

MỘT SỐ GIẢI PHÁP NÂNG CAO TÍNH ỔN ĐỊNH CHO HỆ THỐNG LÁI TỰ ĐỘNG TÀU THỦY DƯỚI ẢNH HƯỞNG CỦA THỜI GIAN TRỄ VÀ NHIỀU KHÔNG XÁC ĐỊNH

TS. Đặng Xuân Kiên, Th.S. Trần Hoàng Dũng, Th.S. Lê Vinh Phan

Trường Đại học Giao thông vận tải TP Hồ Chí Minh

Tóm tắt: Nội dung bài báo nghiên cứu các giải pháp thiết kế hệ thống lái tự động tàu thủy với thời gian trễ điều khiển biến đổi không xác định dựa trên mô hình dự đoán Smith thích nghi kết hợp với bộ điều khiển bền vững. Mô hình dự đoán Smith thích nghi được thiết kế kết hợp giữa khối nhận dạng con tàu và khối ước lượng thời gian trễ điều khiển sử dụng mạng Neural thần kinh nhân tạo, cho thấy khả năng điều khiển thích nghi rất tốt dưới ảnh hưởng của thời gian trễ và nhiễu không xác định. Bên cạnh đó, cơ chế ước lượng thời gian trễ trong quá trình điều khiển sử dụng mạng neural giúp tăng hiệu suất bù thời gian trễ của hệ thống một cách đáng kể. Bộ điều khiển bền vững được tính toán thiết kế bằng cách áp dụng phương pháp vòng lặp bền vững McFarlane - Glover kết hợp giải các bất đẳng thức tuyến tính cho kết quả khả thi chứng tỏ tính chất bền vững của hệ thống. Kết quả mô phỏng trên Matlab chứng minh tính hiệu quả, tích cực và ưu điểm của mô hình đưa ra trong bài báo này.

Abstract: This paper is concerned with the design problem of Ship autopilot system induced unknown varying time-delay (RVTD) based on an adaptive Smith predictor which is compared with a robust controller. The adaptive Smith predictor model, which includes a ship recognition module and time-delay estimator based on artificial neural network, is designed to autopilot control under the effect of time-delay and disturbances. Beside that, the time-delay estimation scheme using neural network improves significantly the time-delay compensation performance of system. The robust controller has been designed by using the Linear Matrix Inequality (LMI) combine with H_{∞} loop shaping - McFarlane and Glover method that obtained the high control performance and robustness of system. In addition, the simulation results via Matlab demonstrate the usefulness and effectiveness of the proposed method.

Keywords: Adaptive autopilot, time-delay estimator, robust controller

1. Giới thiệu chung

Khảo sát các phương pháp điều khiển mờ thích nghi hệ thống lái tự động tàu thủy [1] khi hệ thống là phi tuyến và không xác định được đề cập trong [2], trong đó thuật toán mờ Takagi-Sugeno được áp dụng dưới mô hình điều khiển thích nghi. Cũng bằng phương pháp mờ thích nghi, bài toán điều khiển lái tự động tàu thủy bám theo hành trình xác định trước [3] đã được giải quyết khá triệt để, kết quả cho thấy hệ thống làm việc ổn định nhưng chưa đề cập tới ảnh hưởng của nhiễu trong quá trình hoạt động. Trong [4], việc sử dụng phương pháp điều khiển lái tự động ứng dụng mạng neural với nhiều phương pháp huấn luyện mạng kết hợp thuật toán dự đoán ảnh hưởng của tác động ngoại vi lên bánh lái có tính chất thích nghi cho thấy đáp ứng điều khiển hướng đi tương đối chính xác. Ngoài ra, thuật toán tối ưu di truyền sử dụng để tối ưu bộ điều khiển mạng

thần kinh nhân tạo đã được xem xét trong [5] cho thấy ưu điểm nổi bật của thuật toán di truyền là khả năng điều khiển thích nghi với đối tượng sau một thời gian huấn luyện giúp cho hệ thống có thể tăng khả năng thích nghi. Như vậy, thời gian gần đây các phương pháp điều khiển hiện đại đã được ứng dụng rất nhiều trong thiết kế hệ thống lái tự động tàu thủy, nhưng hầu hết các phương pháp trên đều chưa xem xét tính bền vững của hệ thống điều khiển khi mô hình tàu thủy có chứa các biến không xác định, không chắc chắn hoặc nhiễu tác động vào hệ thống phức tạp.

Trong bài báo này, các tác giả nâng cao và khắc phục nhược điểm của phương pháp thiết kế hệ thống lái sử dụng mô hình Smith kết hợp với bộ điều khiển bền vững trong [6] bằng cách đưa thêm bộ nhận dạng đối tượng sử dụng mạng neural vào mô hình Smith kết hợp với khối Neural ước lượng thời gian trễ điều khiển. Như vậy, mô hình Smith mới là

mô hình thích nghi hoàn toàn, nó giúp cho việc bù thời gian trễ và nhiều trở nên nhanh và chính xác hơn các phương pháp đã được đưa ra trước đây.

2. Đặt vấn đề

2.1. Mô hình động học tàu thủy

Theo [5,20] các ma trận trọng số A, B, C, D của hệ động học lái tàu thủy có giá trị như sau:

$$A = \begin{pmatrix} -0.895 & -0.286 & 0 \\ -4.367 & -0.918 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 0.108 \\ -0.918 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$C = (0 \ 0 \ 1), D = 0$$

Mục tiêu là tìm bộ điều khiển bền vững cho hệ thống để điều chỉnh hướng đi của con tàu theo hướng đặt trước, như vậy hệ thống phải đáp ứng một số yêu cầu và giới hạn sau:

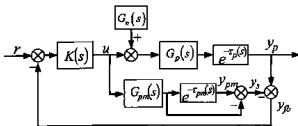
Không bị mất tín hiệu đáp ứng đầu ra của y trong suốt quá trình điều khiển.

Góc bẻ lái giới hạn: $|\dot{\mu}| \leq 35^\circ$

Tốc độ bẻ lái giới hạn: $|\ddot{\mu}| \leq 10^\circ / s$

2.2. Phân tích hệ thống lái tự động tàu thủy dựa trên mô hình dự đoán Smith

Con tàu là đối tượng điều khiển có quán tính lớn, thực tế trong quá trình điều khiển các đối tượng vật lý có quán tính lớn thì vấn đề xử lý thời gian trễ tương đối phức tạp, đặc biệt đối với những bộ điều khiển yêu cầu đáp ứng tín hiệu phản hồi nhanh. Ngoài ra khi đề cập đến ảnh hưởng của nhiễu ngoại vi lên bánh lái, các mô hình Smith thông thường sẽ không đáp ứng được chất lượng điều khiển yêu cầu.



Hình 1. Cấu trúc hệ thống lái tự động dựa trên mô hình dự đoán Smith.

Mô hình Smith được lựa chọn để bù thời gian trễ trong các hệ thống điều khiển tự động [6-10] yêu cầu độ chính xác cao. Xem xét hệ thống lái tàu thủy có cấu trúc như trong Hình 1, trong đó $G_p(s)$ là mô hình động học thực tế của tàu, $G_n(s)$ giả thiết là mô hình nhiễu tác động vào bánh lái, $\tau_p(s)$ là khoảng thời gian trễ sau khi tín hiệu điều khiển tác động vào bánh lái đến khi bộ điều khiển nhận được tín hiệu phản hồi góc lệch hướng đi. Bộ dự đoán Smith bao gồm mô hình mẫu $G_{pm}(s)$ và thời gian trễ mẫu $\tau_{pm}(s)$ được thêm vào cấu trúc của hệ thống. Từ đó ta tính toán hàm truyền của hệ thống trong H.1 như sau:

$$y_p = [G_p(s) + G_n(s)]e^{-\tau_p(s)}u(s) \quad (4)$$

$$y_{pm} = G_{pm}(s)e^{-\tau_{pm}(s)}u(s) \quad (5)$$

$$y_s = (G_{pm}(s)e^{-\tau_{pm}(s)} - G_{pm}(s))u(s) \quad (6)$$

$$y_{ps} = [(G_p(s) + G_n(s))e^{-\tau_p(s)} - G_{pm}(s)e^{-\tau_{pm}(s)} + G_{pm}(s)]u(s) \quad (7)$$

Giả sử ta có thể lựa chọn được các giá trị danh định bằng với các giá trị thực tế, tương ứng với 2 giả thiết sau:

Giả thiết 1: Mô hình danh định của đối tượng chọn chính xác với mô hình thực:

$$G_{pm}(s) = G_p(s) + G_n(s) \quad (8)$$

Giả thiết 2: Thời gian trễ danh định chọn chính xác với thời gian trễ thực:

$$\tau_{pm}(s) = \tau_p(s) \quad (9)$$

Như vậy, phương trình (7) tương đương:

$$y_{ps} = G_{pm}(s)u(s) \quad (10)$$

Từ đó, ta có phương trình hàm truyền của hệ kín như sau:

$$\frac{y_p(s)}{r(s)} = \frac{K(s)[G_p(s) + G_n(s)]e^{-\tau_p(s)}}{1 + K(s)G_{pm}(s)} \quad (11)$$

$$\Rightarrow \frac{y_{ps}(s)}{r(s)} = \frac{K(s)[G_p(s) + G_n(s)]}{1 + K(s)[G_p(s) + G_n(s)]}e^{-\tau_p(s)} \quad (12)$$

Rõ ràng ảnh hưởng của thời gian trễ đã bị đẩy ra khỏi vòng lặp kín đồng nghĩa với

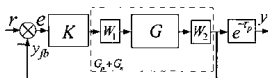
việc triệt tiêu hoàn toàn ảnh hưởng của thời gian trễ tới tính ổn định của hệ thống điều khiển. Có thể thấy rằng rất khó đạt được điều này bởi không thể xác định hoàn toàn chính xác mô hình và thời gian trễ danh định của đối tượng. Mô hình danh định có thể xác định được bằng thực nghiệm nhưng thời gian trễ và nhiều tác động vào đối tượng thì luôn biến đổi và không xác định, vì vậy tìm được thời gian trễ danh định và mô hình danh định là một thách thức đối với các nhà thiết kế hệ thống khi sử dụng mô hình dự báo Smith.

3. Tổng hợp bộ điều khiển bền vững

Chúng ta không bao giờ xác định được hoàn toàn các thông số của mô hình, và điều này sẽ gây ra rất nhiều vấn đề nghiêm trọng trong điều khiển với các mô hình dự đoán Smith có sử dụng mô hình danh định.

3.1. Mô hình rút gọn và tiêu chuẩn ổn định bền vững

Trở lại với bài toán ban đầu, từ phương trình (12), ta có thể xây dựng lại mô hình rút gọn như sau:



Hình 2. Cấu trúc rút gọn hệ thống lái tự động dựa trên mô hình dự đoán Smith.

Trong đó mô hình danh định của con tàu G kết hợp với hai hàm hình thức đại diện cho các thành phần không xác định của mô hình thật là W_1 và W_2 dưới dạng $G_p + G_n = W_1 G W_2$. Giải pháp để tìm ra bộ điều khiển bền vững cho hệ thống lái tự động tàu thủy dựa theo mô hình dự đoán Smith dưới hình thức tối ưu γ theo chuẩn H_∞ được xác định theo [6] như sau:

Định lý 3.1[6]: Xét mô hình hệ thống lái tự động có cấu trúc như trong Hình.1 đồng thời thỏa mãn Giả thiết 1 và Giả thiết 2 [6], tồn tại bộ điều khiển bền vững K nếu đáp ứng hệ bất đẳng thức tuyến tính sau:

$$\begin{bmatrix} K \\ I \end{bmatrix} (I + GK)^{-1} M^{-1} < \gamma \quad (13)$$

Nếu $\gamma > 1$, sẽ đồng thời tồn tại ma trận

xác định dương R được tính toán từ các bất đẳng thức:

$$R(A+LC) + (A+LC)^T R < 0 \quad (14)$$

$$\begin{pmatrix} AR + RA^T - \gamma BB^T & RC^T & -L \\ CR & -\gamma I & I \\ -L^T & I & -\gamma I \end{pmatrix} < 0 \quad (15)$$

Trong đó $L = -ZC^T$ nơi $Z \geq 0$ là giải pháp ổn định bởi phương trình Riccati (19) (Chứng minh theo định lý 3.2 [6]).

3.2. Phương pháp tổng hợp bộ điều khiển bền vững

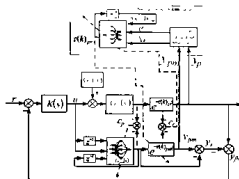
Việc tính toán thiết kế bộ điều khiển bền vững tuân theo các bước cơ bản sau:

Lựa chọn W_1 và W_2 theo giải pháp của Mc Farlane và Glover sao cho γ_{opt} đủ nhỏ và thỏa mãn bất đẳng thức (13).

Tính toán ma trận $R > 0$ và biến vô hướng γ bằng cách giải các bất đẳng thức (14), (15). Nếu các bất đẳng thức ma trận tuyến tính (14), (15) ta có $K_r = W_1 K W_2$.

Đưa các thông số thu được từ bộ điều khiển vào mô hình để kiểm tra tính ổn định và hiệu suất điều khiển.

4. Ước lượng thời gian trễ điều khiển sử dụng bộ điều khiển Neural nhân tạo



Hình 4. Mô hình dự đoán Smith với cơ chế ước lượng thời gian dùng bộ điều khiển Neural nhân tạo.

Trong Hình 4, bộ ước lượng thời gian trễ bao gồm 2 phần, mô đun tính online và ước lượng dùng mạng neural nhân tạo được trình bày trong [10].

5. Mô phỏng

5.1. Thiết lập thông số mô phỏng

Mô hình động học tàu thủy lựa chọn như phương trình (3). Đầu tiên ta tính toán

được biến vô hướng $\gamma_0 = 2.6207$, lựa chọn mức độ không xác định tương ứng 10%, khi đó $\gamma = 1.1\gamma_0 = 2.8828$. Từ đó tính được giá trị của ma trận trọng số R trong phương trình (25) như sau:

$$R = \begin{bmatrix} 0.6444 & -0.5835 & -0.4553 & 0.1578 \\ -0.1739 & 0.4307 & -0.3686 & 0.1123 \\ -0.0390 & -0.1105 & 0.7759 & 0.0215 \\ -0.0997 & -0.2418 & -0.1820 & 0.9482 \end{bmatrix}$$

Theo đó, bộ điều khiển bền vững được tính toán với $K = (A_c, B_c, C_c, D_c)$ tương ứng:

$$A_c = \begin{pmatrix} -8.888 & -36.154 & -42.319 & 0.260 \\ 2 & -18.22 & -25.67 & 0 \\ 0 & -3.74 & -6.68 & 0 \\ -3.396 & -16.678 & -17.91 & -0.874 \end{pmatrix}$$

$$B_c = \begin{pmatrix} -48.783 \\ -39.7027 \\ -10.3437 \\ -19.7095 \end{pmatrix}$$

$$C_c = (0.4245 \quad 0.9540 \quad 0.6466 \quad -0.3073)$$

$$D_c = 0$$

Mô hình thời gian trễ ngẫu nhiên [8]:

$$\tau_p(t) = 0.3 \sin(3 + 0.1t^2) \quad (23)$$

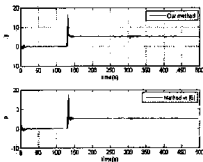
với t ngẫu nhiên trong khoảng (0-10).

Nhiều tác động vào hệ thống bao gồm sóng, gió, dòng chảy...lựa chọn mô hình nhiễu môi trường Pierson-Mostkovic [9]:

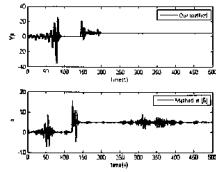
$$S(\omega) = \frac{4\pi^3 H_s^2}{(0.710T_0)^4 \omega^2} \exp\left(-\frac{16\pi^3}{(0.710T_0)^4 \omega^4}\right) \quad (24)$$

với $T_0 = 0.80s, H_s = 5.5mm, \omega$ là hàm ngẫu nhiên dao động thay đổi trong khoảng (0-10).

5.2. Kết quả mô phỏng

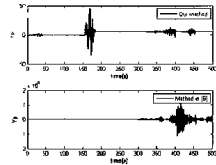


Hình 6. Đáp ứng hệ thống khi thời gian trễ nhỏ $t \in [0-5]$ với nhiễu nhỏ $\omega \in [0-1]$

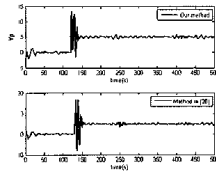


Hình 7. Đáp ứng hệ thống khi thời gian trễ trung bình $t \in [0-10]$ với nhiễu nhỏ $\omega \in [0-1]$.

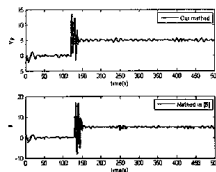
Trường hợp 1: Khi thời gian trễ nhỏ (Hình 6) và trường hợp thời gian trễ điều khiển lớn hơn (Hình 7) hệ thống giữ được ổn định sau một số chu kỳ đầu dao động.



Hình 8. Đáp ứng hệ thống khi thời gian trễ rất lớn $t \in [0-15]$ với nhiễu nhỏ $\omega \in [0-1]$.

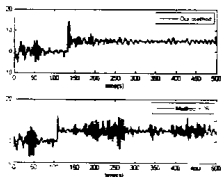


Hình 9. Đáp ứng hệ thống khi thời gian trễ nhỏ $t \in [0-5]$ với nhiễu trung bình $\omega \in [0-5]$.



Hình 10. Đáp ứng hệ thống khi thời gian trễ nhỏ $t \in [0-5]$ với nhiễu trung bình $\omega \in [0-10]$.

Trường hợp 2: Tăng dần ảnh hưởng của nhiễu lên hệ thống (Hình 9, Hình 10) ta thấy cả 2 phương pháp đều bị ảnh hưởng rõ rệt, tuy nhiên mô hình mới đưa ra bị ảnh hưởng ít hơn so với mô hình đưa ra trong [6].



Hình 11. Đáp ứng hệ thống khi thời gian trễ lớn $t \in [0-10]$ và nhiễu lớn $\omega \in [0-10]$.

Trường hợp 3: Khảo sát với trường hợp cả nhiễu tác động vào hệ thống lớn trong khi thời gian trễ của hệ thống cũng lớn (Hình 11) vẫn cho kết quả tốt hơn [6].

6. Kết luận

Phương pháp đưa ra giúp hệ thống lái tự động tàu thủy hoạt động khá ổn định và bền vững. Việc ứng dụng cơ chế ước lượng thời gian trễ điều khiển sử dụng mạng Neural trong thiết kế giúp tăng hiệu suất bù thời gian trễ của hệ thống một cách đáng kể nhưng chưa loại bỏ được hoàn toàn ảnh hưởng của nhiễu trong quá trình điều khiển. Hướng đi và giải thuật trong bài báo này là một hướng mở có thể tiếp tục nghiên cứu sâu rộng hơn nhằm thu được những kết quả khả quan hơn trong thời gian tới.

Tài liệu tham khảo:

[1] K.J. Astrom and C.G. Kallstrom, "Identification of Ship Dynamic," *Automatica*, Vol.12, pp.9-222, Pergamon Press, 1976. Printed in Great Britain.

[2] Y.S. Yang and C.J. Zhou, "Adaptive Fuzzy Control of Ship Autopilots with Uncertain Nonlinear Systems," Proc. 2004 IEEE, Conference on Cybernetics and Intelligent Systems, Singapore, pp. 1323-1328, December. 2004.

[3] Velagic, Z. Vukic and E. Omerdic, "Adaptive fuzzy ship autopilot for track-keeping," *Control Engineering Practice*, Vol 2, pp.433-443, Elsevier, 2002.

[4] V. Nicolau, V. Palade, D. Aiordachioaic and C. Miholca, "Neural Network Prediction of the Roll Motion of a Ship for Intelligent Course Control," *Lecture notes in control and information Science*, Springer-Verlag, Berlin, 1989.

[5] W.Y. Feng, Y. Li and G. Chong, "Tractable Neurocontroller Design and Application to Ship Control with Actuator Limits," *IFSA World congress and 20th NAFIDS International conference*, Vol.3, pp.1282-1287, July. 2001.

[6] X. K. Dang, H. D. Tran, D. C. Quach, "Robust Controller Design for Ship Autopilot with Unknown Time-delay," Proc. Viet Nam conference on Control and Automation 2011, Hanoi, Nov, 2011.

[7] K. Glover, J. Sefton and D.C. McFarlane, "A tutorial on loop shaping using H-infinity robust stabilisation," *Trans. Institute of Measurement and Control*, Vol. 14, No. 3. pp.157-168, 1992.

[8] S. Shaltaf, M. Abdallah, "An Enhanced Technique for Online Discrete Cosine Transform Based-Time Varying Delay Estimation," *Circuits Systems Signal Processing*, Vol. 19, No. 6, pp.501-515, 2000.

[9] M. Tomera, "Nonlinear Controller Design of a Ship Autopilot," *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.*, Vol. 20, No. 2, pp.271-280, 2010.

[10] X. K. Dang, H. D. Tran, D. C. Quach, "Ship Autopilot Design Based on Adaptive Smith Predictor Under the Effect of Uncertain Time-delay and Disturbances," Proc. The 6th Vietnam Conference on Mechatronics, Hanoi, Dec. 2012.

[11] X. K. Dang, Z. H. Guan, H. D. Tran and T. Li, "Fuzzy Adaptive Control of Networked Control System with Unknown Time-delay," Proc. The 30th Chinese Control Conference, Yantai, China, Jul. 2011

Ngày nhận bài: 02/11 năm 2013

Ngày chấp nhận đăng: 10/11/2013

Phản biện: TS. Võ công Phương