

ĐIỀU KHIỂN CHUYỂN LÀN XE ĐẦU KÉO SƠ MI RƠ MOOC BẰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT TẦNG KẾT HỢP BỘ QUAN SÁT TRẠNG THÁI MỞ RỘNG

EXTENDED STATE OBSERVER BASED HIERARCHICAL SLIDING MODE CONTROL FOR TRACTOR-SEMITRAILERS

Lê Ngọc Duy^{1,2,*}, Nguyễn Hữu Việt¹,
Hồ Hữu Hải¹, Nguyễn Tùng Lâm¹

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2025.274>

TÓM TẮT

Trong bài báo này, một mô hình toán học ba bậc tự do xem xét động lực học ngang của xe đầu kéo sơ mi rơ mooc được xây dựng dưới tác động của nhiễu môi trường. Bên cạnh đó, bộ điều khiển trượt tầng cùng với bộ quan sát trạng thái mở rộng được áp dụng cho xe đầu kéo sơ mi rơ mooc thực hiện việc chuyển làn đôi và bám quỹ đạo một cách an toàn. Thông qua các mô phỏng kiểm chứng trên Matlab/Simulink khi so sánh với bộ điều khiển trượt tầng thông thường, cấu trúc điều khiển đề xuất đã đồng thời đáp ứng việc bám quỹ đạo tốt hơn và giữ ổn định tốt hơn cho phương tiện dưới môi trường nhiễu tác động.

Từ khóa: Xe đầu kéo sơ mi rơ mooc, điều khiển trượt tầng, bộ quan sát trạng thái mở rộng.

ABSTRACT

In this paper, a three-degree-of-freedom model considering the lateral dynamics of a tractor-semitrailer is developed under the influence of environmental disturbances. Additionally, a hierarchical sliding mode controller combined with an extended state observer is applied to ensure the tractor-semitrailer performs double lane changes and tracks its trajectory safely. Through validation simulations in Matlab/Simulink, the proposed control structure, when compared to conventional sliding mode controllers, demonstrates both better trajectory tracking and improved stability of the vehicle under the influence of disturbances.

Keywords: Tractor-semitrailers, hierarchical sliding mode control, extended state observer.

¹Đại học Bách khoa Hà Nội

²Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: lengocduy@hauai.edu.vn

Ngày nhận bài: 10/5/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 05/7/2025

Ngày chấp nhận đăng: 28/7/2025

1. GIỚI THIỆU

Trong những năm gần đây, nền giao thông vận tải đang rất ưu chuộng các phương tiện kiểu đầu kéo sơ mi rơ mooc bởi vì chúng có chi phí vận tải thấp, mang tải trọng lớn và có thể được sử dụng linh hoạt với nhiều mục đích khác nhau [1]. Xe đầu kéo sơ mi rơ mooc gồm một đầu kéo và một sơ mi rơ mooc được nối qua khớp trung gian [2]. Do cấu trúc phức tạp, khối lượng lớn và chiều dài thân xe đáng kể mà khi di chuyển ở tốc độ cao, dòng xe này rất dễ gặp các tai nạn do mất ổn định theo phương ngang, ví dụ như dao động sơ mi rơ mooc, gập thân xe, và lật xe [3]. Chính vì thế, để làm giảm số vụ tai nạn nguy hiểm thì việc nghiên cứu về hệ thống an toàn cho dòng xe này là vô cùng quan trọng. Trong số các nghiên cứu đã có, hầu hết việc giữ ổn định ngang cho phương tiện này thông qua đánh lái sơ mi rơ mooc, hoặc đánh lái cả xe đầu kéo và sơ mi rơ mooc [4]. Tuy đạt được hiệu quả tốt hơn trong việc giữ ổn định ngang, việc thiết kế đánh lái cho sơ mi rơ mooc đòi hỏi độ phức tạp cao khi thiết kế cơ khí cho phương tiện. Trong khi đó, số ít các nghiên cứu tập trung vào nghiên cứu điều khiển đánh lái xe đầu kéo. Bộ điều khiển tốc độ được áp dụng cho dòng xe đầu kéo nhiều khớp nối [5]. Các điều khiển chủ động cho phương tiện được thực hiện trong nghiên cứu [6, 7]. Tác giả Deng sử dụng bộ điều khiển trượt với mô hình nhìn trước áp dụng cho xe đầu kéo và bổ sung tín hiệu cho chuyển động của sơ mi rơ mooc thông qua điều khiển mờ [8]. Có thể nói rằng các nghiên cứu trên đều chỉ tập trung thiết kế điều khiển bám quỹ đạo và xem xét dao động của phần sơ mi rơ mooc qua các điều khiển khác. Chính vì vậy trong nghiên cứu này, tác giả đề xuất việc sử dụng điều khiển trượt tầng nhằm đảm

bảo phương tiện vừa bám quỹ đạo và vừa kiểm soát được dao động của phần sơ mi rơ mooc.

Bên cạnh đó, để làm giảm nhiễu trong thực tế tác động lên phương tiện, nghiên cứu này đã sử dụng bộ quan sát trạng thái mở rộng [9] nhằm ước lượng và xử lý nhiễu bất định nhằm nâng cao độ tin cậy của thuật toán điều khiển.

Cấu trúc của bài báo như sau: Mục 2 xây dựng mô hình động lực học phương ngang của xe đầu kéo sơ mi rơ mooc, Mục 3 thiết kế thuật toán điều khiển trượt tầng kết hợp bộ quan sát trạng thái mở rộng, Mục 4 thực hiện kiểm chứng thuật toán điều khiển đề xuất thông qua mô phỏng Matlab/Simulink và thảo luận kết quả mô phỏng, Mục 5 kết luận bài báo và mở ra các hướng nghiên cứu tương lai.

2. MÔ HÌNH ĐỐI TƯỢNG

2.1. Các giả thiết ban đầu

Để xây dựng mô hình đối tượng, mô hình xe đạp (Bicycle model) được sử dụng, đây là mô hình được sử dụng trong rất nhiều các nghiên cứu [10, 11]. Mô hình xe đạp gộp 2 bánh xe phía trái và phải thành một bánh tương đương ở giữa và bỏ qua chuyển động lăn của đối tượng. Khi xây dựng mô hình đối tượng các giả thiết sau được thiết lập:

Giả thiết 1: Bỏ qua chuyển động theo phương đứng trục và phương dọc trục của phương tiện. Nghiên cứu tập trung vào chuyển động theo phương ngang của đối tượng.

Giả thiết 2: Do trong điều kiện vận hành trên mặt đường ổn định, vận tốc theo phương x là hằng số và góc đánh lái nhỏ hơn 10 độ nên giả thiết mô hình lớp là tuyến tính với độ cứng lớp là hằng số.

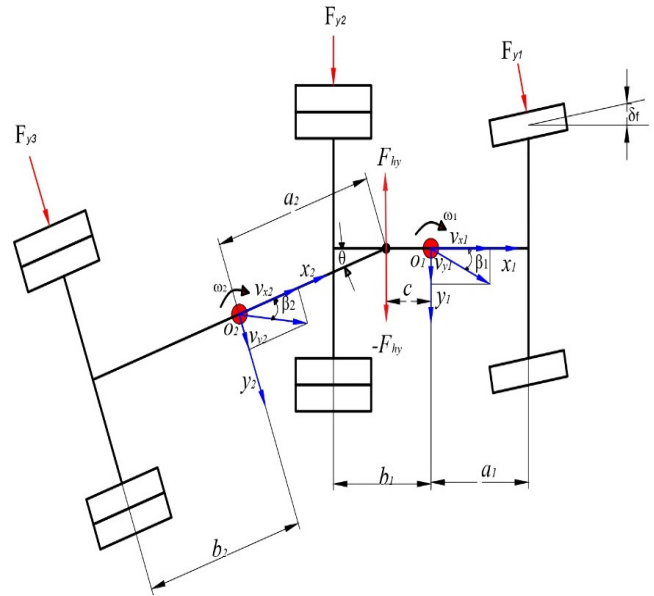
Giả thiết 3: Vận tốc dọc trục của phương tiện bằng hằng số $v = 72\text{km/h}$.

Các thông số của phương tiện như sau: khối lượng xe đầu kéo $m_1 = 5760\text{kg}$, khối lượng sơ mi rơ mooc $m_2 = 6640\text{kg}$, các khoảng cách giữa trọng tâm xe đầu kéo O_1 với bánh trước và bánh sau lần lượt là $a_1 = 1,1(\text{m})$ và $b_1 = 2,39(\text{m})$. Khoảng cách giữa trọng tâm sơ mi rơ mooc O_2 với điểm nối và trục bánh sau lần lượt là $a_2 = 5,21(\text{m})$ và $b_2 = 3,28(\text{m})$. Moment xoay của xe đầu kéo và sơ mi rơ mooc lần lượt là $I_{z1} = 34823(\text{kgm}^2)$ và $I_{z2} = 179992(\text{kgm}^2)$. Khoảng cách từ tâm O_1 tới khớp nối là $c = 1,64(\text{m})$. Hệ số cứng của các lớp bằng nhau và bằng $C_1 = C_2 = C_3 = -223281 (\text{N/rad})$.

2.2. Xây dựng phương trình

Hình 1 mô tả xe đầu kéo sơ mi rơ mooc. Hệ thống gồm 2 trục xe phía trước của xe đầu kéo, và phần thân sau gồm

1 trục của sơ mi rơ mooc. Sơ mi rơ mooc được nối với xe đầu kéo thông qua khớp nối. Đây là dạng mô hình xe đạp hay mô hình một vết với 1 cầu xe chỉ bao gồm 1 bánh ảo được đặt ở vị trí trung điểm của cầu xe. Ở đây, ω_1 và β_1 lần lượt là tốc độ xoay và góc trượt của xe đầu kéo, θ là góc khớp nối giữa xe đầu kéo và sơ mi rơ mooc, δ_f là góc đánh lái bánh trước của xe đầu kéo. F_{hy} là lực liên kết tại khớp nối. F_{y1}, F_{y2}, F_{y3} lần lượt là lực các lớp theo phương ngang. a_{y1}, a_{y2} là gia tốc theo phương ngang tại các trọng tâm của xe đầu kéo và sơ mi rơ mooc.



Hình 1. Xe đầu kéo sơ mi rơ mooc

Sử dụng định luật Newton và định luật bảo toàn moment, ta có hệ phương trình sau:

$$\begin{aligned} m_1 a_{y1} &= F_{y1} \cos \delta_f + F_{y2} - F_{hy} \\ m_2 a_{y2} &= F_{y3} + F_{hy} \cos \theta \\ I_{z1} \omega_1 &= F_{y1} a_1 \cos \delta_f + F_{hy} c - F_{y2} b_1 \\ I_{z2} \omega_2 &= F_{hy} a_2 \cos \theta - b_2 F_{y3} \end{aligned} \quad (1)$$

Biến đổi hệ phương trình (1) kết hợp với các giả thiết ban đầu, mô hình trạng thái của xe đầu kéo sơ mi rơ mooc như sau:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{M}\mathbf{x} + \mathbf{N}\delta_f + \mathbf{d} \quad (2)$$

Trong đó, $\mathbf{x} = [\omega_1, \beta_1, \theta, \theta]$ là các biến trạng thái, δ_f là biến điều khiển, $\mathbf{M}$ và $\mathbf{N}$ lần lượt là ma trận trạng thái và ma trận đầu ra. $\mathbf{d} = [d_1; d_2; d_3; 0]$ là nhiễu môi trường tác động vào hệ thống. Đặt:

$$\mathbf{M} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B} \quad (3)$$

$$\mathbf{N} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{P}$$

Trong đó, $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$ và $\mathbf{P}$ là ma trận hệ số như sau:

$$A = \begin{bmatrix} I_{z1} & m_1 cv & 0 & 0 \\ -m_2(a_2 + c) & (m_1 + m_2)v & -m_2 a_2 & \frac{C_3(a_2 + b_2)}{v} \\ I_{z2} & m_1 a_2 v & I_{z2} & \frac{-C_3 a_2 b_2 - C_3 b_2^2}{v} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{a_1^2 C_1 + b_1^2 C_2 + C_1 a_1 c - C_2 b_1 c}{v} + m_1 cv & -C_1(a_1 + c) + C_2(b_1 - c) & 0 & 0 \\ m_1 v + m_2 v + \frac{-C_1 a_1 + C_2 b_1 + C_3(a_2 + b_2 + c)}{v} & -(C_1 + C_2 + C_3) & 0 & C_3 \\ m_1 a_2 v - \frac{C_1 a_1 a_2 - C_2 b_1 a_2 + C_3 b_2(a_2 + b_2 + c)}{v} & -(C_1 a_2 + C_2 a_2 - C_3 b_2) & 0 & -C_3 b_2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$P = [-C_1(a_1 + c) \quad -C_1 \quad -C_1 a_2 \quad 0]^T \quad (6)$$

3. THIẾT KẾ ĐIỀU KHIỂN

Xem xét mô hình trạng thái trong phương trình (2), mô hình của phương tiện chịu tác động của nhiều môi trường như là gió hay lực ma sát. Các nhiễu này có thể làm giảm chất lượng điều khiển của hệ thống. Do đó bộ quan sát trạng thái mở rộng được thiết kế nhằm ước lượng giá trị nhiễu bất định này. Bên cạnh đó, bộ điều khiển trượt tầng được thiết kế để giảm đồng thời sai lệch vị trí của phương tiện và giảm góc nối θ nhằm đảm bảo bảo phương tiện bám quỹ đạo và giữ ổn định ngang.

3.1. Bộ quan sát trạng thái mở rộng

Bộ quan sát trạng thái mở rộng được thiết kế cho đối tượng như sau:

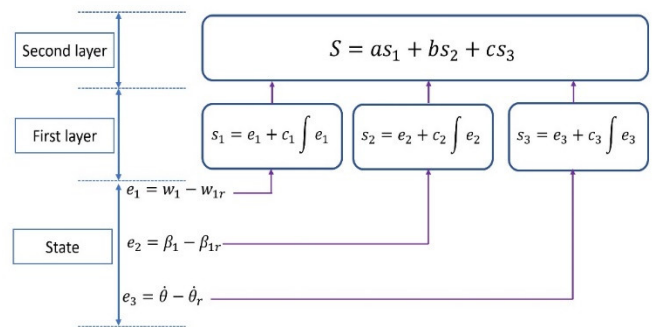
$$\begin{aligned} \dot{\hat{\omega}}_1 &= M(1, :) \hat{x} + N(1) \delta_f + \hat{d}_1 + \frac{\alpha_{11}}{\varepsilon} (\omega_1 - \hat{\omega}_1) \\ \dot{\hat{d}}_1 &= \frac{\alpha_{12}}{\varepsilon^2} (\omega_1 - \hat{\omega}_1) \\ \dot{\hat{\beta}}_1 &= M(2, :) \hat{x} + N(2) \delta_f + \hat{d}_2 + \frac{\alpha_{21}}{\varepsilon} (\beta_1 - \hat{\beta}_1) \\ \dot{\hat{d}}_2 &= \frac{\alpha_{22}}{\varepsilon^2} (\beta_1 - \hat{\beta}_1) \\ \dot{\hat{\theta}} &= \hat{x}(3) + \frac{\alpha_{31}}{\varepsilon} (\theta - \hat{\theta}) \\ \dot{\hat{\theta}} &= M(3, :) \hat{x} + N(3) \delta_f + \hat{d}_3 + \frac{\alpha_{32}}{\varepsilon^2} (\theta - \hat{\theta}) \\ \dot{\hat{d}}_3 &= \frac{\alpha_{33}}{\varepsilon^3} (\theta - \hat{\theta}) \end{aligned} \quad (7)$$

Mục tiêu của bộ quan sát là ước lượng các giá trị trạng thái $\hat{x}$ và các trạng thái nhiễu $\hat{d}$. Với thiết kế như hệ (7), tính ổn định của bộ quan sát được kiểm chứng và chứng minh trong [9].

3.2. Bộ điều khiển trượt tầng

Khác với bộ điều khiển thông thường, bộ điều khiển để xuất sử dụng các trạng thái ước lượng từ bộ quan sát

trạng thái. Cấu trúc điều khiển được thể hiện như hình 2, trong đó sai lệch e_i ($i = 1, 2, 3$) là sai lệch giữa trạng thái thực tế và giá trị đặt. Các mặt trượt bậc một được xây dựng bằng tổng các sai lệch và nguyên hàm của chúng, và mặt trượt bậc hai bằng tổng của ba mặt trượt bậc một với các trọng số tương ứng.



Hình 2. Cấu trúc điều khiển trượt tầng

Áp dụng luật điều khiển trượt tầng kết hợp với bộ quan sát trạng thái mở rộng, luật điều khiển được tính toán như sau:

$$\delta_f = \frac{1}{aN(1) + bN(2) + cN(3)} (-a\hat{F}_1 - b\hat{F}_2 - c\hat{F}_3 - k\hat{S} - \varepsilon \text{sign}(\hat{S})) \quad (8)$$

Trong đó,

$$\hat{F}_1 = M(1, :) \hat{x} + \hat{d}_1 - \dot{\omega}_{1r} + c_1(\hat{\omega}_1 - \omega_{1r})$$

$$\hat{F}_2 = M(2, :) \hat{x} + \hat{d}_2 - \dot{\beta}_{1r} + c_2(\hat{\beta}_1 - \beta_{1r})$$

$$\hat{F}_3 = M(3, :) \hat{x} + \hat{d}_3 + c_3 \hat{\theta}.$$

Và a, b và c là các hằng số dương. ω_{1r} , β_{1r} lần lượt là các giá trị tốc độ xoay mong muốn và góc trượt mong muốn của xe đầu kéo.

3.3. Chứng minh ổn định

Chọn hàm Lyapunov như sau:

$$\dot{\mathbf{V}} = \frac{1}{2} \mathbf{S}^2 \quad (9)$$

Đạo hàm theo thời gian ta được:

$$\dot{\mathbf{V}} = \mathbf{S}(\mathbf{a}\hat{\mathbf{s}}_1 + \mathbf{b}\hat{\mathbf{s}}_2 + \mathbf{c}\hat{\mathbf{s}}_3) \quad (10)$$

Thay thế tín hiệu điều khiển trong (8) ta được:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{V}} = & \mathbf{S}(\mathbf{a}(\mathbf{F}_1 - \hat{\mathbf{F}}_1) + \mathbf{b}(\mathbf{F}_1 - \hat{\mathbf{F}}_1) + \mathbf{c}(\mathbf{F}_1 - \hat{\mathbf{F}}_1) \\ & - \mathbf{k}\hat{\mathbf{S}} - \epsilon \text{sign}(\hat{\mathbf{S}})) \\ \leq & -\mathbf{k}\hat{\mathbf{S}}^2 - |\mathbf{S} - \hat{\mathbf{S}}|\mathbf{k}\hat{\mathbf{S}} - \hat{\mathbf{S}}\epsilon \text{sign}(\hat{\mathbf{S}}) \\ & - |\mathbf{S} - \hat{\mathbf{S}}|\epsilon \text{sign}(\hat{\mathbf{S}}) + \hat{\mathbf{S}}[\mathbf{L}(\mathbf{x} \\ & - \hat{\mathbf{x}}) + \mathbf{a}(\mathbf{d}_1 - \hat{\mathbf{d}}_1) + \mathbf{b}(\mathbf{d}_2 \\ & - \hat{\mathbf{d}}_2) + \mathbf{c}(\mathbf{d}_3 - \hat{\mathbf{d}}_3)] \\ & + |\mathbf{S} - \hat{\mathbf{S}}|[\mathbf{L}(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}) + \mathbf{a}(\mathbf{d}_1 \\ & - \hat{\mathbf{d}}_1) + \mathbf{b}(\mathbf{d}_2 - \hat{\mathbf{d}}_2) + \mathbf{c}(\mathbf{d}_3 \\ & - \hat{\mathbf{d}}_3)] \end{aligned} \quad (11)$$

Trong đó $\mathbf{L}$ là ma trận hằng số 1×4 đã được xác định.

Do tính chất của bộ quan sát đã được xây dựng, khi $\hat{\mathbf{x}} \rightarrow \mathbf{x}, \hat{\mathbf{d}}_1 \rightarrow \mathbf{d}_1, \hat{\mathbf{d}}_2 \rightarrow \mathbf{d}_2, \hat{\mathbf{d}}_3 \rightarrow \mathbf{d}_3$ thì $\hat{\mathbf{S}}[\mathbf{L}(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}) + \mathbf{a}(\mathbf{d}_1 - \hat{\mathbf{d}}_1) + \mathbf{b}(\mathbf{d}_2 - \hat{\mathbf{d}}_2) + \mathbf{c}(\mathbf{d}_3 - \hat{\mathbf{d}}_3)] + |\mathbf{S} - \hat{\mathbf{S}}|[\mathbf{L}(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}) + \mathbf{a}(\mathbf{d}_1 - \hat{\mathbf{d}}_1) + \mathbf{b}(\mathbf{d}_2 - \hat{\mathbf{d}}_2) + \mathbf{c}(\mathbf{d}_3 - \hat{\mathbf{d}}_3)]$ bị chặn và rất nhỏ. Do đó, $\dot{\mathbf{V}} \leq 0$, hệ thống ổn định theo lý thuyết ổn định Lyapunov.

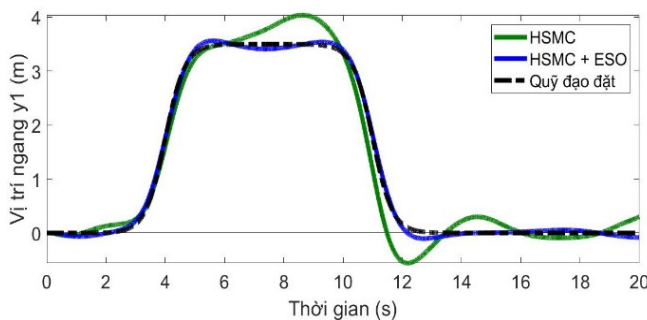
4. MÔ PHỎNG

Kịch bản mô phỏng: Xe đầu kéo sơ mi rơ moóc di chuyển ở tốc độ cao với vận tốc $v = 72\text{km/h}$. Xe thực hiện việc chuyển làn đôi theo quỹ đạo đặt như ở đường màu đen nét đứt trong hình 3 và có công thức như sau:

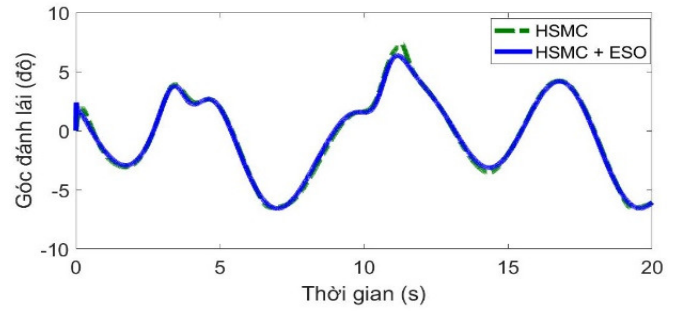
$$\begin{aligned} x_d &= vt \\ y_d &= 1,75[\tanh(1,5t - 6) - \tanh(11,5t - 16,5)] \end{aligned} \quad (12)$$

Dưới sự tác động của nhiễu bất định có thể kể đến như nhiễu do ma sát và gió, các tín hiệu nhiễu bất định được cho như sau:

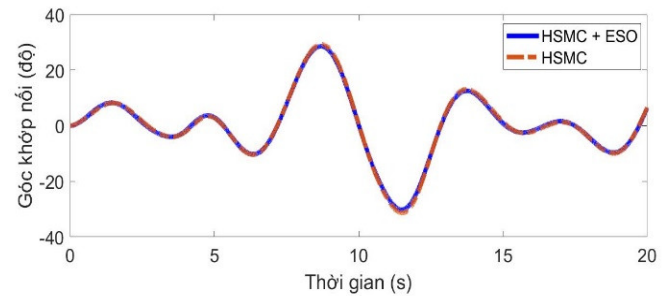
$$\begin{aligned} d_1 &= 0,75\sin(t) - 0,5\cos(t/2) \\ d_2 &= 0,25\sin(t) + 0,5\cos(t) \\ d_3 &= 0,5\sin(t) + 0,75\cos(3t/2) \end{aligned} \quad (13)$$



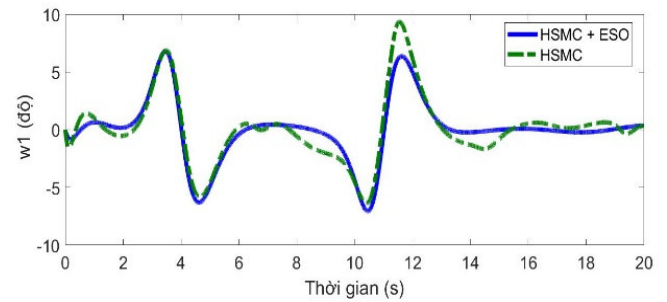
Hình 3. Quỹ đạo phương tiện



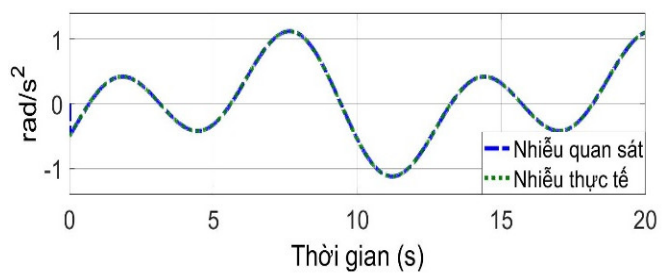
Hình 4. Góc đánh lái phương tiện



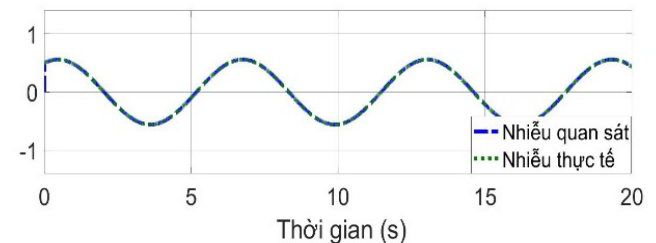
Hình 5. Góc khớp nối



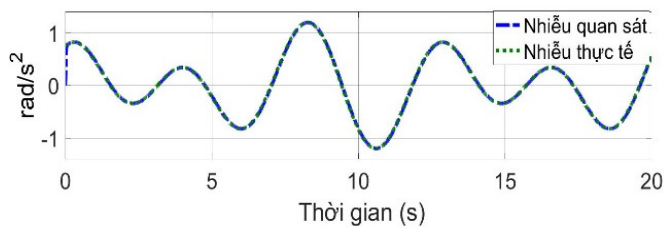
Hình 6. Tốc độ xoay xe đầu kéo



Hình 7. Nhiễu d_1



Hình 8. Nhiễu d_2



Hình 9. Nhiều d_3

Nhận xét: Thông qua các kết quả mô phỏng giữa bộ điều khiển trượt thông thường và bộ điều khiển trượt kết hợp với bộ quan sát trạng thái, như quan sát ở các hình 3 đến hình 9, ta có thể đưa ra hai nhận xét. Thứ nhất, bộ điều khiển trượt tăng HSMC kết hợp bộ quan sát ESO cho khả năng bám làn và giữ ổn định của phương tiện tốt hơn bộ điều khiển trượt tăng HSMC thông thường. Thứ hai đó là bộ quan sát ESO đã quan sát các nhiễu một cách chính xác. Cụ thể như hình số 3 HSMC+ESO giúp sai số xác lập vị trí ngang là nhỏ hơn nhiễu sơ với HSMC có độ vọt lố sang làn 2 xấp xỉ 0,5m (giá trị xấp xỉ 4m so với giá trị đặt 3,5m). Ở hình 4, góc đánh lái của bộ HSMC + ESO có được sự điều chỉnh nhỏ về biên độ nhằm làm giảm ảnh hưởng của nhiễu, điều này dẫn đến kết quả bám quỹ đạo tốt hơn và kiểm soát góc xoay thân xe tốt hơn của bộ điều khiển đề xuất so với bộ điều khiển HSMC thông thường. Trong khi đó, như ở hình 5, góc khớp nối vẫn giữ được ổn định khi áp dụng cả hai bộ điều khiển. Trong hình số 6 tốc độ xoay đầu xe kéo cũng nhỏ hơn tại các điểm cực trị thay đổi hướng của góc quay, điều này làm chuyển động đầu xe bớt thay đổi gấp hơn. Ngoài ra, các hình 7, 8 và 9 cho thấy khả năng ước lượng chính xác nhiễu đầu vào của bộ quan sát ESO.

5. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, một bộ điều khiển trượt tăng được thiết kế nhằm đảm bảo đồng thời việc bám quỹ đạo chuyển làn và giữ ổn định cho xe đầu kéo sơ mi rơ moóc. Ngoài ra, tác giả sử dụng thêm bộ quan sát trạng thái nhằm ước lượng chính xác nhiễu tác động, từ đó cho ra hiệu quả điều khiển tốt hơn, đảm bảo bám quỹ đạo tốt hơn và vẫn giữ sự ổn định cho phương tiện so với phương pháp điều khiển trượt tăng thông thường. Toàn bộ các mô phỏng và kiểm chứng được thực hiện qua Matlab/Simulink nhằm chứng minh sự hiệu quả của thuật toán điều khiển đề xuất. Trong các hướng nghiên cứu tương lai, tác giả sẽ tiếp tục nâng cao chất lượng điều khiển của bộ điều khiển và bộ quan sát.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Wang Wencong, et al., "Trajectory Planning of a Semi-Trailer Train Based on Constrained Iterative LQR," *Applied Sciences*, 13, 19: 10614, 2023.
- [2]. Xiaomei Xu, Lei Zhang, Yiping Jiang, Ning Chen, "Active control on path following and lateral stability for truck-trailer combinations," *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44:1365-1377, 2019.
- [3]. Roman Kamnik, Friedrich Boettiger, Ken Hunt, "Roll dynamics and lateral load transfer estimation in articulated heavy freight vehicles," in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 217(11):985-997, 2003.
- [4]. Vempaty Smitha, He Yuping, Zhao Lin, "An overview of control schemes for improving the lateral stability of car-trailer combinations," *International Journal of Vehicle Performance*, 6, 151, 2020. doi: 10.1504/IJVP.2020.10028995, 2020.
- [5]. Rahim A., Huang W., He Y., "A Longitudinal Speed Controller for Autonomous Multitrailer Articulated Heavy Vehicles," in *Proceedings of the Canadian Society for Mechanical Engineering International Congress*, Charlottetown, PE, Canada, 2021.
- [6]. Liu L., Wang B., He Y., "Research on Path-tracking Control of Articulated Vehicle with a Trailer based on Advanced Model Prediction Control Strategy," in *Proceedings of the Canadian Society for Mechanical Engineering International Congress*, Charlottetown, PE, Canada, 2021.
- [7]. Rahimi A., Huang W., Sharma T., He Y., "An Autonomous Driving Control Strategy for Multi-Trailer Articulated Heavy Vehicles with Enhanced Active Trailer Safety," in *The 27th IAVSD Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks*, Saint-Petersburg, Russia, 2021.
- [8]. Zhao Wen Deng, You Qun Zhao, Bao Hua Wang, Wei Gao, Xinxin Kong, "A preview driver model based on sliding-mode and fuzzy control for articulated heavy vehicle," *Meccanica*, 57(8):1853-1878, 2022.
- [9]. J. Liu, X. Wang, *Advanced sliding mode control*. Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [10]. Islam Md Manjurul, Xuejun Ding, Yuping He, "A closed-loop dynamic simulation-based design method for articulated heavy vehicles with active trailer steering systems," *Vehicle system dynamics*, 50, 5: 675-697, 2012.
- [11]. He Yuping, Md Manjurul Islam, Timothy D. Webster, "An integrated design method for articulated heavy vehicles with active trailer steering systems," *SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems* 3, 2010-01-0092: 158-174, 2010.

AUTHORS INFORMATION

Le Ngoc Duy^{1,2}, Nguyen Huu Viet¹, Ho Huu Hai¹, Nguyen Tung Lam¹

¹Hanoi University of Science and Technology, Vietnam

²Hanoi University of Industry, Vietnam