

Nghiên cứu thuật toán nhận dạng và ước lượng tham số tín hiệu ra đa

Cao Minh Trí*

Viện Vũ khí, Tổng cục Công nghiệp Quốc phòng, Cầu Diễn, Bắc Từ Liêm, Hà Nội, Việt Nam.

*Email: leonardoacmilan@gmail.com

Nhận bài: 17/4/2024; Hoàn thiện: 02/7/2024; Chấp nhận đăng: 18/9/2024; Xuất bản: 25/10/2024.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.98.2024.23-31>

TÓM TẮT

Bài báo đề xuất một thuật toán mới để nhận dạng và ước lượng các tham số tín hiệu ra đa như tần số sóng mang, chu kỳ lặp, độ rộng xung bằng phương pháp xử lý ảnh. Thuật toán đề xuất bao gồm có 03 bước chính. Bước một sử dụng các máy thu nhiều kênh để ước lượng tần số sóng mang của tín hiệu. Bước hai dùng để trích xuất đặc trưng của tín hiệu trên miền thời gian – tần số. Cuối cùng, các phương pháp xử lý ảnh được áp dụng để xác định các tham số thời gian của tín hiệu: chu kỳ lặp, độ rộng xung. Để đánh giá hiệu quả của thuật toán đề xuất, nhóm tác giả sử dụng các tín hiệu mô phỏng trong MATLAB. Kết quả mô phỏng cho thấy, thuật toán đề xuất có thể ước lượng được tham số của tín hiệu đơn cũng như của hỗn hợp tín hiệu.

Từ khóa: Tín hiệu ra đa; Xử lý ảnh; Độ rộng xung; Tần số sóng mang.

1. MỞ ĐẦU

Trong hệ thống ra đa thụ động quá trình trinh sát, phát hiện, ước lượng tham số và nhận dạng tín hiệu đóng vai trò quan trọng [1]. Chính vì vậy, thực tế đã có nhiều phương pháp mới được áp dụng để nâng cao chất lượng phát hiện, xử lý và nhận dạng các tín hiệu ra đa. Một trong phương pháp cơ bản nhất được áp dụng trong việc xử lý các tín hiệu là sử dụng các phép biến đổi như: biến đổi chuỗi Fourier nhanh (FFT) [2]. Hạn chế của phương pháp FFT là chỉ quan sát được tín hiệu trên miền tần số và không đưa ra sự thay đổi của tín hiệu trên cả 2 miền thời gian - tần số. Ngoài ra, FFT chỉ hiệu quả với các tín hiệu có tỉ số tín/ tạp $SNR \geq 8$ dB. Để khắc phục các hạn chế trên, các phương pháp xử lý tín hiệu trên cả 2 miền thời gian-tần số đã được sử dụng bao gồm: chuỗi Fourier thời gian ngắn (STFT) [3], phân bố Wigner-Ville (WVD) [4] và biến đổi Wavelet liên tục (CWT) [5]. Kết quả phân tích của các phương pháp nêu trên sử dụng như đầu vào của bộ nhận dạng tín hiệu. Mặt khác, cùng với sự phát triển của công nghệ khoa học, đã có nhiều nghiên cứu xây dựng bộ nhận dạng tín hiệu dựa trên ứng dụng của trí tuệ nhân tạo (AI) và máy học (ML). Các phương pháp tiêu biểu sử dụng trí tuệ nhân tạo để nhận dạng tín hiệu bao gồm: mạng nơ-ron tích chập (convolution neural network – CNN) [6], mạng DGnet [7], mạng tích chập song kênh (dual channel CNN) [8]. Các phương pháp nêu trên nhận dạng được các tín hiệu xung, tín hiệu điều tần tuyến tính (LFM), mã barker (BPSK) và các tín hiệu manip pha (Frank, P1, P2, Px, Zadoff-Chu) với $SNR \geq -6$ dB. Hạn chế lớn nhất của các phương pháp sử dụng AI và ML đó là yêu cầu cần phải xây dựng cơ sở dữ liệu và thời gian huấn luyện mạng lớn và không nhận dạng được hỗn hợp tín hiệu.

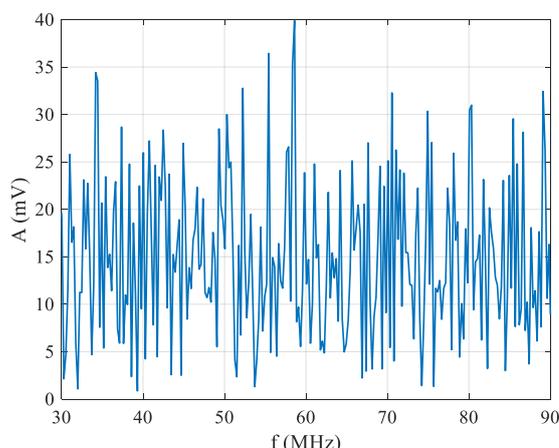
Để khắc phục hạn chế của các phương pháp nêu trên, bài báo này đề xuất một phương pháp mới sử dụng để trích xuất đặc trưng tín hiệu như tần số sóng mang, độ rộng xung, độ di tần. Phương pháp đề xuất dựa trên xử lý ảnh thời gian-tần số của tín hiệu. Phương pháp đề xuất gồm có 03 phần chính: Phần thứ nhất sử dụng các băng lọc để ước lượng tần số sóng mang của tín hiệu. Phần thứ hai dùng để trích xuất đặc trưng của tín hiệu trên cả 2 miền thời gian – tần số. Phần thứ 3 ước lượng các tham số thời gian, độ di tần của tín hiệu bằng phương pháp xử lý ảnh. Bố cục bài báo gồm các phần: phần 2 là mô hình thu tín hiệu của hệ thống thụ động. Phần 3 trình bày cơ sở lý thuyết và các bước của thuật toán. Mô phỏng đánh giá, so sánh hiệu quả của thuật toán được trình bày ở phần 4. Các kết luận và hướng nghiên cứu mới được tổng hợp ở phần 5.

2. MÔ HÌNH THU TÍN HIỆU

Tín hiệu tại đầu vào của máy thu trinh sát điện tử đặc biệt là hệ thống ra đa thụ động được ký hiệu $r(t)$ và được tính bằng công thức (1).

$$r(t) = s(t) + n(t) \quad (1)$$

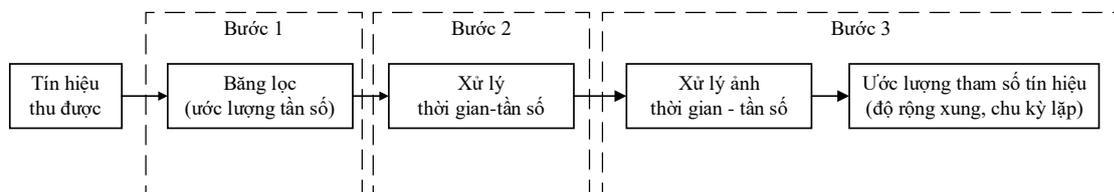
trong đó, $n(t)$ là nhiễu. Hình 1 minh họa tín hiệu thu được tại đầu vào máy thu với $SNR = 0$ dB. Hình 1 cho thấy với tín hiệu có SNR thấp, phương pháp xử lý trên miền tần số (FFT) không phát hiện và nhận dạng được tín hiệu do hệ thống thụ động không có thông tin tiên nhiệm.



Hình 1. Phổ biên độ của tín hiệu tại đầu vào máy thu.

3. THUẬT TOÁN ĐỀ XUẤT

Sơ đồ tổng quan của thuật toán được trình bày trên hình 2. Thuật toán đề xuất bao gồm 3 bước chính. Bước 1 ước lượng tần số sóng mang f_c của tín hiệu bằng các băng lọc. Bước 2 trích xuất các đặc trưng của tín hiệu trên hai miền thời gian – tần số. Bước 3 xử lý các ảnh thời gian – tần số của tín hiệu để ước lượng tham số thời gian của tín hiệu: độ rộng xung τ , chu kỳ lặp T_{op} và độ di tần. Sơ đồ thuật toán của phương pháp đề xuất được trình bày trên hình 3. Tham số tín hiệu mô phỏng được thống kê trong bảng 1.



Hình 2. Sơ đồ tổng quan của thuật toán đề xuất.

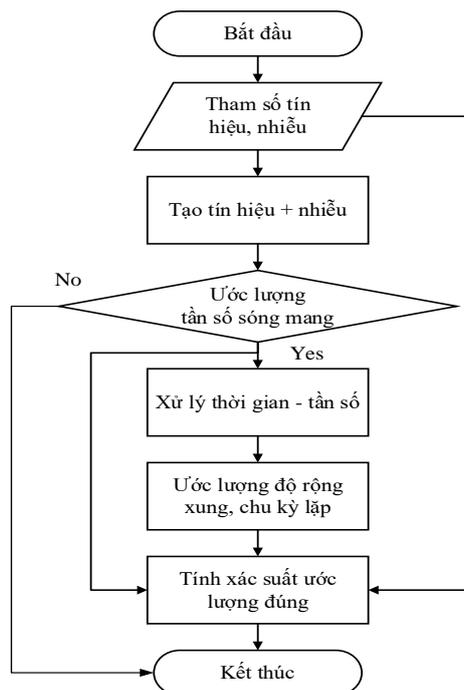
3.1. Ước tần số sóng mang của tín hiệu

Trong trinh sát điện tử, việc đầu tiên và quan trọng đó là xác định tần số sóng mang f_c tín hiệu. Vì vậy, để xác định tần số sóng mang của tín hiệu, tác giả sử dụng băng lọc với dải thông 10 MHz và 100 bộ (hình 4). Đầu ra của các bộ lọc được đưa qua bộ phát hiện tín hiệu CFAR (constant false alarm rate) với xác suất phát hiện đúng $P_d = 90\%$, xác suất báo động lầm $P_{fa} = 1e - 7$. Tần số sóng mang của tín hiệu được xác định tại các điểm tương ứng vượt ngưỡng.

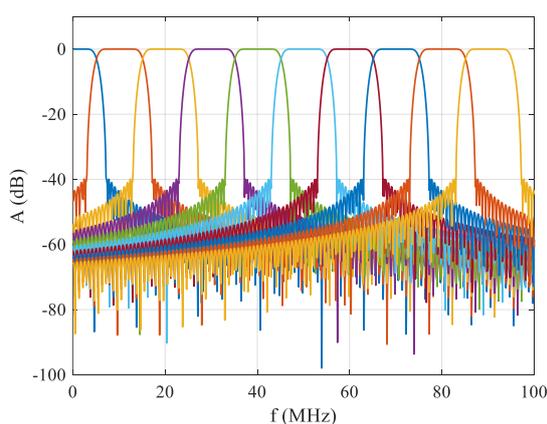
Hình 5 minh họa kết quả đầu ra của băng lọc (màu xanh) và ngưỡng phát hiện CFAR (màu đỏ). Chúng ta thấy rằng, tại tần số $f_c = 60(MHz)$ có công suất $P = 41,82(dBm)$ vượt ngưỡng phát hiện, hay nói cách khác, bằng cách sử dụng kết hợp giữa các băng lọc và bộ CFAR, có thể xác định được tần số sóng mang của tín hiệu. Bước tiếp theo của thuật toán là trích xuất đặc trưng của các tín hiệu đã được phát hiện. Các kỹ thuật sử dụng để trích xuất đặc trưng của tín hiệu trên cả 2 miền thời gian-tần số được trình bày ở phần dưới.

Bảng 1. Tham số mô phỏng.

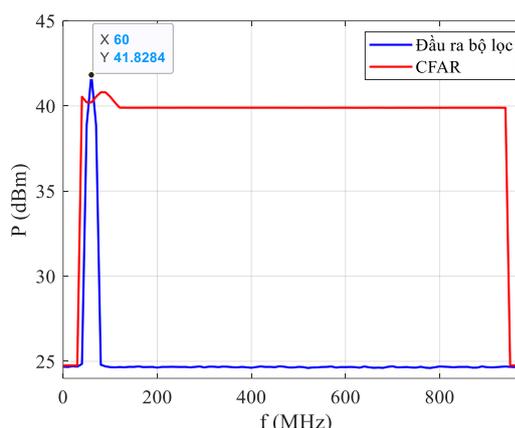
Tín hiệu	Tham số	Giá trị
Tham số chung	Tần số lấy mẫu f_v (MHz)	1000
	Tỉ số tín/tạp SNR (dB)	0
	Dạng nhiễu	Gaussian
LFM	Tần số sóng mang f_c (MHz)	60
	Độ rộng xung τ (μs)	10
	Biên độ A (V)	1
	Độ di tần BW (MHz)	20



Hình 3. Sơ đồ thuật toán.



Hình 4. Đặc tuyến của băng lọc.



Hình 5. Kết quả ước lượng tần số.

3.2. Xử lý tín hiệu trên cả hai miền thời gian-tần số

Trong xử lý tín hiệu trình sát, hai phương pháp thông dụng nhất để trích xuất đặc trưng thời gian-tần số bao gồm: phép biến đổi chuỗi Fourier thời gian ngắn (STFT) [3] và phân phối

Wigner-Ville (WVD) [4]. STFT được biểu diễn bằng công thức (2):

$$STFT\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)w(t-\vartheta)e^{-j\omega t} dt \quad (2)$$

trong đó, $w(t-\vartheta)$ là hàm cửa sổ (hình vuông, hình chữ nhật, hann, hamming,...) và ϑ là độ dài hàm cửa sổ. WVD được biểu diễn bằng công thức (3):

$$WVD\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} x\left(t+\frac{\vartheta}{2}\right)x^*\left(t-\frac{\vartheta}{2}\right)e^{-j\omega\vartheta} d\vartheta \quad (3)$$

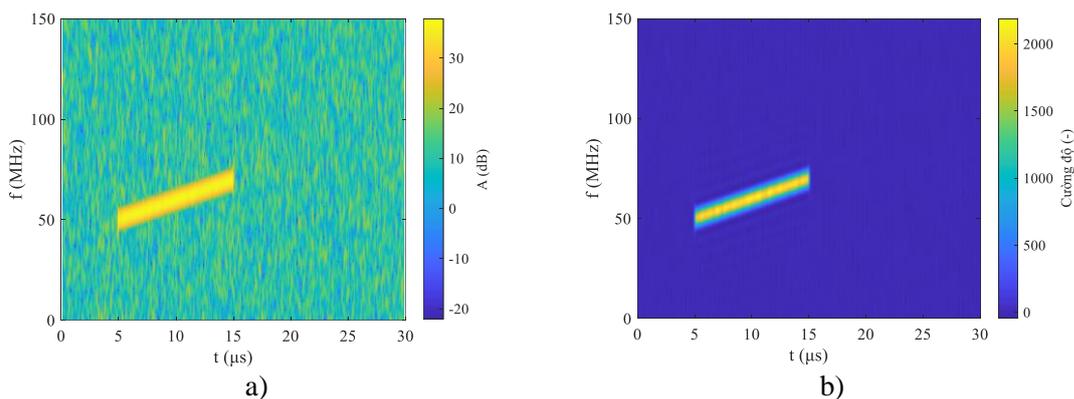
trong đó, $x^*(t-\vartheta)$ là liên hợp phức của $x(t-\vartheta)$. Ngoài ra, trong các nghiên cứu đi trước sử dụng CWT [5] như phương pháp trích xuất đặc trưng của tín hiệu trên miền thời gian-tần số. CWT được viết theo công thức (4):

$$CWT(t,a) = \int_{-\infty}^{\infty} x(u)\psi_{t,a}^*(u) du \quad (4)$$

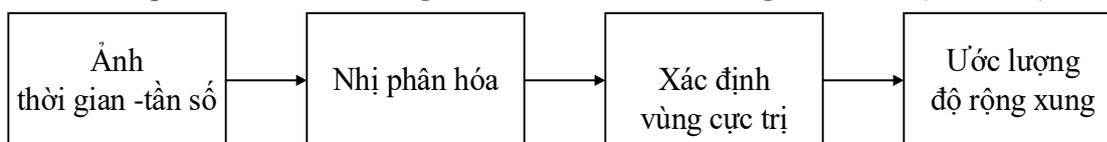
trong đó, a là hệ số cố định, $\psi_{t,a}(u)$ là hàm Wavelet và $\psi_{t,a}^*(u)$ là liên hợp phức của $\psi_{t,a}(u)$. Tham số của các phương pháp trích xuất đặc trưng của tín hiệu trên cả 2 miền thời gian – tần số được tổng hợp trong bảng 2 và kết quả phân tích tín hiệu được minh họa trên hình 6. Hình 6 thể hiện sự biến thiên tần số theo thời gian của tín hiệu (đường màu vàng). Mặt khác, hình 6 cho thấy, độ phân giải của ảnh thời gian-tần số phụ thuộc vào phương pháp trích xuất đặc trưng vào tham số của nó. Từ trên cho thấy, bằng cách xác định đường biến thiên (màu vàng) trên ảnh thời gian-tần số chúng ta có thể ước lượng các giá trị khác của tín hiệu như: độ rộng xung, độ đi tần hoặc chu kỳ lặp của tín hiệu.

Bảng 2. Tham số của các phương pháp xử lý thời gian – tần số.

Phương pháp	Số điểm FFT	Hàm cửa sổ	Độ dài hàm cửa sổ	Số điểm lặp lại
STFT	2048	Kaiser	256	200
WVD	2048	Kaiser	256	-



Hình 6. Kết quả trích xuất đặc trưng của tín hiệu trên miền thời gian-tần số: a) STFT; b) WVD.



Hình 7. Sơ đồ khối chức năng của bộ ước lượng độ rộng xung tín hiệu.

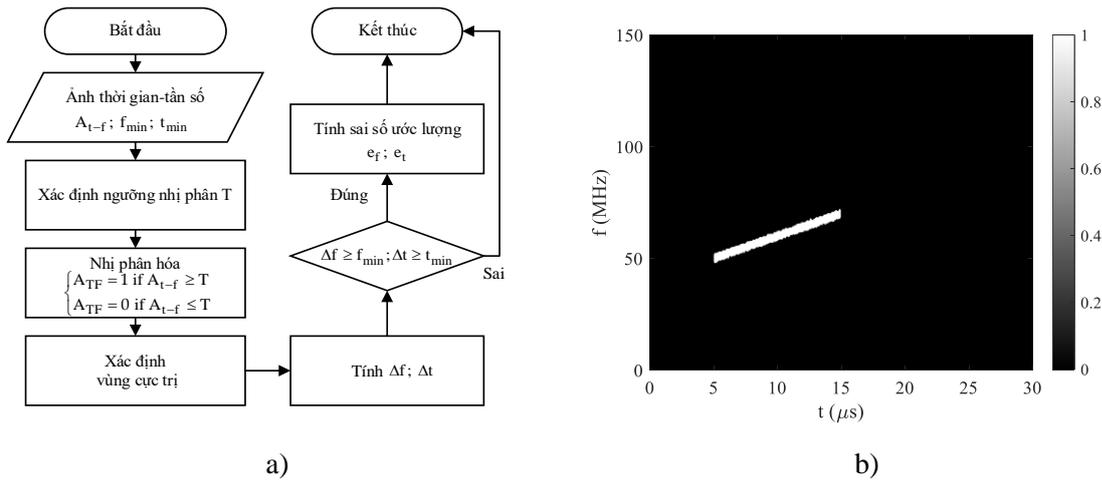
3.3. Ước lượng tham số khác của tín hiệu

Sơ đồ khối chức năng và sơ đồ thuật toán của bộ ước lượng tham số tín hiệu được trình bày trên hình hình 7 và hình 8(a). Kết quả nhị phân ảnh thời gian - tần số (sau biến đổi WVD) được thể hiện trên hình 8(b). Hình 8(b) cho thấy, các tham số thời gian và độ di tần của tín hiệu được tính bằng độ dài đường cực trị (màu trắng) lần lượt trên các trục thời gian và tần số. Các vùng cực trị của ảnh thời gian tần-số được lưu theo công thức (5):

$$\begin{cases} M_i = [A_i, j_{s_i}, j_{e_i}, r_{s_i}, r_{e_i}] \\ \mathbf{M} = [M_1, \dots, M_K] \end{cases} \quad (5)$$

trong đó, M_i là vùng cực trị thứ i với $i = 1, \dots, K$ với K là tổng số vùng cực trị, A là cường độ ảnh, $j_s; j_e$ cột bắt đầu và kết thúc và $r_s; r_e$ là hàng bắt đầu và kết thúc vùng cực trị. Sơ đồ thuật toán tìm vùng cực trị được trình bày trên hình 9. Độ di tần và độ rộng xung của tín hiệu được tính theo biểu thức (6):

$$\begin{cases} \Delta f = (r_e - r_s) \times df \\ \Delta t = (j_e - j_s) \times dt \end{cases} \quad (6)$$



Hình 8. Sơ đồ thuật toán và kết quả nhị phân ảnh: a) sơ đồ thuật toán; b) kết quả nhị phân ảnh.

Trong ví dụ trên, các giá trị $df = 244,37(kHz)$ và $dt = 14,65(ns)$ được lấy từ phương pháp WVD và $f_{min} = 1(MHz); t_{min} = 0,5(\mu s)$. Giá trị của vùng cực đại bao gồm $A = 1; j_s = 343; j_r = 1024; r_s = 196; r_e = 277$. Tham số của tín hiệu được tính theo (7):

$$\begin{cases} \Delta f = (r_e - r_s) \times df = (277 - 196) \times 244,37 = 19,79 (MHz) > f_{min} = 1(MHz) \\ \Delta t = (j_e - j_s) \times dt = (1024 - 343) \times 14,65 = 9,98(\mu s) > t_{min} = 0,5(\mu s) \end{cases} \quad (7)$$

Từ (7), chúng ta thấy độ di tần và độ rộng xung của tín hiệu $BW_e = 19,79(MHz); \tau_e = 9,98(\mu s)$ và sai số khi ước lượng tham số tín hiệu được tính theo (8).

$$\begin{cases} e_\tau = \frac{|\tau - \tau_e|}{\tau} \times 100\% = \frac{|10 - 9,98|}{10} = 2,0\% \\ e_{BW} = \frac{|BW - BW_{ce}|}{BW} \times 100\% = \frac{|20 - 19,79|}{20} = 1,05\% \end{cases} \quad (8)$$

Thuật toán 1: Tìm các vùng cực trị

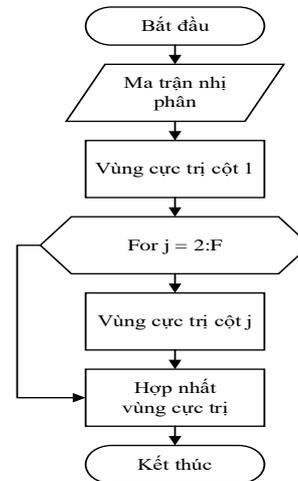
Tham số đầu vào: Ma trận nhị phân A_{TF}

Tham số đầu ra: Vùng cực trị M

Bước 1: Xác định vùng cực trị M_1 của cột 1

Bước 2: Xác định vùng cực trị của các cột còn lại M_j với $j = 2, 3, \dots, F$

Bước 3: Hợp nhất các vùng cực trị của các cột gần nhau.



Hình 9. Sơ đồ thuật toán tìm vùng cực trị.

Các kết quả mô phỏng cho thấy, thuật toán đề xuất có thể ước lượng được tham số tín hiệu như tần số sóng mang: $f_c = 60(MHz)$, $\tau = 9,98(\mu s)$ và $BW = 19,79(MHz)$ và sai số ước lượng $P_{fe} < 5\%$ với $SNR = 0 dB$. Trong phần tiếp theo của bài báo tiến hành đánh giá hiệu quả của thuật toán đề xuất đối với hỗn hợp tín hiệu LFM và xung ra đa trong điều kiện nhiễu tạp với $SNR = -6 dB$.

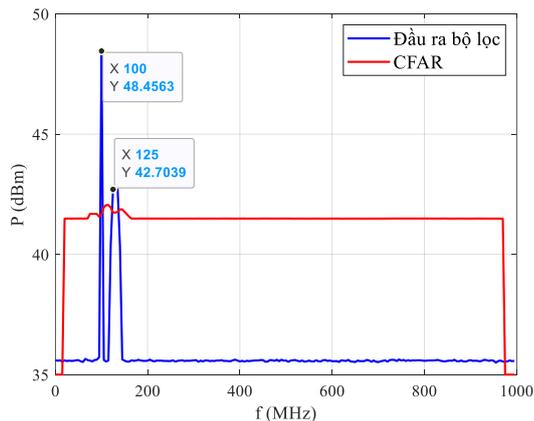
4. MÔ PHỎNG, TÍNH TOÁN, THẢO LUẬN

4.1. Dữ liệu mô phỏng

Trong phần này, hiệu quả của thuật toán đề xuất được đánh giá thông qua việc ước lượng tham số của hỗn hợp 2 tín hiệu LFM và xung ra đa với $SNR = -6 dB$. Ngoài ra, trong phần này tiến hành so sánh đánh giá ảnh hưởng của các phương pháp STFT và WVD đến kết quả ước lượng các tham số tín hiệu. Tham số của các tín hiệu khi không có nhiễu được tổng hợp trong bảng 3.

Bảng 3. Tham số tín hiệu mô phỏng.

Tín hiệu	Tham số	Giá trị
Xung ra đa	Biên độ A(V)	1
	Tần số sóng mang f_{c_1} (MHz)	100
	Độ rộng xung τ_1 (μs)	10
LFM	Tần số sóng mang f_{c_2} (MHz)	130
	Độ rộng xung τ_2 (μs)	10
	Độ di tần BW (MHz)	20

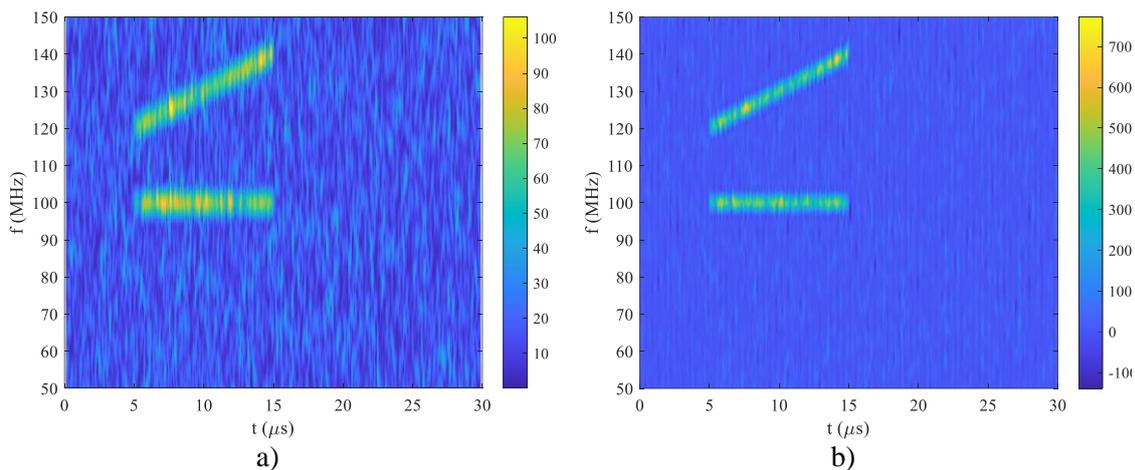


Hình 10. Kết quả ước lượng tần số sóng mang của tín hiệu.

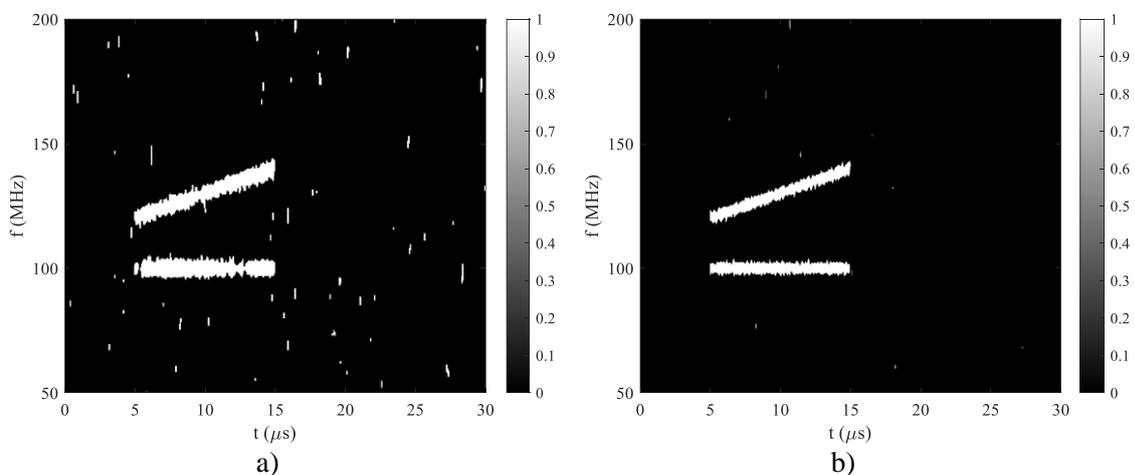
4.2. Kết quả mô phỏng

a) Ước lượng tần số sóng mang

Kết ước lượng tần số sóng mang sử dụng băng lọc (đường màu xanh) kết hợp CFAR (đường màu đỏ) được minh họa trên hình 10. Hình 10 cho thấy rằng, hỗn hợp có 02 tần số $f_{c_1} = 100(MHz)$ với công suất $P_1 = 48,45(dBm)$ và $f_{c_2} = 125(MHz)$ và công suất $P_2 = 42,70(dBm)$ vượt ngưỡng phát hiện. Hay nói cách khác, bằng cách kết hợp băng lọc và CFAR chúng ta có thể ước lượng được tần số sóng mang của tín hiệu $f_{c_1} = 100(MHz)$ và $f_{c_2} = 125(MHz)$.



Hình 11. Kết quả trích xuất đặc trưng tín hiệu: a) STFT; b) WVD.



Hình 12. Kết quả nhị phân hóa ảnh thời gian-tần số của tín hiệu: a) STFT; b) WVD.

b) Xử lý tín hiệu trên cả hai miền thời gian-tần số

Trong phần này, tác giả sử dụng 2 phương pháp STFT và WVD để trích xuất đặc trưng của tín hiệu trên cả hai miền thời gian-tần số. Kết quả trích xuất đặc trưng của tín hiệu được thể hiện ở hình 11. Hình 11 cho thấy, cả hai phương pháp trên đều có thể trích xuất được đặc trưng của tín hiệu. Phương pháp WVD có khả năng triệt nhiễu tốt hơn, mật độ phổ công suất lớn nhất $WVD_{max} = 7500(-)$ và nhỏ nhất $WVD_{min} = -1000(-)$ (hình 11(b)). Ngược lại, phương pháp STFT có mật độ phổ công suất lớn nhất $STFT_{max} = 100(-)$ và nhỏ nhất $STFT_{min} = 0(-)$ và có nhiều điểm nhiễu (hình 11(a)).

c) Ước lượng tham số khác của tín hiệu

Kết quả nhị phân hóa ảnh thời gian-tần số của tín hiệu sử dụng phương pháp Otsu được thể hiện trên hình 12. Kết quả nhị phân hóa cho thấy, ngoài các đường thẳng thể hiện đặc trưng của tín hiệu thì ở STFT chứa nhiều điểm sáng (nhiều) hơn so với WVD. Kết quả ước lượng tham số tín hiệu và sai số khi ước lượng được thông kê trong bảng 4.

Từ các kết quả trên chúng ta thấy, cả hai phương pháp STFT và WVD đều có thể sử dụng để ước lượng tham số của hỗn hợp tín hiệu với độ chính xác ước lượng $P_{ce} > 90\%$. So với STFT, phương pháp WVD cho độ chính xác ước lượng cao hơn ($P_{ce} = 98,7\%$), trong khi phương pháp STFT chỉ đạt độ chính xác $P_{ce} = 96,2\%$.

Bảng 4. Kết quả ước lượng các tham số tín hiệu.

Tín hiệu	Tham số	STFT		WVD	
		Giá trị đo	Sai số (%)	Giá trị đo	Sai số (%)
Xung ra đa	f_{c_1} (MHz)	100	-	100	-
	τ_1 (μs)	9,67	3,3	10,03	3,0
LFM	f_{c_2} (MHz)	125	3,48	125	3,48
	τ_2 (μs)	10,03	3,0	10,01	1,0
	BW (MHz)	21	5,0	19,8	1,0

5. KẾT LUẬN

Trong bài báo này đề xuất một phương pháp mới để ước lượng tham số và nhận dạng tín hiệu ra đa cho mạng nhân tạo. Thuật toán đề xuất sử dụng kết hợp giữa bộ CFAR và xử lý ảnh thời gian-tần số của tín hiệu. Hiệu quả của thuật toán được đánh giá qua hai trường hợp: trường hợp thứ nhất cho các tín hiệu đơn và trường hợp thứ 2 cho hỗn hợp tín hiệu. Các kết quả cho thấy, cả 2 phương pháp STFT và WVD đều nhận dạng và ước lượng được tham số tín hiệu với $SNR = -6\text{ dB}$. Nhưng so STFT, phương pháp WVD cho độ chính xác ước lượng cao hơn $P_{ce} = 98,7\%$. Ngoài ra, phương pháp đề xuất không yêu cầu các thông tin tiên nhiệm về tín hiệu hay cơ sở dữ liệu như các phương pháp sử dụng trí tuệ nhân tạo. Trong các nghiên cứu tiếp theo, tác giả nghiên cứu xây dựng thuật toán nhận dạng các tín hiệu trên các tham số đã ước lượng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. N. Levanon and E. Mozeson, "Radar signals," John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, ISBN: 0-471-47378-2, (2004).
- [2]. Frigo, M., and S. G. Johnson, "FFTW: An Adaptive Software Architecture for the FFT," Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Vol. 3, pp. 1381-1384, (1998).
- [3]. Mitra and K. Sanjit, "Digital signal processing: a computer-based approach," 2nd Ed, New York: MacGraw-Hill, ISBN: 13 9978-0072321050, (2001).
- [4]. M. Stephane, "A Wavelet tour of signal processing," 2nd Ed, San Diego, CA: Academic Press. ISBN: 0080520839, (1999).
- [5]. Lilly and Jonathan M, "Element Analysis: A Wavelet-Based Method for Analysing Time-Localized Events in Noisy Time Series," Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 473, no. 2200: 20160776, (2017). <https://doi.org/10.1098/rspa.2016.0776>.
- [6]. S. Kiranyaz, T. Ince, O. Abdeljaber, O. Avci and M. Gabbouj, "1-D Convolutional Neural Networks for Signal Processing Applications," ICASSP 2019 - 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Brighton, UK, pp. 8360-8364, (2019), doi: 10.1109/ICASSP.2019.8682194.

- [7]. Z. Zhang, J. Zhang, T. Luo, T. Huang, Z. Tang, Y. Chen and D. Luo. "Radar signal intrapulse recognition based on a denoising-guided disentangled network", *Remote Sens.* 14: 1252, (2022). <http://doi.org/10.3390/rs14051252>.
- [8]. Q. Daying, Z. Tang, X. Wang, W. Zhai, and C. Qu. "LPI Radar Signal Recognition Based on Dual-Channel CNN and Feature Fusion", *Symmetry*, 14, no. 3: 570, (2022). <https://doi.org/10.3390/sym14030570>.
- [9]. N. Otsu. "A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms, " *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. Vol. 9, No. 1, pp. 62–66, (1979).

ABSTRACT

A new algorithm for recognizing and estimating radar signal parameters

This paper proposes a new algorithm based on image processing to recognize and estimate radar signal parameters such as carrier frequency, pulse width and modulation. The algorithm includes three steps. In the first step, banking filters are used for detecting and estimating signal carrier frequency. Time-frequency analysis is used in second step to extract signal feature. The last step is based on image processing for estimating pulse width and signal modulation. The simulated signals in MATLAB is used to evaluate performance of algorithm. Simulation results show that the proposed method is able to recognize and estimate parameter of single and multi-component signals.

Keywords: Radar signal; Image processing; Pulse width; Carrier frequency.