

EVALUATION OF DIGITAL SIGNAL PROCESSING TECHNIQUES FOR ENHANCING PASSIVE SURVEILLANCE SYSTEM PERFORMANCE

Duong Van Minh*, Huynh Tan Phat, Nguyen Thi Phuong, Phan Nhat Giang

Military Technical Academy

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	04/9/2025	This paper investigates several signal processing techniques for passive surveillance and radar systems, focusing on the Fast Fourier Transform, Short-Time Fourier Transform, Wigner-Ville Distribution, and In-phase/Quadrature analysis in MATLAB. Simulation results show that Fast Fourier Transform provides detailed spectral information, particularly with larger Fast Fourier Transform points, while Short-Time Fourier Transform enables time-frequency representation but degrades at low signal-to-noise ratios. Wigner-Ville Distribution achieves superior resolution independent of window size and preserves signal characteristics under noisy conditions, though it suffers from cross-term interference. In-phase/Quadrature analysis extracts instantaneous amplitude, phase, and frequency, offering valuable features for radar signal modulation recognition. Comparative results across various signal-to-noise ratios levels demonstrate that each technique exhibits distinct strengths and limitations. Fast Fourier Transform is effective for frequency-domain inspection, Short-Time Fourier Transform balances temporal and spectral analysis, Wigner-Ville Distribution offers robustness and fine resolution in high-noise scenarios, and In-phase/Quadrature analysis supports detailed signal characterization. Among these methods, Wigner-Ville Distribution shows notable resilience against noise, making it particularly suitable for detecting low-probability-of-intercept radar signals. The findings highlight the role of advanced time-frequency analysis in improving passive radar performance and provide a foundation for future research in radar signal processing.
Revised:	30/11/2025	
Published:	30/11/2025	
KEYWORDS		
Fast Fourier transform		
Short time Fourier transform		
Wigner-Ville distribution		
In -phase/Quadrature		
Signal to noise ratio		

NGHIÊN CỨU ĐÁNH GIÁ CÁC KỸ THUẬT XỬ LÝ TÍN HIỆU NĂNG CAO HIỆU QUẢ TRÌNH SÁT CỦA CÁC HỆ THỐNG THỤ ĐỘNG

Dương Văn Minh*, Huỳnh Tấn Phát, Nguyễn Thị Phương, Phan Nhật Giang

Học viện Kỹ thuật Quân sự

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 04/9/2025	Bài báo này nghiên cứu một số kỹ thuật xử lý tín hiệu cho hệ thống trình sát thụ động và tập trung vào biến đổi Fourier nhanh, biến đổi Fourier ngắn hạn, phân bố Wigner-Ville, và phân tích In-phase/Quadrature trong môi trường MATLAB. Kết quả mô phỏng cho thấy biến đổi Fourier nhanh cung cấp phổ tần số chi tiết, đặc biệt khi sử dụng số điểm biến đổi Fourier nhanh lớn; trong khi đó biến đổi Fourier thời gian ngắn cho phép biểu diễn thời gian-tần số nhưng suy giảm hiệu quả ở điều kiện tỷ số tín hiệu trên nhiễu thấp. Phân bố Wigner-Ville đạt độ phân giải vượt trội, không phụ thuộc kích thước cửa sổ và duy trì đặc tính tín hiệu trong môi trường nhiễu, mặc dù có thể xuất hiện nhiễu chéo. Phân tích In-phase/Quadrature cho phép trích xuất biên độ tức thời, pha và tần số, hỗ trợ nhận dạng điều chế. Kết quả so sánh ở nhiều mức tín/tạp cho thấy mỗi kỹ thuật có ưu và nhược điểm riêng. Biến đổi Fourier nhanh phù hợp cho phân tích miền tần số, biến đổi Fourier thời gian cân bằng phân tích thời gian-tần số, phân bố Wigner-Ville thể hiện độ bền vững và độ phân giải cao trong môi trường nhiễu, trong khi In-phase/Quadrature hỗ trợ đặc trưng chi tiết tín hiệu. Trong số đó, phân bố Wigner-Ville cho thấy khả năng chống nhiễu nổi bật, đặc biệt hữu ích cho phát hiện tín hiệu ra đa có xác suất bị chặn thấp. Các kết quả này nhấn mạnh vai trò của các phương pháp phân tích thời gian-tần số tiên tiến trong việc nâng cao hiệu năng ra đa thụ động, đồng thời tạo nền tảng cho các nghiên cứu tiếp theo trong xử lý tín hiệu ra đa.
Ngày hoàn thiện: 30/11/2025	
Ngày đăng: 30/11/2025	
TỪ KHÓA	
Biến đổi Fourier nhanh	
Biến đổi Fourier thời gian ngắn	
Phân bố Wigner-Ville	
Kênh cầu phương I/Q	
Tỉ số tín/tạp	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.13548>

* Corresponding author. Email: minhktqs2008@gmail.com

1. Giới thiệu chung

Trong bối cảnh tác chiến hiện đại, các hệ thống trinh sát điện tử được yêu cầu đáp ứng những tiêu chí khắt khe như đảm bảo tính bí mật (chống trinh sát và chế áp điện tử), đồng thời phải có phạm vi hoạt động và băng thông trinh sát tức thời lớn [1]. Để thỏa mãn các yêu cầu này, hệ thống trinh sát thụ động (Passive Surveillance System – PSS) đã được nghiên cứu và triển khai trong thực tế. Một số hệ thống tiêu biểu đã được phát triển tại Séc, Nga và các quốc gia phương Tây, được giới khoa học và quân sự đánh giá cao [2].

Cách tiếp cận thụ động mang lại nhiều ưu điểm nổi bật: giảm nguy cơ bị đối phương phát hiện hoặc gây nhiễu, nâng cao khả năng sống sót của hệ thống, đồng thời tiết kiệm năng lượng và chi phí triển khai. Nhờ đó, PSS không chỉ được ứng dụng trong lĩnh vực dân sự như giám sát không lưu hay kiểm soát biên giới, mà còn trở thành công nghệ cốt lõi trong các hệ thống trinh sát điện tử và cảnh báo sớm quân sự [3]. Về chức năng, các hệ thống PSS đảm nhận hai nhiệm vụ chính: đầu tiên là xác định vị trí của các nguồn phát xạ và thứ hai là nhận dạng các nguồn phát xạ để xây dựng bức tranh tổng thể về môi trường điện tử, hỗ trợ chỉ huy tác chiến.

Để đạt được khả năng phát hiện và nhận dạng chính xác, các hệ thống trinh sát thụ động cần áp dụng các kỹ thuật xử lý tín hiệu tiên tiến nhằm nâng cao tỷ số SNR, tách biệt tín hiệu quan tâm khỏi hỗn hợp, đồng thời trích xuất các tham số đặc trưng của nguồn phát xạ. Trong số đó, một số phương pháp phổ biến thường được sử dụng có thể kể đến như Biến đổi Fourier nhanh (FFT) [4], Biến đổi Fourier ngắn hạn (STFT) [5], Phân bố Wigner–Ville (WVD) [6] và phân tích In-phase/Quadrature (I/Q) [7]. Về việc so sánh, đánh giá hiệu quả từng thuật toán thì chưa có nghiên cứu nào chỉ ra.

Về mặt học thuật, đã có nhiều nghiên cứu sử dụng trí tuệ nhân tạo để giải quyết bài toán nhận dạng tín hiệu. Trong các nghiên cứu [8] – [11], các tác giả đã đề xuất các cấu trúc mạng khác nhau để nâng cao hiệu quả nhận dạng tín hiệu điều chế trong xung cho hệ thống PSS. Các thuật toán sử dụng trí tuệ nhân tạo này đã cho các kết quả vượt trội so với các phương pháp truyền thống (độ chính xác nhận dạng 90% với SNR = -8 dB) [11]. Tuy nhiên hạn chế chung của các phương pháp này là cần thu thập lượng dữ liệu lớn để huấn luyện và tất cả đang chỉ dừng ở các lý thuyết và mô phỏng chưa đưa vào thực tế ở trên các PSS.

Chính vì vậy, phạm vi nghiên cứu của bài báo tập trung vào việc phân tích và so sánh bốn phương pháp xử lý tín hiệu phổ biến đã được triển khai trong các hệ thống trinh sát thụ động, bao gồm FFT, STFT, WVD và phân tích I/Q với các tín hiệu ra đa như: xung, điều tần tuyến tính (LFM) mã Costas, mã Barker, mã Frank và mã P. Việc đánh giá được tiến hành dựa trên hai tiêu chí là độ chính xác nhận dạng và tỉ số SNR, qua đó làm rõ ưu điểm và hạn chế của từng phương pháp. Kết quả thu được không chỉ cung cấp cái nhìn định lượng về hiệu quả của từng kỹ thuật mà còn tạo cơ sở khoa học quan trọng cho việc lựa chọn giải pháp tối ưu, bảo đảm hệ thống trinh sát thụ động có thể đáp ứng tốt các yêu cầu thực tế trong môi trường tác chiến điện tử hiện đại.

Cấu trúc bài báo gồm có 3 phần chính: các cơ sở lý thuyết của các thuật toán xử lý tín hiệu được trình bày ở phần 2. Phần 3 đánh giá hiệu quả của từng thuật toán với tập dữ liệu các tín hiệu ra đa trong MATLAB. Phần 4 là kết luận tổng quan.

2. Các phương pháp xử lý tín hiệu

Trong phần này, bài báo tập trung trình bày các phương pháp xử lý tín hiệu phổ biến hiện đang được áp dụng trong nhiều hệ thống trinh sát thụ động. Cụ thể, các kỹ thuật như biến đổi Fourier nhanh (FFT), biến đổi Fourier ngắn hạn (STFT), phân bố Wigner–Ville (WVD) và phân tích I/Q.

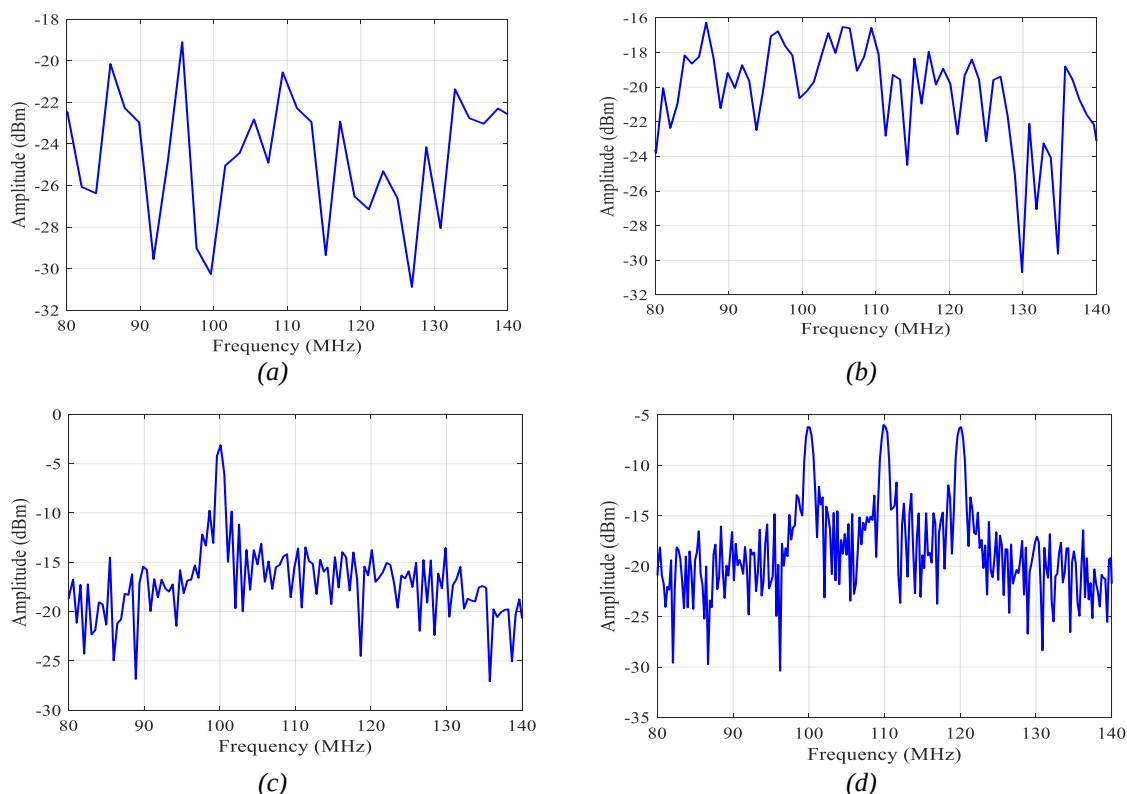
2.1. Biến đổi Fourier nhanh

Thuật toán Cooley–Tukey [6] cho phép tách DFT độ dài N thành các DFT con trên mẫu chẵn và lẻ, từ đó giảm độ phức tạp tính toán từ $O(N^2)$ xuống $O(N \log_2 N)$. Nhờ ưu điểm này, FFT trở thành công cụ nền tảng trong phân tích phổ ra đa và nhận dạng tín hiệu điện tử trong các hệ

thống tác chiến điện tử [8], cũng như trong nhiều ứng dụng kỹ thuật khác như đo rung động, phân tích âm thanh, kiểm tra chất lượng tín hiệu và chẩn đoán tình trạng máy móc [4]. Công thức tổng quát của DFT được biểu diễn như sau:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi kn/N} \quad (1)$$

trong đó, N là số điểm tính DFT, $x(n)$ tín hiệu đầu vào, $X(k)$ là phổ của tín hiệu và $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$.



Hình 1. Kết quả tính FFT của tín hiệu Costas 3 với SNR = 5 dB: a) NDFT = 512; b) NDFT = 1024; c) NDFT = 2048; d) NDFT = 4096

Hình 1 minh họa phổ biên độ của tín hiệu Costas 3 với giá trị số điểm FFT (NDFT) khác nhau. Ở Hình 1a và Hình 1b với NDFT nhỏ ($NDFT \leq 2048$), phổ tín hiệu khó quan sát, hay nói cách khác là việc nhận dạng tín hiệu trở nên khó khăn. Trong một số trường hợp ($NDFT = 2048$) chỉ xuất hiện một vạch phổ (Hình 1c), dễ gây nhầm lẫn với các xung ra đa thông thường. Kết quả phân tích chính xác tín hiệu Costas chỉ đạt được với NDFT = 4096 (Hình 1d). Điều này cho thấy hiệu quả nhận dạng tín hiệu bằng FFT phụ thuộc đáng kể vào số điểm FFT (NDFT) được lựa chọn. Ngoài ra, FFT chỉ quan sát được tín hiệu trên miền tần số, không xác định được sự thay đổi tần số theo thời gian của tín hiệu. Chính vì vậy, dẫn tới nhầm lẫn giữa các tín hiệu M-FSK với Costas và các tín hiệu điều chế pha.

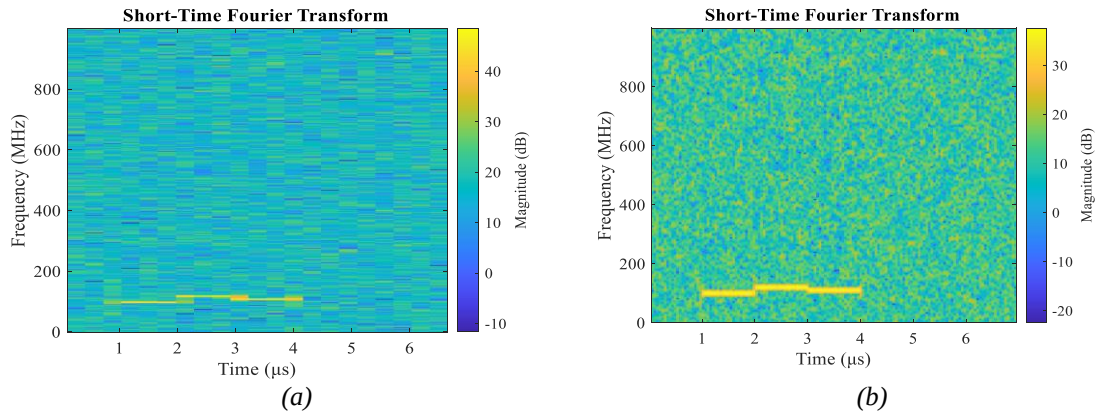
2.2. Biến đổi Fourier thời gian ngắn (STFT)

Để khắc phục các hạn chế của phép biến đổi Fourier rời rạc (FFT), biến đổi Fourier thời gian ngắn (STFT) được sử dụng như một công cụ hiệu quả trong phân tích tín hiệu. STFT cho phép biểu diễn tín hiệu đồng thời trong miền thời gian và miền tần số [5]. Ưu điểm này đặc biệt quan trọng đối với các bài toán giám sát và nhận dạng tín hiệu có phổ biến thiên nhanh như tín hiệu ra

đa điều tần hoặc tín hiệu nhảy tần trong hệ thống thông tin vô tuyến [12]. Tuy nhiên, STFT cũng tồn tại hạn chế cố hữu về sự đánh đổi giữa độ phân giải thời gian và tần số, vốn phụ thuộc trực tiếp vào độ dài cửa sổ phân tích: cửa sổ ngắn nhạy với biến đổi nhanh nhưng khó phân biệt các thành phần tần số lân cận, trong khi cửa sổ dài cải thiện độ phân giải tần số nhưng giảm khả năng theo dõi các biến thiên tức thời [9]. Biểu thức tổng quát của STFT được mô tả như sau:

$$X(\tau, f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n) \omega(n - \tau) e^{-j2\pi f n} \quad (2)$$

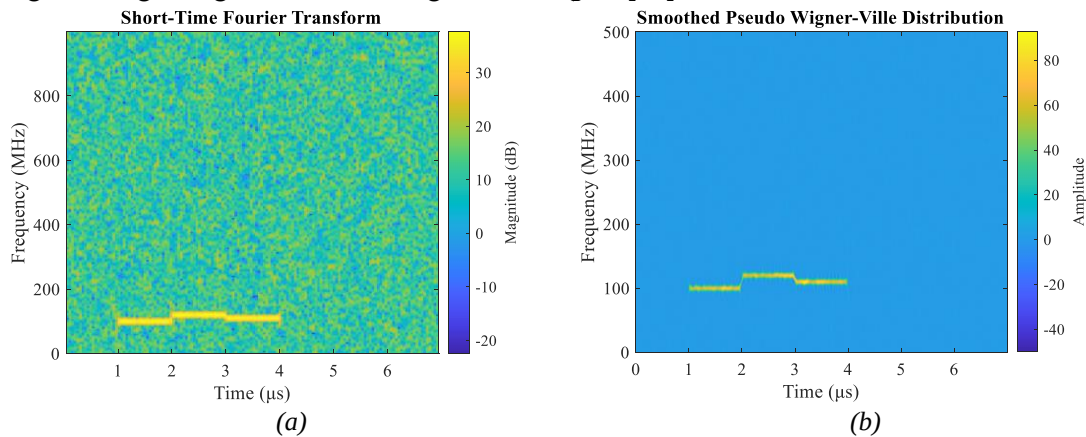
Trong đó $X(\tau, f)$ là kết quả tính STFT, $x(n)$ là tín hiệu đầu vào, $\omega(n - \tau)$ là hàm cửa sổ và τ là độ dài hàm cửa sổ. Hình 2 minh họa kết quả tính STFT của tín hiệu Costas 3 với hai kích thước hàm cửa sổ khác nhau ($NW = 512$ và $NW = 128$). Khi sử dụng kích thước hàm cửa sổ $NW = 512$ (Hình 2a), ảnh thời gian – tần số thể hiện rõ khả năng tách biệt các thành phần tần số, song thông tin về thời điểm bắt đầu và kết thúc tín hiệu trở nên kém rõ ràng. Ngược lại, với kích thước hàm cửa sổ nhỏ hơn $NW = 128$ (Hình 2b), Thời điểm xuất hiện tín hiệu được thể hiện rõ ràng hơn (màu vàng), nhưng khả năng phân biệt tần số riêng lẻ bị suy giảm.



Hình 2. Kết quả tính STFT của tín hiệu Costas 3 với SNR = 5 dB: a) $NW = 512$; b) $NW = 128$.

2.3. Phân bố Wigner–Ville (WVD)

Phân bố Wigner–Ville (WVD) là một công cụ phân tích tín hiệu trong miền thời gian–tần số với độ phân giải rất cao, đạt giới hạn tối ưu theo nguyên lý bất định Heisenberg [7]. Khác với biến đổi Fourier ngắn hạn (STFT), vốn phụ thuộc vào cửa sổ phân tích, WVD không sử dụng cửa sổ nên không bị giới hạn độ phân giải bởi tham số này. Bên cạnh đó, WVD còn thỏa mãn tính chất bảo toàn năng lượng, tức năng lượng toàn phần của tín hiệu trong miền thời gian–tần số bằng với năng lượng của tín hiệu trong miền thời gian [13].



Hình 3. Kết quả phân tích tín hiệu Costas 3: a) STFT; b) WVD

Tuy nhiên, WVD cũng tồn tại những hạn chế, điển hình là sự xuất hiện của các thành phần giao thoa (cross-terms) khi tín hiệu có nhiều thành phần tần số, gây khó khăn trong việc diễn giải kết quả. Ngoài ra, độ phức tạp tính toán của WVD cao hơn so với các phương pháp FFT hoặc STFT. Dù vậy, nhờ ưu điểm vượt trội, WVD đã được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực. Trong hệ thống ra đa, nó hỗ trợ phân tích tín hiệu phản xạ để tách biệt các mục tiêu có vận tốc khác nhau [13]. Đối với hệ thống thông tin, WVD phục vụ giám sát phổ và phát hiện tín hiệu LPI (Low Probability of Intercept). Ngoài ra, trong y sinh, WVD được sử dụng để phân tích các tín hiệu ECG, EEG nhằm phát hiện bất thường [14]. Hình 3 là ví dụ minh họa kết quả phân tích tín hiệu Costas 3 với STFT và WVD. Kết quả cho thấy, WVD có nhiều ưu điểm vượt trội hơn như tăng khả năng phân biệt tín hiệu ở miền thời gian cũng như miền tần số (Hình 3).

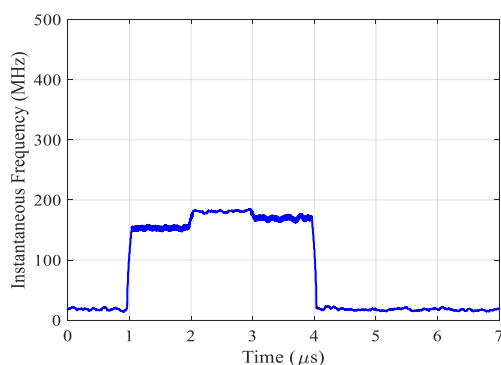
2.4. Phân tích I/Q (In-phase/Quadrature)

Phân tích I/Q (In-phase/Quadrature) là một kỹ thuật xử lý tín hiệu cơ bản nhưng có vai trò then chốt, cho phép biểu diễn tín hiệu dưới dạng hai thành phần trực giao: I (đồng pha) và Q (vuông pha). Quá trình này được thực hiện bằng cách trộn tín hiệu băng tần cao với sóng mang cosine và sine cùng tần số, sau đó lọc thông thấp để thu được tín hiệu cơ sở phức (complex baseband) [14], [15]:

$$x(t) = I(t) + jQ(t) \quad (3)$$

trong đó $I(t)$ và $Q(t)$ lần lượt là phần thực và phần ảo của tín hiệu. Từ biểu diễn này, các đặc trưng quan trọng của tín hiệu có thể được xác định trực tiếp:

$$\begin{cases} A = \sqrt{I^2 + Q^2} \\ \phi(t) = \arctan\left(\frac{Q(t)}{I(t)}\right) \\ f(t) = \frac{d\phi(t)}{dt} \end{cases} \quad (4)$$



Hình 4. Kết quả xử lý tín hiệu Costas bằng xử lý IQ

Ưu điểm nổi bật của phân tích I/Q là khả năng bảo toàn đầy đủ thông tin biên độ và pha, nhờ đó cho phép phân tích chính xác tần số tức thời, độ dịch Doppler cũng như đặc tính điều chế của tín hiệu. Phương pháp này được ứng dụng rộng rãi trong ra đa để đo vận tốc mục tiêu và nhận dạng tín hiệu LPI, cũng như trong các hệ thống thông tin vô tuyến hiện đại [1].

Tuy nhiên, việc thực hiện biến đổi I/Q đòi hỏi sự đồng bộ chính xác giữa dao động nội và tín hiệu thu, đồng thời dễ bị ảnh hưởng bởi nhiễu pha hoặc sai lệch cân bằng giữa hai kênh I và Q [16]. Mặc dù tồn tại những thách thức này, biến đổi I/Q vẫn được xem là một công cụ nền tảng, đóng vai trò không thể thay thế trong các hệ thống xử lý tín hiệu số hiện đại. Hình 4 minh họa kết quả phân tích tín hiệu Costas 3 bằng phương pháp I/Q. Kết quả cho thấy sự biến thiên tần số theo thời gian tồn tại của tín hiệu được thể hiện một cách rõ ràng. Phương pháp này không chỉ phản ánh mối quan hệ tần số–thời gian mà còn cung cấp đầy đủ thông tin về thời điểm xuất hiện cũng như tần số tương ứng của tín hiệu, từ đó hỗ trợ hiệu quả cho quá trình nhận dạng và phân tích dạng điều chế.

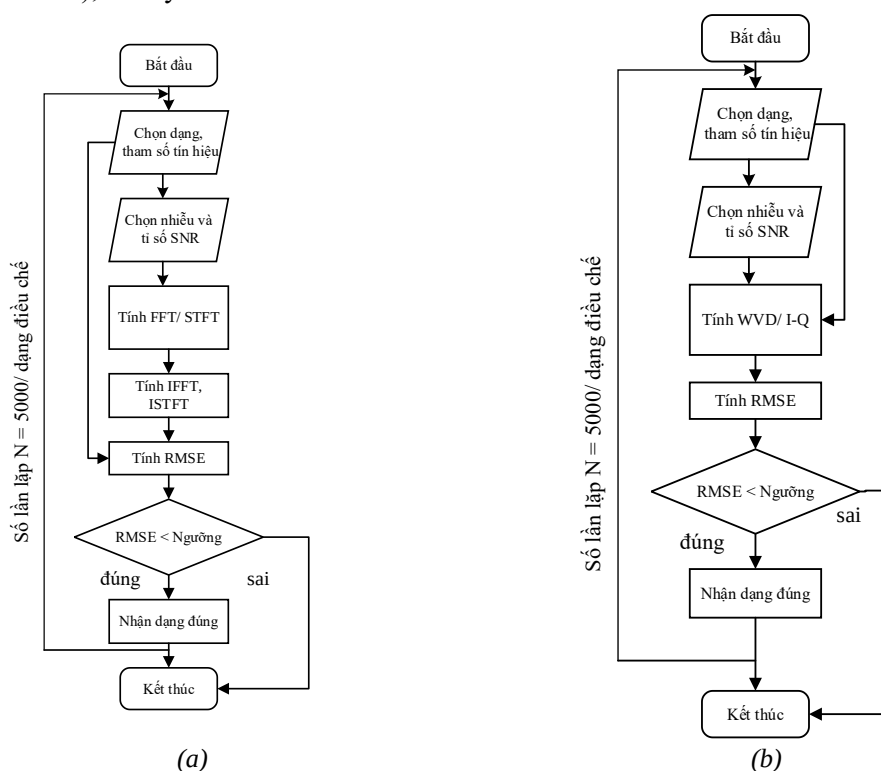
3. Đánh giá hiệu quả các phương pháp xử lý tín hiệu

Trong phần này, tác giả tiến hành đánh giá hiệu quả của các thuật toán đã trình bày đối với từng loại tín hiệu ra đa điển hình, bao gồm: xung cơ bản, điều tần tuyến tính (LFM), mã Barker, Frank và P. Quá trình đánh giá được thực hiện trong môi trường MATLAB, với tiêu chí so sánh là tỉ số SNR tối thiểu cần thiết để đạt được xác suất nhận dạng chính xác $P_{ca} \geq 85\%$. Độ tin cậy của kết

quả được đảm bảo thông qua kiểm định với 5000 mẫu cho mỗi loại tín hiệu. Các tham số tín hiệu sử dụng trong quá trình đánh giá được trình bày trong Bảng 1. Các tham số của các kỹ thuật FFT, WVD, STFT được tổng hợp trong Bảng 2. Sơ đồ thuật toán để đánh giá hiệu quả các phương pháp được minh họa trên Hình 5. Sai số trung bình bình phương được tính theo công thức (5).

$$RMSE = \frac{\|Y - Y_{noise}\|}{\|Y_{noise}\|} \quad (5)$$

trong đó RMSE là sai số trung bình bình phương, Y là kết quả phân tích tín hiệu gốc (không có nhiễu); Y_{noise} là kết quả phân tích tín hiệu có nhiễu. Trong bài báo này, ngưỡng so sánh được thiết lập cố định $H_T = 5 \times 10^{-16}$. Hình 6 trình bày độ chính xác nhận dạng các tín hiệu theo từng mức SNR đối với các phương pháp xử lý khác nhau. Cụ thể, Hình 6(a) cho thấy phương pháp FFT tại (SNR = 0 dB) cho kết quả nhận dạng tốt nhất với các tín hiệu mã P1 (đường màu xanh lá - $P_{ca} = 87,93\%$), tiếp theo là xung ra đa (màu đen - $P_{ca} = 66,31\%$), Frank (màu tím - $P_{ca} = 63,13\%$), LFM (màu vàng - $P_{ca} = 40,35\%$), Barker (màu đỏ - $P_{ca} = 26,13\%$), và thấp nhất là tín hiệu Costas (xanh dương - $P_{ca} = 4,78\%$). Lý do chính là các tín hiệu Costas là tổ hợp nhiều tín hiệu xung đơn, dẫn tới quá trình nhận dạng xảy ra nhầm lẫn. Để đạt độ chính xác nhận dạng các tín hiệu ($P_{ca} \geq 85\%$), FFT yêu cầu tỉ số SNR tối thiểu là 10 dB.



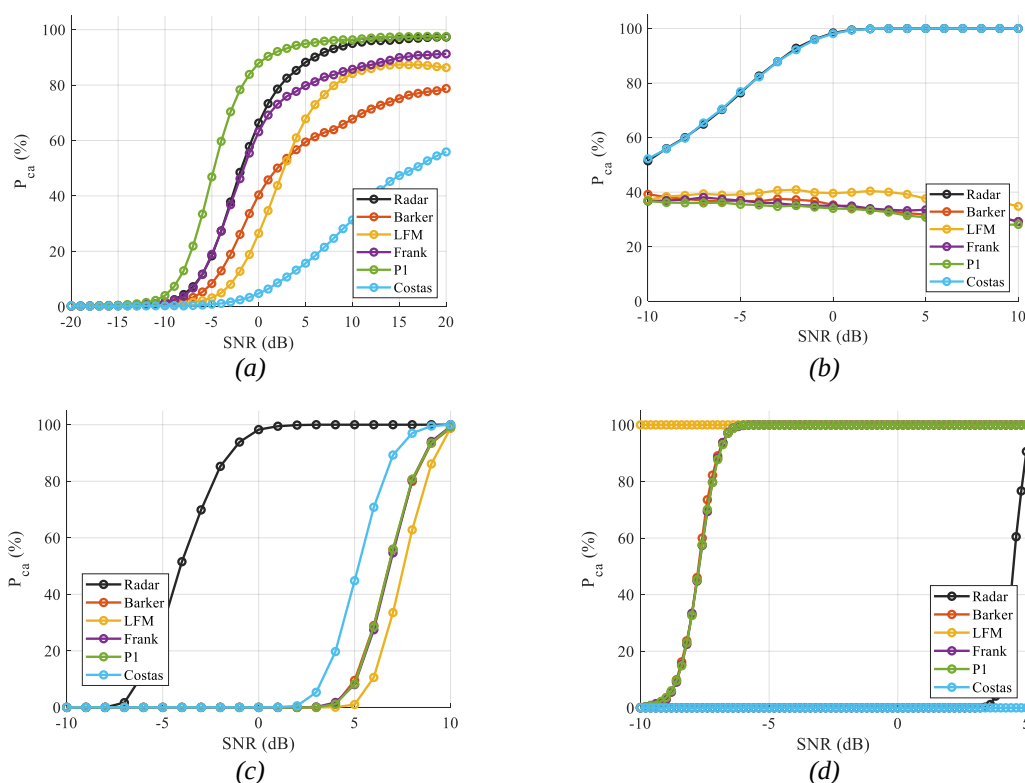
Hình 5. Sơ đồ thuật toán đánh giá các kỹ thuật phân tích trong xung: (a) FFT/STFT; (b) WVD/ I-Q.

Bảng 1. Tham số tín hiệu để đánh giá hiệu quả các phương pháp xử lý tín hiệu

Tham số tín hiệu	Giá trị
Tần số sóng mang f_c (MHz)	50 đến 200
Độ rộng xung t_i (μs)	1 đến 10
Tỉ số SNR (dB)	-10 đến 10
Độ dài mã hóa pha (-)	2, 3, 4, 5
Dạng nhiễu	Tạp trắng

Bảng 2. Tham số các kỹ thuật phân tích

Kỹ thuật phân tích	Tham số	Giá trị
STFT	Số điểm FFT (-)	4096
	Số điểm FFT (-)	4096
	Hàm cửa sổ	Gaussian
	Độ dài hàm cửa sổ (-)	1024
WVD	Số điểm trùng lặp (-)	500
	Số điểm trên miền thời gian, tần số (-)	1024
	Hàm cửa sổ (-)	Gaussian
	Hàm kernel (-)	Smoothed pseudo

**Hình 6.** Kết quả đánh giá hiệu quả của từng phương pháp xử lý tín hiệu:
a) FFT; b) STFT; c) WVD; d) phân tích IQ

Hình 6b minh họa độ chính xác nhận dạng tín hiệu khi sử dụng phương pháp STFT. Kết quả cho thấy STFT gặp nhiều hạn chế trong việc phân biệt các tín hiệu điều chế phức tạp như LFM (màu vàng), Barker (màu đỏ), Frank (màu tím) và mã P1 với độ chính xác $P_{ca} \approx 42\%$. Ngược lại, STFT thể hiện hiệu quả cao đối với các tín hiệu có cấu trúc M-FSK, điển hình là Costas (màu xanh dương) và xung ra đa (màu đen), với độ chính xác tốt ngay cả tại $SNR = -2$ dB ($P_{ca} \geq 85\%$).

Tương ứng, Hình 6c trình bày kết quả phân tích tín hiệu bằng phương pháp WVD. Phương pháp này đạt hiệu quả tốt nhất đối với tín hiệu xung (màu đen, chính xác $P_{ca} \geq 85\%$ tại $SNR = -1$ dB), tiếp theo là Costas (màu xanh dương, $SNR = 7$ dB), Barker, Frank, P1 ($SNR = 8$ dB), trong khi tín hiệu LFM (màu vàng) cho kết quả kém nhất, chỉ nhận dạng chính xác $P_{ca} \geq 85\%$ ở mức $SNR = 10$ dB. Trái ngược với STFT, phương pháp phân tích I/Q (Hình 6d) cho hiệu quả vượt trội đối với các tín hiệu điều chế phức tạp như LFM, Frank, P1 và Barker, với khả năng nhận dạng chính xác $P_{ca} \geq 85\%$ ở mức SNR thấp ($SNR = -8$ dB), nhưng lại gặp khó khăn với các tín hiệu đơn giản hơn như xung ra đa và Costas ($SNR = 5$ dB). Từ các kết quả trên

có thể khẳng định rằng mỗi kỹ thuật phân tích tín hiệu đều có những ưu điểm và hạn chế riêng, phù hợp với các loại tín hiệu khác nhau. Do đó, việc lựa chọn phương pháp cần gắn liền với đặc trưng điều chế của tín hiệu và điều kiện SNR trong từng kịch bản ứng dụng cụ thể. Bảng 3 cho thấy sự khác biệt rõ rệt về hiệu quả nhận dạng tín hiệu giữa các thuật toán phân tích trong điều kiện nhiễu tạp. Các kết quả cho thấy, các phương pháp truyền thống như FFT, STFT, WVD và phân tích I-Q chỉ nhận dạng tốt với một số dạng tín hiệu nhất định. Ví dụ, phương pháp I-Q cho kết quả tốt nhất với tín hiệu LFM, tiếp theo là các tín hiệu mã hóa pha Frank, Barker, P1. Trong khi đó, phương pháp sử dụng AI cho thấy hiệu quả vượt trội có thể nhận dạng được hết các dạng tín hiệu ở mức SNR = -12 dB. Điều này chứng minh khả năng học đặc trưng mạnh mẽ và khả năng chống nhiễu tốt của AI so với phương pháp truyền thống. Mặc dù cho hiệu quả nhận dạng cao, nhưng vẫn tồn tại một số hạn chế như yêu cầu dữ liệu huấn luyện phong phú, tài nguyên tính toán lớn. Điều này gây trở ngại trong các ứng dụng thời gian thực.

Bảng 3. Bảng so sánh các kỹ thuật phân tích tín hiệu

Dạng tín hiệu	Tỉ số SNR tối thiểu (dB)				
	FFT	STFT	WVD	I-Q	AI [17]
Xung ra đa	5	-2	-3	6	-12
LFM	10	>10	9	-10	-12
Costas	20	-2	8	6	-12
Barker	15	>10	9	-8	-12
Frank	7	>10	9	-8	-12
P1	-2	>10	9	-8	-12

4. Kết luận

Nghiên cứu đã tiến hành phân tích và so sánh hiệu quả của các phương pháp xử lý tín hiệu phổ biến trong nhận dạng tín hiệu ra đa, bao gồm FFT, STFT, WVD và phân tích I/Q. Kết quả nghiên cứu cho thấy mỗi phương pháp đều có những ưu điểm và hạn chế nhất định, phụ thuộc vào dạng điều chế và điều kiện SNR.

Cụ thể, FFT thể hiện khả năng nhận dạng đáng tin cậy đối với các tín hiệu có cấu trúc đơn giản như xung ra đa hoặc các dạng mã cơ bản (P1, Frank, Barker) ở mức SNR trung bình–cao, song gặp nhiều khó khăn đối với tín hiệu Costas do đặc thù cấu trúc tổ hợp nhiều xung. Phương pháp STFT cho thấy hiệu quả hạn chế khi xử lý các tín hiệu điều chế phức tạp (LFM, Frank, P1, Barker), nhưng lại nhận dạng tốt các tín hiệu dạng M-FSK như Costas và xung ra đa ở mức SNR thấp. Trong khi đó, WVD vượt trội ở khả năng phân giải thời gian–tần số, giúp nhận dạng tốt các tín hiệu xung và Costas ở mức SNR trung bình, nhưng hiệu quả giảm với tín hiệu LFM. Đáng chú ý, phân tích I/Q chứng minh ưu thế vượt trội trong việc nhận dạng các tín hiệu điều chế phức tạp ngay cả ở SNR thấp (SNR = -8 dB), mặc dù gặp hạn chế đối với các tín hiệu đơn giản hơn như xung ra đa và Costas.

Từ các kết quả trên có thể khẳng định rằng không tồn tại một phương pháp xử lý duy nhất tối ưu cho mọi loại tín hiệu. Việc lựa chọn kỹ thuật phù hợp cần gắn liền với đặc tính điều chế của tín hiệu và điều kiện tác chiến điện tử cụ thể. Hướng nghiên cứu tiếp theo có thể tập trung vào việc kết hợp các phương pháp truyền thống với các kỹ thuật trí tuệ nhân tạo nhằm nâng cao hiệu quả nhận dạng tín hiệu ra đa công suất thấp trong môi trường nhiễu mạnh.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, 3rd ed. McGraw-Hill, 2001.
- [2] N. J. Willis, *Bistatic Radar*, SciTech Publishing, 2005.
- [3] H. Griffiths and C. Baker, *Passive Radar Systems: Technology and Applications*, Cambridge University Press, 2017.
- [4] D. Poullin, "Passive detection using existing transmitters," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 20, no. 6, pp. 3–8, 2005.

-
- [5] V. Černý, *VERA-NG: The Next Generation of Passive Surveillance Systems*, ERA a.s., Czech Republic, 2019.
 - [6] J. W. Cooley and J. W. Tukey, "An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series," *Mathematics of Computation*, vol. 19, no. 90, pp. 297–301, Apr. 1965.
 - [7] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing*, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2010.
 - [8] X. T. Vu, "Automatic radar signal recognition using analytic Wavelet transform and Alexnet," *TNU journal of Science and Technology*, vol. 229, no. 14, pp. 222-230, Oct. 2024.
 - [9] Q. K. Mac, "A new algorithm to improve recognition accuracy of communication signals," *The University of Danang - Journal of Science and Technology*, vol. 22, no. 10, pp. 24-29, Sep. 2024.
 - [10] V. M. Duong, J. Vesely, P. Hubacek, P. Janu, and X. L. Tran, "Detection and Parameter Estimation of Intra-pulse Modulated Radar Signals in Complex Interference Environment," *SN Applied Sciences*, vol. 5, no. 184, 2023, doi: 10.1007/s42452-023-05403-x.
 - [11] V. L. Nguyen, S. V. Doan, T. C. Tran, and V. C. Tran, "LPI radar signal recognition using deep-learning neural network," *The University of Danang - Journal of Science and Technology*, vol. 19, no. 10, pp.70-75, 2021.
 - [12] P. Flandrin, *Time-Frequency/Time-Scale Analysis*. San Diego, CA: Academic Press, 1999.
 - [13] H. L. V. Trees, *Detection, Estimation, and Modulation Theory, Part I*. New York, NY: Wiley, 2001.
 - [14] R. Rangayyan, *Biomedical Signal Analysis*. Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press, 2002.
 - [15] J. G. Proakis and D. G. Manolakis, *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications*, 4th ed., Pearson, 2007.
 - [16] S. Haykin, *Communication Systems*, 5th ed., Wiley, 2009.
 - [17] J. Liang, Z. Luo, and R. Liao, "Intra-Pulse Modulation Recognition of Radar Signals Based on Efficient Cross-Scale Aware Network" *Sensors*, vol. 24, no. 16, 2024, Art. no. 5344, doi: 10.3390/s24165344.