# XÂY DỰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN ỔN ĐỊNH TRẠM QUAN SÁT QUANG ĐIỆN TỬ TRÊN TÀU MẶT NƯỚC DƯỚI TÁC ĐỘNG CỦA ĐIỀU KIỆN SÓNG BIỂN

STABLE CONTROLLER DESIGN FOR ELECTRO-OPTICAL OBSERVATION STATION ON THE SURFACE SHIP SUBJECT TO THE IMPACT OF SEA WAVE CONDITIONS

DOI: http://doi.org/10.57001/huih5804.2025.060

## TÓM TẮT

Hệ truyền động trạm quan sát quang điện tử trên tàu mặt nước là một hệ thống điều khiển 2 kênh theo phương ngang và phương thẳng đứng, chịu ảnh hưởng chéo giữa 2 kênh, lực ma sát, chuyển động của tàu, sóng, gió trên biển. Bài báo này đưa ra giải quyết vấn đề điều khiển trạm quan sát quang điện tử trên tàu mặt nước dưới các điều kiện tác động là các góc lắc của tàu nhằm ổn định đường ngắm từ trạm quan sát đến mục tiêu. Sử dụng phương pháp lặp giá trị để tính toán bộ điều khiển bám tuyến tính bậc 2 dạng rời rạc cho hệ truyền động tầm, hướng. Mục tiêu của bộ điều khiển là hệ truyền động bám sát tốt sự thay đổi liên tục của góc điều khiển với sai số nhỏ hơn 2 mrad.

Từ khóa: Bộ điều khiển bám tuyến tính bậc 2 rời rạc; phương pháp lặp giá trị.

### ABSTRACT

The electro-optical observation station drive system on the surface ship is a 2-channel control system in the altitude and azimuth directions, and is affected by cross-influence between the channels, friction force, ship motion, waves, and wind at sea. This paper presents a solution for controlling the observation station on a surface ship under the impact conditions of the angles of the ship to stabilize the line of sight from the observation station to the target. Using the value iteration method to calculate discrete time linear quadratic tracking controllers for the altitude and azimuth drive system. The goal of the controllers is that the drive system closely tracks the continuous change of the control angle with an error of less than 2 mrad.

*Keywords:* Discrete time linear quadratic tracking controller; value iteration method.

<sup>1</sup>Học viện Kỹ thuật Quân sự <sup>2</sup>Viện Tên lửa và kỹ thuật điều khiển, Học viện Kỹ thuật Quân sự \*Email: hoangminhpt49mta@gmail.com Ngày nhận bài: 16/01/2025 Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 05/3/2025 Ngày chấp nhận đăng: 28/3/2025

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hiện nay, trong lĩnh vực quân sự, việc trang bị và sử dung hiêu quả các tram guan sát guang điên tử trên tàu mặt nước đóng vai trò quan trọng trong tác chiến hiện đại, từ nhiệm vụ quan sát, trinh sát, giám sát vùng trời, vùng biển xung quanh tàu, đến cảnh báo, thu thập thông tin mục tiêu để chỉ thị, điều khiển hỏa lực. Trạm quan sát quang điện tử có thể theo dõi chính xác, bí mật cả ban ngày lẫn ban đêm và có khả năng quan sát xa, rõ nét với các camera hiện đại. Để ổn định được hình ảnh camera trên thiết bị hiển thị, bộ điều khiển chuyển động của trạm quan sát đóng vai trò quan trọng. Chính vì vậy việc nghiên cứu xây dựng bộ điều khiển có khả năng ổn định đường ngắm tới mục tiêu là yêu cầu mang tính thời sự. Trạm quan sát có cấu tạo gồm khối hướng có khả năng quay theo phương ngang, khối tầm được đặt trên khối hướng và quay theo phương thẳng đứng. Trên khối tầm bố trí các camera và các thiết bị đo đạc khác. Hai trục quay của khối tầm và khối hướng được dẫn động bằng động cơ điện, xét theo quan điểm cơ học thì có thể thấy đây là hệ RLED robot, tương đương với tay máy 2 bâc tư do. Có nhiều thuật toán đã được đưa ra điều khiển đối tượng này, trong đó PID là một phương pháp được ứng dụng phổ biến để điều khiển từng kênh riêng biệt, tuy nhiên trạm quan sát luôn phải chịu các tác động từ sự rung lắc của tàu và ảnh hưởng lẫn nhau giữa các chuyển động của kênh tầm hướng cũng như sự ảnh hưởng của lực ma sát khiến cho bộ điều khiển PID không đạt được chất lượng cao. Để nâng cao chất lượng điều khiển dưới tác động của nhiễu loạn cần sử dụng các thuật toán tiên tiến hơn, ví dụ trong [1] sử dụng back-stepping - chế độ trượt - thích nghi RBFNN, trong [2] sử chế độ trượt - mờ - thích nghi. Trong

Hoàng Quốc Minh<sup>1,\*</sup>, Nguyễn Ngọc Tuấn<sup>2</sup>

bài báo này, nhóm tác giả đề xuất sử dụng thuật toán tối ưu để tổng hợp bộ điều khiển bám tuyến tính bậc 2 rời rạc nhằm điều khiển trạm quan sát với độ chính xác cao.

# 2. ĐỘNG HỌC VÀ ĐỘNG LỰC HỌC TRẠM QUAN SÁT QUANG ĐIỆN TỬ

## 2.1. Mô hình động học ổn định đường ngắm

Các hệ tọa độ được sử dụng để tính toán được thể hiện trên hình 1. Hệ tọa độ địa lí địa phương ONEUp có tâm trùng với trọng tâm tàu. Hệ tọa độ liên kết với tàu mặt nước  $O_T X_T Y_T Z_T$  có tâm  $O_T$  trùng với trọng tâm của tàu,  $Y_T$ có hướng từ trọng tâm của tàu đến mũi tàu,  $Z_T$  có hướng lên trên,  $Y_T$  và  $Z_T$  nằm trong mặt phẳng cắt dọc mũi - lái của tàu,  $X_T$  có hướng sang phải của  $Y_T$  và vuông góc với mặt phẳng cắt dọc mũi - lái của tàu. Hệ tọa độ liên kết gắn liền với đế trạm quan sát  $O_K X_K Y_K Z_K$  có các trục cùng phương với các trục tương ứng của hệ tọa độ tàu.

Hệ tọa độ liên kết với khối quay hướng của trạm quan sát  $O_{K1}X_{K1}Y_{K1}Z_{K1}$  có tâm tại trọng tâm khối hướng, hệ tọa độ liên kết với khối quay tầm  $O_{K2}X_{K2}Y_{K2}Z_{K2}$  có tâm tại trọng tâm khối tầm. Trục  $Y_{K2}$  trùng với trục quan sát của camera.

Gọi Q<sub>c</sub>,  $\psi$ ,  $\theta$  lần lượt là góc hướng, góc lắc dọc và góc lắc ngang của tàu. Chiều dương của các góc Q<sub>c</sub>,  $\psi$ ,  $\theta$  tương ứng với thông số của la bàn hàng hải.



Hình 1. Quy ước các hệ tọa độ trên tàu mặt nước và trạm quan sát

Theo đó, ta có ma trận cos-sin định hướng chuyển từ hệ tọa độ địa lý sang hệ tọa độ tàu:

$$C_{\text{NEUp}}^{\text{T}} = \begin{bmatrix} cQ_{c}c\theta + sQ_{c}s\psi s\theta & cQ_{c}s\psi s\theta - sQ_{c}c\theta & -c\psi s\theta \\ sQ_{c}c\psi & cQ_{c}c\psi & s\psi \\ cQ_{c}s\theta - sQ_{c}s\psi c\theta & -sQ_{c}s\theta - cQ_{c}s\psi c\theta & c\psi c\theta \end{bmatrix}$$
(1)

Các kí hiệu c tương ứng với phép toán cos và s tương ứng với phép toán sin, được sử dụng xuyên suốt trong bài báo.

Gọi góc hướng và góc tầm của trạm quan sát trong hệ tọa độ tàu lần lượt là q và  $\varphi$ . Quy định chiều dương các góc q và  $\varphi$  như hình 1. Ta thu được ma trận chuyển hệ tọa độ từ  $O_K X_K Y_K Z_K$  sang  $O_{K1} X_{K1} Y_{K1} Z_{K1}$  và từ  $O_{K1} X_{K1} Y_{K1} Z_{K1}$  sang  $O_{K2} X_{K2} Y_{K2} Z_{K2}$ :

$$C_{K}^{K1} = [cq - sq 0; sq cq 0; 0 0 1]$$
 (2)

$$C_{K1}^{K2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0; 0 & c\phi & s\phi; 0 & -s\phi & c\phi \end{bmatrix}$$
 (3)

Gọi mục tiêu cần quan sát là P, có góc tầm, hướng trong hệ tọa độ địa lý là  $\varphi_r$ , q<sub>r</sub> và khoảng cách OP là R. Ta có vecto mục tiêu P trong hệ tọa độ ONEUp:

$$\vec{P}_{\text{NEUp}} = \begin{bmatrix} Rc\phi_r sq_r & Rc\phi_r cq_r & Rs\phi_r \end{bmatrix}^T$$
(4)

Thông qua các ma trận cos-sin định hướng ở trên, ta tính được các vecto mục tiêu trong hệ tọa độ  $O_T X_T Y_T Z_T$  và hệ tọa độ  $O_{K2} X_{K2} Y_{K2} Z_{K2}$ :

$$\vec{\mathsf{P}}_{\mathsf{T}} = \begin{bmatrix} \mathsf{x}_{\mathsf{P}_{\mathsf{T}}} & \mathsf{y}_{\mathsf{P}_{\mathsf{T}}} & \mathsf{z}_{\mathsf{P}_{\mathsf{T}}} \end{bmatrix}^{\mathsf{T}} = \mathsf{C}_{\mathsf{NEUp}}^{\mathsf{T}} \vec{\mathsf{P}}_{\mathsf{NEUp}}$$
(5)

$$P_{k} = \begin{bmatrix} x_{P_{k}} & y_{P_{k}} & z_{P_{k}} \end{bmatrix}$$
$$= C_{k1}^{K2} C_{k}^{K1} \begin{bmatrix} x_{P_{k}} + d_{1} & y_{P_{k}} - d_{2} & z_{P_{k}} - h \end{bmatrix}^{T}$$
(6)

Do trục quan sát của camera trùng với trục Y<sub>K2</sub>, do vậy để ổn định đường ngắm của trạm quan sát, vecto  $\vec{P}_{k}$  phải cùng phương, cùng hướng với vecto  $\vec{P}_{r} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^{T}$  [3], hay:

Từ đó ta có:

$$\tan \varphi = \frac{z_{P_{-T}} - h}{\sqrt{\left(x_{P_{-T}} + d_{1}\right)^{2} + \left(y_{P_{-T}} - d_{2}\right)^{2}}}$$

$$\tan q = \frac{x_{P_{-T}} + d_{1}}{y_{P_{-T}} - d_{2}}$$
(8)

Khi R =  $\infty$  thì coi như 2 vec tơ  $\vec{P}_{\kappa}$  và  $\vec{P}_{\tau}$  là song song với nhau, khi đó:

$$\tan \varphi = \frac{z_{P_{-T}}}{\sqrt{x_{P_{-T}}^2 + y_{P_{-T}}^2}} \qquad \tan q = \frac{x_{P_{-T}}}{y_{P_{-T}}}$$
(9)

## 2.2. Mô hình động lực học trạm quan sát

Ta xem xét mô hình trạm quan sát có dạng như hình 2, là đối tượng điều khiển dạng RLED robot, sử dụng động cơ một chiều kích từ độc lập. Các cảm biến đo trên các kênh có đầu ra dạng số. Dẫn động từ các trục động cơ tới trục quay các kênh sử dụng hộp giảm tốc. Khối tầm và khối hướng được thiết kế chính xác nhờ các công cụ gia công hiện đại sao cho momen quán tính của các khối là dạng momen trục chính.



Hình 2. Mô hình hệ truyền động trạm quan sát

Ta đặt các kí hiệu vecto tốc độ góc trong các hệ tọa độ O<sub>K</sub>, O<sub>K1</sub>, O<sub>K2</sub> và momen quán tính dạng trục chính của khối hướng và khối tầm như sau:

$$\begin{split} \boldsymbol{\omega}_{K} &= \begin{bmatrix} \boldsymbol{\omega}_{Kx} & \boldsymbol{\omega}_{Ky} & \boldsymbol{\omega}_{Kz} \end{bmatrix}^{T} \quad \boldsymbol{\omega}_{K1} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\omega}_{qx} & \boldsymbol{\omega}_{qy} & \boldsymbol{\omega}_{qz} \end{bmatrix}^{T} \\ \boldsymbol{\omega}_{K2} &= \begin{bmatrix} \boldsymbol{\omega}_{\phi x} & \boldsymbol{\omega}_{\phi y} & \boldsymbol{\omega}_{\phi z} \end{bmatrix}^{T} \\ \boldsymbol{J}_{q} &= diag \begin{bmatrix} \boldsymbol{J}_{qx} & \boldsymbol{J}_{qy} & \boldsymbol{J}_{qz} \end{bmatrix} \qquad \boldsymbol{J}_{\phi} = diag \begin{bmatrix} \boldsymbol{J}_{\phi x} & \boldsymbol{J}_{\phi y} & \boldsymbol{J}_{\phi z} \end{bmatrix} \end{split}$$

Trong đó:  $\omega_{Kx}$ ,  $\omega_{Ky}$ ,  $\omega_{Kz}$  là hình chiếu vecto tốc độ góc của đế trạm quan sát trong hệ tọa độ O<sub>K</sub> lên các trục X<sub>K</sub>, Y<sub>K</sub>, Z<sub>K</sub>;  $\omega_{qx}$ ,  $\omega_{qy}$ ,  $\omega_{qz}$  là hình chiếu vecto tốc độ góc của khối hướng trong hệ tọa độ O<sub>K1</sub> lên các trục X<sub>K1</sub>, Y<sub>K1</sub>, Z<sub>K1</sub>;  $\omega_{qx}$ ,  $\omega_{qy}$ ,  $\omega_{qz}$  là hình chiếu vecto tốc độ góc của khối tầm trong hệ tọa độ O<sub>K2</sub> lên các trục X<sub>K2</sub>, Y<sub>K2</sub>, Z<sub>K2</sub>; J<sub>qx</sub>, J<sub>qy</sub>, J<sub>qz</sub> là momen quán tính trục chính của khối hướng khi quay quanh các trục hệ tọa độ O<sub>K1</sub>; J<sub>qx</sub>, J<sub>qy</sub>, J<sub>qz</sub> là momen quán tính trục chính của khối tầm khi quay quanh các trục hệ tọa độ O<sub>K2</sub>.

Từ đó, theo phương pháp được sử dụng trong [4] ta nhận được phương trình động lực học kênh hướng và kênh tầm:

$$T_{mq} = \frac{J_{qz\Sigma}}{i_q \eta_q} \ddot{q} + \frac{J_{\phi y} - J_{\phi z}}{i_q \eta_q} \dot{\phi} \dot{q} s 2\phi + f_q$$
(10)

$$T_{m\phi} = \frac{J_{\phi x}}{i_{\phi} \eta_{\phi}} \ddot{\phi} - \frac{J_{\phi y} - J_{\phi z}}{2i_{\phi} \eta_{\phi}} \dot{q}^2 s 2\phi + f_{\phi}$$
(11)

Trong đó: T<sub>mq</sub> là momen sinh ra bởi động cơ hướng; T<sub>mφ</sub> là momen sinh ra bởi động cơ tầm; i<sub>q</sub>, η<sub>q</sub> lần lượt là tỉ số truyền và hiệu suất truyền momen từ động cơ hướng lên trục quay kênh hướng; i<sub>\varphi</sub>,  $\eta_{\varphi}$  lần lượt là tỉ số truyền và hiệu suất truyền momen từ động cơ tầm lên trục quay kênh tầm; f<sub>q</sub> là nhiễu tổng tác động lên trục động cơ hướng; f\varphi là nhiễu tổng tác động lên trục động tầm.

$$\begin{split} f_{q} &= \frac{1}{i_{q} \eta_{q}} \begin{bmatrix} T_{qms} + \omega_{Kz} \left(J_{\phi y} - J_{\phi z}\right) \dot{\phi} s2\phi \\ + J_{qz\Sigma} \dot{\omega}_{Kz} + \frac{1}{2} \left(J_{\phi y} - J_{\phi z}\right) \dot{\omega}_{qy} s2\phi \\ + \omega_{qy} \left(J_{\phi y} - J_{\phi z}\right) \dot{\phi} + \omega_{qx} \omega_{qy} J_{qy} \\ + J_{\phi y} \omega_{qx} \omega_{qy} c^{2} \phi \\ + \frac{1}{2} \left(J_{\phi y} - J_{\phi z}\right) \omega_{qx} \omega_{qz} s2\phi \\ + J_{\phi z} \omega_{qx} \omega_{qy} s^{2} \phi - J_{\phi x} \omega_{qx} \omega_{qy} \\ - J_{\phi x} \omega_{qy} \left(\omega_{qx} + \dot{\phi}\right) \end{bmatrix}$$
(12)  
$$f_{\phi} = \frac{1}{i_{\phi} \eta_{\phi}} \begin{bmatrix} T_{\phi ms} + J_{\phi x} \dot{\omega}_{qx} \\ - \left(J_{\phi y} - J_{\phi z}\right) \left(\omega_{qy} \omega_{Kz} + \omega_{qy} \dot{q}\right) c2\phi \\ - \frac{1}{2} \left(J_{\phi y} - J_{\phi z}\right) \left(\omega_{Kz}^{2} + 2\omega_{Kz} \dot{q} - \omega_{qy}^{2}\right) s2\phi \end{bmatrix}$$
(13)  
$$J_{qz\Sigma} = J_{qz} + J_{\phi y} s^{2} \phi + J_{\phi z} c^{2} \phi$$
(14)

Từ (12) và (13) ta có thể thấy, nhiễu tác động lên trục động cơ hướng bao gồm ảnh hưởng do momen ma sát  $T_{qms}$ , góc quay của kênh tầm và dao động của thân tàu khi chịu tác động của sóng gió; nhiễu tác động lên trục động cơ tầm bao gồm ảnh hưởng do momen ma sát  $T_{qms}$ , góc quay của kênh hướng và sự dao động của thân tàu. Ngày nay, nhờ các công cụ thiết kế và gia công hiện đại, việc chế tạo khối tầm của trạm quan sát sao cho  $J_{qy} = J_{qz}$  là hoàn toàn khả thi. Như vậy các phương trình (10), (11), (12), (13) trở thành:

$$T_{mq} = \frac{J_{qz\Sigma}}{i_q \eta_q} \ddot{q} + f_q$$
(15)

$$T_{m\phi} = \frac{J_{\phi x}}{i_{\phi} \eta_{\phi}} \ddot{\phi} + f_{\phi}$$
(16)

$$f_{q} = \frac{1}{i_{q}\eta_{q}} \begin{bmatrix} T_{qms} + J_{qz\Sigma}\dot{\omega}_{Kz} \\ +\omega_{qx}\omega_{qy} \left(J_{qy} + J_{\phi y} - 2J_{\phi x}\right) - J_{\phi x}\dot{\phi}\omega_{qy} \end{bmatrix}$$
(17)

$$f_{\varphi} = \frac{1}{i_{\varphi} \eta_{\varphi}} \left( T_{\varphi ms} + J_{\varphi x} \dot{\omega}_{qx} \right)$$
(18)

Từ (17), (18) ta thấy, biên độ nhiễu đã được giảm thiểu đáng kể nhờ quá trình thiết kế phần cứng. Từ (15), (16) ta đánh giá được các tác động của nhiễu làm thay đổi gia tốc KHOA HỌC CÔNG NGHÊ

chuyển động các kênh trong quá trình điều khiển, đặc biệt là nhiễu thay đổi liên tục theo thời gian, gây khó khăn trong việc điều khiển chính xác vị trí.

Động cơ chấp hành kênh tầm, hướng được chọn là động cơ một chiều kích từ độc lập điều khiển tốc độ bằng cách thay đổi điện áp phần ứng có phương trình cân bằng điện áp và momen sinh ra bởi động cơ là:

$$L\frac{di}{dt} + Ri + K_{E}\omega = U, \ T = K_{M}i$$
(19)

Từ (19) và (10), (11), ta nhận được mô hình toán học của kênh hướng và kênh tầm sau:

$$U_{q} + F_{q} = L_{q} K_{Mq}^{-1} \frac{J_{qz\Sigma}}{i_{q} \eta_{q}} \ddot{q} + \frac{R_{q} K_{Mq}^{-1} J_{qz\Sigma}}{i_{q} \eta_{q}} \ddot{q} + K_{Eq} \dot{q}$$
(20)

$$U_{\varphi} + F_{\varphi} = L_{\varphi} K_{M\varphi}^{-1} \frac{J_{\varphi x}}{i_{\varphi} \eta_{\varphi}} \ddot{\varphi} + \frac{R_{\varphi} K_{M\varphi}^{-1} J_{\varphi x}}{i_{\varphi} \eta_{\varphi}} \ddot{\varphi} + K_{E\varphi} \dot{\varphi}$$
(21)

Với L<sub>q</sub>, R<sub>q</sub>, K<sub>Mq</sub>, K<sub>Eq</sub> lần lượt là giá trị điện cảm, điện trở, hằng số momen, hằng số điện từ của động cơ kênh hướng; L<sub>φ</sub>, R<sub>φ</sub>, K<sub>Mφ</sub>, K<sub>Eφ</sub> lần lượt là giá trị điện cảm, điện trở, hằng số momen, hằng số điện từ của động cơ kênh tầm; F<sub>q</sub> là nhiễu tổng tác động vào kênh hướng; F<sub>φ</sub> là nhiễu tổng tác động vào kênh tầm.

$$F_{q} = -\frac{L_{q}K_{Mq}^{-1}}{i_{q}\eta_{q}} \begin{bmatrix} \dot{J}_{qz\Sigma}\ddot{q} + 2(J_{\phi y} - J_{\phi z})\dot{\phi}^{2}\dot{q}\cos 2\phi \\ +(J_{\phi y} - J_{\phi z})\ddot{\phi}\dot{q}\sin 2\phi \\ +(J_{\phi y} - J_{\phi z})\dot{\phi}\ddot{q}\sin 2\phi + i_{q}\eta_{q}\dot{f}_{q} \end{bmatrix}$$
(22)

$$-R_{q}K_{Mq}^{-1}\left(\frac{J_{\phi y} - J_{\phi z}}{i_{q}\eta_{q}}\dot{\phi}\dot{q}\sin 2\phi + f_{q}\right)$$

$$F_{\phi} = \frac{L_{\phi}K_{M\phi}^{-1}}{i_{\phi}\eta_{\phi}}\left[\begin{pmatrix}J_{\phi y} - J_{\phi z}\end{pmatrix}\dot{\phi}\dot{q}^{2}\cos 2\phi + (J_{\phi y} - J_{\phi z})\dot{q}\ddot{q}\sin 2\phi + i_{\phi}\eta_{\phi}\dot{f}_{\phi}\right]$$
(23)

$$+R_{\phi}K_{M\phi}^{-1}\left(\frac{J_{\phi y}-J_{\phi z}}{2i_{\phi}\eta_{\phi}}\dot{q}^{2}\sin 2\phi+f_{\phi}\right)$$

$$\mathbf{J}_{qq} = \mathbf{R}_{q} \mathbf{K}_{eq}^{-1} \mathbf{K}_{eq}^{-1} \mathbf{J}_{qq}, \quad \mathbf{I}_{eq} = \mathbf{L}_{q} / \mathbf{R}_{q}, \quad \mathbf{M}_{q} = \mathbf{R}_{q} \mathbf{K}_{Mq}^{-1} \mathbf{K}_{eq}^{-1} \mathbf{J}_{qx} / \mathbf{i}_{q} \mathbf{\eta}_{q}$$
 lần lượt là các hằng số điện từ kênh hướng, hằng số tiện từ kênh tầm, hằng số cơ điện kênh hướng và hằng số cơ điện của kênh tầm. Thay các kí hiệu trên vào (18) và (19) ta có:

$$T_{Eq}T_{Mq}\ddot{q} + T_{Mq}\ddot{q} + \dot{q} = K_{Eq}^{-1}U_{q} + K_{Eq}^{-1}F_{q}$$
(24)

$$\mathbf{T}_{\mathsf{E}\boldsymbol{\omega}}\mathbf{T}_{\mathsf{M}\boldsymbol{\omega}}\ddot{\boldsymbol{\varphi}} + \mathbf{T}_{\mathsf{M}\boldsymbol{\omega}}\ddot{\boldsymbol{\varphi}} + \dot{\boldsymbol{\varphi}} = \mathbf{K}_{\mathsf{E}\boldsymbol{\omega}}^{-1}\mathbf{U}_{\boldsymbol{\omega}} + \mathbf{K}_{\mathsf{E}\boldsymbol{\omega}}^{-1}\mathbf{F}_{\boldsymbol{\omega}}$$
(25)

Các phương trình (24) và (25) là mô hình toán học của trạm quan sát, được sử dụng để thiết kế bộ điều khiển cho 2 kênh tầm - hướng. Quá trình mô phỏng chất lượng điều khiển sẽ sử dụng phương trình (10) và (11).

# 3. THUẬT TOÁN TỐI ƯU ỔN ĐỊNH ĐƯỜNG NGẮM TRẠM QUAN SÁT

Như đã trình bày ở phương trình (24), (25) về mô hình toán học trạm quan sát, nếu xem xét thành phần nhiễu  $F_q$ ,  $F_{\phi}$  là nhiễu không phụ thuộc vào trạng thái hệ thống và biến đổi theo thời gian, ta hoàn toàn có thể tổng hợp bộ điều khiển riêng biệt cho từng kênh. Mô hình toán trạm quan sát là các mô hình phi tuyến, để tổng hợp bộ điều khiển bám tuyến tính bậc 2, ta đưa mô hình về dạng tuyến tính bằng cách loại bỏ thành phần nhiễu. Sau khi thiết kế được bộ điều khiển, sẽ đánh giá lại khả năng đáp ứng của hệ thống khi có nhiễu tác động.

Xem xét mô hình toán của kênh tầm, ta đặt kí hiệu sau:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \phi & \dot{\phi} & \ddot{\phi} \end{bmatrix}^{\mathsf{T}}; \quad \mathbf{u} = \mathbf{U}_{\omega}$$

Từ phương trình (25) và cách đặt kí hiệu như trên, bỏ qua tác động của nhiễu, ta có mô hình không gian trạng thái hệ thống điều khiển kênh tầm:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{T_{E\phi}T_{M\phi}} & -\frac{1}{T_{E\phi}} \end{bmatrix}$$
Với
$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_{E\phi}^{-1}}{T_{E\phi}T_{M\phi}} \end{bmatrix} C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$
(27)

Với mô hình trạm quan sát như đã trình bày ở phần 3, bộ điều khiển số là lựa chọn thích hợp. Do vậy trước hết cần tính toán mô hình không gian trạng thái hệ thống điều khiển kênh tầm dưới dạng rời rạc với thời gian lấy mẫu 1µs. Ta nhận được mô hình mới sau:

$$x(k+1) = A_n x(k) + B_n u(k)$$
  

$$y(k) = C_n x(k)$$
(28)

Để đảm bảo việc điều khiển bám sát kênh tầm với độ chính xác cao, lựa chọn hàm chỉ tiêu chất lượng:

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=k_0}^{\infty} \left\{ \begin{bmatrix} Cx(k) - z(k) \end{bmatrix}^T Q \begin{bmatrix} Cx(k) - z(k) \end{bmatrix} + u^T(k) Ru(k) \right\}$$
(29)

 ${O}$  đây,  $x(k) \in \mathbb{R}^3$  là vecto trạng thái,  $u(k) \in \mathbb{R}, y(k) \in \mathbb{R}$ là tín hiệu điều khiển và giá trị đầu ra kênh tầm;  $A_n \in \mathbb{R}^{3\times 3}$ là ma trận dịch chuyển trạng thái,  $B_n \in \mathbb{R}^3$  là vecto điều khiển,  $C_n \in \mathbb{R}^{1\times 3}$  là vecto đầu ra;  $Q, R \in \mathbb{R}$  là các hằng số dương. Gọi  $z(k) \in R$  là giá trị tham chiếu, mục tiêu của bài toán là đưa sai số e(k) = Cx(k) - z(k) về giới hạn cho phép. Điều đó có nghĩa rằng phải đặt hằng số Q lớn và hằng số R nhỏ.

Chọn hàm tham chiếu được sử dụng để tính toán bộ điều khiển là hàm bậc thang, do vậy:

$$z(k+1) = z(k)$$
 (30)

Từ đó ta xây dựng mô hình động học hệ thống mới:

$$X(k+1) = \begin{bmatrix} x(k+1) \\ z(k+1) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} A_n & 0^{3\times 1} \\ 0^{1\times 3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ z(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_n \\ 0 \end{bmatrix} u(k) = \overline{A}X(k) + \overline{B}u(k)$$
(31)

Ở đây,  $0^{3\times 1}$  và  $0^{1\times 3}$  là các ma trận "không" kích thước 3x1 và 1x3.

Xem xét hàm chỉ tiêu mới:

$$V(X(k)) = \frac{1}{2} \sum_{i=k}^{\infty} \gamma^{i-k} \left[ X(i)^{T} \overline{Q} X(i) + u^{T}(i) Ru(i) \right];$$
  
$$\overline{Q} = \begin{bmatrix} C \\ -1 \end{bmatrix} Q \begin{bmatrix} C & -1 \end{bmatrix}$$
(32)

$$\mathbf{u}(\mathbf{k}) = -\mathbf{K}\mathbf{X}(\mathbf{k}) = -\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{\varphi_1} & \mathbf{K}_{\varphi_2} & \mathbf{K}_{\varphi_3} & \mathbf{K}_{\varphi_4} \end{bmatrix} \mathbf{X}(\mathbf{k})$$
(33)

Theo [5], thuật toán lặp VI với ma trận giá trị  $P \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ được sử dụng để giải bài toán bám tuyến tính bậc 2 (tìm giá trị K của hàm điều khiển), bằng cách lập trình động đối với phương trình đệ quy Lyapunov và phương trình đệ quy hệ số khuếch đại.

Phương trình đệ quy Lyapunov:

$$\mathsf{P}^{\mathsf{j}+\mathsf{1}} = \overline{\mathsf{Q}} + (\mathsf{K}^{\mathsf{j}})^{\mathsf{T}}\mathsf{R}\mathsf{K}^{\mathsf{j}} + \gamma(\overline{\mathsf{A}} - \overline{\mathsf{B}}\mathsf{K}^{\mathsf{j}})^{\mathsf{T}}\mathsf{P}^{\mathsf{j}}(\overline{\mathsf{A}} - \overline{\mathsf{B}}\mathsf{K}^{\mathsf{j}})$$
(34)

Phương trình đệ quy hệ số khuếch đại:

$$\mathbf{K}^{j+1} = \left(\mathbf{R} + \gamma \overline{\mathbf{B}}^{\mathsf{T}} \mathbf{P}^{j+1} \overline{\mathbf{B}}\right)^{-1} \gamma \overline{\mathbf{B}}^{\mathsf{T}} \mathbf{P}^{j+1} \overline{\mathbf{A}}$$
(35)

Ở đây, j là vòng lặp thứ j, vòng lặp dừng lại khi P<sup>j+1</sup> = P<sup>j</sup> hoặc  $|P^{j+1} - P^j| < \varepsilon$  với  $\varepsilon$  dương tự quy định. Thuật toán lặp VI gồm (34) và (35) không cần hệ số khuếch đại và ma trận giá trị ban đầu là ổn định, có thể bắt đầu với bất kì giá trị nào của K và P.

Từ các kết quả trên và phương trình (10), (11) ta có thể xây dựng được sơ đồ cấu trúc hệ điều khiển ổn định và bám của trạm quan sát để mô phỏng như hình 3.



Hình 3. Sơ đồ cấu trúc hệ điều khiển bám kênh tầm của trạm quan sát

Trong đó, f<sub>\u03c0</sub> là nhiễu tác động vào kênh tầm do ảnh hưởng của chuyển động tàu, kênh hướng và momen ma sát kênh tầm, d là tác động ảnh hưởng lên kênh tầm do sự không cân đối của momen quán tính J<sub>\u03c0</sub> và J<sub>\u03c02</sub>. Giả thiết trong quá trình chế tạo chính xác, giá trị của 2 momen quán tính trên bằng nhau, như vậy chỉ còn tác động của nhiễu f<sub>\u03c0</sub>, coi rằng đây là nhiễu thay đổi liên tục theo thời gian, không phụ thuộc vào trạng thái hệ thống.

## 4. MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

Từ cấu trúc của trạm quan sát như trình bày ở phần 3, động cơ được lựa chọn cho kênh tầm là động cơ momen không chổi than S-130-102A của Aerotech, có công suất 389,7W, khối tầm được thiết kế có khối lượng 15kg và kích thước như trong hình 2 (sử dụng phần mềm inventor để thiết kế và tính toán momen quán tính). Sử dụng bộ giảm tốc Harmonic FR-100-320-2-GR, hiệu suất truyền momen là 100% và tỉ số truyền là 320. Các thông số tính toán được như sau:

$$\begin{split} &J_{\phi x} = 0,1506 kgm^{2}, R_{\phi} = 12,5 \ \Omega, L_{\phi} = 3,67 mH, \\ &i_{\phi} = 320, \eta_{\phi} = 1, K_{M\phi} = 2,48 Nm/A, \\ &K_{E\phi} = 2,87 Vs/rad, T_{E\phi} = 2,936 \times 10^{-4}, T_{M\phi} = 8,27 \times 10^{-4} \end{split}$$

Chọn  $\gamma = 1$ , Q = 10<sup>6</sup>; R = 0,002. Giá trị khởi đầu K<sub>0</sub> = 0<sup>1×4</sup>

và  $P_0 = 0^{4\times 4}$ . Sử dụng thuật toán lặp VI như trình bày trong phần 4 ta nhận được:

$$K = \begin{bmatrix} 2,2323 \times 10^4 & 11,9215 & 0,0023 & -2,2323 \times 10^4 \end{bmatrix}$$

Bộ điều khiển được đánh giá thông qua sai số góc quay kênh tầm ở các trường hợp không có nhiễu và có nhiễu tác động. Trong quá trình điều khiển trạm quan sát quang điện tử trên tàu mặt nước, tín hiệu điều khiển là dạng tín hiệu có giá trị thay đổi liên tục phụ thuộc vào quy luật sục sạo mục tiêu, quá trình bám sát mục tiêu và góc lắc của tàu, do vậy trong bài báo này sẽ đánh giá khả năng đáp ứng của góc tầm dưới tác động đầu vào là hàm bậc thang, hàm sin và hàm ramp.

# KHOA HỌC CÔNG NGHỆ

Trường hợp 1: Không có nhiễu tác động trong 5 giây đầu, sau đó chịu tác động của momen cản 5Nm, góc đặt là hàm bậc thang biên độ 1rad, hàm sin có biên độ 1rad, tần số 1rad/s và hàm ramp có độ dốc 1, đáp ứng quá độ đối với hàm bậc thang được thể hiện trong hình 4, sai số bám sát được thể hiện trong các hình 5, 6, 7.



Hình 7. Sai số của kênh tầm với tín hiệu đặt là hàm sin

Trường hợp 2: Nhiễu tác động f<sub> $\phi$ </sub> thay đổi liên tục theo thời gian như hình 8, góc đặt như trường hợp 1, sai số bám sát được thể hiện trên các hình 9, 10, 11.

Thời gian (s)



Hình 8. Nhiễu tác động vào hệ thống điều khiển kênh tầm



Hình 9. Sai số của kênh tầm với tín hiệu đặt là hàm bậc thang khi có nhiễu thay đổi theo thời gian



Hình 10: Sai số của kênh tầm với tín hiệu đặt là hàm ramp khi có nhiễu thay đổi theo thời gian



Hình 11. Sai số của kênh tầm với tín hiệu đặt là hàm sin khi có nhiễu thay đổi theo thời gian







Hình 13. Sai số kênh tầm khi ổn định góc tầm đặt trong hệ tọa độ ONEUp

Để kiểm tra khả năng ổn định đường ngắm của trạm quan sát, cần phải mô phỏng góc lắc của tàu. Theo [6], hầu hết tàu chiến thường được thiết kế với góc lắc ngang tối đa là  $\pi/4$  rad và góc lắc dọc là  $\pi/18$  rad. Tàu chiến có chiều dài tính toán (LPP) từ 46 đến 107m có chu kì lắc dọc khoảng 4 đến 5 giây, chu kì lắc ngang từ 10 đến 20 giây tùy độ lớn của tàu. Chọn các thông số để mô phỏng góc lắc tàu như sau: Q<sub>C</sub> =  $\pi/4$  rad,  $\psi = (\pi/18) \sin(2\pi/5 + \pi/2)$ rad,  $\theta = (\pi/6) \sin(2\pi/10)$  rad. Góc hướng của trạm quan sát trong hệ tọa độ ONEUp là  $\pi/3$  rad, còn góc tầm đặt tại giây thứ 0 là  $\pi/6$ , và giây thứ 5 là  $\pi/3$ . Giới hạn điều khiển đối với kênh tầm là -0,17 tới 1,52rad. Để kiểm tra khả năng ổn định của kênh tầm khi có tác động nhiễu, đặt nhiễu như Hình 8 vào hệ thống. Kết quả mô phỏng được thể hiện trên hình 12, 13.

Quan sát kết quả mô phỏng ta có thể thấy, trong trường hợp 1, khi không có nhiễu tác động, đáp ứng quá độ đối với hàm bậc thang có độ quá chỉnh 4,7% và thời gian xác lập nhanh, góc quay kênh tầm đáp ứng tốt với các giá trị đặt với sai số nhỏ hơn 1mrad. Khi có momen cản tại giây thứ 5, sai số vẫn nhỏ hơn 2mrad. Trong trường hợp 2, khi có nhiễu thay đổi theo thời gian tác động, sai số vẫn nhỏ hơn 2mrad. Đối với trường hợp mô phỏng ổn định đường ngắm, sai số bám sát nhỏ hơn 0,5mrad khi có tác động liên tục của nhiễu, đồng thời khả năng đáp ứng khi thay đổi góc đặt tốt. Điều này thể hiện rõ sự mạnh mẽ của thuật toán điều khiển khi có nhiễu tác động.

## 5. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, nhóm tác giả đã trình bày mô hình động học và động lực học của trạm quan sát quang điện tử và sử dụng thuật toán lặp VI để giải bài toán bám với hàm chỉ tiêu tuyến tính bậc 2 rời rạc, đây là phương pháp lập trình động hiệu quả, đơn giản và không yêu cầu giá trị khởi tạo ban đầu ổn định. Quá trình mô phỏng hệ truyền động kênh tầm có ý nghĩa trong thực tế quá trình điều khiển ổn định trạm quan sát trên tàu, đã xét đến khả năng ổn định của bộ điều khiển khi chịu các nhiễu do momen ma sát và góc lắc của tàu. Kết quả mô phỏng đạt chất lượng tốt, góc tầm đã bám sát được giá trị đặt với sai số nhỏ hơn 2mrad.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. F. Dong, X. Lei, W. Chou, "A Dynamic Model and Control Method for a Two-Axis Inertially Stabilized Platform," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64/1, 432-439, 2017.

[2]. H. T. K. Duyen, N. M. Tien, N. N. Chien, D. H. Viet, N. T. T. Huong, P. C. Kien, "Tracking control for electro-optical system in vibration environment based on self-turning fuzzy sliding mode control," *Journal of Computer Science and Cybernetics*, 35/2, 185-196, 2019.

[3]. D. D. Khoa, L. Q. Duong, "Optimal Control for the Target-Tracking Problem using Three-Axis Camera Gimbals," *Journal of Science and Technology*, 127/1, 35-39, 2018.

[4]. Vũ Quốc Huy, *Nghiên cứu tổng hợp hệ thống tự động bám sát mục tiêu cho đài quan sát trên phương tiện cơ động*. Luận án Tiến sĩ kĩ thuật, Viện Khoa học và Công nghệ Quân sự, Hà Nội, 2017.

[5]. S. Tang, *Linear Quadratic Tracking Based on Reinforcement Learning and Motor Speed Control Without System Dynamics*. MSc. thesis, Northeastern University, Boston, 2020.

[6]. Doerry A. W., *Ship Dynamics for Maritime ISAR Imaging*. Sandia National Laboratories, 2008.

#### **AUTHORS INFORMATION**

Hoang Quoc Minh<sup>1</sup>, Nguyen Ngoc Tuan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Military Technical Academy, Vietnam

<sup>2</sup>Institute of Missiles and Control Engineering, Military Technical Academy, Vietnam