

ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT TẦNG THÍCH NGHI QUAN SÁT NEURAL TỰA LUENBERGER CHO TÀU NỔI USV

HIERARCHICAL SLIDING MODE ADAPTIVE CONTROL USING LUENBERGER NEURAL OBSERVER

Nguyễn Khắc Tuấn^{1,*}, Nguyễn Đức Khoát²,
Lê Trần Thắng³, Lê Xuân Hải⁴

TÓM TẮT

Bài báo trình bày thiết kế bộ điều khiển cho tàu nổi ổn định động trên mặt nước (USV), thuộc lớp đối tượng MIMO thiếu cơ cấu chấp hành với mô hình phi tuyến và sự bất định về mô hình và nhiễu. Một bộ quan sát neural cải tiến cho bộ quan sát Luenberger được sử dụng với bộ điều khiển trượt tầng (HSMC) cho USV được giới thiệu. Bộ điều khiển đảm bảo điều khiển vị trí và góc của tàu theo giá trị mong muốn. Tính ổn định của hệ thống kín được chứng minh qua tiêu chuẩn ổn định Lyapunov. Các thuật toán được đề xuất thực hiện trong môi trường mô phỏng tổng hợp với giả thiết có nhiễu sóng, gió, dòng chảy và kết quả thu được minh chứng cho tính hiệu quả của bộ điều khiển.

Từ khóa: USV, bộ quan sát Luenberger, mạng neural, bộ điều khiển trượt tầng.

ABSTRACT

This paper presents the design of a controller for a surface ship moving on water (USV), belonging to the MIMO objects class that lacks an actuator with a nonlinear model and uncertainty, noise model. An improved neural observer for the Luenberger observer used Hierarchical Sliding Mode Control (HSMC) for USV is introduced. The controller ensures to control the position and angle of the train according to the desired trajectory. The stability of the closed system is proven by the Lyapunov Stability Theory. The proposed algorithms are implemented in a synthetic simulation environment with the assumption of interference from waves, wind, flow and the obtained results demonstrate the effectiveness of the controller.

Keywords: USV, Luenberger observer, neural network, Hierarchical Sliding Mode Control.

¹Khoa Điện, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vinh

²Khoa Cơ-Điện, Trường Đại học Mở Địa chất

³Viện Tự động hóa Kỹ thuật Quân sự

⁴Trường Quốc tế, Đại học Quốc gia Hà Nội

*Email: khactuan37@gmail.com

Ngày nhận bài: 15/12/2021

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 25/01/2022

Ngày chấp nhận đăng: 25/02/2022

1. GIỚI THIỆU

USV là hệ thống tàu chuyển động trên mặt nước đang được nghiên cứu trong những năm gần đây nhờ tính linh hoạt của nó [1, 2]. Thách thức khi thiết kế hệ thống điều khiển USV là động lực học của tàu là phi tuyến. Để giải

quyết vấn đề mô hình phi tuyến, rất nhiều nghiên cứu đã được tiến hành, nổi bật là kỹ thuật cuốn chiếu (backstepping) và lý thuyết Lyapunov được sử dụng rộng rãi [3], điều khiển trượt [4], điều khiển dự báo (MPC) [5], điều khiển bề mặt động (DSC) [6], phương pháp đại số tuyến tính [7].

Bộ điều khiển backstepping tồn tại một số nhược điểm như khả năng đáp ứng với những thay đổi của môi trường không cao, cần biết chính xác thông số mô hình khó xác định. Để giải quyết nhược điểm này, chúng tôi đã đưa ra giải pháp sử dụng kỹ thuật điều khiển trượt tầng (HSMC) cho tàu USV [8]. Đây là phương pháp cải tiến của kỹ thuật điều khiển trượt kết hợp với phương pháp backstepping, tận dụng được ưu điểm của kỹ thuật điều khiển trượt là khả năng bền vững khi hệ thống có nhiễu hoặc khi thông số của đối tượng thay đổi theo thời gian. Một khó khăn nữa trong điều khiển tàu nổi là các phép đo vận tốc có thể không đo được hoặc đo được nhưng có tồn tại các nhiễu. Để đối phó với vấn đề này, bộ quan sát Luenberger [9] được đề xuất. Tuy nhiên hạn chế của bộ quan sát Luenberger là đòi hỏi biết đầy đủ một số thông tin chính xác về đối tượng, điều này khó đảm bảo vì trong môi trường thực tế việc đảm bảo thông tin chính xác là khó khăn. Để giải quyết vấn đề này, bài báo đề xuất sử dụng kết hợp thêm mạng neural nhân tạo để xấp xỉ các thành phần bất định trong bộ quan sát. Trong bài báo này, bộ quan sát mạng neural tựa Luenberger được thiết kế cùng bộ điều khiển trượt tầng cho USV. Tính ổn định của hệ được chứng minh qua lý thuyết ổn định Lyapunov.

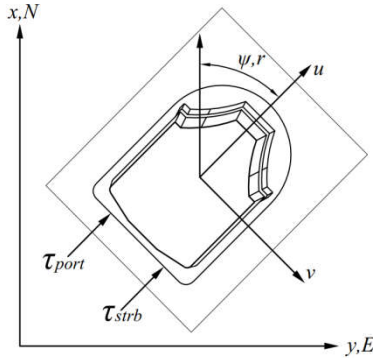
2. MÔ HÌNH TÀU NỔI USV

Theo [1] mô hình ba bậc tự do (surge, sway và yaw) của USV có dạng như sau:

$$\begin{cases} \dot{\underline{\eta}} = J(\underline{\eta})\underline{v} \\ M_{RB}\dot{\underline{v}} + C_{RB}(\underline{v})\underline{v} = \tau_{RB} \end{cases} \quad (1)$$

trong đó: $\underline{\eta} = [x \ y \ \psi]^T$, $\underline{v} = [u \ v \ r]^T$ là véc tơ vị trí và vận tốc của tàu USV theo các phương x, y và góc; $J(\underline{\eta})$ là ma trận chuyển trục từ hệ tọa độ gắn thân tới hệ tọa độ gắn với mặt đất; M_{RB} là ma trận quán tính của USV; $C_{RB}(\underline{v})$ là ma trận Coriolis và lực hướng tâm của USV;

$\tau_{RB} = \tau_{hyd} + \tau_{hs} + \tau_{wind} + \tau_{wave} + \tau_{all}$ là tổng véc tơ lực và mô men tác dụng lên USV; $\tau_{hyd} = -M_A \dot{u}_r - C_A(u_r)u_r - D(u_r)u_r$ là thành phần lực và mô men do dòng chảy gây ra với u_r là vận tốc tương đối của tàu so với dòng chảy; M_A là ma trận hằng số khối lượng gia tăng; C_A là ma trận lực hướng tâm là lực Coriolis do khối lượng gia tăng gây ra; D là ma trận giảm chấn và ma sát tác động lên tàu.



Hình 1. Mô hình tàu USV [1]

Nếu giả thiết vận tốc dòng nước là u_c thì $u_r = u - u_c = [u_r \ v_r \ r]^T$ thành phần vận tốc dòng chảy theo phương góc bỏ qua τ_{wind}, τ_{wave} là thành phần nhiễu loạn từ môi trường gây ra bởi gió, sóng.

Giả thiết thủy động lực học phương ngang bằng 0 nghĩa là $\tau_{hs} = 0, \tau_{all} = [\tau_x \ 0 \ \tau_z]^T = [(\tau_{port} + \tau_{stbd}) \ 0 \ (\tau_{port} - \tau_{stbd})B/2]^T$

Trong đó τ_{port}, τ_{stbd} véc tơ lực đẩy của động cơ bên trái và bên phải của tàu, τ_x, τ_z là lực đẩy tác và mô men tác động lên USV, B là khoảng cách giữa hai động cơ đẩy.

Hệ phương trình động lực học của hệ được viết lại là:

$$\begin{cases} \dot{\eta} = J(\eta)u \\ M_{RB}\dot{u} + C_{RB}(u)u + N(u_r) = \tau_{all} \end{cases} \quad (2)$$

3. BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT TẮNG QUAN SÁT TRẠNG THÁI NEURAL TỰA LUENBERGER

3.1. Bộ điều khiển trượt tầng

Theo [8], chúng tôi đã tách hệ thống thiếu cơ cấu chấp hành thành hai hệ con: một hệ đủ cơ cấu chấp hành và một hệ con tự do. Đối chỗ của hàng 2 và hàng 3 của các ma trận thành phần $J(\eta), M_{RB}, C_{RB}, C_A(u_r), D(u_r)$ trong hệ (2). Viết lại véc tơ vị trí và vận tốc, véc tơ lực đẩy động cơ của hệ dưới dạng:

$$\eta = [\eta_1 \ \eta_2]^T \text{ với } \eta_1 = [x \ \psi]^T, \eta_2 = y; u = [u_1 \ u_2]^T$$

với $u_1 = [u \ r]^T, u_2 = v.$

$$u_r = [u_{r1} \ u_{r2}]^T \text{ với } u_{r1} = [u_r \ r]^T, u_{r2} = v_r;$$

$$\tau_{all} = [\tau \ 0]^T \text{ với } \tau = [\tau_x \ \tau_z]^T.$$

Định nghĩa véc tơ:

$$F(u) = C_{RB}u + N(v_r) = [F_1 \ F_2 \ F_3]^T \quad (3)$$

Đặt $F(u) = [F_{11} \ F_{21}]^T$ trong đó $F_{11} = [F_1 \ F_2]^T = T_1 F(u),$
 $F_{21} = F_3 = T_2 F(u)$ với $T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, T_2 = [0 \ 0 \ 1].$

Các phép biến đổi và ma trận thành phần đã trình bày trong [8] hệ (2) trở thành:

$$\begin{cases} \dot{\eta}_1 = J_{11}u_1 + J_{12}u_2 \\ \dot{u}_1 = f_1(x) + g_1(x)\tau \\ \dot{\eta}_2 = J_{21}u_1 + J_{22}u_2 \\ \dot{u}_2 = f_2(x) + g_2(x)\tau \end{cases} \quad (4)$$

Tín hiệu điều khiển theo phương pháp điều khiển trượt tầng được thiết kế [8] là:

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_{eq1} + \tau_{sw1} + \tau_{eq2} + \tau_{sw2} \\ &= -(\lambda g_1 + \beta g_2)^{-1} \begin{bmatrix} \lambda f_1 + \beta f_2 + \lambda(k_1 J_{11}u_1 + k_1 J_{12}u_2) \\ + \beta(k_2 J_{21}u_1 + k_2 J_{22}u_2) \\ + k_3 \underline{s} + \delta \text{sign}(\underline{s}) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

Trong đó \underline{s} là mặt trượt được định nghĩa:

$$\underline{s} = \lambda s_1 + \beta s_2 \text{ trong đó } s_1 = k_1 e_1 + e_2, s_2 = k_2 e_3 + e_4,$$

$$e_1 = \eta_1 - \eta_{1d}, e_2 = u_1, e_3 = \eta_2 - \eta_{2d}, e_4 = u_2 \text{ và } \eta_{1d}, \eta_{2d}$$

là các giá trị đặt cho quỹ đạo.

$$k_1 = \text{diag}(k_{11} \ k_{12}) \in R^{2 \times 2}, k_2 \in R, \lambda = \text{diag}(\lambda_1 \ \lambda_2) \in R^{2 \times 2},$$

$$\beta = [\beta_1 \ \beta_2]^T \in R^{2 \times 1} \text{ và } k_{11}, k_{12}, k_2, \lambda_1, \lambda_2, \beta_1, \beta_2 > 0.$$

3.2. Bộ quan sát neural tựa Luenberger

Hệ tàu nổi thiếu chấp hành có dạng như đã viết ở phần 2:

$$\begin{cases} \dot{\eta}_1 = J_{11}u_1 + J_{12}u_2 \\ \dot{u}_1 = f_1(x) + g_1(x)\tau \\ \dot{\eta}_2 = J_{21}u_1 + J_{22}u_2 \\ \dot{u}_2 = f_2(x) + g_2(x)\tau \end{cases}$$

Nếu đặt:

$$x = \begin{pmatrix} \eta_1 \\ u_1 \\ \eta_2 \\ u_2 \end{pmatrix} (t), g(x) = \begin{pmatrix} 0_{2 \times 2} \\ g_1(x) \\ 0_{1 \times 2} \\ g_2(x) \end{pmatrix}, f(x) = \begin{pmatrix} J_{11}u_1 + J_{12}u_2 \\ f_1(x) \\ J_{21}u_1 \\ f_2(x) \end{pmatrix}$$

thì có thể chuyển hệ thành dạng Affine với đầu ra là y có dạng:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = Cx \end{cases} \quad (6)$$

trong đó ma trận đầu ra $C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ thể

hiện cho các trạng thái đo được của hệ.

Trước hết, nếu đặt $\varphi(x, u) = f(x) + g(x)u - Ax$, với A là một ma trận Hurwitz tùy chọn, là một ánh xạ trơn, liên tục Lipchitz trên không gian trạng thái compact xác định với x thì hệ tàu nổi đã cho tương đương với:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + \varphi(y, u) \\ y = Cx \end{cases} \quad (7)$$

Như đã biết, trong lý thuyết điều khiển tuyến tính, bộ quan sát Luenberger được thiết kế hoàn toàn phù hợp để quan sát các trạng thái không đo được của hệ tuyến tính dựa trên nguyên tắc hiệu chỉnh sai lệch giữa đầu ra của hệ và đầu ra quan sát thông qua việc thiết kế ma trận Luenberger. Nguyên tắc đó hoàn toàn có thể mở rộng cho lớp hệ phi tuyến truyền ngược dạng Afine, bậc n , quan sát được, được gọi là bộ quan sát tựa Luenberger. Định lý sau sẽ trình bày nguyên tắc đó:

Định lý 1: (Bộ quan sát tựa Luenberger). Nếu hệ phi tuyến (6) là quan sát được, tức là cặp ma trận (A, C) là quan sát được thì với bộ quan sát:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + \varphi(y, u) + K(y - C\hat{x}) \quad (8)$$

sẽ làm cho $\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{x}(t) = x(t)$ nếu ma trận K được tính toán phù hợp sao cho đảm bảo ma trận $A_0 = A - KC$ là ma trận Hurwitz. Các điểm cực của A_0 càng xa trục ảo, tốc độ tiệm cận $\hat{x} \rightarrow x$ càng nhanh.

Như vậy trong định lý 1 cho ta một gợi ý để xây dựng bộ quan sát cho đối tượng tàu nổi. Tuy nhiên do đặc thù đối tượng này là một thiết bị có độ bất định tương đối lớn nên thực tế ánh xạ $\varphi(\cdot)$ không thể xác định chính xác, nghĩa là tồn tại một lượng chênh lệch $\Delta\varphi(y, u)$ đủ nhỏ làm cho:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + \varphi(y, u) + \Delta\varphi(y, u) \\ y = Cx \end{cases} \quad (9)$$

Và khi đó nếu vẫn sử dụng bộ quan sát như (8) thì sẽ không đảm bảo được $\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{x}(t) = x(t)$ kể cả khi $A_0 = A - KC$ là Hurwitz, do phương trình vi phân $\dot{\tilde{x}} = \tilde{x} - \dot{\tilde{x}} = A(x - \hat{x}) + \Delta\varphi(y, u)$

còn dư một số hạng trong nghiệm là: $\int_0^t \Delta\varphi(y, u) dt$.

Để khắc phục được hạn chế nêu trên, trong bài báo này, chúng tôi đề nghị sử dụng mạng Neural nhân tạo để xấp xỉ thành phần hàm bất định $\varphi(y, u)$. Theo đó, thực hiện phép tính xấp xỉ bởi mạng: $\varphi(y, u) = W_o^T \tanh(Y_o^T \bar{x})$, $\bar{x} = (\hat{x}^T \ u^T)^T$, $\delta(\cdot)$ là hàm tác động bị chặn thì mô hình bộ quan sát sẽ được cho theo định lý 2. Nhưng trước hết, chúng ta có giả thiết dưới đây:

Giả thiết 1: Trọng số của mạng Neural là bị chặn. Nghĩa là luôn tồn tại các giá trị \bar{W}_M, \bar{Y}_M thỏa mãn:

$$\|\hat{W}_o\| \leq \bar{W}_M \text{ và } \|\hat{Y}_o\| \leq \bar{Y}_M \quad (10)$$

Giả thiết 2: Các trạng thái hệ thống cùng với các đạo hàm của nó là bị chặn. Nghĩa là $\|x\| < \sup_{t \rightarrow \infty} x(t) \leq a_1$, và

$\|\dot{x}\| < \sup_{t \rightarrow \infty} \dot{x}(t) \leq a_2$. Giả thiết này có ý nghĩa bởi lẽ luôn tồn tại một giới hạn về mặt cơ khí chết tạo cho các hệ thống thực. Ngoài ra nếu kí hiệu

$\Omega = \left\{ x(t) : \mathbb{R}_{\geq 0} \rightarrow \mathbb{R}^n \mid \|x\| < \sup_{t \rightarrow \infty} x(t) \leq a_1 \right\} \subset \mathbb{R}^n$ là tập các véc tơ $x(t)$ thỏa mãn giả thiết 1 thì do \mathbb{R}^n là không gian véc tơ đủ, Ω đóng và bị chặn.

Định lý 2: Đặt $f(x, x_d, t) \in C^1(\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}_{\geq 0}, \mathbb{R})$ là ánh xạ liên tục: $\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}_{\geq 0} \rightarrow \mathbb{R}$ thuộc không gian véc tơ đủ $C^1, 1$ chiều. $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ là tập compact xác định trên không gian \mathbb{R}^n ; $\bar{\epsilon} \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ là hằng số dương bé tùy ý và kí hiệu tập $\left\{ \delta_i(x, x_d, t) \in C^1(\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}_{\geq 0}, \mathbb{R}) \mid i \in \mathbb{N} \right\}$ là tập những ánh xạ: $\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}_{\geq 0} \rightarrow \mathbb{R}$ bị chặn trên miền $C^1(\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}_{\geq 0}, \mathbb{R})$. Cùng với các giả thiết 1, 2, khi đó $\forall x, x_d \in \Omega, \forall t \in \mathbb{R}_{\geq 0}$, luôn $\exists L \in \mathbb{N}$ sao cho $\forall i \in [1, L] \subset \mathbb{N}$, tập các ánh xạ tác động phi tuyến và bị chặn (tập giới nội), liên tục $\left\{ \delta_i(x, x_d, t) \in C^1(\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}_{\geq 0}, \mathbb{R}) \mid i \in \mathbb{N} \right\}$ và tập véc tơ các số thực $\{w_i \in \mathbb{R} \mid i \in [1, L] \subset \mathbb{N}\}$ thỏa mãn:

$$\sup_{\forall x, x_d \in \Omega} \left(\left\| f(x, x_d, t) - W^T \delta(x) \right\| + \left\| \nabla f(x, x_d, t) - W^T \nabla \delta(x) \right\| \right) \leq \bar{\epsilon} \quad (11)$$

Trong đó $\delta(x) = [\delta_1 \ \delta_2 \ \dots \ \delta_L]^T$ gọi là véc tơ hàm tác động và vector $W = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_L]^T$ gọi là véc tơ trọng số. ∇f là kí hiệu ánh xạ Jacobian: $\mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^{m \times n}$ tính bởi $\nabla f = \frac{\partial f(x)}{\partial x}$.

Như vậy nếu định lý 2 thỏa mãn thì sẽ luôn tồn tại 2 giá trị trọng số để

$$\varphi(y, u) = W_o^T \tanh(Y_o^T \bar{x}) \quad (12)$$

Định lý 3: Xét hệ phi tuyến (9) bậc n có cặp ma trận (A, C) quan sát được, cùng với véc tơ hàm toán học bất định mô tả hệ thống $\Delta\varphi(y, u)$, nếu sử dụng bộ quan sát:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A\hat{x} + \hat{W}_o^T \tanh(\hat{Y}_o^T \bar{x}) + K(y - C\hat{x}) \\ \hat{y} = C\hat{x} \\ \bar{x} = (\hat{x}^T \ u^T)^T \end{cases} \quad (13)$$

Đồng thời ma trận K được tính toán phù hợp sao cho đảm bảo ma trận $A_0 = A - KC$ là ma trận Hurwitz. Cập nhật 2 trọng số \hat{W}_o và \hat{Y}_o theo định lý 3, sẽ làm cho sai lệch quan sát hội tụ chừng nào \bar{x} còn nằm bên ngoài trong một miền Compact $\tilde{\Omega}_x$ định nghĩa bởi:

$$\tilde{\Omega}_x = \left\{ \tilde{x} \mid \|\tilde{x}\| \leq \frac{2d}{\mu \|C\| \lambda_{\min}(C^*)^T C^*} \right\} \quad (14)$$

nghĩa là:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\tilde{x}\|(t) = 0, \forall \tilde{x} \in \tilde{\Omega}_x \quad (15)$$

Các điểm cực của A_0 càng xa trục ảo, tốc độ tiệm cận $\tilde{x} \rightarrow x$ càng nhanh.

Định lý 4: (Cập nhật mạng Neural) Kí hiệu $\tilde{y} = y - \hat{y}$ thì luật học mạng Neural được cập nhật theo hệ phương trình dưới đây thông qua cực tiểu hóa hàm sai lệch:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{W}}_o &= -\lambda_1 \tanh(\hat{Y}_o^T \bar{x}) \tilde{y}^T CA_o^{-1} - \theta_1 \|\tilde{y}\| \hat{W}_o \\ \dot{\hat{Y}}_o &= -\lambda_2 \tanh(\hat{Y}_o^T \bar{x}) \tilde{y}^T CA_o^{-1} \hat{W}_o^T (I_N - \Pi(\hat{Y}_o^T \bar{x})) - \theta_2 \|\tilde{y}\| \hat{Y}_o \end{aligned} \quad (16)$$

Trong đó, $\lambda_{1,2}; \theta_{1,2}$ là các hệ số dương thỏa mãn $\theta_1 > \frac{\|\lambda_1 CA_o^{-1}\|^2}{4}, \theta_2 > 1, N$ là số neural lớp ẩn, $\Pi(\hat{Y}_o^T \bar{x})$ là một ma trận chéo với các phần tử trên đường chéo chính là $\tanh^2(\hat{Y}_o^T \bar{x})$, \hat{Y}_o là vector cột thứ p của \hat{Y}_o . Ngoài ra, các sai lệch trọng số $\tilde{W}_o = W_o - \hat{W}_o$ và $\tilde{Y}_o = Y_o - \hat{Y}_o$ là các điểm cân bằng theo nghĩa UUB.

Trong đó, ổn định UUB được định nghĩa: Hệ phi tuyến $\dot{\underline{x}} = f(\underline{x}, t)$ với $f(0, t) = 0; \forall t \geq 0; \underline{x} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ và ánh xạ $f(\cdot) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$. Điểm cân bằng \underline{x}_c được gọi là UUB nếu tồn tại tập đóng $\Omega_x \in \mathbb{R}^n$ sao cho $\forall x \in \Omega_x$ luôn tồn tại chặn trên B và thời gian $T_b(B, \underline{x})$ để luôn có:

$$\|\underline{x} - \underline{x}_c\| \leq B, \forall t \geq t_0 + t_b \quad (17)$$

Chứng minh tính hội tụ:

Sử dụng hàm Lyapunov xác định dương có dạng:

$$V_o(x) = \frac{1}{2} \tilde{x}^T P \tilde{x} + \frac{1}{2} \text{tr}(\tilde{W}_o^T \tilde{W}_o) + \frac{1}{2} \text{tr}(\tilde{Y}_o^T \tilde{Y}_o) \quad (18)$$

P là ma trận đối xứng xác định dương bất kì.

Lấy đạo hàm theo thời gian của hàm ứng viên Lyapunov ta được:

$$\dot{V}_o(x) = \frac{1}{2} \tilde{x}^T P \dot{\tilde{x}} + \frac{1}{2} \tilde{x}^T P \dot{\tilde{x}} + \text{tr}(\tilde{W}_o^T \dot{\tilde{W}}_o) + \text{tr}(\tilde{Y}_o^T \dot{\tilde{Y}}_o) \quad (19)$$

Sử dụng đẳng thức (13) và để ý rằng $\dot{\tilde{W}}_o = -\dot{\hat{W}}_o = \lambda_1 \tanh(\hat{Y}_o^T \bar{x}) \tilde{y}^T CA_o^{-1} + \theta_1 \|\tilde{y}\| \hat{W}_o$ và đồng thời: $\dot{\tilde{Y}}_o = -\dot{\hat{Y}}_o = \lambda_2 \tanh(\hat{Y}_o^T \bar{x}) \tilde{y}^T CA_o^{-1} \hat{W}_o^T (I_N - \Pi(\hat{Y}_o^T \bar{x})) + \theta_2 \|\tilde{y}\| \hat{Y}_o$, thay vào (19) ta được:

$$\begin{aligned} \dot{V}_o(x) &= \frac{1}{2} \tilde{x}^T (PA_o + A_o^T P) \tilde{x} + \tilde{x}^T \left(\begin{array}{l} \tilde{W}_o^T \tanh(\hat{Y}_o^T \bar{x}) \\ + p_M + K(y - C\hat{x}) \end{array} \right) \\ &+ \text{tr}(\tilde{W}_o^T \lambda_1 \tanh(\hat{Y}_o^T \bar{x}) \tilde{y}^T CA_o^{-1} + \tilde{W}_o^T \theta_1 \|\tilde{y}\| \hat{W}_o) \\ &+ \text{tr} \left(\begin{array}{l} \tilde{Y}_o^T \lambda_2 \tanh(\hat{Y}_o^T \bar{x}) \tilde{y}^T CA_o^{-1} \hat{W}_o^T (I_N - \Pi(\hat{Y}_o^T \bar{x})) \\ + \hat{Y}_o^T \theta_2 \|\tilde{y}\| \hat{Y}_o \end{array} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

Mặt khác do ma trận A_o là ma trận bền, P đối xứng xác định dương nên nó còn thỏa mãn phương trình Lyapunov:

$$PA_o + A_o^T P = -\mu I_n \text{ với } \mu > 0 \quad (21)$$

Ta được:

$$\begin{aligned} \dot{V}_o(x) &= -\frac{\rho}{2} \tilde{x}^T \tilde{x} + \tilde{x}^T (\tilde{W}_o^T \tanh(\hat{Y}_o^T \bar{x}) + K(y - C\hat{x})) \\ &+ \text{tr}(\tilde{W}_o^T \lambda_1 \tanh(\hat{Y}_o^T \bar{x}) \tilde{y}^T CA_o^{-1} + \tilde{W}_o^T \theta_1 \|\tilde{y}\| (W_o - \tilde{W}_o)) \\ &+ \text{tr} \left(\begin{array}{l} \tilde{Y}_o^T \lambda_2 \tanh(\hat{Y}_o^T \bar{x}) \tilde{y}^T CA_o^{-1} \hat{W}_o^T (I_N - \Pi(\hat{Y}_o^T \bar{x})) \\ + \tilde{Y}_o^T \theta_2 \|\tilde{y}\| (Y_o - \tilde{Y}_o) \end{array} \right) \end{aligned} \quad (22)$$

Gọi C^* là ma trận giả nghịch đảo của ma trận đầu ra C thì $\tilde{x} = C^* \tilde{y}$. Thay vào đạo hàm của hàm Lyapunov và sử dụng bất đẳng thức Cauchy-Schwartz có dạng:

$$\begin{aligned} \text{tr}(\tilde{W}_o^T (W_o - \tilde{W}_o)) &\leq \bar{W}_M \|\tilde{W}_o\|_F - \|\tilde{W}_o\|_F^2 \\ \text{tr}(\tilde{Y}_o^T (Y_o - \tilde{Y}_o)) &\leq \bar{Y}_M \|\tilde{Y}_o\|_F - \|\tilde{Y}_o\|_F^2 \end{aligned} \quad (23)$$

Biến đổi ta có được:

$$\begin{aligned} \dot{V}_o(x) &\leq -\frac{\rho}{2} \tilde{y}^T (C^*)^T C^* \tilde{y} + C^* \tilde{y}^T P \left(\begin{array}{l} \tilde{W}_o^T \tanh(\hat{Y}_o^T \bar{x}) \\ + K(y - C\hat{x}) \end{array} \right) \\ &+ \text{tr}(\tilde{W}_o^T \lambda_1 \tanh(\hat{Y}_o^T \bar{x}) \tilde{y}^T CA_o^{-1}) \\ &+ \theta_1 \|\tilde{y}\| (\bar{W}_M \|\tilde{W}_o\|_F - \|\tilde{W}_o\|_F^2) \\ &+ \theta_2 \|\tilde{y}\| (\bar{Y}_M \|\tilde{Y}_o\|_F - \|\tilde{Y}_o\|_F^2) \\ &+ \text{tr}(\tilde{Y}_o^T \lambda_2 \tanh(\hat{Y}_o^T \bar{x}) \tilde{y}^T CA_o^{-1} \hat{W}_o^T (I_N - \Pi(\hat{Y}_o^T \bar{x}))) \end{aligned} \quad (24)$$

Mặt khác ta lại có:

$$\begin{aligned} \|\tilde{W}_o\| &= \|W_o - \tilde{W}_o\| \leq \bar{W}_M + \|\tilde{W}_o\| \\ C^* \tilde{y}^T P \left(\begin{array}{l} \tilde{W}_o^T \tanh(\hat{Y}_o^T \bar{x}) \\ + p_M + K(y - C\hat{x}) \end{array} \right) &\leq \|\tilde{y}\| \|P\| \|C^*\| (\sigma_M \|\tilde{W}_o\| + \epsilon_M) \\ \text{tr}(\tilde{W}_o^T \lambda_1 \tanh(\hat{Y}_o^T \bar{x}) \tilde{y}^T CA_o^{-1}) &\leq \sigma_M \|\tilde{y}\| \|\tilde{W}_o\|_F \|\lambda_1 CA_o^{-1}\| \\ \text{tr}(\tilde{Y}_o^T \lambda_2 \tanh(\hat{Y}_o^T \bar{x}) \tilde{y}^T CA_o^{-1} \hat{W}_o^T (I_N - \Pi(\hat{Y}_o^T \bar{x}))) &\leq \|\tilde{y}\| \|\lambda_2 CA_o^{-1}\| \|\tilde{Y}_o\| (\bar{W}_M + \|\tilde{W}_o\|) \end{aligned} \quad (25)$$

Ta được:

$$\begin{aligned} \dot{V}_o(x) &\leq -\frac{\mu}{2} \tilde{y}^T (C^*)^T C^* \tilde{y} + \|\tilde{y}\| \|P\| \|C^*\| (\sigma_M \|\tilde{W}_o\| + \epsilon_M) \\ &+ \sigma_M \|\tilde{y}\| \|\tilde{W}_o\|_F \|\lambda_1 CA_o^{-1}\| + \theta_1 \|\tilde{y}\| (\bar{W}_M \|\tilde{W}_o\|_F - \|\tilde{W}_o\|_F^2) \\ &+ \theta_2 \|\tilde{y}\| (\bar{Y}_M \|\tilde{Y}_o\|_F - \|\tilde{Y}_o\|_F^2) \\ &+ \|\tilde{y}\| \|\lambda_2 CA_o^{-1}\| \|\tilde{Y}_o\| (\bar{W}_M + \|\tilde{W}_o\|) \end{aligned}$$

$$\Leftrightarrow \dot{V}_o(x) \leq -\frac{\mu}{2} \lambda_{\min}(C^*)^T C^* \|\tilde{y}\|^2 + \|\tilde{y}\| \left[\begin{aligned} &\epsilon_M \|P\| \|C^*\| - \left(\theta_1 - \frac{\|\lambda_2 C A_o^{-1}\|^2}{4} \right) \|\tilde{W}_o\|^2 \\ &+ \left(\|P\| \|C^*\| \sigma_M + \theta_1 \bar{W}_M + \sigma_M \|\lambda_1 C A_o^{-1}\| \right) \|\tilde{W}_o\| \\ &+ \left(\theta_2 \bar{Y}_M + \|\lambda_2 C A_o^{-1}\| \|\bar{W}_M\| \right) \|\tilde{Y}_o\| - (\theta_2 - 1) \|\tilde{Y}_o\|^2 \\ &- \left(\|\tilde{Y}_o\| - \frac{\|\lambda_2 C A_o^{-1}\| \|\tilde{W}_o\|}{2} \right)^2 \end{aligned} \right] \quad (26)$$

Như vậy nếu chọn $\theta_1 > \frac{\|\lambda_2 C A_o^{-1}\|^2}{4}$, $\theta_2 > 1$ và đặt:

$$\alpha_1 = \frac{\epsilon_M \|P\| \|C^*\| + \sigma_M \|\lambda_1 C A_o^{-1}\| + \theta_1 \bar{W}_M}{2 \left(\theta_1 - \frac{\|\lambda_2 C A_o^{-1}\|^2}{4} \right)}$$

$$\text{và } \alpha_2 = \frac{\theta_2 \bar{Y}_M + \|\lambda_2 C A_o^{-1}\| \|\bar{W}_M\|}{2(\theta_2 - 1)} \quad (27)$$

Ta được:

$$\dot{V}_o(x) \leq -\frac{\mu}{2} \lambda_{\min}(C^*)^T C^* \|\tilde{y}\|^2 + \|\tilde{y}\| \left[\begin{aligned} &\epsilon_M \|P\| \|C^*\| + \left(\theta_1 - \frac{\|\lambda_2 C A_o^{-1}\|^2}{4} \right) \alpha_1^2 \\ &+ (\theta_2 - 1) \alpha_2^2 \end{aligned} \right] \quad (28)$$

Vậy để đảm bảo tính xác định âm của hàm Lyapunov thì sai lệch quan sát cần thỏa mãn:

$$\|\tilde{y}\| > \frac{2 \left[\epsilon_M \|P\| \|C^*\| + \left(\theta_1 - \frac{\|\lambda_2 C A_o^{-1}\|^2}{4} \right) \alpha_1^2 + (\theta_2 - 1) \alpha_2^2 \right]}{\mu \lambda_{\min}(C^*)^T C^*} \quad (29)$$

Đặt $d = \epsilon_M \|P\| \|C^*\| + \left(\theta_1 - \frac{\|\lambda_2 C A_o^{-1}\|^2}{4} \right) \alpha_1^2 + (\theta_2 - 1) \alpha_2^2$ thì ta

có điều kiện đủ để bộ quan sát xấp xỉ được trạng thái là:

$$\|\tilde{x}\| > \frac{2d}{\mu \lambda_{\min}(C^*)^T C^*} \quad (\text{đ.p.c.m}) \quad (30)$$

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Để kiểm chứng độ hiệu quả của bộ điều khiển được đề xuất, bài báo thực hiện mô phỏng bộ điều khiển trượt tầng thích nghi quan sát neural tựa Luenberger trên phần mềm Matlab Simulink. Thông số mô hình, bộ điều khiển trượt tầng được lấy ở tài liệu [8].

Các tham số của bộ quan sát và mạng neural:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = 50; \theta_1 = \theta_2 = 10; C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

Số neural lớp ẩn: N = 20

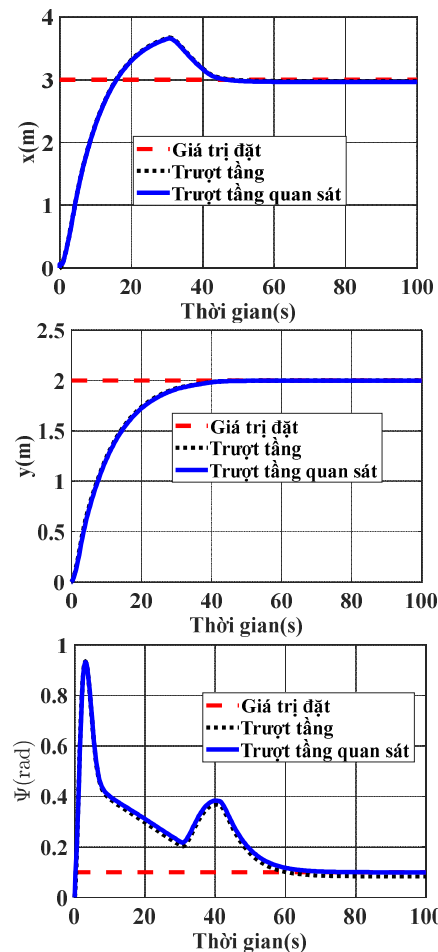
$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -50 & 0 & 0 & -96 & 0 & 0 \\ 0 & -92 & 0 & 0 & -69 & 0 \\ 0 & 0 & -50 & 0 & 0 & -100 \end{bmatrix};$$

$$K = \begin{bmatrix} 120 & 0 & 0 \\ 0 & 120 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2441 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

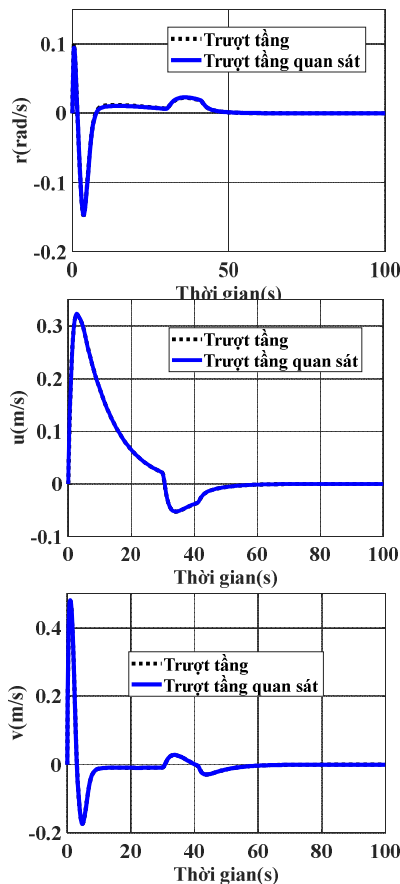
Xét tác vận tốc của dòng nước là hàm thời gian:

$$\underline{u}_c = [0,8 \sin(0,7t) \quad 0,2 \sin(0,5t) \quad 0]^T \text{ (m/s)}$$

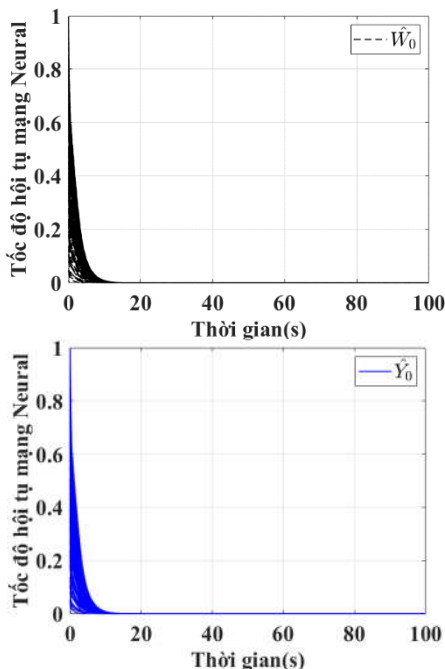
Với vị trí đặt mong muốn $x = 3(\text{m}); y = 2(\text{m}); \psi = 0,1(\text{rad})$



Hình 2. Vị trí và góc hướng của USV



Hình 3. Vận tốc của USV



Hình 4. Luật học mạng Neural của bộ quan sát

Kết quả mô phỏng cho thấy, bộ quan sát được đề xuất đáp ứng tốt yêu cầu xấp xỉ được trạng thái của hệ thống vị trí, vận tốc. Tốc độ hội tụ khoảng 10s được thể hiện ở hình 3. Chất lượng điều khiển đảm bảo so với bộ điều khiển trượt tầng có sử dụng cảm biến đo vị trí, vận tốc

5. KẾT LUẬN

Bộ điều khiển trượt tầng thích nghi quan sát neural tựa Luenberger đạt hiệu quả ổn định, chất lượng tốt, đã giải quyết được một số bài toán thực tế đề ra là sự bất định của mô hình và môi trường hoạt động. Bộ quan sát neural khắc phục được nhược điểm của bộ quan sát Luenberger thuần túy, mở ra hướng giải quyết bài toán khó đo đặc vị trí, vận tốc của tàu trong môi trường nước.

Hướng phát triển tương lai của bài báo là bên cạnh sử dụng bộ quan sát, kết hợp sử dụng bộ xấp xỉ các thành phần bất định sử dụng mạng neural để giải quyết triệt để vấn đề bất định, khó đo đặc của môi trường và mô hình.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Alejandro G G, Ivana C G, David B A, Leonardo G, 2020. *Proc. Int. Conf of the International Conference on Deep Learning Technologies*. 4th (ICDLT 2020) p 118-122.
- [2]. S. Muhammad, A. Doria-Cerezo, 2012. *Passivity-based control applied to the dynamic positioning of ships*. IET Control Theory Applications, vol. 6, no. 5, pp. 680-688.
- [3]. A. Loria, T. I. Fossen, E. Panteley, 2000. *A separation principle for dynamic positioning of ships: Theoretical and experimental results*. IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 8, no. 2, pp.332-343.
- [4]. H. Ashrafiuon, K. R. Muske, L. C. McIninch, R. A. Soltan, 2008. *Sliding-mode tracking control of surface vessels*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 11, pp. 4004-4012.
- [5]. B. J. Guerreiro, C. Silvestre, R. Cunha, A. Pascoal, 2014. *Trajectory tracking nonlinear model predictive control for autonomous surface craft*. IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 22, no. 6, pp. 461-466.
- [6]. D. Chwa, 2011. *Global tracking control of underactuated ships with input and velocity constraints using dynamic surface control method*. IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 19, no. 6, pp. 1357-1370.
- [7]. M. E. Serrano, G. J. E. Scaglia, S. A. Godoy, V. Mut, and O. A. Ortiz, 2014. *Trajectory tracking of underactuated surface vessels: A linear algebra approach*. IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 22, no. 3, pp. 1103-1111.
- [8]. T.K. Nguyen, Th.Tr. Le, C.X. Nguyen, May 27-28, 2021. *Reduce energy loss with dynamic positioning controller for USV based on Hierarchical Sliding Mode Control*. Int Conf of Energy Efficiency and Energy Saving in Technical Systems, Rostov-on-Don, Russia.
- [9]. A. J. Sørensen, S. I. Sagatun, T. Fossen, 1996. *Design of a dynamic positioning system using model-based control*. Control Engineering Practice, vol. 4, no. 3, pp. 359 - 368.

AUTHORS INFORMATION

**Nguyen Khắc Tuan¹, Nguyen Duc Khoat²,
Le Tran Thang³, Le Xuan Hai⁴**

¹Faculty of Electrical Engineering, Vinh University of Technology Education

²Faculty of Electro-Mechanics, Hanoi University of Mining and Geology

³Controls, Automation in Production and Improvement of Technology Institute

⁴International School, Vietnam National University Hanoi