

Thiết kế bộ điều khiển trượt thích nghi cho hệ thống an toàn thông tin

Adaptive sliding mode control for a secure communication system

Nguyễn Văn Lộc¹, Nguyễn Quang Địch¹, Giáp Văn Nam^{1*}

¹Đại học Bách khoa Hà Nội

* Corresponding author E-mail: nam.giapvan@hust.edu.vn

Abstract

This paper discusses the design of a sliding controller for secure communication of electronic circuits based on a master and slave chaos system. Firstly, we present a 3D model of the chaotic system. Secondly, we improve the mathematical models of the Master and Slave systems using the Takagi-Sugeno fuzzy system (T-S). Thirdly, we propose new algorithms for sliding control for signal assimilation of Master and Slave systems. Fourthly, we prove the stability of the control method. Fifth, the MATLAB simulation results confirm the proposed control theory to be completely accurate, and the synchronization process of chaotic systems is successfully tested through experiments related to electronic circuit communication. The Slave system states are precisely monitored states of the Master system.

Keywords: Sliding Mode Control, Takagi-Sugeno Fuzzy, Liu chaotic system.

Kí hiệu

Kí hiệu	Mô tả
A, B, C, D, E	Ma trận trạng thái không gian
u	Tín hiệu điều khiển
λ	Ma trận đường chéo

Viết tắt

T-S	Takagi-Sugeno
-----	---------------

Tóm tắt

Bài báo này thảo luận về việc thiết kế bộ điều khiển trượt để truyền thông an toàn các mạch điện tử dựa trên hệ thống hỗn loạn chủ và phụ. Đầu tiên, một mô hình hệ thống hỗn loạn 3D được biểu diễn. Thứ hai, các mô hình toán học của hệ thống chủ và phụ được cải tiến thành hệ mờ Takagi-Sugeno (T-S). Thứ ba, bài báo đưa ra một số thuật toán mới của điều khiển trượt cho việc đồng bộ hóa tín hiệu của hệ thống chủ và phụ. Thứ tư, việc ổn định của phương pháp điều khiển đã được chứng minh một cách hợp lý. Thứ năm, kết quả mô phỏng MATLAB xác nhận lý thuyết kiểm soát được đề xuất là hoàn toàn chính xác và quá trình đồng bộ hóa các hệ thống hỗn loạn được kiểm tra thành công thông qua các thí nghiệm liên quan đến giao tiếp mạch điện tử. Các trạng thái của hệ thống phụ là các trạng thái được theo dõi chính xác của hệ thống chủ.

1. Giới thiệu

Sự phát triển vượt bậc của khoa học kỹ thuật kèm theo các cuộc tấn công mạng ngày càng tinh vi hơn. Các hệ thống

bảo mật thông thường không đáp ứng được yêu cầu, vì vậy nhu cầu về bảo mật an toàn thông tin được quan tâm. Các công trình nghiên cứu biện pháp mới tăng cường độ tin cậy và an toàn của các hệ thống bảo mật thông tin là cần thiết. Trong đó việc áp dụng các đặc điểm của hệ thống hỗn loạn và hệ thống an toàn thông tin được chú trọng. Một hệ thống an toàn thông tin sử dụng hệ hỗn loạn bao gồm hệ thống chủ và hệ thống phụ. Các điều kiện ban đầu của hệ thống chủ và phụ là khác nhau điều này dẫn đến sự khác nhau giữa các trạng thái của hệ thống hỗn loạn khác nhau. Các trạng thái của hệ thống chủ và hệ thống phụ được sử dụng để mã hóa và giải mã dữ liệu nên hệ thống phụ cần được điều khiển đồng bộ với hệ thống chủ. Để đồng bộ tín hiệu giữa các hệ thống này, việc điều khiển phải được thực hiện chính xác. Trong những năm gần đây nhiều nghiên cứu áp dụng đồng bộ hóa hệ thống hỗn loạn đã được đề xuất. Hệ thống hỗn loạn được sử dụng trong bài báo này và khái niệm cơ bản về đồng bộ có thể tìm thấy trong [1]. Thực hiện mờ hóa T-S cho hệ hỗn loạn và đồng bộ hóa trên hai máy tính được kết nối và trên mạch điện tử có trong [2]. Hệ thống an toàn thông tin được thực hiện trên mạch điện tử và đạt được kết quả khả thi có thể tìm thấy trong [3]. Thực hiện điều khiển đồng bộ hệ hỗn loạn thứ tự phân số được thảo luận trong [4]. Các phương pháp điều khiển đồng bộ hóa thực nghiệm trên mạch điện tử có trong [5-6]. Điều khiển chế độ trượt cho hệ thống an toàn thông tin của mạch phân tử logic đã được thảo luận trong [7]. Truyền thông âm thanh an toàn của đồng bộ hệ hỗn loạn được thể hiện trong [8]. Một số phương pháp quan sát và loại bỏ nhiễu được thảo luận trong [9-10].

Bài báo sử dụng lại hệ thống Liu đã được sử dụng trong [1] và [6]. Thuật toán điều khiển được đề xuất bao gồm một bộ điều khiển chế độ trượt được tích hợp mới thuật toán thích nghi. Hệ thống hỗn loạn được viết lại dưới dạng mờ hóa T-S và chỉ được sử dụng cho việc thiết kế điều khiển chế độ trượt. Hệ thống chủ và phụ vẫn sử dụng ở dạng hệ thống Liu.

Điều khiển trượt là phương pháp điều khiển phi tuyến, gồm hai thành phần điều khiển đóng cắt đưa trạng thái của hệ thống tiến về mặt trượt và thành phần điều khiển tương đương giữ trạng thái hệ thống trên mặt trượt đã chọn [11-13]. Tính ổn định của bộ điều khiển tuân theo định luật Lyapunov [14].

Điều khiển thích nghi là một phương pháp điều khiển tự động trong đó các thông số điều khiển được điều chỉnh liên tục để đáp ứng các yêu cầu hoạt động thay đổi của hệ thống điều khiển [15]. Các thông số điều khiển này có thể là các hằng số hoặc các hàm chức năng. Phương pháp điều khiển thích nghi sử dụng các thuật toán tự động học hoặc các thuật toán giải tích để ước lượng và điều chỉnh các thông số điều khiển. Thuật toán học được dựa trên các mô hình toán học của hệ thống và các thông số được cập nhật liên tục bằng cách phân tích các tín hiệu đầu vào và đầu ra của hệ thống. Kết hợp điều khiển trượt với điều khiển thích nghi giúp hệ thống có thể đáp ứng nhanh hơn với các biến động của hệ thống và đạt được hiệu suất tốt hơn. Điều khiển trượt được sử dụng để thiết lập một mặt phẳng trượt đặc biệt để giảm độ lệch giữa trạng thái thực tế và trạng thái mục tiêu. Điều khiển thích nghi có thể được sử dụng để điều chỉnh các thông số điều khiển của thành phần gây ra hiện tượng rung dựa trên các tín hiệu đầu vào và đầu ra của hệ thống. Các thông số này sẽ được cập nhật liên tục để đảm bảo rằng hệ thống hoạt động tốt trong các điều kiện biến động và không chắc chắn.

Hệ mờ Takagi-Sugeno (T-S) được nghiên cứu lần đầu tiên vào năm 1985 [16] và được mô tả ngắn gọn bởi Tanaka và Wang [17]. Nghiên cứu của Tanaka và Wang giới thiệu một số phương pháp tìm kiếm mô hình mờ T-S bằng cách chuyển đổi mô hình toán học phi tuyến thành một kết hợp các hệ con tuyến tính và các hàm thành viên mờ. Mô hình mờ T-S đóng vai trò trong việc mô hình hóa phi tuyến thành các hệ con tuyến tính, và không làm mất tính tổng quát của các đặc tính của hệ thống gốc. Việc sử dụng các biến mờ và quy tắc mờ giúp mô hình hóa các quan hệ phức tạp giữa các đầu vào và đầu ra của hệ thống một cách chính xác hơn, đồng thời cũng giúp dễ dàng điều chỉnh các tham số và quy tắc để tối ưu hóa hiệu suất của hệ thống. Mô hình mờ T-S có thể được sử dụng để xây dựng một master và slave được đồng bộ hóa cho các hệ thống hỗn loạn trong các nghiên cứu [18-22]. Trong nghiên cứu này, mô hình toán học mờ T-S được sử dụng để thiết kế bộ điều khiển chế độ trượt.

Bộ điều khiển trượt mờ T-S có nhiều ưu điểm vượt trội hơn so với bộ điều khiển trượt thông thường khi được sử dụng để điều khiển các hệ thống không tuyến tính. Tính linh hoạt cao giúp bộ điều khiển trượt mờ T-S có thể tối ưu hóa hiệu suất của hệ thống thông qua việc điều chỉnh các tham số và quy tắc. Tính ổn định cao của bộ điều khiển trượt mờ T-S đảm bảo tính an toàn và độ tin cậy của hệ thống. Độ chính xác cao được đảm bảo nhờ việc sử dụng các biến mờ. Tính diễn giải cao giúp diễn giải và giải thích các quyết định của hệ thống một cách dễ dàng. Tính tương thích cao của bộ điều khiển trượt mờ T-S giúp tích hợp vào các hệ thống điều khiển tự động phức tạp một cách dễ dàng. Do đó, bộ điều khiển trượt mờ T-S là giải pháp hiệu quả cho các hệ thống không tuyến tính phức tạp.

Hệ thống bảo mật an toàn thông tin hoạt động dựa trên sự đồng bộ của hệ thống chủ và phụ. Tín hiệu sau khi được mã hóa bởi hệ thống chủ được gửi và giải mã bởi hệ thống phụ. Tín hiệu hỗn hợp được gửi công khai trên kênh công

cộng. Độ chính xác của tín hiệu sau khi giải mã phụ thuộc vào hiệu suất điều khiển đồng bộ hệ thống chủ và phụ.

Bài báo bao gồm các nội dung: Đầu tiên, giới thiệu chung về hệ thống, phương hướng nghiên cứu, phương pháp đề xuất. Thứ hai, mô hình toán học của hệ thống được viết dưới dạng mờ hóa T-S. Thứ ba, bộ điều khiển chế độ trượt được đề xuất, tính ổn định của hệ thống được kiểm nghiệm. Thứ tư, hiệu quả của các phương án đề xuất thông qua mô phỏng MATLAB và thực nghiệm truyền thông an toàn thông tin trên mạch điện tử được tiến hành. Cuối cùng, kết luận và đề xuất các phương hướng phát triển trong tương lai.

2. Mô hình toán học của hệ hỗn loạn 3D

2.1. Mô hình mờ T-S

$$\begin{cases} \dot{\xi} = g^m \{x, u\} \xi + h^m \{x, u\} u + d \\ \gamma = l^m \{x, u\} \xi \end{cases} \quad (1)$$

Với ξ là các vector biến trạng thái có n thành phần, ξ_j , $j = 1, 2, \dots, n$, $i = 1, 2, \dots, m$, m là số luật mờ. γ là vector đầu ra. g^m , h^m , and l^m là các hàm trơn. Với điều kiện $\xi_i(t) = [\xi_{\min}(t), \xi_{\max}(t)]$ hàm trọng lượng của các biến trạng thái được xác định như sau:

$$\begin{cases} \eta_0^j(\xi_j) = \frac{\xi_{\max}^j - \xi_j(\cdot)}{\xi_{\max}^j - \xi_{\min}^j} \\ \eta_1^j(\xi_j) = 1 - \eta_0^j \end{cases} \quad (2)$$

Khi đó hệ (1) được viết dưới dạng mờ hóa T-S như sau:

$$\begin{cases} \dot{\xi} = \sum_{i=1}^r \omega_i \{ \xi \} \{ (A_i \xi + \Delta A_i \xi) + (B_i u + \Delta B_i u) + D_i d \} \\ \gamma = C \xi \end{cases} \quad (3)$$

Trong đó, $\xi \in R^{n \times q}$, $u \in R^{m \times q}$ và $\gamma \in R^{p \times q}$ là các biến trạng thái hệ thống, đầu vào điều khiển và đầu ra tương ứng của hệ thống. d là nhiễu của hệ thống. $A_i \in R^{n \times q}$, $B_i \in R^{n \times m}$, $C \in R^{p \times n}$ là các ma trận trạng thái, ma trận đầu vào, đầu ra tương ứng. $D \in R^{n \times k}$ là ma trận của nhiễu hệ thống. $\Delta A_i \in R^{n \times q}$ giá trị thay đổi gần đúng của A_i , $\Delta B_i \in R^{n \times m}$ giá trị thay đổi gần đúng của B_i .

Với các điều kiện $|D_i d_j(t)| < \zeta_{dj}$, $|\Delta A_{ij}| \leq \zeta_{\Delta Aij}$, và $|\Delta B_{ij}| \leq \zeta_{\Delta Bij}$ phải được thỏa mãn. Với ζ_{dj} , $\zeta_{\Delta Aij}$, $\zeta_{\Delta Bij}$ xác định tích cực dương.

Những nhiễu loạn và giá trị không xác định được tổ hợp lại thành một biến $\Delta A_i x + \Delta B_i u + D_i d = E_i l$, với $E_i \in R^{3 \times 3}$ là một ma trận hằng xác định trước và $l = [l_1, l_2, \dots, l_j]^T$.

Phương trình (3) có thể viết lại dưới dạng sau:

$$\begin{cases} \dot{\xi} = \sum_{i=1}^r \omega_i \{ \xi \} \{ A_i \xi + B_i u + E_i L \} \\ \gamma = C \xi \end{cases} \quad (4)$$

Với ω_i là hàm thành viên mờ của hệ thống và được xác định:

$$\omega_i(\xi) = \prod_{j=1}^n \eta_{ij}(\xi_j) \quad (5)$$

2.2. Mô hình mờ T-S cho hệ hỗn loạn

Bài báo sử dụng hệ hỗn loạn Liu để thiết kế hệ thống an toàn thông tin. Hệ hỗn loạn Liu có mô hình toán học:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\alpha x_1 + \beta x_2 \\ \dot{x}_2 = -h x_1 x_3 \\ \dot{x}_3 = \sigma h x_1^2 + h x_1 x_2 - \rho / h \end{cases} \quad (7)$$

Trong đó x_1 , x_2 và x_3 là các biến trạng thái; α , β , σ , ρ , và h là các hằng số xác định của hệ thống. Với $\alpha=1$, $\beta=2$, $\sigma=1$, $\rho=3$, và $h=2$ thì hệ phương trình (6) rơi vào trạng thái hỗn loạn.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\alpha - \Delta\alpha & \beta + \Delta\beta & 0 \\ 0 & 0 & (-h - \Delta h)x_1 \\ (\sigma h + \Delta\sigma h)x_1 & (h + \Delta h)x_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\rho/h + \Delta\rho h \end{bmatrix} \quad (8)$$

Với $\omega_i(x_1) = \eta_i(x_1)$ Hệ thống (8) có thể viết lại dưới dạng mờ T-S như sau:

$$\begin{cases} \dot{\xi} = \sum_{i=1}^2 \omega_i \{ x_1 \} \{ (A_i \xi + \Delta A_i \xi + H) \} \\ \gamma = C \xi \end{cases} \quad (9)$$

Trong đó $\xi \in R^{3 \times 1}$ là các biến trạng thái hệ thống. x_1 giá trị thành viên của hệ thống mờ. $A_i \in R^{3 \times 3}$, $C \in R^{1 \times 3}$ là các ma trận gần đúng. $\Delta A_i \in R^{3 \times 3}$ là các ma trận không chắc chắn. H là vector hằng.

$$A_1 = \begin{bmatrix} -1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \\ -10 & -10 & 0 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} -1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & -10 \\ 10 & 10 & 0 \end{bmatrix}, \text{ và}$$

$$H = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -d/k \end{bmatrix}, \text{ hàm thành viên } \omega_1 = \frac{x_{1\max} - x}{x_{1\max} - x_{1\min}},$$

$$\omega_2 = 1 - \omega_1, x_{1\max} = 5, x_{1\min} = -5.$$

Để hệ thống (9) có thể hoạt động ổn định thì thành phần không chắc chắn của hệ thống phải thỏa mãn $|\Delta\alpha x_1 + \Delta\beta x_2| \leq l_{1\max}$, $|\Delta h x_1 x_3| \leq l_{2\max}$ và

$|\Delta\sigma h x_1^2 + \Delta\rho h| \leq l_{3\max}$, với $l_{1\max}$, $l_{2\max}$, và $l_{3\max}$ là những hằng số xác định dương.

Hệ thống chủ được biểu diễn dưới dạng:

$$\begin{cases} \dot{x}_{1m} = -(\Delta\alpha_m + \alpha)x_{1m} + (\Delta\beta_m + \beta)x_{2m} \\ \dot{x}_{2m} = -(\Delta h_{my} + h)x_{1m}x_{3m} \\ \dot{x}_{3m} = (\sigma h + \Delta\sigma h_m)x_{1m}^2 + (h + \Delta h_{x3m})x_{1m}x_{2m} \\ \quad - (\rho/h + \Delta\rho_m) \end{cases} \quad (10)$$

Với m là kí hiệu đại diện cho hệ thống chủ. $\Delta\alpha_m$, $\Delta\beta_m$, $\Delta\sigma_m$, Δh_m , $\Delta\rho h_m$, và $\Delta\rho_m$ là các giá trị thay đổi của các tham số hệ thống. Hệ thống chủ có thể viết lại dưới dạng mờ T-S như sau:

$$\begin{cases} \dot{\xi}_m = \sum_{i=1}^2 \omega_i(x_{1m}) [A_i \xi_m + H_m + E_i l_m] \\ \gamma_m = C \xi_m \end{cases} \quad (11)$$

Để hệ thống (11) có thể hoạt động ổn định thì thành phần không chắc chắn của hệ thống phải thỏa mãn $|\Delta\alpha_m x_{1m} + \Delta\beta_m x_{2m}| \leq l_{1m\max}$, $|\Delta h_m x_{1m} x_{3m}| \leq l_{2m\max}$

và $|\Delta\sigma_m h_m x_{1m}^2 + \Delta\rho h_m| \leq l_{3m\max}$, với $l_{1m\max}$, $l_{2m\max}$, và $l_{3m\max}$ là những hằng số xác định dương.

Hệ thống phụ được biểu diễn dưới dạng:

$$\begin{cases} \dot{x}_{1s} = -(\Delta\alpha_s + \alpha)x_{1s} + (\Delta\beta_s + \beta)x_{2s} + u_{sx1} + d_{sx1} \\ \dot{x}_{2s} = -(\Delta h_{x2s} + h)x_{1s}x_{3s} + u_{sx2} + d_{sx2} \\ \dot{x}_{3s} = (\sigma h + \Delta\sigma h_s)x_{1s}^2 + (h + \Delta h_{x3s})x_{1s}x_{2s} \\ \quad - (\rho/h + \Delta\rho_s) + u_{sx3} + d_{sx3} \end{cases} \quad (12)$$

Với s là kí hiệu đại diện cho hệ thống phụ. $\Delta\alpha_s$, $\Delta\beta_s$, $\Delta\sigma_s$, Δh_s , $\Delta\sigma h_s$, và $\Delta\rho_s$ là các giá trị thay đổi của các tham số hệ thống. d_{sx1} , d_{sx2} , và d_{sx3} ; u_{sx1} , u_{sx2} , và u_{sx3} lần lượt là các giá trị nhiễu loạn và giá trị điều khiển tương ứng với các biến trạng thái x_{1s} , x_{2s} , và x_{3s} ; Hệ thống phụ có thể viết lại dưới dạng mờ T-S như sau:

$$\begin{cases} \dot{\xi}_s = \sum_{i=1}^2 \omega_i(x_{1s}) [A_i \xi_s + B_i u_s + H_s + E_i l_s] \\ \gamma_s = C \xi_s \end{cases} \quad (13)$$

Để hệ thống (13) có thể hoạt động ổn định thì thành phần không chắc chắn của hệ thống phải thỏa mãn $|\Delta\alpha_s x_{1s} + \Delta\beta_s x_{2s}| \leq l_{1s\max}$, $|\Delta h_s x_{1s} x_{3s}| \leq l_{2s\max}$ và $|\Delta\sigma_s h_s x_{1s}^2 + \Delta\rho_h s| \leq l_{3s\max}$, với $l_{1s\max}$, $l_{2s\max}$, và $l_{3s\max}$ là những hằng số xác định dương.

3. Xây dựng bộ điều khiển

3.1. Điều khiển trượt cho hệ thống đồng bộ hóa

Sai số giữa hệ thống chủ và hệ thống phụ được xác định:

$$e = \xi_m - \xi_s \quad (14)$$

Hay:

$$\dot{s} = \sum_{i=1}^2 \omega_i \{x_{1m}\} \sum_{i=1}^2 \omega_i \{x_{1s}\} \{A_i [\xi_m - \xi_s] - B_i u_s + E_i l\} + \lambda e \quad (15)$$

Để đồng bộ hóa tín hiệu của hệ thống chủ và phụ một cách thích hợp, ta chọn điều khiển chế độ trượt với bề mặt chế độ trượt tích phân tỷ lệ như sau:

$$s = e + \lambda \int e \quad (16)$$

Hay

$$\dot{s} = \dot{e} + \lambda e \quad (17)$$

Với λ là ma trận đường chéo dương được xác định:

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix}, \text{ phương trình (16) được viết lại như sau:}$$

$$\dot{s} = \sum_{i=1}^2 \omega_i \{x_{1m}\} \sum_{i=1}^2 \omega_i \{x_{1s}\} \{A_i [\xi_m - \xi_s] - B_i u_s + E_i l\} + \lambda e \quad (18)$$

Với $\dot{s} = 0$, $E_i l = 0$ thành phần điều khiển tương đương của hệ thống được xác định:

$$u_{eqs} = B^{-1} \sum_{i=1}^2 \omega_i (x_{1m}) \sum_{i=1}^2 \omega_i (x_{1s}) \{A_i e + \lambda e\} \quad (19)$$

Thành phần điều khiển tương đương của mỗi trục là:

$$\begin{cases} u_{eqs1} = [1 & 0 & 0] \sum_{i=1}^2 \omega_i (x_{1m}) \sum_{i=1}^2 \omega_i (x_{1s}) [A_i e + \lambda e] \\ u_{eqs2} = [0 & 1 & 0] \sum_{i=1}^2 \omega_i (x_{1m}) \sum_{i=1}^2 \omega_i (x_{1s}) [A_i e + \lambda e] \\ u_{eqs3} = [0 & 0 & 1] \sum_{i=1}^2 \omega_i (x_{1m}) \sum_{i=1}^2 \omega_i (x_{1s}) [A_i e + \lambda e] \end{cases} \quad (20)$$

Thành phần điều khiển chuyển mạch được xác định theo bộ điều khiển relay:

$$\begin{cases} u_{sws1} = k_{u1} \times \text{sign}(s_1) \\ u_{sws2} = k_{u2} \times \text{sign}(s_2) \\ u_{sws3} = k_{u3} \times \text{sign}(s_3) \end{cases} \quad (21)$$

Để giảm ảnh hưởng của hiện tượng rung và nâng cao hiệu suất của quá trình điều khiển ta sử dụng bộ điều khiển thích nghi như sau:

$$\begin{cases} k_{u1} = k_1 \int_0^t |e_1(\tau)| d\tau \\ k_{u2} = k_2 \int_0^t |e_2(\tau)| d\tau \\ k_{u3} = k_3 \int_0^t |e_3(\tau)| d\tau \end{cases} \quad (22)$$

3.2. Đánh giá ổn định

Để xác định tính ổn định của bộ điều khiển chế độ trượt được đề xuất ta chọn hàm Lyapunov có dạng:

$$V(s) = \frac{1}{2} s_1^2 + \frac{1}{2} s_2^2 + \frac{1}{2} s_3^2 \quad (23)$$

Đạo hàm hai vế ta được:

$$\dot{V}(s) = s_1 \dot{s}_1 + s_2 \dot{s}_2 + s_3 \dot{s}_3 \quad (24)$$

Thay (20), (21), (22) vào (24), và biến đổi ta được:

$$\begin{aligned} \dot{V}(s) &= -s_1 k_1 \int_0^t |e_1| \text{sign}(s_1) - s_2 k_2 \int_0^t |e_2| \text{sign}(s_2) - s_3 k_3 \int_0^t |e_3| \text{sign}(s_3) \\ &= -k_1 |s_1| \int_0^t |e_1| - k_2 |s_2| \int_0^t |e_2| - k_3 |s_3| \int_0^t |e_3| \end{aligned} \quad (25)$$

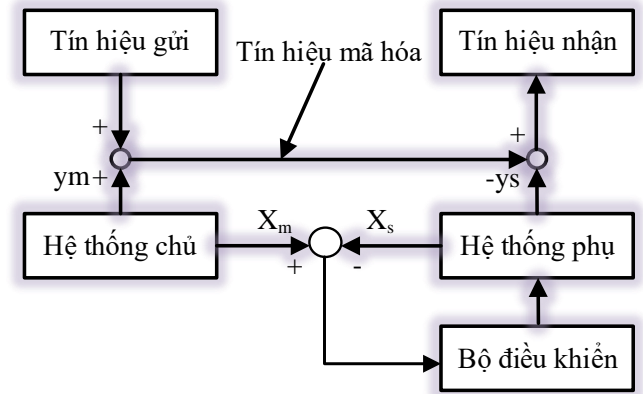
Với k_1, k_2 và k_3 là các hằng số xác định dương thì:

$$\dot{V}(s) < 0 \quad (26)$$

Vậy phương pháp được đề xuất ổn định theo Lyapunov.

4. Ví dụ minh họa

Cấu trúc của một hệ truyền thông an toàn thông tin được thể hiện như Hình 1 bên dưới.



Hình 1. Cấu trúc truyền thông an toàn thông tin.

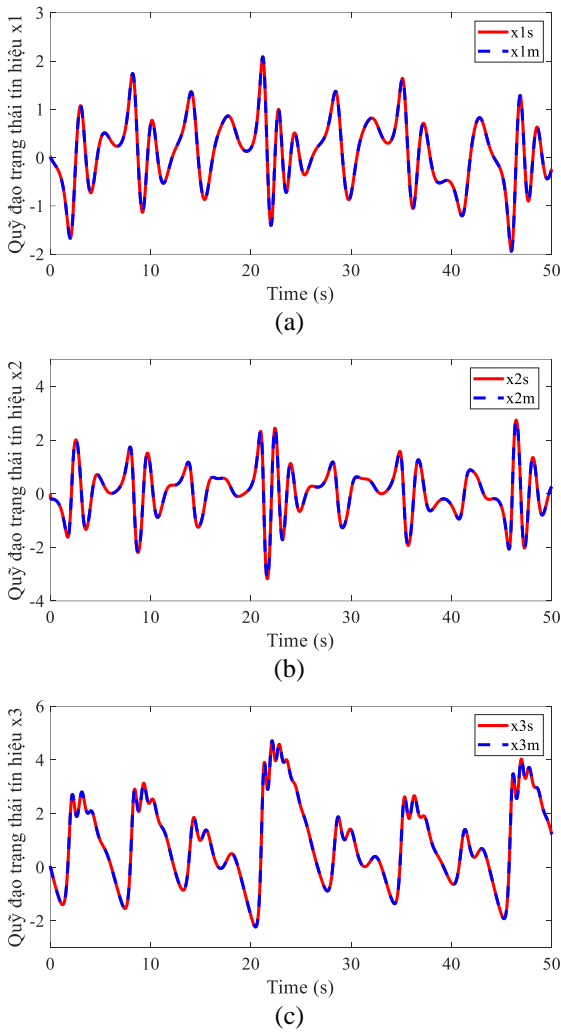
Phần này trình bày kết quả mô phỏng và thực nghiệm. Kịch bản mô phỏng được thực hiện trên phần mềm MATLAB Simulink trên máy tính cá nhân với Windows 11, RAM 12GB và chip Intel(R) Core(TM) i5-8250U CPU @ 1.60GHz 1.80 GHz. Để thực nghiệm quá trình đồng bộ hai hệ hỗn loạn trên mạch điện tử ta sử dụng hai vi mạch AD 633 JNZ và AD 711 JNZ kết hợp với điện trở loại 1/4W - 1% và các tụ để biểu diễn mô hình của hệ hỗn loạn và các phương pháp được đề xuất.

4.1. Matlab&Simulink

Thông số của quá trình mô phỏng trên MATLAB như sau: hệ số mặt trượt $\lambda_1 = 100$, $\lambda_2 = 100$, và $\lambda_3 = 100$. Hệ số của bộ điều khiển: $k_1 = 0.5$, $k_2 = 0.5$, và $k_3 = 0.5$.

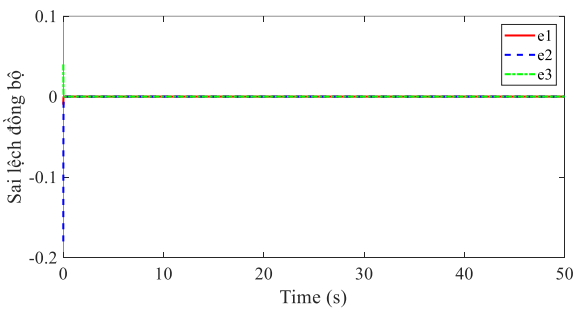
Các trạng thái ban đầu của hệ thống chủ và phụ: $\xi_m(0) = [0.01; -0.2; 0.03]$, $\xi_s(0) = [0.02; -0.02; -0.01]$.

Hiệu suất của quá trình đồng bộ hóa hệ thống chủ và phụ được thể hiện trong Hình 2 dưới đây.



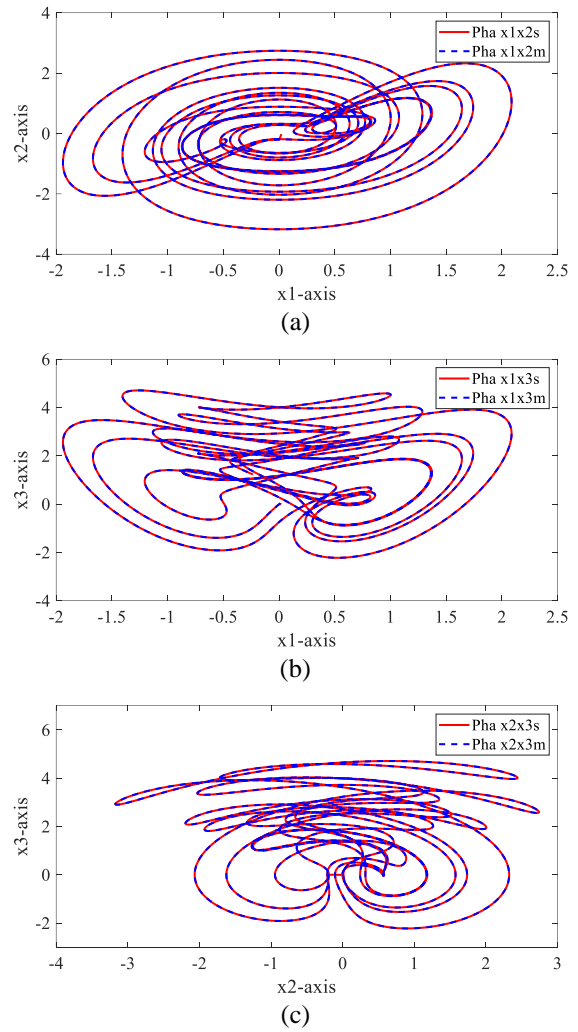
Hình 2. Quỹ đạo đồng bộ các tín hiệu: (a) tín hiệu x_1 ; (b) tín hiệu x_2 ; (c) tín hiệu x_3 .

Việc đồng bộ hóa đạt được chính xác và giá trị sai lệch theo dõi trên ba trục rất nhỏ. Các giá trị sai lệch được hiển thị trong Hình 3 dưới đây

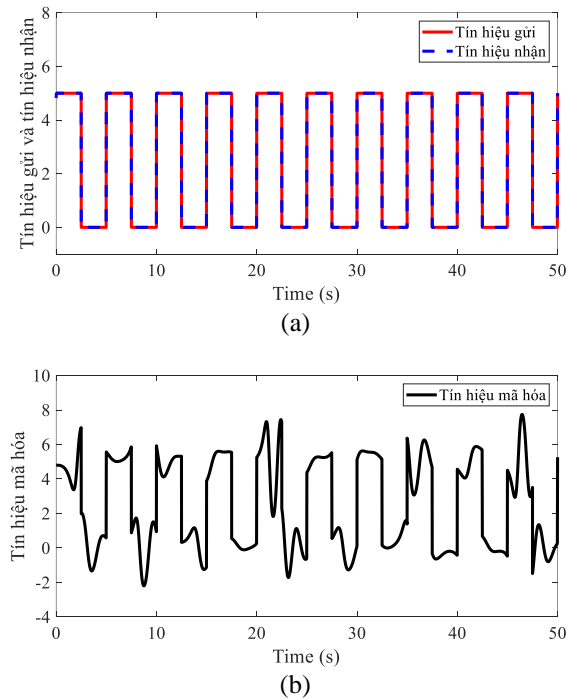


Hình 3. Sai số của hệ thống đồng bộ.

Thời gian ổn định của hệ thống đồng bộ trên các trục x_1 , x_2 và x_3 lần lượt là $T_{e1} < 6.41 \times 10^{-7}(s)$, $T_{e2} < 1.15 \times 10^{-5}(s)$, $T_{e3} < 3.9 \times 10^{-3}(s)$. Sai số theo dõi trong khoảng $e_1 \in [-10^{-2}; 6.4 \times 10^{-7}]$ (V), $e_2 \in [-1.8 \times 10^{-1}; 1.15 \times 10^{-5}]$ (V), $e_3 \in [-2.57 \times 10^{-6}; 4 \times 10^{-2}]$ (V), đối với đồng bộ hóa trên các trục x_1 , x_2 và x_3 . Các quỹ đạo pha của các hệ thống chủ và hệ thống phụ được hiển thị trong Hình 4 bên dưới.



Hình 4. Biểu đồ pha của hệ thống.



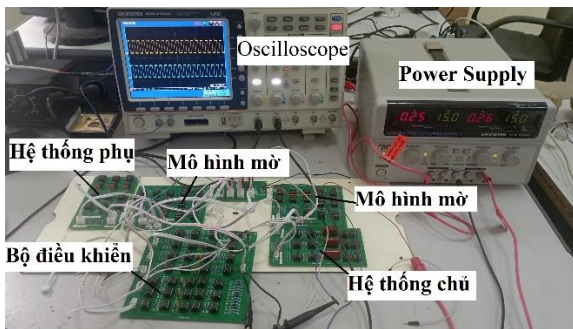
Hình 5. Kết quả mô phỏng truyền thông: (a) tín hiệu gửi và tín hiệu nhận; (b) tín hiệu mã hóa.

Tín hiệu gửi và tín hiệu nhận được là giống nhau ngay cả khi bị ảnh hưởng bởi nhiễu và khác hoàn toàn với tín hiệu mã hóa đảm bảo cho việc bảo mật thông tin. Các kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp điều khiển được đề xuất đáp ứng nhu cầu của quá trình đồng bộ hệ hỗn loạn và bảo mật thông tin.

4.2. Kết quả thực nghiệm

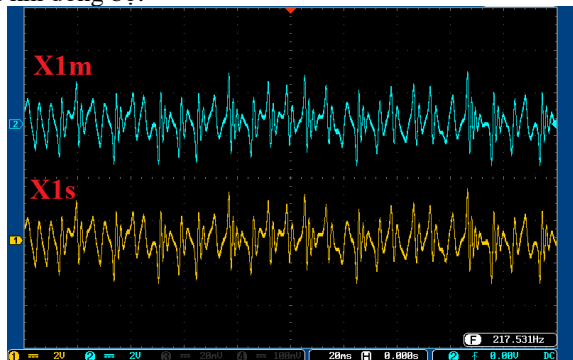
Để thực nghiệm quá trình đồng bộ hai hệ hỗn loạn trên mạch điện tử ta sử dụng hai vi mạch AD 633 JNZ và AD 711 JNZ kết hợp với điện trở loại 1/4W – 1% và các tụ gốm để biểu diễn mô hình của hệ hỗn loạn và các phương pháp được đề xuất. Các phép nhân và chia được thực hiện bằng vi mạch AD 633 JNZ, và phép cộng và trừ được thực hiện bằng vi mạch AD 711 JNZ. Điện áp điện thế thực nghiệm được cung cấp bởi thiết bị nguồn một chiều GWINSTEK GPS-2303. Thiết bị đo lường là máy điện sóng kỹ thuật số GWINSTEK GDS-2104A.

Các tham số của bộ điều khiển: Mặt trượt có hệ số $\lambda_1 = 10$, $\lambda_2 = 10$, và $\lambda_3 = 10$. Hệ số của bộ điều khiển thích nghi: $k_1 = 0.25$, $k_2 = 0.25$, và $k_3 = 0.25$. Các giá trị ban đầu được cài đặt theo giá trị điện trở và tụ điện. Sơ đồ thực nghiệm được bố trí như trong Hình 6 dưới đây:

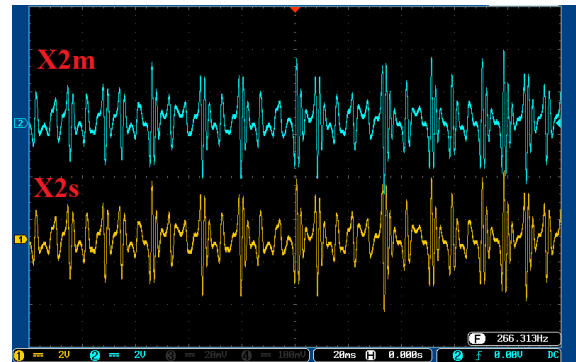


Hình 6. Sơ đồ thực nghiệm

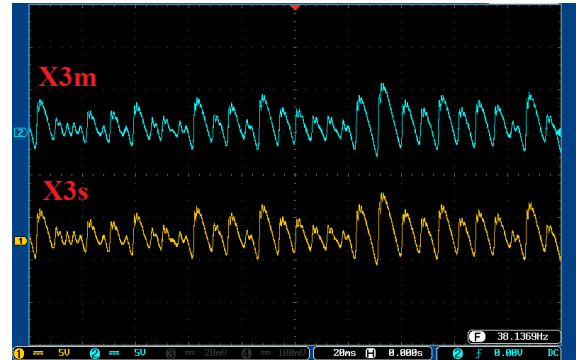
Các trạng thái của hệ thống phụ được đồng bộ gần với trạng thái của hệ thống chủ kết quả được thể hiện trong Hình 7. Các quỹ đạo pha của hệ thống thực nghiệm được thể hiện trong Hình 8. Kết quả thực nghiệm cho thấy quỹ đạo pha thu được khá tương tự với kết quả mô phỏng trên phần mềm MATLAB, hệ thống chủ và hệ thống phụ vẫn giữ ở trạng thái hỗn loạn sau khi đồng bộ.



(a)

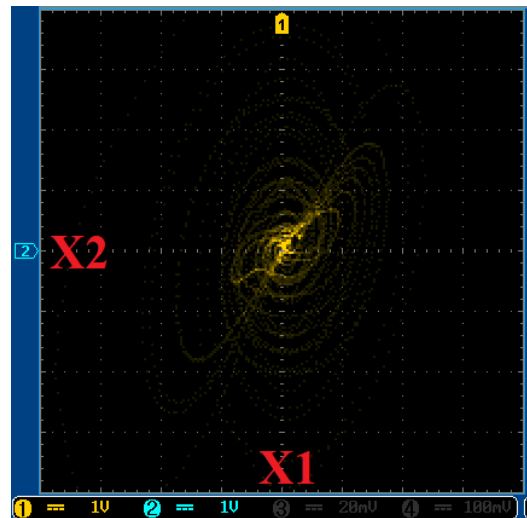


(b)

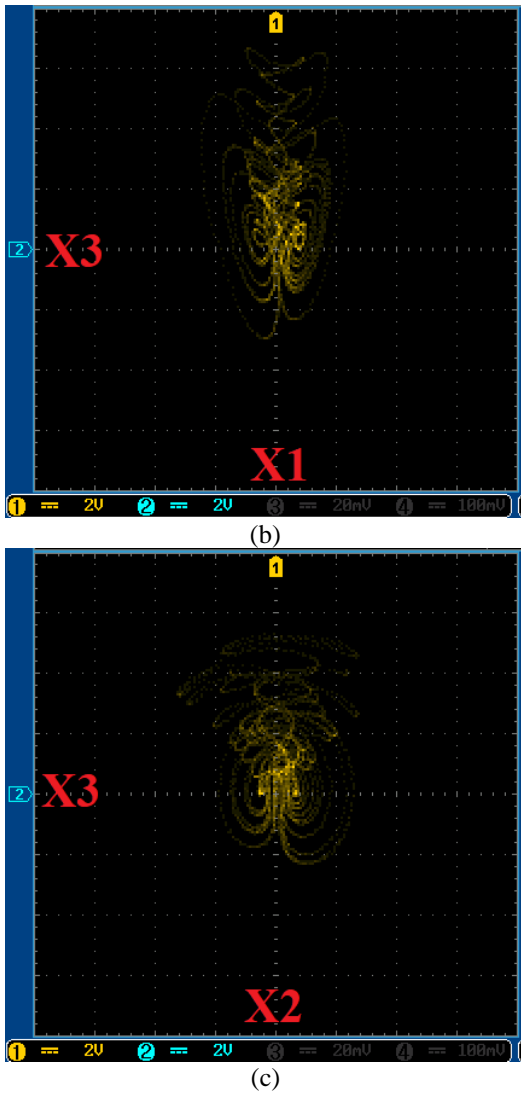


(c)

Hình 7. Quỹ đạo đồng bộ các tín hiệu: (a) tín hiệu x1; (b) tín hiệu x2; (c) tín hiệu x3.

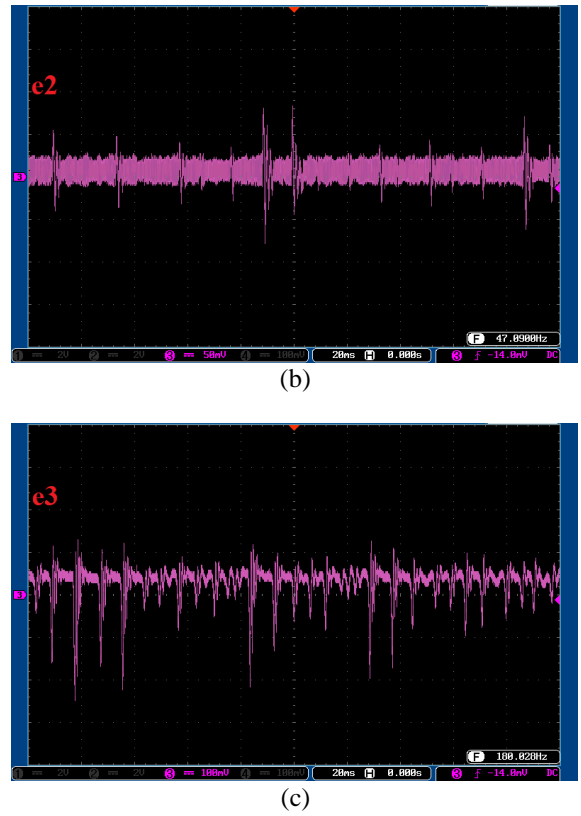


(a)

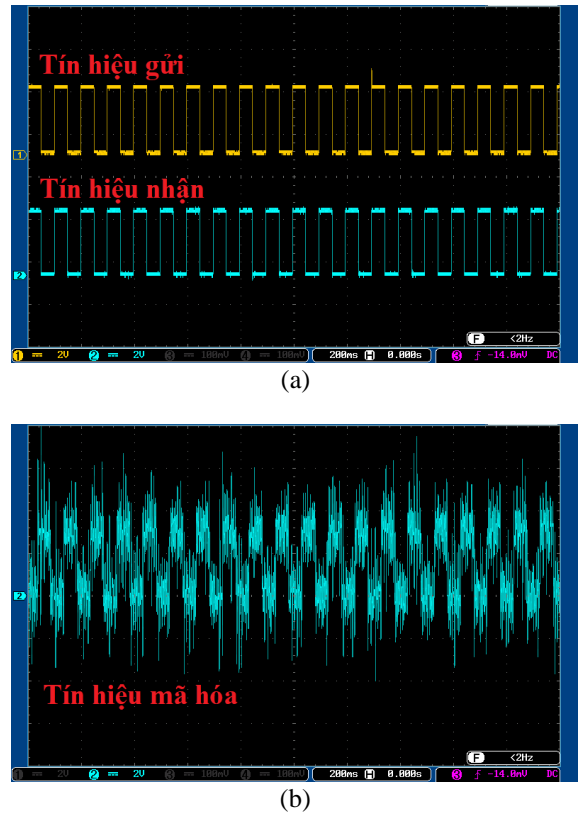


Hình 8. Quỹ đạo các pha.

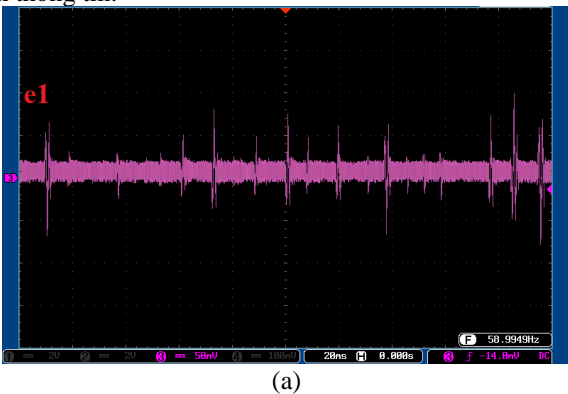
Sai số của quá trình đồng bộ nhỏ được thể hiện trong Hình 9, sai số theo dõi trong khoảng $e_1 \in [-80; 100]$ mV, $e_2 \in [-80; 84]$ mV, $e_3 \in [-250; 130]$ mV. Tín hiệu gửi và tín hiệu nhận được thể hiện như trong Hình 10. Tín hiệu được thử nghiệm là một tín hiệu sóng vuông được mã hóa bằng tín hiệu x_{2m} của hệ thống chủ và giả mã bằng tín hiệu x_{2s} của hệ thống phụ. Tín hiệu nhận được giống với tín hiệu nhận và khác biệt với tín hiệu mã hóa được gửi trên kênh công cộng đảm bảo rằng phương pháp đề xuất là tốt cho các hệ thống an toàn thông tin.



Hình 9. Sai số của quá trình đồng bộ



Hình 10. (a) Tín hiệu gửi; (b) tín hiệu mã hóa.



5. Kết luận

Bài báo đã đề xuất một thuật toán điều khiển mới cho hệ thống bảo mật an toàn thông tin. Bài toán kết hợp mô hình mờ T-S để thiết kế bộ điều khiển đồng bộ hóa hai hỗn loạn khác nhau hệ thống. Các thuật toán điều khiển đề xuất cho một hệ thống đồng bộ hóa cung cấp bảo mật cho dữ liệu hệ thống thông tin liên lạc. Các lý thuyết đề xuất đã được kiểm chứng bằng cách mô phỏng trong môi trường MATLAB và kết quả thực nghiệm trên mạch điện tử. Các kết quả thu được cho thấy sai số của trạng thái chủ và phụ các hệ thống trên các trục là nhỏ, bộ điều khiển trượt được thực hiện bởi mạch điện tử một cách hoàn hảo. Ngoài ra, dữ liệu đã mã hóa và gửi trên kênh công cộng bởi hệ thống chủ. Dữ liệu được khôi phục sau khi được giải mã là giống tín hiệu gửi. Dữ liệu được mã hóa rất khác so với dữ liệu đã gửi, xác nhận rằng hệ thống hỗn loạn đã thay đổi kích thước có thể sử dụng như một hệ thống thông tin liên lạc an toàn và các thuật toán điều khiển được đề xuất là tốt cho hệ thống đồng bộ hóa. Để nâng cao chất lượng của quá trình đồng bộ hệ thống phụ với hệ thống chủ ta có thể kết hợp một kỹ thuật chống rung để giảm thiểu ảnh hưởng của hiện tượng rung. Ngoài ra, có thể kết hợp mô hình mờ T-S với các phương pháp học sâu như mạng nơ-ron để tăng độ chính xác của hệ thống và giảm thiểu sai số. Bên cạnh đó, cũng cần tiếp tục phát triển và thử nghiệm các thuật toán trên nhiều môi trường khác nhau để đảm bảo tính ứng dụng thực tiễn của nghiên cứu.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại Học Bách Khoa Hà Nội (HUST) trong đề tài mã số T2022-TT-011

Tài liệu tham khảo

- [1] V. Nam Giap, S.-C. Huang, Q. Dich Nguyen, and T.-J. Su, "Disturbance observer-based linear matrix inequality for the synchronization of Takagi-Sugeno fuzzy chaotic systems," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 225805–225821, Dec. 2020.
- [2] V. N. Giap, Q. D. Nguyen, and S. C. Huang, "Synthetic adaptive fuzzy disturbance observer and sliding-mode control for chaos-based secure communication systems," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 23907–23928, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3056413.
- [3] Giap, V. N., Nguyen, Q. D., Trung, N. K., Huang, S. C., & Trinh, X. T. (2022). "Disturbance Observer Based on Terminal Sliding-Mode Control for a Secure Communication of Fractional-Order Takagi-Sugeno Fuzzy Chaotic Systems." In *International Conference on Advanced Mechanical Engineering, Automation and Sustainable Development* (pp. 936-941). Springer, Cham.
- [4] Q. D. Nguyen, V. N. Giap, D. -H. Pham and S. -C. Huang, "Fast Speed Convergent Stability of T-S Fuzzy Sliding-Mode Control and Disturbance Observer for a Secure Communication of Chaos-Based System," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 95781-95790, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3205027.
- [5] N. V. Giap, H. S. Vu, Q. D. Nguyen, and S.-C. Huang, "Disturbance and uncertainty rejection-based on fixed-time sliding-mode control for the secure communication of chaotic systems," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 133663–133685, 2021.
- [6] V.-N. Giap, S.-C. Huang, and Q. D. Nguyen, "Synchronization of 3D chaotic system based on sliding mode control: Electronic circuit implementation," in *Proc. IEEE Eurasia Conf. IoT, Commun. Eng. (ECICE)*, Yunlin, Taiwan, Oct. 2020, pp. 156–159, doi: 10.1109/ECICE50847.2020.9301998.
- [7] S. Çiçek, U. E. Kocamaz, and Y. Uyaroglu, "Secure communication with a chaotic system owning logic element," *AEU-Int. J. Electron. Commun.*, vol. 88, pp. 52–62, May 2018.
- [8] D. Chang, Z. Li, M. Wang, and Y. Zeng, "A novel digital programmable multi-scroll chaotic system and its application in FPGA-based audio secure communication," *AEU-Int. J. Electron. Commun.*, vol. 88, pp. 20–29, May 2018.
- [9] V. N. Giap, S.-C. Huang, Q. D. Nguyen, and T.-J. Su, "Robust control-based disturbance observer and optimal states feedback for T-S fuzzy systems," *J. Low Freq. Noise, Vib. Act. Control*, vol. 40, no. 3, Dec. 2020, Art. no. 1461348420981181.
- [10] Q. D. Nguyen, V. N. Giap, V. H. Tran, D. -H. Pham, and S. -C. Huang, "A Novel Disturbance Rejection Method Based on Robust Sliding Mode Control for a Secure Communication of Chaos-Based System," *Symmetry*, vol. 14, no. 8, 1668, 2022.
- [11] Phước, N.D.: Điều khiển trượt cơ bản và trượt bậc cao. Tạp chí Khoa học và Công nghệ. Đại học Thái nguyên. 4.2014. Tập 118, Số 4, tháng 4.2014, trang 3-13.
- [12] Drakunov S.V., Utkin V.I.. (1992). "Sliding mode control in dynamic systems". *International Journal of Control*. 55 (4): 1029–1037. doi:10.1080/00207179208934270.
- [13] Utkin, Vadim; Lee, Jason Hoon (July 2006), Chattering Problem in Sliding Mode Control Systems, vol. 10.1109/VSS.2006.1644542., pp. 346–350.
- [14] Lyapunov, A. M. (1992), *The general problem of the stability of motion*, translated by A. T. Fuller, London: Taylor & Francis, ISBN 978-0-7484-0062-1 Reviewed in detail by M. C. Smith: *Automatica* 1995 vol.3(2), pp. 353–356
- [15] Chengyu Cao, Lili Ma, Yunjun Xu (2012). "Adaptive Control Theory and Applications", *Journal of Control Science and Engineering*". 2012 (1): 1, 2. doi:10.1155/2012/827353.
- [16] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, vols. SMC-15, no. 1, pp. 116–132, Jan. 1985.
- [17] K. Tanaka and H. Wang, *Fuzzy Control Systems Design and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach*. New York, NY, USA: Wiley, 2001.
- [18] J. H. Kim, C. H. Hyun, E. Kim, and M. Park, "Adaptive synchronization of uncertain chaotic systems based on T-S fuzzy model," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 15, no. 3, pp. 69–359, Jun. 2007.
- [19] H. S. Kim, J. B. Park, and Y. H. Joo, "Fuzzy-model-based sampled-data chaotic synchronisation under the input constraints consideration," *IET Control Theory Appl.*, vol. 13, no. 2, pp. 288–296, Jan. 2019.
- [20] H. K. Lam, W. K. Ling, H. H. Lu, and S. S. Ling, "Synchronization of chaotic systems using time-delayed fuzzy state-feedback controller," *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers*, vol. 55, no. 3, pp. 893–903, May 2008.
- [21] Y. Zhao, B. Li, J. Qin, H. Gao, and H. R. Karimi, "H1 consensus and synchronization of nonlinear systems based on a novel fuzzy model," *IEEE Trans. Cybern.*, vol. 43, no. 6, pp. 2157–2169, Dec. 2013.
- [22] J.-H. Kim, C.-H. Hyun, E. Kim, and M. Park, "Adaptive synchronization of uncertain chaotic systems based on T-S fuzzy model," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 15, no. 3, pp. 359–369, Jun. 2007.