

## Nghiên cứu xây dựng mô hình hệ thống quang điện tử đa cảm biến để kiểm soát bề mặt của các vật thể có kích thước lớn

Lê Đình Hùng<sup>1</sup>, Tổng Minh Hòa<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Bộ Tư lệnh Thủ đô Hà Nội, Số 8 Phạm Hùng, Nam Từ Liêm, Hà Nội, Việt Nam;

<sup>2</sup>Viện Khoa học và Công nghệ quân sự, Số 17, phố Hoàng Sâm, Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam.

\*Email: hoa.chiton@gmail.com

Nhận bài: 03/6/2024; Hoàn thiện: 20/7/2024; Chấp nhận đăng: 25/7/2024; Xuất bản: 25/8/2024.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.97.2024.119-128>

### TÓM TẮT

Nghiên cứu này đề xuất một hệ thống quang điện tử (OES) hoàn toàn mới với cấu trúc đa ma trận cảm biến (CMOS) dùng để đo độ biến dạng bề mặt gương phản xạ chính (MR) của một kính viễn vọng vô tuyến kích thước lớn. Hệ thống này bao gồm 24 camera đa cảm biến, trong mỗi camera bố trí 25 ma trận cảm biến, mỗi cảm biến đảm nhiệm thu hình ảnh của một điểm kiểm soát trên bề mặt MR. Các nghiên cứu mô phỏng, tính toán cho thấy với sai số góc và sai số tuyến tính khi xác định vị trí ban đầu của các camera đa cảm biến không vượt quá 0,05 cung giây và 0,005 mm sẽ đảm bảo độ chính xác là 0,1 mm khi xác định vị trí các điểm kiểm soát trên bề mặt gương phản xạ chính của kính viễn vọng. Đồng thời mô phỏng cũng cho thấy EOS đề xuất có thể kiểm soát toàn bộ gương phản xạ với sai số bề mặt không vượt quá giá trị giới hạn 0,05 mm.

**Từ khóa:** Hệ thống quang điện tử (OES); Camera đa cảm biến; Kính viễn vọng vô tuyến; Gương phản xạ chính (MR); Điểm kiểm soát.

### 1. MỞ ĐẦU

Trong thời đại hiện nay, nhiều vật thể có kích thước lớn, có cấu trúc phức tạp đã được xây dựng từ các thành phần riêng lẻ, ví dụ: Kính viễn vọng vô tuyến (RT), các tòa nhà lớn, sân vận động, đập thủy điện,... chúng cần phải được theo dõi liên tục để đảm bảo an toàn. Để làm được điều này, cần kiểm soát rất nhiều điểm trên bề mặt của chúng. Đặc biệt là trong nghiên cứu thiên văn học - một lĩnh vực rất quan trọng và có nhiều tiềm năng khám phá, việc thu thập được dữ liệu để phục vụ cho nghiên cứu thì cần tới các loại kính viễn vọng hiện đại với kích thước lớn và yêu cầu độ chính xác cao. Do đó kính viễn vọng vô tuyến đường kính lớn và tần số cao đã trở thành trọng tâm nghiên cứu và phát triển ở nhiều quốc gia, chẳng hạn như LMT 50 ở Mexico, SRT 64 ở Ý, GBT 100 ở Hoa Kỳ, FAST ở Trung Quốc và RT-70 (Suffa) ở Nga [1]. Độ chính xác của bề mặt là một chỉ số quan trọng của bề mặt MR của kính thiên văn vô tuyến, nó có liên quan mật thiết đến chất lượng thông tin mà kính viễn vọng thu nhận được. Vì vậy, với các gương phản xạ được cấu tạo từ nhiều tấm phản xạ nhỏ thì các điểm liên kết giữa chúng cần được đo đạc và kiểm soát để tránh hiện tượng mỗi nối bị biến dạng do thay đổi nhiệt độ môi trường, hay dưới tác động trọng lực. Bằng cách phân tích dữ liệu về sự dịch chuyển của điểm kiểm soát, các tấm phản xạ của kính viễn vọng vô tuyến được điều chỉnh bằng một công cụ cơ khí để đạt đến trạng thái tối ưu nhất [2]. Tuy nhiên, độ chính xác đo lường của các điểm kết nối của gương chính thường cần đến vài chục micromet [3]. Để đạt được độ chính xác cao, các phương pháp chính được sử dụng để đo biến dạng bề mặt MR của kính viễn vọng vô tuyến khẩu độ lớn bao gồm hệ thống chụp ảnh ba chiều sóng radio, quang trắc kỹ thuật số, kính vĩ điện tử [4-8],... Tuy nhiên, các phương pháp này lại mất rất nhiều thời gian để tiến hành đo đạc từ vài giờ, tới vài ngày, thậm chí vài tuần, vì thế chúng chỉ thích hợp để đo bề mặt gương của kính viễn vọng vào những lúc cần bảo trì theo định kỳ. Ngoài ra, phương pháp quét laze cũng có thể được áp dụng với các thiết bị hiện đại như Leica TPS2000, FARO Laser Tracker Xi và TOPCON DT-200/DT-200L,... có thể đạt được phép đo độ chính xác cao, chúng có thể đo vị trí của các đối tượng từ xa được điều khiển với độ chính xác khá cao và ghi lại kết quả đo để xử lý dữ liệu. Tuy nhiên, những ngày thời tiết xấu như mưa, tuyết hay sương mù các thiết bị laze lại

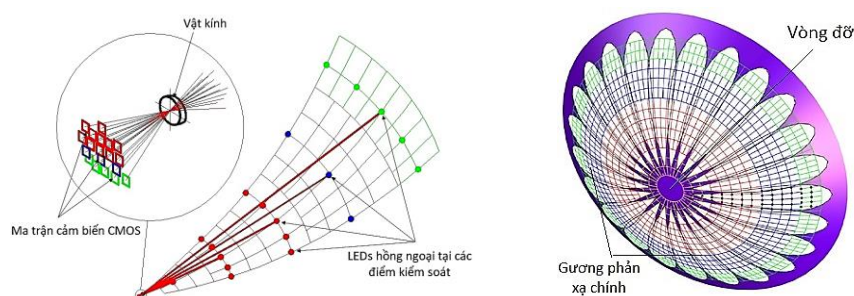
không thể đáp ứng được, hơn nữa tốc độ đo chậm khi số lượng các điểm kiểm soát trên bề mặt gương lên tới hàng nghìn điểm. Vì vậy, các phương pháp kể trên không thể sử dụng để đo biến dạng bề mặt MR của kính viễn vọng theo thời gian thực. Để cải thiện hiệu quả đo biến dạng bề mặt chính của kính viễn vọng vô tuyến theo thời gian thực, giáo sư Igor Konyakhin et al, đã đề xuất một hệ thống đo lường đặc biệt cho kính thiên văn vô tuyến RT-70. Hệ thống này bao gồm các camera riêng biệt, mỗi camera chỉ chứa một vật kính và một ma trận cảm biến (CMOS) [9]. Nhược điểm của hệ thống này là một camera chỉ đo được một điểm trên bề mặt gương chính của kính viễn vọng vô tuyến, vì vậy, toàn bộ hệ thống chỉ có thể đo vị trí cho tối đa 40 điểm đồng thời. Để tăng số lượng điểm được kiểm soát trên bề mặt gương phản xạ chính, nghiên cứu này đề xuất một hệ thống quang điện tử hoàn toàn mới. Các đi-ốt phát quang hồng ngoại (đèn LED) gắn trên nhiều điểm kiểm soát (trên bề mặt gương phản xạ) được hội tụ và tạo ảnh trên các ma trận cảm biến (CMOS) tương ứng thông qua một vật kính và vị trí của các điểm kiểm soát này được xác định thông qua xử lý hình ảnh trên từng ma trận cảm biến. Hệ thống quang điện tử này có các đặc tính có thể thực hiện phép đo không tiếp xúc, chống nhiễu mạnh, độ chính xác phép đo cao, tốc độ đo nhanh và đo đa điểm đồng thời. Do đó, nó có thể được sử dụng để kiểm soát bề mặt MR của kính viễn vọng vô tuyến theo thời gian thực, trong quá trình vận hành kính viễn vọng.

## 2. MÔ HÌNH HỆ THỐNG QUANG ĐIỆN TỬ ĐA CẢM BIẾN ĐỂ KIỂM SOÁT BỀ MẶT GƯƠNG PHẢN XẠ CỦA KÍNH VIỄN VỌNG VÔ TUYẾN RT-70

### 2.1. Cấu trúc và vị trí của các OES trên kính viễn vọng vô tuyến RT-70

Xem xét một cách tiếp cận mới đối với việc thiết kế, chế tạo một hệ thống OES được cấu tạo là camera đa cảm biến, các camera được cố định trên một vòng đỡ ở đỉnh của paraboloid MR, sao cho các trục quang vật kính của chúng được định vị theo hướng xuyên tâm từ tâm đến rìa của MR. Cấu trúc của một camera gồm một vật kính đơn và một nhóm ma trận cảm biến, mỗi cảm biến sử dụng phương pháp “quan sát trực tiếp” sẽ đo độ dịch chuyển của điểm kiểm soát tương ứng được liên kết với nó (hình 1).

Một camera đa cảm biến được thiết kế theo nguyên tắc này có duy nhất một “cơ sở đo” là vật kính của nó, mà căn cứ vào đó các cảm biến được cố định bên trong camera. Điều này trước hết cho phép đảm bảo sự ổn định lâu dài các vị trí tương đối của các kênh đo riêng lẻ trong hệ camera, mỗi kênh đo được xác định bởi liên hệ giữa “cảm biến – điểm chính của vật kính – nguồn bức xạ hồng ngoại (đèn LED) được lắp đặt tại điểm kiểm soát trên bề mặt của MR”; đồng thời nó cho phép giảm đáng kể số lượng OES cần thiết để tạo nên hệ thống giám sát bề mặt MR của kính viễn vọng RT-70. Từ đó, giảm sự ảnh hưởng của khối lượng toàn bộ hệ thống EOS lên bề mặt gương phản xạ của kính viễn vọng trong quá trình vận hành.



a) Vị trí của các cảm biến CMOS bên trong camera đa cảm biến.

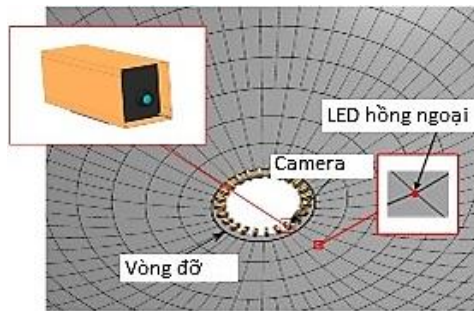
b) Góc quan sát của các OES trên toàn bộ bề mặt MR của RT-70.

**Hình 1.** Cấu trúc của các OES và góc quan sát của chúng trên bề mặt MR.

Khi đó, hệ thống quang điện tử để kiểm soát độ biến dạng bề mặt MR đảm bảo thời gian đo ngắn, do phép đo độ dịch chuyển của tất cả các điểm kiểm soát được thực hiện đồng thời, khi sử dụng các quy trình tính toán song song [10, 11]. Một camera đa cảm biến có thể chứa tới hàng

chục ma trận cảm biến CMOS kích thước nhỏ, cố định với các góc nghiêng khác nhau, tại các vị trí khác nhau trong mặt phẳng dọc và ngang của vật kính duy nhất (hình 1a) [12].

Góc quan sát trên bề mặt MR của các camera đa cảm biến được thể hiện trong hình 1b. Các trường góc của các camera lân cận có thể chồng lên nhau, điều này trước hết giúp đo lường sự thay đổi có thể có về vị trí tương đối của một camera so với camera kia trong quá trình hoạt động dựa trên kết quả của các điểm đo được quan sát đồng thời từ cả hai camera cạnh nhau. Thứ hai, với một số điểm kiểm soát đó bằng phép đo lập thể (triangulation), có thể đo độ dịch chuyển dọc theo cả ba trục tọa độ để kiểm tra các biến dạng của MR có tuân thủ với các nguyên tắc tương đồng hay không [13, 14].



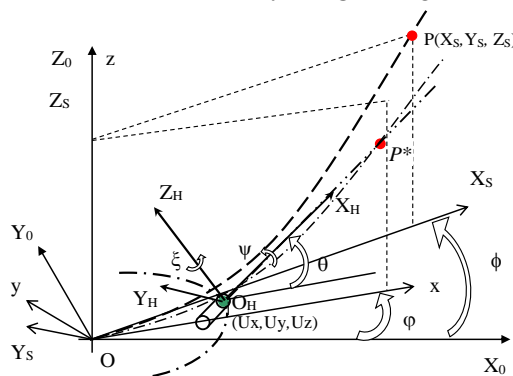
**Hình 2.** Mô hình EOS được đề xuất.

Một phương án khả thi về sự sắp xếp của các OES trên vòng đỡ của MR trong không gian được thể hiện trong hình 2. Theo đó các camera được đặt trên vòng đỡ gần đỉnh của gương phản xạ chính, hướng từ tâm ra rìa của gương phản xạ để thu ảnh của các đi ốt hồng ngoại được gắn tại điểm nối của các tấm phản xạ trên bề mặt gương chính.

### 2.2. Mô hình toán học của OES đa cảm biến để xác định độ dịch chuyển của điểm kiểm soát

Giả sử  $T(X_0Y_0Z_0)$  là hệ trục tọa độ chính gắn với kính viễn vọng vô tuyến RT-70, gốc của hệ trục tọa độ trùng với tâm hình học của mặt paraboloid MR, các trục:  $X_0$  hướng song song với trục nâng của kính viễn vọng,  $Y_0$  vuông góc với nó,  $Z_0$  trùng với trục của MR (hình 3).

Đặt một trong các camera đa cảm biến trên vòng đỡ gần đỉnh của paraboloid, điểm chính và trục quang vật kính của nó nằm trong mặt phẳng  $xOz$  hệ tọa độ trung gian  $A(xyz)$ . Góc của hệ trục tọa độ trung gian trùng với góc của hệ trục tọa độ chính và mặt phẳng  $xOz$  tạo với mặt phẳng  $X_0OZ_0$  của hệ trục tọa độ chính một góc  $\varphi$ , trục “z” của các hệ này đồng hướng.



**Hình 3.** Các hệ tọa độ để xác định vị trí của điểm kiểm soát trên bề mặt MR.

Điểm chính của vật kính hệ camera đa cảm biến nằm trên mặt  $xOz$  của hệ trục tọa độ trung gian  $xyz$  và có tọa độ  $(U_x, U_y, U_z)$ . Đồng thời điểm chính của vật kính chính là gốc tọa độ  $O_H$  của hệ trục tọa độ  $H(X_H Y_H Z_H)$ , gắn liền với camera, trục  $O_H X_H$  tạo với trục  $Ox$  một góc  $\theta$ , còn mặt phẳng  $X_H O_H Z_H$  trùng với mặt phẳng  $xOz$ .

Khi camera được lắp đặt ở vị trí chính xác thì trục  $O_H X_H$  trùng với trục quang học của vật kính và hướng trục tiếp tới một điểm mốc trung tâm  $P^*$ . Và đường ngắm của mỗi cảm biến đều hướng tới một điểm mốc  $P$  (điều kiện giả định là, các điểm mốc trùng với vị trí các điểm cần kiểm soát trên bề mặt MR của kính viễn vọng). Điểm kiểm soát  $P$  trên bề mặt paraboloid MR trùng với điểm tiếp xúc bốn góc của bốn tấm phản xạ liền kề. Nếu nó thuộc vào một nhóm các điểm nằm trong trường quan sát của camera đa cảm biến thứ  $i$  nào đó thì tọa độ của điểm  $P$  trong hệ tọa độ  $T(X_0 Y_0 Z_0)$  là  $P_T(X_T, Y_T, Z_T)$ .

Tuy nhiên, thuận tiện để đặt vị trí danh nghĩa của điểm được kiểm soát trong hệ tọa độ  $S(X_S Y_S Z_S)$ , trục  $OZ_S$  trùng với trục  $OZ_0$  của hệ tọa độ chính  $T(X_0 Y_0 Z_0)$ , và mặt phẳng  $X_S OZ_S$  tạo với mặt phẳng  $X_0 OZ_0$  một góc  $\phi$ . Trong trường hợp này,  $\phi$  được xác định bởi cách bố trí các tấm phản xạ của MR. Khi đó điểm  $P$  có tọa độ trong hệ tọa độ  $S(X_S Y_S Z_S)$  là:

$$P_S = \begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Ma trận chuyển từ hệ tọa độ  $S$  sang hệ tọa độ  $H$  của được xác định bằng biểu thức sau:

$$M_{SH} = M_{AH} M_{TA} \cdot M_{ST} \quad (2)$$

Ở đây,  $M_{AH}$ ,  $M_{TA}$ ,  $M_{ST}$  là các ma trận mô tả sự chuyển đổi giữa hệ trục tọa độ [15].

$$M_{ST} = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) & 0 & 0 \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, M_{TA} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & \sin(\varphi) & 0 & 0 \\ -\sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, M_{AH} = M_{HA}^{-1},$$

$$M_{HA} = \begin{bmatrix} \cos(\xi) \cdot \cos(\theta) & \cos(\theta) \cdot \sin(\xi) & -\sin(\theta) & U_x \\ \cos(\xi) \cdot \sin(\psi) \cdot \sin(\theta) - \cos(\psi) \cdot \sin(\xi) & \cos(\xi) \cdot \cos(\psi) + \sin(\xi) \cdot \sin(\psi) \cdot \sin(\theta) & \cos(\theta) \cdot \sin(\psi) & U_y \\ \sin(\xi) \cdot \sin(\psi) + \cos(\xi) \cdot \cos(\psi) \cdot \sin(\theta) & \cos(\psi) \cdot \sin(\xi) \cdot \sin(\theta) - \cos(\xi) \cdot \sin(\psi) & \cos(\psi) \cdot \cos(\theta) & U_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Tọa độ của điểm  $P$  trong hệ tọa độ  $H(X_H Y_H Z_H)$  được xác định theo biểu thức sau:

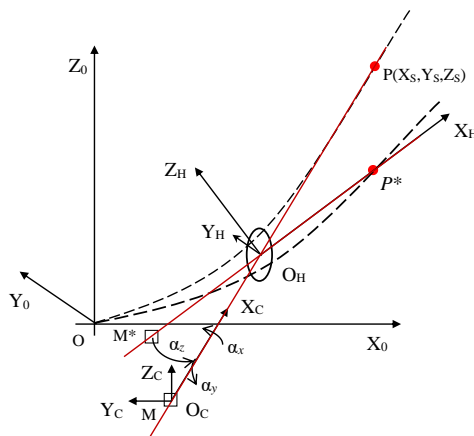
$$P_H = M_{SH} \cdot P_S = \begin{bmatrix} X_H \\ Y_H \\ Z_H \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Theo quy tắc quang hình học với hệ quang lý tưởng, tọa độ ảnh của  $P$  và tọa độ  $P$  trong hệ camera  $H$  có liên hệ với nhau bằng biểu thức sau:

$$\begin{bmatrix} x_H \\ y_H \\ z_H \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f'}{X_H + f'} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{f'}{X_H + f'} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{f'}{X_H + f'} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_H \\ Y_H \\ Z_H \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Trong đó,  $f$  là tiêu cự của vật kính camera.

Cần xác định vị trí các cảm biến CMOS trong hệ tọa độ của camera. Mỗi cảm biến  $M_i$  ( $i$  là chỉ số của điểm kiểm soát trên bề mặt gương) được gắn với hệ tọa độ  $C(X_C Y_C Z_C)$  (hình 4), trục  $O_C X_C$  trùng với đường ngắm - hướng từ tâm cảm biến qua điểm chính của vật kính  $O_H$  đến điểm kiểm soát  $P$  và mặt phẳng  $Y_C O_C Z_C$  vuông góc với đường ngắm này.



**Hình 4.** Các hệ tọa độ xác định vị trí của ma trận CMOS.

Tọa độ của tâm của mỗi cảm biến  $M_i$  trong hệ tọa độ của nó được xác định là  $O_C(0, 0, 0)$ . Góc hệ tọa độ  $O_C$  của từng cảm biến  $M_i$  không trùng với góc  $O_H$  của hệ tọa độ  $H(X_H Y_H Z_H)$  gắn với camera nên tâm của cảm biến  $M_i$  có tọa độ trong hệ tọa độ camera là  $M_H(p_{Hx}, p_{Hy}, p_{Hz})$ . Vị trí tương đối của các trục của các hệ trục tọa độ  $H$  và  $C$  được xác định bởi ba góc  $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ .

Góc  $\alpha_z$  xác định là góc quay của mặt phẳng  $X_C O_C Y_C$  so với trục  $O_H Z$  của hệ tọa độ  $H$ , góc  $\alpha_y$  xác định là góc quay của mặt phẳng  $X_C O_C Z_C$  so với trục  $O_C Y_C$ . Góc  $\alpha_x$  xác định là khả năng quay của cảm biến quanh trục  $O_C X_C$ , vì trục  $O_C X_C$  luôn vuông góc với cảm biến nên  $\alpha_x$  bằng 0.

$M_{CH}$  là ma trận chuyển đổi từ tọa độ  $H$  sang hệ tọa độ  $C$ , tương ứng với các góc quay  $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$  và độ dịch chuyển tuyến tính  $p_{Hx}, p_{Hy}, p_{Hz}$ , được xác định là:

$$M_{CH} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_{Hx} \\ 0 & 1 & 0 & p_{Hy} \\ 0 & 0 & 1 & p_{Hz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_x) & -\sin(\alpha_x) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha_x) & \cos(\alpha_x) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\alpha_y) & 0 & \sin(\alpha_y) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\alpha_y) & 0 & \cos(\alpha_y) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\alpha_z) & -\sin(\alpha_z) & 0 & 0 \\ \sin(\alpha_z) & \cos(\alpha_z) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Khi đó, tọa độ ảnh của điểm kiểm soát  $P$  trong hệ tọa độ  $C(X_C Y_C Z_C)$  gắn với cảm biến  $M$  được xác định bởi biểu thức sau:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ x_C \\ y_C \\ z_C \\ 1 \end{bmatrix} = M_{CH} \cdot \begin{bmatrix} x_H \\ y_H \\ z_H \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Khi MR bị biến dạng, tọa độ điểm kiểm soát  $P$  trong không gian cũng thay đổi theo phương pháp tuyến với về mặt MR (tối đa 30 mm với rìa ngoài cùng MR của kính viễn vọng RT-70) [3], tuy nhiên, khoảng cách từ điểm kiểm soát tới điểm chính của vật kính là gần như không đổi, do đó, nếu tính được độ dịch chuyển điểm ảnh của  $P$  trên cảm biến có thể tính được độ dịch chuyển tương ứng của  $P$  ngoài không gian.

Xây dựng bài toán ngược, khi biết tọa độ điểm ảnh của điểm kiểm soát  $P$  trên cảm biến  $M$ , bằng các phép biến đổi ngược lại với quá trình tính toán ở trên, hoàn toàn tính ra được tọa độ của điểm

kiểm soát P trong không gian. Đối chiếu với cơ sở dữ liệu ban đầu (đã được quét và đưa vào kho dữ liệu) khi hiệu chỉnh bề mặt MR tại thời điểm bắt đầu vận hành, xác định được độ dịch chuyển của điểm kiểm soát P trong không gian theo phương pháp tuyến với bề mặt MR.

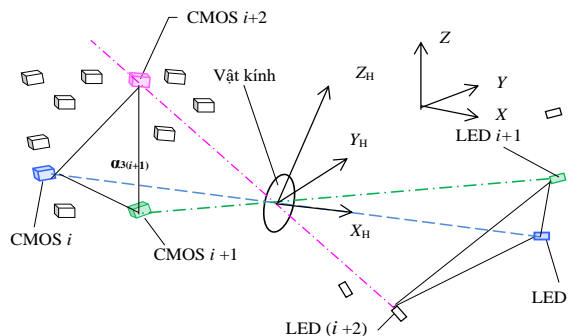
### 3. MÔ PHỎNG, TÍNH TOÁN, THẢO LUẬN

#### 3.1. Xác định tọa độ góc và tuyến tính của các camera đa cảm biến trong không gian tại thời điểm lắp đặt ban đầu

Một trong những yếu tố ảnh hưởng lớn nhất đến sự chính xác của phép đo độ dịch chuyển của điểm kiểm soát là các sai số của góc quay  $\psi$ ,  $\theta$ ,  $\xi$  và tọa độ  $U_x$ ,  $U_y$ ,  $U_z$  định vị của camera đa cảm biến khi lắp đặt ban đầu so với hệ tọa độ chính của kính thiên văn vô tuyến [16, 17] – hình 3.

Để giảm triệt để các thành phần sai số đo lường này, cần xác định giá trị chính xác của các góc quay  $\psi$ ,  $\theta$ ,  $\xi$  và các tọa độ  $U_x$ ,  $U_y$ ,  $U_z$  trong quá trình lắp đặt ban đầu các camera. Sau đó, khi nhập những dữ liệu này vào bộ nhớ của tổ hợp máy tính, các giá trị này sẽ trở thành các giá trị danh nghĩa, điều này làm cho sai số đo lường các thành phần xem xét trên được quy về không.

Để xác định vị trí góc và tuyến tính của camera đa cảm biến, một phương pháp lập thể được đề xuất như sau: Theo đó, góc tam diện được tạo bởi ba cạnh kim tự tháp xuất phát từ đỉnh của nó xác định duy nhất một vị trí không gian của đáy kim tự tháp. Trong OES đang được nghiên cứu, các cạnh của góc tam diện là các đường ngắm giao nhau tại điểm chính của vật kính kết nối các điốt phát quang được lắp đặt tại các điểm kiểm soát trên bề mặt MR (được đánh số  $i$ ,  $i + 1$ ,  $i + 2$ ) và các ảnh của chúng trên cảm biến tương ứng  $i$ ,  $i+1$ ,  $i+2$  (hình 5). Các điốt được sử dụng là L-34SF4C với công suất 20 mWt, các cảm biến được sử dụng là CMOS OV05620 có độ phân giải 5 Mp, số điểm ảnh  $2592 \times 1944$  và kích thước một pixel là  $2,2 \times 2,2 \mu\text{m}$ .



Hình 5. Nguyên tắc lập thể xác định tọa độ góc và tuyến tính của camera trong không gian.

Tại thời điểm thiết lập ban đầu, các điốt phát quang được đặt tại các điểm kiểm soát, dọc theo bề mặt của paraboloid MR “lý tưởng”, tọa độ của chúng trong hệ tọa độ  $T(X_0Y_0Z_0)$  của MR đã được xác định bằng phương pháp quét sóng radio, đồng thời tọa độ của ma trận cảm biến trong hệ tọa độ  $H(X_HY_HZ_H)$  của camera cũng được xác định trong quá trình lắp đặt các cảm biến. Vì các kim tự tháp này có một đỉnh chung tại điểm chính của vật kính và các cạnh của chúng được tạo thành bởi các đường ngắm chung, nên có thể thu được các tham số về vị trí góc và tuyến tính trong không gian của camera đa cảm biến bằng cách giải một hệ phương trình các đường thẳng trùng với các đường ngắm.

Tọa độ ảnh của các điểm kiểm soát, phụ thuộc vào vị trí của camera, được xác định như sau:

$$\begin{cases} (p_{Hj})_{2,1} = y(U_x, U_y, U_z, \psi, \theta, \xi)_j \\ (p_{Hj})_{3,1} = z(U_x, U_y, U_z, \psi, \theta, \xi)_j \end{cases} \quad (7)$$

Trong đó,  $j$  là chỉ số của ma trận cảm biến được lắp đặt trong camera.

Tọa độ ảnh của các điểm kiểm soát trên bề mặt MR “lý tưởng” được xác định bằng hệ thống vi xử lý của mỗi cảm biến biểu diễn như sau:

$$\begin{cases} (p_{H0j})_{2,1} = y_{0j} \\ (p_{H0j})_{3,1} = z_{0j} \end{cases} \quad (8)$$

Trong đó,  $y_{0j}$ ,  $z_{0j}$  là tọa độ ảnh của điểm kiểm soát hiển thị trên cảm biến thứ  $j$  của camera.

Với mảng tọa độ hình ảnh thu được của tất cả các điểm kiểm soát từ phương trình (8), thay vào và giải hệ phương trình (7), vị trí góc và tuyến tính của camera tại thời điểm lắp đặt ban đầu được xác định là:

$$S_0 = (U_{x0}, U_{y0}, U_{z0}, \psi_0, \theta_0, \xi_0) \quad (9)$$

Để tính toán sai số trong việc xác định vị trí góc và tuyến tính của camera, cần xác định ảnh hưởng sai số vị trí của ảnh trên cảm biến, tức là xem xét ảnh hưởng của nhiễu trên mỗi cảm biến CMOS (vì qua khảo sát vật kính có thể bỏ qua ảnh hưởng của quang sai và thuật toán xác định trọng tâm vết ảnh). Khi đó, tọa độ ảnh thu được trên mỗi cảm biến được xác định với sai số là:

$$\begin{cases} y_j = y_{0j} + \delta y_j \\ \tilde{z}_j = z_{0j} + \delta z_j \end{cases} \quad (10)$$

Trong trường hợp này, các sai số  $\delta y_j$ ,  $\delta z_j$  được mô hình hóa như các biến ngẫu nhiên có luật phân phối chuẩn và độ lệch chuẩn  $\rho = 0,05$  pixel. Kết quả là thu được hệ phương trình phi tuyến:

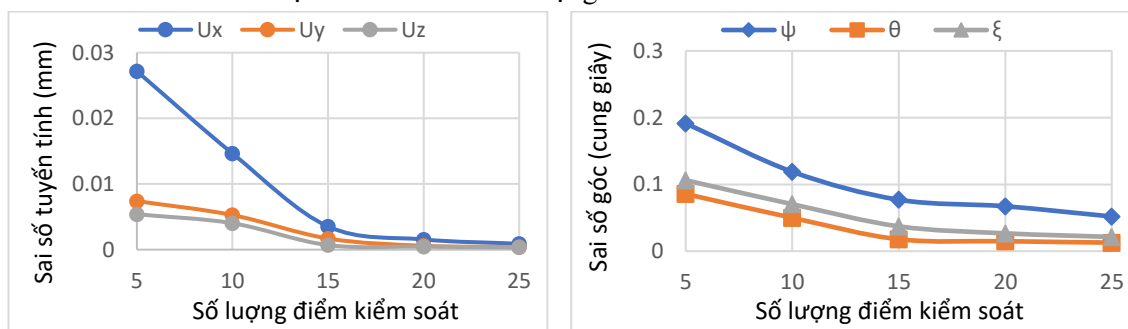
$$\begin{cases} y(U_x, U_y, U_z, \psi, \theta, \xi)_j = y_j \\ z(U_x, U_y, U_z, \psi, \theta, \xi)_j = \tilde{z}_j \end{cases} \quad (11)$$

Khi giải hệ phương trình phi tuyến (11) theo phương pháp Levenberg-Marquardt, 6 tham số định vị không gian của camera được xác định:

$$S = (U_x, U_y, U_z, \psi, \theta, \xi) \quad (12)$$

So sánh mảng kết quả  $S$  từ phương trình (12) với các giá trị danh nghĩa của mảng  $S_0$  được tìm thấy trước đó từ phương trình (9) cho phép tính toán sai số trong việc xác định vị trí góc và tuyến tính của camera đa cảm biến do ảnh hưởng của nhiễu trong CMOS.

Hình 6 đồ thị về sự phụ thuộc của sai số trong việc xác định tham số định hướng không gian của khối đa ma trận tùy thuộc vào số lượng phương trình cần giải trong hệ (11) – tương ứng là số điểm kiểm soát trên bề mặt MR của kính viễn vọng.



**Hình 6.** Sự phụ thuộc của sai số xác định vị trí tuyến tính của camera đa cảm biến vào số lượng điểm kiểm soát trong trường nhìn của nó.

Từ các kết quả thu được trên, có thể thấy rõ sai số trong việc xác định vị trí không gian của camera giảm khi số lượng điểm kiểm soát tăng lên, trên thực tế là số lượng phương trình trong hệ

được giải. Khi số lượng điểm kiểm soát tăng lên 25 điểm, tương ứng là sử dụng tất cả 50 phương trình để giải hệ, thì sai số xác định vị trí góc không vượt quá 0,05 cung giây và vị trí tuyến tính là không quá 0,005 mm. Với những giá trị sai số này thì vị trí trong không gian của camera đảm bảo mức độ tác động tới sai số phép đo độ dịch chuyển điểm kiểm soát nằm trong giới hạn là 0,1 mm. Do vậy, số lượng điểm kiểm soát cần thiết trong trường nhìn của một camera là 25 điểm.

### 3.2. Tính toán số lượng điểm kiểm soát cần thiết trên bề mặt gương phản xạ chính của kính viễn vọng RT-70

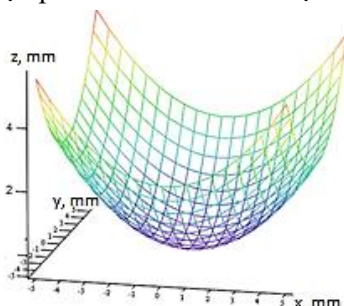
Trong quá trình vận hành hệ thích ứng cho bề mặt MR, sau khi đo sự dịch chuyển của các điểm kiểm soát, các mệnh lệnh được đưa ra từ bộ xử lý trung tâm để căn chỉnh các tấm phản xạ đưa chúng tới một vị trí mới tương ứng với bề mặt của một paraboloid gần đúng mới. Để hoạt động trong phạm vi dải bước sóng vô tuyến, sai số hình dạng bề mặt paraboloid MR của kính viễn vọng vô tuyến RT-70 không được vượt quá giá trị  $\sigma = 0,05$  mm [3]. Phương trình paraboloid:

$$Z_0 = \frac{X_0^2}{4 \cdot F} + \frac{Y_0^2}{4 \cdot F} \quad (13)$$

Tổng sai số của phép đo độ dịch chuyển của các điểm kiểm soát có thể được tính toán từ kết quả mô phỏng là 0,1 mm. Và để xác định số lượng điểm kiểm soát cần thiết để đạt được paraboloid gần đúng với độ chính xác trong giá trị cho phép kỹ thuật dưới đây được áp dụng.

Mô phỏng được thực hiện trong các điều kiện ban đầu sau đây:

1. Giá trị bình phương trung bình của tổng sai số khi đo độ dịch chuyển của các điểm kiểm soát là 0,1 mm.
2. Đường kính của vòng đỡ ở đỉnh paraboloid MR là 6000 mm, các camera đa cảm biến được đặt dọc theo chu vi ngoài của nó, trong trường nhìn của mình mỗi camera quan sát được  $n$  điểm kiểm soát. Các điểm kiểm soát được phân bố đều trên bề mặt MR.



Hình 7. Một paraboloid gần đúng được mô phỏng từ  $m$  điểm kiểm soát.

Qua trình mô phỏng tính toán được thực hiện theo thuật toán sau:

1. Xác định tọa độ của các điểm của paraboloid "lý tưởng". Trong trường hợp không có biến dạng, paraboloid MR của RT-70 có thể được dựng trực tiếp từ phương trình paraboloid (13). Khi mô phỏng, tọa độ  $X_{0i}, Y_{0i}$  của một số điểm đáng kể được đưa ra, còn tọa độ  $Z_{0i}$  tương ứng được tính bằng phương trình (13).
2. Sử dụng phương trình (13) của một paraboloid "lý tưởng", tọa độ  $x_{0i}, y_{0i}, z_{0i}, (i = 1 \dots m)$  được tính cho  $m$  điểm kiểm soát trên bề mặt của nó.
3. Sự dịch chuyển của từng điểm kiểm soát theo hướng pháp tuyến so với bề mặt của paraboloid "lý tưởng" được mô phỏng như một giá trị của biến ngẫu nhiên có phân phối chuẩn và độ lệch chuẩn bằng sai số đo của camera đa cảm biến.
4. Sử dụng hàm "polyfit" (hàm Mathcad 15) và khối phân tích hồi quy Mathcad 15, xác định được các hệ số  $c_k (k = 0 \dots 5)$  của phương trình paraboloid gần đúng và tọa độ  $x_i, y_i, z_i, (i = 1 \dots m)$  được xác định cho  $m$  điểm kiểm soát theo phương trình:

$$z(x, y) = c_0 + c_1x + c_2y + c_3xy + c_4x^2 + c_5y^2 \quad (14)$$

5. Theo phương trình paraboloid gần đúng, thay tọa độ  $X_i = X_{0i}$ ,  $Y_i = Y_{0i}$ , trùng với tọa độ của paraboloid lý tưởng, tọa độ  $Z_i$  của các điểm trên bề mặt của paraboloid gần đúng được xác định.

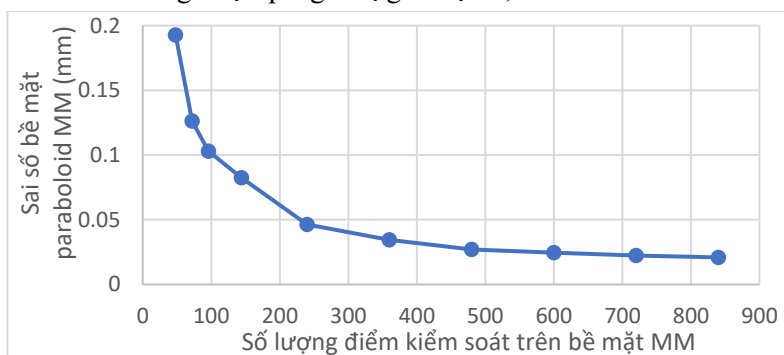
6. Sự khác biệt giữa tọa độ  $Z_i$  của paraboloid gần đúng và  $Z_{0i}$  của paraboloid lý tưởng được tính cho cùng một tọa độ  $X_{0i}$ ,  $Y_{0i}$ :

$$\Delta_i = Z_i - Z_{0i} \quad (15)$$

7. Sai số hình dạng của paraboloid MR được mô phỏng là độ lệch chuẩn của  $\Delta_i$ .

Giá trị của sai số hình dạng bề mặt là một đại lượng phụ thuộc vào số lượng điểm kiểm soát trên bề mặt paraboloid của MR. Xây dựng sự phụ thuộc đó ta được đồ thị hình 8.

Từ sự phụ thuộc thu được có thể thấy, sai số hình dạng bề mặt paraboloid càng giảm dần khi số lượng các điểm kiểm soát tăng lên, tuy nhiên khi số lượng điểm kiểm soát vượt quá 600 điểm ( $m > 600$ ) việc tăng thêm số lượng điểm kiểm soát trên thực tế không làm giảm sai số hình dạng paraboloid. Ngoài ra, tại  $m = 600$ , sai số hình dạng của paraboloid được mô phỏng với sai số đo của camera đa cảm biến không vượt quá giá trị giới hạn 0,05 mm.



**Hình 8.** Sự phụ thuộc của sai số hình dạng paraboloid MR của RT-70 vào số lượng điểm kiểm.

Do đó, trong nghiên cứu này, tổng số điểm kiểm soát trên bề mặt MR của RT-70 được xác định là  $m = 600$ , với số lượng điểm kiểm soát cần thiết trong trường nhìn của một camera đa cảm biến là  $n = 25$  (theo tính toán ở phần trước), vì vậy, số lượng camera đa cảm biến cần thiết cho toàn bộ hệ thống kiểm soát bề mặt MR của RT-70 được xác định là 24.

#### 4. KẾT LUẬN

Dựa trên cấu trúc được đề xuất, một mô hình toán học được xây dựng cho camera đa cảm biến để đo độ dịch chuyển của điểm kiểm soát trên bề mặt MR. Kết quả mô phỏng, tính toán cho thấy tọa độ của một điểm kiểm soát được xác định với sai số trong giới hạn cho phép là 0,1 mm, khi vị trí ban đầu của camera được xác định bởi 25 điểm kiểm soát với những sai số vị trí góc không vượt quá 0,05 cung giây và vị trí tuyến tính là không quá 0,005 mm.

Toàn bộ bề mặt MR, sai số hình dạng bề mặt càng giảm khi số lượng điểm kiểm soát tăng lên. Đối với kính viễn vọng RT-70, quá trình tính toán cho ra kết quả là cần thiết phải kiểm soát 600 điểm để đạt được sai số hình dạng bề mặt paraboloid MR không vượt quá giá trị giới hạn là 0,05 mm. Từ đó, số lượng camera đa cảm biến trong hệ thống OES kiểm soát bề mặt MR kính viễn vọng vô tuyến RT-70 là 24, các camera này được lắp đặt trên vòng đỡ ở gần đỉnh của MR.

Kết quả nghiên cứu mô hình cấu trúc camera đa cảm biến này không chỉ áp dụng cho việc kiểm soát bề mặt của kính thiên văn, mà nó hoàn toàn có thể nghiên cứu, phát triển hơn nữa để áp dụng vào nhiều lĩnh vực khác nhau ví dụ để đo đạc, kiểm soát bề mặt của những vật thể có kích thước lớn với nhiều vị trí cần kiểm soát khác như: bề mặt của đập thủy điện, những tòa nhà lớn, các công trình sân vận động, những cây cầu lớn,...

*Lời cảm ơn:* Nhóm tác giả xin cảm ơn Viện Vật lý kỹ thuật, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự đã tạo điều kiện để nhóm nghiên cứu hoàn thành công trình.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Bolli P et al., “The Mobile Laboratory for Radio-Frequency Interference Monitoring at the Sardinia Radio Telescope”, IEEE Antennas and Propagation Magazine, 55(5):19-24, (2014).
- [2]. Andrew Glassner, “An introduction to ray tracing”, Elsevier, (1989).
- [3]. Радиотелескоп PT-70, [Online], URL: <http://mp.ipme.ru/ipme/labs/RT-70/sou30rce/start.html>
- [4]. Rui L, “Research on content-based remote sensing image retrieval: the strategy for visual feature selection, extraction, description and similarity measurement”, Proceedings (Cat. No. 01EX479), (2001).
- [5]. Gao Y. et al., “Development and calibration of an accurate 6-degree-of-freedom measurement system with total station”, Measurement Science and Technology, 27(12): 125103, (2016).
- [6]. Boniger U et al., “On the Potential of Kinematic GPR Surveying Using a Self-Tracking Total Station: Evaluating System Crosstalk and Latency”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, (2010).
- [7]. Li J. et al., “Fast and accurate measurement of large optical surfaces before polishing using a laser tracker”, Chinese Optics Letters, 11(9):091202-91204, (2013).
- [8]. Um K et al., “Developing a laser theodolite for detecting distance using phase difference of incident and reflected waves”, Electronic Materials Letters, 9(4):421-423, (2013).
- [9]. Konyakhin I et al., “Control of the deformation for the millimeter wave range radiotelescope mirrors”, International Society for Optics and Photonics, 7133: 71333R, (2009).
- [10]. Igor Konyakhin et al., “The experimental research of the systems for measuring the angle rotations and line shifts of the large aperture radio-telescope components”, Proc. SPIE, Vol. 7544, (2010).
- [11]. Konyakhin I.A., Tong M.H., “Multi-matrix optic-electronic systems for measuring the line shifts of the points on the radio-telescope main mirror”, Proceedings of SPIE, Vol. 11053, pp. 1105307, (2019).
- [12]. Li R. et al., “Multi-matrix opto-electronic system for measuring deformation of the millimeter range radiotelescope elements”, Optoelectronics Letters, Vol. 15, No. 2, pp. 144-146, (2019).
- [13]. Коныхин И.А., Усик А.А., “Исследование многоматричной оптико-электронной системы контроля элементов радиотелескопа PT-70 «СУФФА»”, Оптический журнал, том.80, №12, (2013).
- [14]. Бузян А.Т., “Исследование системы контроля положения элементов конструкции радиотелескопа PT-70 на физической модели”, Труды КМУ 2005, 298-300 с.
- [15]. Korn G.A., Korn T.M. “Mathematical handbook for scientists and engineers: definitions, theorems, and formulas for reference and review”, vol. 1152. Dover Publications, New York (2000).
- [16]. Хоанг А.Ф et al., “Анализ погрешности определения параметров поворота мультиматричного блока прогибомера”, Вестник ИТМО. - Т. 19. - № 5(123). - С. 818-824, (2019).
- [17]. Phuong H. et al., “Optical-Electronic System for Measuring Spatial Coordinates of an Object by Reference Marks”, Studies in Systems, Decision and Control, Vol. 261, pp. 217-227, (2020).

### ABSTRACT

#### Research on building a model of multi-sensor optoelectronic system to control the surface of large objects

*This study proposed and studied a completely new optoelectronic system (OES) with multi-sensor matrix structure (CMOS) for measuring the main reflector surface deformation (MR) of a big-sized radio telescope. This system includes 24 multi-sensor cameras, in each 25 sensors are arranged, and each sensor is responsible for image acquisition of a control point on the MR surface. The simulation and calculation studies show that angular and linear errors when determining the initial position of multi-sensor cameras do not exceed 0.05 arcsecond and 0.005 mm, which will ensure an accuracy of 0.1 mm when locating control points on the main reflector surface. At the same time, the simulation also shows that the proposed EOS can control the entire reflector with the surface error not exceeding the limit value of 0.05 mm.*

**Keywords:** Optoelectronic system (OES); Multi-sensor camera; Radio telescope; Main reflector (MR); Control point.