

NGHIÊN CỨU, THIẾT KẾ THUẬT TOÁN ĐIỀU KHIỂN ỔN ĐỊNH CHO THIẾT BỊ ĐẶT TRÊN TÀU

RESEARCH AND DESIGN OF STABILIZATION CONTROL ALGORITHM FOR SHIPBOARD EQUIPMENT

Nguyễn Ngọc Kiên^{1,*}, Vũ Duy Khanh²

¹Khoa Cơ khí chế tạo máy, Trường Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội

²Tổng Công ty Công nghiệp Công nghệ cao Viettel

*Email liên hệ: kien.nguyenngoc@hust.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo này tập trung vào việc nghiên cứu và thiết kế điều khiển cho hệ thống ổn định dao động thiết bị trên tàu biển nhằm duy trì độ ổn định đường ngắm (LOS) cho các thiết bị quan sát, trinh sát và điều khiển hỏa lực ứng dụng trong các lĩnh vực dân sự hoặc quân sự khi đặt trên tàu. Trong môi trường biển, hoạt động của các thiết bị nói trên thường xuyên bị ảnh hưởng bởi nhiễu động từ sóng biển và các chuyển động đa bậc tự do của thân tàu, gây mất ổn định cho dữ liệu quan sát, theo dõi, đo đạc từ cảm biến và đường ngắm của thiết bị điều khiển hỏa lực.

Để giải quyết vấn đề này, tác giả thực hiện mô hình hóa hệ thống ổn định dao động dựa trên nền tảng cơ hệ Gimbal 2 bậc tự do và phân tích sự ảnh hưởng của các thành phần nhiễu lên độ chính xác ổn định của thiết bị. Nghiên cứu đi sâu vào việc thiết kế các thuật toán điều khiển hiện đại nhằm tách biệt hoàn toàn chuyển động của thiết bị khỏi các rung động cơ học, dao động lắc của tàu trên biển và các nhiễu động khác ảnh hưởng đến hệ thống. Tính ổn định và hiệu năng của hệ thống được đánh giá thông qua tốc độ đáp ứng và độ chính xác ổn định. Toàn bộ quy trình thiết kế điều khiển và kiểm chứng thuật toán được mô phỏng trên môi trường Matlab/Simulink, cho thấy hệ thống có khả năng triệt tiêu nhiễu động hiệu quả, đảm bảo tính ổn định với độ chính xác cao cho các thiết bị trong điều kiện vận hành thực tế trên biển.

Từ khóa: Hệ thống ổn định quán tính (ISS); Ổn định đường ngắm (LOS); Gimbal hai trục; Thuật toán điều khiển triệt tiêu nhiễu động; Động lực học hệ Gimbal; Mô phỏng với Matlab/Simulink.

ABSTRACT

This article focuses on researching and designing the control for equipment vibration stabilization systems on ships to maintain Line-of-Sight (LOS) stability for observation, reconnaissance, and fire control equipment applied in civil or military fields when placed on ships. In the marine environment, the operation of the aforementioned equipment is frequently affected by disturbances from sea waves and multi-degree-of-freedom movements of the ship's hull, causing instability for observation data, tracking, measurements from sensors, and the line-of-sight of fire control equipment.

To solve this problem, the author performs modeling of the vibration stabilization system based on a 2-degree-of-freedom Gimbal mechanical system and analyzes the influence of disturbance components on the stabilization accuracy of the equipment. The research goes deep into designing modern control algorithms to completely separate the equipment's motion from mechanical vibrations, ship oscillations at sea, and other disturbances affecting the system. The stability and performance of the system are evaluated through response speed and stabilization accuracy. The entire control design process and algorithm verification are simulated in the Matlab/Simulink environment, showing that the system has the ability to effectively cancel disturbances, ensuring stability with high accuracy for equipment in actual operating conditions at sea.

Keywords: Inertial Stabilization System (ISS); Line-of-Sight (LOS) Stabilization; Two-axis Gimbal; Disturbance Rejection Control Algorithm; Gimbal System Dynamics; Simulation with Matlab/Simulink.

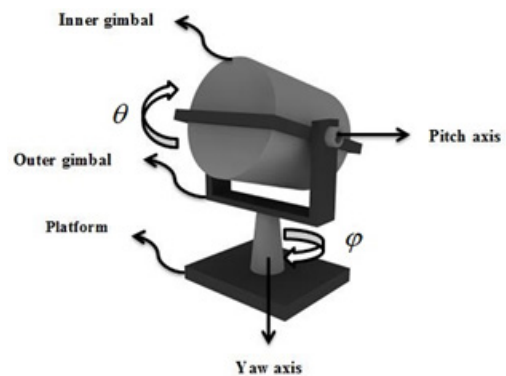
1. NGHIÊN CỨU, MÔ HÌNH HÓA HỆ THỐNG ỔN ĐỊNH DAO ĐỘNG THIẾT BỊ TRÊN TÀU BIỂN

1.1. Giới thiệu về hệ thống ổn định dao động

Trong những năm gần đây, nhu cầu về các hệ thống ổn định với độ chính xác cao hoạt động trong môi trường biển đã tăng lên đáng kể, được thúc đẩy bởi cả các ứng dụng cả dân sự và quân sự. Các thiết bị như camera tầm xa, cảm biến quang học, radar, cảm biến khí tượng hay các hệ thống điều khiển hỏa lực được lắp đặt trên tàu thường xuyên phải chịu các nhiễu động môi trường biển không lường trước được. Những nhiễu động này, chủ yếu do sóng biển và các chuyển động đa bậc tự do của tàu như lắc ngang (roll), lắc dọc (pitch) và xoay (yaw), làm suy giảm nghiêm trọng chất lượng dữ liệu quan sát và độ chính xác của việc theo dõi đường ngắm (LOS).

Để giảm thiểu các tác động này, Hệ thống ổn định quán tính (ISS) 2 bậc tự do, thường được gọi là hệ Gimbal 2 trục đã trở thành một giải pháp công nghệ cốt lõi. Một hệ Gimbal 2 trục điển hình bao gồm: Khung trong (trục pitch) và khung ngoài (trục yaw) được

điều khiển và dẫn động quay bởi các động cơ servo hiệu suất cao [3].



Hình 1.1. Cấu trúc truyền động của hệ thống ổn định dạng Gimbal 2 trục

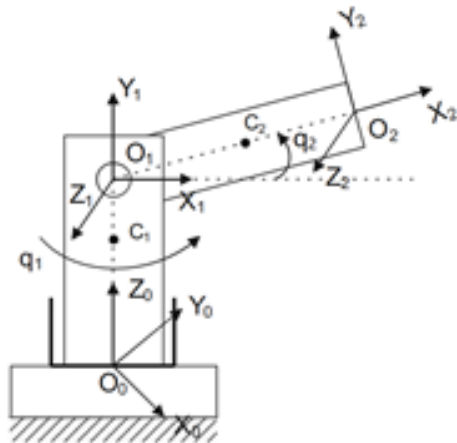
Nguyên lý điều khiển ổn định cơ bản nằm ở việc cô lập các nhiễu động môi trường biển tác động lên chuyển động của thiết bị. Để làm được điều đó, hệ thống phải cảm nhận được các chuyển động góc của bệ bằng cảm biến đo quán tính (IMU) và ra lệnh điều khiển cho các bộ truyền động tạo ra các chuyển động đối kháng theo thời gian thực để đảm bảo ổn định chuyển động cho thiết bị đặt trên [3, 4].

Tuy nhiên, việc đạt được độ chính xác ổn định cao là không hề dễ dàng do đặc

tính động lực học phi tuyến của cơ hệ Gimbal như: Trọng trường, quán tính, lực li tâm, lực Coriolis,... và ma sát cố hữu trong các bộ phận truyền động. Hơn nữa, các yếu tố môi trường bên ngoài như gió giạt và trạng thái biển thay đổi liên tục tạo ra các nhiễu tải ảnh hưởng đáng kể đến độ chính xác ổn định của hệ thống. Các phương pháp điều khiển truyền thống thường gặp khó khăn trong việc duy trì tính bền vững và độ chính xác dưới các điều kiện động này. Do đó, việc nghiên cứu và thiết kế các thuật toán điều khiển hiện đại hướng tới khả năng đáp ứng nhanh và triệt tiêu nhiễu hiệu quả là điều cần thiết để đảm bảo độ tin cậy vận hành của các thiết bị thực hiện nhiệm vụ trên tàu.

1.2. Mô hình hóa hệ thống ổn định dao động

Để hình hóa được hệ thống dưới dạng các phương trình toán học, tác giả đã đơn giản hóa các thiết kế truyền động dưới dạng sơ đồ động học và biểu diễn tọa độ các khâu, khớp theo qui tắc Denavit – Hartenberg (D-H) [1, 2].



Hình 1.2. Sơ đồ động học hệ thống ổn định

Trong đó:

- m_1, m_2 : Khối lượng khâu yaw và pitch;
- $O_1C_1 = l_{C1}, O_2C_2 = l_{C2}$: Chiều dài trọng tâm khâu yaw và pitch;

- l_1, l_2 : Chiều dài khâu yaw và pitch;
- I_{C1}, I_{C2} : Ma trận mô-men quán tính tại trọng tâm khâu yaw và pitch;
- u : Vector mô-men quay khâu yaw và pitch;
- D : Ma trận hệ số cản nhớt tại các khớp quay yaw và pitch.

Chọn tọa độ suy rộng đủ $q = [q_1, q_2]^T$ để mô tả các biến khớp hệ thống và áp dụng quy tắc D-H, ta xây dựng được bảng D-H như sau:

Bảng 1.1. Bảng thông số D-H hệ thống ổn định dao động

Khâu	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	q_1	l_1	0	$\frac{\pi}{2}$
2	q_2	0	l_2	0

Từ bảng 1.1, ta suy ra được các ma trận D-H biến đổi từ khâu $i-1$ sang khâu i dưới dạng:

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} R_i^{i-1} & r_{O_i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Trong đó:

- R_i^{i-1} : Ma trận cosin chỉ hướng khâu $i-1$ so với khâu i ;
- r_{O_i} : Vector gốc tọa độ khâu i .

Tọa độ thuần nhất của trọng tâm các khâu C_i biểu diễn trong hệ tọa độ cố định $Ox_0y_0z_0$:

$$\hat{r}_{Ci}^0 = T_i^0 \cdot \overrightarrow{O_iC_i} = \begin{bmatrix} r_{Ci}^0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Ma trận Jacobi tịnh tiến của khâu i tại trọng tâm C_i biểu diễn trong hệ tọa độ cố định $Ox_0y_0z_0$:

$$J_{TCi} = \frac{\partial \hat{r}_{Ci}^0}{\partial q} \quad (3)$$



Vận tốc góc khâu i trong hệ tọa độ cố định $Ox_0y_0z_0$ được tính theo công thức:

$$\tilde{\omega}_i^0 = \dot{R}_i^0 \cdot R_i^{0T} = \begin{bmatrix} \tilde{\omega}_i^0(3,2) \\ \tilde{\omega}_i^0(1,3) \\ \tilde{\omega}_i^0(2,1) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Ma trận Jacobi quay của khâu i biểu diễn trong hệ tọa độ cố định $Ox_0y_0z_0$:

$$J_{Ri} = \frac{\partial \omega_i^0}{\partial \dot{q}} \quad (5)$$

Tính toán ma trận khối lượng $M(q)$:

$$M(q) = \sum_{i=1}^2 J_{TCi}^T m_i J_{TCi} + J_{Ri}^T R_i^0 I_{Ci} R_i^{0T} J_{Ri} \quad (6)$$

Tính toán ma trận Coriolis và li tâm $C(q, \dot{q})$:

$$c_{ij}(q, \dot{q}) = \sum_{k=1}^2 c_{ijk} \dot{q}_k \quad (7)$$

$$\text{với } c_{ijk} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial m_{ij}}{\partial q_k} + \frac{\partial m_{ik}}{\partial q_j} - \frac{\partial m_{jk}}{\partial q_i} \right)$$

Tính toán vector lực suy rộng có thể:

$$g(q) = \sum_{i=1}^2 -m_i J_{TCi}^T g^0 \quad (8)$$

Tính toán vector lực suy rộng không thể:

$$Q_{kt} := \tau - Q_c = Bu - D\dot{q} \quad (9)$$

Phương trình vi phân chuyển động hệ thống ổn định dao động có dạng:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + D\dot{q} + g(q) = Bu \quad (10)$$

Các phương trình từ (1) đến (10) kể trên được tác giả giải và biểu diễn tường minh dưới

dạng tham số tọa độ suy rộng bằng các phần mềm cho phép tính toán dưới dạng symbolic như Maple hoặc Matlab.

2. THIẾT KẾ ĐIỀU KHIỂN HỆ THỐNG ỔN ĐỊNH DAO ĐỘNG THIẾT BỊ TRÊN TÀU BIỂN

Hệ thống ổn định dao động trên tàu biển rất khó để mô hình hóa chính xác 100% do sự thay đổi của tải trọng, sự mài mòn cơ khí và điều kiện ngẫu nhiên trên biển. Do đó, để đảm bảo tính bền vững và độ chính xác ổn định của hệ thống, tác giả đã lựa chọn thuật toán điều khiển triệt tiêu nhiễu động (ADRC) do nó không đi theo con đường điều khiển dựa trên mô hình truyền thống (Model-based control). Thay vào đó, nó kế thừa ưu điểm của PID (có thể thực nghiệm tuning không cần mô hình) nhưng khắc phục nhược điểm của PID về khả năng chống nhiễu kém và độ trễ của bộ vi phân.

2.1. Tổng quan thuật toán điều khiển triệt tiêu nhiễu chủ động (ADRC)

Thuật toán điều khiển triệt tiêu nhiễu chủ động (ADRC - Active Disturbance Rejection Control) do Giáo sư Han Jingqing đề xuất, đã nổi lên như một giải pháp thay thế mạnh mẽ cho bộ điều khiển PID với cấu trúc điều khiển nổi tảng truyền thống [5]. Khác với các phương pháp điều khiển dựa trên mô hình chính xác (như LQR hay H-infinity), ADRC không yêu cầu một mô hình toán học hoàn chỉnh của đối tượng.

Triết lý cốt lõi của ADRC dựa trên việc xem xét tất cả các thành phần chưa biết, bao gồm:

- Nhiễu nội tại: Sự phi tuyến của hệ thống, sai số mô hình và các thành phần khớp xen kênh (cross coupling).

- Nhiều ngoại vi: Các tác động từ môi trường bên ngoài (sóng biển, gió, rung động cơ khí,...).

Tất cả các thành phần này được gộp chung thành một đại lượng gọi là nhiễu tổng thể. Sau đó, một bộ quan sát trạng thái mở rộng (ESO) được sử dụng để ước lượng liên tục nhiễu tổng thể này và triệt tiêu nó ngay trong luật điều khiển [5].

2.2. Cấu trúc bộ điều khiển triệt tiêu nhiễu động

Ta có phương trình toán mô tả chuyển động của hệ thống (10) dưới dạng hàm vi phân bậc 2, do đó lựa chọn phép xấp xỉ mô hình điều khiển ADRC bậc hai có dạng [6]:

$$y''(t) = b_0 u(t) + f(t) \quad (13)$$

Với các biến trạng thái:

$$x_1 = y(t), x_2 = y'(t) \text{ và } x_3 = f(t).$$

Trong đó:

- $y(t)$: Tín hiệu đầu ra hệ thống;
- $u(t)$: Tín hiệu điều khiển;
- b_0 : Độ lợi tới hạn của hệ thống dưới tác động đầu vào $u(t)$;
- $f(t)$: Tổng nhiễu bao gồm nhiễu nội tại và nhiễu ngoại vi tác động lên hệ thống.

Mô hình không gian trạng thái của hệ thống được biểu diễn dưới dạng như sau:

$$\begin{cases} \dot{x}' = Ax + Bu + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ f'(t) \end{bmatrix} \\ y = Cx \end{cases} \quad (14)$$

Với:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ b_0 \\ 0 \end{bmatrix}, C = [1 \quad 0 \quad 0]$$

Với hệ thống có tính quan sát được này, tác giả sử dụng bộ quan sát (ESO) Luenberger để cung cấp ước lượng về trạng thái và tổng nhiễu tác động lên hệ thống [5]. Phương trình vi phân mô tả bộ quan sát để ước lượng các trạng thái $z = [z_1, z_2, z_3]^T$ như sau:

$$z' = Az + Bu + L(y - Cz) \quad (15)$$

Trong đó, $L = [l_1, l_2, l_3]^T$ là các hệ số quan sát, khai triển ma trận ta có hệ phương trình vi phân liên tục như sau:

$$\begin{cases} z_1' = z_2 + l_1(y - z_1) \\ z_2' = z_3 + b_0 u + l_2(y - z_1) \\ z_3' = l_3(y - z_1) \end{cases} \quad (16)$$

Và các hệ số l_1, l_2, l_3 theo [6] được chọn theo bảng thông bộ quan sát ω_0 với: $l_1 = 3\omega_0$, $l_2 = 3\omega_0^2$, $l_3 = \omega_0^3$.

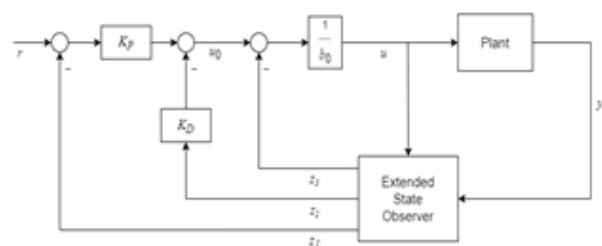
Khi đó, đầu ra bộ điều khiển là tín hiệu $u(t)$ được tính toán như sau:

$$u(t) = \frac{u_0(t) - z_3}{b_0} \quad (17)$$

Với:

$$u_0(t) = K_p(r(t) - z_1) - K_D z_2 \quad (18)$$

Dựa theo cơ sở lý thuyết đã phân tích ở trên, cấu trúc bộ điều khiển được mô tả dưới dạng sơ đồ khối chức năng như sau:



Hình 2.1. Cấu trúc điều khiển triệt tiêu nhiễu chủ động - ADRC

2.3. Phương pháp ước lượng tham số điều khiển

Để triển khai hiệu quả bộ điều khiển ADRC cho hệ thống ổn định dao động, ta cần xây dựng được phương pháp và công thức ước lượng độ lợi tới hạn b_0 và độ lợi điều khiển K_p , K_d [6].

Phương pháp được tác giả đề xuất trong bài viết lần này dựa trên thử nghiệm đáp ứng tự nhiên của hệ thống ổn định dao động, từ đó xác định được hệ số b_0 và hệ số K_p , K_d . Chi tiết các bước và công thức được mô tả theo các mục cụ thể dưới đây:

- Xác định hệ số b_0 :

Bước 1: Kiểm tra đáp ứng hệ thống ở chế độ vòng hở trong phạm vi hoạt động bằng tín hiệu đầu vào dạng bước nhảy (Step) với biên độ u_{oL} .

Bước 2: Theo dõi và ghi lại sự thay đổi đầu ra hệ thống $y(t)$ trong một khoảng thời gian t .

Bước 3: Áp dụng công thức xấp xỉ đầu ra theo đáp ứng gia tốc của hệ thống $y = \frac{1}{2}at^2$ và xác định hệ số gia tốc a theo công thức:

$$a = \frac{2(y(t) - y(0))}{t^2} \quad (19)$$

Bước 4: Xác định hệ số b_0 từ đáp ứng gia tốc a của hệ thống và tín hiệu đầu vào dạng bước nhảy u_{oL} :

$$b_0 = \frac{a}{u_{oL}} \quad (20)$$

- Xác định hệ số K_p , K_d :

Từ phương trình (18) và giả sử bộ quan

sát hoạt động lý tưởng, tức $z_1 = y$ và $z_2 = y'$, khi đó thực hiện biến đổi Laplace hai vế của phương trình với điều kiện đầu bằng 0, ta thu được hàm truyền bộ điều khiển có dạng như sau [6]:

$$G_{cl} = \frac{k_p}{s^2 + k_d s + k_p} \quad (21)$$

Để hàm truyền hệ thống ổn định và có đáp ứng mong muốn, ta so sánh mẫu số của hàm truyền (21) với phương trình đặc trưng chuẩn của hệ dao động bậc 2: $s^2 + 2\xi\omega_c s + \omega_c^2 = 0$. Từ đó, ta rút ra được công thức tính toán hệ số k_p , k_d như sau [6]:

$$k_p = \omega_c^2 \quad (22)$$

$$k_d = 2\xi\omega_c \quad (23)$$

Trong đó:

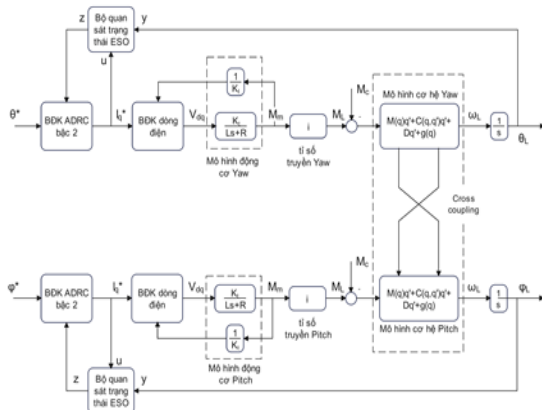
- ω_c : Băng thông của bộ điều khiển hệ thống;
- ξ : Hệ số cản. Trong thực tế thường chọn bằng 1 (hệ số cản tới hạn).

Trong thực tế, ta có thể tăng từ từ ω_c lên cho đến khi hệ thống đạt hiệu suất mong muốn, tuy nhiên có một cách khoa học và hiệu quả hơn là dựa vào tần số dao động riêng của cơ hệ ω_n . Khi tần số điều khiển tiến tới gần tần số dao động riêng của cơ hệ sẽ gây ra hiện tượng cộng hưởng làm mất ổn định hệ thống, do đó để đảm bảo tính bền vững cho hệ thống trong thực tế sẽ cần khảo sát tần số dao động riêng của cơ hệ và chọn $\omega_c \leq \omega_n$.

3. MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ ĐÁP ỨNG ĐIỀU KHIỂN ỔN ĐỊNH CHO HỆ THỐNG

Để kiểm chứng các cơ sở lý thuyết đã phân tích về việc lựa chọn cấu trúc và thiết kế điều khiển bù nhiễu chủ động cho hệ thống ổn

định dao động kể trên, tác giả đã xây dựng mô hình hệ thống và thiết kế điều khiển trên môi trường Simulink của Matlab để mô phỏng lại ứng xử của hệ thống theo các kích bản kiểm nghiệm đáp ứng điều khiển. Mô hình và cấu trúc điều khiển hệ thống được thể hiện như hình 3.1:



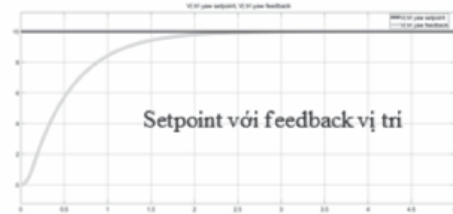
Hình 3.1. Sơ đồ khối chức năng điều khiển hệ thống ổn định dao động

Trong đó:

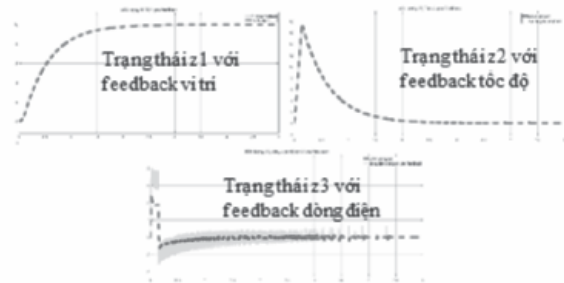
- Mô hình cơ hệ: Được xây dựng dựa phương trình vi phân chuyển động (10) ở mục 1.2.
- Mô hình động cơ: Sử dụng hàm truyền động cơ PMSM kinh điển dưới dạng khâu quán tính bậc nhất phụ thuộc vào tham số R, L của động cơ.
- BDK dòng điện: Sử dụng khối Current controller và điều chế vector không gian FOC có sẵn của Matlab để có thể sinh ra mô-men quay động cơ.
- BDK ADRC bậc 2: Áp dụng cấu trúc bộ điều khiển PD + bộ quan sát ESO như đã phân tích ở mục 2.

Dưới đây là kết quả mô phỏng đáp ứng điều khiển của hệ thống ổn định dao động theo các kích bản đầu vào hệ thống:

1) Kích bản điều khiển vị trí với lượng đặt điều khiển dạng xung STEP:



Hình 3.2. Đáp ứng điều khiển trục yaw với lượng đặt vị trí dạng xung Step

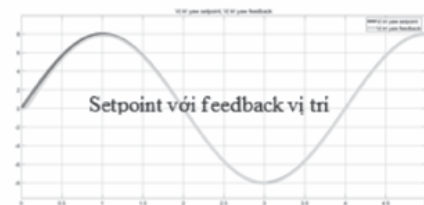


Hình 3.3. So sánh trạng thái ước lượng z của bộ quan sát ESO (màu đỏ) với tín hiệu feedback thực (màu đỏ) của hệ thống

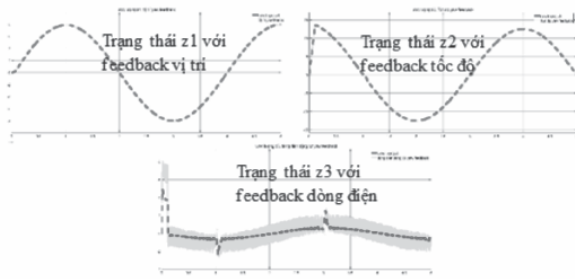
Đánh giá:

- Thời gian quá độ: 1.5s;
- Thời gian xác lập: 2.5s;
- Độ quá điều chỉnh: 0%;
- Sai lệch tĩnh: 0.01 độ;
- Bộ quan sát ước lượng trạng thái và nhiễu chính xác.

2) Kích bản điều khiển bám quỹ đạo hình SIN:



Hình 3.4. Đáp ứng điều khiển trục yaw với lượng đặt vị trí dạng quỹ đạo hình SIN: $y = 8\sin(0.5\pi t)$

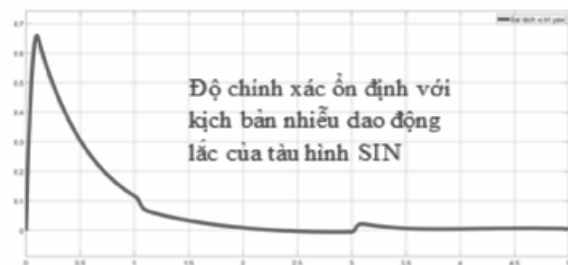


Hình 3.5. So sánh trạng thái ước lượng z của bộ quan sát ESO (màu đỏ) với tín hiệu feedback thực (màu đỏ) của hệ thống

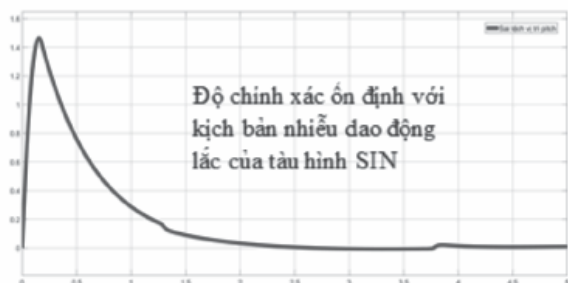
Đánh giá:

- Thời gian xác lập: 1.0s;
- Sai lệch bám: < 0.1 độ RMS;
- Bộ quan sát ước lượng trạng thái và nhiễu chính xác.

3) Kịch bản điều khiển ổn định với nhiễu đầu vào là dao động lắc hình SIN của tàu:



Hình 3.6. Đáp ứng độ chính xác ổn định trục yaw với nhiễu đầu vào hình SIN $y = 8\sin(0.5\pi t)$



Hình 3.7. Đáp ứng độ chính xác ổn định trục pitch với nhiễu đầu vào hình SIN $y = 15\sin(0.4\pi t)$

Đánh giá:

- Thời gian xác lập trạng thái ổn định: 2.5s;
- Sai số ổn định: < 0.1 RMS.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã trình bày một cách hệ thống các vấn đề cốt lõi trong việc thiết kế điều khiển ổn định cho các thiết bị trên tàu. Tác giả đã thành công trong việc xây dựng mô hình toán học, nhận diện các thành phần nhiễu phi tuyến đặc trưng và đề xuất cấu trúc điều khiển bù nhiễu chủ động (ADRC). Kết quả mô phỏng cho thấy thuật toán không chỉ đáp ứng tốt các yêu cầu về độ chính xác mà còn thể hiện khả năng kháng nhiễu mạnh mẽ. Đây là cơ sở khoa học tin cậy để triển khai ứng dụng vào các hệ thống ổn định thực tế trong môi trường biển khắc nghiệt. ❖

Ngày nhận bài: 08/4/2026

Ngày phản biện: 25/4/2026

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Christiaan Oosthuizen, Karim Djouani, Shengzhi Du (2023), “Modelling and stabilizing control of a two-axis gimbal for an unmanned aerial vehicle”. World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences.
- [2]. B. Ekstrand (2001), “Equations of Motion for a Two-Axes Gimbal System”. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 37, no.3, pp. 1083-1091.
- [3]. J.M. Hilkert (2008), “Inertially Stabilized Platform Technology Concepts and Principles”. IEEE Control Systems Magazine, vol. 28, no. 1, pp. 26-46, 2008.
- [4]. Ahi B, Nobakhti (2018), “A Hardware implementation of an ADRC controller on a gimbal mechanism”. IEEE Transactions on Control Systems Technology.
- [5]. Phạm Văn Tuynh, Trần Văn Kiên (2015), “Bàn về phương pháp điều khiển tích cực loại bỏ nhiễu (ADRC)”. ISSN 1859-1531 – Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Đà Nẵng, số 7(92).
- [6]. Xing Chen, Donghai Li, Zhiqiang Gao, Chuanfeng Wang (2011), “Tuning method for second-order active disturbance rejection control”. In Proceedings of the 30th Chinese Control Conference, pages 6322-6327.