

# XÂY DỰNG THUẬT TOÁN XÁC ĐỊNH TỐC ĐỘ GÓC CHO VẬT THỂ CHUYỂN ĐỘNG BẰNG HỆ ĐA GIA TỐC KẾ

## PROPOSING AN ALGORITHM FOR DETERMINING THE ANGLE VELOCITY OF MOVING OBJECTS WITH MULTIPLE ACCELEROMETER SYSTEM

Nguyễn Văn Diên<sup>1</sup>, Đặng Tiến Trung<sup>2</sup>

Trường Đại học Sư phạm kỹ thuật Hưng Yên<sup>1</sup>, Trường Đại học Điện lực<sup>2</sup>

Ngày nhận bài: 23/11/2019, Ngày chấp nhận đăng: 24/04/2020, Phản biện: PGS.TS. Nguyễn Quang Hùng

### Tóm tắt:

Bài báo trình bày cơ sở toán học cho việc sử dụng thông tin đo được từ hệ các gia tốc kế để xác định tốc độ quay của vật thể chuyển động. Từ tốc độ quay có thể xác định được các góc tư thế của vật thể. Giải pháp của bài toán là xây dựng các phương trình mô tả quan hệ giữa tốc độ quay với các gia tốc ở các điểm khác nhau trên vật, sau đó sử dụng giải thuật lọc Kalman để xây dựng thuật toán xác định tốc độ quay của vật. Kết quả là xác định được tư thế và vị trí của vật thể trong không gian (giải quyết bài toán dẫn đường cho vật thể chuyển động).

### Từ khóa:

Gia tốc kế, đối tượng dịch chuyển, thuật toán lọc Kalman.

### Abstract:

Paper presents the mathematical basis of using information that is measured from the accelerometer system to determine the rotation speed of a moving object. From the rotational speed, it is possible to determine the position angles of the object. The solution of the problem is to build equations describing the relationship between the rotation speed and the acceleration at different points on the object. Then the Kalman filtering algorithm is used to build an algorithm to determine the rotation speed of the object. The posture and position of objects in space are identified.

### Keywords:

Accelerometer, moving object, kalman filtering algorithm.

## 1. MỞ ĐẦU

Vấn đề dẫn đường cho vật thể chuyển động bản chất là xác định vị trí, vận tốc của tâm khối và tư thế của nó so với hệ tọa độ được chọn làm hệ tọa độ dẫn đường. Việc sử dụng các phương tiện đo như con quay đo tốc độ góc, gia tốc kế và thông tin định vị vệ tinh đã được nhiều

công trình đề cập và đã có nhiều ứng dụng được hiện thực hóa. Do các con quay đo tốc độ góc luôn có độ trôi không (có giá trị phát ra cho dù vật thể không quay) và độ trôi này biến đổi trong quá trình hoạt động, vì vậy trong thực tế phải có các hệ đo khác để khắc phục hiệu ứng sai số do tính trôi không của các con

quay. Trong [1] đã xây dựng thuật toán kết hợp con quay đo tốc độ góc với hệ đa gia tốc kế để khắc phục hiện tượng trôi không. Trong bài báo này, nhóm tác giả đề xuất giải pháp chỉ sử dụng hệ đa gia tốc kế (không sử dụng con quay và thông tin định vị vệ tinh) để giải quyết vấn đề dẫn đường. Vấn đề này thực sự có ý nghĩa thực tiễn khi xây dựng thiết bị dẫn đường cho các phương tiện ngầm, phương tiện chuyển động nhanh mà ở đó không thể có thông tin từ các hệ định vị vệ tinh.

## 2. THIẾT KẾ THUẬT TOÁN XÁC ĐỊNH THÔNG TIN VỀ TỐC ĐỘ QUAY GÓC TỪ THÔNG TIN HỆ ĐA GIA TỐC KẾ

Vì các gia tốc kế gắn trực tiếp ở vật thể chuyển động, nên các chỉ số đo các gia tốc kế đưa ra là các thành phần của gia tốc ở các điểm gắn gia tốc kế đo trong hệ tọa độ gắn liền với vật thể (hệ tọa độ liên kết). Để xác định được tham số chuyển động của tâm khối vật thể so với hệ tọa độ dẫn đường cần phải có thông tin gia tốc tâm khối so với hệ tọa độ dẫn đường.

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} x_l \\ y_l \\ z_l \end{bmatrix} \quad (1)$$

Trong đó  $A$  gọi là ma trận cosin định hướng, có cấu trúc như [2, 3].

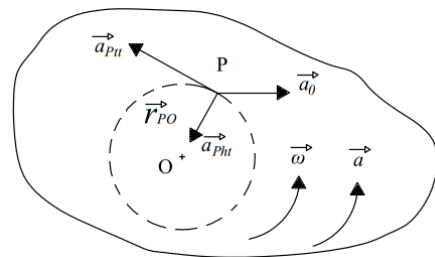
Việc xác định quan hệ giữa hệ tọa độ dẫn đường và hệ tọa độ liên kết chính là việc xác định ma trận  $A$  hoặc ba góc  $\psi, \vartheta, \gamma$  (góc tư thế [3]). Theo [2, 3] nếu có thông tin về tốc độ quay của vật thể xung quanh 3 trục của hệ tọa độ liên kết  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  thì có quan hệ của các phần tử ma trận  $A$  với

các tốc độ quay đó như sau:

$$\begin{aligned} \dot{c}_{11} &= c_{12}\omega_z - c_{13}\omega_y, & \dot{c}_{12} &= c_{13}\omega_x - c_{11}\omega_z, \\ \dot{c}_{13} &= c_{11}\omega_y - c_{12}\omega_x, & \dot{c}_{21} &= c_{22}\omega_z - c_{23}\omega_y, \\ \dot{c}_{22} &= c_{23}\omega_x - c_{21}\omega_z, & \dot{c}_{23} &= c_{21}\omega_y - c_{22}\omega_x, \\ \dot{c}_{31} &= c_{32}\omega_z - c_{33}\omega_y, & \dot{c}_{32} &= c_{33}\omega_x - c_{31}\omega_z, \\ \dot{c}_{33} &= c_{31}\omega_y - c_{32}\omega_x \end{aligned} \quad (2)$$

Trong (2),  $c_{ij}$  là các phần tử của ma trận  $A$ .

Như vậy để xác định tư thế của vật trong quá trình động phải có thông tin về các tốc độ quay  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ . Sau đây sẽ trình bày việc xác định  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  nhờ hệ đa gia tốc kế gắn trên vật thể chuyển động.



Hình 1. Chuyển động phức hợp của vật rắn lý tưởng

Để hiểu rõ bản chất việc xác định tốc độ góc trên cơ sở hệ đa gia tốc kế, ta xem xét chuyển động của một vật rắn lý tưởng như hình 1. Giả sử vật rắn chuyển động phức hợp có gia tốc góc  $\vec{\alpha}$ , vận tốc góc  $\vec{\omega}$ , gia tốc dài  $\vec{a}_O$ . Khi đó phương trình cơ bản mô tả gia tốc của một điểm  $P$  bất kỳ trên vật rắn như sau [1,4]:

$$\vec{a}_P = \vec{a}_O + \vec{a}_{Pht} + \vec{a}_{Pt} \quad (3)$$

trong đó,  $\vec{a}_P, \vec{a}_O$  là gia tốc tại điểm  $P$  và  $O$ ;  $\vec{a}_{Pht}$  là gia tốc hướng tâm tại  $P$ ;  $\vec{a}_{Pt}$  là gia tốc tiếp tuyến tại  $P$ ;  $O$  là tâm khối của vật thể.

Chúng ta biết rằng [4]:

$$\vec{a}_{Ph} = \vec{\alpha} \times \vec{r}_{P0} \quad (4)$$

$$\vec{a}_{Ph} = \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}_{P0}) \quad (5)$$

ở đây  $\vec{r}_{P0}$  là vectơ nối điểm P với điểm O.

Từ (3), (4), (5) suy ra:

$$\vec{a}_P = \vec{a}_0 + \vec{\alpha} \times \vec{r}_{P0} + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}_{P0}) \quad (6)$$

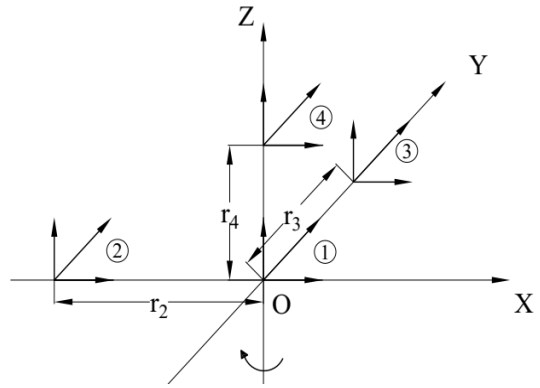
Theo [4], áp dụng công thức nhân 2 vectơ có hướng ta có:

$$\begin{aligned} |\vec{\alpha} \times \vec{r}_{P0}| &= \begin{vmatrix} 0 & r_z & -r_y \\ -r_z & 0 & r_x \\ r_y & -r_x & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_z \end{vmatrix} \\ &= \begin{vmatrix} 0 & r_z & -r_y \\ -r_z & 0 & r_x \\ r_y & -r_x & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{vmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} |\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}_{P0})| &= \\ \begin{vmatrix} 0 & -r_x & -r_x & r_y & r_z & 0 \\ -r_y & 0 & -r_y & r_x & 0 & r_z \\ -r_z & -r_z & 0 & 0 & r_x & r_y \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \omega_x^2 \\ \omega_y^2 \\ \omega_z^2 \\ \omega_x \omega_y \\ \omega_x \omega_z \\ \omega_y \omega_z \end{vmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

Xem xét mô hình hệ cảm biến gồm 4 hệ gia tốc kế 3 trục như hình 2, trong đó hệ gia tốc kế số 1 đặt ở tâm khối vật thể chuyển động. Còn ba hệ gia tốc kế còn lại đặt ở 3 vị trí trên các trục hệ tọa độ gắn liền với vật thể chuyển động.

Hệ tọa độ OXYZ là hệ tọa độ liên kết của vật thể chuyển động, tất cả các cảm biến có trục nhạy song song với các trục tương ứng của hệ tọa độ liên kết.



Hình 2. Mô hình 4 hệ gia tốc kế 3 trục

Vì hệ gia tốc kế số 1 nằm ở tâm khối vật thể, nên chỉ số của nó sẽ là gia tốc chuyển động dài, tức là:

$$[A_{1x} \ A_{1y} \ A_{1z}]^T = [a_x^0 \ a_y^0 \ a_z^0]^T \quad (9)$$

trong đó,  $A_{1x}; A_{1y}; A_{1z}$  là các giá trị lý tưởng của hệ gia tốc kế số 1;  $a_x^0; a_y^0; a_z^0$  là các gia tốc dài của vật thể.

Hệ gia tốc kế số 2 nằm cách tâm khối O khoảng cách  $r$  và ở vị trí:

$$r_{2x} = -r; r_{2y} = 0; r_{2z} = 0 \quad (10)$$

Từ công thức (3), (7), (8) ta có chỉ số gia tốc kế số 2 như sau:

$$\begin{vmatrix} A_{2x} \\ A_{2y} \\ A_{2z} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_x^0 \\ a_y^0 \\ a_z^0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 \\ -r\dot{\omega}_z \\ r\dot{\omega}_y \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} r(\omega_y^2 + \omega_z^2) \\ -r\omega_x \omega_y \\ -r\omega_x \omega_z \end{vmatrix} \quad (11)$$

trong đó  $A_{2x}; A_{2y}; A_{2z}$  là các giá trị lý tưởng của hệ gia tốc kế số 2,  $\omega_x; \omega_y; \omega_z$  là các vận tốc góc của vật thể;  $\dot{\omega}_x; \dot{\omega}_y; \dot{\omega}_z$  là các gia tốc góc của vật thể.

Hệ gia tốc kế số 3 nằm cách tâm khối O khoảng cách:

$$r_{3x} = 0; r_{3y} = r; r_{3z} = 0 \quad (12)$$

Từ công thức (3), (7), (8) ta có chỉ số gia

tốc kể số 3 như sau:

$$\begin{vmatrix} A_{3x} \\ A_{3y} \\ A_{3z} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_x^0 \\ a_y^0 \\ a_z^0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} -r\dot{\omega}_z \\ 0 \\ r\dot{\omega}_x \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} r\omega_x\omega_y \\ -r(\omega_x^2 + \omega_z^2) \\ r\omega_y\omega_z \end{vmatrix} \quad (13)$$

trong đó  $A_{3x}; A_{3y}; A_{3z}$  là các giá trị lý tưởng của hệ gia tốc kể số 3.

Hệ gia tốc kể số 4 nằm cách tâm khối O khoảng cách:

$$r_{4x} = 0; r_{4y} = 0; r_{4z} = r \quad (14)$$

Từ công thức (3), (7), (8) ta có chỉ số gia tốc kể số 4 như sau:

$$\begin{vmatrix} A_{4x} \\ A_{4y} \\ A_{4z} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_x^0 \\ a_y^0 \\ a_z^0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} r\dot{\omega}_y \\ -r\dot{\omega}_x \\ 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} r\omega_x\omega_z \\ r\omega_y\omega_z \\ -r(\omega_x^2 + \omega_y^2) \end{vmatrix} \quad (15)$$

trong đó  $A_{4x}; A_{4y}; A_{4z}$  là các giá trị của hệ gia tốc kể số 4.

Trừ hai vế của phương trình (11) với hai vế phương trình (9) nhận được:

$$\begin{vmatrix} A_{2x} - A_{1x} \\ A_{2y} - A_{1y} \\ A_{2z} - A_{1z} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ -r\dot{\omega}_z \\ r\dot{\omega}_y \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} r(\omega_y^2 + \omega_z^2) \\ -r\omega_x\omega_y \\ -r\omega_x\omega_z \end{vmatrix} \quad (16)$$

Trừ hai vế của phương trình (13) với hai vế phương trình (9) nhận được:

$$\begin{vmatrix} A_{3x} - A_{1x} \\ A_{3y} - A_{1y} \\ A_{3z} - A_{1z} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -r\dot{\omega}_z \\ 0 \\ r\dot{\omega}_x \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} r\omega_x\omega_y \\ -r(\omega_x^2 + \omega_z^2) \\ r\omega_y\omega_z \end{vmatrix} \quad (17)$$

Trừ hai vế của phương trình (15) với hai vế phương trình (9) nhận được:

$$\begin{vmatrix} A_{4x} - A_{1x} \\ A_{4y} - A_{1y} \\ A_{4z} - A_{1z} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} r\dot{\omega}_y \\ -r\dot{\omega}_x \\ 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} r\omega_x\omega_z \\ r\omega_y\omega_z \\ -r(\omega_x^2 + \omega_y^2) \end{vmatrix} \quad (18)$$

Đặt

$$\begin{cases} m_1 = \dot{\omega}_x; m_2 = \dot{\omega}_y; m_3 = \dot{\omega}_z; \\ m_4 = \omega_x^2; m_5 = \omega_y^2; m_6 = \omega_z^2; \\ m_7 = \omega_x\omega_y; m_8 = \omega_x\omega_z; \\ m_9 = \omega_y\omega_z; \end{cases} \quad (19)$$

Với cách đặt biến như (19) từ các phương trình (16), (17), (18) có hệ 9 phương trình:

$$\begin{cases} 1) m_5 + m_6 = (A_{2x} - A_{1x}) / r \\ 2) -m_7 - m_3 = (A_{2y} - A_{1y}) / r \\ 3) -m_8 + m_2 = (A_{2z} - A_{1z}) / r \\ 4) m_7 - m_3 = (A_{3x} - A_{1x}) / r \\ 5) -m_4 - m_6 = (A_{3y} - A_{1y}) / r \\ 6) m_9 + m_1 = (A_{3z} - A_{1z}) / r \\ 7) m_8 + m_2 = (A_{4x} - A_{1x}) / r \\ 8) m_9 - m_1 = (A_{4y} - A_{1y}) / r \\ 9) -m_4 - m_5 = (A_{4z} - A_{1z}) / r \end{cases} \quad (20)$$

Hệ phương trình tuyến tính (20) là hệ tuyến tính với 9 ẩn số  $m_i; i=1..9$ . Tiến hành giải hệ này nhận được:

$$\begin{cases} 1) m_1 = \dot{\omega}_x = (A_{1y} + A_{3z} - A_{1z} - A_{4y}) / 2r \\ 2) m_2 = \dot{\omega}_y = (A_{2z} + A_{4x} - A_{1x} - A_{1z}) / 2r \\ 3) m_3 = \dot{\omega}_z = (A_{1x} + A_{1y} - A_{2y} - A_{3x}) / 2r \\ 4) m_4 = \omega_x^2 = (-A_{4z} + A_{1z} - A_{2x} + A_{1x} - A_{3y} + A_{1y}) / 2r \\ 5) m_5 = \omega_y^2 = (A_{1z} - A_{4z} + A_{2x} - A_{1x} + A_{3y} - A_{1y}) / 2r \\ 6) m_6 = \omega_z^2 = (A_{2x} - A_{1x} - A_{1z} + A_{4z} - A_{3y} + A_{1y}) / 2r \\ 7) m_7 = \omega_x\omega_y = (A_{3x} - A_{1x} + A_{1y} - A_{2y}) / 2r \\ 8) m_8 = \omega_x\omega_z = (A_{4x} - A_{1x} - A_{2z} + A_{1z}) / 2r \\ 9) m_9 = \omega_y\omega_z = (A_{3z} - A_{1z} - A_{1y} + A_{4y}) / 2r \end{cases} \quad (21)$$

Để xác định vận tốc góc  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  của vật

thể xin đề xuất giải pháp ứng dụng giải thuật lọc Kalman để xác định các vận tốc góc  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  (bộ lọc Kalman là một công cụ toán học giúp cho việc đánh giá vectơ trạng thái hệ động học trên cơ sở thông tin quan sát vectơ tín hiệu đầu ra [2]).

Để ứng dụng giải thuật Kalman đối với vấn đề xác định  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  tiến hành xác lập trạng thái  $X$  cần đánh giá là  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ , tức là:

$$X = [x_1, x_2, x_3]^T = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T \quad (22)$$

Từ ba phương trình (1, 2, 3) của hệ (21) có:

$$\begin{aligned} (\omega_x(k) - \omega_x(k-1)) / \Delta T &\approx \dot{\omega}_x \\ &= (A_{1y} + A_{3z} - A_{1z} - A_{4y}) / 2r \\ (\omega_y(k) - \omega_y(k-1)) / \Delta T &\approx \dot{\omega}_y \\ &= (A_{2z} + A_{4x} - A_{1x} - A_{1z}) / 2r \\ (\omega_z(k) - \omega_z(k-1)) / \Delta T &\approx \dot{\omega}_z \\ &= (A_{1x} + A_{1y} - A_{2y} - A_{3x}) / 2r \end{aligned} \quad (23)$$

Trong các phương trình hệ (23) cũng như hệ (21) các ký hiệu  $A_{1x}, A_{1y}, A_{1z}, i=1, 2, 3, 4$  là các thành phần gia tốc thực chiếu trên các trục. Ta ký hiệu  $\tilde{A}_{1x}, \tilde{A}_{1y}, \tilde{A}_{1z}, i=1, 2, 3, 4$  là các số đo được từ các gia tốc kể trên các trục đo tương ứng, các ký hiệu  $\delta_{1x}, \delta_{1y}, \delta_{1z}, i=1, 2, 3, 4$  là các sai số đo của các gia tốc kể tương ứng,  $\Delta T$  - bước thời gian rời rạc hóa phương trình vi phân của hệ (23). Khi đó sẽ có các phương trình sau:

$$\begin{aligned} (A_{1y} + A_{3z} - A_{1z} - A_{4y}) / 2r &= \\ (\tilde{A}_{1y} + \tilde{A}_{3z} - \tilde{A}_{1z} - \tilde{A}_{4y}) \Delta T / 2r & \\ -(\delta_{1y} + \delta_{3z} - \delta_{1z} - \delta_{4y}) \Delta T / 2r & \end{aligned} \quad (24a)$$

$$\begin{aligned} (A_{2z} + A_{4x} - A_{1x} - A_{1z}) & \\ = (\tilde{A}_{2z} + \tilde{A}_{4x} - \tilde{A}_{1x} - \tilde{A}_{1z}) \Delta T / 2r & \quad (24b) \\ -(\delta_{2z} + \delta_{4x} - \delta_{1x} - \delta_{1z}) \Delta T / 2r & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (A_{1x} + A_{1y} - A_{2y} - A_{3x}) / 2r & \\ = (\tilde{A}_{1x} + \tilde{A}_{1y} - \tilde{A}_{2y} - \tilde{A}_{3x}) \Delta T / 2r & \quad (24c) \\ -(\delta_{1x} + \delta_{1y} - \delta_{2y} - \delta_{3x}) \Delta T / 2r & \end{aligned}$$

Với các đặt biến như (22) từ ba phương trình của hệ (24a), (24b), (24c) nhận được:

$$\begin{aligned} x_1(k) &= x_1(k-1) + \\ (\tilde{A}_{1y} + \tilde{A}_{3z} - \tilde{A}_{1z} - \tilde{A}_{4y}) \Delta T / & \quad (25) \\ 2r - (\delta_{1y} + \delta_{3z} - \delta_{1z} - \delta_{4y}) \Delta T / 2r & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_2(k+1) &= x_2(k) \\ + (\tilde{A}_{2z} + \tilde{A}_{4x} - \tilde{A}_{1x} - \tilde{A}_{1z}) \Delta T & \quad (26) \\ / 2r - (\delta_{2z} + \delta_{4x} - \delta_{1x} - \delta_{1z}) \Delta T / 2r & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_3(k) &= x_3(k-1) \\ + (\tilde{A}_{1x} + \tilde{A}_{1y} - \tilde{A}_{2y} - \tilde{A}_{3x}) \Delta T / & \quad (27) \\ 2r - (\delta_{1x} + \delta_{1y} - \delta_{2y} - \delta_{3x}) \Delta T / 2r & \end{aligned}$$

Phương trình (25), (26), (27) chính là phương trình động học trong thuật toán lọc Kalman.

Từ 6 phương trình (từ phương trình thứ 4 đến phương trình thứ 9) của hệ (21) chúng ta nhận được hệ phương trình tham chiếu như sau:

$$\begin{cases} a) Z_k = [z_1 \ z_2 \ z_3 \ z_4 \ z_5 \ z_6]^T \\ \quad = h(X_k) + v_k \\ b) h = [h_1(X_k) \ h_2(X_k) \ h_3(X_k) \\ \quad \quad \quad h_4(X_k) \ h_5(X_k) \ h_6(X_k)]^T \end{cases} \quad (28)$$

Trong đó các hàm  $z_i = h_i(X_k)$  là 6 phương trình (từ phương trình thứ 4 đến

phương trình thứ 9) của hệ (21) được cụ thể như sau:

$$\begin{cases} \hat{z}_1 = h_1(X_k) = \omega_x^2(k) = \hat{x}_1^2(k) \\ \hat{z}_2 = h_2(X_k) = \omega_y^2(k) = \hat{x}_2^2(k) \\ \hat{z}_3 = h_3(X_k) = \omega_z^2(k) = \hat{x}_3^2(k) \\ \hat{z}_4 = h_4(X_k) = \omega_x(k)\omega_y(k) \\ = \hat{x}_1(k)\hat{x}_2(k) \\ \hat{z}_5 = h_5(X_k) = \omega_x(k)\omega_z(k) \\ = \hat{x}_1(k)\hat{x}_3(k) \\ \hat{z}_6 = h_6(X_k) = \omega_y(k)\omega_z(k) \\ = \hat{x}_2(k)\hat{x}_3(k) \end{cases} \quad (29)$$

Hệ phương trình (29) chính là hệ phương trình tham chiếu trong giải thuật lọc Kalman.

Để có thông tin đo lường các thông số tham chiếu trong giải thuật lọc Kalman, ta thực hiện đọc các chỉ số các gia tốc kế và sau đó thực hiện các phép tính số học theo các biểu thức ở vế phải của 6 phương trình cuối hệ (21), tức là:

$$\begin{cases} z_1 = (-\hat{A}_{4z} + \hat{A}_{1z} - \hat{A}_{2x} + \hat{A}_{1x} - \hat{A}_{3y} \\ + \hat{A}_{1y}) / 2r \\ z_2 = (\hat{A}_{1z} - \hat{A}_{4z} + \hat{A}_{2x} - \hat{A}_{1x} + \hat{A}_{3y} \\ - \hat{A}_{1y}) / 2r \\ z_3 = (\hat{A}_{2x} - \hat{A}_{1x} - \hat{A}_{1z} + \hat{A}_{4z} - \hat{A}_{3y} \\ + \hat{A}_{1y}) / 2r \\ z_4 = (\hat{A}_{3x} - \hat{A}_{1x} + \hat{A}_{1y} - \hat{A}_{2y}) / 2r \\ z_5 = (\hat{A}_{4x} - \hat{A}_{1x} - \hat{A}_{2z} + \hat{A}_{1z}) / 2r \\ z_6 = (\hat{A}_{3z} - \hat{A}_{1z} - \hat{A}_{1y} + \hat{A}_{4y}) / 2r \end{cases} \quad (30)$$

Ở đây  $\hat{A}_{ix}, \hat{A}_{iy}, \hat{A}_{iz}, i=1,2,3,4$  là các số đo đọc được của các gia tốc kế ở các thời điểm gián đoạn thứ  $k$ .

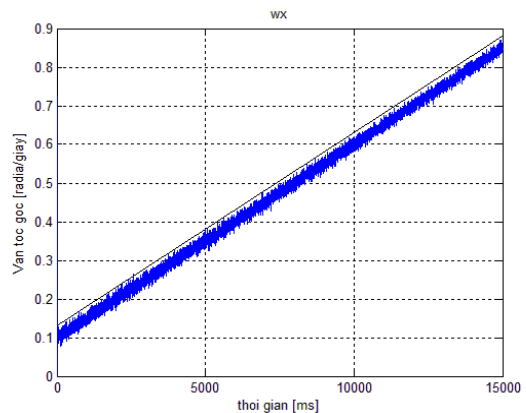
Như vậy có đủ thông tin để thực hiện giải

thuật lọc Kalman. Các ma trận G (ma trận cường độ nhiễu), Q (hiệp phương sai hệ động học), R (hiệp phương sai quan sát) được xác định trên cơ sở hệ phương trình (25), (26), (27), (28) và các thông tin về phương sai của các gia tốc kế do hãng sản xuất sản phẩm cung cấp trong tài liệu bán sản phẩm. Vấn đề này được giải quyết như trong công trình [1].

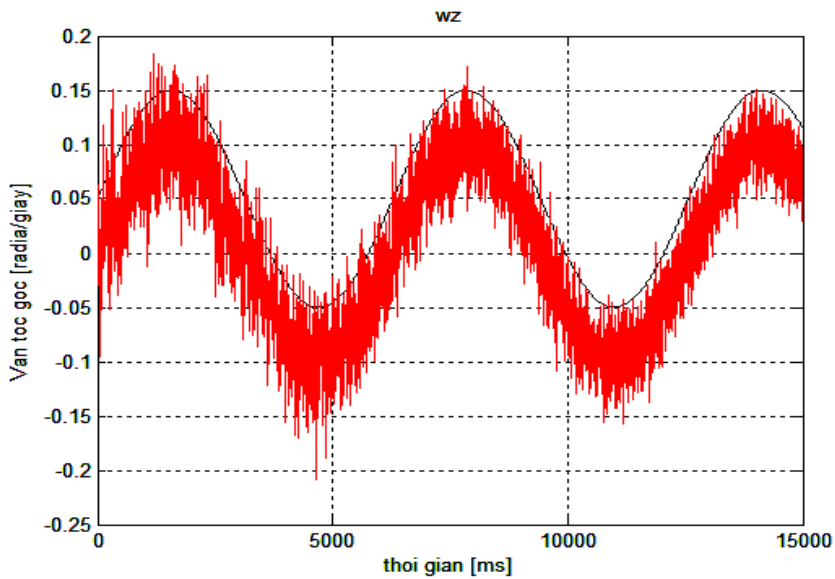
Mẫu chốt vấn đề được đề cập trong bài báo này là đã xây dựng được thuật toán xác định tốc độ góc của vật thể chuyển động từ hệ thuần túy các gia tốc kế, không có các con quay đo tốc độ góc, nên tránh được hiệu ứng trôi không.

Trên các hình 3, hình 4 và hình 5 là kết quả mô phỏng thuật toán đã trình bày. Ở các hình này đường liền nét là các tốc độ góc giả định, còn đường màu xanh là kết quả lọc Kalman từ các thông tin giả gia tốc kế. Các tốc độ góc giả định ở đây là các hàm sau:

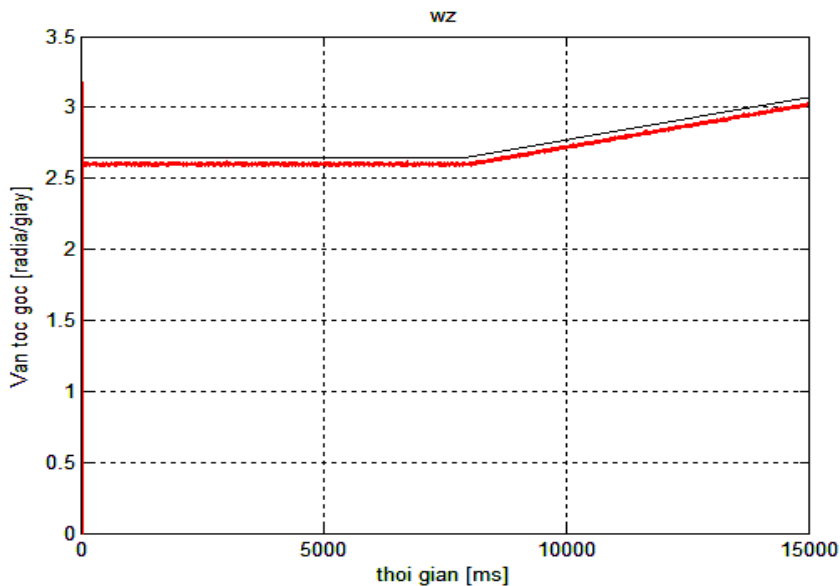
$$\begin{aligned} \omega_x(t) &= 0.005t + 0.1; \omega_y(t) = 0.1\sin(0.1t); \\ \omega_z(t) &= \begin{cases} 2.6 \text{ khi } t \leq 8000(\text{ms}) \\ 2.6 + 0.006(t-8) \text{ khi } t > 8000(\text{ms}) \end{cases} \end{aligned}$$



Hình 3. Đồ thị vận tốc góc  $\omega_x$  từ kết quả lọc Kalman hệ đo gia tốc kế



Hình 4. Đồ thị vận tốc góc  $\omega_y$  từ kết quả lọc Kalman hệ đo gia tốc kế



Hình 5. Đồ thị vận tốc góc  $\omega_z$  từ kết quả lọc Kalman hệ đo gia tốc kế

### 3. KẾT LUẬN

Qua kết quả mô phỏng cho thấy tất cả các trường hợp các tốc độ góc quay quanh các trục, được tính từ giải pháp lọc Kalman trên cơ sở xử lý thông tin đo được từ hệ gia tốc kế, trùng với các tốc độ quay đặt. Như vậy giải pháp và thuật toán đã trình

bày có tính đúng đắn và có giá trị sử dụng. Việc sử dụng hệ đa gia tốc kế tránh không phải sử dụng các con quay đo tốc độ góc (luôn có độ trôi không) và không phải dùng các thông tin từ ngoài vật thể (như thông tin từ hệ định vị vệ tinh).

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Hoàng Minh, Trần Đức Thuận, Nguyễn Sỹ Long, Nguyễn Việt Hưng. "Xây dựng phương pháp và thuật toán xác định vận tốc góc bằng hệ đa gia tốc kết hợp con quay vận tốc góc", Tạp chí Nghiên cứu khoa học và công nghệ quân sự, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự, số 34, 12-2014, tr 3-13.
- [2] Фильтрация и Стохастическое Управление в Динамических Системах. Под Редакцией К Т Леондеса, перевод с английского. Издательство "Мир" Москва 1980.
- [3] В.В. Матвеев, В.Я. Распопов. «Основы Построения Бесплатформенных Инерциальных Навигационных Систем» - СПб: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009.
- [4] Salychev O.S (1998) "Inertial Systems in Navigation and Geophysics", Bauman MSTU Press, Moscow.

### Giới thiệu tác giả:



Tác giả Nguyễn Văn Diên tốt nghiệp đại học chuyên ngành sư phạm kỹ thuật; nhận bằng Thạc sĩ chuyên ngành cơ điện tử tại Đại học Tổng hợp Leibniz Hannover - Đức năm 2007. Hiện nay tác giả là giảng viên Bộ môn Cơ điện tử - Trường Đại học Sư phạm kỹ thuật Hưng Yên. Từ năm 2012 là nghiên cứu sinh Viện Khoa học và Công nghệ quân sự.

Lĩnh vực nghiên cứu: điều khiển và đồng bộ hóa các cơ cấu dịch chuyển.



Tác giả Đặng Tiến Trung nhận bằng tốt nghiệp đại học chuyên ngành kỹ sư điện - tự động hóa tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội năm 2004, bảo vệ luận án Tiến sĩ năm 2019 tại Học viện Kỹ thuật quân sự. Hiện nay tác giả là giảng viên Khoa Kỹ thuật điện - Trường Đại học Điện lực.

Lĩnh vực nghiên cứu: ứng dụng các giải pháp điều khiển hiện đại trong hệ thống điện.



