

BỘ LỌC PHI TUYẾN KALMAN MỞ RỘNG LAI BÁM MỤC TIÊU TRONG ĐIỀU KIỆN ĐO LƯỜNG MỘT PHẦN**Nguyễn Huy Công^{1*}, Lê Hồng Minh¹, Nguyễn Văn Bình¹, Nguyễn Quang Minh¹**¹Trung tâm Công nghệ Vi điện tử và Tin học, Viện ứng dụng Công nghệ

*Tác giả liên hệ: vt_vidientu@mic.gov.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày một mô hình Khung bộ lọc Kalman mở rộng lai (Hybrid Extended Kalman Filter) linh hoạt để xử lý bài toán bám mục tiêu đo lường trong tọa độ cực ở điều kiện thực tế. Mô hình bao gồm một bộ lọc chính HEKF và một bộ dự đoán trạng thái (state predictor) hoạt động độc lập. HEKF có đầu vào đo lường hoạt động ở hai chế độ: đo lường đủ (full measurement - FM) và chỉ đo góc (angle-only - AO). Mô hình được tích hợp một chiến lược thích nghi bao gồm cơ chế chuyển đổi chế độ đo lường đồng bộ dữ liệu, cơ chế dự đoán trạng thái bám sát và hợp nhất trạng thái trong trường hợp chất lượng bám sát bị suy biến. Độ tin cậy của ước lượng tọa độ mục tiêu được đánh giá qua hiệp phương sai, hỗ trợ có hiệu quả cho quá trình ra quyết định của người điều khiển. Kết quả mô phỏng dựa trên một kịch bản gần với thực tế cho thấy khung HEKF đề xuất có khả năng duy trì cung cấp tọa độ mục tiêu với độ chính xác cao trong các giai đoạn bám sát mục tiêu, đồng thời ổn định và phục hồi nhanh khi hệ thống quay trở lại chế độ FM.

Từ khóa: Bộ lọc Kalman mở rộng lai (HEKF), xử lý đa tần số, bám sát chỉ đo góc, laser đo xa, hợp nhất trạng thái, đánh giá độ tin cậy

HYBRID EXTENDED KALMAN FILTER FOR TARGET TRACKING UNDER PARTIAL MEASUREMENT CONDITIONS**ABSTRACT**

This paper presents a flexible Hybrid Extended Kalman Filter (HEKF) framework for solving the target tracking problem under realistic conditions, where measurements are obtained in polar coordinates. The proposed framework consists of a primary HEKF and an independent state predictor module. The HEKF works within two measurement modes: Full Measurement (FM) and Angle-Only (AO). An adaptive strategy is integrated into the framework, incorporating a synchronized mode-switching mechanism, a state prediction and fusion process, and a degradation-handling mechanism to maintain tracking reliability when measurement quality deteriorates. The estimation confidence of target coordinates is evaluated through the state covariance, providing effective support for operator decision-making. Simulation results based on a near-realistic scenario demonstrate that the proposed HEKF framework can maintain high-accuracy target position estimation during tracking phases and exhibits robustness and fast recovery when the system returns to the FM mode.

Keywords: Hybrid Extended Kalman Filter (HEKF), multi-frequency processing, angle-only tracking, laser range finder, state fusion, reliability assessment

Ngày nhận bài: 23/10/2025 Ngày nhận bài sửa: 03/11/2025 Ngày duyệt đăng bài: 10/11/2025

1. GIỚI THIỆU

Các hệ tọa độ quang điện tử đo lường phần tử mục tiêu (bao gồm các góc và cự ly mục

tiêu) trong hệ tọa độ của cảm biến. Quá trình bám sát mục tiêu bằng các hệ thống này thường phải giải quyết vấn đề ước lượng trạng thái phi tuyến liên quan đến chuyển đổi đo lường từ tọa

độ cực/cầu sang tọa độ vuông góc. Theo các phân tích của Lee và cộng sự (2021), trên thực tế có thể thực hiện bám sát mục tiêu trong các hệ tọa độ khác nhau: i) Trong tọa độ hỗn hợp, ii) Trong hệ tọa độ vuông góc, và iii) Trong hệ tọa độ của cảm biến.

Để xử lý vấn đề phi tuyến trong các bài toán bám sát mục tiêu, bộ lọc Extended Kalman Filter (EKF), Unscented Kalman Filter (UKF) hay Cubature Kalman Filter (CKF) gần đây được phát triển mạnh mẽ, dựa trên tuyến tính hóa quanh ước lượng hiện tại hay sử dụng các điểm sigma để ước lượng thống kê hoặc ước lượng moment phân phối phi Gaussian, như đã đề cập trong các công trình của Lee và cộng sự (2021) và Jiang và cộng sự (2025). Biến thể Converted Measurement Kalman Filter (CMKF) cũng được sử dụng, như trong công bố của Cho và Min-JeaTahk (2022), để giải quyết bài toán đo lường trong tọa độ cực bằng cách chuyển đổi sang tọa độ vuông góc.

Trên thực tế hoạt động của các hệ thống đo lường quang học kết hợp laser đo xa (LRF) thường bắt gặp các tình huống như: i) Tần số làm việc không đồng bộ giữa cảm biến góc và laser đo xa (LRF), ii) Tỷ lệ trúng đích của laser thấp trong điều kiện bám sát phức tạp, và iii) Nhiều đo biến đổi theo trạng thái bám sát. Trong các tình huống này, các bộ lọc EKF/UKF/CKF hay CMKF bị phân kỳ nhanh chóng do chỉ hoạt động ở điều kiện đo lường đầy đủ đồng bộ, bị méo thống kê khi chuyển đổi tọa độ hay có độ phức tạp tính toán cao, dẫn tới kết quả bám sát mục tiêu bị suy biến đáng kể và trở nên không còn tin cậy được. Vấn đề này có thể giải quyết được nhờ các tùy biến bộ lọc Kalman kết hợp với những chiến lược xử lý phù hợp như trong các nội dung nghiên cứu của Korrdistan và cộng sự (2016), Hu và cộng sự (2012) và Cebeira và Vicente (2023).

Bài báo này đề xuất một kiến trúc bộ lọc Kaman mở rộng lại (HEKF) có khả năng thay

đổi cấu trúc cập nhật tùy thuộc vào loại dữ liệu đo lường có sẵn và mức độ tin cậy của trạng thái bám sát. Mô hình bao gồm:

- Một bộ lọc chính HEKF hoạt động ở hai chế độ đo lường đủ / chỉ góc với cơ chế chuyển đổi thích nghi và một bộ dự đoán trạng thái (state predictor) hoạt động độc lập.

- Cơ chế dự đoán trạng thái bám sát: TỐT/TRUNG BÌNH/KÉM/MẤT BẮM dựa trên chỉ số laser trúng đích Phit, cơ chế hợp nhất trạng thái thông minh tùy thuộc trạng thái bám sát.

- Hệ thống đánh giá độ tin cậy của tọa độ báo cáo dựa trên phân tích hiệp phương sai hỗ trợ quá trình ra quyết định của người điều khiển.

2. MÔ HÌNH BỘ LỌC KALMAN MỞ RỘNG LẠI (HEKF)

Xem xét bài toán bám sát chuyển động mục tiêu trên mặt phẳng ngang (2D) từ trạm quan sát cố định trên mặt đất. Mô hình HEKF hoạt động trên hai miền không gian khác nhau: i) Trạng thái và dự đoán trong tọa độ vuông góc $[x, y]$, cho phép mô tả mô hình động lực học tuyến tính, và ii) Đo lường trong tọa độ cực $[r, \theta]$, bước cập nhật sử dụng mô hình phi tuyến xử lý bằng EKF.

2.1. Mô hình trạng thái

Giả sử mục tiêu chuyển động đều theo mô hình vận tốc không đổi (constant velocity - CV) có vector trạng thái:

$$\mathbf{x}_k = [x_k, y_k, \dot{x}_k, \dot{y}_k]^T \quad (1)$$

Với x_k, y_k là tọa độ, $\dot{x}_k, \dot{y}_k$ là vận tốc mục tiêu trong hệ tọa độ vuông góc.

Phương trình động học chuyển đổi trạng thái tuyến tính trong hệ tọa độ vuông góc:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{F}\mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k \quad (2)$$

Trong đó, $\mathbf{w}_k \sim \mathcal{N}(0, \mathbf{Q})$ là nhiễu quá trình, $\mathbf{Q}$ là ma trận hiệp phương sai mô hình hóa những thay đổi nhỏ về vận tốc mà mô hình CV bỏ qua; $\mathbf{F}$ là ma trận chuyển đổi.

2.2. Mô hình đo lường

Cảm biến cung cấp cự ly r và góc phương vị θ của mục tiêu. Vector đo lường đầy đủ là:

$$\mathbf{z}_k = \begin{bmatrix} r_k \\ \theta_k \end{bmatrix} = \mathbf{h}(\mathbf{x}_k) + \mathbf{v}_k \quad (3)$$

với $\mathbf{v}_k \sim \mathcal{N}(0, \mathbf{R})$ là nhiễu đo lường, $\mathbf{R}$ là ma trận hiệp phương sai, $\mathbf{R} = \text{diag}(\sigma_r^2, \sigma_\theta^2)$; $\mathbf{h}(\mathbf{x}_k)$ là hàm đo lường:

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}_k) = \begin{bmatrix} \sqrt{x_k^2 + y_k^2} \\ \tan^{-1}(y_k/x_k) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Mô hình đo lường là phi tuyến, với đặc điểm là nhiễu Gaussian trong tọa độ cực sẽ trở nên phi tuyến khi chuyển sang tọa độ vuông góc, dẫn tới các ước lượng vị trí bị lệch (biased). Vấn đề này được xử lý bằng bộ lọc EKF thông qua tính các Jacobian tuyến tính hóa tại ước lượng hiện tại. Sử dụng hàng thứ hai của $\mathbf{h}(\mathbf{x}_k)$ với vector đo lường chỉ góc là:

$$\mathbf{z}_k = [\theta_k] = \tan^{-1}(y_k/x_k) + \mathbf{v}_\theta \quad (5)$$

Mô hình EKF thông thường chỉ hoạt động hiệu quả khi dữ liệu đo lường đủ. Trong trường hợp thiếu hoặc mất dữ liệu đo lường, EKF dùng cập nhật và nhanh chóng bị trôi dự đoán,

$$\text{HEKF Mode} = \begin{cases} \text{Đo đủ} & \text{nếu } r_k \in \mathcal{R}_{\text{valid}} \\ \text{Chỉ góc} & \text{nếu } r_k \notin \mathcal{R}_{\text{valid}} \text{ trong } \tau \text{ chu kỳ} \end{cases} \quad (6)$$

Để xử lý tính không đồng bộ giữa tần lặp laser và tần số HEKF, có thể dùng một bộ đệm trượt 30 ms để phát hiện có laser trả về hay không.

3.2. Bộ dự đoán trạng thái độc lập

Trong chế độ chỉ góc, cho dù được cập nhật liên tục về góc, ước lượng vị trí của HEKF mặc dù là trôi chậm hơn so với EKF thông thường ở cùng điều kiện nhưng vẫn sẽ bị trôi theo thời gian và sẽ trở nên đáng kể nếu HEKF hoạt động ở chế độ chỉ góc trong một khoảng thời gian dài. Trong trường hợp này, có thể dùng một bộ dự đoán trạng thái (SP) chạy song song và độc lập với HEKF. Bộ dự đoán trạng thái này cũng sử dụng mô hình CV cho mục tiêu được bám, chỉ thực hiện dự đoán dựa trên

phục hồi và hội tụ chậm khi có đủ đo lường trở lại như nhận xét của Lee và cộng sự (2021) và Jiang và cộng sự (2025). Nhiều giải pháp lọc với đo lường một phần (chỉ góc), như có giới thiệu trong các công bố của Hu và cộng sự (2012) và Cebeira và Vicente (2023), nhằm tận dụng đo lường góc được cập nhật với tần số cao để quản lý, duy trì hướng chuyển động của mục tiêu khi không có dữ liệu về cự ly của nó.

3. CHIẾN LƯỢC KHUNG HEKF

Khi triển khai mô hình HEKF yêu cầu cần phải có cơ chế chuyển đổi mượt mà giữa trạng thái đo lường đủ và đo lường chỉ góc $[r_k, \theta_k]^T \leftrightarrow [\theta_k]$. Đồng thời cũng cần phải có cơ chế kiểm soát sai lệch trong các trường hợp nhiễu đo lường phức tạp hoặc khi mô hình CV có nhiều quá trình thay đổi đáng kể

3.1. Cơ chế chuyển đổi chế độ HEKF

Có thể đề xuất kiểm tra cờ hai trạng thái LASER = CÓ (có tín hiệu cự ly do laser đo xa trả về) và LASER = KHÔNG (không có cự ly) trong mỗi nhịp làm việc để chuyển đổi chế độ của HEKF sử dụng trạng thái lọc cuối cùng tin cậy để khởi tạo chế độ lọc tiếp theo.

động học ổn định cuối cùng được quan sát trước khi hệ thống mất đo lường một phần. Trạng thái của bộ dự đoán:

$$\mathbf{x}_k^{sp} = [x_k^{sp}, y_k^{sp}, \dot{x}_k^{sp}, \dot{y}_k^{sp}]^T \quad (7)$$

với ma trận chuyển đổi trạng thái $\mathbf{F}^{sp}$ tương tự như (2) của HEKF.

Bộ dự đoán trạng thái (SP) có thể coi là "bản sao bảo thủ" của HEKF: trong khi HEKF sẽ nhận bất định đo lường lớn trong chế độ chỉ góc, thì bộ dự đoán trạng thái sử dụng độ bất định tương đối nhỏ, giả định một sự ổn định nhất định trong mô hình động học trong giai đoạn này.

Vai trò của SP sẽ có ý nghĩa trong trường hợp đường ngắm (LOS) trở mục tiêu bị sai lệch

hoặc dao động xung quanh mục tiêu trong các trạng thái bám sát mục tiêu thực tế. Trong các tình huống như vậy, HEKF không nhận biết được LOS trở mục tiêu chính xác hay không, mà đều coi tất cả các đo lường góc trong quá trình chỉ góc là thuộc mục tiêu. Để thấy là khi đó HEKF sẽ cho kết quả cập nhật thiếu tin cậy

$$\mathbf{x}_k^{fused} = \omega \mathbf{x}_k^{HEKF} + (1 - \omega) \mathbf{x}_k^{sp}, \quad \omega \in (0,1) \quad (8)$$

Đối với hiệp phương sai $\mathbf{P}^{fused}$ ta cũng tiến hành hợp nhất theo mô hình (8) trên. Cơ chế này hoạt động như một bộ lọc nhiễu thông minh cho bộ lọc chính HEKF.

Điểm nhạy cảm nhất trong (8) là tính toán hoặc có kịch bản lựa chọn (tra bảng) chính xác trị số của ω tùy thuộc vào chất lượng góc đo

$$\omega_k = \omega_{min} + (\omega_{max} - \omega_{min})[1 - Tr(P)_{norm}(k)] \quad (9)$$

với $Tr(P)_{norm}(k) = Tr(P_k)/Tr(P_{max})$ là hiệp phương sai tự chuẩn hóa, $Tr(P_{max})$ là ngưỡng mà dữ liệu trở nên không còn tin cậy, chọn được bằng thực nghiệm. Biểu thức (9) là dạng nội suy tuyến tính giá trị của ω trong miền giá trị $(\omega_{max} - \omega_{min})$ của nó.

3.3. Đánh giá trạng thái bám sát

Để có cơ sở lựa chọn ω một cách thích nghi, ta cần phải dự đoán được chất lượng bám

Bảng 1. Phân loại trạng thái bám sát trong mô phỏng

Trạng thái bám sát	P_{hit}	$\sigma_\theta^2(^{\circ})$	ω
TỐT	1,0 (2/2)	0,05...0,10	0,8...0,95
TRUNG BÌNH	0,5(1/2)	0,10...0,30	0,4...0,8
KÉM	0,0 (0/2)	0,30...0,50	0,15...0,4
MẤT BẮM	0,0 (0/4)	>0,50	0,05...0,15

Nguồn: Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

4.1. Thiết lập mô phỏng

- Phương pháp: Monte-Carlo 50 lần, tổng thời gian bám sát 20 s;

- HEKF: 100Hz (10 ms) đồng bộ với encoder, LRF 2 pps (500 ms $\pm$ 5 ms);

và sai lệch so với thực tế. Để "chỉnh sửa" hoặc "kiểm chế" những sai số tương tự, có thể dùng một bước hợp nhất trạng thái giữa HEKF và SP dựa trên trọng số giao điểm hiệp phương sai (Covariance Intersection - CI), không quan tâm đến tính tương quan của chúng:

lượng được: độ chính xác trở mục tiêu càng cao, trạng thái cập nhật của bộ lọc càng chính xác, thì ω càng lớn và ngược lại. Trong thực tế, nếu độ chính xác bám sát mục tiêu cao, thì sai lệch đo góc giảm và ngược lại. Mô hình HEKF sử dụng trọng số ω được điều chỉnh thích nghi theo trạng thái bám sát:

sát của hệ thống dựa trên đo lường. Các trạng thái bám sát có thể được dự đoán dựa trên tỷ lệ laser trúng đích: Gọi số lượng các xung laser trả về là N_{hit} , ta có tỷ số laser trúng đích trong một chu kỳ làm việc của LRF là:

$$P_{hit} = \frac{N_{hit}}{N_{total}} \quad (10)$$

- Mục tiêu: chuyển động thẳng đều, vị trí đầu (100m,1000m), $V = 10\text{m/s}$, góc 30° ;

- Máy đo cố định trên mặt phẳng ngang: đo cự ly và phương vị $[r, \theta]$ mục tiêu;

- Nhiễu đo: $\sigma_r^2 = 5\text{m}$, $\sigma_\theta^2 = 0,05^{\circ} - 0,5^{\circ}$ (theo trạng thái bám);

- Nhiễu quá trình: $\sigma_a^2 = 0,1$ và $0,5 \text{ m/s}^2$.

4.2. Kết quả và phân tích

Bảng 2. Hiệu suất tổng thể

Chỉ số	HEKF	EKF	UKF	CMKF
RMSE vị trí (m)	$6,01 \pm 0,63$	$21,56 \pm 3,45$	$17,08 \pm 2,78$	$25,23 \pm 4,12$
RMSE vận tốc (m/s)	$0,59 \pm 0,08$	$2,10 \pm 0,35$	$1,56 \pm 0,24$	$2,45 \pm 0,42$
RMSE FM (m)	$5,12 \pm 0,52$	$6,23 \pm 0,68$	$5,78 \pm 0,61$	$6,89 \pm 0,75$
RMSE AO (m)	$8,78 \pm 1,12$	$34,67 \pm 5,23$	$27,45 \pm 4,12$	$42,89 \pm 6,78$
Thời gian tính toán (ms)	$1,58 \pm 0,15$	$0,92 \pm 0,08$	$2,45 \pm 0,22$	$1,18 \pm 0,11$
Số lần phân kỳ	1/50	14/50	6/50	19/50

Nguồn: Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả

Bảng 2 cho thấy HEKF có ưu thế vượt trội so với EKF, UKF và CMKF, đặc biệt là trong chế độ chỉ góc (AO): HEKF duy trì RMSE vị trí trung bình là 8,78 m, lần lượt tốt hơn EKF 74,7%, UKF 68%, và CMKF 79,5%. Ở chế độ đo đủ, RMSE vị trí của HEKF có độ tin cậy xấp xỉ lý thuyết ($\sigma_r^2 = 5\text{m}$). So với EKF và

CMKF thì HEKF có thời gian tính toán lâu hơn, nhưng vẫn so sánh tốt với UKF, và đảm bảo tính thời gian thực. HEKF có số lần bị phân kỳ trong suốt thời gian mô phỏng là không đáng kể, CMKF bị phân kỳ lớn do tính phi tuyến của đo lường.

Bảng 3. Hiệu suất của HEKF theo kịch bản giai đoạn bám sát trong mô phỏng

Giai đoạn bám sát	HEKF (m)	EKF (m)	UKF(m)	ω trung bình
TỐT (0-3s)	$2,15 \pm 0,23$	$2,34 \pm 0,28$	$2,28 \pm 0,25$	$0,86 \pm 0,07$
TRUNG BÌNH (3-7s)	$3,67 \pm 0,45$	$9,45 \pm 1,23$	$7,89 \pm 0,98$	$0,60 \pm 0,08$
TỐT (7-9s)	$2,28 \pm 0,25$	$16,78 \pm 2,45$	$13,45 \pm 1,89$	$0,83 \pm 0,06$
KÉM (9-11s)	$10,12 \pm 1,45$	$47,89 \pm 6,78$	$39,23 \pm 5,45$	$0,22 \pm 0,04$
TRUNG BÌNH (11-15s)	$5,45 \pm 0,67$	$30,12 \pm 4,12$	$23,67 \pm 3,45$	$0,55 \pm 0,07$
TỐT (15-20s)	$2,95 \pm 0,32$	$16,45 \pm 2,34$	$13,78 \pm 1,95$	$0,80 \pm 0,06$

Nguồn: Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả

Theo Bảng 3, HEKF có độ ổn định cao qua các giai đoạn bám sát: độ lệch chuẩn của HEKF là 0,23-1,45 m, trong khi của EKF dao động từ 0,28 - 6,78 m, của UKF là 0,25 - 5,45 m. Cơ chế hợp nhất trạng thái của HEKF chứng

tỏ tác dụng vượt trội ở giai đoạn bám sát kém so với hai bộ lọc còn lại. Trọng số hợp nhất ω thay đổi từ 0,86 (TỐT) xuống 0,22 (KÉM) phản ánh đúng logic điều khiển.

Bảng 4. Ảnh hưởng của nhiễu quá trình lên hoạt động của HEKF

Quá trình	RMSE (m)	ω trung bình	Lỗi tương đối	Thời gian phục hồi (s)
Đi vào, $\sigma_a^2=0,1$	$4,56 \pm 0,48$	$0,41 \pm 0,05$	$0,46 \pm 0,06\%$	$1,1 \pm 0,2$
Đi vào, $\sigma_a^2=0,5$	$6,78 \pm 0,72$	$0,29 \pm 0,04$	$0,82 \pm 0,10\%$	$1,6 \pm 0,3$
Đi ra, $\sigma_a^2=0,1$	$7,89 \pm 0,85$	$0,35 \pm 0,04$	$0,72 \pm 0,09\%$	$2,1 \pm 0,3$
Đi ra, $\sigma_a^2=0,5$	$11,23 \pm 1,25$	$0,22 \pm 0,03$	$1,02 \pm 0,13\%$	$3,5 \pm 0,5$

Nguồn: Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả

Số liệu trên Bảng 4 phản ánh thực tế: khi nhiễu quá trình tăng, mô hình CV bị vi phạm, RMSE tăng ~ 48% khi σ_a^2 tăng từ 0,1 m/s² lên 0,5 m/s². Khi mục tiêu đi ra, RMSE tăng mạnh ~73% do độ nhạy góc giảm theo tăng khoảng

cách, thời gian phục hồi cũng tăng. Kết quả còn cho thấy HEKF có khả năng thích nghi tự động: ω giảm khi nhiễu tăng, ưu tiên bộ dự đoán trạng thái trong các điều kiện khó.

Bảng 5. Phân tích hiệu quả hợp nhất trạng thái ($Tr(P)_{max} = 600$)

Thời điểm	$Tr(P)_{norm}$	ω	RMSE không hợp nhất (m)	RMSE có hợp nhất (m)	Giảm sai số
4,5s (KÉM)	0,742±0,076	0,215 ± 0,03	18,1 ± 2,3	10,8 ± 1,4	40,3 ± 3,2%
6,2 s (TB)	0,5211±0,054	0,518 ± 0,06	14,5 ± 1,8	8,9 ± 1,1	38,6 ± 2,9%
10,1 s (KÉM)	0,891±0,087	0,172 ± 0,02	46,8 ± 5,6	28,1 ± 3,4	40,0 ± 3,1%
13,8 s(TB)	0,595±0,070	0,452 ± 0,05	24,3 ± 2,9	14,6 ± 1,8	39,9 ± 3,0%
Trung bình	0,687 ± 0,00	0,339 ± 0,04	25,9 ± 3,2	15,6 ± 1,9	39,7 ± 2,1%

Nguồn: Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả

Bảng 5 cho thấy rằng, giảm sai số tới 40 % với độ bất định cao (0,891), 38,6% ở độ bất định trung bình (0,521). Độ lệch chuẩn của các

tham số thấp cho thấy tính ổn định của cơ chế hợp nhất đã đề xuất. Giá trị $Tr(P)$ chuẩn hóa dễ dàng thiết lập ngưỡng và khá trực quan.

Bảng 6. Hiệu quả xử lý không đồng bộ tần số

Chỉ số	Không đệm	Có đệm 30ms	Cải thiện
RMSE trung bình (m)	6,34 ± 0,71	6,01 ± 0,63	+5,2%
Số lần chuyển mode	35 ± 4	22 ± 3	+37,1%
Ổn định vận tốc (m/s)	0,62 ± 0,09	0,59 ± 0,08	+4,8%

Nguồn: Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả

Có thể thấy, bộ đệm 30 ms giảm đáng kể chuyển chế độ HEKF sai do tính không ổn định (jitter) tần lặp laser, đồng thời cải thiện 5,2% độ chính xác tổng thể.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã đề xuất thành công một khung bộ lọc Kalman mở rộng lai (HEKF) thích hợp cho bài toán bám mục tiêu trong điều kiện đo lường một phần và không đồng bộ, ở những giai đoạn bám sát có chất lượng suy biến khác nhau. HEKF đạt RMSE trung bình $6,01 \pm 0,63$ m, cải thiện 72,1% so với EKF trong điều kiện thực tế với jitter laser ± 5 ms. Cơ chế hợp nhất trạng thái thích nghi với trọng số ω nội suy làm giảm trung bình $39,7 \pm 2,1\%$ sai số, phản ánh qua quan hệ ngược chiều giữa $Tr(P)_{norm}$ và ω . Giải pháp bộ đệm 30 ms giảm 37,1% chuyển chế độ sai, cho thấy việc xử lý không đồng bộ mang lại kết quả khả quan. Mô phỏng dựa trên phương pháp Monte-Carlo có độ tin cậy cao.

Mô hình HEKF có tính ứng dụng thực tế cao, có thể triển khai các bước cứng hóa trên nền tảng nhúng và thử nghiệm thực tế, mở rộng cho hệ thống 3D và tích hợp các mô hình

về thời gian

chuyển động phức tạp, phát triển cơ chế học thích nghi trực tuyến cho các tham số hệ thống. Giải pháp này hoàn toàn khả thi cho những ứng dụng bám sát mục tiêu sử dụng bộ chuyển động pan-tilt và cảm biến quang điện tử trong mục đích quân sự.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu được tài trợ bởi Đề tài cấp bộ (2024-2025) " Nghiên cứu thiết kế và chế thử kính ngắm quang điện tử có tính năng đo xa laser và tính toán điểm ngắm tự động dùng cho bắn thẳng trên pháo tự hành " do Viện Ứng dụng Công nghệ chủ trì.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Jihoon Lee, & et al. (2021). Performance Verification of a Target Tracking System with a Laser Rangefinder. *Digital Object Identifier 10.1109/IEEE ACCESS*, 9, 30993.
- Shida Jiang, Junzhe Shi, & Scott Moura (23 June 2025). A new framework for nonlinear Kalman filters. *Submitted to Automatica*, arXiv: 2407.05717v10.

Min-Huyn Cho, & Min-JeaTahk (2.2022). Decorrelated Debiased Coverted Measurement Kalman Filter for Phased Array Radar Tracking System. *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, 58 (1), 581-595.

Mojtaba Korrdestan, & et al (2016). A New Fusion Estimation Method for Multi-rate Multi-sensor Systems with Missing Measurements. *IEEE ACCESS*, 4, 1-11.

Jun Hu, & et al (2012). Extended Kalman filtering with stochastic nonlinearities and multiple missing measurements. *Automatica*, 9, 2007-2015.

Alvaro Arroyo Cebeira, & Mariano Asensio Vicente (2023). Adaptive IMM-UKF for Airborne Tracking. *Aerospace*, 10, 698.