

NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG THUẬT TOÁN LỌC KALMAN TRONG HỆ THỐNG GIÁM SÁT GÓC NGHIÊNG TÀU BIỂN NHẪM ĐÁP ỨNG NGHỊ QUYẾT MỚI CỦA IMO - MSC.532

APPLICATION OF THE KALMAN FILTER ALGORITHM IN SHIP ROLL MONITORING SYSTEMS IN COMPLIANCE WITH IMO RESOLUTION MSC.532

ĐINH ANH TUẤN, ĐOÀN HỮU KHÁNH*, NGUYỄN THANH VÂN

Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: khanhdh.ddt@vimaru.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.967>

Tóm tắt

Tổ chức Hàng hải Quốc tế (IMO) gần đây đã ban hành Nghị quyết MSC.532, quy định các yêu cầu nghiêm ngặt hơn đối với việc giám sát và báo cáo các tham số ổn định của tàu trong quá trình hoạt động. Nghiên cứu này trình bày việc thiết kế và triển khai hệ thống giám sát góc nghiêng (roll) của tàu biển dựa trên thuật toán lọc Kalman nhằm đáp ứng các tiêu chuẩn mới này. Hệ thống được đề xuất sử dụng cảm biến đo lường quán tính 9 trục (IMU), bao gồm cảm biến con quay hồi chuyển, gia tốc kế và từ kế để liên tục đo các góc nghiêng (roll), chúi (pitch) và hướng (heading) của tàu. Bộ lọc Kalman mở rộng được áp dụng để giảm nhiễu và độ trôi của tín hiệu cảm biến, cung cấp ước lượng chính xác và ổn định của góc nghiêng ngay cả trong điều kiện sóng và rung động mạnh. Kết quả thử nghiệm từ mô phỏng và thực nghiệm trên biển cho thấy bộ ước lượng dựa trên Kalman cải thiện độ chính xác của góc nghiêng hơn 40% so với phương pháp lọc thông thấp bậc 2 truyền thống (với tần số cắt $f_c = 0,5\text{Hz}$). Hệ thống có thể dễ dàng tích hợp vào mạng giám sát tàu hiện có, mang lại giải pháp tin cậy và hiệu quả về chi phí nhằm đáp ứng Nghị quyết MSC.532 của IMO.

Từ khóa: Lọc Kalman, giám sát góc nghiêng tàu biển, cảm biến đo lường quán tính (IMU), ước lượng tư thế, Nghị quyết MSC.532(107) của IMO, Nghị quyết MSC.363 (92).

Abstract

The International Maritime Organization (IMO) has recently issued Resolution MSC.532, which specifies stricter requirements for monitoring and reporting ship stability parameters during operation. This study presents the design and

implementation of a ship roll angle monitoring system based on the Kalman filter algorithm to meet these new standards. The proposed system utilizes a 9-axis Inertial Measurement Unit (IMU), consisting of a gyroscope, accelerometer, and magnetometer, to continuously measure the ship's roll, pitch, and heading angles. An Extended Kalman filter (EKF) is applied to effectively reduce sensor noise and drift, providing accurate and stable estimation of the roll angle even under strong wave and vibration conditions. Experimental results from both simulation and sea trials demonstrate that the Kalman-based estimator improves roll angle accuracy by more than 40% compared to the conventional second-order low-pass filtering method (with a cutoff frequency of $f_c = 0.5\text{Hz}$). The system can be easily integrated into existing ship monitoring networks, providing a reliable and cost-effective solution to comply with IMO Resolution MSC.532.

Keywords: Kalman filter, ship roll monitoring; inertial measurement unit (IMU), attitude estimation, IMO Resolution MSC.532(107), IMO Resolution MSC.363(92).

1. Giới thiệu

Trong những năm gần đây, yêu cầu về nhận thức tình huống và giám sát an toàn vận hành tàu ngày càng được nâng cao. Việc theo dõi liên tục các tham số động lực học như góc nghiêng (roll), góc chúi (pitch) và hướng (heading) đóng vai trò then chốt trong việc đánh giá ổn định động và kiểm soát chuyển động của tàu trên biển [1].

Đặc biệt, về mặt pháp lý, Nghị quyết MSC.532(107) được IMO thông qua vào tháng 6/2023 (sửa đổi Quy định 19 Chương V của Công ước

SOLAS) đã chuyển từ khuyến nghị sang yêu cầu bắt buộc (mandatory). Cụ thể, đoạn 2.12 quy định: Các tàu container và tàu hàng rời có tổng dung tích từ 3.000GT trở lên, được đóng mới vào hoặc sau ngày 01/01/2026, phải được trang bị thiết bị đo nghiêng điện tử để xác định, hiển thị và ghi lại chuyển động lắc của tàu [2]. Quy định này đặt ra yêu cầu cấp thiết về việc phát triển các hệ thống giám sát có độ chính xác cao để đáp ứng thời hạn hiệu lực đang đến gần.

Chuyển động nghiêng quá mức không chỉ ảnh hưởng đến sự thoải mái của hành khách và hàng hóa mà còn có thể gây rủi ro nghiêm trọng đối với độ ổn định của tàu, thậm chí dẫn đến các tai nạn lật tàu [3]. Do đó, việc ước lượng chính xác góc nghiêng của tàu trong thời gian thực đã trở thành một thành phần quan trọng trong các hệ thống giám sát và điều khiển hàng hải hiện đại.

Các phương pháp đo góc nghiêng truyền thống thường dựa trên cảm biến cơ học hoặc cảm biến gia tốc một trục [4]. Tuy nhiên, các cảm biến này thường bị ảnh hưởng bởi nhiễu, sai lệch và trôi tín hiệu trong điều kiện sóng biển động. Gần đây, cảm biến đo lường quán tính (IMU) tích hợp con quay hồi chuyển, gia tốc kế và từ kế đã trở thành một giải pháp mạnh mẽ cho bài toán theo dõi chuyển động [5, 6]. Tuy nhiên, mỗi loại cảm biến đều có những hạn chế riêng - con quay hồi chuyển dễ bị trôi theo thời gian và nhạy cảm với nhiệt độ [7], gia tốc kế nhạy với rung động, còn từ kế dễ bị nhiễu bởi từ trường xung quanh [8]. Để khắc phục những vấn đề này, các thuật toán hợp nhất cảm biến (sensor fusion) đã được nghiên cứu nhằm kết hợp dữ liệu từ nhiều nguồn cảm biến khác nhau, nâng cao độ chính xác và tính ổn định của phép đo [9].

Trong số các phương pháp hợp nhất cảm biến, thuật toán lọc Kalman được xem là một trong những kỹ thuật hiệu quả nhất cho bài toán ước lượng “tự thể” theo thời gian thực [10, 11]. Bằng cách gán trọng số tối ưu cho các phép đo cảm biến dựa trên đặc tính thống kê của chúng, bộ lọc Kalman có thể giảm nhiễu và bù trôi tín hiệu hiệu quả, ngay cả trong điều kiện môi trường biển động mạnh. Trong nghiên cứu này, một hệ thống giám sát góc nghiêng tàu biển dựa trên bộ lọc Kalman được phát triển, sử dụng cảm biến quán tính 9 trục gồm MPU6050 và HMC5883L. Hệ thống cho phép ước lượng các góc roll, pitch và heading theo thời gian thực, cung cấp dữ liệu chính xác và ổn định nhằm đáp ứng yêu cầu của Nghị quyết MSC.532 của IMO. Phương pháp đề xuất đã được kiểm chứng thông qua cả mô phỏng và thử nghiệm thực tế trên biển, cho thấy tính hiệu quả và khả năng ứng dụng trong các hệ thống giám sát tàu hiện có.

2. Đặt vấn đề

Mặc dù đã có những tiến bộ đáng kể trong giám sát lắc tàu dựa trên IMU và ứng dụng bộ lọc Kalman [9, 10], vẫn còn nhiều thách thức kỹ thuật trong việc đạt được ước lượng lắc tàu chính xác, ổn định và thời gian thực cho các tàu biển. Các inclinometer cơ học và gia tốc kế một trục thường có sai số đo lên tới $\pm 2\div 3^\circ$ trong điều kiện biển trung bình (chiều cao sóng $\sim 2\text{m}$) và rất nhạy cảm với rung động trên 5Hz [4, 8]. Ngay cả với kỹ thuật kết hợp cảm biến, gyroscope tích lũy trôi với tốc độ $0,1\div 0,5^\circ/\text{phút}$, gia tốc kế vẫn nhạy với rung động tần số cao, và la bàn có thể bị biến dạng vượt quá 10° gần các cấu trúc từ tính [8, 9].

Hơn nữa, nhiều hệ thống hiện tại thiếu kiểm chứng hệ thống qua thử nghiệm biển thực tế. Ví dụ, các nghiên cứu chỉ dựa trên mô phỏng thường báo cáo RMSE (Root Mean Square Error) khoảng $0,8\div 1,5^\circ$, trong khi thử nghiệm thực địa cho thấy độ lệch lên tới 3° dưới điều kiện biển động [11]. Những khác biệt này cho thấy nhu cầu cần một hệ thống tích hợp có thể:

- Ước lượng các góc nghiêng (roll), góc chúi (pitch) và hướng mũi (heading) trong thời gian thực với RMSE $< 1^\circ$;
- Bù nhiễu, trôi cảm biến và các nhiễu động động học một cách ổn định;
- Chứng minh hiệu quả và tuân thủ IMO Resolution MSC.532 thông qua cả mô phỏng và thử nghiệm thực tế.

Nghiên cứu này giải quyết những khoảng trống trên bằng cách triển khai hệ thống kết hợp nhiều cảm biến dựa trên bộ lọc Kalman mở rộng được rời rạc với IMU 9 trục (MPU6050 + HMC5883L), cung cấp độ chính xác ước lượng được cải thiện ($< 0,82^\circ$ RMSE trong thử nghiệm biển) phù hợp để tích hợp vào mạng giám sát trên tàu phục vụ cho công tác cảnh báo và dò tìm chu kỳ lắc của con tàu.

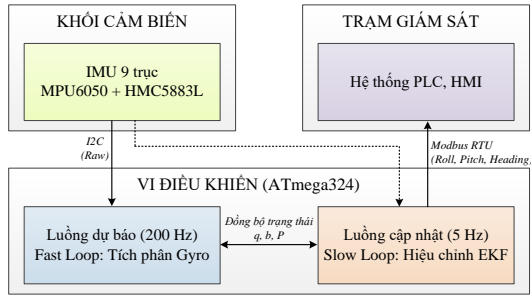
3. Phương pháp ước lượng và hợp nhất cảm biến

3.1. Lựa chọn phần cứng và đề xuất phương án thu thập và tiền xử lý dữ liệu cảm biến

Các phép đo thô từ IMU được hiệu chuẩn trước để loại bỏ sai số Bias và hệ số tỷ lệ. Nhiễu tần số cao được giảm bằng bộ lọc thông thấp (cutoff 5Hz) để giữ lại động lực học của lắc và nghiêng tàu trong điều kiện biển thông thường. Dữ liệu từ la bàn được hiệu chỉnh để bù biến dạng hard-iron và soft-iron dựa trên quy trình hiệu chuẩn [8].

Hệ thống giám sát lắc tàu đề xuất sử dụng IMU 9 trục bao gồm MPU6050 (gyroscope + accelerometer)

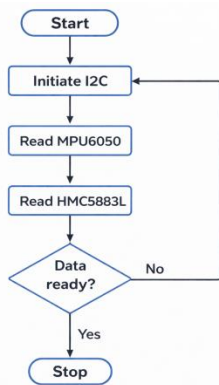
và HMC5883L (Magnetometer) để đo dao động tàu trong thời gian thực [5, 8]. Sơ đồ luồng dữ liệu và kiến trúc xử lý tín hiệu của hệ thống được mô tả chi tiết tại Hình 1, bao gồm 3 giai đoạn chính: Thu thập dữ liệu, xử lý tín hiệu, và ước lượng trạng thái bằng bộ lọc Kalman.



Hình 1. Sơ đồ luồng dữ liệu và kiến trúc xử lý đa tốc độ của hệ thống

Chip xử lý chọn loại ATmega324 với tần số xung nhịp 20MHz trên cơ sở phân tích sơ bộ thuật toán Dự báo (Predict, chỉ cho gyro): Chạy thường xuyên (200Hz) tích phân quaternion từ gyro. Thuật toán cập nhật (Update, accel và mag) sẽ chạy chậm 5Hz để hiệu chỉnh quaternion và bias bằng EKF update. Việc tách Predict xử lý nhanh và Update xử lý chậm hơn sẽ giảm mạnh chi phí tính toán.

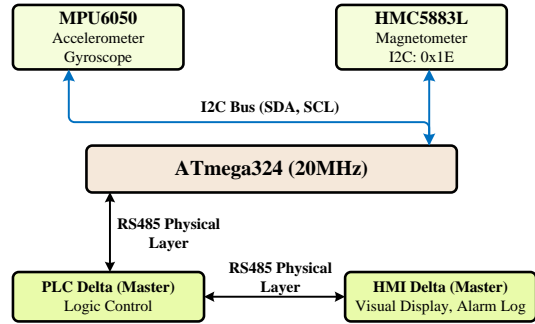
Quy trình thu thập dữ liệu thô từ các cảm biến thông qua giao thức I2C được mô tả chi tiết qua lưu đồ thuật toán tại Hình 2.



Hình 2. Thuật toán truy xuất dữ liệu với giao thức I2C

Ngoài ra, để thực hiện các cài đặt, giao diện người dùng, thực hiện các cảnh báo và lưu nhật ký sự kiện chip ATmega324 thực hiện giao tiếp truyền thông tín hiệu với PLC/HMI qua giao thức Modbus RTU. Sơ đồ tổng thể được đề xuất như Hình 3. Trên cơ sở thiết kế này, nhóm tác giả đã thi công và hoàn thiện sản phẩm.

Hình ảnh thực tế của thiết bị giám sát góc nghiêng sau khi chế tạo và đóng gói được thể hiện tại Hình 4.



Hình 3. Đề xuất sơ đồ kết nối tín hiệu phản ứng



Hình 4. Thiết bị giám sát góc nghiêng sau khi chế tạo

3.2. Mô hình Roll, Pitch và Heading

Trong nghiên cứu này, bộ lọc Kalman mở rộng EKF dựa trên biểu diễn quaternion được sử dụng để ước lượng các góc nghiêng (roll), chúi (pitch) và hướng (heading) của tàu.

3.2.1. Vector trạng thái và mô hình động học

Để đảm bảo tính ổn định của bộ ước lượng, điều kiện quan sát được (observability) của hệ thống cần được thỏa mãn. Trong cấu hình IMU 9 trục đề xuất, vector trạng thái x (bao gồm quaternion và bias con quay) là hoàn toàn quan sát được. Cụ thể, vector trọng trường đo bởi gia tốc kế cung cấp tham chiếu tuyệt đối để hiệu chỉnh sai số trôi cho góc nghiêng (Roll) và góc chúi (Pitch). Đồng thời, vector từ trường đo bởi từ kế đóng vai trò tham chiếu hướng Bắc để hiệu chỉnh sai số trôi cho góc hướng (Heading), đảm bảo ma trận hiệp phương sai sai số P_k hội tụ theo thời gian

Vector trạng thái bao gồm quaternion và sai lệch của con quay hồi chuyển, được định nghĩa như sau:

$$x = [q_0, q_1, q_2, q_3, b_x, b_y, b_z]^T \quad (1)$$

Trong đó: $q = [q_0, q_1, q_2, q_3]^T$ là quaternion đơn vị mô tả "tư thế" của tàu, $b = [b_x, b_y, b_z]^T$ là vector sai lệch của cảm biến con quay hồi chuyển. Động học quaternion dưới tác động của vận tốc góc đo được: $\omega = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ được mô tả bởi:

$$\dot{q} = \frac{1}{2} \Omega(\omega - b)q \quad (2)$$

$$\omega = \omega_{true} + b + \eta_g \quad (3)$$

Trong đó ma trận $\Omega(\omega)$ được xác định như sau:

$$\Omega(\omega) = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z \\ \omega_x & 0 & \omega_z & -\omega_y \\ \omega_y & -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_z & \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Để triển khai trong miền rời rạc, phương pháp tích phân bậc nhất kết hợp với chuẩn hóa quaternion được áp dụng:

$$\tilde{q}_{k+1} = \text{normalize}(q_k + \dot{q}_k \Delta t) \quad (5)$$

Sai lệch của con quay hồi chuyển được mô hình hóa như một quá trình trôi ngẫu nhiên:

$$b_{k+1} = b_k + w_b \quad (6)$$

Với w_b là nhiễu trắng Gauss để mô hình hóa quá trình trôi ngẫu nhiên của bias con quay hồi chuyển.

Mô hình Random Walk này cho phép bộ lọc EKF tự động ước lượng và bù trừ các thành phần sai số biến đổi chậm theo thời gian thực, bao gồm cả sai số trôi điểm không (Zero-rate bias drift) do sự thay đổi nhiệt độ của cảm biến trong quá trình hoạt động lâu dài, mà không cần thực hiện quy trình cân chỉnh bù nhiệt tĩnh (static thermal calibration).

Mô hình đo sử dụng trực tiếp các vector gia tốc và từ trường đã được chuẩn hóa nhằm tránh các vấn đề kỳ dị và hiện tượng quán góc khi sử dụng góc Euler. Vector đo được xác định như sau:

$$z = [\hat{a}_x \quad \hat{a}_y \quad \hat{a}_z \quad \hat{m}_x \quad \hat{m}_y \quad \hat{m}_z]^T \quad (7)$$

Trong đó:

$$\hat{a} = \frac{a}{\|a\|}, \hat{m} = \frac{m}{\|m\|} \quad (8)$$

Lần lượt là vector gia tốc và từ trường đã được chuẩn hóa. Giá trị đo kỳ vọng được xác định bằng cách quay các vector trọng lực và từ trường tham chiếu từ hệ tọa độ quán tính sang hệ tọa độ thân tàu thông qua quaternion ước lượng:

$$\hat{a} \approx R(q)^T \hat{g}, \quad \hat{m} \approx R(q)^T \hat{m}_{ref} \quad (9)$$

Với \hat{g} là vector trọng lực đơn vị và \hat{m}_{ref} là vector

từ trường trái đất đã được chuẩn hóa trong hệ tọa độ quán tính. Cả hai đều phi tuyến theo q nên cần tuyến tính hóa để lấy Jacobian H.

3.2.2. Các bước thực hiện EKF

a. Bước dự báo

Để thực hiện bước này ta sử dụng dữ liệu từ gyroscope để tích phân quaternion và dự báo sai lệch bias. Tại tần số 200Hz, chỉ thực hiện tích phân Quaternion (phương trình 5). Việc dự báo ma trận hiệp phương sai số P (phương trình 10) được thực hiện đồng bộ với chu kỳ cập nhật (5Hz) để tiết kiệm tài nguyên tính toán.

$$P = FPF^T + Q \quad (10)$$

Với ma trận Jacobian $F = \partial f(x, \omega) / \partial x$ (7x7) ở bước này được tính bằng cách lấy đạo hàm riêng của phương trình chuyển trạng thái theo vector trạng thái tại thời điểm hiện tại.

$$\hat{z} = h(q) = [R(q)^T g \quad R(q)^T m_{ref}] \quad (11)$$

Ma trận Jacobian của mô hình đo được suy ra bằng cách tuyến tính hóa mô hình đo xung quanh trạng thái ước lượng hiện tại. Do mô hình đo không phụ thuộc vào sai lệch con quay hồi chuyển, các phần tử tương ứng trong ma trận Jacobian bằng 0. Vector đo z gồm gia tốc và từ trường đã chuẩn hóa.

b. Bước cập nhật:

Để tuyến tính hóa mô hình phi tuyến, ma trận Jacobian H (6x7) được xác định bởi đạo hàm của hàm đo lường theo trạng thái q :

$$H = \begin{bmatrix} H_{acc} & 0_{3 \times 3} \\ H_{mag} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Trong đó: H_{acc} là đạo hàm của vector trọng lực tham chiếu qua ma trận quay $R(q)^T$, H_{mag} là đạo hàm của vector từ trường trái đất tham chiếu qua $R(q)^T$.

Ngoài ra, để thực hiện bước này ta sử dụng dữ liệu từ gia tốc kế (accel) và từ kế (mag) để hiệu chỉnh sai số tích lũy từ bước dự báo. Quá trình cập nhật được thực hiện ở tần số thấp hơn (5Hz) để giảm chi phí tính toán mà vẫn đảm bảo độ chính xác.

- Tính toán sai lệch dự báo trên cơ sở [12]:

$$y = z - \hat{z} \quad (13)$$

- Sử dụng ma trận Jacobian H đã xác định ở (12) để tính toán mức độ tin tưởng vào phép đo:

$$S = HPH^T + R, \quad K = PH^T S^{-1} \quad (14)$$

- Cập nhật vector sai số trạng thái: Tính toán độ hiệu chỉnh dựa trên hệ số tăng và sai lệch đo lường:

$$\delta x = Ky \quad (15)$$

Trong đó: $\delta x = [\delta q^T \ \delta b^T]^T$ chứa thông tin hiệu chỉnh cho cả “trụ thể” và sai lệch cảm biến. Cập nhật trạng thái và chuẩn hóa, đối với Bias sẽ cập nhật trực tiếp:

$$b_{k+1} = b_k + \delta_b \quad (16)$$

Đối với Quaternion, do tính chất đặc thù của không gian quaternion, việc cập nhật được thực hiện qua phép nhân quaternion để bảo toàn cấu trúc hình học:

$$q_{k+1} \leftarrow \text{normalize}(\tilde{q}_{k+1} \otimes \delta q) \quad (17)$$

Việc chuẩn hóa (normalize) là bắt buộc để đảm bảo q luôn là quaternion đơn vị, giúp thuật toán duy trì tính ổn định và chính xác trong thời gian dài. Ngoài ra, cập nhật ma trận hiệp phương sai sai số có dạng:

$$P_{k+1} = (I - KH)P_k \quad (18)$$

Trên cơ sở mô hình toán học đã xây dựng, nhóm tác giả tiến hành lập trình nhúng cho vi điều khiển ATmega324, bao gồm thực thi thuật toán thu thập dữ liệu (như đã trình bày tại Hình 2) và hiện thực hóa bộ lọc EKF theo hệ phương trình từ (1) đến (18).

3.2.3. Giải thuật thực thi trên vi điều khiển

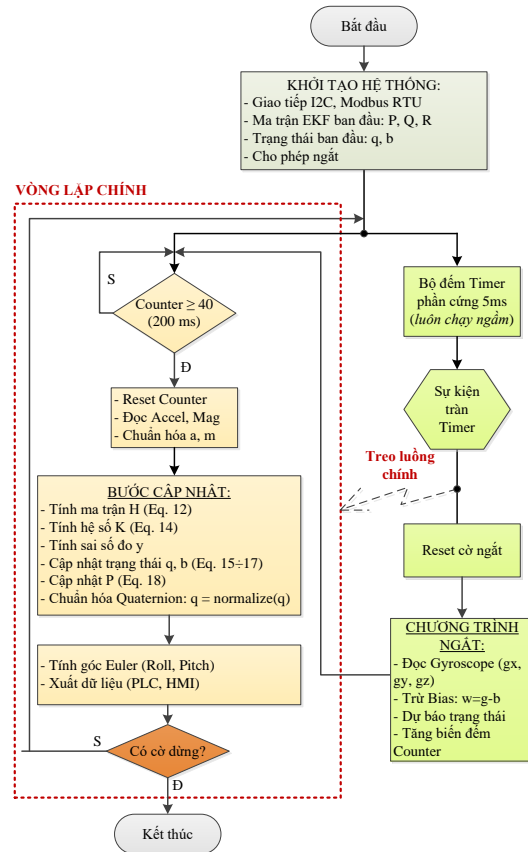
Do vi điều khiển ATmega324 có cấu trúc 8-bit và tài nguyên tính toán giới hạn, việc triển khai trực tiếp toàn bộ thuật toán EKF trong mỗi chu kỳ lấy mẫu là không khả thi. Do đó, nghiên cứu đề xuất giải thuật thực thi theo kiến trúc “đa tốc độ” (Multi-rate implementation) được mô tả tại Hình 5.

Quy trình thực thi được chia thành 2 luồng xử lý song song dựa trên cơ chế ngắt phần cứng (Hardware Interrupt):

- Luồng xử lý ưu tiên (Interrupt Service Routine - 200Hz): Được kích hoạt bởi sự kiện tràn Timer định kỳ 5ms. Tại đây, vi xử lý thực hiện đọc dữ liệu con quay hồi chuyển, trừ sai số bias và thực hiện tích phân số quaternion (phương trình (5)). Bước này yêu cầu ít tài nguyên tính toán nhưng cần tần số cao để đảm bảo độ mượt và giảm sai số tích lũy của góc nghiêng.

- Luồng xử lý nền (Main Loop - 5Hz): Được thực thi trong vòng lặp chính khi biến đếm (Counter) đạt ngưỡng 40 chu kỳ (tương ứng 0,2s). Tại đây, vi xử lý thực hiện các tác vụ nặng về tính toán ma trận bao gồm: đọc gia tốc kế/từ kế, tính ma trận Jacobian H

(phương trình 12), hệ số Kalman K (phương trình 14) và cập nhật vector trạng thái (phương trình 15-17). Đặc biệt, việc dự báo ma trận hiệp phương sai P (phương trình 10) cũng được hoãn lại để thực hiện đồng bộ tại bước này nhằm tối ưu hóa hiệu năng CPU.



Hình 5. Lưu đồ giải thuật EKF đa tốc độ trên vi điều khiển ATmega324

Cơ chế cờ dừng (Stop Flag) và giao thức Modbus RTU cũng được tích hợp trong vòng lặp chính để đảm bảo khả năng giám sát và điều khiển từ xa thông qua PLC/HMI.

3.3. Thiết lập kịch bản và môi trường kiểm chứng

Quá trình đánh giá hệ thống được thực hiện qua hai giai đoạn độc lập nhằm kiểm chứng toàn diện hiệu năng của thuật toán:

- Giai đoạn 1: Mô phỏng trên MATLAB/Simulink. Để đánh giá khả năng khử nhiễu lý thuyết, nhóm tác giả xây dựng kịch bản mô phỏng với tín hiệu đầu vào là các dao động hình sin (biên độ $\pm 15^\circ$) mô tả chuyển động lắc của tàu. Tín hiệu này được cộng thêm nhiễu trắng Gauss với độ lệch chuẩn $\sigma = 1,5^\circ$ và sai số trôi (bias) ngẫu nhiên để giả lập đặc tính sai số của cảm biến MEMS trong thực tế.

- Giai đoạn 2: Thử nghiệm thực địa. Hệ thống phần cứng hoàn thiện được lắp đặt trên tàu vỏ thép có chiều dài 50m hoạt động tại vùng biển Hải Phòng. Thử nghiệm diễn ra trong điều kiện biển cấp 3-4, tương ứng chiều cao sóng từ 1-3m và biên độ lắc cực đại ghi nhận tới. Để làm cơ sở đối sánh (Ground Truth), kết quả ước lượng từ bộ lọc Kalman được so sánh đồng bộ thời gian với dữ liệu từ Inclinometer độ chính xác cao (cho góc Roll/Pitch) và hệ thống la bàn vệ tinh GPS Compass (cho góc Heading) [13].

3.4. Các chỉ số đánh giá hiệu năng

Để đánh giá độ chính xác và khả năng lọc nhiễu của thuật toán lọc Kalman mở rộng, hai chỉ số quan trọng là sai số bình phương trung bình chân phương (RMSE) và tỉ số tín hiệu trên nhiễu (SNR) được sử dụng:

Sai số bình phương trung bình chân phương (RMSE): Đo lường độ lệch giữa giá trị ước lượng và giá trị tham chiếu thực tế:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad (19)$$

Trong đó: x_i là giá trị tham chiếu (từ inclinometer hoặc mô phỏng); \hat{x}_i là giá trị ước lượng từ bộ lọc EKF; N là số mẫu dữ liệu.

Tỷ số tín hiệu trên nhiễu (SNR): Đánh giá mức độ cải thiện chất lượng tín hiệu sau khi lọc:

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum s^2}{\sum (s - \hat{s})^2} \right) \quad (20)$$

Trong đó: s là tín hiệu sau khi qua bộ lọc Kalman (tín hiệu ước lượng); \hat{s} là tín hiệu thô đo được từ cảm biến (bao gồm cả tín hiệu thực và nhiễu); $\sum (s - \hat{s})^2$ đại diện cho năng lượng của thành phần nhiễu đã được loại bỏ bởi bộ lọc.

4. Mô phỏng và thử nghiệm kiểm chứng

Hệ thống giám sát lắc tàu dựa trên bộ lọc Kalman được đánh giá toàn diện thông qua hai giai đoạn: Mô phỏng trên phần mềm MATLAB/Simulink và thử nghiệm thực tế trên tàu biển.

4.1. Mô phỏng trên Matlab/Simulink

Quá trình mô phỏng được thực hiện với tín hiệu lắc tổng hợp có biên độ $\pm 15^\circ$, cộng thêm nhiễu trắng với độ lệch chuẩn $\sigma = 1,5^\circ$ để giả lập môi trường biển động. Bộ lọc Kalman được áp dụng để đánh giá khả năng giảm nhiễu đo và bù trôi cho cảm biến con quay

hồi chuyển (Gyroscope).

Kết quả các chỉ số hiệu năng bao gồm RMSE, sai số cực đại và thời gian phản hồi được tóm tắt trong Bảng 1.

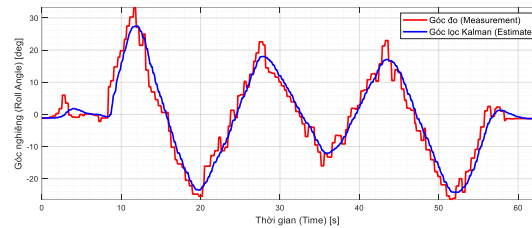
Bảng 1. Chỉ số hiệu năng của hệ thống trong mô phỏng

Tham số	RMSE (°)	Sai số cực đại (°)	Thời gian phản hồi (s)	Cải thiện SNR (dB)
Roll	0,78	1,5	0,12	24
Pitch	0,82	1,8	0,13	21
Heading	0,85	2,15	0,14	22

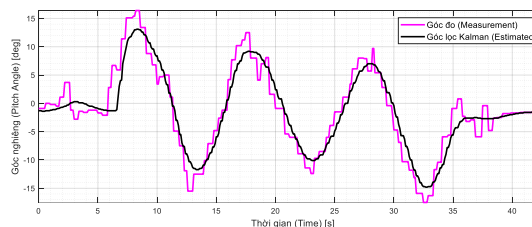
Kết quả cho thấy với mức nhiễu đầu vào lớn ($\sigma = 1,5^\circ$), bộ lọc vẫn duy trì độ chính xác cao với sai số RMSE luôn nhỏ hơn $0,82^\circ$.

4.2. Kết quả thử nghiệm mô hình trên biển

Hệ thống giám sát được lắp đặt và thử nghiệm thực tế trên tàu vỏ thép dài 50m tại khu vực Hải Phòng trong điều kiện biển cấp 3. Tín hiệu thô từ IMU chứa nhiều nhiễu do rung động cơ khí của máy tàu và va chạm sóng.



Hình 6. Đáp ứng góc nghiêng (Roll) trước và sau lọc Kalman. Điều kiện thử nghiệm: Biển cấp 3-4, chiều cao sóng $H_s \approx 1-3$ m, tàu chịu tác động của sóng ngang (Beam seas)



Hình 7. Đáp ứng góc chúi (Pitch) trước và sau lọc Kalman. Điều kiện thử nghiệm: Biển cấp 3-4, chiều cao sóng $H_s \approx 1-3$ m, tàu chịu tác động của sóng ngang (Beam seas)

Quan sát tín hiệu tại Hình 6 và Hình 7 cho thấy:
 + Về biên độ nhiễu: Dữ liệu thô (đường màu đỏ và

màu hồng) có dải nhiễu dao động quanh giá trị thực với biên độ khoảng $\pm 0,4^\circ$ đến $\pm 0,6^\circ$, gây ra bởi rung động máy và va chạm sóng.

+ Hiệu quả lọc: Tín hiệu sau lọc Kalman (đường màu xanh và màu đen) trở nên trơn mượt và bám sát xu hướng chuyển động của tàu với một độ trễ pha nhỏ (khoảng 0,12s), phù hợp với đặc tính của các bộ lọc thời gian thực. Độ trễ này là chấp nhận được và không ảnh hưởng đến khả năng giám sát ổn định tàu. Năng lượng nhiễu đã bị triệt tiêu đáng kể, thể hiện qua chỉ số SNR (Tỉ số tín hiệu trên nhiễu) tăng thêm khoảng 18dB đến 22dB sau khi lọc. Điều này giúp hệ thống tránh được các báo động giả do xung nhiễu tức thời.

Bảng 2. Tổng hợp chỉ số hiệu năng thực tế trên biển

Tham số	RMSE ($^\circ$)	Sai số cực đại ($^\circ$)	Thời gian phản hồi (s)	Cải thiện SNR (dB)
Roll	0,81	2,10	0,12	22
Pitch	0,82	2,20	0,13	18
Heading	0,89	2,15	0,14	20

4.3. Đánh giá và thảo luận

Dựa trên dữ liệu thực nghiệm và đối sánh với các phương pháp truyền thống, nghiên cứu rút ra các nhận xét định lượng sau:

+ Thứ nhất, về mức độ cải thiện sai số: Thuật toán Kalman đã làm giảm chỉ số RMSE xuống mức rất thấp, tương ứng với mức giảm từ 70% đến 85% so với dữ liệu thô ban đầu. Sai số RMSE cho góc Roll/Pitch đạt dưới $0,82^\circ$ và Heading dưới $0,9^\circ$.

+ Thứ hai, so sánh định lượng với các bộ lọc khác: Để làm rõ hiệu quả, nhóm tác giả so sánh kết quả EKF với phương pháp Lọc thông thấp (LPF) bậc 2 (tần số cắt $f_c=0,5\text{Hz}$). Kết quả thực nghiệm cho thấy LPF có độ trễ lớn và sai số cực đại lên tới 3,7 độ khi chịu tác động của gia tốc ngang. Trong khi đó, bộ lọc EKF đề xuất giúp giảm sai số cực đại xuống còn $2,2^\circ$. Như vậy, mức độ cải thiện sai số cực đại đạt khoảng 40%. Về sai số trung bình (RMSE), EKF đạt $0,82^\circ$, tốt hơn đáng kể so với mức $1,5^\circ$ của LPF.

+ Thứ ba, về khả năng đáp ứng tiêu chuẩn: Thời gian phản hồi của bộ ước lượng đạt dưới 0,15s. Quan trọng hơn, độ chính xác của hệ thống thỏa mãn tiêu chuẩn tính năng MSC.363(92) (được tham chiếu bởi quy định trang bị MSC.532). Cụ thể, sai số RMSE đạt $0,82^\circ$, nằm trong giới hạn cho phép $\pm 1,0^\circ$ đối với góc nghiêng dưới 45° được quy định tại Mục 6.1 của Nghị quyết này [14].

5. Kết luận

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã xây dựng hệ thống giám sát lắc tàu biển dựa trên bộ lọc Kalman mở rộng, sử dụng IMU 9 trục (MPU6050 + HMC5883L) để ước lượng các góc roll, pitch và heading trong thời gian thực. Phương pháp đề xuất bù trôi gyroscope, nhiễu accelerometer và biến dạng magnetometer, cung cấp ước lượng trạng thái chính xác và ổn định trong điều kiện biển động.

Kết quả mô phỏng và thử nghiệm biển cho thấy RMSE dưới $0,82^\circ$ cho roll và pitch, và dưới $0,9^\circ$ cho heading, với sai số cực đại không vượt quá $2,2^\circ$ và thời gian phản hồi dưới 0,15s. So với phương pháp truyền thống sử dụng inclinometer, hệ thống giảm sai số cực đại khoảng 35-40%, cho thấy sự cải thiện đáng kể về độ chính xác và ổn định đo lường. Hệ thống đáp ứng yêu cầu của IMO Resolution MSC.532 và có thể tích hợp vào mạng giám sát trên tàu.

Các hướng nghiên cứu tiếp theo sẽ tập trung vào việc tích hợp tín hiệu vận tốc tàu từ GPS để bù trừ sai số gia tốc hướng tâm khi tàu quay vòng gấp, đồng thời triển khai bộ lọc Kalman thích nghi (Adaptive Kalman Filter) để giảm thiểu ảnh hưởng của rung động tần số cao và nhiễu từ trường, cũng như mở rộng phạm vi thử nghiệm trên các tàu có tải trọng lớn hơn trong điều kiện biển khắc nghiệt.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT25-26.69**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Fossen, T. I (2011), *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*, John Wiley & Sons, Ltd.
doi: 10.1002/9781119994138.
- [2] IMO (2023), *Resolution MSC.532(107): Amendments to the International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974* (Chapter V, Regulation 19). International Maritime Organization, London.
- [3] Perez (2005), *T. Ship Motion Control: Course Keeping and Roll Stabilisation Using Rudder and Fins.*, Springer.
- [4] Andrews, M. G. a. A (2015), *Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB*, Wiley.
- [5] InvenSense (2019), *MPU6050 Product Specification*.
- [6] Y. Niu, F. G., and S. Mao (2025), *Ship attitude prediction based on low-cost inertial measurement*

- units, Chinese Journal of Ship Research, Vol.20, No.1, pp. 1-9.
- [7] Park, H. J. L. a. D. J. (2022), *Analysis of Thermal Characteristics of MEMS Sensors for Measuring the Rolling Period of Maritime Autonomous Surface Ships*, J. Mar. Sci. Eng., Vol.10, No.7, p. 859.
- [8] Honeywell (2014), *HMC5883L 3-Axis Digital Compass IC*.
- [9] Kraft, E (2003), *A quaternion-based unscented Kalman filter for orientation tracking*, in Proceedings of the American Control Conference (ACC).
- [10] Madgwick, S. O (2010), *An efficient orientation filter for inertial and magnetic sensor arrays*. Technical report.
- [11] R. Mahony, T. H., and J. Pflimlin (2008), *Nonlinear complementary filters on the special orthogonal group*, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.53, No.5, pp.1203-1218.
- [12] Sabatini, A. M (2006), *Quaternion-based extended Kalman filter for determining orientation by inertial and magnetic sensing*, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol.53, No.7, pp.1346-1356.
- [13] GNSS (2014), *H. Vector V103 and V113 GPS Compass User Guide*, Hemisphere GNSS Inc., Scottsdale, AZ, USA,.
- [14] IMO (2013), *Resolution MSC.363(92): Performance Standards for Electronic Inclometers*, International Maritime Organization.

Ngày nhận bài:	13/01/2026
Ngày nhận bản sửa:	04/02/2026
Ngày duyệt đăng:	10/02/2026