số gia công tới chất lượng của vật kính hiển vi. Từ quy trình này, vật kính hiển vi được chế tạo hoạt động trong vùng phổ hồng ngoại từ 8-12 μm , với độ phóng đại $\beta = 10^x$ và sai số kích thước, hình dạng của các thấu kính rất nhỏ, có quang sai mặt sóng nhỏ hơn $\lambda/10$ đáp ứng yêu cầu đề ra.

Chương 4

CÁC KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

Chương 4 trình bày thử nghiệm đánh giá chất lượng hoạt động của các thành phần và toàn hệ thống mô hình thiết bị. Đồng thời, nghiên cứu thuật toán xử lý kết quả đo hàm LSF, MTF của HTQH ảnh nhiệt cần kiểm tra; phân tích, đánh giá kết quả và các yếu tố ảnh hưởng đến kết quả đo.

4.1. Kết quả hoạt động thực nghiệm của hệ chuẩn trực.

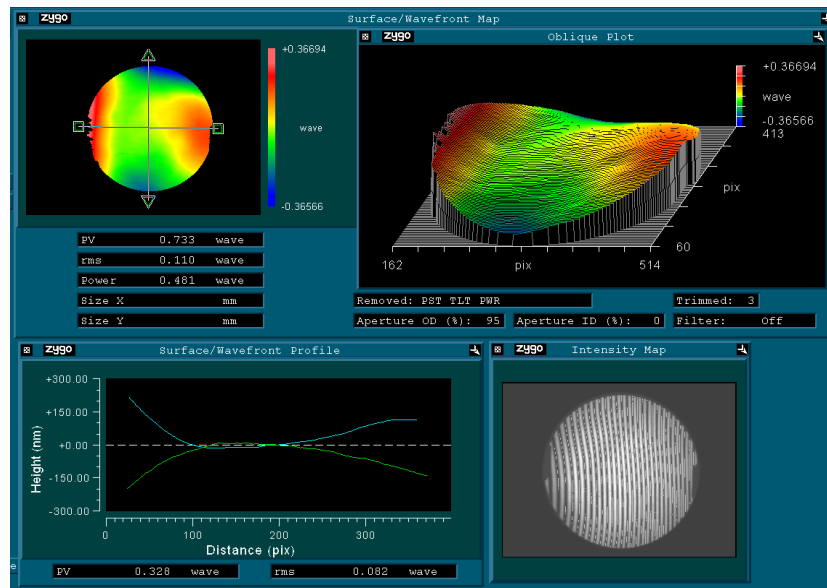
Để kiểm tra chất lượng hoạt động của hệ chuẩn trực, luận án tiến hành đo kiểm hai nội dung, đó là:

- Đo quang sai mặt sóng của ống chuẩn trực khi gá lắp thành hệ thống dưới tác dụng của lực gá kẹp $F = 48,4 \text{ N}$.
- Sử dụng hệ chuẩn trực để đánh giá chất lượng ảnh của ống kính ảnh nhiệt.

4.1.1. Đo quang sai mặt sóng của gương chuẩn trực

Để kiểm tra quang sai mặt sóng của gương chuẩn trực khi chịu lực gá kẹp ở chương 3 là $F = 48,4 \text{ N}$ có đạt yêu cầu đề ra hay không ($< \lambda/10$) ta cho ống chuẩn trực làm việc với giao thoa kế Verifire XP/D – ZYGO. Giao thoa kế này sử dụng chùm tia đo từ laser He-Ne có bước sóng $\lambda_m = 0,6328 \mu\text{m}$, không phải vùng hồng ngoại. Từ kết quả đo được, ta thực hiện quy đổi các giá trị đo được sang bước sóng hồng ngoại $\lambda_{\text{IR}} = 10,6 \mu\text{m}$ bằng cách nhân với hệ số tỷ lệ $k = \lambda_m / \lambda_{\text{IR}}$.

Các đồ thị sai sóng được trích từ phần mềm xử lý ảnh giao thoa được thể hiện trên hình 4.1. So sánh với hình 3.6b, có thể thấy bản đồ sai sóng của ống chuẩn trực từ đo kiểm thực nghiệm có phân bố tương đương với giá trị thiết kế.



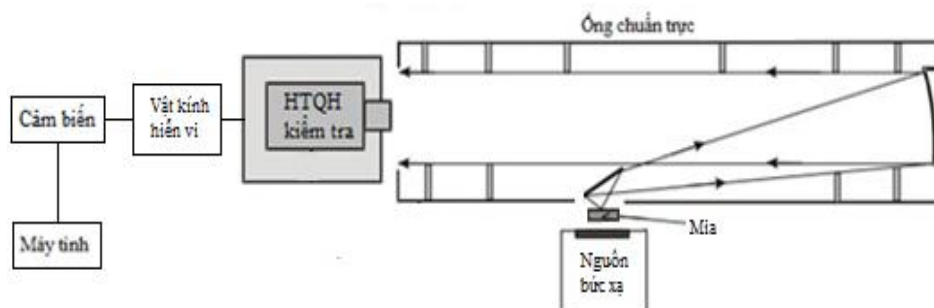
Hình 4.1. Bản đồ sai sóng của ống chuẩn trực đo bằng giao thoa kế Zygo

Tại $\lambda = 0,6328 \mu\text{m}$ ta có: $PV = 0,733\lambda$; $RMS = 0,11\lambda$. Quy đổi sang bước sóng $10,6 \mu\text{m}$: $PV = 0,044\lambda$; $RMS = 0,066\lambda$, giá trị quang sai mặt sóng rất nhỏ ($\approx \lambda/20$), đáp ứng yêu cầu sử dụng trong đo kiểm quang học.

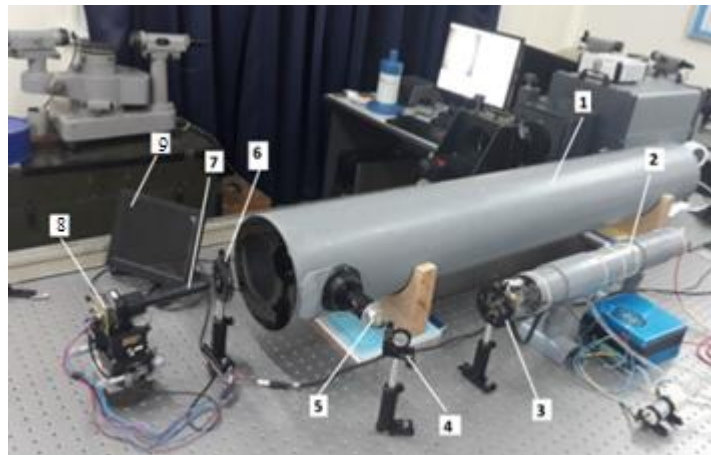
4.1.2. Kết quả thu nhận ảnh của lỗ có kích thước nhỏ tạo bởi vật kính ảnh nhiệt

Để thu nhận và đánh giá chất lượng ảnh của vật kính ảnh nhiệt, ta cho vật kính làm việc với vật mẫu có dạng lỗ nhỏ đường kính $25 \mu\text{m}$ và tiến hành thu nhận ảnh của chúng để đánh giá – Đây chính là hình ảnh hàm nhòe điểm PSF của vật kính.

Sơ đồ hệ thống đo kiểm được thể hiện tại hình 4.2:



a) Sơ đồ nguyên lý

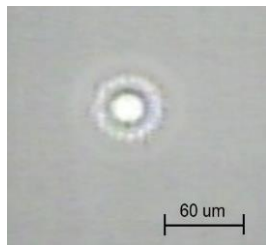


b) Mô hình thiết bị

Hình 4.2. Sơ đồ và mô hình thiết bị thu nhận ảnh của vật kính FLIR

1. Ống chuẩn trực; 2. Laser CO₂; 3. Thấu kính giãn chùm; 4. Gương phản xạ; 5. Mía dạng lỗ tròn; 6. Vật kính ảnh nhiệt; 7. Vật kính hiển vi; 8. Cảm biến ảnh nhiệt; 9. Màn hình.

Kết quả thu nhận ảnh của vật mẫu qua hệ thống được thể hiện trên hình 4.3a - 4.3c tương ứng với hình ảnh của các vết nhiễu xạ được chụp tại ba vị trí trên thị giới của ống kính.



a)



b)



c)

Hình 4.3. Kết quả đo kiểm vật kính ảnh nhiệt

a), b), c). Hình ảnh vết nhiễu xạ tại các vị trí: trung tâm thị giới; 1/2 thị giới; rìa thị giới.

Tại vị trí trung tâm, vết tròn đều, thấy rõ các vòng nhiễu xạ, chứng tỏ ống kính được khử quang sai rất tốt; tại các vị trí khác vết bị méo, độ méo tăng dần từ trung tâm ra ngoài biên thị giới, nguyên nhân là do hệ làm việc với tia ngoài trục nên xuất hiện quang sai làm giảm chất lượng ảnh. Điều này chứng tỏ hệ

thống đo kiểm hoạt động tốt, đã phát hiện được sự suy giảm chất lượng ảnh của vật kính được thử nghiệm.

4.2. Kết quả thử nghiệm hoạt động của vật kính hiển vi.

Các thông số từng thành phần của vật kính hiển vi đã trình bày ở chương 3 được kiểm soát để hạn chế sai số đến mức thấp nhất, các sai số sau khi gia công hầu như không ảnh hưởng đến chất lượng hoạt động của vật kính.

Để kiểm tra hoạt động của vật kính hiển vi, ta tiến hành hai nội dung:

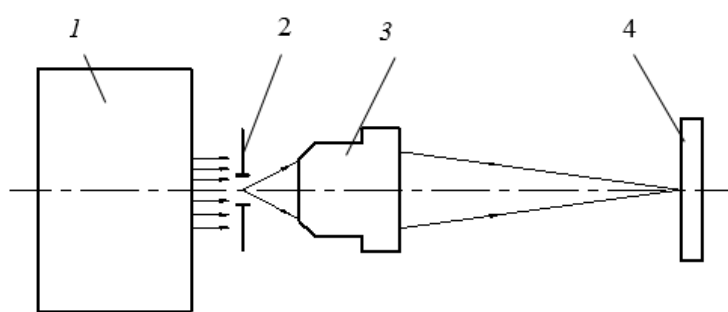
- Kiểm tra độ phóng đại bằng hoạt động thực nghiệm tạo ảnh của của vật kính hiển vi.

- Kết quả thu nhận ảnh của lỗ có kích thước nhỏ tạo bởi vật kính hiển vi.

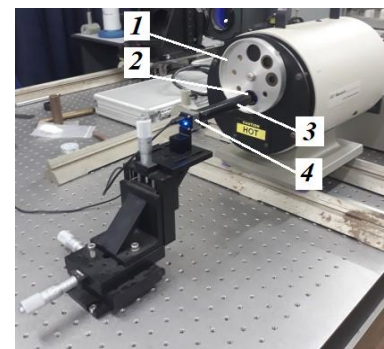
4.2.1. Kiểm tra độ phóng đại của vật kính hiển vi

Để kiểm tra độ phóng đại của vật kính hiển vi, phương pháp thực hiện là ghép vật kính với một cảm biến ảnh nhiệt thành một hệ kính hiển vi hồng ngoại và quan sát một vật mẫu là lỗ nhỏ có đường kính $D = 317,5 \mu\text{m} = 0,3175 \text{ mm}$.

Sơ đồ thử nghiệm được thể hiện ở hình 4.4, trong đó luận án sử dụng vật đen tuyệt đối làm nguồn phát bức xạ hồng ngoại; cảm biến ảnh nhiệt FLIR Boson 320, pixel Pitch = $12 \mu\text{m} = 0,012 \text{ mm}$, Thermal Sensitivity: 50 mK.



a)

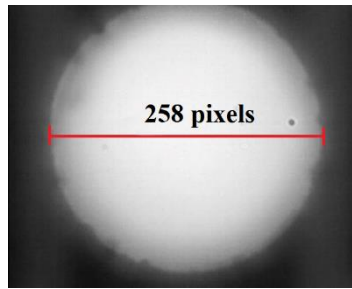


b)

Hình 4.4. Sơ đồ đo kiểm hoạt động của vật kính hiển vi hồng ngoại

a) Sơ đồ nguyên lý; b) Sơ đồ bố trí thực tế

1. Vật đen tuyệt đối; 2. Vật mẫu; 3. Vật kính hiển vi; 4. Cảm biến



Hình 4.5. Ảnh của lỗ nhỏ có đường kính 0,3175 mm

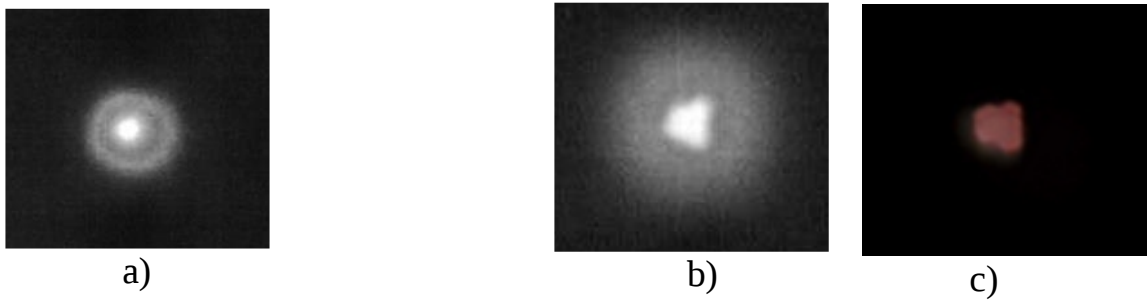
Với cách bố trí sơ đồ như trên, kết quả hình ảnh lỗ thu nhận được hiển thị trên máy tính được thể hiện ở hình 4.5. Đường kính của lỗ trên ảnh chiếm 258 pixels tương ứng với khoảng cách là $y' = 258 \cdot 0,012 = 3,096$ mm, như vậy:

$$\text{Độ phóng đại: } \beta = \frac{y'}{y} = \frac{3,096}{0,3175} = 9,75.$$

Từ đây, ta sẽ lấy $\beta = 9,75$ làm giá trị độ phóng đại của vật kính hiển vi để tính toán các bước tiếp theo.

4.2.2. Kết quả thu nhận ảnh của lỗ có kích thước nhỏ tạo bởi vật kính hiển vi.

Để khẳng định chất lượng tạo ảnh của vật kính bằng thực nghiệm, phương pháp thông thường là sẽ đo quang sai mặt sóng của chùm tia đi qua nó. Phương pháp chính xác nhất hiện nay để đo quang sai mặt sóng là sử dụng giao thoa kế (Giao thoa kế Fizeau, giao thoa kế dịch chuyển...) [48], hoặc sử dụng phương pháp Shark-Hartmann [53]. Tuy nhiên, hiện nay các thiết bị có sẵn theo các phương pháp này chỉ sử dụng được với vùng phổ nhìn thấy hoặc hồng ngoại gần, với vùng phổ từ 8-12 μm vẫn chưa có thiết bị thương mại nào đo được. Vì vậy, luận án buộc phải đánh giá quang sai mặt sóng thông qua thử nghiệm hoạt động tạo ảnh của nó. Phương pháp này cũng được bố trí như sơ đồ hình 4.4, sau đó sử dụng kính hiển vi quan sát và thu nhận ảnh một số vật mẫu có kích thước 10 μm và 25 μm để tiến hành phân tích, đánh giá. Kết quả hình ảnh của các vật mẫu nhận được thể hiện ở hình 4.6:



Hình 4.6. Hình ảnh quan sát các lỗ nhỏ

a) Ảnh của lỗ 10 μm ; b), c) Ảnh của lỗ 25 μm khi làm việc trong vùng hồng ngoại và vùng nhìn thấy.

Từ kết quả trên ta nhận thấy:

- Đối với lỗ có đường kính 10 μm , lỗ này có kích thước chỉ tương đương bước sóng làm việc của vật kính hiển vi nên ta có thể coi nó là một điểm sáng, nếu hệ quang không có quang sai (hoặc quang sai rất nhỏ) thì theo lý thuyết nhiễu xạ [54], ảnh thu được sẽ là một đốm sáng tròn có cường độ năng lượng tập trung ở trung tâm và giảm dần về phía ngoài. Kết quả thực nghiệm ở hình 4.6a nhận được ảnh là một đốm sáng hình tròn tương ứng với lý thuyết. Như vậy, chất lượng vật kính hiển vi đạt giới hạn nhiễu xạ.

- Đối với lỗ có kích thước 25 μm : Lỗ này có kích thước lớn hơn bước sóng làm việc của vật kính hiển vi nên các hiệu ứng hình học đã được thể hiện (hình 4.6b), hình dạng và các chi tiết của lỗ được dựng lại trung thực, giống như khi quan sát trong ánh sáng nhìn thấy (hình 4.6c). Điều này chứng tỏ vật kính hiển vi có chất lượng tốt.

4.3. Ứng dụng mô hình thiết bị đo hàm LSF, MTF của một số mẫu vật kính ảnh nhiệt.

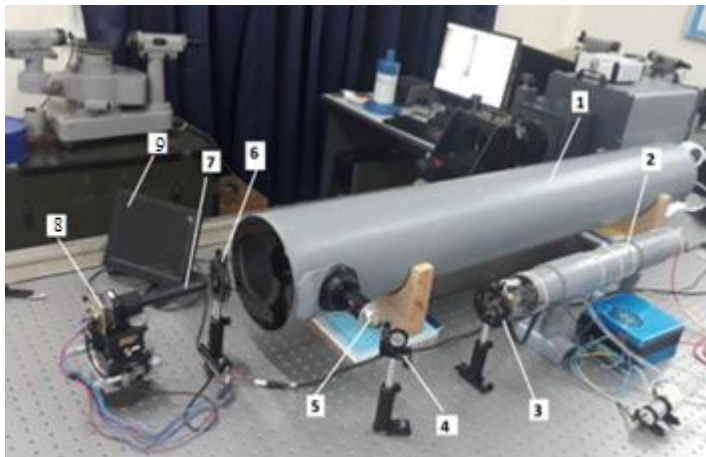
Thông qua các bước kiểm tra hoạt động thực nghiệm đã chứng tỏ hệ chuẩn trực và vật kính hiển vi hoạt động có chất lượng tốt. Với mục tiêu xây dựng một mô hình thiết bị hoàn chỉnh, luận án tiến hành lắp ráp các thành phần

thành một hệ thống để kiểm tra, đánh giá chất lượng ảnh của HTQH hoạt động trong vùng phổ $8\div 12\text{ }\mu\text{m}$ với hai nội dung, đó là:

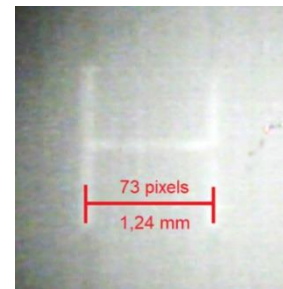
- Đo tiêu cự của một mẫu vật kính ảnh nhiệt.
- Đo hàm nhòe đường LSF, hàm truyền điều biến MTF của một số mẫu vật kính ảnh nhiệt.

4.3.1. Đo tiêu cự của vật kính ảnh nhiệt.

Sơ đồ thiết bị đo tiêu cự của vật kính mẫu được thể hiện ở hình 4.7, sơ đồ này cơ bản giống sơ đồ ở hình 4.2 chỉ khác nhau hình dạng của mĩa số 5 phục vụ cho mục đích đo kiểm khác nhau.



a) Sơ đồ đo tiêu cự



b) Ảnh của mĩa chữ H

Hình 4.7. Sơ đồ đo tiêu cự của vật kính ảnh nhiệt và ảnh của mĩa chữ H

1. Ống chuẩn trực; 2. Laser CO₂; 3. Thấu kính giãn chùm; 4. Gương phản xạ; 5. Mĩa chữ H; 6. Ống kính ảnh nhiệt; 7. Vật kính hiển vi; 8. Cảm biến; 9. Màn hình.

Các thành phần của hệ thống đo bao gồm:

- Ống kính ảnh nhiệt FLIR cần kiểm tra (6) có tiêu cự $f' = 19\text{ mm}$, F1.2.
- Cảm biến ảnh nhiệt FLIR (9) để thu nhận ảnh có kích thước 640×480 , pixel Pitch $p = 17\text{ }\mu\text{m} = 17 \cdot 10^{-3}\text{ mm}$.
- Vật kính hiển vi (7) có độ phóng đại $\beta = 9,75\times$.

- Nguồn phát bức xạ laser CO₂ làm nguồn bức xạ cho hệ chuẩn trực vì laser CO₂ phát ra ánh sáng hồng ngoại có bước sóng 10,6 μm trùng với bước sóng trung tâm của dải phổ 8-12 μm và chúng có độ đơn sắc cao.

Bảng 4.1. Bảng các thông số kỹ thuật chính của laser CO₂

TT	Thông số kỹ thuật chính	Giá trị
1	Bước sóng	10,6 μm
2	Chiều dài	700 mm
3	Đường kính ngoài	50 mm
4	Đường kính chùm tia	≤ 3 mm
5	Điện áp khởi động	14-15 kv
6	Điện áp hoạt động	10 – 10,5 kv
7	Làm mát	Bằng nước

Với các thành phần đã lựa chọn, ta tiến hành gá lắp, hiệu chỉnh các thành phần thành một hệ đo kiểm hoàn chỉnh được thể hiện ở hình 4.7. Phương pháp đo tiêu cự được thực hiện theo phương pháp độ phóng đại, sử dụng mĩa có dạng chữ H với kích thước ngang $y = 10 \text{ mm}$ đặt tại vị trí (5) của sơ đồ.

Khi đó, ảnh của mĩa hình chữ H do ống kính ảnh nhiệt FLIR tạo ra được phóng đại bởi vật kính hiển vi có độ phóng đại $\beta = 9,75^x$, và được thu nhận bởi cảm biến và hiển thị trên màn hình máy tính (Hình 4.7b).

Số điểm ảnh giữa hai cạnh của mĩa chữ H là $n = 73$ pixel hay khoảng cách giữa chúng là $y' = 73 \cdot 0,017 = 1,241 \text{ mm}$.

Từ đó, tiêu cự của ống kính là:

$$f' = \frac{f'_c \cdot y'}{\beta \cdot y} = \frac{1510 \cdot 1,241}{9,75 \cdot 10} = 19,2 \text{ mm}$$

*** Các yếu tố ảnh hưởng đến độ chính xác của phép đo tiêu cự:**

$$\text{Từ công thức: } f' = \frac{f'_c \cdot y'}{\beta \cdot y} \quad (4.1)$$

Vì phân hai vế và chia cho f' , ta có sai số tương đối của phép đo là:

$$\frac{df'}{f'} = \left| \frac{df'_c}{f'_c} \right| + \left| \frac{d\beta}{\beta} \right| + \left| \frac{dy}{y} \right| + \left| \frac{dy'}{y'} \right| \quad (4.2)$$

Các thành phần trong công thức (4.4) chính là các yếu tố ảnh hưởng đến kết quả đo tiêu cự, cụ thể như sau:

- Ảnh hưởng của ống chuẩn trực:

Do có sai số trong việc chế tạo nên tiêu cự của ống chuẩn trực sẽ không như thiết kế ban đầu, sai số này cũng bị ảnh hưởng đến kết quả đo tiêu cự. Giá trị tiêu cự sau khi gia công đã được xác định ở chương ba đó là: $f' = 1510 \pm 2$

mm. Nghĩa là, sai số tương đối của ống chuẩn trực là: $\frac{df'_c}{f'_c} = \frac{2}{1510} = 0,13\%$

- Ảnh hưởng của vật kính hiển vi:

Độ phóng đại của vật kính hiển vi sau 5 lần đo là: $\beta = 9,75 \pm 0,15$.

Do vậy, sai số tương đối là: $\frac{d\beta}{\beta} = \frac{0,15}{9,75} = 1,5\%$

- Ảnh hưởng của việc gia công, chế tạo mĩa chữ H:

Việc gia công, chế tạo mĩa hình chữ H được thực hiện tại nhà máy Z191-Tổng cục CNQP có độ chính xác cao, thông thường sai số này cỡ micromet.

Do vậy: $\frac{dy}{y} = \frac{0,01}{10} = 0,1\%$

- Ảnh hưởng của việc xác định khoảng cách ảnh y' :

Việc xác định y' bằng cách tính số pixel trên đoạn thẳng nối giữa hai cạnh của ảnh mĩa chữ H, sai số tính y' được chọn là giá trị của 1pixel, nghĩa là:

$dy' = 1\text{pixel} = 0.017 \text{ mm}$. Từ đó: $\frac{dy'}{y'} = \frac{0,017}{1,241} = 1,37\%$

Do đó, ta có sai số tương đối của phép đo tiêu cự là:

$$\frac{df'}{f'} = \left| \frac{df'_c}{f'_c} \right| + \left| \frac{d\beta}{\beta} \right| + \left| \frac{dy}{y} \right| + \left| \frac{dy'}{y'} \right|$$

$$\frac{df'}{f'} = 1,5\% + 0,13\% + 0,1\% + 1,37\% = 3,1\%$$

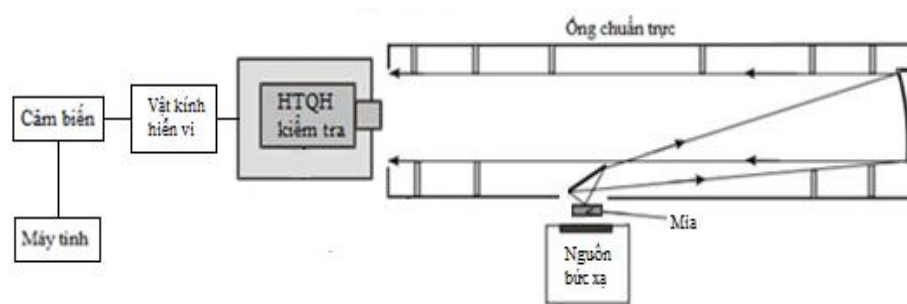
Với kết quả đo tiêu cự $f' = 19,2$ mm thì sai số so với công bố của nhà sản xuất ($f' = 19$ mm) là 1% nằm trong giới hạn cho phép.

Như vậy, mô hình thiết bị dùng để đo tiêu cự có kết quả tin cậy, phù hợp với công bố của nhà sản xuất.

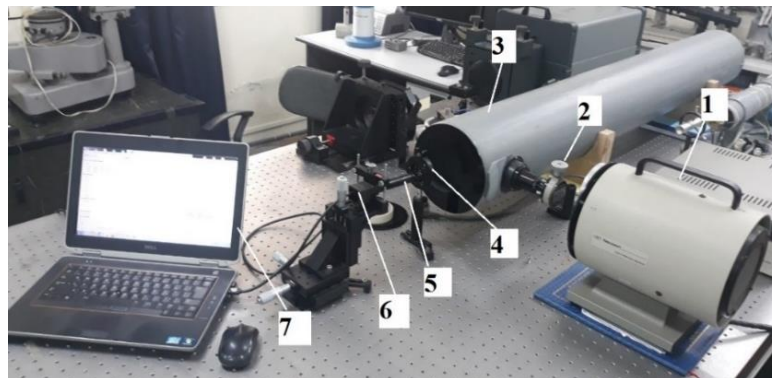
4.3.2. Đo hàm nhòe đường LSF, hàm truyền điều biến MTF

4.3.2.1. Mô hình thiết bị đo.

Mô hình thực nghiệm đo hàm nhòe đường LSF, hàm truyền điều biến MTF được luận án bố trí như hình 4.8:



a) Sơ đồ nguyên lý



b) Mô hình thiết bị

Hình 4.8. Sơ đồ và mô hình thử nghiệm hoạt động của hệ thống

1. Nguồn bức xạ; 2. Vật mẫu; 3. Ống chuẩn trực; 4. Vật kính cần kiểm tra; 5. Vật kính hiển vi; 6. Cảm biến; 7. Máy tính.

*** Các thành phần trong mô hình thiết bị:**

1. Nguồn bức xạ: Là vật đen tuyệt đối Oriel 67000 của hãng Newport (Mỹ) với thông số kỹ thuật như sau:

- Có khả năng làm nóng đồng nhất trong phạm vi nhiệt độ 50°C đến 1200°C.
- Tích hợp 7 vị trí khẩu độ cho phép điều chỉnh kích thước khẩu độ với đường kính 15,2; 10,2; 5,1; 2,5; 1,3; 0,64 và 0,32 mm.

2. Vật mẫu là khe sáng có thể điều chỉnh được kích thước, thuận tiện trong quá trình thu nhận ảnh hàm nhòe đường LSF của vật kính cần kiểm tra.

3. Hệ chuẩn trực: Đã được thiết kế, chế tạo, hoạt động có chất lượng tốt.

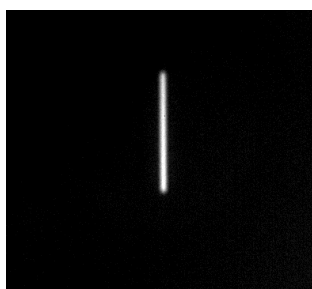
4. Vật kính hiển vi: Đã được thiết kế và chế tạo có chất lượng tốt.

5. Cảm biến ảnh nhiệt: Là cảm biến PICO640GEN2 của hãng Lynred (Pháp) có kích thước 640x480 pixel, kích thước mỗi pixel $p = 17 \mu\text{m}$, độ nhạy nhiệt $< 40 \text{ mK}$, dải nhiệt độ hoạt động: $[-40^\circ\text{C}; +85^\circ\text{C}]$. Đặc biệt, đây là cảm biến chuyên dụng tích hợp phần mềm cho phép điều chỉnh các thông số hiển thị để thu nhận ảnh với chất lượng tốt nhất, phục vụ cho việc phân tích, đánh giá chất lượng ảnh.

6. Máy tính hiển thị và xử lý kết quả.

*** Nguyên lý hoạt động của mô hình thử nghiệm:**

Khi hoạt động, nguồn bức xạ từ vật đen tuyệt đối chiếu vào vật mẫu, thông qua hệ chuẩn trực, vật kính cần kiểm tra và vật kính hiển vi thì ảnh của vật mẫu thu được trên cảm biến sẽ có dạng là một vạch sáng.



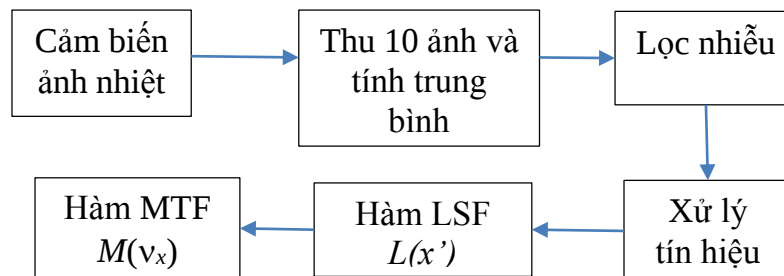
Hình 4.9. Ảnh của vật mẫu

Điều chỉnh các thông số hiển thị trên phần mềm để thu được ảnh có chất lượng tốt nhất ta thu được ảnh của vật mẫu có dạng như hình 4.9, trong đó năng lượng bức xạ được phân bố tập trung ở trung tâm và cường độ năng lượng giảm dần ở hai bên.

Về mặt lý thuyết, từ ảnh này ta có thể tạo mặt cắt ngang để thu được hàm nhòe đường LSF, từ đó biến đổi Fourier để thu được hàm truyền MTF của vật kính cần kiểm tra. Tuy nhiên, dù chất lượng có tốt thì ảnh của vật mẫu hiện tại vẫn bị ảnh hưởng bởi nhiễu của hệ thống, nếu ta dùng nó để tính hàm LSF, MTF sẽ ảnh hưởng đến độ chính xác của kết quả đo. Vì vậy, luận án phải tiến hành xây dựng thuật toán xử lý ảnh, kết hợp với các bước tính toán toán học để xác định hàm LSF, MTF của vật kính cần kiểm tra để kết quả chính xác hơn.

4.3.2.2. Thuật toán xử lý ảnh của HTQH ảnh nhiệt

Quy trình xử lý ảnh và kết quả đo hàm LSF, MTF được thể hiện ở hình 4.10:

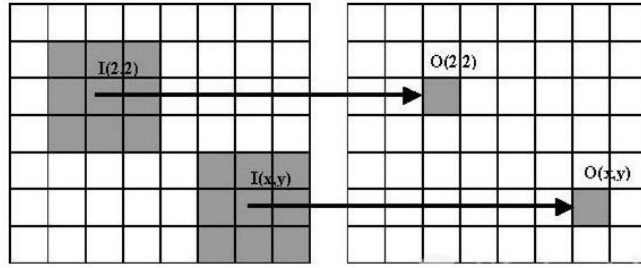


Hình 4.10. Quy trình xử lý kết quả đo hàm LSF, MTF

Trước tiên, cảm biến sẽ chụp 10 ảnh của vật mẫu và tính giá trung bình tại các điểm ảnh tương ứng trên 10 ảnh này để lấy ra ảnh cuối cùng có dạng như hình 4.9. Mục đích của bước này là để tăng tỷ số tín/tạp của tín hiệu cần xử lý, khi đó chất lượng của tín hiệu có ích cần thu nhận sẽ tăng lên so với trường hợp chỉ chụp một ảnh của vật mẫu.

Tuy nhiên, chất lượng tín hiệu đầu vào của ảnh khi đó vẫn bị ảnh hưởng bởi các tín hiệu nhiễu, nhiễu này chủ yếu dạng đốm và có tần số cao. Do vậy, để ảnh có chất lượng tốt hơn, ta phải thực hiện lọc nhiễu bằng bộ lọc thông thấp

với mục đích lọc tín hiệu có tần số cao và cho qua những tín hiệu có tần số thấp. Nguyên tắc của phương pháp này là cho ma trận ảnh nhân với một ma trận lọc dạng cửa sổ có kích thước 3x3[55]. Việc nhân ảnh với ma trận lọc giống như việc trượt ma trận lọc theo hàng trên ảnh và nhân với từng vùng của ảnh, cộng các kết quả lại tạo thành kết quả của điểm ảnh trung tâm (Hình 4.11).



Hình 4.11. Mô tả phương pháp lọc nhiễu của ảnh

Ma trận đầu vào I được nhân với ma trận lọc để tạo thành ma trận đầu ra O. Sau khi qua bước này, ảnh đầu ra sẽ mịn hơn và chất lượng được tăng lên khá nhiều.

Bước tiếp theo, từ ảnh này hàm nhòe đường LSF được xác định bằng cách cắt một đường vuông góc với ảnh khe sáng. Đồ thị hàm LSF khi đó sẽ có dạng một cực đại trung tâm và giảm dần ở hai bên (Hình 4.12a). Ngoài ra, hàm LSF này được vật kính hiển vi phóng đại 10 lần, và thực chất hàm LSF ta cần xác định là hàm LSF tại vị trí mặt phẳng ảnh của vật kính cần kiểm tra. Do vậy, tại bước xử lý dữ liệu, hàm LSF tại cảm biến phải được thu nhỏ kích thước 10 lần (tương ứng với kích thước mỗi điểm ảnh 1.7 μm), đồng thời quy đổi về hàm LSF tại mặt phẳng ảnh của HTQH cần kiểm tra bằng mối quan hệ giữa tín hiệu đầu vào và đầu ra như sau [56]:

$$V_{out} = c_1 \Phi_{in}^{\gamma} + c_2 \quad (4.3)$$

Ở đây: Φ_{in} : Tín hiệu đầu vào; V_{out} : Tín hiệu đầu ra; γ : Hệ số hiệu chỉnh Gamma; c_1 : Hằng số, $c_1 = 1$; c_2 : Hệ số hiệu chỉnh.

Vì vậy:
$$(V_{out} - c_2) = c_1 \Phi_{in}^{\gamma}$$

Trong trường hợp này: $V_{out} = LSF_{cambien}$ và $\Phi_{in} = LSF_{HTQH}$

Do đó ta có:

$$(LSF_{cambien} - c_2) = (LSF_{HTQH})^\gamma \quad (4.4)$$

Ở đây: $\gamma = 0,7$ (theo công bố của nhà sản xuất).

$LSF_{cambien}$: LSF của HTQH tại cảm biến.

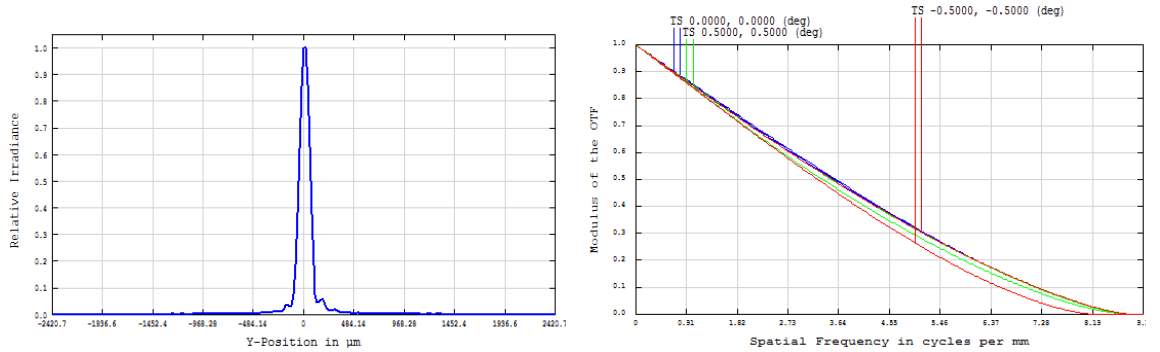
LSF_{HTQH} : LSF của HTQH tại mặt phẳng ảnh.

Từ đó:

$$LSF_{HTQH} = (LSF_{cambien} - c_2)^{\frac{1}{\gamma}} = (LSF_{cambien} - c_2)^{\frac{1}{0,7}} = (LSF_{cambien} - c_2)^{1,4} \quad (4.5)$$

Từ đó, hàm truyền MTF được xác định bằng biến đổi Fourier của hàm LSF_{HTQH} (Hình 4.12b):

$$MTF = \left| F[LSF_{HTQH}] \right| \quad (4.6)$$



a. Hàm nhòe đường LSF

b. Hàm truyền điều biến MTF

Hình 4.12. Minh họa mối quan hệ giữa hàm LSF và hàm MTF

4.3.2.3. Kết quả đo hàm LSF, MTF:

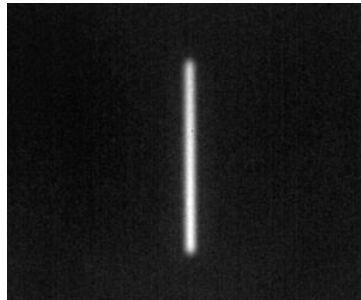
Với mô hình thiết bị kiểm tra hệ quang ảnh nhiệt và thuật toán xử lý kết quả ở trên. Để kiểm tra chất lượng hoạt động của mô hình thiết bị, luận án tiến hành chọn hai mẫu vật kính ảnh nhiệt đã có thông số các hàm LSF, MTF, từ đó làm cơ sở so sánh, đối chiếu với kết quả đo hàm LSF, MTF của hệ thống. Các thông số cơ bản của hai vật kính như sau:

Bảng 4.2. Thông số của các mẫu vật kính cần kiểm tra

	Vật kính 1	Vật kính 2
Tiêu cự	100	19
Khẩu độ tương đối	F1.0	F1.25
Hãng sản xuất	Wavelength Opto-electronic	Flir

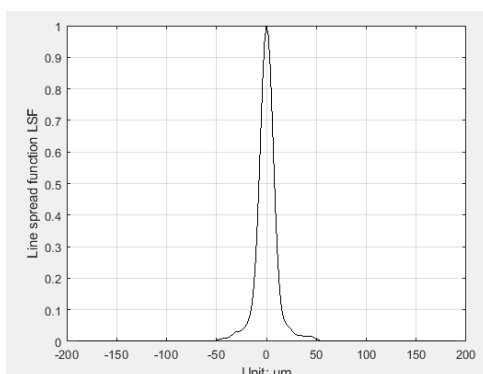
a) Kết quả đo kiểm vật kính thứ nhất:

Tiến hành lắp vật kính thứ nhất vào mô hình thiết bị, khi đó ảnh của vật mẫu thu được sau khi qua hệ thống có dạng hình 4.13.

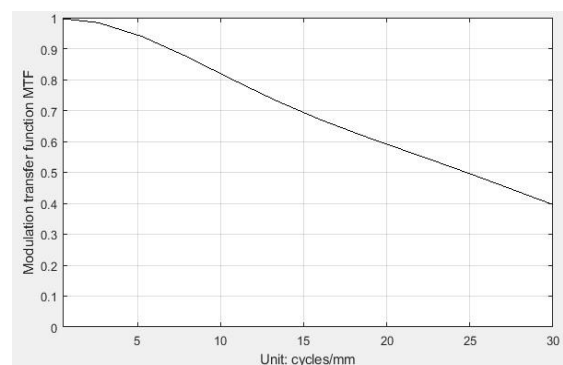


Hình 4.13. Ảnh của vật mẫu khi thử nghiệm với vật kính thứ nhất

Từ thuật toán được viết trên phần mềm Matlab, ta xác định được hàm LSF, MTF như hình 4.14.



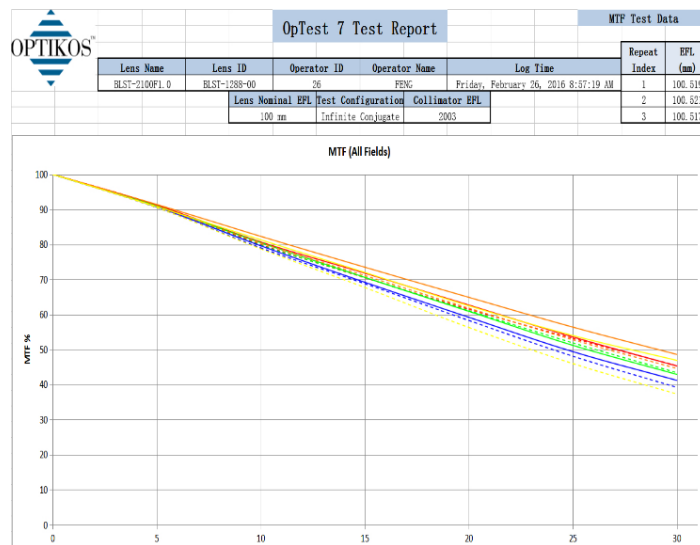
a. Hàm nhòe đường LSF



b. Hàm truyền điều biến MTF

Hình 4.14. Kết quả thực nghiệm đo hàm LSF, MTF của vật kính thứ nhất.

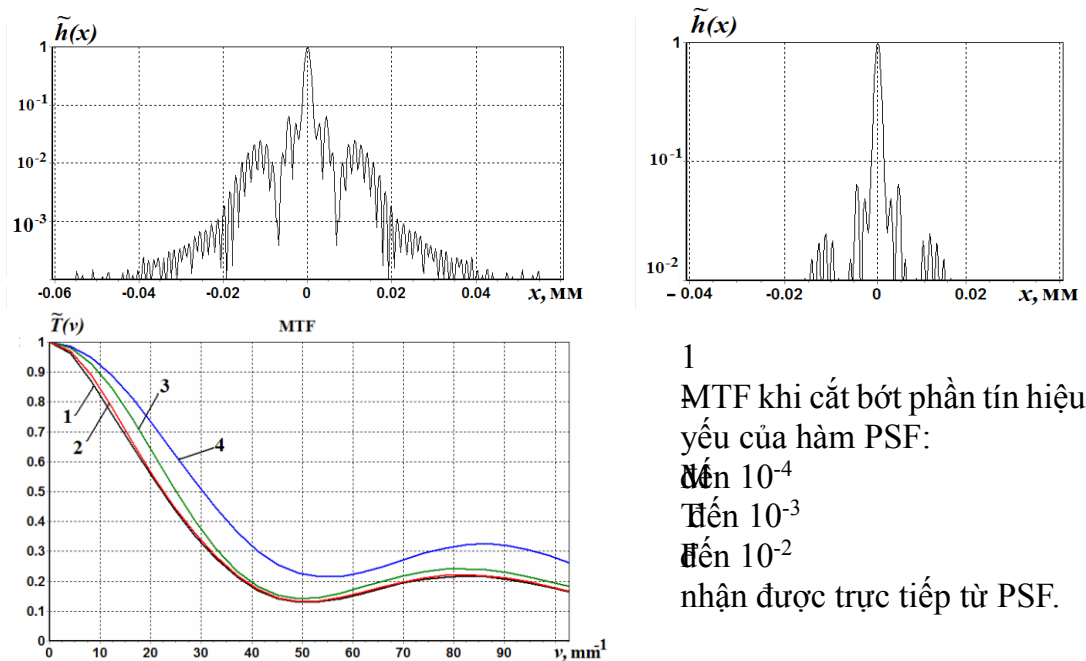
Ta có, hàm MTF được công bố bởi nhà sản xuất thể hiện ở hình 4.15:



Hình 4.15. Hàm MTF theo công bố của nhà sản xuất

So sánh kết quả đo hàm MTF thực nghiệm và hàm MTF của nhà sản xuất ta nhận thấy: Các giá trị hàm MTF thực nghiệm có hình dạng khá tương đồng, giá trị tương đối sát với hàm MTF của nhà sản xuất. Riêng đoạn đầu đường cong ứng với dải tần số thấp ($\nu_x \leq 10$ lp/mm), độ tương phản đo được cao so với MTF của nhà sản xuất. Điều này do dải động của cảm biến ảnh nhiệt chưa đủ để ghi nhận những tín hiệu yếu dẫn đến dữ liệu tính toán hàm MTF chưa đầy đủ nên có sự sai khác ở vùng này.

Đối với nội dung này đã có nghiên cứu chỉ ra rằng, dải động của cảm biến là yếu tố rất quan trọng, có ảnh hưởng lớn đến kết quả đo hàm MTF [1]. Khi cảm biến có dải động lớn, có khả năng thu nhận những tín hiệu yếu thì đồ thị hàm MTF càng thấp xuống và ngược lại khi cảm biến không thu được những tín hiệu yếu nghĩa là các tín hiệu này bị cắt đi thì hàm MTF càng cao lên.



Hình 4.16. Ảnh hưởng của phạm vi đo PSF đến kết quả đo hàm MTF

Hình 4.16 thể hiện kết quả hàm MTF tương ứng trong bốn trường hợp tín hiệu khi bị cắt ở các giá trị khác nhau, tín hiệu càng bị cắt nhiều thì đồ thị hàm MTF càng cao lên. Điều này chứng tỏ dải động của cảm biến có ảnh hưởng lớn đến kết quả đo hàm MTF. Do vậy, muốn thu được hàm MTF chính xác thì dải động của cảm biến phải được mở rộng hơn nữa.

b) Kết quả đo kiểm vật kính thứ hai:

Đây là vật kính được lấy từ thiết bị ảnh nhiệt để kiểm tra, đánh giá. Tuy nhiên, nhà sản xuất chỉ công bố các thông số đặc trưng của cả thiết bị ảnh nhiệt chứ không có thông số LSF, MTF của vật kính ảnh nhiệt.

Để kiểm tra chất lượng của vật kính này, chúng tôi tiến hành thu nhận vết nhiễu xạ của nó. Kết quả thực nghiệm nhận được ảnh là một đốm sáng hình tròn có cường độ năng lượng tập trung ở trung tâm và giảm dần về phía ngoài tương ứng với lý thuyết nhiễu xạ (Hình 4.17). Như vậy, vật kính được khử quang sai rất tốt và sai số gia công nhỏ.

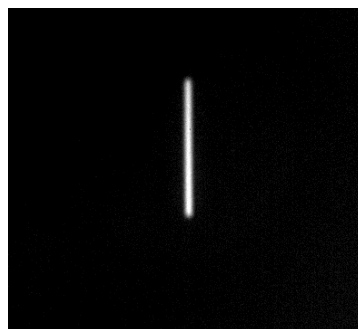


Hình 4.17. Ảnh của lỗ nhỏ có đường kính 10 μm

Khi đó, hàm LSF và MTF theo giới hạn nhiễu xạ được coi gần như hàm LSF, MTF thực tế hoạt động của vật kính. Do đó, mặc dù nhà sản xuất không công bố hàm LSF, MTF của vật kính nhưng chúng ta có thể dùng hàm LSF, MTF tính theo giới hạn nhiễu xạ để so sánh, đối chiếu với hàm LSF, MTF đo được thông qua mô hình thiết bị, từ đó đánh giá được chất lượng cũng như độ tin cậy của mô hình thiết bị đã xây dựng.

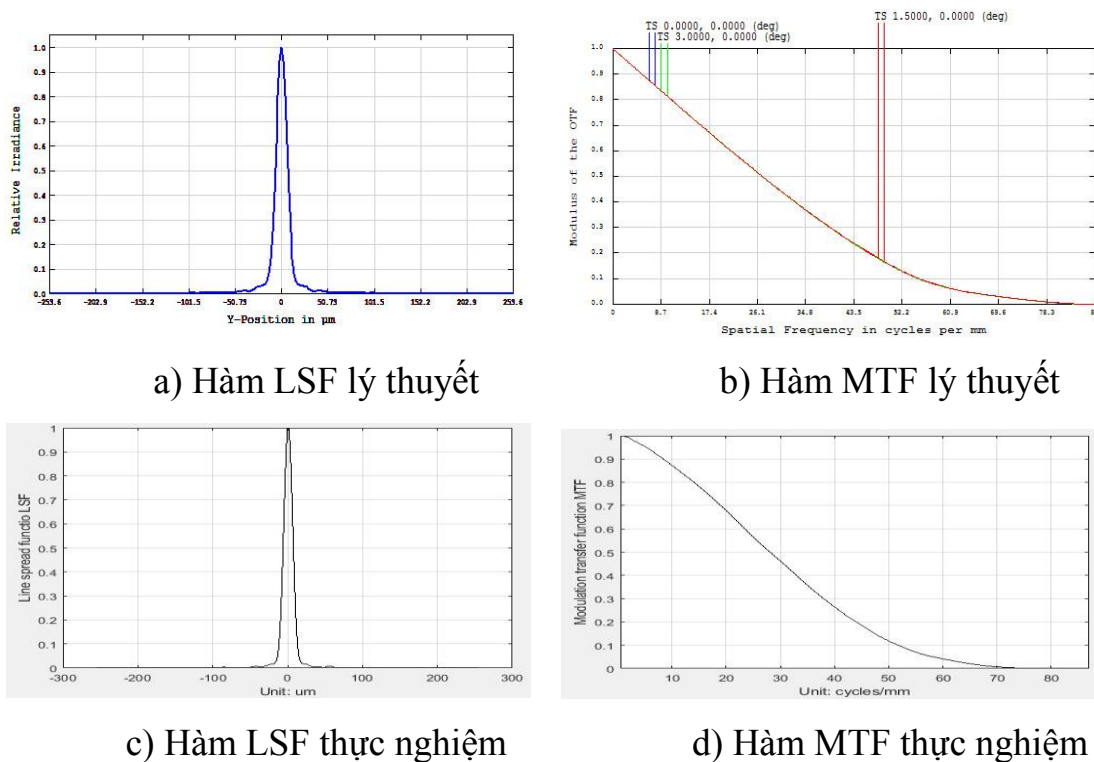
Hàm LSF, MTF theo giới hạn nhiễu xạ được tính bằng cách nhập các thông số tiêu cự và khẩu độ của vật kính vào phần mềm Zemax, kết quả được thể hiện ở hình 4.19a, 4.19b.

Để xác định hàm LSF, MTF thực nghiệm, ta lắp vật kính thứ hai vào hệ thống, khi đó ảnh của vật mẫu như hình 4.18:



Hình 4.18. Ảnh của vật mẫu khi thử nghiệm với vật kính thứ hai

Từ đó, kết quả đo LSF, MTF thực nghiệm thu được thể hiện tại hình 4.19c, 4.19d.



Hình 4.19. Hàm LSF và MTF lý thuyết và thực nghiệm.

Như vậy, nhìn vào kết quả đo hàm LSF và hàm MTF lý thuyết và thực nghiệm trên hình 4.19 ta thấy rằng:

- Hàm nhòe đường LSF có hình dạng tương đối tương đồng, phân bố năng lượng thể hiện rõ cấu trúc một cực đại ở trung tâm và giảm dần sang hai bên.
- Đối với hàm MTF: Tương tự vật kính thứ nhất, các giá trị hàm MTF thực nghiệm tương đối sát với hàm MTF lý thuyết, đoạn đầu đường cong cao hơn so với lý thuyết do dải động của cảm biến còn hạn chế, vì vậy cần có giải pháp để khắc phục nhược điểm này. Tuy nhiên, với kết quả hiện tại, mô hình thiết bị vẫn phù hợp để kiểm tra các vật kính ảnh nhiệt dùng trong quân sự do các thiết bị này thường dùng để quan sát xa, mục tiêu khi đó có kích thước góc nhỏ, vì vậy dải tần số cao sẽ được quan tâm nhiều hơn trong đánh giá.

Căn cứ vào kết quả đo hàm LSF, MTF của thiết bị đối với một số mẫu vật kính ảnh nhiệt có thể khẳng định thiết bị đáp ứng tốt yêu cầu sử dụng trong lĩnh vực đo kiểm HTQH ảnh nhiệt.

4.4. Kết luận

Thông qua các hoạt động thử nghiệm và kết quả ở chương 4, ta nhận thấy:

Hệ chuẩn trực được thiết kế và chế tạo có quang sai mặt sóng nhỏ hơn $\lambda/10$. Hoạt động thử nghiệm thu nhận ảnh của hệ chuẩn trực và vật kính hiển vi chứng tỏ quang sai được khử tốt, vật kính đạt giới hạn nhiễu xạ. Hai thành phần này đảm bảo các yêu cầu kỹ thuật để sử dụng trong hệ đo kiểm ảnh nhiệt. Khẳng định việc làm chủ thiết kế và chế tạo ống chuẩn trực, vật kính hiển vi với điều kiện công nghệ trong nước.

Kết quả đo tiêu cự của mô hình thiết bị cho kết quả sai số khoảng 1%. Đồng thời, với thuật toán xử lý ảnh và các phép biến đổi toán học một cách khoa học, rõ ràng, kết quả thử nghiệm mô hình thiết bị cho thấy các hàm nhòe đường LSF và hàm truyền điều biến MTF của một số mẫu vật kính ảnh nhiệt nhận được phù hợp với công bố của nhà sản xuất.

Đây là thiết bị đầu tiên ở Việt Nam có khả năng đánh giá chất lượng ảnh của HTQH ảnh nhiệt, phục vụ cho công tác nghiên cứu, phát triển các hệ quang ảnh nhiệt trong nước.

KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN CỦA LUẬN ÁN

1. Kết quả luận án

Luận án đã hoàn thành mục tiêu xây dựng giải pháp và mô hình thiết bị đánh giá chất lượng tạo ảnh của HTQH làm việc trong vùng phổ 8-12 μm với một số kết quả chính như sau:

- Luận án đã nghiên cứu, đề xuất một phương pháp khoa học để tính ảnh hưởng của cơ cấu gá lắp đến quang sai mặt sóng của linh kiện quang học. Bằng cách sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn để tính toán chuyển vị của các điểm nút trên bề mặt của linh kiện khi chúng chịu tác dụng bởi hệ lực gá kẹp của kết cấu cơ khí. Bước tiếp theo, tác giả sử dụng phương pháp bình phương tối thiểu làm khớp biên dạng bề mặt linh kiện với bề mặt phi cầu để tính các hệ số của đa thức Zernike Standard. Từ đó, xác định được quang sai mặt sóng trên phần mềm Zemax.

Đây là phương pháp có thể được áp dụng được đối với các linh kiện khác nhau. Vì vậy, đối với hệ thống khi được tạo bởi các linh kiện khác nhau, ta có thể tính được đóng góp quang sai của từng thành phần khi chịu lực gá kẹp, từ đó có lựa chọn, điều chỉnh kết cấu phù hợp để giảm ảnh hưởng của kết cấu đến mức thấp nhất đối với chất lượng hoạt động của hệ thống. Đây là đóng góp mới, có ý nghĩa thực tiễn cao trong quá trình thiết kế, chế tạo nhằm nâng cao chất lượng tạo ảnh HTQH.

- Luận án đã thiết kế, chế tạo thành công hệ chuẩn trực, vật kính hiển vi hoạt động trong vùng phổ hồng ngoại 8-12 μm . Trong đó, hệ chuẩn trực được lựa chọn là hệ phản xạ sử dụng gương cầu chuẩn trực nhằm mục đích mở rộng dải phổ hoạt động, dễ gia công, chế tạo, phù hợp với công nghệ trong nước. Kết quả hoạt động thực nghiệm cho thấy hệ được khử quang sai tốt, có thể nhận biết được sự suy giảm chất lượng của HTQH cần kiểm tra.

Đối với vật kính hiển vi, luận án sử dụng vật kính aplanat để tính toán, thiết kế vật kính hiển vi nhằm mục đích giảm khẩu độ và quang sai của hệ thống. Kết quả đo kiểm sai số hình dạng bề mặt các thấu kính của vật kính hiển vi đều nhỏ hơn $\lambda/10$; hoạt động thử nghiệm cho thấy vật kính đạt giới hạn nhiễu xạ. Đây cũng là đóng góp mới của luận án trong việc cung cấp giải pháp xây dựng một mô hình thiết bị hoàn chỉnh để đánh giá chất lượng tạo ảnh của HTQH làm việc trong vùng phổ hồng ngoại.

- Luận án đã xây dựng được phần mềm xử lý ảnh để xác định hàm nhòe đường LSF và hàm truyền điều biến MTF của HTQH cần kiểm tra. Thông qua hoạt động thực nghiệm của mô hình thiết bị khi kiểm tra một số mẫu vật kính, ảnh thu nhận được trên cảm biến được xử lý qua thuật toán và cho kết quả hàm nhòe đường LSF và hàm truyền điều biến MTF một cách nhanh chóng và phù hợp với công bố của nhà sản xuất. Bên cạnh đó, khi sử dụng hệ thống để đo tiêu cự của vật kính mẫu, sai số đạt được so với công bố của nhà sản xuất là 1%, nằm trong giới hạn cho phép của phép đo tiêu cự.

Như vậy, với phương pháp tính toán, thiết kế khoa học, tường minh, luận án đã xây dựng thành công mô hình thiết bị đáp ứng yêu cầu đo kiểm quang học. Điều này có ý nghĩa rất lớn trong tình hình ở Việt Nam, khi chưa có thiết bị nào có thể kiểm tra, đánh giá được chất lượng của hệ quang làm việc trong vùng phổ hồng ngoại 8-12 μm .

2. Hướng phát triển của luận án

Với kết quả nghiên cứu đã đạt được, trong thời gian tới luận án mong muốn hoàn thiện, tối ưu hơn nữa mô hình thiết bị từ thiết kế đến gia công, chế tạo các cụm quang cơ để phát triển mô hình thành thiết bị thương mại để có thể phục vụ cho công tác đo kiểm, sản xuất các hệ quang ảnh nhiệt cho các viện nghiên cứu, trung tâm đo lường, nhà máy sản xuất trong nước.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

1. Tran Anh Quang, Le Duy Tuan, Le Hoang Hai, Le Van Nhu (2020), “*Design and manufacture of a microscope objective used to test optical systems working in the spectral region of $8\div 12\ \mu\text{m}$* ”, 6th Academic Conference On Natural Science for Young Scientists, Master & Phd Students from Asean Countries, ISBN: 978-604-913-088-5.
2. Le Duy Tuan, Tran Anh Quang, Le Hoang Hai (2021), “*Design and manufacture of a collimator used to test thermal imaging lenses working in the spectral region of $8\div 12\ \mu\text{m}$* ”, The 11th International Conference On Photonics and Applications, ISBN: 978-604-9988-20-2.
3. Trần Anh Quang, Lê Hoàng Hải, Phạm Văn Quân, Lê Duy Tuấn, Trần Xuân Diệu (2021), “*Phân tích sự biến dạng mặt gương do tác dụng của hệ lực gá kẹp và ứng dụng trong thiết kế kết cấu cụm gương chính của ống chuẩn trực hồng ngoại*”, Tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ quân sự, ISSN: 1859 - 1043.
4. Tran Anh Quang, Le Duy Tuan, Le Hoang Hai (2022), “*Optical setup for evaluating image quality of thermal imaging lenses working in the spectral region of $8\div 12\ \mu\text{m}$* ”, Tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ quân sự, ISSN 1859 - 1043.
5. Tuan Duy Le, Quang Anh Tran*, Si Van Do, Hai Hoang Le, Duong Van Ta (2022), “*Method for determining the wavefront aberration of deformed optical components under external forces*”, Optical Engineering (ISI-Q2), <https://doi.org/10.1117/1.OE.61.11.115104>.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tiếng Việt

1. Lê Duy Tuấn, V.K. Kirillovski, Lê Hoàng Hải, Dương Chí Dũng, Nguyễn Hùng Vân (2008), *Một kỹ thuật mới nâng cao dải động cho camera để đo chính xác hàm nhòe điểm của hệ thống quang học*, Advances in Optics, Photonics, Spectroscopy and Applications, Viet Nam.
2. Lê Duy Tuấn, Nguyễn Hồng Ngọc (2018), *Giáo trình công nghệ gia công chi tiết quang học*, NXB QĐND.

Tiếng Anh

3. Ronald G. Driggers (2012), *Introduction to Infrared and Electro-Optical systems*, Artech house Bosston, London.
4. M.Vollmer (2018), *Infrared thermal imaging*, University of Appplied sciences Brandenburg, Germany.
5. Michael Bass (1995), *Handbook of optics*, 2nd ed, Vol. 2, McGraw-Hill.
6. Fort Belvoir (2001), *Night Vision Thermal Imaging Systems Performance Model*, User's Manual & Reference Guide, U.S. Army Night Vision and Electronic Sensors Directorate.
7. Optikos Coporation (1999), *How to measure MTF and other properties of lense*, USA.
8. Stephen Chaney (2005), *Measurement of the Point Spread Function and Optical Transfer Function of a Lens*.
9. Jack D. Gaskill (1998), *Linear systems, Fourier transform, and optics*, John Wiley & Sons, NewYork.
10. W.J. Smith (2008), *Modern optical engineering*, 4th ed, McGraw-Hill.
11. Bijl and Valetton (1998), *Validation of the new TOD method and ACQUIRE model predictions using observer performance data for ship targets*, submitted to Optical Engineering, Vol. 37 No. 7.

12. Bijl, Valetton, Maarten Hogervorst (2001), *A critical evaluation of test patterns for EO system performance characterization*, TNO Human Factors, P.O. Box 23, 3769 ZG Soesterberg, The Netherlands.
13. R.C. Staunton (1998), "Edge operator error estimation incorporating measurements of CCD TV camera transfer function", IEE Proc. Vision Image Signal Process 145, 229–235.
14. S. E. Reichenbach (1991), S. K. Park, and R. Narayanswamy, "Characterizing digital image acquisition devices", Opt. Eng. (Bellingham) 30, 170–177.
15. A. P. Tzannes and J. M. Mooney (1995), "Measurement of the modulation transfer function of infrared cameras", Opt. Eng. (Bellingham) 34, 1808–1817.
16. Christopher D. Claxton and Richard C. Staunton (2008), Measurement of the point-spread function of a noisy imaging system, J. Opt. Soc. Am. A. Vol. 25, No. 1.
17. C. Bradford, W. Pepler and J. Waidelich (1999), "Use of a slit camera for MTF measurements", Medical Physics 26, 2286–2294.
18. H. Fujita, D. Tsai, T. Itoh, K. Doi, J. Morishita, K. Ueda and A. Ohtsuka (1992), "A Simple Method for Determining the Modulation Transfer Function in Digital Radiography", IEEE Transactions on Medical Imaging 11, 34–39.
19. M. Giger and K. Doi (1984), "Investigation of basic imaging properties in digital radiography. 1. Modulation transfer function", Medical Physics 11, 287–295.
20. P.F. Judy (1976), "The line spread function and modulation transfer function of a computed tomography scanner", Medical Physics 3, 233–236.

21. F. Yin, M. Giger and K. Doi (1990), "Measurement of the presampling modulation transfer function of film digitizers using a curve fitting technique", *Medical Physics* 17, 962–966.
22. W. J. De Ruijter (1995), "Imaging Properties and Applications of Slow-Scan Charge-Coupled Device Cameras Suitable for Electron Microscopy" *Micron*, Vol. 26, No. 3, pp. 247-275.
23. P.B. Greer, T. Van Doorn (2000), "Evaluation of an algorithm for the assessment of the MTF using an edge method", *Medical Physics*, 27(9),2048-2059.
24. Hon-Sum Wong (1991), "Effect of knife-edge skew on modulation transfer function measurements of charge-coupled device imagers employing a scanning knife edge", *Opt. Eng.* Vol. 30 No. 9.
25. Joseph D. LaVeigne, Stephen D. Burks (2009), "Improving MTF measurements of under-sampled optical systems", *Proceedings of SPIE*.
26. Krzysztof Chrzanowski (2010), *Testing thermal imagers*, Military university of technology, Warsaw.
27. C. Fan, G. Li, and C. TAO (2015), "Slant edge method for point spread function estimation", *Appl. Opt.* 54, 4097-4103.
28. (2000), *Photography-Electronic Still Picture Cameras-Resolution Measurements*, ISO Standard 12233.
29. Masaoka, T. Yamashita, Y. Nishida, and M. Sugawara (2014), "Modified slanted-edge method and multidirectional modulation transfer function estimation", *Opt. Express* 22, 6040-6046.
30. S. M. Bentzen (1983), "Evaluation of the spatial resolution of a CT scanner by direct analysis of the edge response function", *Med. Phys* 10, 579-581.

31. F. F. Yin, M. L. Giger, and K. Doi (1990), "Measurement of the presampling modulation transfer function of film digitizers using a curve fitting technique", *Med. Phys.* 17, 960-966.
32. ASTM standard E 1213-2002, "Standard Test Method for Minimum Resolvable Temperature Difference for Thermal Imaging Systems".
33. ASTM standard E 1311-99, "Standard Test Method for Minimum Detectable Temperature Difference for Thermal Imaging Systems".
34. MIL-STD-1859 (1983): Thermal Imaging Devices, Performance Parameters of.
35. STANAG 4349 (1995), *Measurement of minimum resolvable thermal difference (MRTD) of thermal cameras*.
36. Holst G.C (2008), Testing and evaluation of infrared imaging systems, *JCD Publishing Company*.
37. Holst G.C (1993), *The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook*, Vol.3: Electro-Optical System Design, Analysis, and Testing, Chapt. 4, pp. 206-207, SPIE.
38. G.C. Holst (1993), Testing and Evaluation of Infrared Imaging Systems, *JCD Publishing Company*, Winter Park.
39. G. Schwesinger (1954), "Optical Effect of Flexure in Vertically Mounted Precision Mirrors", *J. Opt. Soc. Am.* 44(5), 417-424 [doi:10.1364/JOSA.44.000417].
40. A.J. Malvick (1972), "Theoretical Elastic Deformations of the Steward Observatory 230-cm and the Optical Sciences Center 154-cm Mirrors", *Appl. Opt.* 11(3), 575-585 [doi:10.1364/AO.11.000575].
41. A. Hatheway (1985), *Finite Element Methods For Evaluating Optical System Performance*, SPIE.

42. R. Xu et al (2004), "Support schemes and thermal effects analyses of large-aperture interferometer mirrors", in *Optical Science and Technology, the SPIE 49th Annual Meeting*, SPIE.
43. Z.-T. Y. Chia-Yen Chan, Ting-Ming Huang, Yi-Cheng Chen, Fong-Zhi Chen (2017), "Analysis and experimental investigation for collimator reflective mirror surface deformation adjustment", *Terr. Atmos. Ocean. Sci.* 28(2), 167-176.
44. Cook, R. D (2007), "Concepts and applications of finite element analysis", John wiley & sons.
45. S. S. Rao (2011), "Chapter 7 - Numerical Solution of Finite Element Equations", in *The Finite Element Method in Engineering (Fifth Edition)* S. S. Rao, Ed., pp. 241-274, Butterworth-Heinemann, Boston.
46. E. Madenci, and I. Guven (2015), "ANSYS Solution and Postprocessing", in *The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS®* E. Madenci, and I. Guven, Eds., pp. 139-175, Springer US, Boston, MA.
47. Z. Malacara, and M. Servín (2005), *Interferogram Analysis For Optical Testing*, Taylor & Francis Group.
48. D. Malacara (2007), *Optical Shop Testing 3th Ed.*, John Wiley & Sons.
49. D. E. Wells, and E. J. Krakiwsky (1971), *The Method Of Least Squares*.
50. V.A. Panov (1976), *Microscopy optics*.
51. K. B. Doyle, V. L. Genberg, and G. J. Michels, "Modeling of Optical Mounts", pp. 147-199, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers.
52. Paul R. Yoder. Jr (2006), *Opto-Mechanical Systems Design Third Edition*.

53. Le Duy Tuan, Duong Chi Dung, Le Hoàng Hai, Vu Van Huyen (2011),
“Setting-up a Shack-Hartmann wavefront sensor”, *Journal of Science and
Technique*.
54. S.A. Rodionov, Basic Optics, ITMO 2000.
55. R.C. Gonzalez, R. E. Woods (2018), *Digital Image Processing*, 4th
edition.
56. David R. Bull, Fan Zhang (2021), *Intelligent Image and Video
Compression*, 2rd Edition.
57. Ci-systems, Mets (www.ci-systems.com).
58. Hgh, Ir-Col (www.hgh.fr).
59. Inframet, Ori (www.inframet.com).
60. Santabarbara, 14000 Zi (www.sbir.com).
61. Optikos, Lenscheck LWTR (www.optikos.com).
62. Trioptics, ImageMaster Universal (www.trioptics.com).

PHỤ LỤC

1. Chương trình tính các hệ số của đa thức Zernike Standard bằng phần mềm Delphi:

Procedure TForm1.Mainprogram(Sender: TObject);

var fr:textfile;

st:string;

j:integer;

x,dx,y,dy,z,dz,R,c,dtv,dk:real;

coef:realarray;

data:realarray2;

I: Integer;

xm,ym:real;

begin

j:=0;

st:=edit1.Text;

val(st,R,j);

st:=edit2.Text;

val(st,dk,j);

st:=edit4.Text;

val(st,DTV,j);

order:=6;

dz:=0;

xm:=0;

ym:=0;

if OpenTextFileDialog1.Execute then

begin

st:=OpenTextFileDialog1.FileName;

```

AssignFile(fr,st);
Reset(fr);
j:=0;
try
while not Eof(fr) do
begin
  readln(fr,x,dx,y,dy,z,dz);
  x:=x+dx;
  y:=y+dy;
  if sqrt(x*x+y*y)<=DTV/2 then
  begin
    j:=j+1;
    setlength(data,j,4);
    data[j-1,0]:=2*x/DTV;
    data[j-1,1]:=2*y/DTV;
    data[j-1,2]:=z;
    data[j-1,3]:=dz;
    StringGrid.RowCount:=j;
    StringGrid.Cells[1,j]:=floattostr(data[j-1,0]);
    StringGrid.Cells[2,j]:=floattostr(data[j-1,1]);
    StringGrid.Cells[3,j]:=floattostr(data[j-1,2]);
  end;
end;
finally
  closeFile(fr);
end;
end;

```

```

DispData(data);//hiển thị dữ liệu gốc
coef:=ZernikeZM_Fit2(data,R,DTV,order);//fit đa thức
SetCoef(coef);
coef[0]:=0;
c:=coef[4];
coef[4]:=coef[5];
coef[5]:=c;
c:=coef[6];
coef[6]:=coef[7];
coef[7]:=c;
c:=coef[8];
coef[8]:=coef[9];
coef[9]:=c;
c:=coef[22];
coef[22]:=coef[23];
coef[23]:=c;
c:=coef[24];
coef[24]:=coef[25];
coef[25]:=c;
c:=coef[26];
coef[26]:=coef[27];
coef[27]:=c;
c:=coef[28];
coef[28]:=coef[29];
coef[29]:=c;
c:=coef[30];
coef[35]:=0;

```

```

coef[34]:=0;
coef[33]:=0;
coef[32]:=0;
coef[31]:=0;
coef[30]:=0;
//Ghi các hệ số của đa thức Zernike vào file số liệu
st:=ExtractFilePath(Application.ExeName);
AssignFile(fr,st+'HS.dat');
rewrite(fr);
writeln(fr,order*order+1);
writeln(fr,DTV/2);
for I := 0 to length(coef)-1 do
begin
    writeln(fr,coef[i])
end;
writeln(fr,c);
closefile(fr);
end;
//////////

```

Function

ZernikeZM_Fit2(Data:realarray2;R,DTV:real;Order:integer):realarray;

```

var i,j,n,p,ts,l:integer;
x,y,z:real; //x,y luong dich chuyen goc toa do
b,HS,coef_zer:realarray;
A:realarray2;
rows,cols:integer;
st:string;

```

```

begin
ts:=order*order;//so luong cac he so cua da thuc
setlength(HS,ts);
setlength(coef_Zer,ts);
rows:=length(data);
cols:=length(data[0]);
setlength(A,rows,ts);
setlength(B,rows);
for i := 0 to rows-1 do
    begin
        x:=data[i,0];
        y:=data[i,1];
        z:=ConicSurf(DTV*x/2,DTV*y/2,R,0);
        HS:=Coef_ZernikeZMDec(order,x,y);
        for j:=0 to length(HS)-1 do
            A[i,j]:=HS[j];
            B[i]:=-(z+data[i,2]+data[i,3]);
        end;
        HS:=BinhPhuongToiThieu(A,length(A[0]),Rows,B);
    result:=HS;
    HS:=nil;
end;
//////////

function ConicSurf(x,y,R,k:real):real;
var z,c:real;
begin
    if r<>0 then c:=1/r else c:=0;

```

```

    z:= (x*x+y*y);
    result:= c*z/(1+sqrt(1-(1+k)*c*c*z));
end;
//////////
function Coef_ZernikeZMDec(order:integer;x,y:real):realarray;
var i,n,l,m,s,k:integer;
ro,teta,r:real;
x1,x2,x3,x4,x5:Extended;
begin
ro:=sqrt(x*x+y*y);
if ro>0 then
    begin
        if (y>=0) then    teta:=arcsin(x/ro)
        else    teta:=pi-arcsin(x/ro);
    end
else teta:=pi;
i:=0;
for n:=0 to 2*(order-1) do
    begin
        if n<=order-1 then k:=n else k:=k-1;
        for l:=0 to k do
            if ((n-l)mod 2=0) then
                begin
                    m:=round((n-l)/2);
                    r:=0;
                    for s:=0 to m do
                        begin

```

```

x1:= giaithua(n-s);
x2:= power(ro,n-2*s);
x3:= giaithua(s);
x4:= giaithua(m-s);
x5:= Giaithua(n-m-s);
if s mod 2=0 then r:=r+x1*x2/(x3*x4*x5)
else r:=r-x1*x2/(x3*x4*x5)
end;
result[i]:=sqrt(n+1)*r*cos(l*teta);
if l<>0 then
begin
result[i+1]:=sqrt(n+1)*r*sin(l*teta);
inc(i,2)
end
else inc(i,1);
end;
end;
end;
//////////

```

Function

BinhPhuongToiThieu(A:realarray2;Cols,Rows:integer;B:realarray):real array;

```

var At,AM,L,U,P:realarray2;//so hang cua ma tran B phai bang so hang
cua ma tran A = Rows
BA:realarray;
i,j:integer;
begin

```

```

setlength(At,Rows,Cols);
setlength(AM,Cols,Cols);
setlength(L,Cols,Cols);
setlength(U,Cols,Cols);
setlength(P,Cols,Cols);
Setlength(BAt,cols);

```

```

At:=chuyenVi(A,Cols,Rows);
AM:=NhanMT(AT,A,Rows,Cols,Cols);
for i:=0 to cols-1 do  // nhan ma tran At voi b;
    begin
        BAt[i]:=0;
        for j:=0 to rows-1 do
            BAt[i]:=BAt[i]+At[i,j]*b[j];
        end;
    end;

```

```

DecompositionLUP(L,U,P,AM,Cols);
Result:=SolveLUP(L,U,P,BAt,Cols);
setlength(At,0,0);
setlength(AM,0,0);
setlength(L,0,0);
setlength(U,0,0);
setlength(P,0,0);
Setlength(BAt,0);
end;

```

```

//////////

```

```

Function ChuyenVi(a:realarray2;Cols,Rows:integer):realarray2;
//n cot, m hang

```

```

var i,j:integer;
c:realarray2;
begin
setlength(c,Cols,Rows);
  for i:=0 to Rows-1 do
    for j:=0 to Cols-1 do
      c[j,i]:=a[i,j];
result:=c;
setlength(c,0,0);
end;

```

```

//////////

```

function

NhanMT(a,b:realarray2;n,row_A,Col_B:integer):realArray2;

//ma tran A co n cot, ma hang

var i,j,k:integer; *//ma tran B co mb cot, n hang*

dt:real; *//phan tu C[i,j] bang hang i cua A nhan voi cot j cua B*

begin *//C co mb cot va ma hang*

for i:=0 to Row_A-1 do

for j:=0 to Col_B-1 do

begin

dt:=0;

for k:=0 to n-1 do dt:=dt+a[i,k]*b[k,j];

result[i,j]:=dt;

end;

end;

```

//////////

```

Procedure DecompositionLUP(var L,U,P,A:realarray2;n:integer);

var i,j,k,kk:integer;

tg,pp:real;

begin

for i:=0 to n-1 do

// for j:=1 to n do

P[i,i]:=1;

for k:=0 to n-1 do

begin

pp:=0;

for i:=k to n-1 do

if abs(a[i,k])>pp then

begin

pp:=abs(a[i,k]);

kk:=i

end;

if pp=0 then exit; //co loi

for i:=0 to n-1 do

begin

tg:=P[k,i];

P[k,i]:=P[kk,i];

P[kk,i]:=tg;

end;

for i:=0 to n-1 do

begin

tg:=a[k,i];

a[k,i]:=a[kk,i];

```

        a[kk,i]:=tg;
    end;
    for i:=k+1 to n-1 do
        begin
            a[i,k]:=a[i,k]/a[k,k];
            for j:=k+1 to n-1 do a[i,j]:=a[i,j]-a[i,k]*a[k,j];
            end;
        end;
    end;

    for i:=0 to n-1 do
        for j:=0 to n-1 do
            begin
                if j=i then
                    begin
                        L[i,j]:=1;
                        U[i,j]:=A[i,j];
                    end;
                if j>i then
                    begin
                        L[i,j]:=0;
                        U[i,j]:=A[i,j];
                    end;
                if j<i then
                    begin
                        L[i,j]:=A[i,j];
                        U[i,j]:=0;
                    end;
                end;
            end;
        end;
    end;

```

```
end;
```

```
end;
```

```
//////////
```

Function

SolveLUP(L,U,P:realarray2;b:realarray;n:integer):realarray;

```
var i,j:integer;
```

```
y,Bp,rs:realarray;
```

```
ly:real;
```

```
begin
```

```
setlength(y,n);
```

```
setlength(Bp,n);
```

```
setlength(rs,n);
```

```
for i:=0 to n-1 do // nhan ma tran P voi b;
```

```
begin
```

```
Bp[i]:=0;
```

```
for j:=0 to n-1 do
```

```
Bp[i]:=Bp[i]+p[i,j]*b[j];
```

```
end;
```

```
for i:=0 to n-1 do
```

```
begin
```

```
ly:=0;
```

```
for j:=0 to i-1 do Ly:=Ly+L[i,j]*y[j];
```

```
y[i]:=Bp[i]-ly;
```

```
end;
```

```
for i:=n-1 downto 0 do
```

```
begin
```

```
ly:=0;
```

```

        for j:=i to n-1 do Ly:=Ly+U[i,j]*Rs[j];
        Rs[i]:=(y[i]-ly)/U[i,i];
    end;
result:=rs;
setlength(y,0);
setlength(Bp,0);
setlength(rs,0);
end;

```

2. Chương trình tính hàm LSF, hàm MTF của mẫu vật kính ảnh nhiệt bằng phần mềm Matlab:

```

I01=imread('Anhvatkinh_100.bmp');    %Doc anh
I01=rgb2gray(I01);

I01=double(I01)/255;
[m n]=size(I01);
I02=zeros(m,n);
dpd = 9.75;
figure,
imshow(I01)

H=[1 2 1;    %Ma tran loc thong thap
   2 4 2;
   1 2 1]*(1/16);

I02=conv2(I01,H);    %Nhan tích chấp để lọc nhiễu của I01
figure,
imshow(I02)

line=I02(120,:);    % tao duong cat ngang
I03 = sum(I01)/248;    % Cat chan
I04 = sum (I03)/(302);
x0 = I04;
line = line - 0.55*x0;

```

```

line1=zeros(size(line));
line1(130:180)=line(130:180);
[ma idx]= max(line1);
line2 = zeros(201);
line2 = (line1(idx-100:idx+100));
line2 = smooth(line2.^1.4);
x = 0:200;
x=(x-100)*(17/dpd);

figure, plot(x,line2./max(line2),'k');
grid on;
xlabel('Unit: um')
ylabel('Line spread function LSF')

a1 = 5/((17/dpd));
a11 = 0:200;
f1 = a1.*a11;
line3=(fft(line2));
P = abs(line3);
figure, plot(f1,P./max(P),'k');
grid on;
xlabel('Unit: cycles/mm')
ylabel('Modulation transfer function MTF')
xlim([0.5 300])
ylim([0 1])

```