

BÁM QUỶ ĐẠO THIẾT BỊ BAY MỘT KÊNH TỐC ĐỘ CAO BẰNG ĐIỀU KHIỂN SAI SỐ HỮU HẠN THỜI GIAN KẾT HỢP MẠNG NƠ-RON

HIGH SPEED UAV TRAJECTORY TRACKING BY FINITE-TIME ERROR CONTROL
COMBINED WITH NEURAL NETWORK

Phạm Công Tư¹, Nguyễn Quang Vinh^{1,*}

DOI: <https://doi.org/10.57001/hu1h5804.2025.373>

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày một phương pháp điều khiển lai cho thiết bị bay một kênh tốc độ cao một kênh, dựa trên sự kết hợp giữa điều khiển sai số hữu hạn thời gian (Finite-Time Error Feedback Control - FTEFC) và mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm (Radial Basis Function Neural Network - RBFNN). Mục tiêu của phương pháp là đạt được hiệu suất bám quỹ đạo mạnh mẽ và ổn định trong điều kiện tồn tại bất định mô hình và nhiễu ngoài. Bộ điều khiển FTEFC được thiết kế để đảm bảo sai số bám quỹ đạo hội tụ về 0 trong một khoảng thời gian hữu hạn, không phụ thuộc vào điều kiện ban đầu. Để tăng cường khả năng chống nhiễu, mạng RBFNN được tích hợp làm bộ bù thích nghi, có khả năng ước lượng và triệt tiêu các thành phần nhiễu và sai lệch tham số trong mô hình. Phân tích ổn định dựa trên phương pháp Lyapunov chứng minh rằng hệ thống được đề xuất đảm bảo tính hội tụ trong thời gian hữu hạn và duy trì ổn định toàn cục. Các kết quả mô phỏng so sánh với bộ điều khiển PID truyền thống cho thấy hiệu năng được cải thiện đáng kể, với sai số bám quỹ đạo giảm khoảng 83% và thời gian hội tụ nhanh hơn 38%. Kết quả này khẳng định hiệu suất vượt trội, tính bền vững và khả năng chống nhiễu cao của phương pháp điều khiển lai đề xuất, mở ra tiềm năng ứng dụng cho các thiết bị bay tốc độ cao yêu cầu độ chính xác và hiệu suất năng lượng cao.

Từ khóa: Điều khiển bền vững, mạng nơ-ron, FTEFC, tối ưu quỹ đạo, điều khiển tên lửa.

ABSTRACT

This paper presents a hybrid control approach for a high-speed single-channel Unmanned Aerial Vehicle (UAV), combining Finite-Time Error Feedback Control (FTEFC) and a Radial Basis Function Neural Network (RBFNN). The proposed method aims to achieve robust and stable trajectory tracking performance in the presence of model uncertainties and external disturbances. The FTEFC is designed to ensure that the trajectory tracking error converges to zero within a fixed finite time, independent of the initial conditions. To enhance disturbance rejection capability, an RBFNN is integrated as an adaptive compensation unit, capable of estimating and eliminating the effects of modeling errors and environmental disturbances. A Lyapunov-based stability analysis demonstrates that the proposed system achieves finite-time convergence and maintains global stability. Simulation results, compared to a conventional PID controller, indicate significant performance improvements, with approximately 83% reduction in tracking error and 38% faster convergence time. These findings highlight the superior robustness, strong anti-disturbance capability, and high efficiency of the proposed hybrid control scheme, making it a promising solution for high-speed UAVs requiring high precision and energy efficiency.

Keywords: Robust control, Neural networks, Finite-Time Error Feedback Control (FTEFC), Trajectory optimization, Missile control.

¹Viện Khoa học và Công nghệ Quân sự

*Email: vinhquang2808@gmail.com

Ngày nhận bài: 02/8/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 13/11/2025

Ngày chấp nhận đăng: 28/11/2025

1. GIỚI THIỆU

Điều khiển thiết bị bay (TBB) một kênh tốc độ cao là một trong những bài toán nghiên cứu đầy thách thức trong lĩnh vực hàng không - vũ trụ, do tính phi tuyến mạnh, sự biến thiên tham số theo thời gian, cùng sự hiện diện của nhiễu và bất định phức tạp trong mô hình động lực học [1]. Trong môi trường thực tế, yêu cầu đặt ra không chỉ là độ chính xác bám quỹ đạo cao, mà còn là tốc độ hội tụ nhanh, khả năng kháng nhiễu mạnh, và chi phí tính toán phù hợp với giới hạn phần cứng nhúng. Do đó, nhiều phương pháp điều khiển hiện đại đã được đề xuất nhằm khắc phục những hạn chế của các bộ điều khiển cổ điển như PID, vốn kém hiệu quả khi xử lý các hệ thống phi tuyến và có tham số biến đổi.

Một hướng tiếp cận nổi bật là điều khiển trượt (SMC) và các biến thể thích nghi của nó. Các công trình gần đây mở rộng SMC vào bài toán tích hợp dẫn đường - điều khiển (Integrated Guidance and Control - IGC) cho tên lửa trong không gian ba chiều, cho thấy SMC thích nghi có thể đạt độ chính xác bám cao ngay cả trong điều kiện mục tiêu cơ động và nhiễu mạnh. Tuy nhiên, hiện tượng chattering và mức tiêu thụ năng lượng cao vẫn là những vấn đề tồn tại, đòi hỏi các kỹ thuật làm mượt hoặc bổ sung thành phần thích nghi để cải thiện [2, 3]. Các nghiên cứu gần đây đã kết hợp SMC với ràng buộc hiệu suất hữu hạn (prescribed-performance) hoặc luật thích nghi (adaptive laws) để giảm chattering và đảm bảo hiệu suất ổn định trong toàn bộ quá trình bám.

Điều khiển dự báo mô hình (MPC) cũng được ứng dụng rộng rãi nhờ khả năng xử lý ràng buộc và tối ưu hóa theo thời gian thực. Wang và cộng sự [4] chỉ ra rằng MPC có thể cải thiện đáng kể độ chính xác so với các phương pháp tuyến tính truyền thống như LQR; tuy nhiên, chi phí tính toán và độ trễ vẫn là rào cản lớn khi triển khai trên nền tảng phần cứng giới hạn. Để khắc phục, các nghiên cứu gần đây tập trung vào MPC rút gọn (reduced-order MPC), MPC phi tuyến xấp xỉ (approximate nonlinear MPC), hoặc kết hợp với phương pháp giả phổ (pseudospectral methods) nhằm giảm tải tính toán trong các nhiệm vụ dẫn đường và điều khiển tên lửa [5, 6].

Song song đó, học sâu (Deep Learning) và đặc biệt là học tăng cường sâu (DRL) đã nổi lên như một xu hướng nghiên cứu mạnh mẽ trong những năm gần đây. Các nghiên cứu áp dụng DRL (như DDPG, TD3, PPO) cho bài toán dẫn đường giai đoạn cuối (terminal guidance) và IGC cho thấy khả năng thích nghi cao với mô hình không chính xác và nhiễu phi tuyến, đồng thời duy trì hiệu suất tối ưu trong các kịch bản mục tiêu cơ động [7, 8]. Tuy

nhien, hai hạn chế lớn của DRL là thời gian huấn luyện kéo dài và nhu cầu dữ liệu mô phỏng khổng lồ. Bên cạnh đó, việc đảm bảo an toàn và tuân thủ ràng buộc vật lý (giới hạn điều khiển, quá tải,...) trong quá trình học vẫn là vấn đề mở. Một số hướng nghiên cứu mới đã cố gắng rút ngắn thời gian huấn luyện thông qua phát lại kinh nghiệm (experience replay) cải tiến và kết hợp mô hình hóa toán học, nhằm tăng hiệu quả học và độ ổn định [9].

Một nhánh nghiên cứu khác có liên quan trực tiếp đến phương pháp đề xuất trong bài báo này là điều khiển hội tụ hữu hạn (FTC) và điều khiển hội tụ cố định (Fixed-Time Control). Các bộ điều khiển này cho thấy ưu thế về tốc độ hội tụ nhanh và độ bền vững cao trước nhiễu, đặc biệt phù hợp cho nhiệm vụ bám quỹ đạo yêu cầu phản ứng nhanh [10, 11]. Gần đây, nhiều công trình đã mở rộng hướng tiếp cận này cho các hệ phi tuyến phức tạp, hệ nhiễu tham số biến đổi và tích hợp tiêu chí hiệu suất hữu hạn (prescribed-performance constraints) để đảm bảo sai số luôn nằm trong giới hạn mong muốn.

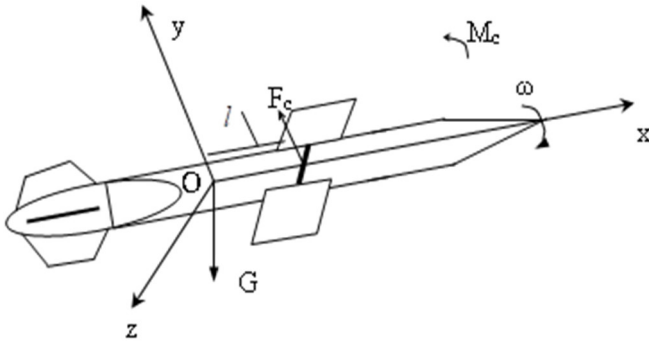
Về bù bất định và ước lượng nhiễu, mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm (RBFNN) và các cấu trúc mạng nơ-ron thích nghi được sử dụng rộng rãi nhờ khả năng xấp xỉ phi tuyến mạnh và chi phí tính toán thấp hơn so với mạng học sâu [12, 13]. Các công trình gần đây đề xuất RBFNN thích nghi hội tụ hữu hạn thời gian cho điều khiển UAV hoặc hệ động lực học hàng không, cho thấy sự kết hợp giữa bộ điều khiển hữu hạn thời gian và RBFNN online có thể vừa đảm bảo hội tụ nhanh, vừa bù bất định hiệu quả mà không làm tăng đáng kể tải tính toán [14, 15]. Ngoài ra, một số nghiên cứu tích hợp RBFNN với bộ lọc Kalman mở rộng (EKF) hoặc kỹ thuật phát lại kinh nghiệm để cải thiện điều kiện kích thích và ổn định ước lượng trong môi trường thực.

Từ những kết quả đó, bài báo này đề xuất một phương pháp điều khiển lai (hybrid control approach), kết hợp bộ điều khiển sai số hữu hạn thời gian mở rộng (FTEFC) nhằm đảm bảo hội tụ nhanh, với mạng RBFNN online để ước lượng và bù nhiễu, bất định trong thời gian thực. Mục tiêu là đạt được hiệu suất bám quỹ đạo và độ ổn định tương đương hoặc vượt trội so với các phương pháp hiện có (SMC thích nghi, MPC rút gọn, DRL), đồng thời duy trì chi phí tính toán thấp và khả năng triển khai thực tế. Giải pháp này hướng tới lấp đầy khoảng trống giữa điều khiển hội tụ nhanh và bù nhiễu thích nghi chi phí thấp trong hệ điều khiển TBB một kênh tốc độ cao.

2. MÔ HÌNH TOÁN HỌC THIẾT BỊ BAY MỘT KÊNH TỐC ĐỘ CAO

Xét hệ tọa độ liên kết Oxyz gắn với TBB, trong đó: có điểm O đặt tại tâm khí động; Ox gắn trục dọc TBB; Oy,

Oz: trục đứng và ngang thân TBB. Hệ Oxyz quay cùng TBB quanh Ox với vận tốc góc ω_x (hình 1) [16, 17].



Hình 1. Lực và mô men điều khiển tác động lên TBB

O - trọng tâm TBB; Oxyz - hệ tọa độ gắn với thân TBB; ω_x - tốc độ góc quay của TBB quanh trục dọc; F_c - lực điều khiển tác động lên cánh lái; M_c - mô men điều khiển TBB

Theo định luật II Niuton ta có phương trình chuyển động tịnh tiến tâm khối của TBB như sau:

$$m\dot{\mathbf{v}} + \boldsymbol{\omega} \times (m\mathbf{v}) = \mathbf{F} + m\mathbf{g} \quad (1)$$

$$\text{Với: } \mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}, \boldsymbol{\omega} = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}, \mathbf{F} = \begin{bmatrix} P-D \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix}$$

Trong đó: v_x, v_y, v_z lần lượt là các thành phần vận tốc theo Ox, Oy, Oz; F_y, F_z là lực khí động theo Oy, Oz; P là lực đẩy động cơ; D là lực cản khí động theo trục Ox. Trong trường hợp coi TBB bay với vận tốc ổn định $v_x \approx \text{const}$ và quay quanh trục dọc Ox với vận tốc $\omega_x = \omega \approx \text{const}$.

$$m(\dot{v}_y - \omega v_z) = F_y(v_y, \theta) + m(-g \cos \phi(t)) \quad (2)$$

$$m(\dot{v}_z + \omega v_y) = F_z(v_z, \theta) + m(-g \sin \phi(t))$$

Gọi θ là góc quay quanh trục Oz, ta có phương trình mô men quanh Oz có dạng:

$$I_z \ddot{\theta} + c_\theta \dot{\theta} + k_{\theta, \text{rot}} \theta + (I_x - I_z) \omega \dot{\theta} = K_u u(t) \quad (3)$$

Trong đó: I_x, I_y, I_z lần lượt là mô men quán tính trục Ox, Oy, Oz.

Thành phần $(I_x - I_z) \omega \dot{\theta}$ xuất hiện do thành phần gyroscopic coupling từ roll-rate $\omega_x = \omega$ kết hợp với tốc độ góc nhỏ $\omega_y \omega_z$. Ở xấp xỉ tuyến tính nó tạo một thành phần tỷ lệ theo $\dot{\theta}$.

$k_{\theta, \text{rot}}$ là hệ số khôi phục góc.

$$\text{Do đó: } \ddot{\theta} = -\frac{(c_\theta + (I_x - I_z) \omega)}{I_z} \dot{\theta} - \frac{k_{\theta, \text{rot}}}{I_z} \theta + \frac{K_u}{I_z} u(t)$$

Chọn trạng thái:

$$\mathbf{x} = [x_g \ y_g \ z_g \ v_y \ v_z \ \theta \ \dot{\theta}]^T, u = u(t).$$

Với hệ phương trình trạng thái dạng:

$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u + \mathbf{d}(t)$, kết hợp với các phương trình (2) và (3) ta có:

$$\mathbf{A}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \phi & -\sin \phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin \phi & \cos \phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{c_y}{m} & \omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega & -\frac{c_z}{m} & \frac{k_\theta}{m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{k_{\theta, \text{rot}}}{I_z} & -\frac{c_\theta + (I_x - I_z) \omega}{I_z} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_u}{I_z} \end{bmatrix}$$

trong đó: u là tín hiệu điều khiển;

$\mathbf{d}(t)$ biểu diễn tổng hợp bao gồm:

$$\mathbf{d}(t) = \mathbf{d}_{\text{model}}(t) + \mathbf{d}_{\text{ext}}(t).$$

x_g, y_g, z_g lần lượt là tọa độ theo các trục $O_g x_g, O_g y_g, O_g z_g$ của hệ tọa độ quán tính có gốc O_g trùng với gốc O hệ tọa độ gắn với thân tên lửa Oxyz tại thời điểm đầu.

3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN SAI SỐ HỮU HẠN THỜI GIAN KẾT HỢP MẠNG NƠ-RON

3.1. Bộ điều khiển sai số hữu hạn thời gian

Xét hệ thống TBB tốc độ cao một kênh với sai số bám $e = x - x_d \in \mathbb{R}^n$, luật điều khiển FTEFC được thiết kế gồm hai thành phần chính [18]:

$$u_{\text{FTEFC}} = -k_1 |e|^\alpha \text{sign}(e) - k_2 \int_0^t |e|^\beta \text{sign}(e) dt \quad (4)$$

trong đó:

- $k_1, k_2 > 0$ là các hệ số điều khiển;
- $0 < \alpha < 1, 0 < \beta < 1$ là các tham số mũ điều chỉnh tốc độ hội tụ;

• $\text{sign}(e)$ là hàm signum xác định theo từng thành phần của vector e .

Theo công thức (4) ta thấy: thành phần thứ nhất $-k_1|e|^\alpha \text{sign}(e)$ đảm bảo: Hội tụ nhanh khi sai số lớn do tính chất $\alpha < 1$; Giảm chattering so với SMC truyền thống nhờ bậc phân thứ α . Thành phần tích phân

$-k_2 \int_0^t |e|^\beta \text{sign}(e) dt$ có tác dụng triệt tiêu sai số tĩnh và ổn

định hệ thống với nhiễu không đổi.

Xét hàm Lyapunov ứng viên:

$$V = \frac{1}{2} e^T e + \frac{1}{2} \left(\int_0^t |e|^\beta \text{sign}(e) dt \right)^2 \quad (5)$$

Đạo hàm theo thời gian:

$$\dot{V} = e^T \dot{e} + |e|^\beta \text{sign}(e) \int_0^t |e|^\beta \text{sign}(e) dt \quad (6)$$

Thay thế (4) vào động lực học sai số, ta thu được:

$$\dot{V} \leq -k_1 |e|^{\alpha+1} - k_2 \left| \int_0^t |e|^\beta \text{sign}(e) dt \right|^{\beta+1} \quad (7)$$

Theo bổ đề hội tụ hữu hạn [18], hệ thống đạt hội tụ trong thời gian:

$$t_s \leq \frac{1}{k(1-\alpha)} \ln \left(1 + \frac{k_1}{k_2} |e(0)|^{1-\alpha} \right) \quad (8)$$

Để giải được bài toán trên, các tham số sẽ được lựa chọn: k_1 : Xác định dựa trên giới hạn điều khiển tối đa k_2 đảm bảo $k_2/k_1 \approx 0,3 - 0,5$ để cân bằng giữa tốc độ và ổn định; α, β : Thường chọn trong khoảng $[0,5; 0,9]$ để đạt hội tụ nhanh mà không gây dao động.

3.2. Thiết kế mạng nơ-ron bù nhiễu

Mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm (RBFNN) được sử dụng để ước lượng online các thành phần nhiễu tổng hợp $d(t)$, với cấu trúc gồm 3 lớp [19]:

$$\hat{d}(x) = W^T \phi(x) + \epsilon(x) \quad (9)$$

trong đó:

- $W \in \mathbb{R}^{n_h \times n}$: Ma trận trọng số tối ưu;
- $\phi(x) = [\phi_1(x), \dots, \phi_{n_h}(x)]^T$: Vector hàm kích hoạt;
- $\epsilon(x)$: Sai số xấp xỉ, thỏa mãn $\|\epsilon(x)\| \leq \epsilon^*$

Hàm kích hoạt RBF có dạng Gaussian:

$$\phi_i(x) = \exp \left(-\frac{\|x - c_i\|^2}{2\sigma_i^2} \right), \quad i = 1, \dots, n_h \quad (10)$$

với:

- c_i : Tâm của hàm cơ sở thứ i ;
- σ_i : Độ rộng hàm cơ sở;
- n_h : Số nơ-ron ẩn (chọn theo phạm vi nhiễu).

Luật cập nhật trọng số được thiết kế để cực tiểu hóa hàm mục tiêu:

$$J(W) = \frac{1}{2} e^T e + \frac{\kappa}{2} \text{tr}(\tilde{W}^T \tilde{W}) \quad (11)$$

với $\tilde{W} = W - W^*$ là sai lệch trọng số.

Áp dụng gradient descent, ta thu được:

$$\dot{W} = -\eta (\phi(x) e^T + \kappa \|e\| W) \quad (12)$$

trong đó:

- $\eta > 0$: Tốc độ học;
- $\kappa > 0$: Hệ số ổn định e-modification

Xét hàm Lyapunov mở rộng:

$$V = \frac{1}{2} e^T e + \frac{1}{2\eta} \text{tr}(\tilde{W}^T \tilde{W}) \quad (13)$$

Đạo hàm theo thời gian:

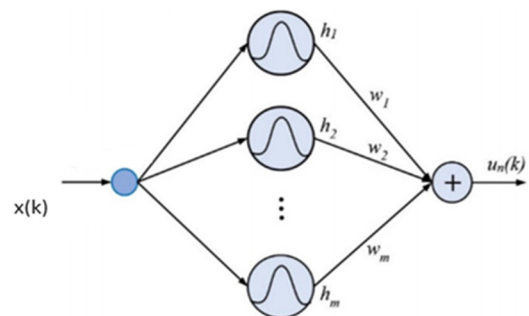
$$\dot{V} = e^T \dot{e} + \frac{1}{\eta} \text{tr}(\tilde{W}^T \dot{\tilde{W}}) \quad (14)$$

Thay thế (12) và động lực học sai số, ta có:

$$\dot{V} \leq -k_1 \|e\|^{\alpha+1} - \kappa \|e\| \|\tilde{W}\|_F^2 + \epsilon^* \|e\| \quad (15)$$

Điều kiện đủ để hệ ổn định:

$$\|e\| \geq \left(\frac{\epsilon^*}{k_1} \right)^{1/\alpha} \quad \text{và} \quad \|\tilde{W}\|_F \geq \frac{\epsilon^*}{\kappa} \quad (16)$$



Hình 2. Sơ đồ cấu trúc mạng RBF trong hệ thống điều khiển

3.3. Kết hợp điều khiển sai số hữu hạn thời gian và mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm

Bề mặt trượt terminal được định nghĩa cho kênh điều khiển:

$$s_i = e_{v_i} + \alpha_i |e_{p_i}|^{\gamma} \text{sign}(e_{p_i}), \quad i = x, y, z \quad (17)$$

với $e_{p_i} = p_i - p_{i,d}$, $e_{v_i} = v_i - v_{i,d}$ lần lượt là sai số vị trí và vận tốc, $0 < \gamma < 1$, $\alpha_i > 0$.

Mạng RBFNN được sử dụng để ước lượng các thành phần bất định:

$$f(x) = W^T \Phi(x) + \varepsilon \quad (18)$$

với $\Phi(x) = [\varphi_1(x), \dots, \varphi_N(x)]^T$ là vector hàm cơ sở Gaussian, W là vector trọng số và ε là sai số xấp xỉ.

Luật điều khiển tổng hợp gồm ba thành phần:

$$u = u_{eq} + u_{nn} + u_{sw} \quad (19)$$

- Thành phần tương đương: $u_{eq} = -\alpha \gamma |e_{p_i}|^{\gamma-1} e_{v_i} + \ddot{p}_d$
- Thành phần bù RBFNN: $u_{nn} = -\hat{W}^T \Phi(x)$
- Thành phần chuyển mạch: $u_{sw} = -Ks - \eta \tanh(s/\delta)$

Luật cập nhật trọng số với hiệu chỉnh sigma:

$$\dot{\hat{W}} = -\Gamma [\Phi(x)s^T + \sigma \hat{W}] \quad (20)$$

Xét động học của biến trượt s_i

Vì $\frac{d}{dt}(|e_{p_i}|^{\gamma_i} \operatorname{sgn} e_{p_i}) = \gamma_i |e_{p_i}|^{\gamma_i-1} e_{v_i}$ theo Filippov tại $e_{p_i} = 0$ nên:

$$\dot{s}_i = \ddot{p}_i - \ddot{p}_{d,i} + \alpha \gamma_i |e_{p_i}|^{\gamma_i-1} e_{v_i} = f_i(x) + b_i u + d_i + \alpha \gamma_i |e_{p_i}|^{\gamma_i-1} e_{v_i}$$

Thay u_i và (18) vào, các hạng danh định triệt tiêu:

$$\dot{s}_i = -k_{p_i} s_i - k_{v_i} |s_i|^{\rho_i} \operatorname{sgn}(s_i) + \tilde{W}_i^T \Phi_i(x) + \tilde{d}_i(t) \quad (21)$$

Xét hàm Lyapunov mở rộng: $V_i = \frac{1}{2} s_i^2 + \frac{1}{2} \tilde{W}_i^T \Gamma_i^{-1} \tilde{W}_i$

Lấy đạo hàm theo (21) và $\dot{\tilde{W}}_i = -\hat{W}_i$:

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &= s_i \dot{s}_i + \tilde{W}_i^T \Gamma_i^{-1} \dot{\tilde{W}}_i \\ &= s_i (-k_{p_i} s_i - k_{v_i} |s_i|^{\rho_i} \operatorname{sgn}(s_i) + \tilde{W}_i^T \Phi_i + \tilde{d}_i) + \tilde{W}_i^T \Gamma_i^{-1} (-\hat{W}_i) \\ &= -k_{p_i} s_i^2 - k_{v_i} |s_i|^{1+\rho_i} + s_i \tilde{d}_i + s_i \tilde{W}_i^T \Phi_i - \tilde{W}_i^T \Phi_i s_i + \sigma_i \tilde{W}_i^T \hat{W}_i \\ &= -k_{p_i} s_i^2 - k_{v_i} |s_i|^{1+\rho_i} + s_i \tilde{d}_i + \sigma_i \tilde{W}_i^T \hat{W}_i \text{ (hủy chéo NN)} \end{aligned}$$

Dùng bất đẳng thức chuẩn:

$$|s_i \tilde{d}_i| \leq \frac{k_{d_i}}{2} s_i^2 + \frac{\Delta_i^2}{2k_{d_i}}, \quad \tilde{W}_i^T \hat{W}_i = \tilde{W}_i^T (W_i^* - \tilde{W}_i) \leq \frac{1}{2} |W_i^*|^2 - \frac{1}{2} |\tilde{W}_i|^2$$

Suy ra:

$$\dot{V}_i \leq -\frac{k_{p_i}}{2} s_i^2 - k_{v_i} |s_i|^{1+\rho_i} - \underbrace{\frac{\sigma_i}{2} |\tilde{W}_i|^2}_{=: C_i} + \frac{\Delta_i^2}{2k_{d_i}} \quad (22)$$

Hệ quả: s_i và $\tilde{W}_i$ đều bị chặn đều (UUB). Để chứng minh hội tụ hữu hạn thời gian của s_i , dùng trực tiếp (21):

$$|\dot{s}_i| \leq -k_{v_i} |s_i| - k_{2i} |s_i|^{\rho_i} + \Delta_i \leq -k_{2i} |s_i|^{\rho_i} + \Delta_i$$

Nếu chọn $k_{2i} > \Delta_i$ thì theo bổ đề so sánh cho bất phương trình $\dot{z} \leq -az^\rho + b$ với $0 < \rho < 1$, ta có:

$$|s_i(t)| \rightarrow 0 \text{ trong hữu hạn thời gian}$$

$$T_{s,i} \leq \frac{|s_i(0)|^{1-\rho_i}}{(k_{2i} - \Delta_i)(1-\rho_i)} \quad (23)$$

Khi đã "vào trượt" $s_i = 0$ (và duy trì trên mặt), động học lỗi rút gọn từ (17):

$$e_{v_i} = -\alpha_i |e_{p_i}|^{\gamma_i} \operatorname{sgn}(e_{p_i}) \Rightarrow \dot{e}_{p_i} = -\alpha_i |e_{p_i}|^{\gamma_i} \operatorname{sgn}(e_{p_i})$$

Chọn $V_{e,i} = \frac{1}{2} |e_{p_i}|^2$ hoặc dùng công thức chuẩn:

$$|e_{p_i}(t)| \rightarrow 0 \text{ trong hữu hạn thời gian}$$

$$T_{e,i} \leq \frac{|e_{p_i}(T_{s,i})|^{1-\gamma_i}}{\alpha_i(1-\gamma_i)} \quad (24)$$

Tổng thời gian hội tụ: $T_i \leq T_{s,i} + T_{e,i}$

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THẢO LUẬN

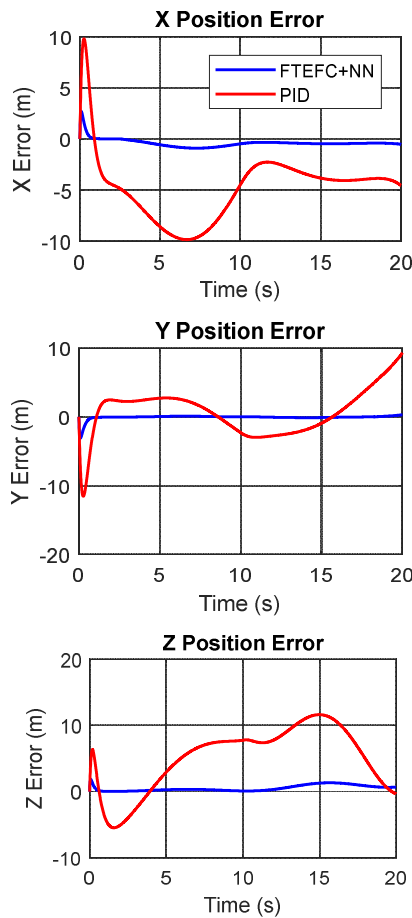
Để khảo sát so sánh bộ điều khiển FTEFC-RBFNN và bộ điều khiển PID ta tiến hành mô phỏng trên Matlab với đối tượng điều khiển là một TBB một kênh tốc độ cao có khối lượng $m = 10\text{kg}$ đang bay với vận tốc ổn định $V = 560\text{m/s}$. Các hệ số khí động học của TBB một kênh được tính sơ bộ theo các phương pháp gần đúng của khí động học với dây cung khí động trung bình ba = 0,1m, diện tích cánh $S = 0,01\text{m}^2$ và đường kính $D = 0,07\text{m}$. Các mô men quán tính sẽ là $J_x = 0,007\text{kg.m}^2$ và $J_y = J_z = 2\text{kg.m}^2$. Thời gian mô phỏng là 20s và được tính với bước thời gian $\Delta t = 0,01\text{s}$. Quỹ đạo tham chiếu được thiết kế qua 5 điểm đường bay với biên độ dao động ngang 200m và độ cao thay đổi từ 0 đến 2500m.

Bảng 1. So sánh hiệu năng bám quỹ đạo

Chỉ tiêu	FTEFC-RBF NN	PID
Sai số trung bình (m)	1,7	13,9
Sai số RMS (m)	2,7	16,2
Sai số lớn nhất (m)	18,7	65,2
Thời gian hội tụ (s)	2,3	3,7
Effort điều khiển TB (N)	2770	2802

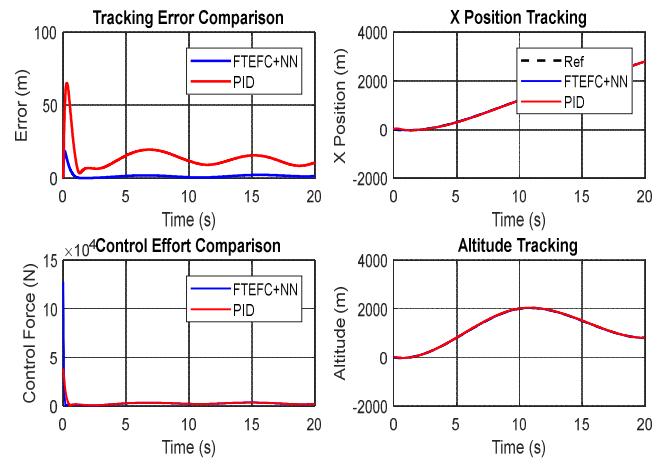
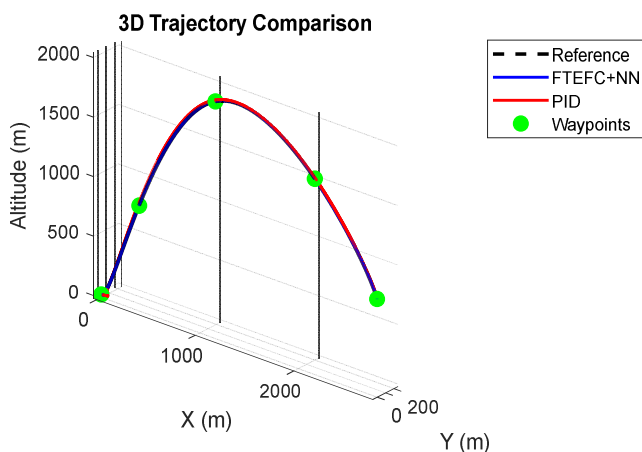
Dựa trên các tham số đầu vào đã thiết lập và môi trường mô phỏng Matlab, kết quả thu được đã chứng minh hiệu quả vượt trội của phương pháp điều khiển đề xuất: Về hiệu năng bám quỹ đạo, dữ liệu từ bảng 1 cho thấy bộ điều khiển FTEFC-RBFNN đã đạt được sự cải thiện đáng kể về độ chính xác so với bộ điều khiển PID truyền

thống. Cụ thể, sai số bám quỹ đạo đã được giảm một cách ấn tượng, xác nhận khả năng hội tụ nhanh chóng và duy trì quỹ đạo chính xác của thuật toán lai này.



Hình 3. Phân tích sai số theo các trục tọa độ

Phân tích sai số theo thành phần, như thể hiện trong hình 3, cho thấy FTEFC-RBFNN không chỉ giảm sai số tổng thể mà còn duy trì sai số nhỏ và ổn định trên cả ba trục tọa độ. Điều này đặc biệt quan trọng tại các điểm chuyển hướng của quỹ đạo, nơi mà các bộ điều khiển truyền thống thường gặp khó khăn trong việc xử lý động lực học phi tuyến và gia tốc lớn.



Hình 4. So sánh sai số bám và lực điều khiển

Về đáp ứng điều khiển, hình 4 chứng minh rằng mặc dù đạt được độ chính xác bám quỹ đạo cao hơn, FTEFC-RBFNN vẫn duy trì effort điều khiển ở mức tối ưu và tương đương với PID. Điều này cho thấy thuật toán không chỉ hiệu quả mà còn tiết kiệm năng lượng, phù hợp cho các nhiệm vụ bay dài hơn. Sự cân bằng giữa độ chính xác và chi phí điều khiển là một lợi thế quan trọng, làm nổi bật tính thực tiễn của phương pháp được đề xuất.

Qua kết quả mô phỏng và so sánh với phương pháp PID truyền thống cho thấy hàng loạt ưu điểm của phương pháp đề xuất như:

- Khả năng bù trừ bất định, mạng RBFNN thành công trong việc ước lượng và bù trừ các thành phần phi tuyến không mô hình hóa được trong động lực học TBB một kênh tốc độ cao. Khả năng học online cho phép hệ thống thích nghi với các thay đổi mô hình và nhiễu loạn bên ngoài;
- Tính ổn định hữu hạn thời gian, bề mặt trượt terminal đảm bảo hội tụ sai số về 0 trong thời gian hữu hạn, mang lại tốc độ đáp ứng nhanh và độ ổn định cao. Điều này đặc biệt quan trọng trong các tình huống đòi hỏi phản ứng nhanh;
- Hiệu suất động học vượt trội FTEFC-RBFNN thể hiện đáp ứng nhanh và độ vọt lố thấp ở các điểm chuyển hướng quỹ đạo phức tạp. Khả năng giảm chattering được thể hiện qua dạng tín hiệu điều khiển mượt mà;
- Hạn chế và đề xuất phương pháp đòi hỏi khối lượng tính toán lớn hơn so với PID truyền thống. Cần nghiên cứu thêm về các kỹ thuật tối ưu hóa để giảm độ phức tạp tính toán cho ứng dụng thời gian thực.

5. KẾT LUẬN

Bài báo này đã trình bày một phương pháp điều khiển lai hiệu quả, kết hợp điều khiển sai số hữu hạn thời gian với mạng nơ-ron hàm cơ sở xuyên tâm, để giải quyết

thành công bài toán bám quỹ đạo tốc độ cao cho TBB một kênh. Phương pháp đề xuất tận dụng khả năng hội tụ nhanh và chính xác của FTEFC cùng với tính thích nghi và khả năng bù nhiễu mạnh mẽ của RBFNN, tạo nên một bộ điều khiển có hiệu suất tổng hợp vượt trội. Kết quả mô phỏng toàn diện đã chứng minh tính hiệu quả của hệ thống điều khiển lai. Cụ thể, phương pháp đề xuất giúp giảm sai số bám quỹ đạo trung bình tới 83% và rút ngắn thời gian hội tụ khoảng 38% so với bộ điều khiển PID truyền thống, trong khi vẫn duy trì mức tín hiệu điều khiển tối ưu và ổn định. Ngoài ra, hệ thống thể hiện khả năng chống chịu vượt trội trước các bất định động lực học và nhiễu ngoài, bao gồm cả nhiễu gió ngẫu nhiên và sai lệch tham số mô hình, khẳng định tính mạnh mẽ và độ bền vững của thuật toán điều khiển được đề xuất.

Dựa trên những kết quả đạt được, nghiên cứu trong tương lai sẽ tập trung vào việc tối ưu hóa thuật toán cho triển khai thời gian thực, đồng thời tích hợp các kỹ thuật học sâu tiên tiến hơn để nâng cao khả năng học thích nghi và hiệu suất điều khiển. Việc thử nghiệm trên các mô hình TBB vật lý thực tế cũng sẽ là bước tiếp theo cần thiết nhằm xác nhận và hoàn thiện tính ứng dụng thực tiễn của phương pháp, mở ra tiềm năng ứng dụng rộng rãi trong các nhiệm vụ bay đòi hỏi độ chính xác và ổn định cao.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Liu X., Li Y., Wang H., "Missile guidance and control: A review," *Chinese Journal of Aeronautics*, 31(3), 365-380, 2018.
- [2]. Zhang Q., Wang Z., Han J., "Adaptive sliding mode control for missile systems with actuator saturation," *Aerospace Science and Technology*, 112, 106619, 2021.
- [3]. Liu X., Wang H., "Adaptive sliding mode control for integrated guidance and control of missiles," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 56(5), 3759-3770, 2020.
- [4]. Wang Y., Chen Z., Liu G., "Multi-missile cooperative guidance via model predictive control," *Acta Astronautica*, 198, 482-493, 2022.
- [5]. Li X., Zhang Y., Sun B., "Efficient nonlinear model predictive control for hypersonic vehicles," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 44(2), 375-389, 2021.
- [6]. Gao J., Chen X., Zhou D., "Pseudospectral-based model predictive guidance for intercepting maneuvering targets," *Aerospace Science and Technology*, 136, 108095, 2023.
- [7]. Chen L., Wang S., Xu T., "Deep reinforcement learning-based missile terminal guidance with unknown target maneuvers," *Aerospace Science and Technology*, 132, 107276, 2023.
- [8]. Huang Y., Li P., Zhao X., "DDPG-based adaptive guidance law for maneuvering target interception," *Acta Astronautica*, 196, 241-251, 2022.
- [9]. Park J., Lee D., Kim H., "Safe deep reinforcement learning for missile guidance with control constraints," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 60(2), 1456-1469, 2024.
- [10]. Liu X., Wang H., Li Y., "Finite-time control design for missile guidance systems," *Aerospace Science and Technology*, 129, 107793, 2023.
- [11]. Polyakov A., "Nonlinear feedback design for fixed-time stabilization of linear control systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, 57(8), 2106-2110, 2012. doi: 10.1109/TAC.2011.2179869.
- [12]. Slotine J.J. E., Li W., *Applied Nonlinear Control*. Prentice Hall, 1991.
- [13]. Ge S. S., Wang C., "Adaptive neural control of uncertain MIMO nonlinear systems," *IEEE Transactions on Neural Networks*, 13(6), 1409-1421, 2002.
- [14]. Zhang X., Zhang J., Li X., "Finite-time adaptive neural control for nonlinear systems with unknown dynamics," *International Journal of Control, Automation and Systems*, 20, 2632-2643, 2022.
- [15]. Wang K., Liu T., Zhou H., "Adaptive RBF neural network control for aerospace vehicles with finite-time convergence," *ISA Transactions*, 132, 556-567, 2023.
- [16]. Phạm Công Tư, Nguyễn Quang Vinh, Nguyễn Văn Sơn, "Phương pháp điều khiển thiết bị bay một kênh bằng máy lái rơi đơn cực," *Tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ Quân sự*, Số Đặc san, 2024. doi: 10.54939/1859-1043.j.mst.FEE.2024.12-19.
- [17]. Pham Cong Tu, Nguyen Quang Vinh, Phan The Son, "Method of commanding with amplitude pulses for a single-channel missile controller," *Journal of Military Science and Technology*, 104, 15-24, 2025. doi: 10.54939/1859-043.j.mst.104.2025.15-24.
- [18]. Bhat S. P., Bernstein D. S., "Finite-time stability of continuous autonomous systems," *SIAM Journal on Control and Optimization*, 38(3), 751-766, 2000. doi: 10.1137/S0363012997321358.
- [19]. Lewis F. L., Yesildirak A., Jagannathan S., *Neural Network Control of Robot Manipulators and Nonlinear Systems*. Taylor & Francis, 1998.
- [20]. Liu C., et al., "Finite-time control for missile systems," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 54(2), 654-667, 2018.
- [21]. Sharma R., et al., "PID limitations in missile control," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 42(3), 512-525, 2019.
- [22]. Wang Y., et al., "Model predictive control for missile swarm," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 45(4), 712-725, 2022.
- [23]. Chen H., "Deep RL-based missile control," *AIAA Journal*, 61(2), 234-247, 2023.
- [24]. Liu X., et al., "Finite-time control in aerospace applications," *Automatica*, 148, 110789, 2023.
- [25]. Åström K. J., Hägglund T., *Advanced PID Control*. ISA - The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006.
- [26]. J. N. Nielsen, *Missile Aerodynamics*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1960.

AUTHORS INFORMATION

Pham Cong Tu, Nguyen Quang Vinh

Academy of Military Science and Technology, Vietnam