

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA ĐỘ TRỄ TÍNH TOÁN ĐẾN ĐỘ CHÍNH XÁC CỦA NGÒI NỔ CẬN ĐÍCH FMCW VÀ GIẢI PHÁP BÙ TRỄ DỰA TRÊN VẬN TỐC DỰ ĐOÁN

INVESTIGATING THE IMPACT OF PROCESSING LATENCY ON FMCW PROXIMITY FUZE ACCURACY AND A VELOCITY-BASED PREDICTIVE COMPENSATION SCHEME

Hoàng Đình Nguyễn¹, Võ Công Tú¹, Phạm Thành Đông^{2,*}

¹Viện Công nghệ, Tổng cục Công nghiệp quốc phòng

²Khoa Hàng không vũ trụ, Học viện Kỹ thuật quân sự

*Email: pham.thanh-dong@lqdtu.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo này nghiên cứu ảnh hưởng của độ trễ tính toán trong hệ thống radar Frequency-modulated continuous wave (FMCW) lên độ chính xác của ngòi nổ cận đích hoạt động ở tốc độ cao. Khi vận tốc tương đối lớn, độ trễ xử lý gây ra sai số khoảng cách đáng kể. Trong bài báo này, nhóm tác giả xây dựng mô hình tính toán sai số và đề xuất giải pháp bù trễ dựa trên vận tốc dự đoán. Thông qua mô phỏng Monte Carlo, chứng minh rằng sai số bình phương trung bình của khoảng cách khi không bù trễ tăng tuyến tính theo vận tốc, trong khi giải pháp bù trễ đề xuất có thể giảm thiểu sai số này tới hơn 90%, duy trì độ chính xác gần với giới hạn nhiễu đo lường. Nghiên cứu này cung cấp cơ sở quan trọng cho việc thiết kế thuật toán thời gian thực cho ngòi nổ cận đích tốc độ cao.

Từ khóa: FMCW Radar; Ngòi nổ cận đích; Độ trễ tính toán; Bù trễ; Sai số bình phương trung bình; Ước lượng vận tốc.

ABSTRACT

This paper investigates the impact of computational latency (processing delay) in Frequency-Modulated Continuous Wave (FMCW) radar systems on the accuracy of high-velocity proximity fuzes. When the relative velocity is high, the processing delay introduces a significant ranging error. In this study, the authors develop an error calculation model and propose a velocity-based predictive compensation scheme. Through Monte Carlo simulations, it is demonstrated that the Root Mean Square Error (RMSE) of the range when uncompensated increases linearly with velocity, while the proposed compensation solution can mitigate this error by over 90%, maintaining accuracy close to the measurement noise limit. This research provides an essential foundation for designing real-time algorithms for high-speed proximity fuzes.

Keywords: FMCW Radar; Proximity Fuze; Computational Latency; Delay Compensation; Root Mean Square Error; Velocity Estimation.

1. GIỚI THIỆU

Ngòi nổ cận đích (Proximity Fuze) là thành phần then chốt trong các hệ thống vũ khí hiện đại, yêu cầu kích nổ chính xác khi đạt đến một khoảng cách an toàn (R_{safe}) so với mục tiêu [1, 3, 4, 8].

Radar loại FMCW được ưu tiên sử dụng trong các ngòi nổ do khả năng đo độ phân giải khoảng cách cao ($\Delta R \approx c/(2B)$) và cung cấp đồng thời thông số vận tốc [6, 7]. Tuy nhiên, trong các hệ thống vũ khí tốc độ cao, độ trễ thời gian cần thiết cho việc thu thập dữ liệu, giải điều chế và xử lý thuật toán (Fast Fourier Transform - FFT, dò tìm mục tiêu) dẫn đến độ trễ tính toán τ_{proc} [5]. Các trang thiết bị thuộc các hệ thống lắp trên tên lửa hoặc trên các loại đạn tốc độ cao, thường phải đáp ứng các yêu cầu phản ứng cực nhanh vì độ trễ tính toán (τ_{proc}) là nguồn gây sai số khoảng cách đáng kể. Nếu không bù trễ, khoảng cách $R_{measured}$ được trả về là của thời điểm τ_{proc} trước đó, dẫn đến sai lệch khoảng cách $\Delta R \approx v \cdot \tau_{proc}$. Sai lệch này có thể khiến vật thể kích nổ quá sớm hoặc quá muộn, làm giảm đáng kể hiệu quả chiến đấu.

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả tập trung phân tích định lượng mối quan hệ giữa vận tốc tương đối (v) và sai số bình phương khoảng cách (RMSE) khi không có bù trễ. Từ đó, nhóm đề xuất giải pháp bù trễ bằng việc xây dựng mô hình toán học cho giải pháp bù trễ dựa trên vận tốc dự đoán. Trên cơ sở mô hình toán đã xây dựng, tiến hành đánh giá hiệu quả giảm thiểu RMSE giữa hệ thống không bù trễ và hệ thống có bù trễ qua mô phỏng Monte Carlo. Hướng tiếp cận này cung cấp giải pháp dự đoán đơn giản sử dụng thông số vận tốc \hat{v} , nhưng lại cho hiệu quả gần tương đương với các phương pháp phức tạp hơn, mà yêu cầu tính toán lại thấp hơn khá nhiều. Điều này phù hợp cho các giai đoạn đầu của quá trình hình thành

giải pháp kỹ thuật, giúp tính toán sơ bộ thông số một cách nhanh chóng, làm cơ sở để đề xuất các giải pháp phức tạp hơn như bộ lọc dự đoán Kalman Filter (KF) hoặc Unscented Kalman Filter (UKF).

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ MÔ HÌNH TOÁN HỌC

2.1. Nguyên lý ước lượng khoảng cách và vận tốc bằng radar FMCW

Radar FMCW sử dụng sự khác biệt tần số beat (f_b) giữa tín hiệu gửi và tín hiệu nhận để ước lượng khoảng cách R . Khi mục tiêu có vận tốc v , tín hiệu nhận còn chứa tần số Doppler (f_d) [6].

Sử dụng chuỗi chirp lên (f_{up}) và chirp xuống (f_{down}) để tách f_r và f_d [6, 7]:

$$\text{Tần số Range Beat: } f_r = \frac{f_{up} + f_{down}}{2}$$

$$\text{Tần số Doppler: } f_d = \frac{f_{up} - f_{down}}{2}$$

Từ các giá trị tần số thu được của radar FMCW, khoảng cách $R_{measured}$ và vận tốc ước lượng \hat{v} của mục tiêu được tính như sau:

$$R_{measured} = \frac{cT}{2B} \cdot f_r \quad (1)$$

$$\hat{v} = \frac{\lambda}{2} \cdot f_d$$

2.2. Mô hình sai số đo độ trễ và giải pháp bù trễ

Trong bài toán ngòi nổ, độ trễ xử lý τ_{proc} (thường là vài ms) lớn hơn rất nhiều so với thời gian chirp T (thường là vài μ s hoặc vài chục μ s).

Do đó, lỗi do mục tiêu di chuyển trong khoảng thời gian $2T$ là không đáng kể so với lỗi do mục tiêu di chuyển trong khoảng thời gian τ_{proc} . Nội dung nghiên cứu của bài báo này tập trung vào vấn đề cốt lõi là bù lỗi độ trễ xử lý τ_{proc} , do vậy khoảng cách đo được $R_{measured}$ có thể coi tương ứng với vị trí mục tiêu R_{tx} tại thời điểm T_0 . Vị trí kích nổ mong muốn là R_{act} tại thời điểm $T_0 + \tau_{proc}$.

Sai số khoảng cách (không bù): Vị trí thực tế hiện tại (R_{act}) so với vị trí đo được ($R_{measured}$):

$$\Delta R_{uncomp} = R_{act} - R_{measured} \approx v \cdot \tau_{proc} \quad (2)$$

Giải pháp bù trễ dự đoán: Vận tốc ước lượng \hat{v} được sử dụng để dự đoán sự dịch chuyển trong thời gian τ_{proc} .

$$R_{corrected} = R_{measured} + \hat{v} \cdot \tau_{proc} \quad (3)$$

Sai số đã bù: Sai số sau khi bù chủ yếu bị chi phối bởi nhiễu đo lường và sai số ước lượng \hat{v} .

$$\Delta R_{comp} = R_{act} - R_{corrected} \quad (4)$$

3. PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG VÀ XỬ LÝ DỮ LIỆU

Trong bài báo này, nhóm tác giả sử dụng môi trường phần mềm MATLAB để thực hiện mô phỏng Monte Carlo, đánh giá hiệu suất bằng sai số bình phương trung bình (RMSE) của khoảng cách.

3.1. Thiết lập mô hình mô phỏng

Các tham số đầu vào mô phỏng bao gồm: Tham số về radar FMCW, tham số độ trễ, tham số về nhiễu được thể hiện trong bảng 1.

Bảng 1. Các tham số đầu vào mô phỏng

TT	Tham số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
1	Tốc độ ánh sáng	c	3×10^8	m/s
2	Tần số trung tâm	f_c	77	GHz
3	Băng thông quét	B	500	MHz
4	Thời gian chirp	T	100	μ s
5	Độ trễ tính toán	τ_{proc}	5	ms
6	Vị trí ban đầu	R_{tx}	100	m
7	Nhiều chuẩn (tần số)	noise _{std}	10	Hz
8	Số lần lặp Monte Carlo	N	2000	

3.2. Quy trình tính toán mô phỏng

Sử dụng mô phỏng Monte Carlo với $N = 2000$ lần lặp để đảm bảo tính thống kê. Vận tốc tương đối $|v|$ thay đổi trong khoảng 50 m/s đến 500 m/s (mô phỏng kịch bản tiếp cận tốc độ cao). Biến phụ thuộc là giá trị RMSE của khoảng cách (R) ở mỗi trường hợp vận tốc.

Quy trình tính toán được thực hiện theo các trình tự sau:

- Thiết lập kịch bản thay đổi vận tốc tương đối $|v|$;

- Xác định vị trí thực tế tại T_0 : R_{tx} ;
- Xác định vị trí thực tế tại $T_0 + \tau_{proc}$:

$$R_{act} = R_{tx} + v \cdot \tau_{proc}$$

- Tính toán $R_{measured}$ và $R_{corrected}$ (từ R_{tx} và \hat{v});

- Tính sai số:

$$\Delta R_{uncomp} = R_{act} - R_{measured}$$

$$\Delta R_{comp} = R_{act} - R_{corrected} \quad (5)$$

- Tính RMSE cho từng trường hợp vận tốc

tốc dựa trên 2000 lần lặp:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta R_i)^2} \quad (6)$$

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Xác định sai số khoảng cách cơ bản do nhiễu

Sai số khoảng cách cơ bản do nhiễu ΔR tương đương với nhiễu tần số $\Delta f = 10$ Hz (noise_{std}) được tính toán bằng cách sử dụng công thức (1):

$$\Delta R = \frac{cT}{2B} \cdot \Delta f$$

Với các tham số đã thiết lập trong mô hình mô phỏng được cho trong bảng 1, xác định được giá trị ΔR như sau:

$$\Delta R = \frac{(3 \times 10^8 \text{ m/s}) \times (100 \times 10^{-6} \text{ s})}{2 \times (500 \times 10^6 \text{ Hz})} \times (10 \text{ Hz})$$

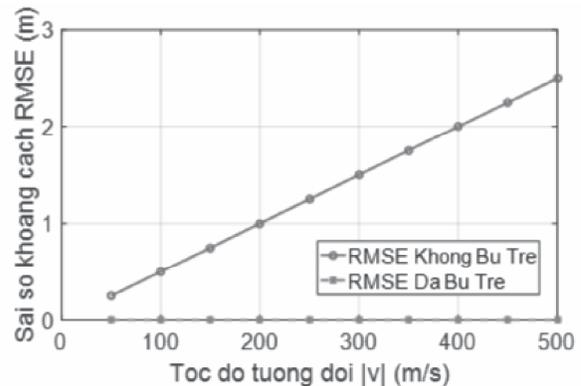
$$\Delta R \approx 0.003 \text{ m}$$

ΔR là sai số lý thuyết do độ phân giải tần số đơn thuần, hay còn được coi là mức nhiễu nền về mặt vật lý (lý thuyết), thường có giá trị rất nhỏ (như tính toán ở trên là 3 mm) và chỉ mang tính chất tham khảo. Vì trong thực tế, quá trình đo lấy số liệu của radar còn chịu ảnh hưởng của rất nhiều yếu tố, một trong số yếu tố quan trọng và ảnh hưởng nhất là độ trễ tính toán (τ_{proc}) dẫn đến các sai số về khoảng cách, đặc biệt đối với các đối tượng mục tiêu tốc độ cao.

4.2. Ảnh hưởng của vận tốc lên RMSE của khoảng cách

Sử dụng các tham số đầu vào trong bảng

1 và các biểu thức tính toán (1) ÷ (6), xác định được giá trị RMSE theo dải tốc độ chuyển động tương ứng của mục tiêu. Hình 1 minh họa mối quan hệ giữa vận tốc $|v|$ và RMSE của khoảng cách.



Hình 1. Ảnh hưởng của vận tốc đến sai số khoảng cách đo RMSE

RMSE chưa bù trễ ($RMSE_{uncomp}$): Theo kết quả trên đồ thị cho thấy RMSE của hệ thống không bù trễ ($RMSE_{uncomp}$) tăng gần như tuyến tính theo giá trị tuyệt đối của vận tốc $|v|$. Tại giá trị vận tốc $|v| = 500$ m/s, sai số đạt ~ 2.5 m. Số liệu tính toán đã khẳng định độ trễ tính toán là yếu tố chi phối sai số chính trong môi trường tốc độ cao.

RMSE đã bù trễ ($RMSE_{comp}$): Đường RMSE này duy trì ở mức thấp và ổn định (khoảng ~ 0.05 m) trên toàn bộ dải vận tốc. Mức sai số này khá gần với sai số do nhiễu đo lường noise_{std} và sai số do phép ước lượng vận tốc $|v|$.

4.3. Hiệu quả của giải pháp bù trễ

Phân tích các số liệu tính toán được từ mô hình toán ở trên, số liệu tính toán của các trường hợp không bù trễ và bù trễ theo dải tốc độ khác nhau được và thể hiện trong ba trường hợp tại Bảng 2. Kết quả chỉ ra rằng giải pháp bù

trễ dựa trên vận tốc dự đoán có thể loại bỏ gần như hoàn toàn sai số gây ra bởi độ trễ tính toán, đưa độ chính xác của ngòi nổ về gần với giới hạn vật lý của cảm biến (nhiều).

Bảng 2. Sai số RMSE trường hợp bù trễ và không bù trễ theo vận tốc

Tham số	v = 100 m/s	v = 250 m/s	v = 500 m/s
RMSE không bù, RMSE _{uncomp} (m)	0.5	1.25	2.5
RMSE bù, RMSE _{comp} (m)	0.05	0.05	0.05
Hiệu suất (Giảm % RMSE)	90 %	96 %	98 %

Hiệu suất vượt trội của phương pháp bù trễ trong bài báo nằm ở tính đơn giản, dựa trên các thông số khoảng cách và vận tốc v được cung cấp đồng thời bởi radar FMCW trong cùng một chu kỳ đo (thông qua các tần số range và doppler). Phương pháp này đặc biệt phù hợp với các mô hình xử lý thời gian thực, cần tốc độ xử lý nhanh, trả kết quả gần đúng ngay lập tức. Tuy nhiên giải pháp này cũng tồn tại những giới hạn như giả định τ_{proc} là hằng số. Thực tế, τ_{proc} có thể dao động do tải CPU/DSP, cần phải được timestamping chính xác bằng phần cứng tại thời điểm ADC capture. Bên cạnh đó giải pháp trong bài cũng chưa có bộ lọc trạng thái. Phương pháp hiện tại phù hợp trong các trường hợp bù trễ từng mẫu độc lập.

Để tăng cường độ chính xác và tin cậy, trong nghiên cứu tiếp theo, nhóm tác giả hướng tới tích hợp bộ lọc dự đoán như Kalman Filter (KF) hoặc Unscented Kalman Filter (UKF). KF sử dụng $R_{corrected}$ như một phép đo dự đoán để tinh chỉnh trạng thái theo dõi bộ tham số (R, v) [5, 6]. Để cải thiện ước lượng v , việc kết hợp

dữ liệu từ IMU (Inertial Measurement Unit) có thể cung cấp thông tin gia tốc để bù khoảng cách khi độ trễ lớn [5].

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã đánh giá thành công ảnh hưởng của độ trễ tính toán τ_{proc} lên ngòi nổ FMCW, chỉ ra rằng sai số khoảng cách có thể vượt quá 2 m ở vận tốc cao. Giải pháp bù trễ dựa trên vận tốc dự đoán được đề xuất đã giảm thiểu RMSE của khoảng cách tới hơn 90%, cho phép hệ thống duy trì độ chính xác cần thiết cho quyết định kích nổ. Điều này đặc biệt quan trọng cho việc triển khai ngòi nổ cận đích trên các nền tảng thiết bị chuyển động với tốc độ cận âm và siêu âm. ❖

Ngày nhận bài: 05/12/2025

Ngày phản biện: 15/12/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Nguyễn Ngọc Chương, Dương Văn Yên, “Thiết kế ngòi đạn”. NXB. Quân đội nhân dân, 2019.
- [2]. Đàm Hữu Nghị, “Đạn tên lửa phòng không có điều khiển”. Học viện Kỹ thuật quân sự, 1990.
- [3]. Nguyễn Ngọc Dương, “Cấu tạo và hoạt động của ngòi nổ không tiếp xúc pháo binh”. Học viện Kỹ thuật quân sự, 1989.
- [4]. V.K. Arora, “Proximity Fuzes: Theory and Techniques”. Defence Scientific Information & Documentation Centre (DESIDOC), 2010.
- [5]. U.S. Army Armament Research, “Next-Generation Fuze Technologies”. Development and Engineering Center (ARDEC), ARDEC Technical Report, Picatinny Arsenal, NJ, USA, 2019.
- [6]. E. O. Schweitzer, “Advanced Electronic Fuzing Systems”. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017.
- [7]. Dmitry R. Melnikov et al., “Miniature Radar-Based Proximity Fuze for Artillery Shells”. Russian Journal of Military Technology, Moscow, 2020.
- [8]. U.S. Department of Defense, “Military Handbook – Fuzing Systems”. MIL-HDBK-757, Washington DC, 2018.