

Định vị phương tiện ngầm trên cơ sở kết hợp thiết bị dẫn đường quán tính và thiết bị đo vận tốc theo hiệu ứng dopple

A system for positioning underwater vehivles based on combination of IMU and Doppler speed measument enquipment

Phạm Văn Phúc, Nguyễn Quang Vịnh, Nguyễn Đức Ánh
Viện KH-CN Quân sự, Trường Đại học Phòng cháy chữa cháy
e-Mail: vinhquang2808@yahoo.com

Tóm tắt

Bài báo trình bày phương pháp kết hợp thiết bị dẫn đường quán tính với thiết bị đo vận tốc trên cơ sở bộ lọc Kalman mở rộng nhằm nâng cao độ chính xác vận tốc thiết bị phương tiện ngầm. Kết quả nhận được khi thử nghiệm trên bàn xoay 3 bậc tự do của hãng Aeromsmith và thử nghiệm trên robot ngầm cứu nạn cứu hộ của Đại học Phòng cháy chữa cháy đã minh chứng tính đúng đắn của thuật toán.

Từ khóa: Bộ lọc kalman, Thiết bị đo lường quán tính, Phương tiện ngầm

Abstract: This article describes the combination method of the inertial navigation equipment and the velocity meter based on the expanded Kalman filter in order to increase the precision of the underground vehicle's velocity. The obtained results when tested on a turntable 3 degrees of freedom of Aeromsmith and testing firm in underground rescue robot Rescue Fire Fighting University have demonstrated the correctness of the algorithm.

Keywords: Kalman filter, IMU, AUV

Chữ viết tắt

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
AUV		Phương tiện ngầm
IMU		Thiết bị đo lường quán tính
DVL		Đo vận tốc theo hiệu ứng dopple
DS		Cảm biến áp suất
EC		La bàn điện tử

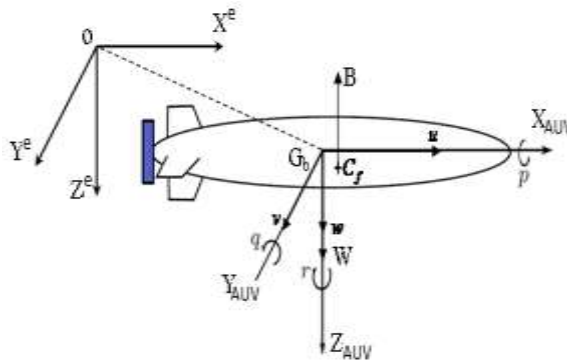
Phần mở đầu

Phương tiện ngầm (AUV) có nhiều loại khác nhau như tàu ngầm, ngư lôi, rô bốt ngầm dùng cho nhiều mục đích khác nhau như trong hoạt động quân sự, thám hiểm đáy đại dương, thăm dò khai thác tài nguyên biển. Có nhiều phương pháp khác nhau để dẫn đường phương tiện ngầm như phương pháp dẫn đường âm thanh, phương pháp dẫn đường theo tính chất vật lý phụ thuộc nhiều độ chính xác của bản đồ đáy biển đã xây dựng. Phương tiện ngầm cũng có thể nổi lên mặt nước để cập nhật vị trí thông qua GPS/GNSS nhưng sẽ ảnh hưởng đến quỹ đạo, thời gian hành trình và yếu tố bí mật hoạt động. Một số thiết bị ngầm sử dụng phao giả GPS hay kéo dài Anten thu sóng trên mặt nước nhưng lại gặp phải sự hạn chế độ sâu hoạt

động [4,8]. Giải pháp cho những AUV hiện đại là kết hợp nhiều thiết bị đo như: thiết bị đo vận tốc theo hiệu ứng Doppler, cảm biến áp suất, la bàn điện với hệ thống dẫn đường quán tính ở các hình thức khác nhau để cập nhật vị trí.

Các hệ tọa độ tham chiếu

Hệ tọa độ chuẩn (NED) có gốc tọa độ tại tâm trọng lực AUV, các trục theo hướng bắc (N), hướng đông (E) và hướng xuống dưới (D) tạo thành tam diện thuận. Mối quan hệ giữa hệ tọa độ chuẩn và hệ tọa độ cố định tâm trái đất $X^e Y^e Z^e$ [1]. Vị trí AUV trong mặt phẳng đứng z là độ sâu tương đối so với mặt biển, vị trí trong mặt phẳng ngang là vĩ độ φ và kinh độ λ được mô tả trong hệ tọa độ $X^e Y^e Z^e$, trong khi đó vận tốc $v_{NED} = v_N \ v_E \ v_D^T$ được xét trong hệ tọa độ NED . Tương tự hệ tọa độ NED , hệ tọa độ liên kết có gốc tọa độ tại tâm trọng lực AUV tuy nhiên các trục của nó trùng với các trục của đối tượng. Hình 1 biểu diễn phương tiện ngầm qua các hệ tọa độ [8].

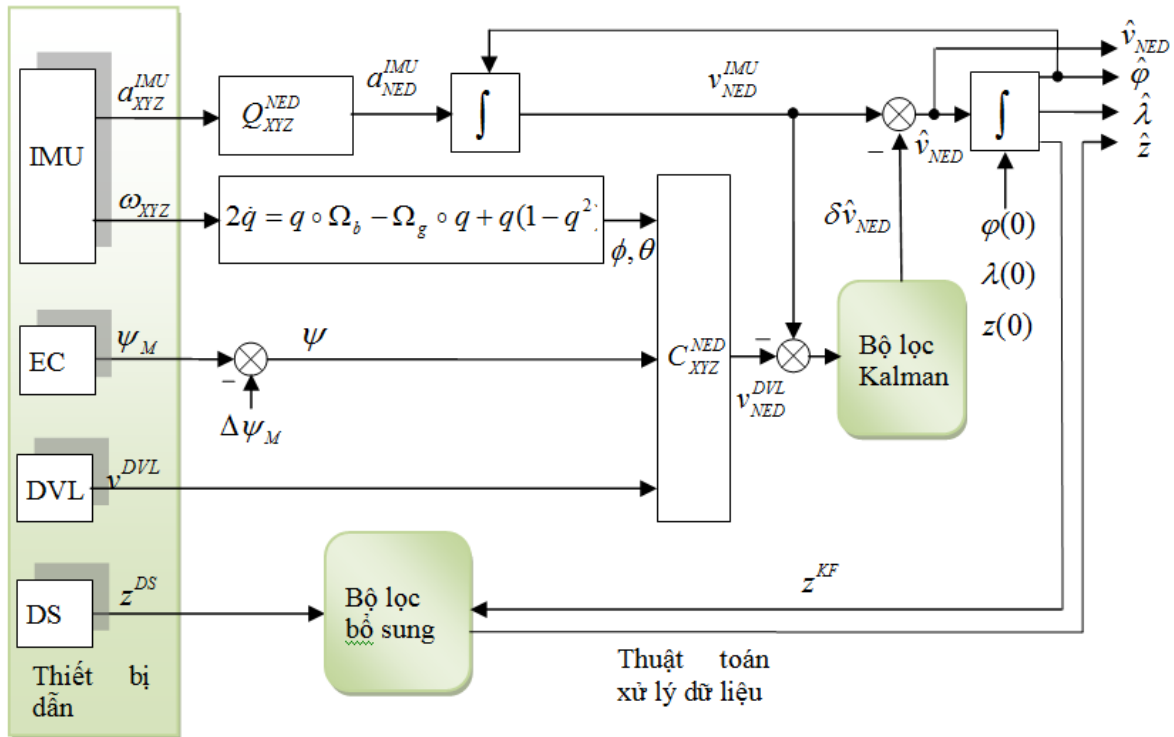


Hình 1: Biểu diễn phương tiện ngầm qua các hệ tọa độ

Hệ thống định vị phương tiện ngầm

3.1 Cấu trúc hệ thống định vị

Hệ thống định vị nhằm cung cấp thông tin về vị trí (φ, λ, z) trong hệ tọa độ cố định tâm trái đất $X^e Y^e Z^e$ và về vận tốc v_{NED} của phương tiện ngầm trong hệ tọa độ chuẩn NED dựa trên phép đo lường của thiết bị dẫn đường. Cấu trúc hệ thống định vị như hình 2 [1,2,4,8].



Hình 2: Cấu trúc hệ thống định vị AUV

3.1.1 Thiết bị đo lường quán tính (IMU)

IMU gồm 3 gia tốc kế và 3 cảm biến tốc độ góc có các trục đặt trùng với các trục của hệ tọa độ liên kết [5] cho phép cung cấp các thành phần gia tốc trong hệ tọa độ liên kết $a_{XYZ}^{IMU} = [a_x \ a_y \ a_z]^T$ và tốc độ góc quay tuyệt đối của hệ tọa độ liên kết $\omega_{XYZ} = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$. Phép đo của gia tốc kế và cảm biến tốc độ tồn tại các dạng sai số khác nhau gồm sai số ngẫu nhiên và độ trôi của các cảm biến gia tốc, vận tốc góc, sai số tăng nhanh theo thời gian trong các ứng dụng kéo dài.

3.1.2 La bàn điện

La bàn điện là thiết bị có chi phí thấp, kích thước nhỏ, công suất nhỏ nhưng được ứng dụng hiệu quả để đo góc hướng ψ_M (góc giữa trục dọc của hệ tọa độ liên kết với phương bắc tại điểm đang xét) với sai số dưới 1% [7]. Tuy nhiên tùy thuộc vào khu vực sử dụng mà cần phải hiệu chỉnh la bàn một lượng $\Delta\psi_M$ theo từ trường của khu vực đó để tạo ra hướng đi đúng ψ của đối tượng. Ngoài ra, la bàn bị ảnh hưởng bởi chính các nguồn điện sinh ra trong bản thân đối tượng sử dụng nó.

3.1.3 Thiết bị đo vận tốc theo hiệu ứng Doppler

DVL thường có 4 đầu thu phát xung âm thanh được gắn trong đối tượng sao cho các đầu thu phát quay xuống dưới, các đầu thu phát được thiết kế sao cho tạo ra góc lệch so với đáy biển [3]. Nếu xung âm phát đi từ DVL tới được đáy biển thì bộ thu phát sẽ nhận được xung phản hồi “bottom-lock”, kết hợp sự chuyển dịch Doppler từ 4 đầu thu DVL để xác định các thành phần vận tốc tương đối so với đáy biển $v^{DVL} = [v_x \ v_y \ v_z]^T$ trong hệ tọa độ liên kết.

Độ chính xác và độ sâu tối đa của DVL phụ thuộc vào tần số làm việc (bảng 1) [2]. Tuy nhiên, độ sâu

này mang tính lý tưởng đối với đáy biển cứng, có tính phản xạ sóng âm tốt. Trong điều kiện làm việc ở vùng biển có độ sâu vượt quá giới hạn làm việc của DVL có thể sử dụng DVL đo vận tốc AUV so với bề mặt nước biển theo nguyên lý phản xạ sóng âm tại bề mặt nước – không khí. Tuy nhiên, trong trường hợp này có ảnh hưởng sai số dòng chảy bề mặt [6,7].

Tần số	Độ chính xác	Độ sâu
150kHz	$\pm 0.5\%$ khi vận tốc $\pm 2\text{m/s}$	425-500m
300kHz	$\pm 0.4\%$ khi vận tốc $\pm 2\text{m/s}$	200m
600kHz	$\pm 0.2\%$ khi vận tốc $\pm 1\text{m/s}$	90m
1200kHz	$\pm 0.2\%$ khi vận tốc $\pm 1\text{m/s}$	30m

Bảng 1: Giới hạn làm việc của DVL

3.1.4 Cảm biến áp suất (DS)

DS cho phép xác định độ sâu tương đối của đối tượng so với mặt biển z^{DS} với độ chính xác và tốc độ cập nhật cao. Cảm biến áp suất dựa trên nguyên lý đo áp suất thủy tĩnh theo công thức [8]:

$$\partial p / \partial z = \rho g \quad (1)$$

Trong đó, p là áp suất thủy tĩnh; z là độ sâu tại vị trí đo so với mặt nước; ρ là mật độ nước phụ thuộc vào độ sâu, độ mặn và nhiệt độ nước biển tại vị trí AUV hoạt động; g là gia tốc trọng trường phụ thuộc vào vị trí của AUV. Các loại DS hiện đại có thể sử dụng đến độ sâu có áp suất 6000dbar với độ chính xác đến $\pm 0.01\%$. DS có kích thước và công suất nhỏ cho phép ứng dụng trên nhiều thiết bị ngầm.

3.2 Thuật toán xử lý dữ liệu

Thuật toán xử lý tín hiệu từ các thiết bị dẫn đường gồm các bước: Tính toán vận tốc của AUV trong hệ tọa độ chuẩn từ gia tốc đo được bởi IMU, biến đổi vận tốc v^{DVL} từ hệ tọa độ gắn liền sang hệ tọa độ

chuẩn v_{NED}^{DVL} bằng cách sử dụng các góc trạng thái từ IMU và EC, ước lượng sai số vận tốc IMU thông qua bộ lọc Kalman và bù hồi tiếp để hiệu chỉnh sai số vận tốc IMU, tính toán vị trí AUV thông qua vận tốc IMU đã được hiệu chỉnh, lọc bỏ sóng độ sâu z^{DS} nhận được từ cảm biến áp suất và độ sâu ước lượng z^{KF} theo tính toán từ vận tốc đã hiệu chỉnh của IMU.

3.2.1 Tính toán vận tốc IMU

Gia tốc trong hệ tọa độ chuẩn a_{NED}^{IMU} được xác định từ chỉ số của gia tốc kể trong hệ tọa độ liên kết a_{XYZ}^{IMU} theo công thức [8]:

$$a_{NED}^{IMU} = Q_{XYZ}^{NED}; a_{XYZ}^{IMU} = a_N, a_E, a_D \quad (1,2)$$

Trong đó, Q_{XYZ}^{NED} là ma trận cosin chỉ phương viết theo tham số Rodrigo-Hamilton [8]:

$$Q_{XYZ}^{NED} = \begin{bmatrix} 2q_0^2 + 2q_1^2 - 1 & 2q_1q_2 + 2q_0q_3 & 2q_1q_3 - 2q_0q_2 \\ 2q_1q_2 - 2q_0q_3 & 2q_0^2 + 2q_2^2 - 1 & 2q_2q_3 + 2q_0q_1 \\ 2q_1q_3 + 2q_0q_2 & 2q_2q_3 - 2q_0q_1 & 2q_0^2 + 2q_3^2 - 1 \end{bmatrix}$$

Với q là số Quaternion siêu phức được ký hiệu $q = q_0 + q_1i + q_2j + q_3k$, các tham số Rodrigo-Hamilton q_i được xác định từ phương trình [8]:

$$2\dot{q} = q \circ \Omega_b - \Omega_g \circ q + q(1 - q^2) \quad (3)$$

trong đó, dấu " \circ " là ký hiệu phép nhân hai số siêu phức, $\Omega_b = 0 + \omega_x i + \omega_y j + \omega_z k$ là tốc độ góc quay tuyệt đối của hệ tọa độ liên kết, $\Omega_g = 0 + \omega_{gx} i + \omega_{gy} j + \omega_{gz} k$ là tốc độ góc quay tuyệt đối của hệ tọa độ chuẩn do trái đất có hình dạng cầu quay với vận tốc góc U , các thành phần $\omega_{gx}, \omega_{gy}, \omega_{gz}$ được xác định từ các biểu thức [8]: $\omega_{gx} = (U + \dot{\lambda}) \cos \varphi$, $\omega_{gy} = (U + \dot{\lambda}) \sin \varphi$, $\omega_{gz} = -\dot{\varphi}$. (4)

Phương tiện ngầm hoạt động trong nước có vận tốc thấp, khoảng cách thường không xa nên có thể xem $\omega_{gx} = \omega_{gy} = \omega_{gz} = 0$. Giải hệ (3) các tham số Rodrigo-Hamilton được viết dưới dạng rời rạc [8]:

$$q_0(k+1) = q_0(k) + 0.5T[\omega_x(k+1)q_1(k) + \omega_y(k+1)q_2(k) + \omega_z(k+1)q_3(k) - \varepsilon(k)q_0(k)]$$

$$q_1(k+1) = q_1(k) - 0.5T[\omega_x(k+1)q_0(k) - \omega_z(k+1)q_2(k) + \omega_y(k+1)q_3(k) - \varepsilon(k)q_1(k)]$$

$$q_2(k+1) = q_2(k) - 0.5T[\omega_y(k+1)q_0(k) + \omega_z(k+1)q_1(k) - \omega_x(k+1)q_3(k) - \varepsilon(k)q_2(k)]$$

$$q_3(k+1) = q_3(k) - 0.5T[\omega_z(k+1)q_0(k) - \omega_y(k+1)q_1(k) + \omega_x(k+1)q_2(k) - \varepsilon(k)q_3(k)]$$

Trong đó, T là thời gian lấy mẫu rời rạc; Số hiệu chuẩn: $\varepsilon(k) = 1 - (q_0^2(k) + q_1^2(k) + q_2^2(k) + q_3^2(k))$.

Các góc Ole (góc xoắn Cren ϕ , góc chúc ngóc θ và góc hướng ψ) liên hệ giữa hệ tọa độ chuẩn và hệ tọa độ liên kết được xác định [8]:

$$\begin{cases} \phi = \arctg \frac{-(2q_2q_3 - 2q_0q_1)}{(2q_0^2 + 2q_2^2 - 1)} \\ \theta = \arcsin(2q_1q_2 + 2q_0q_3) \\ \psi = \arctg \frac{-(2\lambda_1\lambda_3 - 2\lambda_0\lambda_2)}{(2\lambda_0^2 + 2\lambda_1^2 - 1)} \end{cases} \quad (6)$$

Phương tiện ngầm hoạt động trong môi trường nước có vận tốc thấp, khoảng cách thường không quá xa nên có thể xem trái đất dạng hình cầu để tính toán vận tốc của AUV theo gia tốc trong hệ tọa độ chuẩn a_{NED}^{IMU}

$$v_N(k+1) = v_N(k) + T(a_N(k) + F_N(k))$$

$$v_E(k+1) = v_E(k) + T(a_E(k) + F_E(k)) \quad (7)$$

$$v_D(k+1) = v_D(k) + T(a_D(k) + F_D(k))$$

Trong đó, các thành phần $F_N(k), F_E(k), F_D(k)$ được tính toán [1]:

$$\begin{aligned} F_N(k) &= -2U \sin \varphi(k) \cdot v_E(k) - v_E^2(k) \cdot \text{tg}(\varphi(k)) / R \\ &\quad + v_N(k) \cdot v_D(k) / R \\ F_E(k) &= -2U \sin \varphi(k) \cdot v_N(k) - 2U \cos \varphi(k) \cdot v_D(k) \\ &\quad - v_E(k) \cdot v_N(k) \cdot \text{tg}(\varphi(k)) / R \\ &\quad - v_E(k) \cdot v_D(k) / R \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} F_D(k) &= -2U \cos \varphi(k) \cdot v_E(k) - v_E^2(k) / R \\ &\quad - v_N^2(k) / R + g \end{aligned}$$

$a_{NED}^{IMU} = [a_N, a_E, a_D]^T$ là gia tốc AUV đo từ IMU trong hệ tọa độ chuẩn, xác định theo biểu thức (2).

$v_{NED}^{IMU} = [v_N, v_E, v_D]^T$ là các thành phần vận tốc AUV trong hệ tọa độ chuẩn; R bán kính trái đất dạng hình cầu, U - Tốc độ quay ngày/đêm của trái đất ($U=7,3 \cdot 10^5$ Rad/s).

3.2.2 Biến đổi vận tốc DVL sang hệ tọa độ chuẩn

Vận tốc từ DVL trong hệ tọa độ liên kết v_{NED}^{DVL} được biến đổi sang hệ tọa độ chuẩn v_{NED}^{DVL} nhờ ma trận cosin chỉ phương C_{AUV}^{NED} [1]:

$$[v_N^{DVL} \ v_E^{DVL} \ v_D^{DVL}]^T = C_{AUV}^{NED} [v_x \ v_y \ v_z]^T \quad (9)$$

Các thành phần v_x, v_y, v_z là vận tốc AUV đo được trong hệ tọa độ liên kết. Ma trận cosin chỉ phương được tính từ các góc Ole ϕ, θ theo (6) và góc hướng ψ nhận được từ la bàn sau khi đã hiệu chỉnh [1]:

$$C_{AUV}^{NED} = \begin{bmatrix} c(\psi)c(\theta) & c(\psi)s(\theta)s(\phi) - s(\psi)c(\phi) & c(\psi)s(\theta)c(\phi) + s(\psi)s(\phi) \\ s(\psi)c(\theta) & s(\psi)s(\theta)s(\phi) + c(\psi)c(\phi) & s(\psi)s(\theta)c(\phi) - c(\psi)s(\phi) \\ -s(\theta) & c(\theta)s(\phi) & c(\theta)c(\phi) \end{bmatrix}$$

Với $s(\cdot), c(\cdot)$ là ký hiệu các hàm sin và hàm cosin. Ở đây $C_{AUV}^{NED} = Q_{XYZ}^{NED}$.

3.2.3 Bộ lọc Kalman.

Bê lãc Kalman lư mét c«ng cô to,n hãc gióp cho viöc ®,nh gi, vĐct-trìng th,i hõ ®éng hãc trãn c- sê thng tin quan s,t vĐct-trìng hiöu Çu ra. Gi¶ sø qu, trxn h chuyón ®éng cña phưng tiệy hoÆc qu, trxn h c«ng nghõ ®-íc m« t¶ bëi hõ ph--ng trxn h ®éng hãc d-íi dñg rëi ríc nh- sau [8]:

$$X_k = F_{k-1}(X_{k-1}) + \omega_k; Z_k = h(X_k) + v_k$$

trong @ã, X_k, X_{k-1} là trạng thái của vĐct- trạng thái X (vĐct- n chiều) ở b-íc thờ k và b-íc thờ $k-1$; Z_k là giá trị của vĐct- @Cũ ra (vĐct- m chiều, th-êng $m \leq n$); ω_k, v_k là nhiễu @éng lúc và nhiễu @o cả d'ng nhiễu tr'ng v'í kú v'ng to, n h'c b'ng 0: $\omega_k \sim N(0, Q_k); v_k \sim N(0, R_k)$;

F_{k-1} là vĐct- h'p s' F ở b-íc thờ $k-1$:

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

trong @ã, f_1, f_2, \dots, f_n là c, c h'p phi t'yn v'í bi'õn s' là vĐct- X ; h_k là vĐct- h'p s' h ở b-íc thờ k : $h = (h_1, h_2, \dots, h_m)^T$

Ma tr'ên hi'p ph-ng sai c'ũa vĐct- sai s' @, nh gi, tr'ng th,i vĐct- X nh- sau: $P_k = \varepsilon (X_k - \hat{X}_k)(X_k - \hat{X}_k)^T$, trong @ã ε là ký hi'ũ kú v'ng to, n h'c.

Th'ĩ t'c c'ũa thu'ët to, n @, nh gi, tr'ng th,i X tr'ũn c- s' vĐct- quan s, t (@o @-íc) Z theo Kalman [8]:

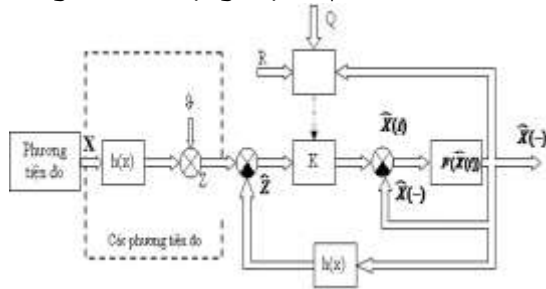
$$\hat{X}_k(-) = F_{k-1}(\hat{X}_{k-1}(+)), \Phi_{k-1} = \partial F_{k-1} / \partial X \Big|_{X=\hat{X}_{k-1}(+)},$$

$$\hat{Z}_k = h_k(\hat{X}_k(-)), H_k = \partial h_k / \partial X \Big|_{X=\hat{X}_k(-)}$$

$$P_k(-) = \Phi_{k-1} P_{k-1}(+) \Phi_{k-1}^T + Q_{k-1}, K_k = P_k(-) H_k^T (H_k P_k(-) H_k^T + R_k)^{-1}$$

$$\hat{X}_k(+) = \hat{X}_k(-) + K_k (Z_k - \hat{Z}_k), P_k(+) = (I - K_k H_k) P_k(-)$$

ở @y, I là ma tr'ên @-n v'p. Nh- v'ũy @O ti'õn h'nh l'c Kalman tr'ũn m, y t'ũnh c'ũn x, c @'nh vĐct- h'p $F(\cdot)$ (t'õc c, c h'p f_1, f_2, \dots, f_n), h'p $h(\cdot)$ (t'ũc c, c h'p h_1, h_2, \dots, h_m) và c, c ma tr'ũn Q_k, R_k (@'c trung nhi'ũ đ'ng h'c và nhi'ũ @o).



Hình 3: Bộ lọc Kalman phi tuyến mở rộng

3.2.4 Kết hợp thiết bị đo vận tốc theo hiệu ứng Doppler với việc đo vận tốc từ thiết bị đo quán tính

Trong thiết bị IMU có các gia tốc kế đo các gia tốc theo các phương của hệ tọa độ liên kết. Ba chỉ số gia tốc kế a_x, a_y, a_z luôn có nhiễu đo, tức là:

$$\hat{a}_x = a_x + w_{ax}; \hat{a}_y = a_y + w_{ay}; \hat{a}_z = a_z + w_{az} \quad (13)$$

Trong đó $\hat{a}_x, \hat{a}_y, \hat{a}_z$ là các gia tốc đo được, a_x, a_y, a_z là gia tốc thực tế, w_{ax}, w_{ay}, w_{az} các nhiễu đo dạng nhiễu trắng.

Giả sử các phần tử của ma trận covariance chỉ phương Q_{XYZ}^{NED} được ký hiệu là: $a_{ij} (i=1,2,3; j=1,2,3)$. Để xác định v_N, v_E, v_D cần phải xác định được a_N, a_E, a_D trên cơ sở từ thông tin $\hat{a}_x, \hat{a}_y, \hat{a}_z$ bằng cách chuyển đổi qua ma trận covariance chỉ phương Q_{XYZ}^{NED} :

$$\begin{cases} \hat{a}_N = a_{11}a_x + a_{12}a_y + a_{13}a_z + a_{11}W_{ax} + a_{12}W_{ay} + a_{13}W_{az} \\ \hat{a}_E = a_{21}a_x + a_{22}a_y + a_{23}a_z + a_{21}W_{ax} + a_{22}W_{ay} + a_{23}W_{az} \\ \hat{a}_D = a_{31}a_x + a_{32}a_y + a_{33}a_z + a_{31}W_{ax} + a_{32}W_{ay} + a_{33}W_{az} \end{cases}$$

Thay các giá trị của công thức trên vào (7) và biến đổi nhận được hệ phương trình thể hiện sai số vận tốc của khối đo lường quán tính IMU:

$$\begin{cases} \Delta v_N(k+1) = \Delta v_N(k) + w_N(k) \\ \Delta v_E(k+1) = \Delta v_E(k) + w_E(k) \\ \Delta v_D(k+1) = \Delta v_D(k) + w_D(k) \end{cases} \quad (14)$$

Trong đó $w_N(k), w_E(k), w_D(k)$ là các tín hiệu nhiễu dạng nhiễu trắng được xác định từ các nhiễu trắng đo gia tốc được xác định qua phép biến đổi sau:

$$\begin{cases} W_N(k) = T.a_{11}.W_{ax} + T.a_{12}.W_{ay} + T.a_{13}.W_{az} \\ W_E(k) = T.a_{21}.W_{ax} + T.a_{22}.W_{ay} + T.a_{23}.W_{az} \\ W_D(k) = T.a_{31}.W_{ax} + T.a_{32}.W_{ay} + T.a_{33}.W_{az} \end{cases} \quad (15)$$

ở đây T là bước tính.

Như vậy thiết bị dẫn đường quán tính IMU cho ta thông tin về vận tốc với các thành phần sau

$$\tilde{v}_N^{IMU} = v_N + \Delta v_N; \tilde{v}_E^{IMU} = v_E + \Delta v_E; \tilde{v}_D^{IMU} = v_D + \Delta v_D$$

Coi véc tơ Δx trong biểu thức (11) được ký hiệu như sau: $\Delta x = (\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3)$ trong đó:

$\Delta x_1 = \Delta v_N; \Delta x_2 = \Delta v_E; \Delta x_3 = \Delta v_D$, khi đó ma trận A và véc tơ $W(k)$ trong biểu thức (11) sẽ là:

$$A = \text{diag}(1, 1, 1); W(k) = (W_N(k), W_E(k), W_D(k))^T;$$

v_x, v_y, v_z do thiết bị đo vận tốc theo hiệu ứng Doppler được xác định trong hệ tọa độ liên kết (có nhiễu đo) tức là: $\tilde{v}_x = v_x + w_{vx}; \tilde{v}_y = v_y + w_{vy}; \tilde{v}_z = v_z + w_{vz}$

Trong đó w_{vx}, w_{vy}, w_{vz} là nhiễu đo dạng nhiễu trắng.

$$\tilde{v}_N^{DVL} = a_{11}v_x + a_{12}v_y + a_{13}v_z + a_{11}w_{vx} + a_{12}w_{vy} + a_{13}w_{vz}$$

$$\tilde{v}_E^{DVL} = a_{21}v_x + a_{22}v_y + a_{23}v_z + a_{21}w_{vx} + a_{22}w_{vy} + a_{23}w_{vz}$$

$$\tilde{v}_D^{DVL} = a_{31}v_x + a_{32}v_y + a_{33}v_z + a_{31}w_{vx} + a_{32}w_{vy} + a_{33}w_{vz}$$

Trong đó $v_x^{NED}, v_y^{NED}, v_z^{NED}$ là các thành phần của vận tốc thực trong hệ tọa độ NED, tức là $v_N, v_D, v_E (v_N = v_x^{NED}, v_E = v_y^{NED}, v_D = v_z^{NED})$, do vậy:

$$\tilde{v}_N^{DVL} = v_N + w_x^{NED}; \tilde{v}_E^{DVL} = v_E + w_y^{NED};$$

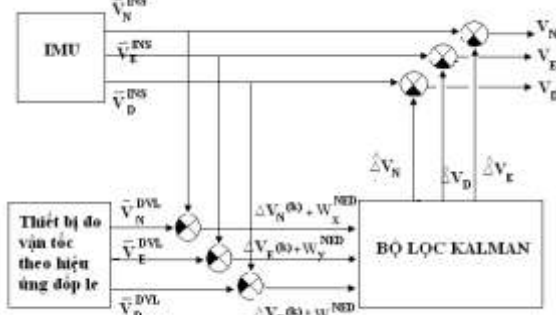
$\tilde{v}_D^{DVL} = v_D + w_z^{NED}$ là các thành phần vận tốc đo được của thiết bị đo hiệu ứng Doppler biểu diễn trên hệ tọa độ chuẩn. Véc tơ quan sát $Z(k)$:

$$z(k) = \begin{pmatrix} \tilde{v}_N^{IMU} - \tilde{v}_N^{DVL} \\ \tilde{v}_E^{IMU} - \tilde{v}_E^{DVL} \\ \tilde{v}_D^{IMU} - \tilde{v}_D^{DVL} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta v_N + w_x^{NED} \\ \Delta v_E + w_y^{NED} \\ \Delta v_D + w_z^{NED} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \Delta x + \begin{pmatrix} w_x^{NED} \\ w_y^{NED} \\ w_z^{NED} \end{pmatrix} = C \Delta x + v(k)$$

Trong đó $v(k) = w_x^{NED}, w_y^{NED}, w_z^{NED}^T$

Áp dụng thuật toán lọc (12) sẽ đánh giá được sai số Δx để hiệu chỉnh tham số vận tốc do IMU cấp ra. Hình 4 mô tả cấu trúc bộ kết hợp thiết bị dẫn đường quán tính với thiết bị đo vận tốc theo hiệu ứng Doppler



Hình 4: Cấu trúc thiết bị đo kết hợp xác định vận tốc phương tiện ngầm

3.2.6 Tính toán vị trí từ vận tốc IMU đã hiệu chỉnh

Vị trí của AUV trong hệ tọa độ cố định tâm trái đất được tính toán thông qua giá trị vận tốc của IMU sau khi hiệu chỉnh \hat{v}_{NED} . Phương trình tính toán vị trí của AUV viết dưới dạng rời rạc [1]:

$$\hat{\varphi}(k+1) = \hat{\varphi}(k) + T\hat{v}_N(k+1) / R$$

$$\hat{\lambda}(k+1) = \hat{\lambda}(k) + T\hat{v}_E(k+1) / (R \cos \hat{\varphi}(k+1))$$

$$z^{KF}(k+1) = z^{KF}(k) + T\hat{v}_D(k+1) \quad (15)$$

Trong đó vị trí ban đầu $\varphi(0), \lambda(0)$ và $z(0)$ là biết trước của phương tiện ngầm. Vị trí ban đầu có độ chính xác cao, nhận được từ các thông tin trước khi thiết bị ngầm lặn.

Mô phỏng và kiểm nghiệm thuật toán

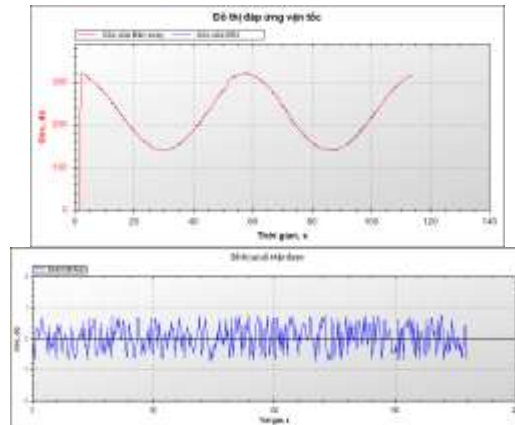
4.1. Mô phỏng, kiểm nghiệm thuật toán trên bàn xoay 3 bậc tự do

Trong phòng thí nghiệm sử dụng bàn xoay ba bậc tự do 1573 của hãng Ideal Aeromsmith. Mô đun IMU gắn vào bàn xoay trên hình 5.



Hình 5: Thử nghiệm trên bàn xoay 3 bậc tự do

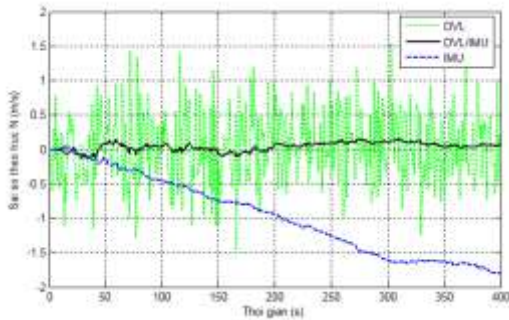
Kết quả thử nghiệm trên bàn xoay để calib hệ thống và lấy các đặc trưng sai số của IMU cho thấy: sai số giữa bàn xoay với thiết bị dẫn đường quán tính khi bàn xoay chuyển động trong đều, chuyển động hình sin, chuyển động hình bậc thang là nhỏ hơn 1 độ (hình 6)



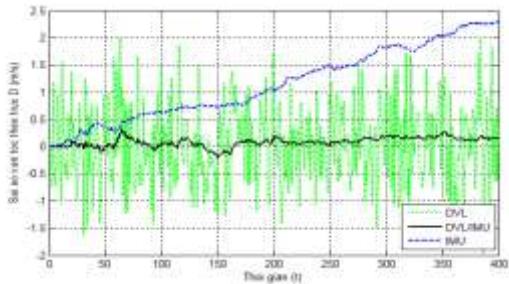
Hình 6: Kết quả và sai số khi bàn xoay ba bậc tự do chuyển động hình sin

4.2. Mô phỏng, kiểm nghiệm thuật toán trên phương tiện ngầm.

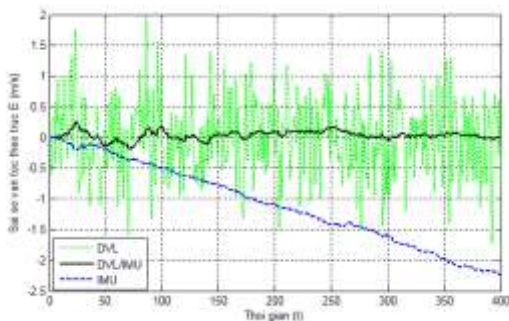
Gá lắp sản phẩm lên robot ngầm cứu nạn cứu hộ của Đại học phòng cháy chữa cháy, cho thiết bị thử nghiệm lên robot và chuyển động theo quỹ đạo đặt trước trong bể bơi. Kết quả nhận được (hình 7-9) cho thấy sai số vận tốc của hệ thống định vị cho AUV nhỏ hơn đáng kể so với sai số thiết bị dẫn đường IMU và DVL khi hoạt động riêng lẻ. Dữ liệu xử lý thông qua bộ lọc Kalman có hiệu quả đáng kể trong giảm sai số vận tốc IMU và loại bỏ nhiễu của DVL. Sai số vị trí của theo vận tốc IMU đã hiệu chỉnh thông qua bộ lọc Kalman duy trì tăng không giới hạn nhưng tốc độ tăng thấp hơn trong trường hợp vận tốc IMU khi chưa được hiệu chỉnh. Giả sử, thời gian mô phỏng lên đến 400s, sai số vị trí IMU hàng trăm mét trong khi sai số vị trí theo vận tốc đã hiệu chỉnh IMU/DVL chỉ vài mét đến vài chục mét.



Hình 7: So sánh sai số vận tốc theo trục N của DVL, IMU và sau khi hiệu chỉnh qua bộ lọc Kalman IMU/DVL



Hình 8: So sánh sai số vận tốc theo trục D của DVL, IMU và sau khi hiệu chỉnh qua bộ lọc Kalman IMU/DVL



Hình 9: So sánh sai số vận tốc theo trục E của DVL, IMU và sau khi hiệu chỉnh qua bộ lọc Kalman IMU/DVL

Kết luận

Bài báo đã trình bày một phương pháp kết hợp thiết bị dẫn đường quán tính với thiết bị đo vận tốc trên cơ sở bộ lọc Kalman mở rộng ứng dụng cho một chủng loại phương tiện ngầm nhằm nâng cao độ chính xác vận tốc thiết bị phương tiện ngầm. Kết quả nhận được khi mô phỏng, thực nghiệm trên bàn xoay 3 bậc tự do của hãng Aeromsmith và robot ngầm cứu nạn cứu hộ đã minh chứng tính đúng đắn của thuật toán. Tuy nhiên, để giảm sai số của sensor, hệ thống nhóm tác giả sẽ phát triển và kiểm nghiệm bằng một số thuật toán khác./.

Tài liệu tham khảo

- [1] P. Kaniewski.; G. S. Kaliski.: *Integrated Positioning System for AUV*. Molecular and Quantum Acoustics vol. 26, (2005).
- [2] B. Jalving.; K. Gade.; O. K. Hagen.: *A Toolbox of Aiding Techniques for the HUGIN AUV Integrated Inertial Navigation System*. Oceans 2003 MTS/IEEE, San Diego, CA, USA, 22-26 September 2003.

- [3] A. Bahr.; *Cooperative Localization for Autonomous Underwater Vehicles*. Degree of Doctor of Philosophy at the Massachusetts Institute of technology and the woods hole Ceanographic Institution February 2009.
- [4] Ø. Hegrenæs.; E. Berglund.; O. Hallingstad.: *Model-Aided Inertial Navigation for Underwater Vehicles*. The IEEE International Conference On Robotics and Automation, Pasadena, 2008.
- [5] A. Alahyari.; S. G. Rozbahani.: *INS/DVL Positioning System using Kalman Filter*. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 5(9): 1123-1129, 2011 ISSN 1991-8178
- [6] R. C. Schott.; S. Huber.: *Electronic Compass Sensor*. 0-7803-8692-2/04/\$20.00 ©2004 IEEE.
- [7] Кошляков, В. Н. *Задачи динамики твердого тела и прикладной теории гироскопов: аналит. методы* / В.Н. Кошляков. -М. : Наука, 1985. - 286с.
- [8] Trương Duy Trung, Nguyễn Quang Vịnh, Nguyễn Quang Hùng, Trần Đức Thuận. “Xây dựng thuật toán xác định tham số dẫn đường cho phương tiện chuyển động trên cơ sở kết hợp con quay tốc độ góc với từ kế, gia tốc kế và vận tốc kế”. Tạp chí Nghiên cứu KH-CN quân sự. Số 24, 4-2013.

Author’s bibliography

Phạm Xuân Phúc sinh năm 1976, tốt nghiệp đại học chuyên ngành kỹ sư Kỹ thuật điện – điện tử 2001 tại Học viện Hải quân, nhận bằng thạc sĩ chuyên ngành Tự động hóa năm 2012 tại Đại học Bách khoa Tp.HCM. Hiện anh đang làm NCS tại Viện KHCNQS. Hướng nghiên cứu: Nhận dạng, dẫn đường và điều khiển phương tiện ngầm.

Nguyễn Đức Ảnh sinh năm 1976, tốt nghiệp đại học chuyên ngành kỹ sư tại Đại học Phòng cháy chữa cháy, nhận bằng thạc sĩ chuyên ngành Tự động hóa năm 2012 tại Học Viện Kỹ Thuật quân sự. Hiện anh đang làm tại Đại Học Phòng cháy chữa cháy và NCS tại Viện KHCNQS. Hướng nghiên cứu: Các hệ thống quán tính, nhận dạng, dẫn đường và điều khiển phương tiện ngầm.

Nguyen Quang Vinh was born in 1975 in Thai Binh, Vietnam. He works at Institute of military sciences and technologies as the chief of the department of electronic wireless devices. In 1997, being a student of Academy of military techniques, he won the first prize in the Vietnamese national competition of scientific technical creation (VIFOTEC), the third prize in Vietnamese National Mathematical Olympiad. He got PhD degree in Russia, at Moscow state technical university named after Bauman, in 2006. He has taken part in many scientific projects, for example: researching and applying of the control software, designing and installing of parallel systems for processing information in automatic systems accompanying flying objects, constructing of the project and technical theoretical factual foundations for fire-

power anti-aircraft complexes with small height to intercept Tomahawk rocket, etc. Besides he has 11 publications in prestigious international journals in the fields of nonlinear control, modelling, the inertial navigation system, adaptive control, control systems in aeronautics.