

# KIỂM SOÁT DỰ BÁO MÔ HÌNH DỰA TRÊN ĐIỀU KHIỂN LYAPUNOV PHÂN CẤP CHO TÀU THỦY DƯỚI TÁC ĐỘNG NHIỀU GIÓ

## LYAPUNOV HIERARCHICAL CONTROL BASED ON NONLINEAR MODEL PREDICTIVE CONTROL METHOD FOR SURFACE VESSEL UNDER WIND DISTURBANCE

PHẠM VĂN TRIỆU

Khoa Máy tàu biển, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

Email liên hệ: phamvantrieu@vimaru.edu.vn

### Tóm tắt

Trong nghiên cứu này, một chiến lược điều khiển bền vững hiện đại được phát triển để tối thiểu hóa sai lệch quỹ đạo của hệ thống tàu mặt nước tự hành dưới tác động của gió. Trước tiên, bộ điều khiển bền vững được thiết kế dựa trên kỹ thuật cuốn chiếu và lý thuyết điều khiển trượt. Việc phân tích tính ổn định của bộ điều khiển bền vững dựa trên hàm ứng viên Lyapunov phi tuyến được tích hợp vào bộ giải của phương pháp điều khiển dự báo mô hình, từ đó xây dựng lên hệ thống điều khiển bám quỹ đạo cho tàu thủy. Hệ thống này được chứng minh không chỉ đảm bảo tính ổn định của bộ điều khiển dự báo mô hình dưới tác động của nhiễu mà còn đảm bảo tiêu chí an toàn trong quá trình vận hành nhờ vào việc giới hạn đầu vào điều khiển và các trạng thái của hệ thống. Cuối cùng, mô phỏng số được thực hiện để minh họa tính hiệu quả của hệ thống điều khiển đề xuất, và được so sánh với bộ điều khiển phi tuyến khác.

**Từ khóa:** Tàu thủy, điều khiển bền vững, hàm Lyapunov phi tuyến, điều khiển dự báo mô hình, nhiễu gió.

### Abstract

A novel robust control strategy is developed to minimize the trajectory deviation of an autonomous surface vessel system under wind disturbance. First, the robust controller is designed based on the backstepping technique and sliding mode control theory. Analyzing the stability of the robust controller based on the nonlinear Lyapunov candidate function is integrated into the solver of the model predictive control method, thereby constructing a trajectory tracking control system for the ship. The control system is demonstrated to not only guarantee the stability of the model predictive controller under wind disturbance but also satisfy safety criteria during the operation process thanks to control inputs and states' system restrictions. Numerical simulation is implemented to illustrate the

efficiency of the proposed scheme, which is compared with the other nonlinear controller.

**Keywords:** Surface vessel, robust control, nonlinear Lyapunov function, model predictive control, wind disturbance.

### 1. Giới thiệu

Trong những năm gần đây, công nghệ hàng hải đã nhận được rất nhiều quan tâm của các nhà khoa học Việt Nam cũng như trên toàn thế giới do những lợi ích mà môi trường biển mang lại [1], [2], [3]. Trong đó, tàu mặt nước được biết đến với những ứng dụng rộng rãi trong công cuộc khám phá đại dương, khai thác, thương mại, và quân sự [4], [5]. Để đảm bảo sự an toàn và tối ưu hóa quá trình vận hành của các thiết bị hàng hải, nhiều công trình nghiên cứu được tiến hành trong bối cảnh công nghiệp hóa - hiện đại hóa. Đặc biệt, khả năng vận hành độc lập, giới hạn không gian làm việc, và giải quyết các yếu tố bất định trong môi trường biển đã chứng kiến rất nhiều sự nỗ lực trong cộng đồng học thuật cho hệ thống tàu thủy [6], [7], [8]. Cụ thể, một bộ quan sát nhiễu được tích hợp vào cấu trúc điều khiển chế độ trượt hiện đại để đảm bảo hiệu suất bám của tàu thủy mặt nước trong [9]. Trong khi đó, nghiên cứu [10] không chỉ giải quyết các vấn đề bất định mà còn trình bày một bộ điều khiển thời gian hữu hạn. Vì vậy, chiến lược điều khiển trong [10] cho thấy lợi ích của tốc độ hội tụ so với các nghiên cứu khác. Những phương pháp học máy cũng được áp dụng để giải bài toán tối ưu cho hệ thống tàu thủy trong [11] và [12] bằng cách ứng dụng lý thuyết học tăng cường và cơ chế ước lượng dựa trên mạng nơ-ron. Bên cạnh đó, một số tác giả tập trung giải quyết bài toán điều khiển bám quỹ đạo cho một nhóm tàu mặt nước. Trong khi các nghiên cứu [13] và [14] tập trung vào luật điều khiển phi tuyến cho hệ đa tác tử thì các nghiên cứu [15] và [16] phát triển bài toán điều khiển đội hình cho nhóm tàu thủy dựa trên luật tối ưu. Tuy nhiên, các bộ điều khiển được đề cập đến ở trên chưa xem xét đến việc giới hạn đầu vào điều khiển cũng như đầu ra của hệ thống để đảm bảo an toàn

trong quá trình vận hành. Trong [17] và [18], kỹ thuật ràng buộc đầu vào điều khiển đã được tích hợp để đảm bảo hệ thống luôn ổn định trong miền làm việc xác định của cơ cấu chấp hành. Ngoài ra, chiến lược giới hạn đầu ra của hệ thống tàu thủy cũng được nghiên cứu trong [19] và [20], bài toán này có ý nghĩa đặc biệt trong môi trường biển luôn thay đổi.

Dựa trên phân tích của các nghiên cứu trước đây, một cấu trúc điều khiển bền vững được đưa ra để giải quyết đồng thời vấn đề bám quỹ đạo, tính ổn định của hệ thống điều khiển vòng kín, giới hạn đầu vào và đầu ra cho hệ thống tàu thủy. Đầu tiên, chiến lược điều khiển phi tuyến bền vững được thiết kế cho hệ thống tàu thủy tự hành để xây dựng cơ sở ổn định cho hệ thống điều khiển vòng kín. Sau đó, bộ điều khiển dự báo mô hình dựa trên hàm Lyapunov được xây dựng để tạo ra tín hiệu điều khiển cho hệ thống, tín hiệu điều khiển này đảm bảo được các mục tiêu đã đề ra. Trong các phần còn lại của bài báo này, chúng tôi sẽ đưa ra những nội dung sau: Mô hình toán học của hệ thống tàu thủy tự hành dưới ảnh hưởng của gió được đưa ra trong Phần 2. Sau đó, phương pháp điều khiển đề xuất được đưa ra trong Phần 3. Trong Phần 4, các kết quả mô phỏng số của cấu trúc điều khiển đề xuất được đưa ra và so sánh với các bộ điều khiển khác nhằm nhấn mạnh hiệu quả của đề xuất. Cuối cùng, những kết luận và hướng phát triển trong tương lai cho hệ thống được trình bày.

## 2. Mô hình tàu thủy tự hành

Nghiên cứu này xem xét mô hình tàu thủy tự hành CyberShip II (CS2), đây là mô hình thu nhỏ của tàu cung ứng với tỉ lệ 1:70, dựa theo nghiên cứu [21]. Khối lượng của tàu CS2 là  $m=23,8kg$ , chiều dài và chiều rộng của tàu lần lượt là  $L_{CS2}=1,255m$ ,  $B_{CS2}=0,29m$ . Tàu thủy tự hành chuyển động trong mặt phẳng nằm ngang và có ba loại chuyển động đặc trưng là chuyển động dạt, chuyển động tịnh tiến, và chuyển động quay hướng. Ba kiểu chuyển động này được đặc trưng bởi các bậc tự do, vậy nên mô hình toán học của tàu thủy được biểu diễn dưới dạng mô hình ba bậc tự do. Theo nghiên cứu [21], bằng việc áp dụng các định luật vật lý cho tàu thủy trên hệ quy chiếu quán tính và hệ quy chiếu gắn với thân tàu, mô hình động lực học của tàu thủy được biểu diễn bằng hệ phương trình sau:

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{R}(\boldsymbol{\varphi}) \mathbf{v} \quad (1)$$

$$\mathbf{M}(\boldsymbol{\eta}) \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\boldsymbol{\eta}, \mathbf{v}) \mathbf{v} + \mathbf{D}(\boldsymbol{\eta}, \mathbf{v}) \mathbf{v} = \mathbf{U} + \mathbf{d}_w \quad (2)$$

trong đó:  $\boldsymbol{\eta} = [x \quad y \quad \varphi]^T \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$  là véc tơ biểu thị vị

trí của tàu  $(x, y)$  và hướng tàu  $(\varphi)$  khi xét trên hệ quy chiếu quán tính.  $\mathbf{v} = [u \quad \omega \quad r]^T \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$  biểu thị véc tơ vận tốc và  $\mathbf{U} = [U_u \quad U_\omega \quad U_r]^T \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$  là véc tơ điều khiển.  $\mathbf{d}_w$  đại diện cho nhiễu gió tác động lên hệ thống tàu thủy. Ma trận  $\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$  là ma trận quay và được biểu diễn như sau:

$$\mathbf{R}(\boldsymbol{\varphi}) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Ma trận quay có các tính chất  $\mathbf{R}^T(\boldsymbol{\varphi})\mathbf{R}(\boldsymbol{\varphi}) = \mathbf{I}$ ,  $\|\mathbf{R}(\boldsymbol{\varphi})\| = 1$ . Thêm vào đó,  $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ ,  $\mathbf{C}(\mathbf{v}) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ ,

$\mathbf{D}(\mathbf{v}) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  lần lượt được định nghĩa là ma trận quán tính, ma trận Coriolis và lực ly tâm, ma trận suy giảm thủy động lực học. Các ma trận này thỏa mãn các tính chất sau đây.

**Tính chất 1.** Ma trận quán tính của đối tượng là ma trận đối xứng xác định dương hay  $\mathbf{M}^T = \mathbf{M} > 0$ .

**Tính chất 2.** Xem xét ma trận  $\dot{\mathbf{M}}$  đạo hàm theo thời gian của ma trận  $\mathbf{M}$ . Ta có  $(\dot{\mathbf{M}} - 2\mathbf{C}) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  là một ma trận đối xứng không âm.

**Tính chất 3.** Đặt  $\mathbf{N} = (\dot{\mathbf{M}} - 2\mathbf{C})$ , theo tính chất 2 thì  $\mathbf{N}$  là ma trận đối xứng không âm. Với một véc tơ bất kì  $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ ,  $\mathbf{b} \neq 0$ , điều kiện sau được thỏa mãn

$$-\mathbf{b}^T \mathbf{N} \mathbf{b} = \mathbf{b}^T \mathbf{N}^T \mathbf{b} = \mathbf{b}^T \mathbf{N} \mathbf{b} \quad (4)$$

hay  $\mathbf{b}^T \mathbf{N} \mathbf{b} = 0$ .

**Giả thuyết 1.** Nhiễu gió trong mô hình ở phương trình (2) được giả thuyết bị chặn bởi các hằng số dương  $Y$ , theo [22]:

$$\|\mathbf{d}_w\| \leq Y \quad (5)$$

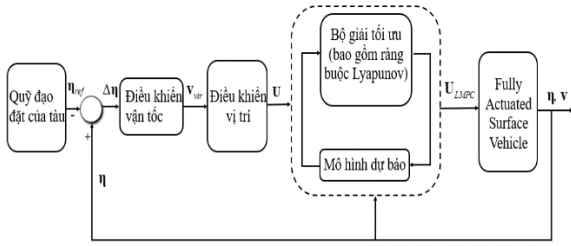
Trong môi trường thực tế, đối tượng tàu thủy chịu tác động của các loại gió có cường độ và tần suất khác nhau, đặc biệt có rất nhiều loại gió có cường độ mạnh ảnh hưởng lớn đến việc chuyển động của tàu. Tuy có đặc tính thay đổi theo thời gian nhưng hiện tượng tự nhiên này luôn có năng lượng hữu hạn, nghiên cứu [21] đã chỉ ra điều này và trình bày các tính toán liên

quan đến năng lượng của các loại nhiễu gió tác động vào tàu. Thêm vào đó, các thiết kế cơ học của tàu cũng đã xem xét đến những ảnh hưởng của nhiễu gió, nhờ đó mà tàu có thể vận hành trong môi trường biển phức tạp. Vì vậy, giả thuyết 1 hoàn toàn hợp lý.

Phần tiếp theo sẽ trình bày quy trình thiết kế chiến lược điều khiển cho tàu thủy tự hành dựa trên mô hình toán học đưa ra ở phương trình (1) và (2).

### 3. Phương pháp điều khiển

Trong phần này, những đóng góp chính để tối thiểu hóa sai lệch bám cho hệ thống tàu thủy tự hành được đưa ra. Trước tiên, một cấu trúc điều khiển bền vững được thiết kế và xem xét tính ổn định dựa trên lý thuyết Lyapunov. Những hệ quả của bộ điều khiển phi tuyến và hàm Lyapunov trở thành điều kiện ổn định của điều khiển dự báo mô hình. Tiếp theo, một bộ điều khiển dự đoán mô hình phi tuyến được phát triển nhằm đồng thời đảm bảo tính ổn định, tính khả thi, và việc ràng buộc đầu vào và biến trạng thái. Cấu trúc của hệ thống điều khiển vị trí cho tàu thủy được minh họa bởi sơ đồ ở Hình 1.



Hình 1. Cấu trúc hệ thống điều khiển tàu thủy

#### 3.1. Cấu trúc điều khiển bền vững

Để thiết kế bộ điều khiển động học và vòng động lực học, sai lệch quỹ đạo của từng vòng điều khiển sẽ được trình bày lần lượt trong phương trình (7) và (8):

$$\Delta\boldsymbol{\eta} = \boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{\eta}_{ref} \quad (6)$$

$$\Delta\mathbf{v} = \mathbf{v} - \mathbf{v}_{vir} \quad (7)$$

trong đó:  $\boldsymbol{\eta}_{ref} = [x_{ref} \quad y_{ref} \quad \varphi_{ref}]^T$  và

$\mathbf{v}_{vir} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$  lần lượt là quỹ đạo mong muốn và tín hiệu điều khiển ảo. Thực hiện đạo hàm phương trình (6) và kết hợp với phương trình (1) và (7), ta có:

$$\begin{aligned} \Delta\dot{\boldsymbol{\eta}} &= \dot{\boldsymbol{\eta}} - \dot{\boldsymbol{\eta}}_{ref} = \mathbf{R}(\boldsymbol{\varphi})\mathbf{v} - \dot{\boldsymbol{\eta}}_{ref} \\ &= \mathbf{R}(\boldsymbol{\varphi})(\Delta\mathbf{v} + \mathbf{v}_{vir}) - \dot{\boldsymbol{\eta}}_{ref} \end{aligned} \quad (8)$$

Dựa trên phương trình (8), tín hiệu điều khiển ảo

được thiết kế như sau:

$$\mathbf{v}_{vir} = \mathbf{R}^T(\boldsymbol{\varphi})(\dot{\boldsymbol{\eta}}_{ref} - \boldsymbol{\kappa}_1\Delta\boldsymbol{\eta}) \quad (9)$$

trong đó:  $\boldsymbol{\kappa}_1 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  là ma trận tham số điều khiển xác định dương. Tiếp theo, lấy đạo hàm phương trình (7) và thực hiện nhân cả hai vế của phương trình với ma trận  $\mathbf{M}(\boldsymbol{\eta})$ , ta có:

$$\mathbf{M}(\boldsymbol{\eta})\Delta\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{M}(\boldsymbol{\eta})(\dot{\mathbf{v}} - \dot{\mathbf{v}}_{vir}) \quad (10)$$

Thế phương trình (2) vào phương trình (10), phương trình (10) trở thành:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}(\boldsymbol{\eta})\Delta\dot{\mathbf{v}} &= \mathbf{U} + \mathbf{d}_w - \mathbf{C}(\boldsymbol{\eta}, \mathbf{v})\mathbf{v} \\ &\quad - \mathbf{D}(\boldsymbol{\eta}, \mathbf{v})\mathbf{v} - \mathbf{M}(\boldsymbol{\eta})\dot{\mathbf{v}}_{vir} \end{aligned} \quad (11)$$

Tín hiệu điều khiển cho hệ thống tàu bề mặt được thiết kế như sau:

$$\begin{aligned} \mathbf{U} &= \mathbf{C}(\boldsymbol{\eta}, \mathbf{v})\mathbf{v}_{vir} + \mathbf{D}(\boldsymbol{\eta}, \mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{M}(\boldsymbol{\eta})\dot{\mathbf{v}}_{vir} \\ &\quad - \mathbf{R}^T(\boldsymbol{\varphi})\Delta\boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{\kappa}_2\Delta\mathbf{v} - \boldsymbol{\kappa}_3\text{sign}(\Delta\mathbf{v}) \end{aligned} \quad (12)$$

trong đó:  $\boldsymbol{\kappa}_2, \boldsymbol{\kappa}_3 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  là các ma trận tham số điều khiển xác định dương. Sau đó, để kiểm chứng tính ổn định của cấu trúc điều khiển tầng phi tuyến, một hàm Lyapunov được chọn như sau:

$$V_L = \frac{1}{2}\Delta\boldsymbol{\eta}^T\Delta\boldsymbol{\eta} + \frac{1}{2}\Delta\mathbf{v}^T\mathbf{M}(\boldsymbol{\eta})\Delta\mathbf{v} \quad (13)$$

dựa trên tính chất 1, hàm Lyapunov  $V_L$  đảm bảo xác định dương. Tiến hành đạo hàm phương trình (13):

$$\begin{aligned} \dot{V}_L &= \Delta\boldsymbol{\eta}^T\Delta\dot{\boldsymbol{\eta}} + \Delta\mathbf{v}^T\mathbf{M}(\boldsymbol{\eta})\Delta\dot{\mathbf{v}} \\ &\quad + \frac{1}{2}\Delta\mathbf{v}^T\dot{\mathbf{M}}(\boldsymbol{\eta})\Delta\mathbf{v} \end{aligned} \quad (14)$$

Thay các phương trình (8) và (11) vào phương trình (14), ta được:

$$\begin{aligned} \dot{V}_L &= \Delta\boldsymbol{\eta}^T(\mathbf{R}(\boldsymbol{\varphi})(\Delta\mathbf{v} + \mathbf{v}_{vir}) - \dot{\boldsymbol{\eta}}_{ref}) \\ &\quad + \Delta\mathbf{v}^T \left( \mathbf{U} + \mathbf{d}_w - \mathbf{C}(\boldsymbol{\eta}, \mathbf{v})\mathbf{v} \right. \\ &\quad \left. - \mathbf{D}(\boldsymbol{\eta}, \mathbf{v})\mathbf{v} - \mathbf{M}(\boldsymbol{\eta})\dot{\mathbf{v}}_{vir} \right) \\ &\quad + \frac{1}{2}\Delta\mathbf{v}^T\dot{\mathbf{M}}(\boldsymbol{\eta})\Delta\mathbf{v} \end{aligned} \quad (15)$$

Tín hiệu điều khiển ảo trong (9) và điều khiển động học trong (12) được sử dụng cho phương trình (15) như sau:

$$\begin{aligned} \dot{V}_L = & -\Delta\eta^T \kappa_1 \Delta\eta + \Delta\eta^T \mathbf{R}(\varphi) \Delta\mathbf{v} - \Delta\mathbf{v}^T \kappa_2 \Delta\mathbf{v} \\ & - \Delta\mathbf{v}^T \kappa_3 \text{sign}(\Delta\mathbf{v}) + \Delta\mathbf{v}^T \mathbf{d}_w - \Delta\mathbf{v}^T \mathbf{R}^T(\varphi) \Delta\eta \\ & + \frac{1}{2} \Delta\mathbf{v}^T (\dot{\mathbf{M}}(\boldsymbol{\eta}) - 2\mathbf{C}(\boldsymbol{\eta}, \mathbf{v})) \Delta\mathbf{v} \end{aligned} \quad (16)$$

Phương trình (16) được viết lại bằng cách sử dụng tính chất 1 và 2 như sau:

$$\begin{aligned} \dot{V}_L = & -\Delta\eta^T \kappa_1 \Delta\eta - \Delta\mathbf{v}^T \kappa_2 \Delta\mathbf{v} \\ & - \Delta\mathbf{v}^T \kappa_3 \text{sign}(\Delta\mathbf{v}) + \Delta\mathbf{v}^T \mathbf{d}_w \end{aligned} \quad (17)$$

Như vậy, phương trình (17) xác định âm khi và chỉ khi  $\kappa_1, \kappa_2 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  là các ma trận xác định dương và  $\kappa_3 > Y$ . Do đó, bộ điều khiển trong phương trình (9) và (12) đảm bảo hệ thống điều khiển vòng kín ổn định và sai lệch tiến về vị trí cân bằng  $[\Delta\eta^T \ \Delta\mathbf{v}^T]^T = [\mathbf{0} \ \mathbf{0}]^T$ . Tuy nhiên, để đảm bảo hiệu suất bám quỹ đạo, các bộ điều khiển phi tuyến cần điều chỉnh các tham số điều khiển đủ lớn. Quá trình điều chỉnh tham số này sẽ dẫn đến tín hiệu điều khiển vượt ra ngoài vùng làm việc của cơ cấu chấp hành. Ngoài ra, đầu ra của hệ thống tàu mặt nước cũng vi phạm các điều kiện an toàn khi xuất hiện các yếu tố bất định và nhiễu trong môi trường đại dương. Vì vậy, để giải quyết hai vấn đề then chốt này, những ưu điểm của bộ điều khiển dự báo mô hình phi tuyến được phát triển.

### 3.2. Điều khiển mô hình dựa trên Lyapunov

Trong phần này, tác giả đề xuất một thuật toán điều khiển bền vững tối ưu dựa trên ý nghĩa của hàm Lyapunov và bộ điều khiển dự báo mô hình phi tuyến. Thuật toán này được thực hiện bởi các bước sau đây:

Bước 1: Các tham số mô hình của tàu thủy và phương trình (21) cần được khai báo.

Bước 2: Tiến hành đo các trạng thái của hệ thống tại thời điểm  $t_i$

Bước 3: Dựa trên trạng thái này ở bước 2, bài toán tối ưu cho bộ điều khiển đề xuất trong phương trình (21) được tính toán để tìm ra  $\hat{\mathbf{U}}(t_k)$  với  $k = i, \dots, i + N - 1$ .

Bước 4: Tín hiệu điều khiển cho hệ thống tàu bề mặt được gán như sau  $\mathbf{U}_{LMPC} = \hat{\mathbf{U}}(t_i) = \hat{\mathbf{U}}(0)$ .

Bước 5: Xem xét  $i = i + 1$  và quay lại bước 2.

Để thiết kế thuật toán này, mô hình toán học trong (1) và (2) được viết lại như sau:

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\Lambda}} = & \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\eta}} \\ \dot{\mathbf{v}} \end{bmatrix} = \mathbf{f}(\boldsymbol{\Lambda}, \mathbf{U}) \\ = & \begin{bmatrix} \mathbf{R}(\varphi) \mathbf{v} \\ \mathbf{M}^{-1}(\boldsymbol{\eta})(\mathbf{U}) - \mathbf{C}(\boldsymbol{\eta}, \mathbf{v}) \mathbf{v} - \mathbf{D}(\boldsymbol{\eta}, \mathbf{v}) \mathbf{v} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (18)$$

Dựa trên mô hình hệ thống trong phương trình (18), bộ điều khiển dự báo mô hình phi tuyến được xây dựng để đảm bảo tối thiểu hóa sai lệch bám với hàm chi phí như sau:

$$J^* = \min \int_0^{t_s} (\Delta\boldsymbol{\Lambda}^T(\tau) \mathbf{Q} \Delta\boldsymbol{\Lambda}(\tau) + \hat{\mathbf{U}}^T(\tau) \mathbf{R} \hat{\mathbf{U}}(\tau)) d\tau \quad (19)$$

trong đó:  $\Delta\boldsymbol{\Lambda} \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$  là véc tơ sai lệch giữa trạng thái dự báo  $(\hat{\boldsymbol{\Lambda}}(\tau))$  và trạng thái tham chiếu,  $\hat{\mathbf{U}}(\tau) \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$  đại diện cho tín hiệu điều khiển được dự báo.  $t_s = T_s N$  được định nghĩa là thời gian dự báo với  $T_s$  và  $N$  lần lượt được xem là thời gian trích mẫu và số bước dự đoán.  $\mathbf{Q} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$  và  $\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  là các ma trận trọng số xác định dương. Thêm vào phương trình (19), các điều kiện đi kèm bộ điều khiển dự báo được đưa ra như sau:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\boldsymbol{\Lambda}}}(\tau) = \mathbf{f}(\hat{\boldsymbol{\Lambda}}(\tau), \hat{\mathbf{U}}(\tau)) \\ \hat{\boldsymbol{\Lambda}}(0) = \boldsymbol{\Lambda}(t_0) \\ \boldsymbol{\Lambda}_{\min} \leq \hat{\boldsymbol{\Lambda}}(\tau) \leq \boldsymbol{\Lambda}_{\max} \\ \mathbf{U}_{\min} \leq \hat{\mathbf{U}}(\tau) \leq \mathbf{U}_{\max} \end{cases} \quad (20)$$

trong đó:  $\boldsymbol{\Lambda}(t_0) \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$  đại diện cho trạng thái ban đầu của từng chu kỳ lấy mẫu.  $\boldsymbol{\Lambda}_{\max} \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$ ,  $\mathbf{U}_{\max} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$  và  $\boldsymbol{\Lambda}_{\min} \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$ ,  $\mathbf{U}_{\min} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$  lần lượt là véc tơ giới hạn trên và giới hạn dưới của véc tơ trạng thái và điều khiển. Tuy nhiên, việc xem xét tính ổn định của bộ điều khiển dự báo mô hình truyền thống thường rất phức tạp, đặc biệt khi hệ thống phi tuyến được xem xét. Vì vậy, chúng tôi tích hợp hệ quả của lý thuyết ổn định Lyapunov được trình bày trong Phần 3.1. Do đó, bộ điều khiển dự báo mô hình phi tuyến dựa trên hàm Lyapunov được hệ thống hóa như sau:

$$\begin{cases} J^* = \min \int_0^t (\Delta\boldsymbol{\Lambda}^T(\tau) \mathbf{Q} \Delta\boldsymbol{\Lambda}(\tau) + \hat{\mathbf{U}}^T(\tau) \mathbf{R} \hat{\mathbf{U}}(\tau)) d\tau \\ \dot{\hat{\boldsymbol{\Lambda}}}(\tau) = \mathbf{f}(\hat{\boldsymbol{\Lambda}}(\tau), \hat{\mathbf{U}}(\tau)) \\ \hat{\boldsymbol{\Lambda}}(0) = \boldsymbol{\Lambda}(t_0) \\ \boldsymbol{\Lambda}_{\min} \leq \hat{\boldsymbol{\Lambda}}(\tau) \leq \boldsymbol{\Lambda}_{\max} \\ \mathbf{U}_{\min} \leq \hat{\mathbf{U}}(\tau) \leq \mathbf{U}_{\max} \\ \frac{\partial V_{LMPC}}{\partial \boldsymbol{\Lambda}} \mathbf{f}(\hat{\boldsymbol{\Lambda}}(0), \hat{\mathbf{U}}(0)) \leq \frac{\partial V_L}{\partial \boldsymbol{\Lambda}} \mathbf{f}(\hat{\boldsymbol{\Lambda}}(0), \hat{\mathbf{U}}(0)) \end{cases} \quad (21)$$

trong đó:  $V_L$  được định nghĩa trong phương trình (13).  $\hat{\boldsymbol{\Lambda}}(0)$  và  $\hat{\mathbf{U}}(0)$  đại diện cho giá trị ban đầu trong chuỗi dự đoán của bộ điều khiển. Bên cạnh đó, điều kiện đảm bảo ổn định cũng được trình bày chi tiết như sau:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_{LMPC}}{\partial \Lambda} \mathbf{f}(\hat{\Lambda}(0), \hat{\mathbf{U}}(0)) &= \frac{1}{2} \Delta \hat{\mathbf{v}}^T(0) \hat{\mathbf{M}}(\hat{\boldsymbol{\eta}}(0)) \Delta \hat{\mathbf{v}}(0) \\ &+ \Delta \hat{\boldsymbol{\eta}}^T(0) (\mathbf{R}(\hat{\boldsymbol{\phi}}(0)) (\Delta \hat{\mathbf{v}}(0) + \mathbf{v}_{vir}) - \hat{\boldsymbol{\eta}}_{ref}) \\ &+ \Delta \hat{\mathbf{v}}^T(0) \left( \hat{\mathbf{U}}(0) - \mathbf{C}(\hat{\boldsymbol{\eta}}(0), \hat{\mathbf{v}}(0)) \hat{\mathbf{v}}(0) \right. \\ &\left. - \mathbf{D}(\hat{\boldsymbol{\eta}}(0), \hat{\mathbf{v}}(0)) \hat{\mathbf{v}}(0) - \mathbf{M}(\hat{\boldsymbol{\eta}}(0)) \dot{\mathbf{v}}_{vir} \right) \quad (22) \\ &\leq -\Delta \hat{\boldsymbol{\eta}}^T(0) \boldsymbol{\kappa}_1 \Delta \hat{\boldsymbol{\eta}}(0) - \Delta \hat{\mathbf{v}}^T(0) \boldsymbol{\kappa}_2 \Delta \hat{\mathbf{v}}(0) \\ &\quad - \Delta \hat{\mathbf{v}}^T(0) \boldsymbol{\kappa}_3 \text{sign}(\Delta \hat{\mathbf{v}}(0)) \end{aligned}$$

Như vậy, bộ điều khiển dự báo mô hình dựa trên hàm Lyapunov đã được phát triển để giải quyết đồng thời các vấn đề quan trọng trong điều khiển học được đưa ra ở trên.

#### 4. Mô phỏng

Nhằm kiểm nghiệm và đánh giá hiệu quả của bộ điều khiển đã đề xuất (MPC), tác giả thực hiện mô phỏng số so sánh bộ điều khiển MPC dựa trên hàm Lyapunov với các bộ điều khiển phi tuyến đã được sử dụng cho tàu thủy, bao gồm điều khiển trượt (SMC) và điều khiển cuộn chiều (BSP). Thông số mô hình được cài đặt giống trong nghiên cứu [22]. Quỹ đạo tham chiếu cho tàu chuyển động theo, các giá trị ban đầu, nhiễu ( $\mathbf{d}_w(t)$ ) và các tham số điều khiển lần lượt được đưa ra:

$$\boldsymbol{\eta}_d = \begin{bmatrix} 4 * \sin(0.02t) \\ 2.5 * (1 - \cos(0.02t)) \\ 0.02t \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{d}_w = \begin{bmatrix} 0.3 + 1.5 * \sin(0.5t) + 1.5 * \sin(0.1t) \\ -0.63 + 0.06 * \sin(0.5t - \pi/3) + 0.75 * \sin(0.3t) \\ -0.9 * \sin(0.5t + \pi/3) - 0.9 * \sin(0.1t) \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\eta}(0) = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.5 \\ \pi/9 \end{bmatrix}, \mathbf{v}(0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

$$\boldsymbol{\kappa}_1 = \boldsymbol{\kappa}_3 = 5\mathbf{I}_3, \boldsymbol{\kappa}_2 = 10\mathbf{I}_3, \hat{\mathbf{U}}(0) = [0 \ 0 \ 0]^T,$$

$$[\mathbf{U}_{max} \ \mathbf{U}_{min}] = [5\mathbf{I}_3 \ -5\mathbf{I}_3]^T, T_s = 0.05, N = 30,$$

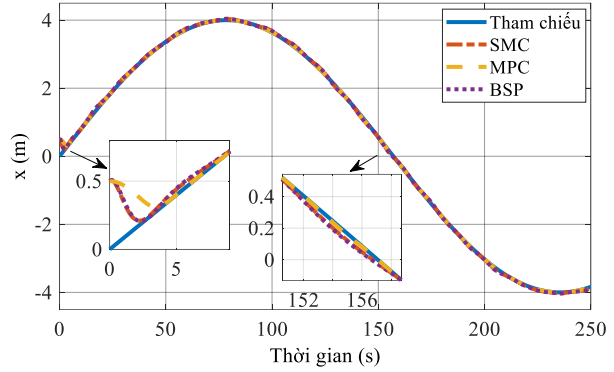
$$\boldsymbol{\Lambda}_{max} = [4 \ 5 \ \text{inf} \ 0.1 \ 0.1 \ 0.1]^T,$$

$$\boldsymbol{\Lambda}_{min} = [-4 \ 0 \ 0 \ -0.2 \ -0.2 \ -0.2]^T,$$

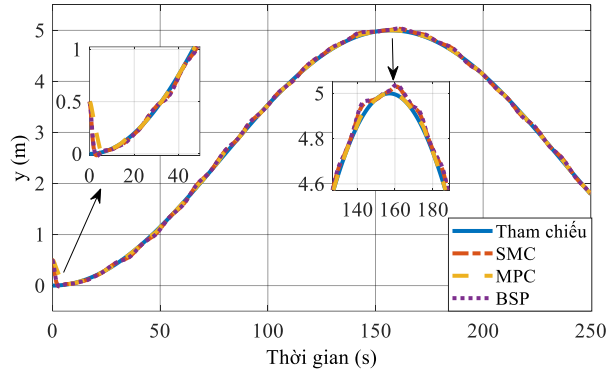
$$\mathbf{Q} = \text{diag}(80, 100, 85, 100, 100, 115), \mathbf{R} = \text{diag}(1, 1, 0.5)$$

Thông qua Hình 2, 3, 4, ta có thể nhận thấy các đáp ứng vị trí khi tàu sử dụng bộ điều khiển đề xuất có chất lượng tốt hơn hai bộ điều khiển trượt và cuộn chiều. Tuy có tốc độ đáp ứng chậm hơn các bộ điều khiển cùng so sánh vì khối lượng tính toán nặng hơn, phương án điều khiển MPC dựa trên hàm Lyapunov

lại có khả năng duy trì các ràng buộc của các biến trạng thái và đầu ra, thể hiện ở Hình 2, 3, 4 và 5. Trong khi đó, bộ điều khiển SMC và BSP không đảm bảo được điều kiện ràng buộc cho các trạng thái của tàu, điều này có thể nhìn thấy rõ ràng ở Hình 3, 5. Xem xét đáp ứng vận tốc của tàu, ở thời điểm ban đầu hai bộ điều khiển SMC và BSP xuất hiện hiện tượng vọt lố, khi giá trị đáp ứng vượt quá giá trị ràng buộc, điều này sẽ dễ khiến việc vận hành tàu gặp nguy hiểm do vận tốc đột ngột tăng cao quá ngưỡng quy định.



Hình 2. Đáp ứng chuyển động tịnh tiến của tàu

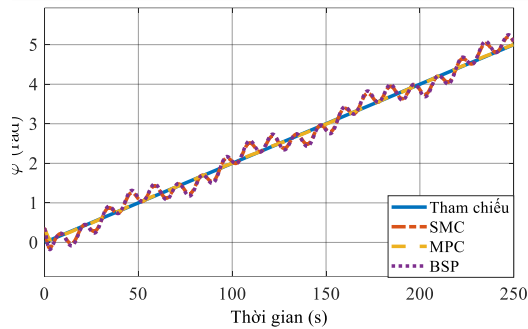


Hình 3. Đáp ứng chuyển động dạt của tàu

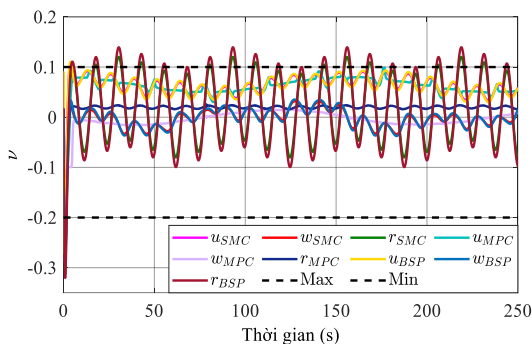
Kết quả trong Hình 6 cho thấy bộ điều khiển SMC và BSP không có khả năng ràng buộc như bộ điều khiển MPC. Cả ba tín hiệu điều khiển ( $U_u, U_\omega, U_r$ ) cho vị trí  $x, y$  và góc quay  $\phi$  của tàu, thu được từ MPC dựa trên hàm Lyapunov luôn duy trì trong một khoảng giá trị ràng buộc, trong khi đó bộ điều khiển SMC và BSP tạo ra các tín hiệu điều khiển lớn, khiến các giá trị này vi phạm ràng buộc của cơ cấu chấp hành. Từ đó ta có thể thấy ưu điểm vượt trội của MPC dựa trên hàm Lyapunov trong việc đảm bảo tính an

toàn cho đối tượng tàu thủy.

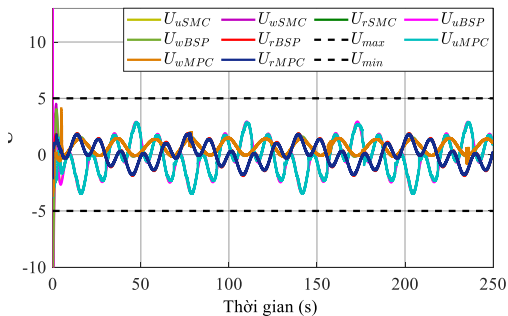
Dưới sự tác động của nhiễu gió, ta có thể thấy rõ



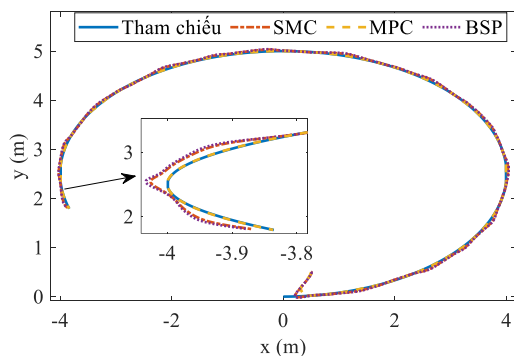
**Hình 4. Đáp ứng chuyển động quay hướng**



**Hình 5. Giá trị đáp ứng vận tốc của tàu**



**Hình 6. Tín hiệu điều khiển**



**Hình 7. Quỹ đạo chuyển động của tàu**

ràng quỹ đạo chuyển động của tàu khi sử dụng bộ điều khiển MPC là tốt nhất, bộ điều khiển đề xuất điều khiển tàu đi chuyển theo quỹ đạo sát với quỹ đạo tham chiếu. Trong khi đó, nếu tàu sử dụng bộ điều khiển SMC hoặc BSP thì nó sẽ đi chuyển lệch khỏi quỹ đạo tham chiếu tại những thời điểm nhiễu gió lớn, hiện tượng này có thể thấy rõ ở Hình 7.

## 5. Kết luận

Qua nghiên cứu này, nhóm tác giả đã trình bày được một cấu trúc điều khiển bền vững dựa trên hàm Lyapunov và điều khiển dự báo mô hình để đảm bảo đồng thời việc tối thiểu hóa sai lệch và an toàn. Đặc biệt, yếu tố bền vững để đối phó với những thành phần nhiễu gió cũng được thể hiện. Kết quả mô phỏng giữa các cấu trúc điều khiển phi tuyến đã cho thấy ưu điểm về khả năng bền vững, ổn định và an toàn của phương pháp đề xuất. Trong những nghiên cứu tới, chúng tôi sẽ xem xét đến việc tích hợp các bộ quan sát trạng thái để giảm sự phụ thuộc vào thiết bị đo cũng như xử lý nhiễu đo. Ngoài ra, việc nghiên cứu thực nghiệm sẽ được áp dụng để xác nhận kết quả mô phỏng.

## Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT23-24.21**.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Y. Qiao, J. Yin, W. Wang, F. Duarte, J. Yang, and C. Ratti (2023), *Survey of Deep Learning for Autonomous Surface Vehicles in Marine Environments*, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol.24, No.4, pp.3678-3701.
- [2] J. Li, G. Zhang, C. Jiang, and W. Zhang (2023), *A survey of maritime unmanned search system: Theory, applications and future directions*, Ocean Engineering, Vol.285, p.115359.
- [3] B. Zhang, D. Ji, S. Liu, X. Zhu, and W. Xu (2023), *Autonomous Underwater Vehicle navigation: A review*, Ocean Engineering, Vol.273, p.113861.
- [4] Z. Peng, J. Wang, D. Wang, and Q.-L. Han (2021), *An Overview of Recent Advances in Coordinated Control of Multiple Autonomous Surface Vehicles*, IEEE Trans Industr Inform, Vol.17, No.2, pp.732-745.
- [5] C. Liu et al. (2022), *Human-machine cooperation research for navigation of maritime autonomous surface ships: A review and consideration*, Ocean Engineering, Vol.246, p.110555.
- [6] M. F. Dos Santos, A. F. D. S. Neto, L. De Mello

- Honório, M. F. Da Silva, and P. Mercorelli (2023), *Robust and Optimal Control Designed for Autonomous Surface Vessel Prototypes*, IEEE Access, Vol.11, pp.9597-9612.
- [7] Z. Peng, C. Wang, Y. Yin, and J. Wang (2023), *Safety-Certified Constrained Control of Maritime Autonomous Surface Ships for Automatic Berthing*, IEEE Trans Veh Technol, Vol.72, No.7, pp.8541-8552.
- [8] Y. Zhang, D. Wu, P. Cheng, W. Wu, and W. Zhang (2024), *Robust adaptive fault-tolerant control for path maneuvering of autonomous surface vehicles with actuator faults based on the noncooperative game strategy*, Ocean Engineering, Vol.292, p.116541.
- [9] C. Zhang and S. Yu (2023), *Disturbance observer-based prescribed performance super-twisting sliding mode control for autonomous surface vessels*, ISA Trans, Vol.135, pp.13-22.
- [10] L. Jin, S. Yu, Q. Zhao, G. Shi, and X. Wu (2024), *Fixed-time  $H_\infty$  tracking control of unmanned underwater vehicles with disturbance rejection via Port-Hamiltonian framework*, Ocean Engineering, Vol.293, p.116533.
- [11] Y. Wang et al. (2024), *Deep reinforcement learning based collision avoidance system for autonomous ships*, Ocean Engineering, Vol.292, p.116527.
- [12] L. P. T. et al. Vu, V.T., Dao, P.N. (2020), *Online Actor-Critic Reinforcement Learning Control for Uncertain Surface Vessel Systems with External Disturbances*, No.X, pp.112.
- [13] H. Qin, J. Si, N. Wang, and L. Gao (2023), *Fast fixed-time nonsingular terminal sliding-mode formation control for autonomous underwater vehicles based on a disturbance observer*, Ocean Engineering, Vol.270, p.113423.
- [14] C. Huang, H. Xu, P. Batista, X. Zhang, and C. Guedes Soares (2023), *Fixed-time leader-follower formation control of underactuated unmanned surface vehicles with unknown dynamics and ocean disturbances*, Eur J Control, Vol.70, p.100784.
- [15] D. P. Nam, D. Van Trong, P. D. Duong, and N. H. Quang (2023), *Formation Controller and Reinforcement Learning Algorithm in Multiple Surface Vessels*, in Next Generation of Internet of Things, R. Kumar, P. K. Pattnaik, and J. M. R. S. Tavares, Eds., Singapore: Springer Nature Singapore, pp.529-535.
- [16] K. Nguyen, V. T. Dang, D. D. Pham, and P. N. Dao (2023), *Formation control scheme with reinforcement learning strategy for a group of multiple surface vehicles*, International Journal of Robust and Nonlinear Control, No. May 2022, 2023, doi: 10.1002/rnc.7083.
- [17] Z. Wei and J. Du (2023), *Reinforcement learning-based optimal trajectory tracking control of surface vessels under input saturations*, International Journal of Robust and Nonlinear Control, Vol.33, No.6, pp.3807-3825, doi: 10.1002/rnc.6597.
- [18] J. Qin, J. Du, and J. Li (2023), *Adaptive Finite-Time Trajectory Tracking Event-Triggered Control Scheme for Underactuated Surface Vessels Subject to Input Saturation*, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol.24, No.8, pp.8809-8819.
- [19] Y. Jiang, Z. Liu, and F. Chen (2024), *Adaptive output-constrained finite-time formation control for multiple unmanned surface vessels with directed communication topology*, Ocean Engineering, Vol.292, p.116552.
- [20] A. Naderolasli, K. Shojaei, and A. Chatraei (2023), *Terminal sliding-mode disturbance observer-based finite-time adaptive-neural formation control of autonomous surface vessels under output constraints*, Robotica, Vol.41, No.1, pp.236-258.
- [21] Skjetne, R., Fossen, T. I., & Kokotović, P. V. (2005). *Adaptive maneuvering, with experiments, for a model ship in a marine control laboratory*. Automatica, Vol.41(2), pp.289-298.
- [22] Van, Mien (2019). *Adaptive neural integral sliding-mode control for tracking control of fully actuated uncertain surface vessels*. International Journal of Robust and Nonlinear Control 29, No.5, pp.1537-1557.

Ngày nhận bài:	06/04/2024
Ngày nhận bản sửa:	13/04/2024
Ngày duyệt đăng:	19/04/2024