

NGHIÊN CỨU GIẢM LẮC ĐỌC TÀU THỦY ỨNG DỤNG PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN TOÀN PHƯƠNG TUYẾN TÍNH BẬC HAI

RESEARCH ON PITCH STABILIZATION OF THE VESSEL BASE ON LINEAR QUADRATIC REGULAR CONTROL

NGUYỄN QUANG DUY*, LÊ ĐỨC BÌNH

Khoa Hàng hải, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: nguyenquangduy@vimaru.edu.vn

Tóm tắt

Trong quá trình tàu thuyền hành trình trên biển, dao động lắc dọc của tàu sẽ ảnh hưởng lớn đến sự an toàn của con tàu và hàng hóa cũng như sức khỏe của thủy thủ đoàn. Để giảm thiểu tới mức tối đa ảnh hưởng của chuyển động lắc dọc lên con tàu. Trong bài báo này một phương pháp điều khiển mới để giảm chuyển động lắc dọc của tàu được đề xuất dựa trên phương pháp điều khiển toàn phương tuyến tính bậc hai. Một mô hình toán học chuyển động lắc dọc của tàu được đưa ra có xem xét tới các nhiễu tác động lên hệ thống là cơ sở để thiết kế bộ điều khiển, trạng thái của hệ thống được ước tính bằng bộ lọc Kalman, sau đó hệ thống được điều khiển bằng phương pháp điều khiển tối ưu toàn phương tuyến tính Linear Quadratic Gaussian (LQG). Sau cùng, kết quả mô phỏng sử dụng phần mềm Matlab cho thấy rằng việc sử dụng phương pháp điều khiển LQG để đạt được khả năng giảm lắc dọc của tàu là khả thi, kết quả cho thấy hiệu quả của phương pháp điều khiển được đưa ra và bộ điều khiển hệ thống được thiết kế.

Từ khóa: Mô hình hệ thống lắc dọc, điều khiển tối ưu, bộ lọc Kalman.

Abstract

When ships are sailing on the sea, pitch motion will greatly reduce the safety of ships and cargo, as well as the health of the crew. To reduce the effect of pitch motion of the ship. In this paper, a new control method to reduce the ship's pitch motion is proposed based on the quadratic linear control method. A mathematical model of the ship's pitch motion is given considering the disturbances acting on the system as the basis for the controller design. The state of the system is estimated by Kalman filter, and then the system is controlled by the optimal control method. Finally, the simulation results using Matlab software show

that using the LQG control method to achieve the ability to reduce the ship's pitch motion is feasible, the results show the effectiveness of the given control method and the system controller is designed.

Keywords: Pitch motion system model, optimal control, Kalman filter.

1. Mở đầu

Lắc dọc là một trong sáu bậc dao động tự do của tàu, bao gồm chuyển động quay, chuyển động ngang, chuyển động tiến lùi, lắc ngang, dập dềnh, và lắc dọc, trong đó chuyển động lắc dọc có tác động tiêu cực lớn đến sự ổn định và an toàn của tàu. Do tác động của chuyển động lắc dọc, hiệu quả khai thác của con tàu bị giảm đi đáng kể, sự an toàn của thuyền viên làm việc trên tàu, an toàn của hàng hóa và của con tàu bị đe dọa nghiêm trọng. Do đó, nghiên cứu giảm lắc dọc của tàu là một nhiệm vụ quan trọng và là hướng nghiên cứu được các nhà nghiên cứu đặc biệt quan tâm.

Chuyển động lắc dọc của con tàu chủ yếu là do sự tác động của sóng ngẫu nhiên, dưới tác dụng của sóng ngẫu nhiên và hệ động lực làm cho con tàu chuyển động trên các hướng khác nhau, trong phạm vi của nghiên cứu này, nhóm tác giả xem xét nghiên cứu chuyển động của tàu với các dao động lắc dọc kết hợp với chuyển động dập dềnh (chuyển động lên xuống) của con tàu. Trong quá trình vận hành tàu, chuyển động lắc dọc gây ra sự ảnh hưởng lớn tới sức khỏe của thuyền viên, sự an toàn của con tàu và hàng hóa, làm giảm đáng kể hiệu quả khai thác cũng như an toàn của con tàu. Do tính chất quan trọng của việc giảm lắc dọc tàu thủy, tới nay đã có nhiều công trình nghiên cứu được đưa ra để giảm chuyển động lắc dọc cho con tàu bao gồm cả các công trình nghiên cứu lý thuyết và thực tế sử dụng các phương pháp điều khiển khác nhau.

Trong bài báo này, một bộ điều khiển tối ưu toàn phương tuyến tính LQG được áp dụng cho hệ thống lắc dọc tuyến tính của tàu thủy. Phương pháp LQG

luôn là lựa chọn hàng đầu để điều khiển một hệ thống tuyến tính giúp mang lại hiệu quả điều khiển và ổn định cao. Với việc bản thân bộ điều khiển LQG là sự kết hợp của bộ điều khiển toàn phương tuyến tính bậc hai với bộ lọc Kalman dự đoán trạng thái của hệ thống, giúp mang lại hiệu quả điều khiển cao, đặc biệt với những hệ thống chịu ảnh hưởng của nhiễu ngoài tác động và cả nhiễu nội của hệ thống, mà mô hình chuyển động lắc dọc tàu thủy là một ví dụ điển hình. Mô hình chuyển động lắc dọc tàu thuyền có tính đến ảnh hưởng của nhiễu bên ngoài là sóng ngẫu nhiên, và nhiễu hệ thống là nhiễu trắng, giúp cho nghiên cứu có tính thực tiễn cao. Với bộ điều khiển LQG, bộ lọc Kalman được sử dụng để dự đoán trạng thái mô hình, một hàm tối ưu được đưa ra làm cơ sở thiết kế luật điều khiển tối ưu của hệ thống. Sau cùng, kết quả mô phỏng được đưa ra để chứng minh tính hiệu quả của bộ điều khiển được nghiên cứu.

Bố cục bài báo được sắp xếp như sau: Bộ lọc Kalman nhiễu màu ngẫu nhiên được đưa ra trong phần 2, mô hình sóng ngẫu nhiên và thiết kế bộ điều khiển LQG được nghiên cứu trong phần 3 và phần 4 là kết luận của bài báo.

2. Bộ lọc Kalman nhiễu màu ngẫu nhiên

Các lực và mô men tác động vào con tàu gây ra các chuyển động lắc đứng và lắc dọc bao gồm lực nổi của bản thân con tàu, lực nâng và mô men được tạo ra trong quá trình tàu hành hải, chuyển hướng và các lực tác động do ảnh hưởng của nhiễu. Để làm giảm các tác động do chuyển động lắc dọc và lắc đứng gây ra, trong nghiên cứu này sử dụng hệ thống vây giảm lắc chủ động có dạng cánh gấp kiểu T-foil và Flap. Mô hình toán học mô tả chuyển động lắc dọc và lắc đứng của tàu được đưa ra như sau [1]:

$$\begin{aligned} & (m + a_{33})\ddot{x}_3 + b_{33}\dot{x}_3 + c_{33}x_3 + a_{35}\ddot{x}_5 + b_{35}\dot{x}_5 + c_{35}x_5 \\ & = F_{T-foil} + F_{Flap} + F_{wave} \\ & (I_{55} + a_{55})\ddot{x}_5 + b_{55}\dot{x}_5 + c_{55}x_5 + a_{53}\ddot{x}_3 + b_{53}\dot{x}_3 + c_{53}x_3 \\ & = M_{T-foil} + M_{Flap} + M_{wave} \end{aligned} \quad (1)$$

Trong đó: m là lượng giãn nước của tàu, I_{55} là mô men nội gây ra theo trục dọc tàu, a_{33} , a_{55} là khối lượng và mô men tăng thêm, a_{35} , a_{53} , b_{35} , b_{53} , c_{35} , c_{53} là các hệ số, là các biến trạng thái của hệ thống, F_{T-foil} , M_{T-foil} , F_{Flap} , M_{Flap} là lực và mô men gây ra bởi các thiết bị giảm lắc của tàu.

Phương trình trạng thái chuyển động lắc dọc của một con tàu được viết lại dưới dạng như sau [2, 3]:

$$\dot{x} = Ax + Bu + Cw_f$$

$$y = Hx + v \quad (2)$$

Trong đó $x = [x_3 \dot{x}_3 \ x_5 \dot{x}_5]^T$, $u = [\alpha_1 \ \alpha_2]^T$ tín hiệu đầu vào của hệ thống, w_f là nhiễu ngoài do sóng ngẫu nhiên gây ra. Chọn x_3 và x_5 là hai biến trạng thái của hệ thống, x_3 biểu thị trạng thái lắc đứng của con tàu, trong khi x_5 biểu thị trạng thái lắc dọc của con tàu. Lực và mô men giảm lắc được tạo ra bởi cơ cấu giảm lắc chủ động của con tàu có dạng F_{T-foil} , M_{T-foil} , F_{Flap} , M_{Flap} và được xác định như sau:

$$F_{T-foil} = \frac{1}{2} \delta A \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} V^2 \alpha_2, \quad M_{T-foil} = F_{T-foil} l_{T-foil}$$

$$F_{Flap} = \frac{1}{2} C_{L1} \delta V^2 S \alpha_1, \quad M_{Flap} = F_{Flap} l_{Flap}$$

Với δ là tỷ trọng nước biển, A là diện tích của vây giảm lắc dạng T-foil, S là diện tích của vây dạng Flap, C_L , C_{L1} là hệ số nâng của vây dạng T-foil và Flap tương ứng, V là vận tốc của tàu, α_1 , α_2 , l_{T-foil} , l_{Flap} là góc vây và cánh tay đòn lực nâng của vây T-foil và Flap tương ứng.

A, B, C là các ma trận hệ số của hệ thống và được đưa ra như sau [1]:

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} -A_0^{-1}B_0 & -A_0^{-1}C_0 \\ I_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} \end{bmatrix}, \quad A_0 = \begin{bmatrix} m + a_{33} & a_{35} \\ a_{53} & I_{55} + a_{55} \end{bmatrix} \\ C &= \begin{bmatrix} -A_0^{-1} \\ 0_{2 \times 2} \end{bmatrix}, \quad B_0 = \begin{bmatrix} b_{33} & b_{35} \\ b_{53} & b_{55} \end{bmatrix}, \quad C_0 = \begin{bmatrix} c_{33} & c_{35} \\ c_{53} & c_{55} \end{bmatrix} \\ B &= \begin{bmatrix} -A_0^{-1} \\ 0_{2 \times 2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} C_{L1} \delta V^2 S & \frac{1}{2} \delta A \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} V^2 \\ \frac{1}{2} C_{L1} \delta V^2 S \times l_{Flap} & \frac{1}{2} \delta A \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} V^2 \times l_{T-foil} \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

v là nhiễu nội của hệ thống, thông thường có thể coi là nhiễu trắng thông thường, ma trận phương sai của nó có thể được đưa ra như sau:

$$Q = \text{diag}[20.3 \times 10^{-4} \ 2.26 \times 10^{-6}]$$

Dựa trên lý thuyết ánh xạ, có thể thu được ma trận nhiễu ngoài do sóng biển tác động w_f và ma trận phương sai tương ứng là:

$$Q = \text{diag}[0,037 \times 10^{14} \ 3,576 \times 10^{14}]$$

Dựa vào phương pháp rời rạc hóa phương trình

không gian trạng thái liên tục, đặt: $\Phi = e^{AT_s}$,

$$G = \int_0^{T_s} e^{A(T_s-t)} B dt, \quad \Gamma = \int_0^{T_s} e^{A(T_s-t)} C dt,$$

Chọn khoảng thời gian rời rạc $T_s = 0,1s$ Kết hợp công thức (1) và (2) ta được phương trình không gian trạng thái sau:

$$x(k+1) = \Phi x(k) + Gu(k) + \Gamma w_f(k) \quad (3)$$

$$y(k+1) = Hx(k+1) + v(k+1) \quad (4)$$

Tới đây, theo nguyên tắc phân tách, tạm thời không xét đến ảnh hưởng của $u(k)$, nghiên cứu ước lượng trạng thái $x(k)$ của phương trình rời rạc (3) dưới tác dụng của nhiễu ngoài $w_f(k)$ thông qua bộ lọc Kalman ta có công thức như sau [4].

$$\hat{x}(k+1) = [\Phi - K_{stb} H \Phi] \hat{x}(k) + K_{stb} y(k+1) \quad (5)$$

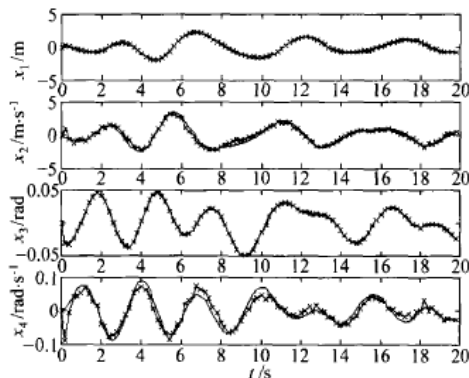
Trong đó: K_{stb} là ma trận độ lợi của bộ lọc Kalman ở trạng thái ổn định, thu được bằng phương trình đệ quy sau:

$$M = \Phi P \Phi^T + \Gamma Q_{ff} \Gamma^T \quad (6)$$

$$K_{stb} = M H^T [H M H^T + Q_w]^{-1} \quad (7)$$

$$P = [I - K_{stb} H] M \quad (8)$$

Trong đó: P là ma trận ước lượng trạng thái ổn định có giá trị ban đầu là $P_0 = I \times 10^4$, M là ma trận lỗi ước tính trước một bước dự báo trạng thái ổn định ban đầu.



Hình 1. Ước lượng trạng thái hệ thống

Kết quả mô phỏng của bộ lọc được chỉ ra bằng cách so sánh phương trình (3) và phương trình (5). Kết quả mô phỏng đạt được như thể hiện trên Hình 1.

3. Điều khiển tối ưu giảm lắc dọc tàu thủy

3.1. Mô hình sóng ngẫu nhiên tác động vào hệ thống

Trong nghiên cứu này, dựa trên phổ Pierson-Moskowitz (P-M), phổ sóng biển ngẫu nhiên được đưa ra như sau [1, 5]:

$$W_t(\pi_a) = \frac{0,0081 \times g^2}{\pi_a^5} \exp\left(-\frac{3,11}{N_{1/3}^2 \pi_a^4}\right). \quad (9)$$

Trong đó: $N_{1/3}$ là chiều cao sóng, π_a là tần số của sóng biển, g là gia tốc trọng trường.

Dựa trên lý thuyết quá trình ngẫu nhiên, mô hình góc dốc sóng được mô tả [10]:

$$\beta(t) = \sum_{l=1}^n (\sqrt{2W_p(\pi_a)} \Delta\pi_a \cos(\pi_{a_l} t + \mu_l)), \quad (10)$$

Trong đó:

π_{a_l} là tần số sóng thứ l ;

μ_l là pha ngẫu nhiên của sóng thứ l ;

n là số lượng sóng được sử dụng để mô tả sóng ngẫu nhiên.

Chọn pha ngẫu nhiên của góc dốc sóng có giá trị biến ngẫu nhiên từ $0-2\pi$, khi đó phổ độ cao sóng và phổ năng lượng có mối quan hệ sau:

$$W_p(\pi_a) = K_1^2 K_2^2 \frac{\pi_a^4}{g^2} W_t(\pi_a), \quad (11)$$

Trong đó K_1 và K_2 là các hệ số, giá trị của chúng phụ thuộc vào hình dạng thân tàu. Trong vùng nước sâu, có tính đến mối quan hệ $\pi_a^2 = kg$, khi tính đến ảnh hưởng của hướng tới của sóng và tốc độ tới tần số sóng, thì tần số sóng mà tàu gặp phải được mô tả như sau:

$$\pi_e = \pi_a - \frac{\pi_a^2}{g} P \cos \rho, \quad (12)$$

Trong đó:

P là tốc độ của tàu;

ρ là hướng sóng tới.

Dựa trên nguyên lý năng lượng tương đương, ta có mối quan hệ sau:

$$W_p(\pi_a) \Delta\pi_a = W_p(\pi_e) \Delta\pi_e. \quad (13)$$

Hay:

$$W_p(\pi_e) = \frac{\Delta\pi_a}{\Delta\pi_e} W_p(\pi_a)$$

Sau biến đổi, ta có:

$$W_p(\pi_e) = W_p(\pi_a) / (1 - \frac{2\pi_a}{g} P \cos \rho). \quad (14)$$

Do đó, mô hình góc dốc của sóng thu được như sau:

$$\beta_e(t) = \sum_{l=1}^n (\sqrt{2W_p(\pi_e)} \Delta\pi_e \cos(\pi_{e_l} t + \mu_l) \sin \rho). \quad (15)$$

Trong đó:

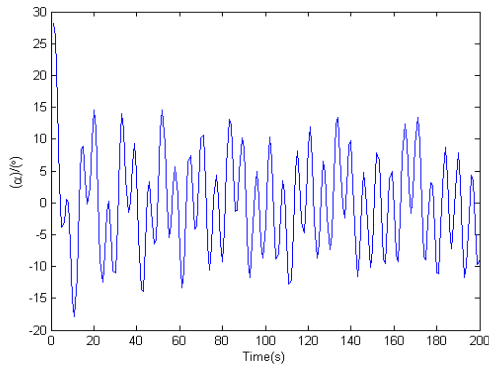
π_{e_l} là tần số sóng mà tàu gặp phải;

μ_l là pha ngẫu nhiên của sóng thứ l .

Từ (14) và (15), ta có:

$$\beta_e(t) = \sum_{l=1}^n (\sqrt{2W_p(\pi_a)\Delta\pi_a} \cos(\pi_{e_l}t + \mu_l) \sin \rho. \quad (16)$$

Hình 2 là mô phỏng của sóng ngẫu nhiên với: $N_{1/3} = 5,8m, n = 28$ hướng sóng $\rho = 45^\circ$ và tốc độ tàu $P = 7,8 m/s$.



Hình 2. Mô phỏng của sóng ngẫu nhiên với góc tới của sóng bằng 45°

3.2. Điều khiển tối ưu giảm lắc dọc tàu thủy

Trong phần này, bộ điều khiển của hệ thống rời rạc (3) được thiết kế. Dựa trên phương pháp điều khiển LQG, trạng thái của hệ thống sau khi thêm vào biến điều khiển có phương trình đệ quy như sau [6]:

$$u(k) = -L_{stb}\hat{x}(k) \quad (17)$$

$$x(k+1) = \Phi x(k) + Gu(k) + \Gamma w_f(k) \quad (18)$$

$$\hat{x}(k+1/k) = \Phi\hat{x}(k) + Gu(k) \quad (19)$$

$$\hat{x}(k+1) = \hat{x}(k+1/k) + K_{stb}[y(k+1) - H\hat{x}(k+1/k)] \quad (20)$$

Hàm mục tiêu có dạng hiệu suất bậc hai được đưa ra như sau:

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} [\hat{x}^T(k)Q_x x(k) + \hat{u}^T(k)Q_u u(k)] \quad (21)$$

Sau đó ma trận độ lợi của tín hiệu phản hồi trạng thái thu được như sau:

$$L_{stb} = [Q_u + G^T S G]^{-1} G^T S \Phi \quad (22)$$

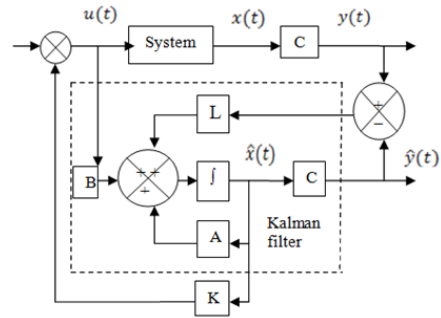
$$S = [\Phi - GL_{stb}]^T S [\Phi - GL_{stb}] + Q_x + L_{stb}^T Q_u L_{stb} \quad (23)$$

Trong (23): Giá trị ban đầu của ma trận S là $S = Q_x$. Trong quá trình mô phỏng, giá trị của Q_x được chọn như sau:

$$Q_x = \text{diag}[16 \times 10^{13} \quad 3 \times 10^{12} \quad 6 \times 10^{16} \quad 2 \times 10^{14}],$$

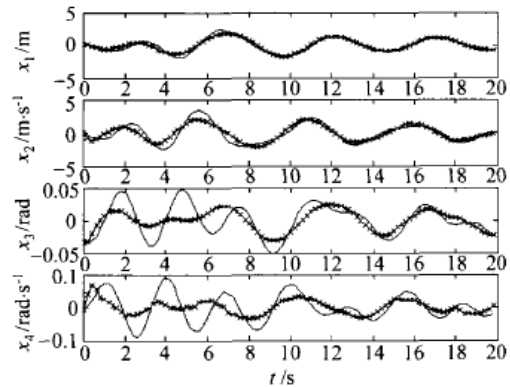
$$Q_u = 30.$$

Sơ đồ hệ thống được đưa ra như sau:



Hình 3. Sơ đồ khối hệ thống điều khiển

Theo các công thức từ (17) đến (20), kết quả mô phỏng thu được như sau:



Hình 4. Trạng thái hệ thống điều khiển LQG

Từ Hình 4 chúng ta có thể thấy x_1 và x_2 là các biến trạng thái của hệ thống biểu thị biên độ lắc và tốc độ lắc đứng của tàu giữa có và không có bộ lọc Kalman, đường nét đậm biểu thị hệ thống có sử dụng bộ lọc Kalman, đường nét mảnh biểu thị hệ thống khi không sử dụng bộ lọc Kalman, tuy chưa thực sự rõ rệt nhưng chúng ta có thể thấy hệ thống khi có bộ lọc Kalman thì hiệu quả giảm lắc là tốt hơn, biên độ dao động nhỏ hơn, hệ thống duy trì sự ổn định. Tương tự như vậy với các giá trị của x_3 và x_4 là các biến trạng thái của hệ thống biểu thị biên độ lắc và tốc độ lắc dọc của tàu giữa có và không có bộ lọc Kalman, hiệu quả khi sử dụng bộ lọc Kalman là rất rõ, biên độ lắc dọc của tàu được giảm đi đáng kể, hệ thống duy trì được sự ổn định theo thời gian.

4. Kết luận

Trong nghiên cứu này, dựa trên phương pháp điều khiển toàn phương tuyến tính LQG, một bộ điều khiển giảm lắc dọc tàu thủy được đưa để giảm lắc dọc cho tàu thủy. Bộ điều khiển được nghiên cứu là sự kết hợp của bộ lọc Kalman và bộ điều khiển tuyến tính LQR giúp cho hệ thống điều khiển ổn định và đạt được trạng thái điều khiển như mong muốn. Ngoài ra, với việc xem xét tác động của các yếu tố nhiễu, bao gồm nhiễu ngoài tác động và nhiễu nội của hệ thống giúp cho kết quả nghiên cứu gần với thực tế hơn. Kết quả mô phỏng cho thấy hiệu quả của phương pháp điều khiển được nghiên cứu.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT22-23.08**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Zhilin Liu, Guosheng Li (2021), *Robust anti-pitching control for high-speed multihull under stochastic wave disturbance*, 33rd Chinese control and decision conference (CCDC), pp.6146-6151.
- [2] John H W (1961), *Model Investigation of the stability and control of Pitch*, David Taylor Model Basin, Report C.
- [3] Chen S L, Steven W S, Armin W T (1999), *A systematic approach to modeling nonlinear multi-DOF ship motion in regular sea*, Journal of Ship research, pp.25-37.
- [4] Sun Zengqi (2000), *Theory and Application of Computer Mechanism*, Beijing: Tsinghua University.
- [5] Songtao Zhang, Peng Zhao, Lihua Liang (2018), *LQR-based ship roll reduction control using fin stabilizer*, IEEE international conference on mechatronics and automation ICMA, pp.1031-1036.
- [6] Grimble M J (1999), *LQG Feedforward/feedback stochastic optimal control and marine application*, Transaction of the Institute of Measurement and control, pp.30-31.

Ngày nhận bài:	25/10/2022
Ngày nhận bản sửa:	08/11/2022
Ngày duyệt đăng:	16/11/2022