

## TỔNG HỢP BỘ QUAN SÁT TRẠNG THÁI TRONG HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN PHƯƠNG TIỆN NGẦM

Phạm Văn Phúc<sup>1\*</sup>, Trần Đức Thuận<sup>2</sup>, Nguyễn Quang Vịnh<sup>2</sup>

**Tóm tắt:** Bài báo trình bày một phương pháp thiết kế bộ lọc tín hiệu hướng trên cơ sở bộ quan sát trạng thái trong hệ thống điều khiển của phương tiện ngầm. Trong đó chuyển động của phương tiện ngầm được coi như vật rắn chuyển động 6 bậc tự do; hệ thống lái tự động trong phương tiện ngầm được đề xuất sử dụng cấu trúc bộ quan sát trạng thái từ đó sẽ tính toán và lọc thành phần tần số thấp ra khỏi nhiễu do dòng chảy đại dương tác động đến PTN. Kết quả mô phỏng bằng MATLAB/SIMULINK đã chứng minh tính đúng đắn của thuật toán.

**Từ khóa:** Bộ quan sát trạng thái; Phương tiện ngầm.

### 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Có rất nhiều các công trình nghiên cứu về phương pháp tuyến tính hóa, với các kết quả thu được cho thấy phương pháp này có triển vọng rất lớn trong điều khiển phi tuyến [2,5,7]. Song nó lại có nhược điểm là phải xác định được chính xác giá trị của các biến trạng thái của đối tượng (thông thường là đo trực tiếp bằng các thiết bị sensor) để đưa phản hồi về bộ điều khiển, nhưng với phương tiện ngầm có nhiều biến trạng thái không thể đo đếm trực tiếp được. Vì vậy, trong bài báo này tác giả đã đưa ra một phương pháp để xác định giá trị của các biến trạng thái - phương pháp quan sát thông qua các tín hiệu vào/ra, thay cho việc đo trực tiếp.

### 2. NỘI DUNG

#### 2.1. Phương trình chuyển động phương tiện ngầm

Vị trí và góc định hướng của phương tiện ngầm  $\eta = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$  được mô tả tương đối trong hệ tọa độ cố định tâm trái đất OXYZ, vận tốc tuyến tính và vận tốc góc  $v = [u, v, w, p, q, r]^T$  được mô tả trong hệ tọa độ gắn liền  $C_b X_b Y_b Z_b$  có tâm trùng với tâm nổi  $C_b$  (hình 1).

Phương trình động học phương tiện ngầm được mô tả[1]:

$$\dot{\eta} = J(\eta)v \quad (1)$$

trong đó,  $J(\eta)$  là ma trận chuyển tọa độ.

Phương tiện ngầm tự hành (AUV) được điều khiển bởi hai bánh lái trong mặt phẳng ngang, hai bánh lái theo mặt phẳng đứng. Giả sử chuyển động phương tiện ngầm chỉ xét đến sự ảnh hưởng của dòng chảy, bỏ qua sự ảnh hưởng của sóng và gió.

Khi xét đến sự ảnh hưởng của vận tốc dòng chảy tác động lên phương tiện ngầm, phương trình chuyển động của phương tiện ngầm sẽ là (Sorensen, 2005a):

$$(M_{RB} - M_A)\dot{v} = (C_A(v_{td})v_{td} - C_{RB}(v)v) + D(v_{td})v_{td} + L(v_{td})v_{td} + g(\eta) + \tau \quad (2)$$

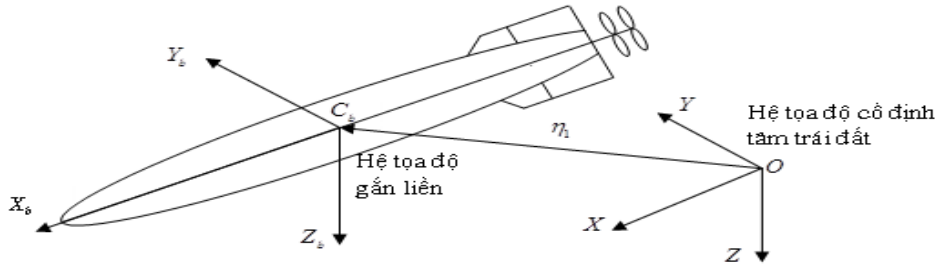
trong đó,  $M_{RB}$  là ma trận quán tính;  $C_{RB}$  là ma trận hướng tâm Coriolis;  $M_A, C_A(v_{td})$  là ma trận quán tính và ma trận hướng tâm Coriolis khối nước kèm;  $D(v_{td})$  là ma trận lực và mô men thủy động;  $g(\eta)$  là véc tơ lực và mô men phục hồi;  $L(v_{td})$  là ma trận lực và mô men của bánh lái;  $\tau = \tau_{bl} + \tau_{cvit}$  là lực và mô men của bánh lái, vây và chân vịt;  $v_{td} = v - v_c = [u_{td}, v_{td}, w_{td}, p, q, r]^T$

với  $v_c = [u_c, v_c, w_c, 0, 0, 0]^T$  là vận tốc dòng chảy đối với hệ tọa độ gắn liền vật thể.

Giả thiết vận tốc chuyển động thẳng của AUV luôn là hằng số  $u = u_0$ , từ (2) ta có hệ phương trình chuyển động tổng quát của AUV là [2],[4]:

$$\begin{cases} (m - X_{\dot{u}})\dot{u} = X_{uu}uu + (X_{v|v}|v| + X_{uv}u)v + (X_{uw}u + X_{|w|w}|w|)w + X_{up}up + (X_{wq}w + X_{qq}q - mw)q + (X_{vr}v + X_{rr}r + mv)r + X_{pl} + X_{u\delta_1}u^2\delta_1 \\ (m - Y_{\dot{v}})\dot{v} - Y_{\dot{r}}\dot{r} = (Y_{v|v}|v| + Y_{uv}u_0)v + mpw + Y_{vp}wp + Y_{pq}pq + (Y_wu - mu)r + Y_{u\delta_2}u^2\delta_2 \\ (m - Z_{\dot{w}})\dot{w} - Z_{\dot{q}}\dot{q} = mqu + (Z_{|w|w}|w| + Z_{uw}u)w + (Z_{vp}v + Z_{rp}r - mv)p + Z_{uq}uq + Z_{u\delta_3}u^2\delta_3 \\ (I_{xx} - K_{\dot{p}})\dot{p} = K_{uu}uu + K_{up}up + (I_{yy} - I_{zz})qr + z_f B \cos \theta \sin \gamma + K_{u\delta_4}u^2\delta_4 \\ -M_{\dot{w}}\dot{w} + (I_{yy} - M_{\dot{q}})\dot{q} = M_{uw}uw + (M_{vp}v + M_{rp}r)p + (I_{zz} - I_{xx})rp + M_{uq}uq + z_f B \sin \theta + x_f B \cos \theta \cos \phi + M_{u\delta_5}u^2\delta_5 \\ -N_{\dot{v}}\dot{v} + (I_{zz} - N_{\dot{r}})\dot{r} = N_{uv}uv + N_{vp}wp + (I_{xx} - I_{yy})pq + N_{pq}pq + N_{ur}ur - x_f B \cos \theta \sin \gamma + N_{u\delta_6}u^2\delta_6 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \dot{x} = u_0 \cos \psi \cos \phi + v(\cos \psi \sin \phi \sin \theta - \sin \psi \cos \phi) + w(\cos \psi \sin \theta \cos \phi + \sin \psi \sin \phi) \\ \dot{y} = u_0 \sin \psi \cos \theta + v(\sin \psi \sin \theta \sin \phi + \cos \psi \cos \phi) + w(\sin \psi \sin \theta \cos \phi - \cos \psi \sin \phi) \\ \dot{z} = -u_0 \sin \theta + v(\cos \theta \sin \phi) + w \cos \theta \cos \phi \\ \dot{\phi} = p + q \tan \theta \sin \phi + r \tan \theta \cos \phi \\ \dot{\theta} = q \cos \phi - r \sin \phi \\ \dot{\psi} = q \sin \phi \sec \theta + r \cos \phi \sec \theta \end{cases} \quad (4)$$



Hình 1. Các hệ tọa độ tham chiếu chuyển động của AUV.

Từ các phương trình (3) và (4) có thể xây dựng được phương trình chuyển động riêng cho kênh điều khiển theo hướng, theo độ sâu và điều khiển giảm lắc [4].

Xét trong mặt phẳng ngang với giả thiết tốc độ là không đổi và  $w = p = q = 0$ , góc hướng nhỏ, các thông số ban đầu  $\psi_0 = r_0 = 0$  khi đó:

$$\dot{\psi} = r; \quad \dot{x} = u_0 \cos \psi - v \sin \psi \approx u_0 - v\psi; \quad \dot{y} = u_0 \sin \psi + v \cos \psi \approx u_0\psi + v.$$

Chuyển động của AUV trong mặt phẳng ngang được mô tả bởi hệ phương trình sau [5]:

$$\begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & -Y_{\dot{r}} & 0 \\ -N_{\dot{v}} & I_{zz} - N_{\dot{r}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{v|v}|v_{td}| + Y_{uv}u_{td} & -mu_{td} + Y_{ur}u_{td} & 0 \\ N_{uv}u_{td} & N_{ur}u_{td} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{td} \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{u\delta_2}u_{td}^2 \\ N_{u\delta_6}u_{td}^2 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_h \quad (5)$$

Tương tự như vậy, chuyển động của AUV trong mặt phẳng đứng được mô tả bởi hệ phương trình sau:

$$\begin{bmatrix} m-Z_{\dot{w}} & -Z_{\dot{q}} & 0 & 0 \\ -M_{\dot{w}} & I_{yy}-M_{\dot{q}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{|w|w} |w_{td}| + Z_{uw} u_{td} & Z_{uq} u_{td} & 0 & 0 \\ M_{uw} u_{td} & M_{uq} u_{td} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} w_{td} \\ q \\ \theta \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Z_{uu\delta_s} u_{td}^2 \\ M_{uu\delta_s} u_{td}^2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \delta_s \quad (6)$$

Sử dụng hệ phương trình (5),(6) để xây dựng bài toán tổng hợp bộ quan sát trạng thái cho chuyển động theo góc hướng và độ sâu với các hệ số được tính toán dựa vào các chỉ số kích thước của một chủng loại AUV.

**2.2. Tổng hợp bộ quan sát trạng thái cho chuyển động của góc hướng**

Bộ quan sát trạng thái theo góc hướng được xây dựng sao cho đầu vào là góc bề lái hướng  $r$ , đầu ra là góc hướng  $\psi$  thay đổi trong giới hạn cho phép.

Đặt các biến trạng thái:

$$\begin{aligned} x_1 &= r \\ x_2 &= \psi \end{aligned}$$

Hệ thống chuyển động góc hướng của AUV được viết dưới dạng [6]:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \dot{x}_2 \\ \dot{x}_2 &= 0.0225x_3 - 0,2331x_2 + 0.0258\delta_r \\ \dot{x}_3 &= -0,1114x_3 - 0,2647x_2 - 0,0211\delta_r \end{aligned} \quad (7)$$

Phương trình trên có thể viết lại như sau :

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= f + b\delta_r, f = 0.0225x_3 - 0,2331x_2 \end{aligned} \quad (8)$$

Trong đó  $f$  là thành phần bất định, với loại AUV đang nghiên cứu [7] thì chọn  $b = 0.0268$

Bộ quan sát nâng cao đề xuất có dạng:

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2 + \lambda |x_1 - z_1|^{1/2} \text{sign}(x_1 - z_1) + b\delta_r \\ \dot{z}_2 &= \alpha \text{sign}(x_1 - z_1) \end{aligned} \quad (9)$$

trong đó  $z_1, z_2$  là các biến trạng thái ước lượng cho  $x_1, x_2$ .

Khi đó sai số được tính như sau:

$$e_1 = x_1 - z_1, e_2 = -z_2 + f \quad (10)$$

Lấy đạo hàm hai vế sai số  $\dot{e}_1 = \dot{x}_1 - \dot{z}_1$ , thay vào (8), (9) ta thu được:

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= -e_2 - \lambda |e_1|^{1/2} \text{sign}(e_1) + f \\ \dot{e}_2 &= f - \alpha \text{sign}(e_1) \end{aligned} \quad (11)$$

Sau khoảng thời gian xác định  $z_1 = x_1, z_2 = f = F(t, x_1, x_2, z_2)$  với:

$$F(t, x_1, x_2, z_2) = f(t, x_1, x_2, U(t, x_1, x_2)) - f(t, x_1, z_2, U(t, x_1, x_2)) + \xi(t, x_1, x_2, U(t, x_1, x_2)) \lim_{x \rightarrow \infty} \quad (12)$$

Giả sử rằng các trạng thái của hệ thống bị giới hạn, và tồn tại một hằng số  $f^+$  thỏa mãn các bất phương trình sau:

$$|F(t, x_1, x_2, z_2)| < f^+ \quad (13)$$

với:  $t, x_1, x_2$  bất kỳ và  $|z_2| < 2^{|x_2|}$  ta nhận được:

$$\alpha > f^+; \lambda > \sqrt{\frac{2}{\alpha - f^+}} \frac{(\alpha + f^+)(1 + p)}{(1 - p)} \text{ với } p \text{ được chọn } 0 < p < 1 \quad (14)$$

Khi  $\alpha, \lambda$  thỏa mãn theo điều kiện trên thì các biến trạng thái ước lượng hội tụ, khi đó các sai số  $e_1, e_2$  hội tụ đến 0,  $e_1, e_2$  thỏa mãn:

$$\dot{e}_1 = \dot{e}_2 - \lambda |\dot{e}_1|^{1/2} \text{sign}(e_1) \quad (15)$$

$$\dot{e}_2 \in [-f^+, +f^+] - \alpha \text{sign}(e_1) \quad (16)$$

hay:

$$e_2 \in [\alpha - f^+, \alpha + f^+] \text{ với } e_1 = 0. \quad (17)$$

$$\ddot{e} \in [-f^+, f^+] - \left(\frac{1}{2} \lambda \frac{\dot{e}_1}{|e_1|^{1/2}} + \alpha \text{sign}(e_1)\right) \quad (18)$$

Khi:  $e_1 = 0 \rightarrow e_2 = x_2 - 0 = x_2$

$e_1 > 0$  với giá trị khởi tạo  $x_2 > 0$

$e_1 < 0$  với giá trị khởi tạo  $x_2 < 0$

- Xét khi  $e_1 > 0 \Rightarrow \dot{e}_1 > 0$ , khi đó quỹ đạo được xác định giữa trục  $e_1 = 0, \dot{e}_1 = 0$  và quỹ đạo của phương trình  $\ddot{e}_1 = -(\alpha - f^+), \ddot{e}_1 \leq f^+ - \alpha \text{sign} e_1 - \frac{1}{2} \lambda \frac{\dot{e}_1}{|e_1|^{1/2}} < 0$

Hiển nhiên rằng khi  $e_2 = \dot{e}_1$ , ở thời điểm  $e_1 = 0$  và xét:

$$\dot{e}_2 = F(x_1, x_2, z_2, u) - \alpha \text{sign}(e_1) \quad (19)$$

ta được  $0 < \alpha - f^+ \leq |\dot{e}_2| \leq \alpha + f^+$ , vì vậy  $|\dot{e}_i| \geq (\alpha - f^+)t_i$ , với  $t_i$  là khoảng thời gian khi  $e_1 = 0$ , do đó ta có:

$$t_i \leq \frac{|\dot{e}_i|}{(\alpha - f^+)} \quad (20)$$

Thời gian hội tụ tổng được ước lượng theo:

$$T \leq \sum \frac{|\dot{e}_i|}{(\alpha - f^+)} \quad (21)$$

Trong thực tế với một loại AUV đang xét [7] chọn các giá trị sau:  $a_1 = 1.1, a_2 = 1.5$   
 $\alpha = a_1 f^+, \lambda = a_2 (f^+)^{1/2}$

### 2.3. Tổng hợp bộ quan sát trạng thái cho hệ thống ổn định độ sâu

Bộ quan sát trạng thái cho hệ thống ổn định sâu với đầu ra là góc chúc góc  $\theta$  thay đổi theo giới hạn cho trước. Khi đó các biến trạng thái được đặt như sau:

$$\begin{aligned}x_1 &= z \\x_2 &= \theta \\x_3 &= q\end{aligned}\tag{22}$$

Hệ thống chuyển động của AUV theo độ sâu được viết dưới dạng sau[6]:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= -u_0 x_2 + f_1(.) \\ \dot{x}_2 &= x_3 \\ \dot{x}_3 &= f_2(.) + b\delta_s\end{aligned}\tag{23}$$

trong đó:  $u_0$  là vận tốc chuyển động của AUV;  $b\delta_s$  là mô men sinh ra bởi góc bẻ lái sâu;  $f_1(.)$ ,  $f_2(.)$  là các hàm số phụ thuộc vào tham số cụ thể của AUV và các thành phần không xác định chính xác của mô hình.

Bộ quan sát nâng cao cho hệ thống ổn định độ sâu có dạng như sau:

$$\begin{aligned}\dot{z}_1 &= z_2 + k_1 |e_1|^{2/3} \text{sign}(e_1) \\ \dot{z}_2 &= z_3 + k_2 |e_1|^{1/3} \text{sign}(e_1) \\ \dot{z}_3 &= k_3 \text{sign}(e_1) + b\delta_s\end{aligned}\tag{24}$$

Với  $e_1 = x_1 - z_1, e_2 = -z_2 + f_1, e_3 = -z_3 + f_2$ ;  $|f_1'| < f_{01}, |f_2'| < f_{02}$ ; và  $\delta_s$  là tín hiệu điều khiển trượt:

$$\delta_s = -(\dot{e} - K \text{sat}(s)), s = \alpha e + \dot{e}, e = x - x_d$$

Với  $s$  là mặt trượt, ở đây ta lựa chọn hàm  $\text{sat}$  thay cho hàm  $\text{sign}$  để chống hiện tượng chattering.

Khi đó động học sai số hệ thống là:

$$\begin{aligned}\dot{e}_1 &= -e_2 - k_1 |e_1|^{2/3} \text{sign}(e_1) + f_1 \\ \dot{e}_2 &= -e_3 - k_2 |e_1|^{1/3} \text{sign}(e_1) + f_1' \\ \dot{e}_3 &= -k_3 \text{sign}(e_1) + f_2'\end{aligned}\tag{25}$$

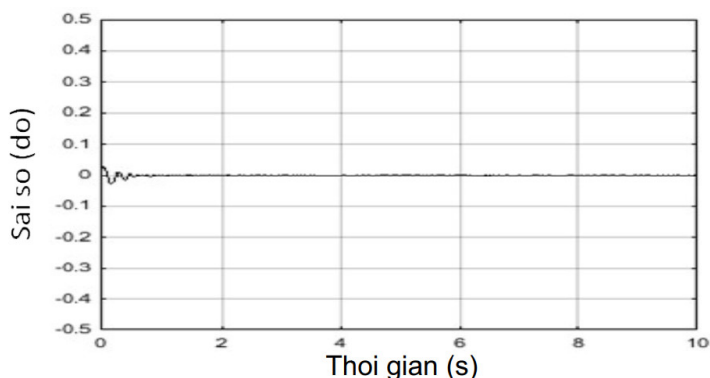
Như vậy  $e_1, e_2$  và  $e_3$  sẽ hội tụ tới 0 trong thời gian xác định  $t > T_0$  bằng việc lựa chọn các hệ số khuếch đại  $k_1, k_2$  và  $k_3$  phù hợp

Sau khi các sai số của hệ thống hội tụ tới 0,  $x_1 = z_1, z_2 = f_1, z_3 = f_2$  sau thời gian xác định  $t > T_0$ .

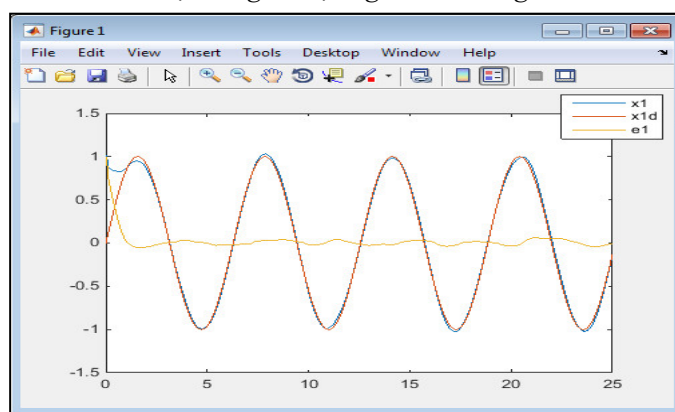
### 3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Với dữ liệu đầu vào là một chủng loại AUV có các thông số như sau[7]:  $m = 175\text{kg}$ ;  $I_{xx} = 14\text{kgm}^2$ ;  $I_{yy} = 13\text{kgm}^2$ ;  $I_{zz} = 16\text{kgm}^2$ ;  $X_u = 120\text{Ns} / m$ ;





Hình 4. Kết quả mô phỏng sai số giữa giá trị ước lượng và biến trạng thái của hệ thống ổn định góc lái hướng.



Hình 5. Kết quả mô phỏng bộ quan sát ổn định độ sâu của AUV.

Qua kết quả mô phỏng:

- Thời gian hội tụ giữa sai số của giá trị ước lượng và biến trạng thái của hệ thống ổn định góc hướng nhanh.
- Trong hệ thống ổn định độ sâu, giá trị ước lượng của hệ thống nhận được phù hợp trạng thái của hệ thống.
- Tuy nhiên do ảnh hưởng của dòng chảy đại dương, quỹ đạo chuyển động theo các biến trạng thái ước lượng chưa tiếp cận được quỹ đạo thực tế. Do khuôn khổ bài báo nên tác giả chỉ tập trung trình bày bộ quan sát trạng thái.

#### 4. KẾT LUẬN

Trong môi trường nước, các đặc tính động học của phương tiện ngầm có tính phi tuyến cao và luôn chịu sự tác động của các thành phần bất định nên việc xác định chính xác các giá trị của các biến trạng thái là hết sức khó khăn. Bộ quan sát nâng cao đã nêu với ưu điểm là số lượng tính toán ít, không cần phải tính đạo hàm của các sai số nhưng vẫn đảm bảo được khả năng hội tụ nhanh giữa giá trị ước lượng và giá trị của hệ thống.

Các kết quả trong bài báo đã được mô phỏng kiểm nghiệm trên Matlab Simulink và khẳng định được tính đúng đắn của các phương pháp đề xuất. Đây là cơ sở đầu vào để khảo sát đánh giá quỹ đạo chuyển động của AUV khi có tác động của bên ngoài.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. T. I.Fossen, *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, Chichester: John Wiley & Sons, 1994.

- [2]. Xiao Liang, “Dynamic Modeling and Computer Simulation for Autonomous Underwater Vehicles with Fins”, journal of computers, vol. 8, no. 4, april 2013, pp 1058-1064.
- [3]. Tutorial.S Drakunov, V Utkin, “Sliding mode observers for robust fault reconstruction in nonlinear systems”, Proceedings of the 34th IEEE Conference, 2012, pp 373-383
- [4]. Agus Budiyo, “Advances in unmanned underwater vehicles technologies: Modeling, control and guidance perspective”, Indian Journal of Marine Sciences Vol. 38(3), September 2009, pp. 282-295
- [5]. Jorge Davila, Leonid Fridman, and Arie Levant, “Second-Order Sliding-Mode Observer for Mechanical Systems”, IEEE transactions on automatic control, vol. 50, no. 11, november 2005, pp 1785-1789
- [6]. S. K. Spurgeon, “Sliding mode observers: a survey,” Intern. J. Syst. Sci., vol. 39, 2008, pp 751–764.
- [7]. Trần Đức Thuận, Nguyễn Quang Vịnh, Trương Duy Trung, “Mô hình hóa và nhận dạng tên lửa chống ngầm”, Tạp chí Nghiên cứu KH&CN Quân sự, Viện KH&CN quân sự, (28), 2013, tr3-11.

#### ABSTRACT

#### CONSTRUCT AN OBSERVER OF CONTROL SYSTEM FOR UNDERWATER VEHICLES

*The paper presents a method for designing a signal filter based on an observer in a underwater vehicle control system. In which the motion of an underwater vehicle is regarded as a solid body moving 6 degrees of freedom; The autopilot system in the underwater vehicle is proposed using a state observer structure to calculate and filter the low frequency component of the underwater vehicle out of the disturbance due to ocean currents. MATLAB / SIMULINK simulation results demonstrate the correctness of the algorithm, indicating that the system performs well in this model.*

**Keywords:** Observer; Underwater vehicles.

*Nhận bài ngày 01 tháng 7 năm 2018*

*Hoàn thiện ngày 10 tháng 9 năm 2018*

*Chấp nhận đăng ngày 20 tháng 9 năm 2018*

*Địa chỉ:* <sup>1</sup> Trường Cao đẳng Kỹ thuật Hải quân;  
<sup>2</sup> Viện Khoa học và Công nghệ quân sự.  
\*Email: phucanhquansg@gmail.com.