

Xây dựng thuật toán xử lý tín hiệu băng tần cơ sở ứng dụng cho ra đa phát hiện thiết bị bay không người lái

Vũ Hồng Phúc^{1*}, Nguyễn Đức Nghĩa¹, Trần Văn Ánh¹, Bùi Chí Thanh², Vũ Chí Thanh¹

¹Viện Ra đa, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự;

²Học viện PKKQ.

*Email: vuphuc283@gmail.com

Nhận bài: 05/12/2022; Hoàn thiện: 06/01/2023; Chấp nhận đăng: 02/02/2023; Xuất bản: 28/02/2023.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.85.2023.18-25>

TÓM TẮT

Bài báo trình bày việc xây dựng thuật toán xử lý tín hiệu băng tần cơ sở ứng dụng cho ra đa phát hiện thiết bị bay không người lái (UAV) bằng việc sử dụng tín hiệu điều tần tuyến tính liên tục (FMCW). Trên cơ sở thuật toán đã xây dựng, bài báo trình bày các nội dung nghiên cứu mô phỏng trong môi trường Matlab, đồng thời tiến hành nghiên cứu thực nghiệm bằng việc thiết kế, triển khai bộ xử lý tín hiệu trên nền tảng công nghệ FPGA. Kết quả của nghiên cứu cho thấy có thể sử dụng ra đa FMCW để phân biệt mục tiêu UAV với mục tiêu thường bằng dấu hiệu micro Doppler. Bộ xử lý tín hiệu là cơ sở để xây dựng ra đa phát hiện UAV hoàn chỉnh trong tương lai.

Từ khóa: Ra đa phát hiện UAV; Tín hiệu điều tần tuyến tính liên tục (FMCW); Bộ xử lý tín hiệu băng tần cơ sở; Micro Doppler; FPGA; ZynQ Z-7045.

1. MỞ ĐẦU

Trong chiến tranh hiện đại, các UAV ngày càng được sử dụng nhiều hơn trên chiến trường. Các UAV có thể thực hiện các chức năng trinh sát, giám sát, phát hiện mục tiêu, chỉ huy, kiểm soát, thu thập thông tin tình báo, tác chiến điện tử, tấn công và phát hiện các thiết bị nổ, thậm chí đánh giá thiệt hại trong một trận chiến. UAV là phương tiện hỗ trợ cho hầu như tất cả các lĩnh vực trong chiến đấu. Bài toán phát hiện UAV từ xa là việc làm hết sức cấp thiết. UAV có thể được phát hiện bằng các phương pháp âm học, video, nhiệt, ra đa,... [1].

Phương pháp âm học sử dụng các cảm biến âm thanh để thu các dữ liệu âm thanh từ môi trường xung quanh, UAV thường tạo ra tiếng rít với tần số khoảng 40 kHz từ các rotor quay cánh quạt [2]. Phương pháp âm thanh chỉ có thể hoạt động tốt trong môi trường yên tĩnh, không đạt hiệu quả trong môi trường nhiều tiếng ồn.

Phương pháp video sử dụng các cảm biến camera để nhận dạng các vật thể chuyển động trên nền trời [3]. Tuy có thể phát hiện được UAV song điểm hạn chế là khó phân biệt UAV với chim chóc hoặc một số vật thể bay khác.

Phương pháp sử dụng ra đa có thể giải quyết được các hạn chế trên. Bằng phương pháp ra đa, các nhà nghiên cứu đã đề ra một số giải pháp: phân tích, so sánh diện tích phản xạ hiệu dụng [4-8]; trích xuất tần số Doppler [9]; xử lý tín hiệu vô tuyến phát ra từ UAV [10]; sử dụng ra đa thụ động với mô phỏng Monte Carlo [11]; phân tích tín hiệu sử dụng chuỗi nhị phân giả ngẫu nhiên (PRBS) để xác minh khả năng phát hiện [12]. Việc khai thác đặc tính về diện tích phản xạ hiệu dụng cũng như một số ý tưởng mà các nghiên cứu trên đã đề cập gặp nhiều thách thức trong thực tế do diện tích phản xạ hiệu dụng của UAV khá nhỏ dẫn đến biên độ tín hiệu phản xạ yếu. Hơn nữa, đặc điểm của UAV là chúng có kích thước nhỏ, thực hiện các chuyến bay tầm thấp, ở cự ly gần, khả năng cơ động cao trong các dạng địa hình; Trong khi đó, các ra đa xung không hoạt động tốt ở các thang cự ly gần, không xử lý tốt các ô phân giải cỡ nhỏ.

Ra đa điều tần tuyến tính liên tục (FMCW) có các ưu điểm như: phát và thu tín hiệu liên tục, đảm bảo độ phủ đầy đủ mà không có điểm mù; việc xử lý tín hiệu FMCW dựa trên độ lệch tần số giữa tín hiệu phát và tín hiệu thu, do đó, sự suy giảm biên độ tín hiệu phản xạ so với biên độ tín hiệu phát không gây thách thức cho quá trình xử lý tín hiệu, tín hiệu thu ở tần số vô tuyến được

xử lý sau khi được trộn về dải tần số thấp, điều này làm đơn giản hoá hệ thống xử lý nhưng vẫn đảm bảo đủ thông tin cho phép giải mã các thông tin của mục tiêu [13].

Trong bài báo này, chúng tôi trình bày việc xây dựng thuật toán phát hiện mục tiêu UAV sử dụng tín hiệu FMCW. Trên cơ sở thuật toán đã xác định, tiến hành mô phỏng trong môi trường Matlab, đồng thời xây dựng bộ xử lý tín hiệu bằng tần cơ sở trên nền tảng FPGA, ứng dụng cho ra đa phát hiện UAV.

2. XÂY DỰNG THUẬT TOÁN XỬ LÝ TÍN HIỆU BĂNG TẦN CƠ SỞ PHÁT HIỆN UAV

Nguyên lý hoạt động cơ bản của ra đa điều tần liên tục (FMCW) dựa trên việc lấy ra độ lệch tần số giữa tín hiệu phát và tín hiệu thu, từ đó trích xuất các thông tin về mục tiêu [13]. Để lấy ra độ lệch tần số giữa tín hiệu phát và tín hiệu thu, cần phải xây dựng bộ trộn tần số cho hai tín hiệu này. Tín hiệu sau bộ trộn được cho qua bộ lọc để loại bỏ thành phần tần số cao, sau đó được số hoá để đưa vào xử lý số; sau khi xử lý số, thông tin trích xuất được thể hiện trên màn hình hiển thị. Như vậy, một ra đa điều tần liên tục điển hình được cấu thành từ các bộ phận cơ bản: bộ phát, bộ thu, bộ trộn tín hiệu, bộ chuyển đổi tương tự-số, bộ xử lý số tín hiệu.

Với mục tiêu bị phát hiện là một UAV, tín hiệu phát FMCW sau khi gặp UAV sẽ bị điều chế bởi các tần số: tần số beat (độ lệch tần số giữa tín hiệu phát và tín hiệu thu) mang thông tin về cự ly của mục tiêu, tần số Dopp-le chính mang thông tin về vận tốc của mục tiêu, tần số micro Dopp-le mang thông tin về cánh quạt của UAV.

Sử dụng ra đa FMCW, giả sử tại một vị trí phương vị phát M xung điều tần tuyến tính dạng răng cưa, mỗi xung điều tần tuyến tính dạng răng cưa, sau đó, cho tín hiệu phản xạ về, trộn xuống trung tần được số hoá thành N mẫu. Ta có ma trận xử lý $M \times N$ điểm.

Theo lý thuyết ra đa điều tần tuyến tính tín hiệu dạng răng cưa [14], cự ly mục tiêu là một hàm phụ thuộc theo tần số beat:

$$R(f_b) = \frac{c \cdot T}{2} \cdot \frac{f_b}{B} \quad (1)$$

Trong đó, R : Cự ly mục tiêu (m); c : Hằng số tốc độ ánh sáng (m/s); T : Độ rộng xung tín hiệu điều tần dạng răng cưa (s); B : Độ di tần (Hz); f_b : Tần số beat (độ lệch tần số giữa tín hiệu phát và tín hiệu thu).

Như vậy, với chu kỳ lặp T , độ di tần B là các thông số của tín hiệu phát; sau khi thực hiện “biến đổi Fourier nhanh” (FFT) đối với tín hiệu tại đầu ra của bộ lọc thông thấp sau khi trộn tần tín hiệu phát và tín hiệu thu (tín hiệu trung tần IF), thu được trên phổ tín hiệu IF tần số f_b , sẽ tính được cự ly của mục tiêu theo (1).

Tại ô cự ly xuất hiện f_b , tín hiệu phản hồi có độ dịch pha $f_D \cdot mT$ phụ thuộc tuyến tính vào số xung điều tần đã được phát, m . Dãy giá trị tín hiệu phản xạ tại ô cự ly f_b tương ứng với xung điều tần thứ m được phát [14]:

$$S'_{IF}(m) = A'_{IF} \cdot \exp(i \cdot 2\pi \cdot f_D \cdot mT) \quad (2)$$

Trong đó, f_D : Tần số Dopp-le của mục tiêu; M : Số xung điều tần tuyến tính trong một gói tín hiệu phát, $1 \leq m \leq M$.

Về bản chất, $S'_{IF}(m)$ là $S'_{IF}(t) = \frac{A_{IF}}{2} \cdot \exp(i2\pi f_D \cdot t)$ được lấy mẫu theo chu kỳ T .

Phổ của $S'_{IF}(t)$ là thành phần tần số f_D . Để xác định f_D thực hiện biến đổi Fourier cho dãy giá trị tín hiệu này.

$$FFT[S'_{IF}(t)](f) = \frac{A_{IF}}{2} \cdot \delta(f - f_D) \quad (3)$$

f_D liên hệ với vận tốc hướng tâm của mục tiêu theo biểu thức:

$$v(f_D) = c \cdot \frac{f_D}{2f_c} \quad (4)$$

Sau hai lần thực hiện FFT, thu được bản đồ 2D các điểm cự ly-tần số, với các giá trị biên độ cao hơn tương ứng với giả định mục tiêu.

Theo [15] tín hiệu ra đa phản xạ từ cánh quạt rotor với chiều dài L , tần số quay Ω :

$$S_L(t) = L \cdot \text{sinc}\left(\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{L}{2} \cdot \cos\beta \cdot \sin(\Omega t + \theta_0)\right) \cdot \exp\left(i \cdot \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{L}{2} \cdot \cos\beta \cdot \sin(\Omega t + \theta_0)\right) \quad (5)$$

Với β là góc tà giữa ra đa và mục tiêu; θ_0 là góc ban đầu của cánh quạt. Đạo hàm theo thời gian hàm pha được hàm phụ thuộc tần số micro Dop-ler theo thời gian:

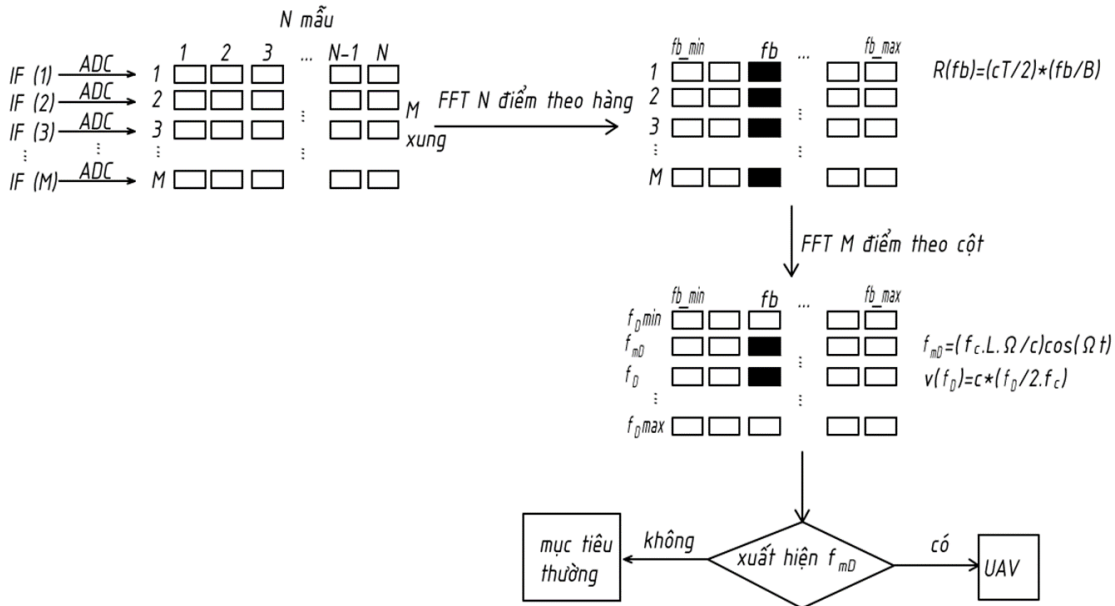
$$f_{mD}(t) = f_c \cdot \frac{L \cdot \Omega \cdot \cos\beta \cdot (-\sin\theta_0 \sin\Omega t + \cos\theta_0 \cos\Omega t)}{c} \quad (6)$$

Khi $\theta_0 = 0$; $\beta = 0$:

$$f_{mD}(t) = f_c \cdot \frac{L \cdot \Omega}{c} \cdot \cos(\Omega t) \quad (7)$$

Như vậy, tồn tại thành phần tần số micro Dop-ler trong tín hiệu phản xạ về từ mục tiêu UAV.

Với mục tiêu là UAV, trên bản đồ cự ly-tần số, tại ô cự ly xuất hiện mục tiêu, ngoài vạch phổ tần số Dop-ler chính sẽ có thêm vạch phổ tần số micro Dop-ler; với mục tiêu thường chỉ xuất hiện vạch phổ tần số Dop-ler chính. Thuật toán phát hiện UAV bằng ra đa FMCW được thể hiện trên hình 1.



Hình 1. Thuật toán phát hiện mục tiêu UAV bằng ra đa FMCW.

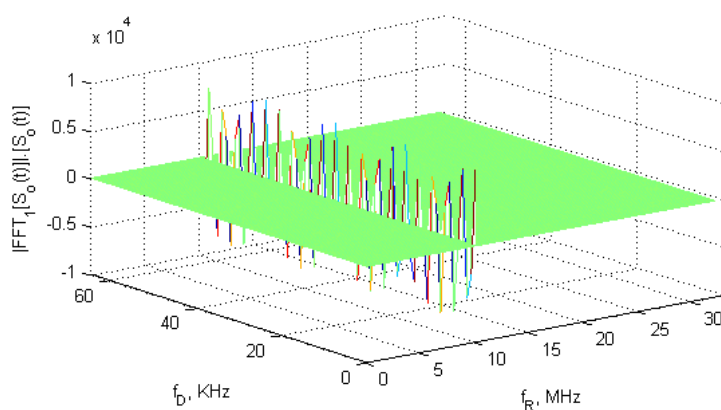
KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THỰC NGHIỆM

3.1. Nghiên cứu mô phỏng

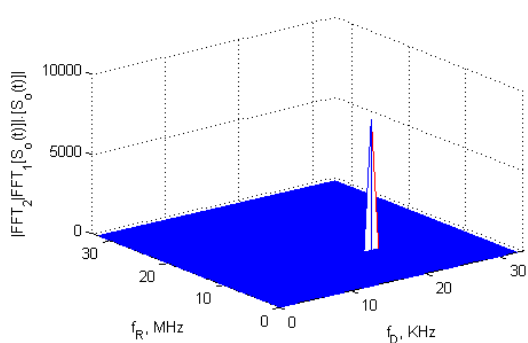
Trên cơ sở thuật toán đã xây dựng phần hai, tiến hành nghiên cứu mô phỏng trong môi trường Matlab. Hai gói dữ liệu đặc trưng cho mục tiêu thường và UAV được xây dựng. Các thông số của hai gói dữ liệu được trình bày trong bảng 1. Hai gói dữ liệu này lần lượt được xử lý theo thuật toán trên hình 1. Các kết quả xử lý được thể hiện trên các hình 2, hình 3.

Bảng 1. Bảng tham số khảo sát.

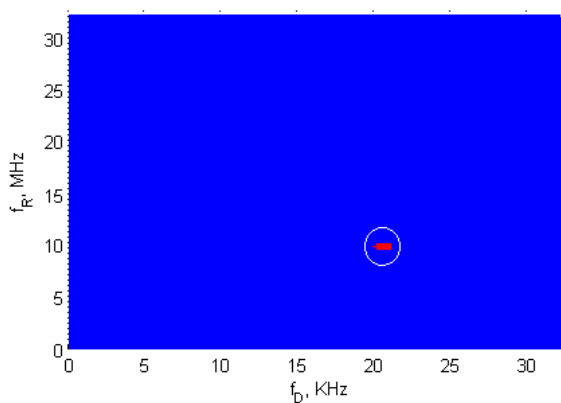
TT	Mục tiêu quan sát của radar	Tham số khảo sát					Kết quả khảo sát
		Tần số lấy mẫu f_{AD} , MHz	Tần số Đốp-le, f_D , KHz	Tần số micrô Đốp-le f_{mD} , KHz	Độ lệch tần số phát-thu $f_{mt}(f_b)$, MHz	Số chu kỳ phát xung M	
1	Mục tiêu thường	64	20	0	10	64	Hình 2
2	UAV	64	20	5	10	64	Hình 3



(a)



(b)



(c)

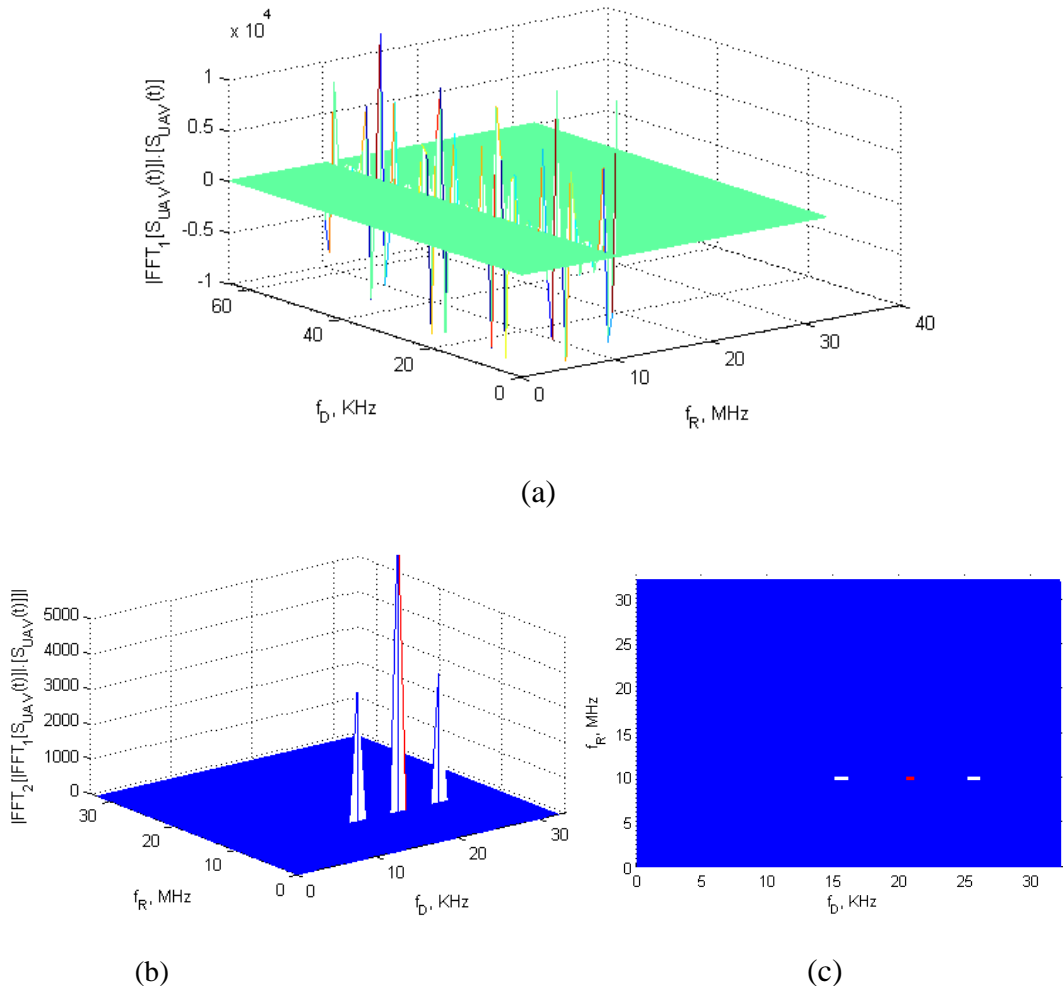
Hình 2. Kết quả khảo sát với mục tiêu thường, a-Gói dữ liệu sau FFT N điểm theo hàng;

b-Gói dữ liệu sau FFT M điểm theo cột;

c-Bản đồ cự ly – tần số sau xử lý tín hiệu phản xạ từ mục tiêu thường.

Trên hình 2, tín hiệu phản xạ từ mục tiêu thường sau xử lý cho kết quả hiển thị trên bản đồ cự ly – vận tốc với một điểm dấu tương ứng với một cặp thông số về cự ly và vận tốc duy nhất. Trên hình 3, tín hiệu phản xạ từ mục tiêu UAV sau xử lý cho kết quả hiển thị trên bản đồ cự ly – vận tốc với hai điểm dấu vận tốc nằm trên cùng một ô cự ly, điểm dấu đỏ với giá trị tần số Đốp-le

tương ứng thể hiện tốc độ chuyển động của UAV, điểm dấu xanh với giá trị tần số micro Đốp-le tương ứng thể hiện tốc độ quay của cánh quạt trên UAV. Kết quả mô phỏng trong môi trường Matlab phù hợp với mô hình lý thuyết đã xây dựng tại mục 2. Như vậy, bằng phương pháp xử lý tín hiệu trên miền tần số, thông qua việc phân tích phổ tín hiệu thu từ ra đa FMCW có thể phân biệt được mục tiêu thường và mục tiêu UAV.

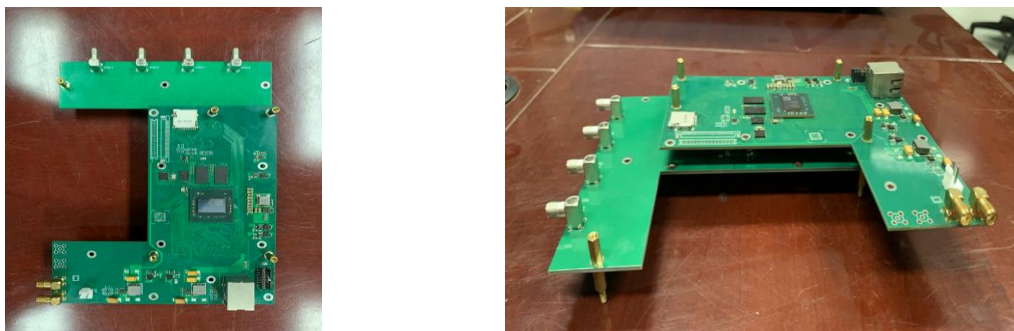


Hình 3. Kết quả khảo sát với mục tiêu UAV, a-Gói dữ liệu sau FFT N điểm theo hàng;
 b-Gói dữ liệu sau FFT M điểm theo cột;
 c-Bản đồ cự ly – tần số sau xử lý tín hiệu phản xạ từ mục tiêu UAV.

3.2. Nghiên cứu thực nghiệm

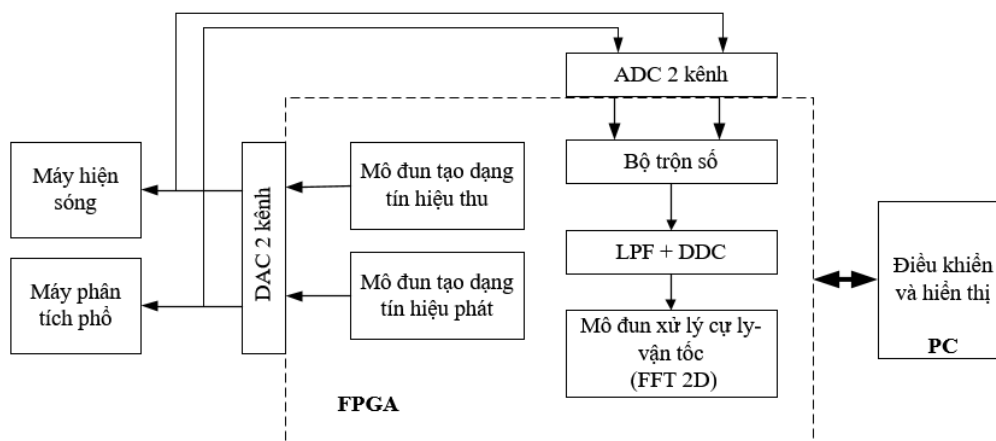
Để kiểm tra tính khả thi của thuật toán phát hiện UAV trong thực tiễn, nhóm nghiên cứu tiến hành xây dựng Bộ xử lý tín hiệu băng tần cơ sở phát hiện UAV, gồm 3 bộ phận chính: mô đun tạo dạng tín hiệu phát băng tần cơ sở; mô đun tạo dạng tín hiệu thu băng tần cơ sở; mô đun xử lý tín hiệu.

Bộ xử lý tín hiệu được xây dựng trên nền tảng bo mạch chip FPGA XC7Z045 tích hợp card AD/DA. Bo mạch FPGA XC7Z045 tích hợp card AD/DA có cấu tạo cơ bản : ADC 250MSPS 14 bit, 2 kênh; DAC 400MSPS, 14 bit, 2 kênh, chip FPGA Zynq XC7Z045, RAM 1 Gb DDR3, giao tiếp truyền dữ liệu Giga Ethernet, chân nạp chương trình JTAG,...

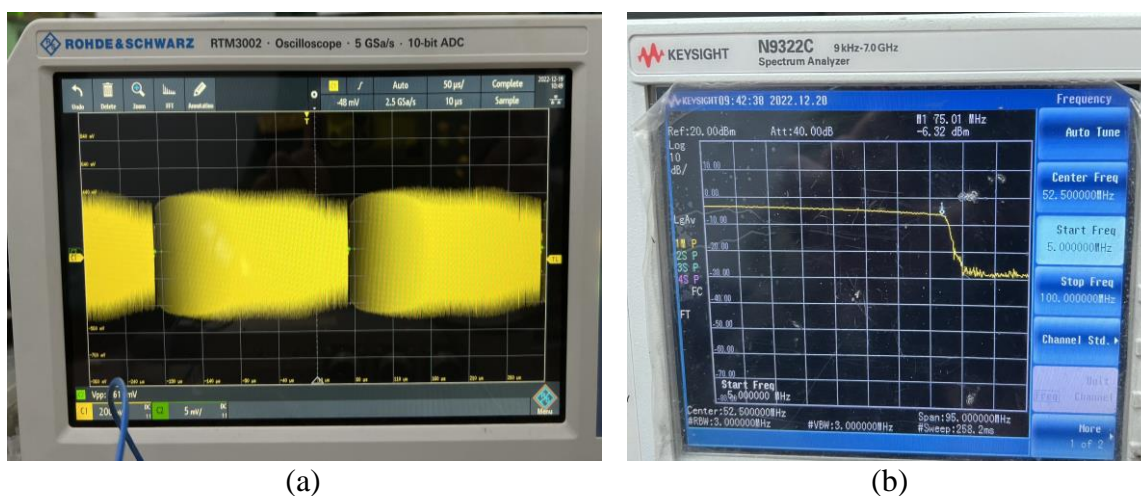


Hình 4. Bo mạch FPGA chip XC7Z045 tích hợp card AD/DA.

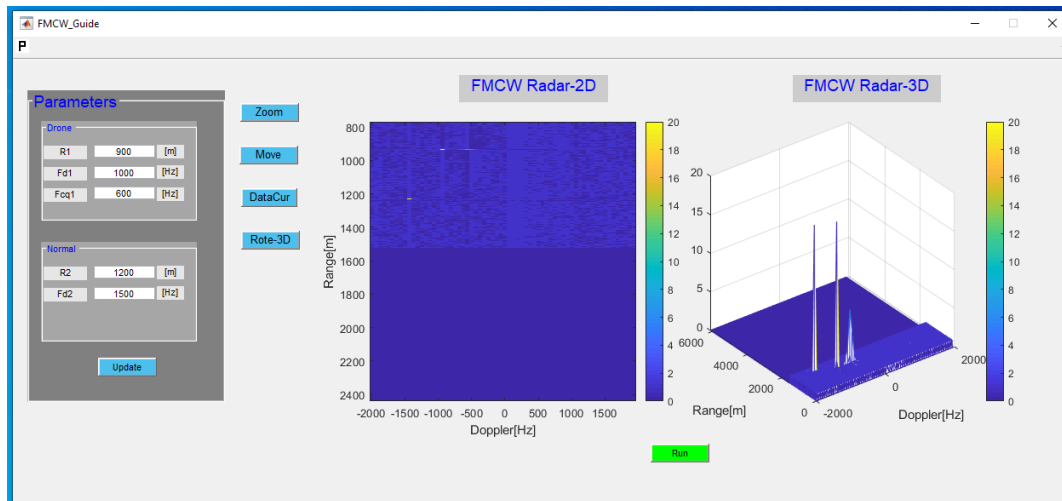
Việc cấu hình chip FPGA XC7Z045, bộ AD/DA tốc độ cao được thực hiện trong môi trường Vivado bằng ngôn ngữ mô tả phần cứng VHDL/Verilog HDL, IP Core, C/C++ Embedded FPGA. Sau khi chip FPGA XC7Z045 được cấu hình xong, các mô đun tạo dạng tín hiệu thu, tạo dạng tín hiệu phát, xử lý tín hiệu được khởi chạy. Dữ liệu sau xử lý được truyền đến máy tính theo chuẩn ethernet và được hiển thị bằng công cụ Matlab.



Hình 5. Sơ đồ kiểm tra tạo dạng và xử lý tín hiệu.



Hình 6. Kiểm tra khả năng tạo dạng tín hiệu FMCW; a-Tín hiệu được tạo dạng trên miền thời gian; b-Tín hiệu được tạo dạng trên miền tần số.



Hình 7. Hiển thị kết quả xử lý bằng Matlab.

Kết quả xử lý tín hiệu trên phần cứng được thể hiện trên hình 7. Kết quả cho thấy, với đầu vào là tín hiệu thu từ mục tiêu thường, sau xử lý chỉ xuất hiện một vạch phổ trên màn hình hiển thị; với đầu vào là tín hiệu thu từ mục tiêu UAV, sau xử lý sẽ xuất hiện hai vạch phổ trên màn hình hiển thị. Xử lý thực nghiệm trên bo mạch FPGA cho kết quả phù hợp với mô hình lý thuyết và mô phỏng trong môi trường Matlab. Việc triển khai thuật toán đã được xây dựng ở mục 2 bằng công nghệ FPGA là hoàn toàn khả thi.

4. KẾT LUẬN

Như vậy, bằng việc sử dụng tín hiệu phát điều tần tuyến tính liên tục dạng răng cưa và phương pháp FFT 2D tín hiệu trung tần IF để lập bản đồ cự ly-tần số, có thể phân biệt được mục tiêu thường vận động và mục tiêu UAV vận động. Trên cơ sở thuật toán phát hiện UAV bằng radar FMCW được xây dựng, nhóm nghiên cứu đã tiến hành mô phỏng thuật toán bằng phần mềm Matlab và triển khai thành công thuật toán trên bo mạch tích hợp FPGA. Trong tương lai, nhóm nghiên cứu sẽ tiếp tục cải tiến, nâng cấp bộ xử lý tín hiệu để thích ứng với điều kiện thực tiễn và radar phát hiện UAV hoàn chỉnh trong tương lai.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Florin-Lucian Chiper, Alexandru Martian, “Drone Detection and Defense Systems: Survey and a Software-Defined Radio-Based Solution”, Sensors (2022).
- [2]. M. Nijim and N. Mantrawadi, “Drone Classification and Identification System by Phenome Analysis Using Data Mining Techniques,” 2016 IEEE Symp. Technologies for Homeland Security, pp. 1–5, (2016).
- [3]. M. A. Ma’sum et al., “Simulation of Intelligent Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Military Surveillance” 2013 Int’l. Conf. Advanced Computer Science and Inf. Systems, pp. 161–66, (2013).
- [4]. Blyakhman A.B., Burov V.N., Myakinkov A.V. & Ryndyk A.G. “Detection of unmanned aerial vehicles via multistatic forward scattering radar with airborne transmit positions”. Int. Radar Conf, (2014).
- [5]. Krátký, M. & Fuxa, L. (2015). “Mini UAVs Detection by Radar”. IEEE Conf. Pub., pp. 1–5, (2014).
- [6]. Ochodnický, J., Matousek, Z., Babjak, M., & Kurty, J. “Drone detection by Ku-band battlefield radar”. Int. Conf. Military Tech. (ICMT), pp. 613–616, (2017).
- [7]. Rzewuski, S., Kulpa, K., Member, S., Salski, B., Kopyt, P., Borowiec, K. & Member, S. (2018). “Drone RCS estimation using simple experimental measurement in the WIFI band”. 22nd Int. Microwave Radar Conf. (MIKON). pp. 695–698, (2018).
- [8]. Nuss, B., Sit, L., Fennel, M., Mayer, J., Mahler, T. & Zwick, T. “MIMO OFDM radar system for drone detection.” 18th Int. Radar Symp. IEEE Conf. Pub., pp. 1–9, (2017).

- [9]. Jian, M., Lu, Z. & Chen, V. C. (2018). “Drone detection and tracking based on phase-interferometric Doppler radar”. 2018 IEEE Radar Conf., pp. 1146–1149, 2018.
- [10]. Yang, X., Huo, K., Jiang, W., Zhao, J. & Qiu, Z. “A passive radar system for detecting UAV based on the OFDM communication signal”. Prog. Electromag. Research Sympo., (PIERS) Proc. 2016. pp. 2757–2762, (2016).
- [11]. Gaigals, G., Vavilina, E. & Carlo, M. “Simulation of compressed sensing based passive radar for drone detection”. 5th IEEE Workshop Adv. Infor. Elect. Elect. Engr. (AIEEEE), 2017. pp. 1–5, (2017).
- [12]. Sung, J. L., Jae, H. J. & Bonghyuk, P. “Possibility verification of drone detection radar based on pseudo random binary sequence”. IEEE Conf. Pub., pp. 291–292, (2016).
- [13]. M.Jankiraman, “FMCW radar design”, Artech House (2018).
- [14]. Pasi Koivumäki, Aalto university, “Triangular and Ramp Waveforms in Target Detection with a Frequency Modulated Continuous Wave Radar”, (2017).
- [15]. Victor C.Chen, Hao Ling, “Time-Frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis” Artech House (2002).

ABSTRACT

Building a baseband signal processing algorithm for unmanned aerial vehicle detection radar

In this paper, the construction of a baseband signal processing algorithm for unmanned aerial vehicle (UAV) detection radar by using continuous linear frequency modulation (FMCW) signal is presented. On the basis of the built algorithm, the article presents the contents of simulation research in Matlab environment, and conducts experimental research by designing and deploying signal processors on the technology platform FPGA. The results of the study show that FMCW radar can be used to distinguish UAV targets from normal targets by the micro Dopple signature. The signal processor is the basis for building a complete UAV detection radar in the future.

Keywords: UAV detection radar; Continuous linear frequency modulation (FMCW); Baseband signal processor; Micro Doppler signature; FPGA; ZynQ Z-7045.