

Xây dựng giải pháp xác định tham số mô hình đối tượng chuyển động quayTrần Xuân Khánh¹, Trần Đức Thuận^{2*}¹Viện Tự động hóa KTQS, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự;²Khoa Điện-Điện tử, Đại học Đông Á.

*Email: thuandauto@yahoo.com

Nhận bài: 14/8/2023; Hoàn thiện: 29/9/2023; Chấp nhận đăng: 10/10/2023; Xuất bản: 25/10/2023.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.90.2023.38-44>**TÓM TẮT**

Bài báo trình bày giải pháp ứng dụng các phần tử đo vi cơ quán tính và bộ lọc Kalman để xác định tham số của chuyển động quay. Đồng thời cũng đưa ra giải pháp xác định tham số mô hình của một số đối tượng chuyển động quay thường gặp trong các khí tài quân sự.

Từ khóa: Lọc Kalman; Vi cơ quán tính; Tham số mô hình; Chuyển động quay.

1. MỞ ĐẦU

Trong các khí tài quân sự, thường có các cơ cấu chuyển động quay (bệ pháo, bệ tên lửa, bệ các rada, bệ các khí tài quan sát). Để điều khiển các cơ cấu quay này đạt chất lượng cao, đạt độ chính xác, độ tác động nhanh theo yêu cầu cần phải có thông tin về mô hình mô tả đối tượng này. Cấu trúc của mô hình có thể xác định nhờ các phương trình toán lý. Tuy nhiên, tham số của mô hình đối tượng này có thay đổi trong các lần sử dụng khác nhau (do các yếu tố như thời tiết, độ biến đổi của các ổ trục) và có thể thay đổi biến thiên trong mỗi lần hoạt động như: Momen quán tính của kênh hướng phụ thuộc vào góc tầm (góc quay tầm và hướng phụ thuộc vào quỹ đạo mục tiêu của đối phương). Đây là yếu tố có tính ngẫu nhiên, không phụ thuộc vào chủ thể điều khiển. Chính vì vậy, cần phải hiệu chỉnh tham số mô hình trong quá trình hoạt động của các khí tài có hệ quay. Việc hiệu chỉnh tham số mô hình sẽ giúp cho việc hiệu chỉnh tham số bộ điều khiển (luật điều khiển), từ đó nâng cao chất lượng điều khiển.

Như vậy, cần phải giải quyết vấn đề nhận dạng (xác định) tham số mô hình. Có thể dựa vào thông tin tín hiệu điều khiển và đầu ra của đối tượng để xác định tham số mô hình. Tuy nhiên, việc đọc thông tin về hai tín hiệu này luôn có nhiễu và các yếu tố khác của thiết bị đo nên đòi hỏi phải có các giải pháp mang tính học thuật. Việc dùng các thiết bị đo vi cơ quán tính để đo đạc được nhiều tài liệu đề cập [1-3]. Để sử dụng thiết bị vi cơ quán tính đo lực và tốc độ chuyển động, các tác giả trên đã ứng dụng bộ lọc Kalman để kết hợp thông tin của nhiều phương tiện đo khác nhằm khử yếu tố trôi về nhiễu. Tuy nhiên, đối với vật chuyển động quay (tâm khối bất động) thì cần phải có giải pháp khác. Việc xây dựng thuật toán nhận dạng cho các đối tượng phổ quát đã được trình bày ở giáo trình [4]. Tuy nhiên, đối với đối tượng chuyển động quay có số phương trình ít hơn số tham số cần nhận dạng, cần phải có phát triển tiếp theo.

2. NỘI DUNG CẦN GIẢI QUYẾT**2.1. Xây dựng giải pháp xác định tham số mô hình**

Xét một hệ chuyển động quay hướng (quay xung quanh một trục thẳng đứng), gọi ω là tốc độ quay, J là Momen quán tính của hệ, ρ là hệ số cản. Phương trình cơ bản của hệ quay sẽ là:

$$J \frac{d\omega}{dt} + \rho\omega(t) = M \quad (1)$$

Trong đó, hai tham số J , ρ thay đổi trong quá trình hoạt động, tức là chúng ta có hệ tuyến tính không dừng. Để thiết kế được bộ điều khiển tạo ra mô men M đạt yêu cầu thì cần phải có đánh giá (nhận dạng) được giá trị J và ρ .

Giả sử phương trình (1) được rời rạc hóa với bước Δt chúng ta sẽ có phương trình:

$$J \frac{\Delta\omega}{\Delta t} + \rho\omega(i) = M(i) \tag{2}$$

Hoặc:

$$J \frac{\omega(i) - \omega(i-1)}{\Delta t} + \rho\omega(i) = M(i) \tag{3}$$

Hoặc:

$$J(\omega(i) - \omega(i - 1)) + \rho. \Delta t\omega(i) = \Delta t. M(i) \tag{4}$$

Từ phương trình (4) ta nhận thấy, nếu đo được các giá trị $\omega(i)$, $M(i)$ và xác định được Δt thì chúng ta có phương trình với hai ẩn số J và ρ . Về mặt toán học, hai ẩn số với 1 phương trình sẽ cho ta vô số nghiệm J và ρ . Để giải được, chúng ta xây dựng phương trình thứ 2.

Để dàng nhận thấy, ở một thời điểm k khác i chúng ta sẽ có phương trình với hệ số khác từ phương trình (4):

$$J(\omega(k) - \omega(k - 1)) + \rho. \Delta t\omega(k) = \Delta t. M(k) \tag{5}$$

Về mặt lý thuyết từ hai phương trình (4) và (5) sẽ cho nghiệm duy nhất với J và ρ . Các giá trị $\omega(i)$ và $M(i)$, $\omega(k)$ và $M(k)$ là các số đo được nhờ các thiết bị đo. Tuy nhiên, thiết bị đo cho ta giá trị khác với giá trị thực do các nguyên nhân về thiết bị đo và phương pháp đo. Như vậy, giá trị J và ρ nhận được cũng có sai số. Để khắc phục vấn đề này, ta đề xuất giải pháp sau. Lấy một số lượng N vị trí các số liệu $\omega(i)$, $M(i)$, sau đó lấy các giá trị trung bình. Đặt:

$$\Delta\omega = \omega(i) - \omega(i - 1) \tag{6}$$

Phương trình (4) có dạng:

$$J\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta\omega(i)\right) + \rho\left(\Delta t \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \omega(i)\right) = \Delta t. \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M(i) \tag{7}$$

Đặt $J = x$, $\rho = y$ và

$$a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta\omega(i) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \omega(i) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \omega(i - 1) \tag{8}$$

$$b = \Delta t \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \omega(i) \tag{9}$$

$$c = \Delta t \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M(i) \tag{10}$$

Vậy ta có phương trình:

$$a. x + b. y = c \tag{11}$$

Tiếp tục thực hiện N lần lấy số liệu tiếp theo, chúng ta sẽ có phương trình thứ hai:

$$a_1. x + b_1. y = c_1 \tag{12}$$

Ở đây, a_1, b_1, c_1 được xác định tương tự (8), (9), (10). Từ phương trình (11), (12) có thể xác định được x, y tức là J, ρ . Để dàng nhận thấy, để hệ (11), (12) có nghiệm duy nhất thì cần phải thỏa mãn:

$$a_1. b \neq a. b_1 \tag{13}$$

Tức là:

$$\delta = a_1. b - a. b_1 \tag{14}$$

δ càng lớn thì độ chính xác khi xác định J, ρ càng cao. Để có được điều này thì hàm Momen $M(i)$ và $M(k)$ của hai lần thực nghiệm phải khác nhau.

Nghiệm x sẽ được xác định như sau:

$$J = \frac{c. b_1 - c_1. b}{a. b_1 - a_1. b} \tag{15}$$

$$\rho = \frac{a. c_1 - a_1. c}{a. b_1 - a_1. b} \tag{16}$$

Để tạo ra $M(i)$, $M(k)$ khác nhau cần đưa chương trình thay đổi điện áp cấp vào động cơ quay đối tượng hai lần thí nghiệm với hai chương trình thay đổi khác nhau.

Từ các công thức (8), (9), (10) cho thấy, để xác định được các hệ số a, b, c, a_1, b_1, c_1 cần phải đo hoặc bằng giải pháp nào đó xác định được dãy số liệu $\omega(i)$ và $M(i)$. Vấn đề này được giải quyết bằng cách đưa các phần tử vi cơ điện tử (con quay vi cơ và gia tốc kế) vào cơ cấu quay.

Con quay vi cơ cho ta thông số có dạng:

$$\tilde{\omega} = \omega + b + \mu_c \quad (17)$$

Trong đó:

ω - Tốc độ quay thật;

b - Giá trị độ trôi (Phụ thuộc vào nhiệt độ môi trường);

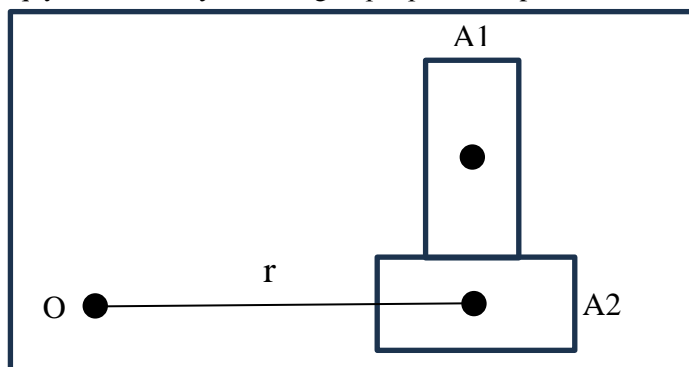
μ_c - Giá trị nhiễu đo có dạng ồn trắng.

Gia tốc kế cho ta thông tin:

$$\tilde{A} = A + \mu_a \quad (18)$$

Trong đó: A là gia tốc của điểm đặt gia tốc kế và có phương trùng với phương của gia tốc kế; μ_a là giá trị nhiễu đo có dạng ồn trắng.

Như vậy, không thể có thông tin ω và A từ việc đọc trực tiếp thông tin từ gia tốc kế và con quay vi cơ. Để giải quyết vấn đề này đề xuất giải pháp đặt các phần tử đó như sau:



Hình 1. Bố trí các phần tử vi cơ hệ quay.

Gia tốc kế A_1 cho ta thông tin về Momen lực $M(i)$, còn gia tốc kế A_2 cho ta thông tin về gia tốc pháp tuyến của chuyển động quay. Tức là:

$$\tilde{A}_2 = \omega^2 r + \mu_{a2} \quad (19)$$

$$\tilde{A}_1 = M(i) + \mu_{a1} \quad (20)$$

Giả sử có thông tin $\tilde{A}_{1[i]}$ ở thời điểm rời rạc thì từ (20) có tổng sau:

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tilde{A}_1(i) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M(i) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mu_{a1}(i) \quad (21)$$

Theo lý thuyết xác suất khi μ_{a1} là ồn trắng và

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mu_{a1}(i) \approx 0 \quad (22)$$

Khi đó:

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tilde{A}_1(i) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M(i) \quad (23)$$

Như vậy, từ thông tin của gia tốc kế A_1 chúng ta có thông tin để giải phương trình (11) và (12) xác định các tham số đo J, ρ của mô hình, còn thông tin về $\omega(i)$ sẽ được giải quyết trên cơ sở áp dụng bộ lọc Kalman.

Từ phương trình (17) có:

$$\omega(i) = \tilde{\omega}(i) - b - \mu_c \quad (24)$$

Vì b là độ trôi, biến đổi chậm và gần như không thay đổi nên có thể coi:

$$b_{(i)} \approx b_{(i-1)} \quad (25)$$

Đặt: $x_1 = \omega, x_2 = b$ (26)

Ta có hệ phương trình:

$$\begin{cases} x_1(i) = \tilde{\omega}_{(i)} - x_2(i) - \mu_c \\ x_2(i) = x_2(i-1) \end{cases} \quad (27)$$

$$\quad \quad \quad (28)$$

Đặt:

$$X = (x_1 \ x_2)^T \quad (29)$$

Khi đó:

$$X(i) = F(X(i-1)) + G(\mu_c(i)) \quad (30)$$

Ta có thể viết lại công thức (28) là:

$$F = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{\omega}_{(i)} - x_2(i) \\ x_2(i) \end{pmatrix} \quad (31)$$

$$G = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (32)$$

Từ phương trình (19) có thể đạt phương trình sau:

$$z(i) = rx_1^2(i) + \mu_{a2} \quad (33)$$

Hai phương trình (30 và (33) là cơ sở để xác định luật lọc Kalman.

2.2. Ứng dụng phương pháp lọc Kalman cho việc thu thập dữ liệu

Xét quá trình công nghệ được mô tả bởi hệ phương trình động học dưới dạng rời rạc như sau:

$$X(k) = F(X(k-1)) + Gw(k-1) \quad (34)$$

$$Z(k) = h(X(k)) + v(k) \quad (35)$$

Trong đó, $X(k), X(k-1)$ là trạng thái của vecto trạng thái X (vecto n chiều) ở bước thứ k và bước thứ $k+1$;

$Z(k)$ là giá trị của vecto đầu ra (vecto m chiều, thường $m \leq n$);

$w(k-1), v(k)$ là vecto nhiễu động lực và nhiễu đo có dạng nhiễu trắng với kỳ vọng toán học bằng 0: $w(k) \sim N_{(0,Q)}$; $v(k) \sim N_{(0,R)}$;

$F(X(k-1))$ là vecto hàm số bước thứ $k-1$:

$$F = (f_1, f_2, \dots, f_n)^T \quad (36)$$

$$h = (h_1, h_2, \dots, h_m)^T \quad (37)$$

Trong đó, f_1, f_2, \dots, f_n là các hàm phi tuyến với biểu số của vecto X .

h_1, h_2, \dots, h_m - Vecto hàm số h .

Ma trận hiệp phương sai của vecto sai số đánh giá trạng thái vecto X như sau:

$$P_k = \varepsilon([X(k) - \hat{X}(k)][X(k) - \hat{X}(k)]^T) \quad (38)$$

Trong đó, ε là ký hiệu kỳ vọng toán học.

Thủ tục của thuật toán đánh giá trạng thái X trên cơ sở vecto quan sát Z theo Kalman [5, 6] như sau:

$$\hat{X}_-(k) = F(\hat{X}_+(k-1)) \quad (39)$$

$$\Phi(k-1) = \frac{\partial F}{\partial X} \Big|_{X=\hat{X}_+(k-1)} \quad (40)$$

$$\hat{Z}(k) = h(\hat{X}_-(k)) \quad (41)$$

$$H(k) = \frac{\partial h}{\partial X} \Big|_{X=\hat{X}_-(k)} \quad (42)$$

$$P_-(k) = \Phi(k-1)P_+(k-1)\Phi^T(k-1) + G(k-1)Q(k-1)G^T(k-1) \quad (43)$$

$$K(k) = P_-(k)H^T(k)(H(k)P_-(k)H^T(k) + R(k))^{-1} \quad (44)$$

$$\hat{X}_+(k) = \hat{X}_-(k) + K(k)(Z(k) - \hat{Z}(k)) \quad (45)$$

$$P_+(k) = (I - K(k)H(k))P_-(k) \quad (46)$$

Trong đó, I - Ma trận đơn vị.

Như vậy, để tiến hành lọc Kalman trên máy tính, cần xác định vecto hàm F(.) (tức là các hàm f_1, f_2, \dots, f_n), hàm h(.) (tức là các hàm h_1, h_2, \dots, h_m) và các ma trận Q(k) và R(k) (đặc trưng nhiễu động học và nhiễu đo).

Từ (31) và (40) ta có:

$$\Phi(k-1) = \frac{\partial F}{\partial X} \Big|_{X=\hat{X}_+(k-1)} = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (47)$$

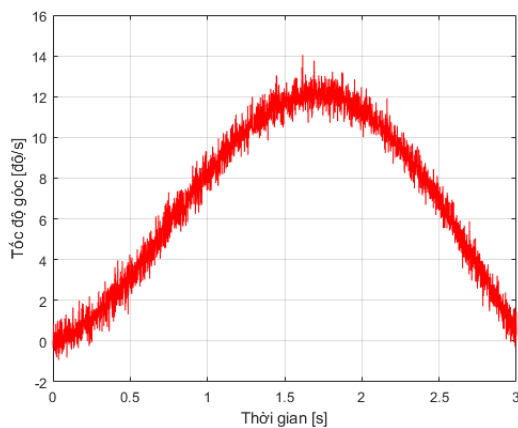
Từ (37) và (42) ta có:

$$H(k) = \frac{\partial h}{\partial X} \Big|_{X=\hat{X}_-(k)} = \begin{pmatrix} 2r\hat{X}_-(k) & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (48)$$

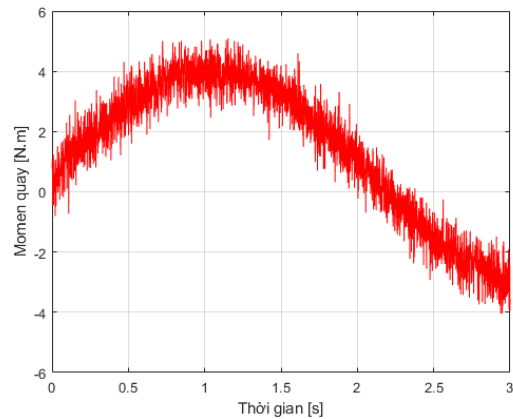
3. MÔ PHỎNG, TÍNH TOÁN, THẢO LUẬN

3.1. Xác định tham số mô hình J, ρ

Xét tín hiệu đầu vào ω và M có dạng tín hiệu như sau:

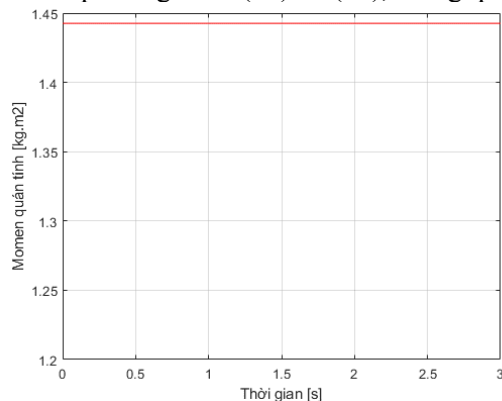


Hình 2. Tín hiệu tốc độ góc ω.

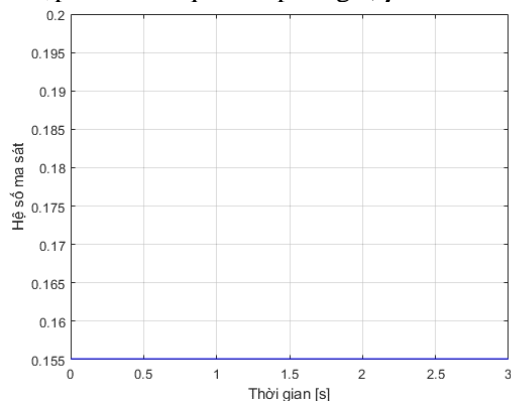


Hình 3. Tín hiệu Momen quay M.

Từ phương trình (15) và (16), thông qua quá trình lặp ta có kết quả mô phỏng J, ρ như sau:



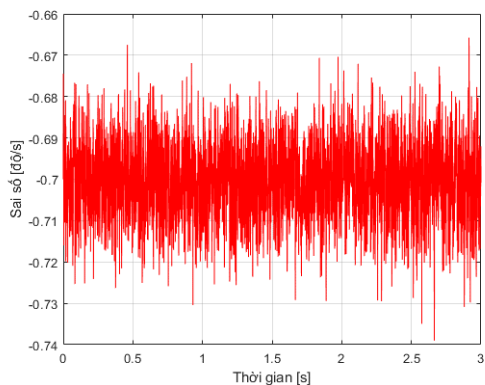
Hình 4. Giá trị Momen quán tính J.



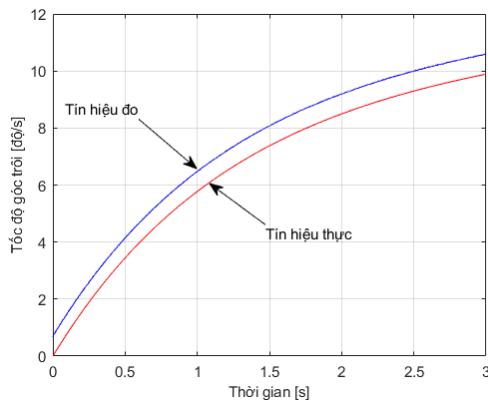
Hình 5. Giá trị hệ số ma sát ρ.

3.2. Sử dụng lọc Kalman để xác định ω từ phương tiện đo

Xét tín hiệu đo được của ω khi tính đến nhiễu tạp và nhiễu trôi.

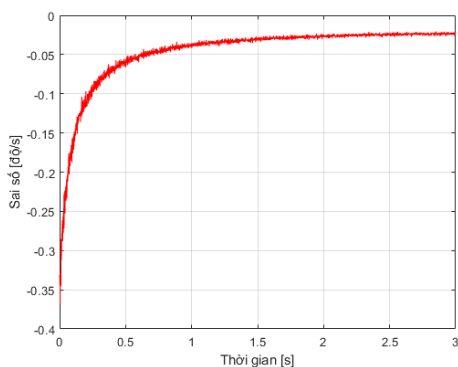


Hình 6. Giá trị sai số giữa tín hiệu thực và tín hiệu đo khi có nhiễu và trôi.

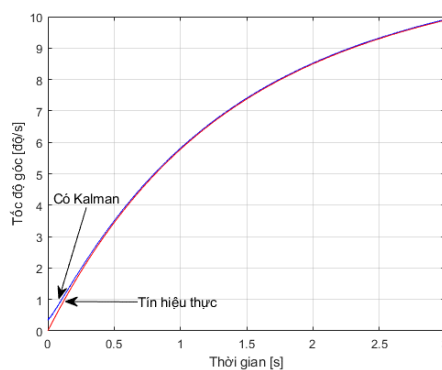


Hình 7. Tín hiệu thực và tín hiệu đo khi có nhiễu và trôi.

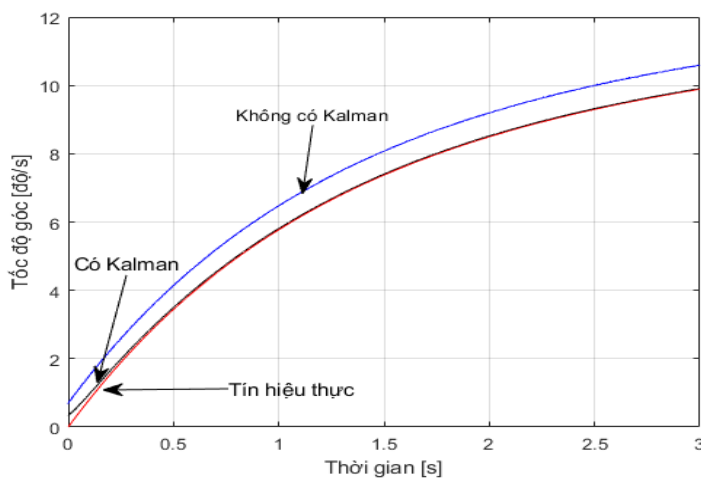
Khi sử dụng bộ lọc Kalman để lọc tín hiệu ω từ con quay.



Hình 8. Giá trị sai số giữa tín hiệu thực và tín hiệu sau khi lọc Kalman.



Hình 9. Tín hiệu thực và tín hiệu sau lọc Kalman.



Hình 10. Tín hiệu tốc độ góc có và không có lọc Kalman.

Nhận xét: Qua đồ thị hình 10 cho thấy nhờ bộ lọc Kalman đã xác định được tham số tốc độ góc với độ chính xác cao khử được độ trôi do nhiễu gây ra.

4. KẾT LUẬN

Bài báo tập trung xây dựng giải pháp xác định tham số mô hình đối tượng chuyển động quay J, ρ thông qua việc xác định tốc độ quay ω và Momen M bằng việc đọc tín hiệu từ con quay vi cơ và gia tốc kế A1, A2. Bài báo cũng đã đưa ra giải pháp ứng dụng phương pháp lọc Kalman để xác định chính xác giá trị đọc được từ con quay vi cơ do ảnh hưởng của nhiễu và độ trôi. Các thuật toán này sẽ có giá trị để xây dựng các thuật toán điều khiển đạt chất lượng cao nhằm nâng cao độ chính xác bám mục tiêu cơ động.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Nguyễn Văn Chúc, Ngô Trọng Mai, “*Thuật toán dẫn đường quán tính có hiệu chỉnh ứng dụng thiết bị vi cơ điện tử dùng cho hệ thống điều khiển thiết bị bay*”, Hội nghị Khoa học ngành vũ khí, Trung tâm KHKT-CNQS, tr.260-266, (2007).
- [2]. Trần Đức Thuận, Nguyễn Quang Vịnh, Trương Duy Trung, “*Mô hình động học chuyển động của ngư lôi*”, Tạp chí Nghiên cứu KH&CN quân sự, số 21, tr.28-35, (2012).
- [3]. Trần Đức Thuận, Trương Duy Trung, Nguyễn Quang Vịnh, Nguyễn Sĩ Long, Trần Xuân Kiên, Bùi Hồng Huế, Nguyễn Văn Diên, “*Xây dựng thuật toán xác định tham số định hướng cho phương tiện chuyển động trên cơ sở kết hợp con quay tốc độ góc với từ kế và gia tốc kế*”, Tạp chí Nghiên cứu KH&CN quân sự, số 25, tr.7-16, (2013).
- [4]. Phước.N.D, “*Phân tích và điều khiển hệ phi tuyến*”, NXB Bách khoa, (2012).
- [5]. Thuận.T.Đ, Mỹ.B.N, “*Thiết bị dẫn đường quán tính và đo cao trong hệ thống điều khiển thiết bị bay*”, NXB Khoa học và kỹ thuật, (2015).
- [6]. Tim Babb, “*How a Kalman filter works, in pictures*”, <https://www.bzarg.com/p/how-a-kalman-filter-works-in-pictures>, Accessed: 2018-11-30, (2018).
- [7]. Charles K, Chui and Guanrong Chen, “*Kalman Filtering: With Real-Time Applications (5th ed.)*”, Springer Publishing Company, Incorporated, (2017).
- [8]. Mohinder S, Grewal and Angus P. Andrews, “*Kalman Filtering: Theory and Practice with MATLAB (4th ed.)*”, Wiley-IEEE Press, (2014).
- [9]. Rudolph Emil Kalman, “*A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems*”, Transactions of the ASME–Journal of Basic Engineering 82, Series D, 35–45, (1960).

ABSTRACT

Building a solution to determine the model parameters of rotational motion object

This paper presents a solution for applying inertial micromechanical measurement elements and a Kalman filter to determine the parameters of rotational motion object. At the same time, it also provides a solution to determine the model parameters of some rotational motion objects commonly encountered in military equipment.

Keywords: Kalman filter; Inertia Micromechanical; Model parameters; Rotation.