

PHƯƠNG PHÁP KẾT HỢP TÍCH LŨY TƯƠNG QUAN VÀ LỌC SỐ ĐỂ TÁCH MỤC TIÊU RAĐA DI ĐỘNG

THE COMBINATION METHOD OF CORRELATION ACCUMULATION AND DIGITAL FILTERING FOR DETECTING MOVING RADAR TARGETS

Trần Văn Nghĩa ⁽¹⁾, Đặng Trung Hiếu ⁽²⁾, Trương Hữu Đông Hà ⁽³⁾, Nguyễn Văn Linh ⁽³⁾

⁽¹⁾ Học viện Phòng không-Không quân, ⁽²⁾ Trường Đại học Điện lực,

⁽³⁾ Viện Kỹ thuật Phòng không-Không quân

Ngày nhận bài: 24/06/2024, Ngày chấp nhận đăng: 25/07/2024, Phản biện: TS. Lưu Đức Thọ

Tóm tắt:

Trong bài báo này, trước tiên các tác giả nghiên cứu các phương pháp tách mục tiêu radar di động truyền thống, sau đó, các tác giả đề xuất phương pháp kết hợp tích lũy tương quan và lọc số cho tín hiệu radar có điều tần tuyến tính (Linear Frequency Modulation - LFM). Các kết quả thực hiện bằng công cụ System Generator và thử nghiệm trên FPGA cho thấy khả năng triển khai thực tế phương pháp đề xuất.

Từ khóa:

Hệ thống radar điều chế tần số tuyến tính, tích lũy tương quan, bộ lọc số, bộ phát hiện mục tiêu radar dịch chuyển.

Abstract:

In this paper, the authors first investigate traditional methods for detecting moving radar targets, and then propose a approach which combines correlation accumulation and digital filtering for radar signals with linear frequency modulation (LFM). The implementation results via the System Generator tool and FPGA testing demonstrate the practical feasibility of the proposed method.

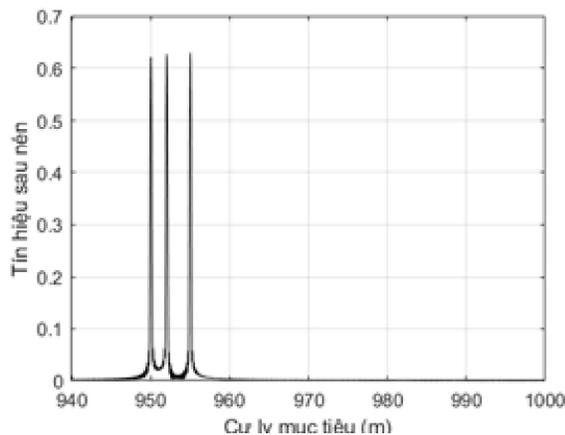
Keywords:

Linear frequency modulation radar system, correlation accumulation, digital filter, moving radar target detector.

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Ngày nay, các thiết bay không người lái UAV (Unmanned Aerial Vehicle) và các thiết bị bay cỡ nhỏ như FlyCam được ứng dụng và sử dụng rộng rãi trên nhiều lĩnh vực đời sống xã hội, góp phần tích cực vào sự phát triển xã hội. Tuy nhiên, chúng cũng đem đến nhiều mặt trái khi bị lợi dụng để tiến hành một số hoạt động gây nguy hại tới quốc phòng an ninh, an toàn hàng không và trật tự xã hội. Do đó, việc phát hiện UAV, FlyCam và các vấn đề xử lý tín hiệu ứng phó với hoạt động của chúng là chủ đề mang tính cấp thiết.

Trong những năm gần đây, việc nghiên cứu và thử nghiệm các thuật toán xử lý tín hiệu radar điều tần tuyến tính LFM đang được quan tâm mạnh mẽ nhờ vào khả năng phát hiện mục tiêu ở cự ly xa hơn đồng thời cũng có khả năng phân biệt cao hơn theo cự ly [1]-[5]. Trong số đó có nhiều thuật toán hiệu quả được triển khai ứng dụng thực tiễn trong các đài radar hiện đại. Đặc biệt, nhờ vào giải pháp đề xuất trong [5, 6], máy thu radar có thể phân biệt được các đối tượng bay đến 2-3m (xem Hình 1), phù hợp cho việc phát hiện các thiết bị bay không người lái UAV cỡ nhỏ và FlyCam.



Hình 1. Tín hiệu thu radar LFM phản xạ từ 3 mục tiêu sau nén xung [5]

Tuy nhiên, các UAV cỡ nhỏ và FlyCam chủ yếu bay ở độ cao thấp, dẫn đến tín hiệu thu radar bao gồm không chỉ tín hiệu phản xạ từ các mục tiêu cần quan tâm, mà còn các tín hiệu từ địa vật cố định như mặt đất, cây cối, đồi núi hay các công trình xây dựng, ...) và từ các đối tượng chuyển động chậm (ví dụ, đám mây chuyển động với tốc độ gió, chim trời, luồng khí thải từ các nhà máy, ...). Tín hiệu phản xạ trên được gọi chung là nhiễu tiêu cực hay nhiễu địa vật và đôi khi chúng che lấp mục tiêu hiển thị trên các màn hình hiện sóng chuyên dụng gây khó khăn cho việc quan sát, xử lý tín hiệu và đưa ra quyết định cần thiết. Chính vì thế yêu cầu đặt ra là cần phải tách được thông tin của mục tiêu quan tâm từ các loại nhiễu này.

Các mục tiêu khi chuyển động sẽ tạo ra trong tín hiệu thu một lượng tần số thay đổi bởi hiệu ứng Doppler [6, 7]. Địa vật có chuyển động tương đối bị giới hạn so với radar nên tồn tại sự khác biệt về lượng tần số Doppler giữa mục tiêu quan tâm với địa vật không mong muốn. Cụ thể là, mật độ phổ công suất của tín hiệu thu sẽ tập trung xung quanh tần số DC $f = 0$. Tuy nhiên, đối với các radar có LFM, tín hiệu phát vào không gian có tần số thay đổi, điều này tương đương với việc tạo ra sự dịch chuyển tương đối giữa đài radar và địa vật, do đó

gây khó khăn cho việc tách tín hiệu của các mục tiêu di động từ địa vật với các phương pháp truyền thống [6, 7].

Bài báo trình bày các phương pháp số tách mục tiêu radar di động (TMTDD) và đề xuất phương pháp hiệu quả TMTDD cho radar sử dụng tín hiệu bức xạ cận liên tục có điều tần tuyến tính, triển khai thử nghiệm phương pháp đề xuất trên FPGA. Phương pháp đề xuất có khả năng áp dụng cho các hệ thống radar LFM hiện đại ngày nay, xử lý được với tín hiệu phản xạ từ UAV, FlyCam khi có các phương pháp nén xung thích hợp.

Cấu trúc các phần tiếp theo của bài báo bao gồm: phần 2 phân tích một số phương pháp số tách mục tiêu radar di động liên quan và đề xuất phương pháp tích lũy tương quan kết hợp lọc số, phần 3 thử nghiệm phương pháp đề xuất trên phần cứng FPGA và phần 4 đưa ra kết luận của bài báo.

2. MỘT SỐ PHƯƠNG PHÁP SỐ TÁCH MỤC TIÊU RADAR DI ĐỘNG VÀ PHƯƠNG PHÁP TÍCH LŨY TƯƠNG QUAN

2.1. Các phương pháp số tách mục tiêu di động truyền thống

Các phương pháp số tách mục tiêu di động (TMTDD) truyền thống có thể chung quy lại về một hệ thống số chung hoặc dưới dạng bộ lọc số được mô tả bằng phương trình hiệu số:

$$y(n) = \sum_{i=0}^L a(i)x(n-i) - \sum_{i=1}^M b(i)y(n-i) \quad (1)$$

trong đó $x(n)$ là tín hiệu đầu vào ở thời điểm thứ n , $y(n)$ là tín hiệu đầu ra ở thời điểm thứ n , $a(i)$, $b(i)$ là các hệ số trọng số, L là bậc của bộ lọc.

Khi một trong các hệ số $b(i) \neq 0$ thì (1) sẽ mô tả bộ lọc hồi quy (IIR), trong đó, tín hiệu đầu ra không những chỉ phụ thuộc vào tín hiệu đầu vào ở thời điểm hiện tại và các thời điểm trước đó mà còn

phụ thuộc vào cả tín hiệu đầu ra ở các thời điểm trước. Khi tất cả các hệ số $b(i) = 0$ thì (1) trở thành:

$$y(n) = \sum_{i=0}^L a(i)x(n-i) \quad (2)$$

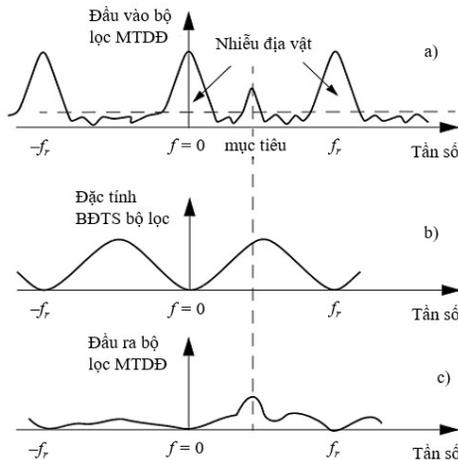
bộ lọc này gọi là bộ lọc không hồi quy (FIR), tín hiệu ra chỉ phụ thuộc vào tín hiệu đầu vào.

Thực hiện bộ lọc hồi quy cần số khâu lọc ít hơn so với thực hiện bộ lọc không hồi quy có đặc tuyến tương đương với nó. Tuy nhiên, bộ lọc không hồi quy luôn ổn định, trong khi đó bộ lọc hồi quy sử dụng phản hồi dễ mất ổn định và sai số tích lũy [1].

Cơ sở để tách mục tiêu di động là dựa vào sự dịch chuyển tần số Doppler trong tín hiệu thu được so với tần số sóng mang. Dịch chuyển tần số Doppler được xác định bằng biểu thức:

$$f_d = \pm \frac{2v}{c} f_0 = \pm \frac{2v}{\lambda} \quad (3)$$

Trong đó, c là vận tốc ánh sáng, v là vận tốc mục tiêu, f_0 và λ là tần số và bước sóng tín hiệu.



Hình 2. Quá trình lọc theo phương pháp trừ qua chu kỳ. (a) Phổ tín hiệu phản xạ; (b) Đặc tính biên độ tần số bộ lọc; (c) Phổ tín hiệu đầu ra bộ lọc

Các loại nhiễu có tần số thấp, quanh vùng tần số 0 nên các bộ lọc để TMTĐĐ có đặc tính thông dải

[1]. Một dạng cụ thể bộ lọc dùng để TMTĐĐ có thể tìm thấy trong các đài radar hiện nay là các bộ lọc số/tương tự theo phương pháp trừ qua chu kỳ (Hình 2) [8].

Các bộ lọc số cũng có thể thực hiện hiệu quả bằng biến đổi Fourier rời rạc (DFT) [1], [2]. DFT thực hiện biến đổi chuỗi N giá trị rời rạc $x(n)$ trong miền thời gian thành chuỗi $X(k)$ trong miền tần số.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-jnk2\pi/N} \quad (4)$$

Bản chất phép biến đổi DFT chính là thực hiện N bằng lọc số mắc song song không hồi quy (Hình 3). Bộ lọc mục tiêu di động theo phương pháp lọc số bằng biến đổi Fourier được chỉ ra ở Hình 4 cho phép điều chỉnh đặc tính biên độ tần số của bộ lọc theo yêu cầu nhờ hàm cửa sổ.

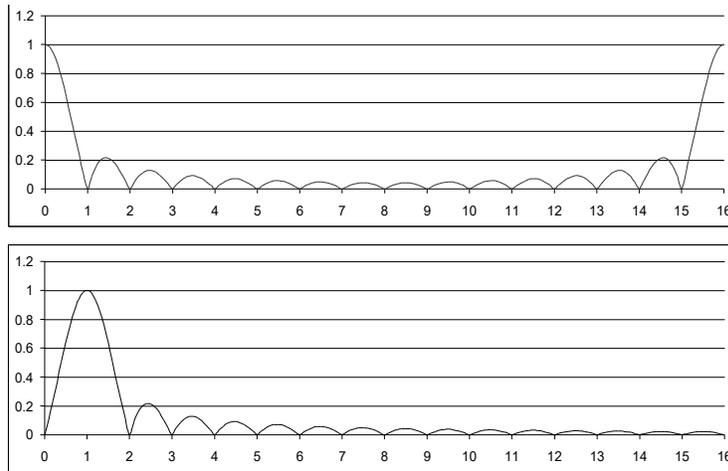
2.2. Phương pháp tích lũy tương quan để xuất cho tách mục tiêu di động

Phương pháp lọc số dùng DFT có ưu điểm thực hiện được bộ lọc có đặc tuyến bất kỳ. Tuy nhiên, nhược điểm của nó là sử dụng cặp DFT/IDFT làm tăng đáng kể độ phức tạp tính toán và trễ.

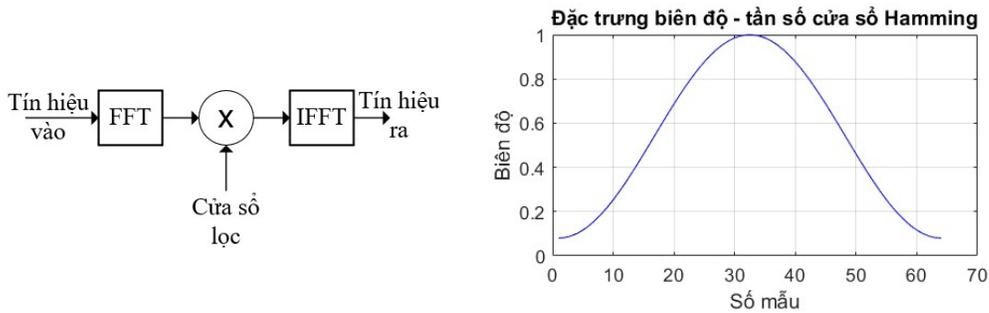
Dựa trên tính đơn giản của phương pháp bù qua chu kỳ, bài báo đề xuất phương pháp tích lũy tương quan kết hợp FFT. Quá trình tích lũy gồm 64 chu kỳ và mỗi chu kỳ lấy mẫu 512 điểm được mô tả ở Hình 5 với các bước sau:

- Trong mỗi một chu kỳ quét không gian radar, các mẫu tín hiệu được ghi vào bộ nhớ theo chiều dọc;
- Trong các chu kỳ quét không gian radar, tín hiệu được ghi vào bộ nhớ theo hàng;
- Quá trình đọc ra được thực hiện tuần tự theo hàng rồi đưa sang lọc số bằng cặp FFT/IFFT.

Như vậy sau quá trình tích lũy tín hiệu mục tiêu sẽ có dạng dao động theo tần số Doppler còn



Hình 3. Đặc tuyến biên độ tần số các băng lọc (số 0 phía trên, số 1 phía dưới) của DFT



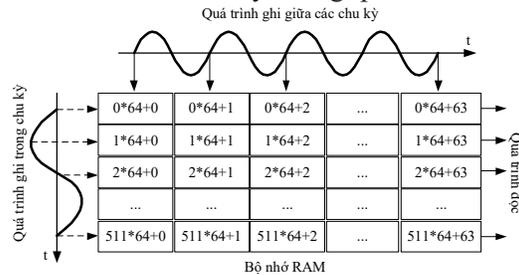
Hình 4. Bộ lọc số dùng FFT và đặc tuyến biên độ tần số hàm cửa sổ Hamming

nhiều có giá trị gần như không đổi trong một khung, vì thế khi thực hiện phân tích phổ bằng phép biến đổi FFT thì phổ của mục tiêu sẽ bị lệch khỏi vạch phổ trung tâm một lượng bằng tần số Doppler còn nhiều sẽ có phổ trùng với vạch phổ trung tâm.

Để kiểm tra thuật toán của bộ tích lũy, giả thiết tín hiệu phản xạ về từ mục tiêu bay ra xa đài và tín hiệu địa vật. Tín hiệu phản xạ về từ mục tiêu có pha được xác định như biểu thức (5) (áp dụng cho loại tín hiệu bức xạ radar phức tạp như tín hiệu cận liên tục, tín hiệu có điều tần tuyến tính,...nhưng cũng phù hợp với cả loại tín hiệu radar đơn xung), với R_1 là cự ly ban đầu của mục tiêu, $\mu = B / \tau$ là hệ số LFM, B là độ di tần, τ là độ rộng xung. Khi

đó tần số tức thời của tín hiệu phản xạ được xác định như biểu thức (6).

Tín hiệu địa vật có thể được tạo ra giống như đối với trường hợp mục tiêu đứng yên. Tổng hợp tín hiệu phản xạ từ mục tiêu và các dạng nhiễu sau nén xung (thường nén xung bằng bộ lọc phối hợp) được đưa vào bộ tích lũy tương quan.



Hình 5. Quá trình ghi và đọc của bộ tích lũy tương quan

$$\psi(t) = 2\pi \left(-f_0 \left(\frac{2R_1}{c} + \frac{2v}{c} t \right) + \frac{\mu}{2} \left(t - \left(\frac{2R_1}{c} + \frac{2v}{c} t \right) \right)^2 \right), 0 \leq t \leq \tau \quad (5)$$

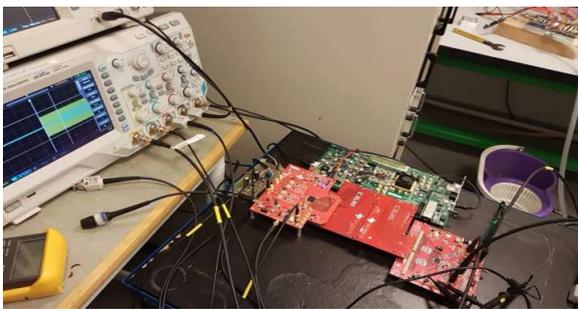
$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \psi(t) = -f_0 \frac{2v}{c} + \mu \gamma \left(\gamma t - \frac{2R_1}{c} \right) \quad (6)$$

$$\approx -f_0 \frac{2v}{c} + \mu \left(t - \frac{2R_1}{c} \right) = -f_d + \frac{B}{\tau} \left(t - \frac{2R_1}{c} \right)$$

3. THỬ NGHIỆM TRÊN PHẦN CỨNG FPGA

Để đánh giá thiết kế trên phần cứng, trong các thử nghiệm đã sử dụng 3 bo mạch phát triển: Xilinx Kintex-7 FPGA KC705 Evaluation Kit, Analog-to-Digital Converter (ADC) board TSW1400 và Digital to Analog Converter (DAC) board DAC34SH84EVM (Hình 6).

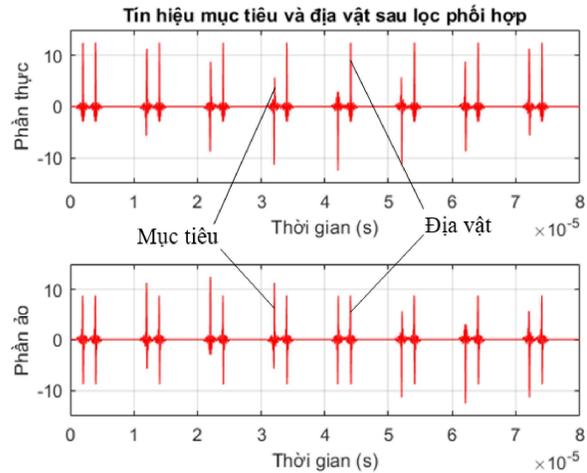
Tín hiệu đầu vào bộ tích lũy gồm tín hiệu phản xạ từ mục tiêu và địa vật sau nén xung bằng lọc phối hợp được phát từ FPGA qua DAC rồi đưa vào ADC. Các tham số được thiết lập trong thử nghiệm: Tần số Doppler $f_d = 1/8 f_L$, với f_L là tần số lặp lại của tín hiệu. Thời gian giữ chậm phản xạ $\tau_{muctieu} = 1\mu s$, $\tau_{diavat} = 3\mu s$.



Hình 6. Thiết lập phần cứng thử nghiệm

Thực hiện mô phỏng trên Matlab, tín hiệu tạo giả mục tiêu di động và địa vật sau khi qua bộ lọc phối hợp thể hiện như Hình 7. Ta thấy rằng, tín hiệu phản xạ từ mục tiêu sau qua bộ lọc phối hợp là xung nén xuất hiện trước địa vật (nghĩa là mục tiêu

nằm gần đài radar hơn) và có biên độ thay đổi với lượng tần số Doppler, còn tín hiệu phản xạ từ địa vật có biên độ gần như không đổi.



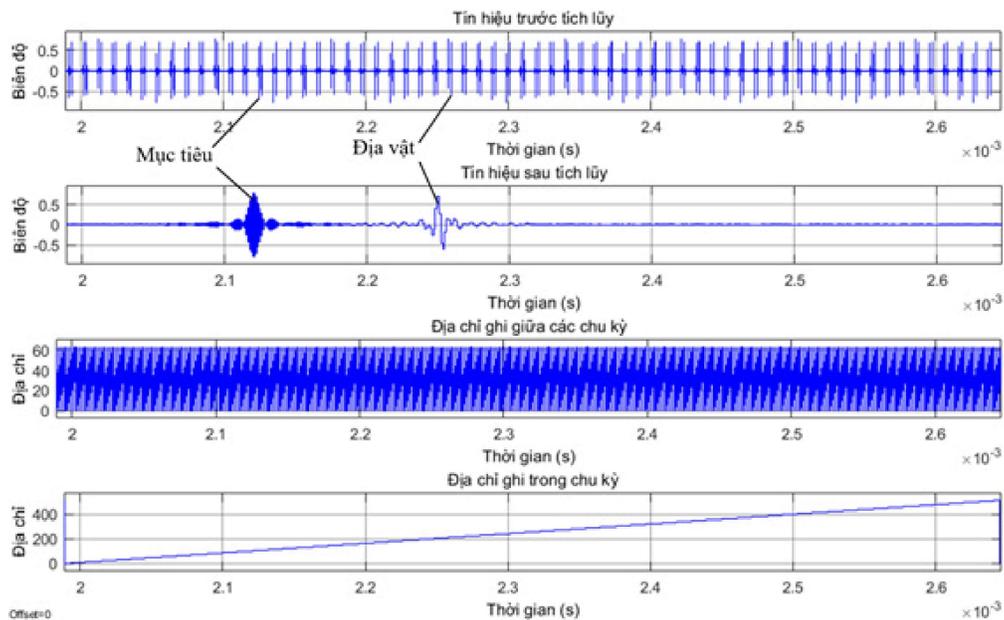
Hình 7. Tín hiệu mục tiêu và địa vật sau khi lọc bằng bộ lọc phối hợp

Tín hiệu sau nén xung bằng lọc phối hợp sẽ được tích lũy tương quan và phân tích phổ. Kết quả kiểm tra trên System Generator trên Hình 8 cho thấy tín hiệu trước tích lũy tương ứng với mô phỏng Matlab trên Hình 7, trong đó, tín hiệu phản xạ về bao gồm tín hiệu của mục tiêu có giá trị thay đổi và của địa vật ít thay đổi. Sau tích lũy, tín hiệu của mục tiêu và của nhiều địa vật được tách biệt tại các vị trí thời gian tương ứng với cự ly của chúng. Hình 9 là đoạn tín hiệu mở rộng ở hai vị trí tương ứng với mục tiêu và nhiều địa vật. Từ Hình 9 có thể thấy, tín hiệu của mục tiêu tại các khung tích lũy 64 điểm dao động theo tần số Doppler (bên trái) còn tín hiệu địa vật gần như không đổi (bên phải), điều đó cho thấy sau quá trình tích lũy tương quan thì tín hiệu phản xạ từ mục tiêu di động và từ địa vật khác nhau rõ rệt hơn tạo cơ sở tăng hiệu quả cho lọc số TMTDD.

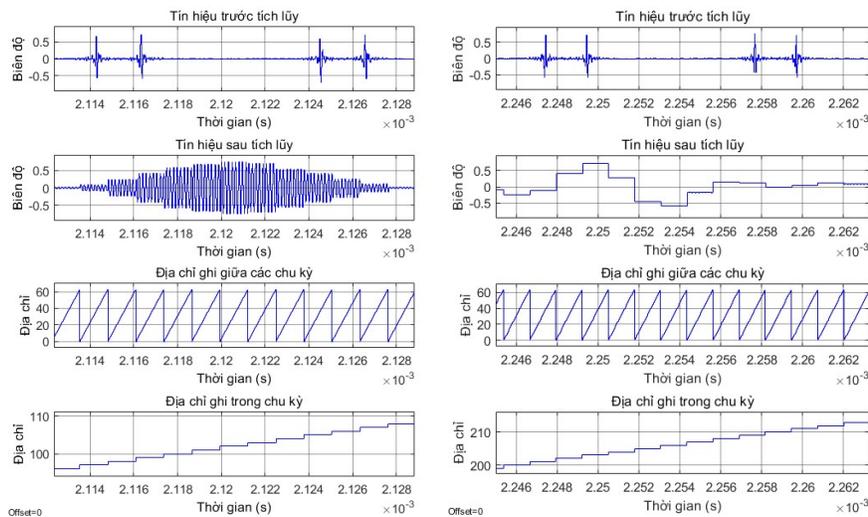
Hình 10 biểu diễn phổ của tín hiệu phản xạ được mở rộng tại hai thời điểm tương ứng thu được

của mục tiêu và địa vật. Phổ tín hiệu phản xạ từ mục tiêu có vị trí lệch so với tần số lặp lại xung thăm dò không gian một lượng tương ứng với tần số Doppler. Trong khi, đối với tín hiệu phản xạ từ nhiều địa vật, phổ tập trung xung quanh tâm các vạch phổ theo tần số lặp lại của xung thăm dò. Như

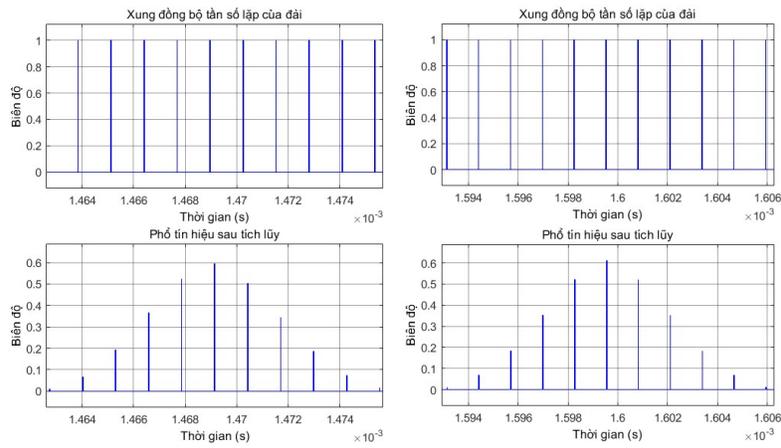
vậy thông qua việc phân tích phổ tín hiệu phản xạ bằng khối FFT có thể tách được tín hiệu phản xạ từ mục tiêu khỏi nhiễu bằng các hàm cửa sổ lọc truyền thống. Ngoài ra, tần số Doppler *cũng có thể được tính toán dựa vào mức độ lệch của vạch phổ tín hiệu mục tiêu so với xung đồng bộ.*



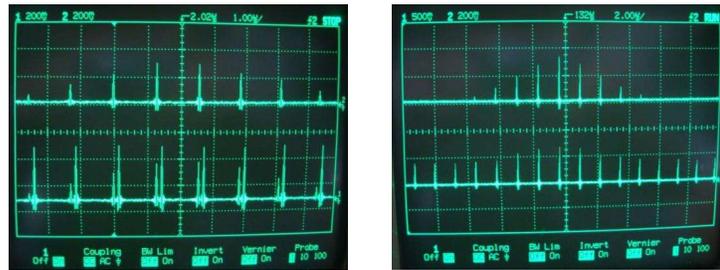
Hình 8. Tín hiệu trước và sau một chu kỳ tích lũy



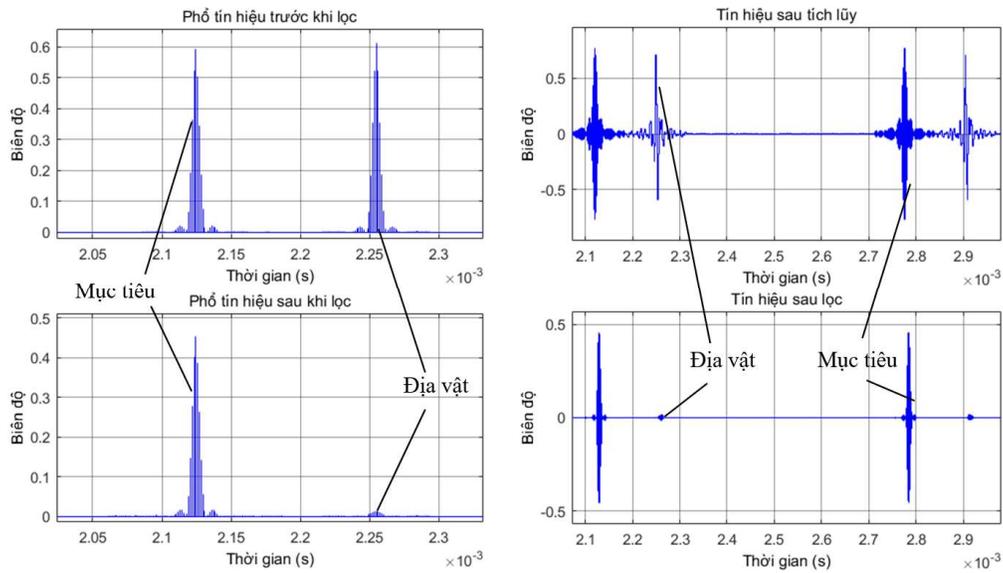
Hình 9. Tín hiệu mục tiêu (bên trái) và địa vật (bên phải) sau tích lũy khung 64 điểm



Hình 10. Phổ tín hiệu mục tiêu (bên trái) và nhiễu đại vật (bên phải) sau tích lũy



Hình 11. Phổ tín hiệu mục tiêu (bên trái) và nhiễu (bên phải) sau tích lũy thử nghiệm trên FPGA



Hình 12. Dạng phổ (phía trái) và dạng tín hiệu (phía phải) của mục tiêu và địa vật trước và sau lọc số

Các kết quả thực nghiệm trên FPGA trên Hình 11 hoàn toàn tương ứng với kết quả đánh giá trên System Generator trên Hình 10. Trên thiết bị hiện sóng quan sát thấy vạch phổ tín hiệu phản xạ từ mục tiêu lệch khỏi vạch phổ xung đồng bộ, trong khi đó, tín hiệu phản xạ từ nhiều địa vật tập trung tại tâm vạch phổ của xung đồng bộ.

Để thực hiện khử nhiễu tiêu cực, tín hiệu sau tích lũy được đưa qua bộ lọc số dựa trên cặp FFT/IFFT (Hình 4). Kết quả lọc số nhận được bằng công cụ System Generator trên Hình 12 cho thấy, tín hiệu nhiễu tiêu cực bị chế áp đáng kể.

Hiệu quả của các phương pháp nhiễu tiêu cực được đánh giá thông qua hệ số chế áp K_{ca} [7]. Hệ số này được tính bằng tỷ lệ công suất nhiễu tiêu cực ở đầu ra so với đầu vào bộ bù nhiễu và được tính trên thang Decibel. Bảng 1 đưa ra kết quả so sánh hiệu quả chế áp nhiễu của phương pháp đề xuất với các phương pháp trừ qua chu kỳ 1 lần, 2 lần và 4 lần [7], [8].

Bảng 1. Hệ số chế áp K_{ca} của một số phương pháp

Phương pháp	K_{ca} (dB)
Trừ qua chu kỳ 1 lần	8
Trừ qua chu kỳ 2 lần	20
Trừ qua chu kỳ 4 lần	36
Phương pháp đề xuất	42

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày việc nghiên cứu, phân tích các phương pháp số tách mục tiêu radar di động và đề xuất phương pháp hiệu quả cho các thiết bị thu radar sử dụng tín hiệu cận liên tục. Phương pháp đề xuất được thực hiện thử nghiệm trên công nghệ FPGA. Kết quả thử nghiệm cho thấy hiệu quả tốt của phương pháp đề xuất và khả năng triển khai thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. P. Zhou, F. Zhang and S. Pan, "Generation of Linear Frequency-Modulated Waveforms by a Frequency-Sweeping Optoelectronic Oscillator," Journal of Lightwave Technology, vol. 36, no. 18, pp. 3927–3934, 2018.

[2]. Y. Cao and Q. -Y. Yu, "A Dual Mode Multi-Beam and Integrated CPM-LFM Signal for Dual-Functional Radar Communication Systems," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, June 2024, doi: 10.1109/TVT.2024.3412711.

[3]. V. J. Arya and V. Subha, "Pulse compression using linear frequency modulation technique," 2017 International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT), pp. 921–926, 2017.

[4]. X. Tan and J. Zhu, "Window effects on the performance of matched filtering for linear frequency modulation signal," 2014 7th International Congress on Image and Signal Processing, pp. 820–825, 2014.

[5]. Trần Văn Nghĩa, "Nâng cao độ phân biệt mục tiêu cho hệ thống radar điều tần tuyến tính sử dụng lọc phối hợp," Hội nghị Khoa học kỹ thuật đo lường toàn quốc lần thứ VII, pp. 762-767, 2020.

[6]. C. Gu, Z. Zhang, J. Liu and J. Mao, "Characterization of the Frequency Ramp Nonlinearity Impact on the Range Estimation Accuracy and Resolution in LFM CW Radars," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 72, pp. 1-12, 2023, Art no. 8003712, doi: 10.1109/TIM.2023.3285926.

[7]. B.R. Mahafza, "Radar Systems Analysis and Design Using Matlab," 766p., CRC press, 3rd Edition, 2013.

[8]. Phạm Dũng Nghĩa, Nguyễn Trung Minh, "Thiết kế bộ lọc mục tiêu di động radar đơn xung bằng công nghệ FPGA," Tạp chí Khoa học giáo dục Phòng không – Không quân, số 99, trang 102-107, 2023.

Giới thiệu tác giả:



Tác giả Trần Văn Nghĩa tốt nghiệp đại học tại Học viện Kỹ thuật Quân sự năm 2009 và nhận bằng tiến sĩ tại Đại học Vật lý kỹ thuật Mátx-cova năm 2018. Hiện nay tác giả đang công tác tại Học viện Phòng không – Không quân.

Hướng nghiên cứu chính: Xử lý tín hiệu, các hệ thống vô tuyến viễn thông, truyền hình thể hệ mới, thuật toán nén dải động tín hiệu băng rộng và méo trước tín hiệu/tuyến tính hóa bộ khuếch đại công suất, kỹ thuật học máy, xử lý tín hiệu ra-đa, tác chiến điện tử, kỹ thuật lập trình chip vi mạch tích hợp bán dẫn FPGA.



Tác giả Đặng Trung Hiếu tốt nghiệp đại học tại Trường Đại học Giao thông Vận tải năm 2006 và nhận bằng Thạc sĩ tại Học viện Kỹ thuật Quân sự năm 2009. Hiện nay tác giả đang làm NCS và công tác tại Trường Đại học Điện lực.

Hướng nghiên cứu chính: Xử lý tín hiệu, các hệ thống vô tuyến thể hệ mới.



Tác giả Trương Hữu Đông Hà tốt nghiệp đại học và cao học tại Trường đại học Hàng không Matxcova-Liên Bang Nga năm 2011. Hiện nay đang công tác tại Viện Kỹ thuật Phòng không-Không quân.

Hướng nghiên cứu chính: Xử lý tín hiệu, các hệ thống vô tuyến hàng không, xử lý tín hiệu ra-đa, kỹ thuật lập trình vi điện tử số FPGA.



Tác giả Nguyễn Văn Linh tốt nghiệp đại học tại Trường đại học tổng hợp kỹ thuật Điện Leti-Liên Bang Nga năm 2013 và nhận bằng thạc sĩ tại Học viện Kỹ thuật Quân sự năm 2024. Hiện nay đang công tác tại Viện Kỹ thuật Phòng không-Không quân.

Hướng nghiên cứu chính: Xử lý tín hiệu, các hệ thống vô tuyến hàng không, xử lý tín hiệu ra-đa, kỹ thuật lập trình vi điện tử số FPGA.