XỬ LÝ TƯƠNG QUAN DÙNG FT VÀ FrFT TÍN HIỆU THU KHI KHÔNG BIẾT THỜI GIAN GIỮ CHẬM VÀ DỊCH TẦN SỐ DOPPLER

Nguyễn Cao Hữu[1*], Ngô Văn Huấn[2]

Tóm tắt: *Biến đổi Fourier (Fourier Transform - FT) là trường hợp đặc biệt của biến đổi Fourier phân đoạn (The Fractional Fourier Transform - FrFT). FT và FrFT có hiệu quả cao trong xử lý tín hiệu. Bài báo đề xuất sử dụng FT và FrFT để giải quyết bài toán xử lý tương quan tín hiệu thu trong thực tế khi không biết thời gian giữ chậm và dịch tần số Doppler. Mô phỏng cho thấy sự hiệu quả dùng FrFT so với FT khi xử lý tương quan tín hiệu điều tần tuyến tính.*

Từ khóa: Xử lý tương quan; Biến đổi Fourier phân đoạn; Biến đổi Fourier; Tín hiệu điều tần tuyến tính.

1. MỞ ĐẦU

Biến đổi Fourier phân đoạn (The Fractional Fourier Transform - FrFT) là công cụ mạnh trong phân tích tín hiệu, FrFT tổng quát hơn FT, mối quan hệ giữa FT và FrFT thể hiện trong [5], tổng quan và ứng dụng của FrFT nêu trong [2, 6]. Việc phân tích, xử lý tương quan (XLTQ) tín hiệu điều tần tuyến tính (ĐTTT) trong Ra đa và Sonar là điểm mạnh của FrFT so với FT.

Xử lý tương quan cũng như lọc phối hợp là giải pháp quan trọng trong xử lý tín hiệu để nâng cao tỷ số tín/tạp. XLTQ tín hiệu dùng FT nêu trong [1] và khi dùng FrFT nêu trong [3, 4]. Khi đó, tín hiệu thu được tương quan chéo với tín hiệu phát (bản sao tín hiệu phát), khi hai tín hiệu này khác nhau thì tín hiệu ra XLTQ bị suy giảm, hoặc mất khi hai tín hiệu khác nhau lớn. Sự khác nhau giữa hai tín hiệu này chủ yếu là do thời gian giữ chậm và dịch tần Doppler của tín hiệu thu. Sự khác nhau về thời gian được xử lý bằng giữ chậm bản sao tín hiệu phát, khác nhau về tần số do dịch tần Doppler khó xử lý hơn. Trong [1, 3] đưa ra một số ảnh hưởng của dịch tần Doppler làm cho tín hiệu ra XLTQ dùng FT bị méo, khi dịch tần Doppler lớn tín hiệu ra không quan sát được. Bài báo đề xuất biện pháp giải quyết vấn đề này bằng cách đồng bộ thời gian giữ chậm và dịch tần Doppler của bản sao tín hiệu phát theo tín hiệu thu. Bố cục của bài báo: Mục 2 trình bày XLTQ dùng FT và FrFT; Mục 3 mô phỏng và đánh giá kết quả; Mục 4 kết luận.

2. XỬ LÝ TƯƠNG QUAN DÙNG FT VÀ FRFT

2.1. Xử lý tương quan dùng FT

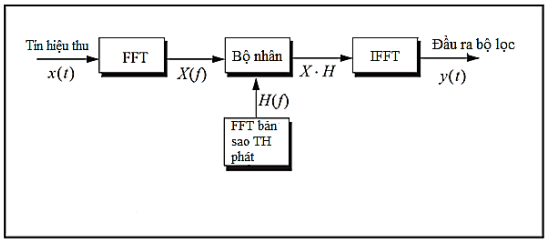
2.1.1. Định nghĩa FT

Biến đổi Fourier thuận (Fourier transform – FT) và ngược (IFT) của tín hiệu x(t) là:

$$X(\omega)=\int_{-\infty}^{+\infty}x(t).e^{-j\omega t}dt \text{ và } x(t)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{+\infty}X(\omega).e^{j\omega t}d\omega \quad (1)$$

2.1.2. Mô hình xử lý tương quan dùng FFT

- Theo [1], XLTQ dùng FFT giữa tín hiệu thu và bản sao tín hiệu phát được thực hiện như hình 1:



Hình 1. *Xử lý tương quan dùng FFT.*

- Tín hiệu thu x(t) sau khi FFT ta được X(f), bản sao tín hiệu phát sau FFT là H(f), tín hiệu ra bộ nhân được biến đổi FFT ngược để được đầu ra y(t).

- Trong [1, 3] đã đưa ra ảnh hưởng khi tín hiệu phát không đồng bộ với tín hiệu thu về thời gian giữ chậm và tần số Doppler. Như vậy, để có đầu ra XLTQ cực đại ta phải đồng bộ bản sao tín hiệu phát theo tín hiệu thu cả về hai tham số này. Bài báo đề xuất thực hiện như sau:

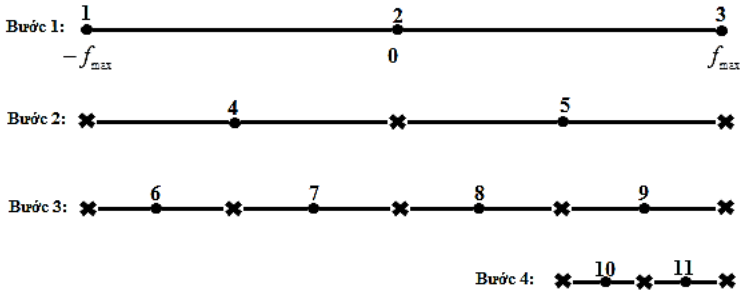
+ Đồng bộ thời gian giữ chậm

- Tín hiệu thu về từ sau khoảng thời gian bằng độ rộng xung phát, được rời rạc theo thời gian với khoảng rời rạc bằng độ rộng xung phát τ_x và ghi lần lượt vào ô nhớ 1, 2, …, N, $N=T_L/\tau_x$ là số khoảng rời rạc trong một chu kỳ lặp T_L.

- Tín hiệu thu ghi ở ô nhớ 1 được XLTQ với bản sao tín hiệu phát được giữ chậm một lượng là τ_x. Tín hiệu thu ở ô nhớ 2 được XLTQ với bản sao tín hiệu phát được giữ chậm một lượng là $2\tau_x$, tín hiệu thu ở các ô nhớ còn lại được xử lý tương tự.

+ Đồng bộ tần số Doppler

Giả sử, v_{max} là tốc độ lớn nhất có thể của các mục tiêu chuyển động như máy bay, tên lửa,… Do đó, tần số Doppler lớn nhất là $f_{\max}$ (khi mục tiêu bay với v_{max} hướng vào tâm đài) và tần số Doppler nhỏ nhất là $f_{\min} = -f_{\max}$ (khi mục tiêu bay với v_{max} từ tâm đài hướng ra ngoài). Từ khoảng giá trị $\left[-f_{\max} \div f_{\max}\right]$ ta phải ước lượng được giá trị tần số Doppler phù hợp với mỗi khoảng rời rạc về thời gian. Phương pháp được đề xuất sử dụng ước lượng tiệm cận dần như hình 2:



Hình 2. *Các bước ước lượng tiệm cận tần số Doppler.*

Nguyên lý ước lượng tần số Doppler khi đã đồng bộ với thời gian ở ô nhớ thứ i như sau:

Bước 1: Tính tương quan giữa tín hiệu thu ở ô nhớ thứ i và bản sao tín hiệu phát ở các giá trị của tần số Doppler tương ứng với các điểm 1, 2, 3 (Bước 1, hình 2). Tìm giá trị lớn nhất của các giá trị tại điểm 1, 3 gọi là U_{ra1}, sau đó, so sánh với giá trị ngưỡng U_{ng} (U_{ng}=Giá trị đầu ra của XLTQ giữa tín hiệu thu ở ô nhớ thứ i với bản sao tín hiệu phát khi tần số Doppler bằng không-ứng với điểm 2).

Nếu $U_{raB1} \geq U_{ng}$ dừng, nếu $U_{raB1} < U_{ng}$ ta chuyển sang bước 2.

Bước 2: Việc tính toán tương tự như bước 1 nhưng thực hiện ở các điểm 4, 5. Giá trị lớn nhất tìm được ở bước này là U_{ra2}. Nếu $U_{raB2} < U_{ng}$ ta chuyển sang bước 3.

Bước 3: Việc tính toán tương tự bước 1 nhưng thực hiện ở các điểm 6, 7, 8 và 9. Giả sử giá trị đầu ra của XLTQ lớn nhất tương ứng với điểm 9 và thỏa mãn $U_{ra9} > U_{ng}$ thì quá trình chuyển sang bước 4.

Bước 4: Việc tính toán thực hiện ở các điểm 10 và 11. Tìm giá trị lớn nhất của đầu ra XTLQ tương ứng với các điểm 9, 10 và 11.

Nếu giá trị lớn nhất tương ứng với điểm 9 thì dừng quá trình.

Nếu giá trị lớn nhất tương ứng với 2 điểm còn lại thì quá trình xử lý được tiếp tục đến khi đến khi U_{ra} cực đại.

Ta ước lượng được giá trị tần số Doppler của mục tiêu. Lưu ý các điểm 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 đều là giá trị nằm giữa của khoảng giá trị đang xét.

2.2. Xử lý tương quan dùng FrFT

2.2.1. Định nghĩa FrFT

- Biến đổi FrFT của tín hiệu f(x) ký hiệu là:

$$X_\alpha(y) = F_\alpha\left[f(x)\right] = \int_{-\infty}^{+\infty} K_\alpha(x,y) f(x)\,\mathrm{dx} \tag{2}$$

Với: + $K_\alpha = \sqrt{\dfrac{1-j\cot\phi}{2\pi}} e^{\frac{1}{2}jy^2\cot\phi} . e^{-jxy\,\mathrm{cosec}\,\phi + \frac{1}{2}jx^2\cot\phi}$

+ $\alpha \in [-1;1]$ là cấp của FrFT, $\phi = \dfrac{\alpha\pi}{2} \in \left[-\dfrac{\pi}{2};\dfrac{\pi}{2}\right]$ là góc quay trong mặt phẳng thời gian tần số.

2.2.2. Mô hình xử lý tương quan dùng FrFT

- Giả sử một tín hiệu ĐTTT pha và tần số tức thời của nó cho bởi phương trình sau:

Tín hiệu ĐTTT $\Rightarrow e^{j(at^2+f_0t+c)}$;

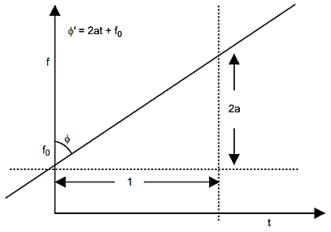
Phase $\Rightarrow at^2 + f_0t + c$;

Tần số tức thời $\Rightarrow 2at + f_0$;

f_0: Tần số khởi đầu của tín hiệu;

2a: Tốc độ hoặc tỷ lệ thay đổi, độ dốc;

c: Pha ban đầu.



Hình 3. *Mối quan hệ giữa tần số tức thời f và t.*

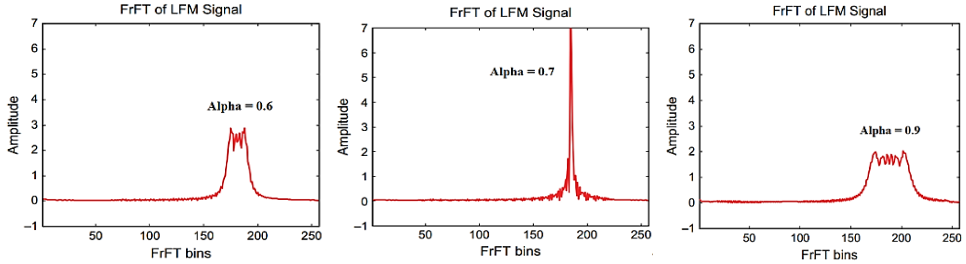
+ Mỗi dạng tín hiệu ĐTTT sẽ có một α_{opt} để tín hiệu ra lớn nhất [3]:

$$\alpha_{opt} = \frac{2\phi}{\pi} = \frac{2}{\pi}\tan^{-1}\left(\frac{1}{2a}\right) \tag{3}$$

+ Với tần số lấy mẫu là f_s, trong khoảng thời gian T sẽ có f_s*N mẫu và tham số α_{opt} được xác định:

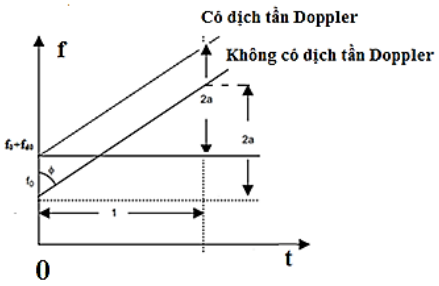
$$\alpha_{opt} = \frac{2}{\pi}\tan^{-1}\left(\frac{f_s^2/N}{2a}\right) \tag{4}$$

Hình 4 là ví dụ trong [3] về FrFT tín hiệu ĐTTT với độ rộng xung 200 ms, độ rộng băng thông là 300 Hz, tần số trung tâm 1 KHz, α_{opt}=0.7. FrFt với α=0.6, α= 0.7, α=0.9. Với kết quả FrFT trên hình 4 thì khi $\alpha = \alpha_{opt} = 0.7$ xung ra hẹp và lớn nhất so với giá trị α khác.



Hình 4. *FrFT với các α khác nhau.*

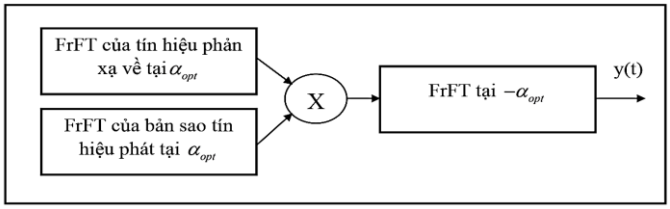
+ Xem xét ảnh hưởng của độ dịch tần Doppler trong xử lý FrFT: Xét trường hợp đài ra đa cảnh giới, khi anten quét qua mục tiêu ta thu được 1 chùm xung. Trong khoảng thời gian ngắn này, ta coi tốc độ mục tiêu là không đổi. Giả sử tần số Doppler là f_{d0}. Do đó, tần số tức thời của tín hiệu thu về là $2at + f_0 + f_{d0}$.



Hình 5. *Mối quan hệ giữa tần số tức thời f của tín hiệu thu khi không có và có dịch tần Doppler.*

Từ hình 5 ta thấy, tham số **a** không thay đổi khi có và không có dịch tần Doppler. Do đó, FrFT với mục tiêu chuyển động và không chuyển động là không thay đổi.

- Theo [4, 5] mô hình XLTQ được thể hiện trên hình 6. Việc tính toán XLTQ tại ô nhớ thứ i (tương ứng khoảng rời rạc thứ i) được đồng bộ thời gian tương tự như FT. Mục tiêu chuyển động không làm thay đổi tham số α_{opt} do đó, không cần phải đồng bộ về tần số Doppler.

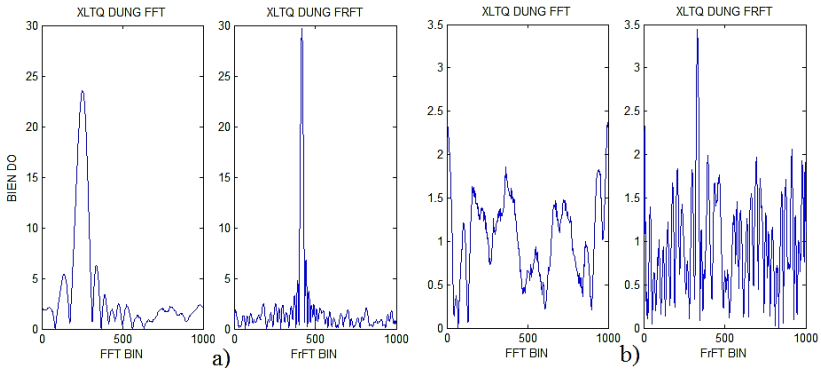


Hình 6. *Mô hình XLTQ trong miền FrFT.*

3. MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

Để kiểm chứng hiệu quả của đề xuất, chúng tôi dùng MATLAB mô phỏng và so sánh các kết quả. Tín hiệu mô phỏng là tín hiệu ĐTTT có tham số: độ rộng xung $\tau_x = 100\ ms$, độ rộng băng B=200 Hz trộn với tạp Gauss. Giá trị α_{opt} tính theo công thức (4) là 0.9745. Kết quả như sau:

3.1. Bản sao tín hiệu phát đồng bộ về thời gian, nhưng không đồng bộ về dịch tần Doppler



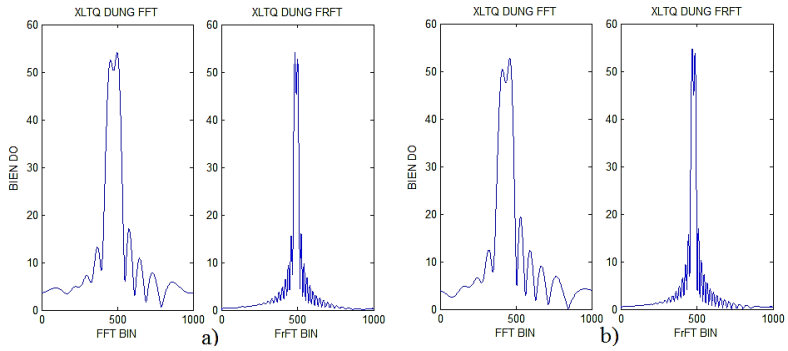
Hình 7. *XLTQ FFT và FrFT:*

a) Tỷ số SNR = -5 dB, tín hiệu thu có $t_{gc} = 1ms$, dịch tần F_d = 50 Hz;

b) Tỷ số SNR = -30 dB tín hiệu thu có $t_{gc} = 1ms$, dịch tần F_d = 100 Hz.

Nhận xét: Khi có dịch tần Doppler tín hiệu ra XLTQ dùng FT giảm nhiều, khi F_d = 100 Hz tín hiệu ra bị mất. Khi dùng FrFT tín hiệu ra XLTQ thay đổi nhỏ và vẫn phát hiện được mục tiêu.

- Ta xem xét khả năng phân biệt theo cự ly và tần số khi XLTQ dùng FFT và FrFT:

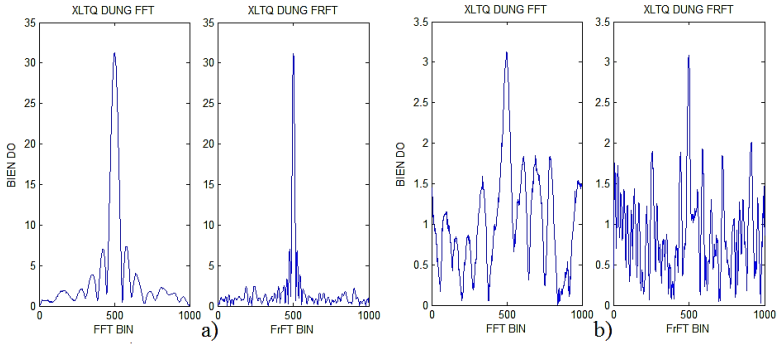


Hình 8. *Hai mục tiêu tương ứng với tín hiệu thu có: a)* $t_{gc1} = 1\ ms$ *và* $t_{gc2} = 4.3\ ms$*;*
b) Độ dịch tần Doppler F_{d1} *= 10 Hz,* F_{d2} *= 17.2 Hz.*

Nhận xét: Khả năng phân biệt theo cự ly và tần số khi XLTQ dùng FrFT cao hơn so với FFT.

3.2. Bản sao tín hiệu phát đồng bộ cả về thời gian giữ chậm và dịch tần Doppler

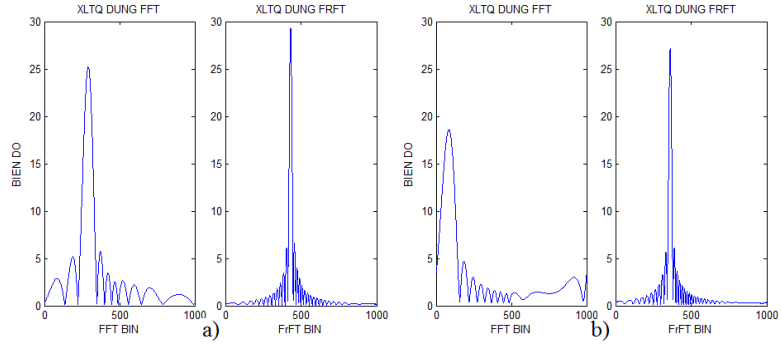
Kết quả XLTQ dùng FT và FrFT khi tiến hành đồng bộ hai tham số thể hiện trên hình 9.



Hình 9. *XLTQ FFT và FrFT tín hiệu thu có: a) Tỷ số SNR = -5 dB,* $t_{gc} = 1ms$*,* F_d *= 50 Hz;*
b) Tỷ số SNR = -30 dB $t_{gc} = 1ms$*,* F_d *= 100 Hz.*

Nhận xét: Tín hiệu thu sau XLTQ dùng FTvà FrFT đều tăng lên, tuy nhiên, xử lý dùng FrFT cho xung ra độ rộng hẹp, sườn xung dốc hơn do đó làm tăng độ chính xác khi xác định cự ly.

3.3. Bản sao tín hiệu phát đồng bộ cả về thời gian và dịch tần Doppler nhưng có sai số



Hình 10. *Xử lý FFT và FrFT với* t_{gc} *= 20 ms,* F_d *= 100 Hz với sai số đồng bộ:*
a) Sai số $\Delta f = 30\%,\ \Delta\tau = 30\%$*; b) Sai số* $\Delta f = 60\%,\ \Delta\tau = 60\%$*.*

Khi đồng bộ về thời gian và dịch tần Doppler của bản sao tín hiệu phát luôn có sai số so với lượng giữ chậm thời gian và lượng dịch tần Doppler của tín hiệu thu. Ta xét ảnh hưởng của sai số này đến tín hiệu ra XLTQ. Đánh giá ảnh hưởng này trên hình 10 khi XLTQ dùng FT và FrFT.

Nhận xét: XLTQ dùng FT bị thay đổi nhiều khi có sai số, khi dùng FrFT ảnh hưởng nhỏ hơn.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã đề xuất biện pháp đồng bộ thời gian và độ dịch tần Doppler của bản sao tín hiệu phát dùng FT và FrFT khi XLTQ tín hiệu để khắc phục vấn đề không biết thời gian giữ chậm và lượng dịch tần Doppler của tín hiệu thu. Khi dùng FT bắt buộc phải đồng bộ thời gian và dịch tần Doppler của bản sao tín hiệu phát theo tín hiệu thu. Khi dùng FrFT phải đồng bộ thời gian của bản sao tín hiệu phát theo tín hiệu thu, nhưng không cần đồng bộ lượng dịch tần Doppler theo tín hiệu thu. Tín hiệu ra XLTQ khi dùng FrFT luôn tốt hơn khi dùng FT.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Bassem R. Mahafza, *"Analysis and design using Matlab"*, 2000, 2004, 2013, CRC Press.

[2]. Ervin Sejdic´a, Igor Djurovic´b, LJubiˇsa Stankovic´b, *"Fractional Fourier transform as a signal processing tool: An overviewof recent developments"*. Signal Processing 91 (2011) 1351–1369

[3]. Roshen Jacob, Tessamma and Unnikrishnan. *"Applications of fractional Fourier transform in Sonar signal processing"*, IETE journal of reach, vol 55, ISSUE 1, Jan-Feb 2009.

[4]. A. K. Singh, R. Saxena. *"Correlation Theorem for Fractional Fourier Transform"*, International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition, Vol. 4, No. 2, June, 2011.

[5]. Ahmed L Zayed. *"On the Relationship between the Fourier and Fractional Fourier Transforms"*, IEEE Signal Processing Letters, Vol. 3, No. 12, December 1996.

[6]. R Ajiv S Axena and K Ulbir S Ingh. *"Fractional Fourier transform: A novel tool for signal processing"*, J. Indian Inst. Sci, Jan.–Feb. 2005, 85, 11–26.

ABSTRACT

CORRELATION PROCESSING BASED ON FT AND FRFT RECEIVED SIGNALS WITHOUT KNOWING DELAY TIME AND DOPPLER FREQUENCY SHIFT

Fourier Transform (FT) is a special case of Fractional Fourier Transform (FrFT). FT and FrFT have high efficiency in signal processing. In this paper, a solution based on FT and FrFT to solve the correlation processing of received signals problem without knowing delay time and Doppler frequency shift was proposed. Simulated results using Matlab shows that, compare to FrFT and FT, the efficiency of linear frequency modulated signal correlation processing.

Keywords: Correlation Processor; Fractional Fourier transform; Fourier transforms; LFM.

Nhận bài ngày 30 tháng 6 năm 2021
Hoàn thiện ngày 30 tháng 7 năm 2021
Chấp nhận đăng ngày 02 tháng 8 năm 2021

Địa chỉ: [1]Lớp Cao học Kỹ thuật Ra đa – dẫn đường 532A, Học viện Kỹ thuật quân sự;
[2]Học viện Kỹ thuật quân sự.
*Email: nguyencaohuuktqs@gmail.com.