

Giải pháp xử lý hiển thị mục tiêu đảm bảo điều khiển bám sát theo chu kỳ trong ra đa đơn xung

Hà Huy Dũng*, Nguyễn Văn Hạnh, Cao Việt Linh,
Đoàn Văn Tùng, Đinh Văn Trường

Viện Ra đa, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự, 17, Hoàng Sâm, Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam.

*Tác giả liên hệ: dungsystemdesigner@gmail.com

Nhận bài: 12/9/2024; Hoàn thiện: 08/11/2024; Chấp nhận đăng: 12/12/2024; Xuất bản: 25/12/2024.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.100.2024.39-45>

TÓM TẮT

Ra đa đơn xung sử dụng tín hiệu thu tương tự theo từng chu kỳ kích phát để tách sai số tọa độ của mục tiêu bám sát. Việc lựa chọn, xác nhận mục tiêu cần bám sát được thực hiện nhờ thao tác trực tiếp ra đa trên màn hình hiển thị. Bài báo xây dựng phương pháp xử lý thông tin về mục tiêu cung cấp lên màn hình hiển thị đảm bảo hai tiêu chí là đồng bộ với các thuật toán bám sát ở tốc độ cao và cung cấp chính xác dữ liệu về mục tiêu hỗ trợ quá trình chọn mục tiêu cần bám sát trên màn hình.

Từ khóa: Đơn xung; Bám sát; Tương tự; Theo từng chu kỳ; Ra đa; màn hình.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ra đa đơn xung (Monopulse Radar) là ra đa 3 tọa độ có cấu trúc gọn nhẹ, thời gian cơ động, triển khai và đưa vào hoạt động trong thời gian ngắn. Ra đa đơn xung được phát triển phục vụ cho quản lý và bám sát các mục tiêu trong vùng cự ly gần. Đối tượng bám sát của loại ra đa này rất đa dạng bao gồm các mục tiêu tốc độ chậm như tàu chiến, tàu không người lái, máy bay không người lái (UAV) đến các mục tiêu trên không có tốc độ vượt âm [1]. Chức năng bám sát của ra đa đơn xung được thực hiện nhờ so sánh tín hiệu giữa kênh thu tổng và kênh thu hiệu với hai phương pháp: quét búp sóng theo hình nón hoặc phân cực tín hiệu nhờ cấu trúc khe ăng ten. Quá trình bám sát được thực hiện tức thời với tín hiệu thu [2]. Để lựa chọn được mục tiêu bám sát, cần có các giải pháp để lọc bỏ nhiễu tích cực, địa vật và hiển thị duy nhất các mục tiêu có giá trị bám sát lên màn hình hiển thị.

Bài toán lọc mục tiêu di động (MTI) thường sử dụng các giải pháp như: Lập bản đồ nhiễu-địa vật (STI) [3], xác định mục tiêu theo tần số Doppler [4], hay ứng dụng xử lý số DSP trong ra đa [5]. Các giải pháp này đã xác định được những phương pháp tin cậy để tách mục tiêu ra đa trong nền nhiễu và địa vật như: phương pháp ổn định xác suất báo động lâm (CFAR), bù khử nhiễu qua chu kỳ (Delay-Canceller). Tuy nhiên, các giải pháp hiện nay đều sử dụng bộ nhớ dữ liệu và thời gian tạo vùng nhiễu lớn [3], giải pháp DSP đều có yêu cầu về đặc trưng mục tiêu của ra đa để tối ưu hóa các MTI như Airbone MTI, Ground-MTI [5]. Vì thế, các giải pháp đã nêu phù hợp đối với các ra đa cảnh giới, ra đa đa chức năng với thông tin mục tiêu theo ô cự ly được lưu trữ, xử lý, bám sát quỹ đạo được thực hiện trên phần mềm máy tính.

Với yêu cầu cấu trúc gọn nhẹ, cơ động và tính toán tức thời của kênh bám sát trong ra đa đơn xung, việc xử lý thông tin mục tiêu đưa lên màn hình hiển thị cũng phải đáp ứng song song với quá trình tính toán bám sát. Do đó, cần có giải pháp thực hiện tại phần cứng để tách mục tiêu trong điều kiện có nhiễu tích cực cao. Phần tiếp theo của bài báo sẽ mô tả phương pháp xử lý thông tin ra đa áp dụng kết hợp CFAR và Delay-Canceller, đề xuất giải pháp thực hiện thực tế trên FPGA và phân tích các kết quả đạt được.

2. GIẢI PHÁP XỬ LÝ THÔNG TIN HIỂN THỊ MỤC TIÊU TRONG RA ĐA ĐƠN XUNG

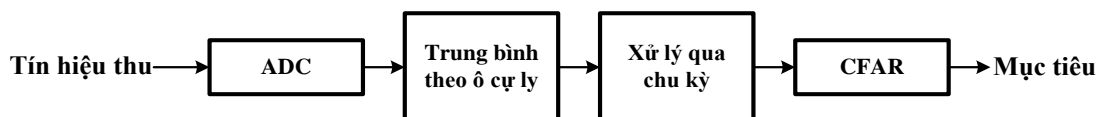
2.1. Xây dựng giải pháp

Trên ra đa đơn xung cần hiển thị vị trí góc được nhận từ các cảm biến góc và vùng hiển thị theo độ rộng búp sóng ra đa và cự ly mục tiêu được hiển thị theo ô cự ly, từ tâm đài đến hết vùng quan sát của ra đa.

Thông tin hiển thị mục tiêu trên màn hình dạng nhìn vòng (phương vị, cự ly) đối với các miền góc tả khác nhau theo từng chu kỳ và đảm bảo độ tin cậy khi trắc thủ ra đa lựa chọn bám sát, cần thực hiện những yêu cầu:

- Có khả năng lọc nhiễu tích cực;
- Có khả năng tách mục tiêu thăng giáng (chuyển động) và hiển thị.

Để thực hiện các yêu cầu nêu trên, cần giải quyết các vấn đề xử lý thông tin thu của ra đa để cung cấp tới màn hiển thị máy tính gồm: Xử lý thông tin ở miền xung số; Lựa chọn giải pháp lọc nhiễu, phát hiện mục tiêu phù hợp; Xây dựng phương pháp giải quyết các giải pháp trên các công nghệ phần cứng. Dựa trên những kết quả đã đạt được tại các nghiên cứu trước đây [3-5], nhóm thực hiện đề xuất sơ đồ chức năng thực hiện như tại hình 1.



Hình 1. Sơ đồ chức năng tuyến xử lý thông tin hiển thị trong ra đa đơn xung.

Tín hiệu thu sau khi số hóa (ADC) và tính trung bình theo ô cự ly sẽ được đưa tới thành phần xử lý qua chu kỳ. Thành phần này dựa trên phương pháp Delay Canceller để thực hiện bù khử qua từng chu kỳ [6]. Mô hình với 2,3 chu kỳ được xử lý thường phù hợp với đối tượng mục tiêu nằm trong một dải vận tốc nhất định và loại bỏ những mục tiêu thăng giáng chậm. Đối với đối tượng mục tiêu có dải vận tốc lớn từ tàu biển tới vật thể bay vượt âm, nhóm nghiên cứu sử dụng biến thể của bộ trễ bù khử (Delay Canceller) sử dụng các trọng số FFT được sử dụng theo [7]. Với tín hiệu thăng giáng có hàm phân bố xác suất biên độ A theo nền nhiễu A_0 có dạng:

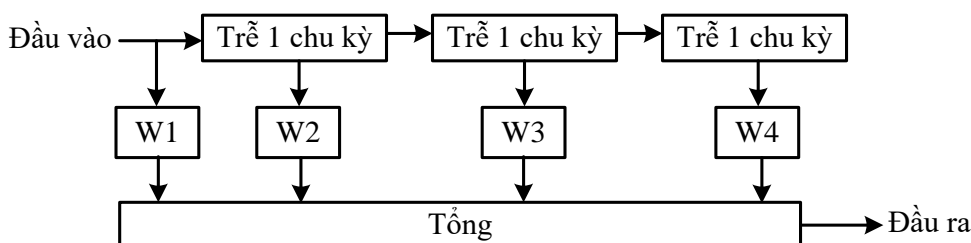
$$p(A) = \frac{9A^3}{2A_0^4} \exp\left(-\frac{3A^2}{2A_0^2}\right) \quad (1)$$

Mô hình thực hiện như mô tả trên hình 2. Tín hiệu đầu vào lần lượt đi qua các khâu trễ và nhân với trọng số $[W1 \ W2 \ W3 \ W4]$. Kết quả đầu ra y theo đầu vào x được tính như (2):

$$y = x_0 w_1 + x_{-1} w_2 + x_{-2} w_3 + x_{-3} w_4 \quad (2)$$

Trong đó:

- $w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 0$ [7].
- x_{-n} : Giá trị tại khâu trễ n .

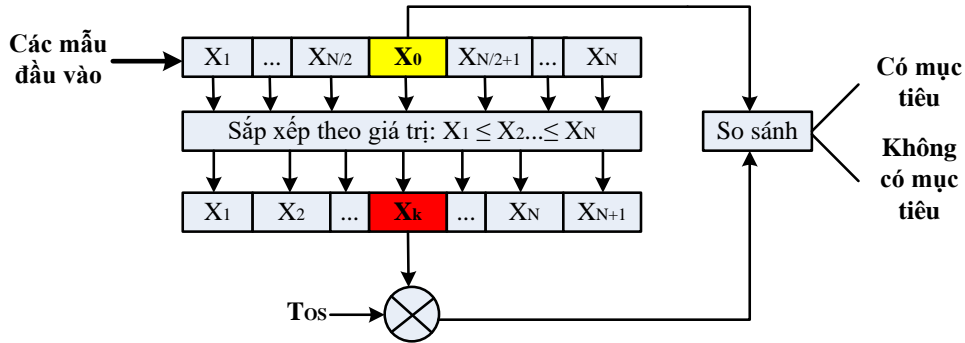


Hình 2. Xử lý qua chu kỳ phát hiện mục tiêu thăng giáng trên nền nhiễu.

Giải pháp trên FPGA thực hiện bộ bù khử sẽ sử dụng 4 bộ RAM. Tại một thời điểm sẽ có 1 bộ RAM ghi tín hiệu vào và 3 bộ RAM được đọc ra. Dữ liệu 3 chu kỳ liên tiếp đọc từ RAM kết hợp với dữ liệu tức thời tại đầu vào tạo ra 4 chu kỳ tham gia nhân trọng số bù khử của bộ xử lý

lọc mục tiêu.

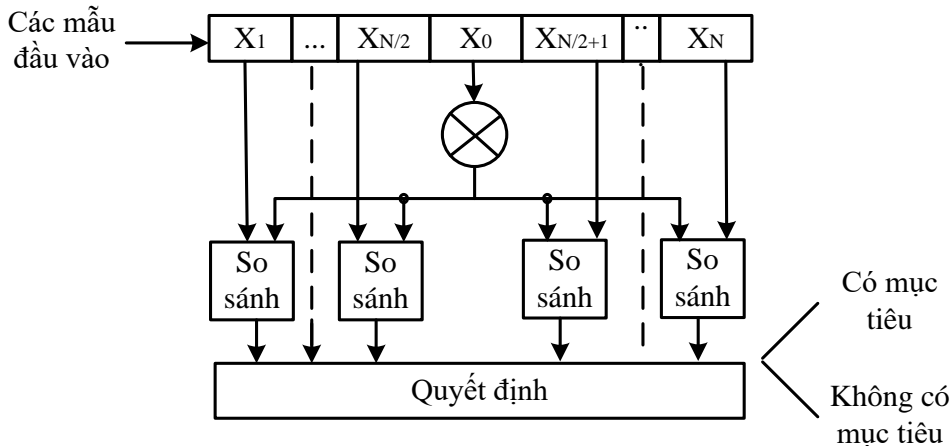
Theo sơ đồ chức năng tại hình 1, đầu ra của tín hiệu xử lý qua chu kỳ sẽ được đưa tới thành phần ổn định xác suất báo động lằm CFAR. Đối tượng bám sát của radar đơn xung là các mục tiêu tàu, vật thể bay có tuân theo mô hình chuẩn Swerling II [8]. Do đó, giải pháp phát hiện theo nguyên lý phù hợp là dựa trên CFAR xếp hạng thống kê (OS-CFAR) [9].



Hình 3. Nguyên lý OS-CFAR nguyên mẫu.

Thuật toán OS-CFAR nguyên mẫu được thể hiện trên hình 3. Thuật toán này yêu cầu thu đủ số ô cự ly đánh giá, sau đó thực hiện sắp xếp các dữ liệu theo thứ tự tăng dần, tiếp theo là so sánh ô cự ly cần đánh giá với vị trí có thứ hạng k của dữ liệu đã sắp xếp. Tiến trình thực hiện OS-CFAR như vậy sẽ tiêu tốn tài nguyên xử lý và có độ trễ nhiều ô cự ly trước khi đưa ra kết quả.

Để thời gian tính toán quyết định được tại vị trí đánh giá có hay không có mục tiêu ngay sau từng nhịp chuyển ô cự ly (khi đã có đủ giá trị các giá trị lân cận), cần có giải pháp kết hợp chức năng so sánh, nhân và sắp xếp giá trị trong một khe thời gian xử lý. Giải pháp OS-CFAR kết hợp mới này được thể hiện trên hình 4. Việc tính toán nhanh được thực hiện như sau: Tại ô cự ly cần đánh giá, giá trị số hóa sẽ được nhân trước với ngưỡng và so sánh trực tiếp với các ô liền kề. Việc ra quyết định có/không có mục tiêu dựa vào số lần ô đánh giá lớn hơn ô liền kề theo tiêu chuẩn K/N. Tất cả các thực hiện vừa nêu được triển khai đồng thời trong một xung nhịp của ô cự ly.



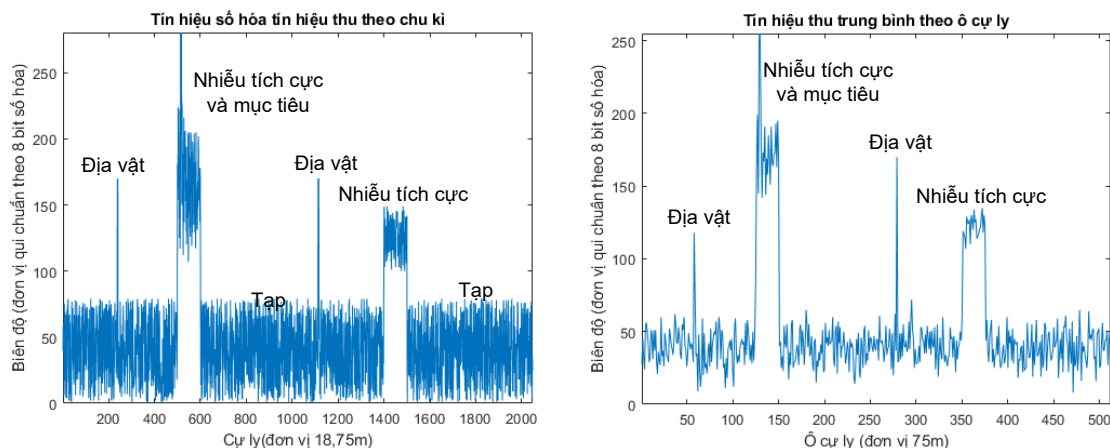
Hình 4. Nguyên lý OS-CFAR xử lý song song.

Phần mềm nhúng FPGA thực hiện OS-CFAR kết hợp bằng một thanh ghi dịch có độ dài bằng số ô cự ly đánh giá (gồm cả biên và vị trí đánh giá). Các dữ liệu theo từng ô cự ly được đưa vào thanh ghi dịch và tham gia quá trình so sánh. Việc quyết định sự tồn tại của mục tiêu theo tiêu chuẩn được thực hiện nhờ một bộ nhớ ROM có các giá trị đầu ra 0/1 dựa trên số kết quả so sánh lớn hơn các vị trí biên.

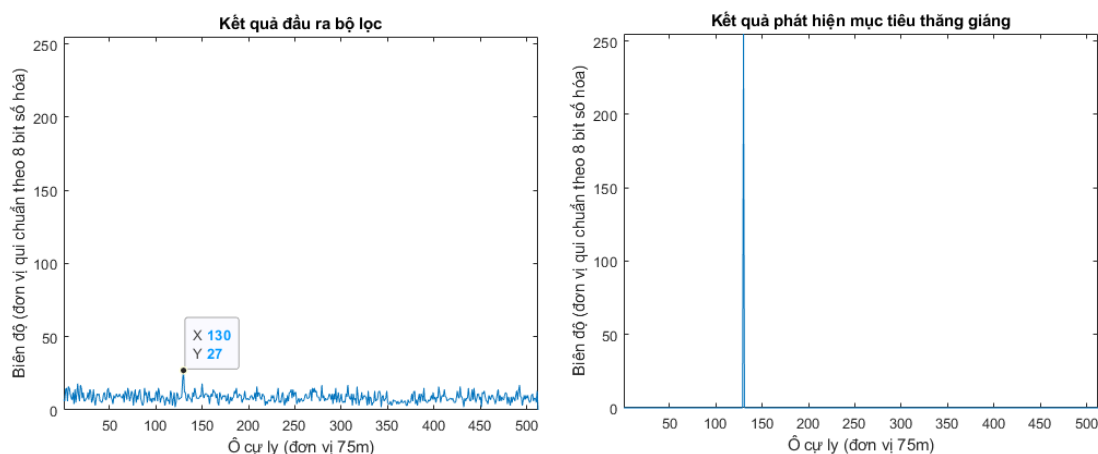
2.2. Đánh giá khả năng của giải pháp

Mục 2.1 đã đưa ra các giải pháp xử lý tín hiệu trong lọc bỏ nhiễu và phát hiện mục tiêu cấp tới phần hiển thị của ra đa đơn xung. Để đánh giá khả năng hoạt động của các giải pháp, nhóm nghiên cứu thực hiện các thuật toán trên phần mềm mô phỏng Matlab.

Tín hiệu đầu vào mô phỏng là các chu kỳ của tín hiệu thu trong 40 km, với tốc độ lấy mẫu 9,6 MHz. Tín hiệu thu sau đó được lấy trung bình theo ô cự ly. Trên hình 5 mô tả tín hiệu mô phỏng số hóa và trung bình theo ô cự ly với địa vật nằm tại các ô cự ly 55 và 278, mục tiêu di động nằm trong vùng nhiễu tại ô cự ly 130.



Hình 5. Tín hiệu mô phỏng và tín hiệu thị tần trung bình theo ô cự ly.



Hình 6. Đầu ra bộ lọc và kết quả phát hiện mục tiêu di động.

Tín hiệu trung bình theo ô cự ly được đưa qua các khâu xử lý bù khử qua chu kỳ (bộ lọc mục tiêu) và OS-CFAR kết hợp. Kết quả thực hiện được thể hiện trên hình 6, trong đó, đầu ra bộ lọc đã loại bỏ các loại nhiễu và địa vật. Tại vị trí ô cự ly 130, bộ OS-CFAR kết hợp đã đưa ra kết quả phát hiện mục tiêu thăng giáng.

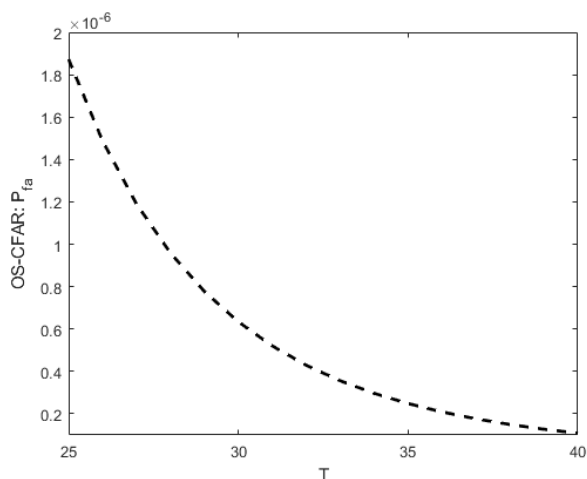
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Trong Mục 2, giải pháp xử lý thông tin cho kênh hiển thị trong ra đa đã được xây dựng và đánh giá chất lượng, độ tin cậy qua mô phỏng. Các đánh giá kết quả thể hiện tính hiệu quả và phù hợp với ứng dụng của giải pháp được thể hiện qua các đánh giá:

- *Xác suất báo động làm* của bộ OS-CFAR đã đề xuất đảm bảo mức 10^{-6} theo công thức (3)

[10] với $N = 8, K = 7$ như thể hiện trên hình 7.

$$P_{FA} = k \binom{N}{k} \frac{(k-1)!(T_{OS} + N - k)!}{(T_{OS} + N)!} \quad (3)$$

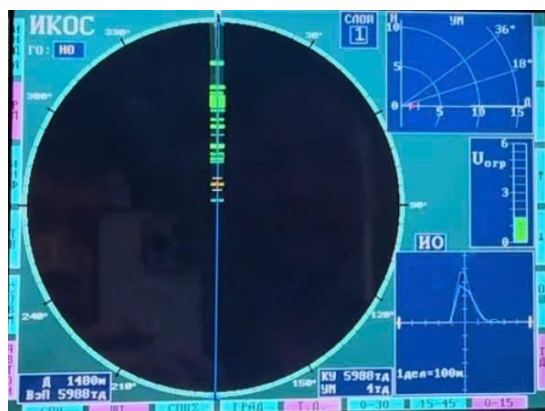


Hình 7. Xác suất báo động làm của OS-CFAR kết hợp.

- *Tài nguyên phần cứng:* Trên cơ sở các giải pháp được chọn đạt được kết quả theo yêu cầu đã đặt ra, việc triển khai thực tế cho đài ra đa được thực hiện tại phần cứng FPGA. Nhóm nghiên cứu sử dụng chip Altera, phần mềm biên dịch Quartus. Tài nguyên sử dụng của các thành phần chức năng trong xử lý mục tiêu phục vụ màn hiển thị ra đa hỏa lực đơn xung được tổng hợp trong bảng 1.

Bảng 1. Tài nguyên thực hiện xử lý thông tin mục tiêu kênh hiển thị.

Chức năng / Tài nguyên	Tính trung bình	Ghi dịch trễ theo chu kỳ	Tính toán lọc FIR	OS-CFAR
Phần tử lô gic	71	107	182	241
Bộ nhớ dữ liệu	0	16384 bit	12288 bit	10496 bit



(a)



(b)

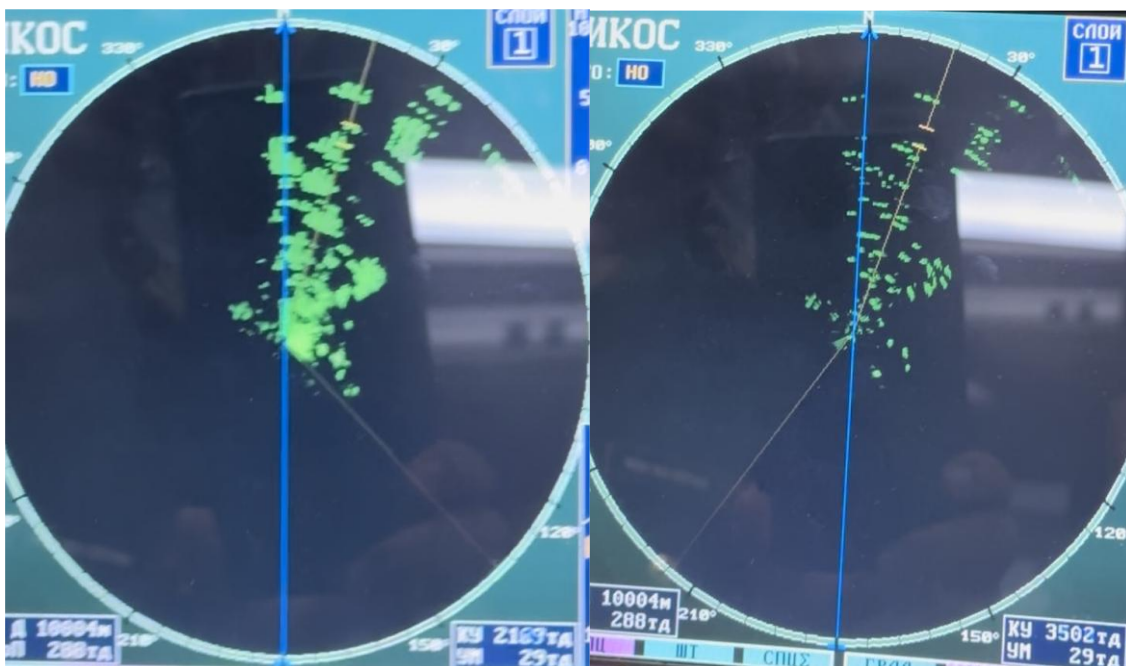
Hình 8. Màn hình ra đa khi chưa xử lý (a) và qua xử lý (b).

Với tổng cộng 601 phần tử lô gic và 40 Kbit bộ nhớ dữ liệu được sử dụng, phương pháp xử lý được thiết kế có thể chạy trên các dòng chip nhỏ như EPM hoặc Cyclone I có chi phí thấp của Altera.

- *Kết quả thực tế:* Màn hình ra đa đơn xung trên tàu Hải quân khi chỉ thực hiện số hóa tín hiệu theo ô cự ly và phát hiện theo biên độ, trong trường hợp có nhiều địa vật được thể hiện trên hình 8 (a). Có thể thấy, trắc thủ không thể xác định được mục tiêu trên nền nhiễu trải dài trên dải cự ly quan sát.

Sau khi xử lý lọc mục tiêu, kết quả được thể hiện trên hình 8(b). Các nhiễu đã được loại bỏ và trên màn hình là các mục tiêu mà trắc thủ có thể xác định và lựa chọn để bám sát.

Khả năng xử lý tín hiệu cũng được kiểm chứng đối với quá trình quét không gian quan sát như trên hình 9, với ảnh màn hình bên trái là hiển thị tín hiệu khi chưa được xử lý và bên phải là đã qua xử lý. Có thể thấy, các giải pháp xử lý thông tin đảm bảo tốc độ theo từng chu kỳ được đáp ứng một cách liên tục.



Hình 9. Đánh giá hiệu quả của xử lý khi ra đa quét vùng quan sát.

Với các kết quả đạt được, nhóm nghiên cứu đã xây dựng đầy đủ kênh chức năng xử lý thông tin phục vụ hiển thị trong ra đa đơn xung. Chất lượng và độ tin cậy của phương pháp được đề xuất là tương ứng với cơ sở lý thuyết thiết kế. So với các giải pháp truyền thống, trong phương án mới, các thuật toán sử dụng được tối ưu hóa, sử dụng các phép tính song song để đáp ứng tốc độ tính toán theo từng chu kỳ.

4. KẾT LUẬN

Kênh xử lý thông tin ra đa phục vụ hiển thị được thực hiện trên phần cứng nhỏ gọn, đáp ứng đầy đủ các yêu cầu về chất lượng, cấu trúc và thời gian đáp ứng của ra đa bám sát đơn xung. Kết quả này mở ra khả năng thực hiện các thuật toán bám sát trên phần mềm nhúng, hướng tới thiết kế toàn bộ các chức năng xử lý tín hiệu của ra đa đơn xung trên duy nhất một chip FPGA để tăng cường sự ổn định, độ tin cậy và giảm chi phí, kích thước của hệ thống ra đa đơn xung.

Bài báo này đã được báo cáo tại Hội thảo khoa học Quốc gia “Ứng dụng Công nghệ cao vào thực tiễn” năm 2024.

THAM KHẢO

- [1]. John D. “*Glass, Monopulse processing and tracking of maneuvering targets*”, Georgia Institute of Technology, (2015).
- [2]. D. Barton, S. Sherman, “*Monopulse Principles and Techniques*”, Second Edition, Publisher: Artech, (2011).
- [3]. Jerry C. Whitaker, “*The Electronics Handbook*”, ISBN 0-8493-1889-0, p. 1824, (2005).
- [4]. Hsueh-Jyh Li and Yean-Woei Kiang, “*Radar and Inverse Scattering*”, Academic Press. P 680, (2005).
- [5]. Skolnik, M., “*Introduction to Radar Systems*”, New York, McGraw-Hill, 3rd Edition, (2001).
- [6]. Jo-Yen Nieh, Yuan-Pin Cheng, “*Innovative Multi-Target Estimating with Clutter-Suppression Technique for Pulsed Radar Systems*”, Sensor, (2020).
- [7]. I. Cohen, N. Levanon, “*Adjusting 3-Pulse Canceller to Enhance Slow Radar Targets*,” Tel Aviv University, Israel, (2015).
- [8]. Hammers, David E., “*Detection of fluctuating targets*”, Topic in Radar, pp 69, (2009).
- [9]. P. Suresh, T. Thayaparan, and K. Venkataramaniah, “*Fourier-Bessel transform and time-frequency-based approach for detecting manoeuvring air target in sea-clutter*,” IET Radar, Sonar & Navigation, vol. 9, no. 5, pp. 481–491, (2015).
- [10]. Richards M. A., “*Fundamentals of Radar system processing*”, Second Edition, Mc Graw Hill Education, pp. 354-360, (2015).

ABSTRACT

A processing solution for target periodic tracking and selection in monopulse radar

The fire-control radar uses analog signals received in each transmitted cycle to separate the coordinate errors of the tracked target. The target selection and confirmation for tracking are carried out by the radar operator via display screen. This paper proposes a method for processing target information displayed on the display screen, ensuring two criteria: synchronization with high-speed tracking algorithms and the accurate provision of target data to support the target selection process on the screen.

Keywords: Monopulse; Track; Analog; In cycle; Radar; Screen.