ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ

TRẦN VŨ HỢP

NÂNG CAO KHẢ NĂNG LỌC NHIỄU, CẢI THIỆN CHẤT LƯỢNG ĐÀI RA-ĐA PHÂN GIẢI CAO

Ngành đào tạo: Kỹ thuật Viễn thông
Mã số: 9520208

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT VIỄN THÔNG

TP. HÀ NỘI - NĂM 2026

Công trình được hoàn thành tại **Trường Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội**

Người hướng dẫn khoa học: 1. PGS.TSKH. Nguyễn Văn Lợi
2. TS. Trần Cao Quyền

Phản biện 1: .....
Phản biện 2: .....
Phản biện 3: .....

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng cấp Đại học Quốc gia chấm luận án tiến sĩ họp tại Trường Đại học Công nghệ - Đại học Quốc gia Hà Nội.
Vào hồi ..... giờ ..... ngày ..... tháng ..... năm 2026

Có thể tìm hiểu luận án tại:
- Thư viện Quốc gia Việt Nam
- Trung tâm Thông tin - Thư viện, Đại học Quốc gia Hà Nội

PHẦN MỞ ĐẦU

Tính cấp thiết của đề tài

Trong bối cảnh cuộc Cách mạng công nghiệp lần thứ tư và sự chuyển dịch của hình thái chiến tranh hiện đại sang tác chiến phi đối xứng, sử dụng UAV cảm tử, đạn lượn thông minh và các phương tiện gây nhiễu điện tử, các hệ thống ra-đa truyền thống bộc lộ nhiều hạn chế khi phải phát hiện mục tiêu nhỏ, cơ động, có tiết diện phản xạ thấp trong môi trường nhiễu phức tạp. Ra-đa phân giải cao (HRR) ra đời để đáp ứng các yêu cầu đó, tuy nhiên chính các đặc tính công nghệ mang lại ưu thế phân giải, băng thông rộng, ăng-ten mảng pha, xử lý đa kênh, đồng thời làm gia tăng độ nhạy cảm với nhiễu, khiến bài toán xử lý nhiễu trở thành yếu tố quyết định độ chính xác và độ ổn định của toàn bộ chuỗi xử lý tín hiệu.

Luận án tập trung vào hai nhóm nhiệm vụ trọng yếu: giám sát tầm thấp (phát hiện UAV cỡ nhỏ với nhiễu pha do tín hiệu rò trong ra-đa FMCW và nhiễu rời rạc từ chim, phương tiện mặt đất) và cảnh giới tầm xa (xử lý nền nhiễu hỗn hợp phi Gaussian, không đồng nhất gồm nhiễu địa vật, nhiễu biển, nhiễu khí tượng).

Mục tiêu nghiên cứu

(1) Đề xuất giải pháp giảm nhiễu pha trong ra-đa FMCW thông qua tối ưu hóa thiết kế phần cứng ăng-ten có hệ số cách ly cao;

(2) Xây dựng phương pháp giảm nhiễu rời rạc và phân loại UAV dựa trên đặc trưng vi đốp-le và mô hình học máy;

(3) Phát triển phương pháp xử lý đa búp sóng kết hợp phát hiện thích nghi CFAR hai giai đoạn cho ra-đa xung;

(4) Kiểm chứng các giải pháp đề xuất trên hệ thống ra-đa thực.

Đối tượng, phạm vi và phương pháp nghiên cứu

Đối tượng là các hệ thống HRR thuộc hai nhóm: ra-đa FMCW và

ra-đa xung.

Phạm vi xét ba dạng nhiễu: nhiễu pha nội tại, nhiễu rời rạc và nhiễu hỗn hợp phi Gaussian.

Phương pháp nghiên cứu: luận án tích hợp bốn nhóm phương pháp: phân tích lý thuyết và mô phỏng (kiểm chứng bằng mô phỏng điện từ trước khi chế tạo); thiết kế, chế tạo và tích hợp các cấu trúc cao tần mới vào hệ thống ra-đa thực; xử lý tín hiệu thích nghi kết hợp học máy (đặc trưng vi đốp-le, phân cụm HDBSCAN, xấp xỉ Bernstein, Random Forest); thực nghiệm trên các đài ra-đa đang vận hành.

Đóng góp mới của luận án

(1) Cấu trúc ăng-ten khe ống dẫn sóng định hướng cao tích hợp lưới lọc phân cực, đạt hệ số cách ly phát-thu 85 dB, làm giảm nhiễu pha trong ra-đa FMCW.

(2) Chuỗi xử lý DDDCR khai thác đặc trưng vi đốp-le kết hợp bản đồ giao thông và mô hình học máy để lọc nhiễu rời rạc và phân loại UAV.

(3) Thuật toán đa búp sóng kết hợp CFAR hai giai đoạn, sử dụng phân cụm HDBSCAN và xấp xỉ PDF phi Gaussian bằng đa thức Bernstein.

Kiểm chứng thực nghiệm

Trên ra-đa FMCW phát hiện DJI Phantom 4 ở 3,5 km với $P_D = 0{,}7$ và $P_{fa} \leq 10^{-4}$, loại bỏ 97% nhiễu rời rạc, phân loại đúng 100% drone; trên ra-đa xung 3D tầm 360 km, SNR tăng khoảng 8 dB (tại cự ly 70 km) và báo động lầm giảm > 90% so với CA-CFAR.

Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

Thứ nhất, đối với ra-đa FMCW tầm thấp, luận án đề xuất và kiểm chứng phương pháp giảm nhiễu pha từ hướng tiếp cận thiết kế phần cứng ăng-ten, khắc phục khoảng trống của các nghiên cứu trước đây vốn chủ yếu tập trung vào xử lý ở khối phát hoặc hậu xử lý tín hiệu;

đồng thời phát triển chuỗi xử lý tích hợp đặc trưng vi đốp-le kết hợp học máy để phân loại UAV. Nguyên mẫu ra-đa FMCW tích hợp ăng-ten đề xuất đạt hệ số cách ly 85 dB, phát hiện ổn định mục tiêu DJI Phantom 4 ở cự ly 3,5 km với xác suất phát hiện $P_D = 0{,}7$ và $P_{fa} \leq 10^{-4}$. Phương pháp phân loại UAV loại bỏ 97% nhiễu rời rạc và phân loại chính xác 100% drone; đạt tầm phân loại 3,5 km (cắt ngang) và 1,8 km (bay dọc), cải thiện gấp 1,6÷3,2 lần tùy kịch bản bay so với ra-đa thương mại tham chiếu Elvira.

Thứ hai, đối với ra-đa xung cảnh giới tầm xa, luận án xây dựng mô hình phát hiện thích nghi dựa trên phân cụm HDBSCAN và xấp xỉ phân bố xác suất bằng đa thức Bernstein, cho phép thích ứng với môi trường nhiễu phi Gaussian mà không phụ thuộc giả thiết phân bố cho trước. Kết hợp đa búp sóng cải thiện SNR khoảng 8 dB (tại cự ly 70 km), phương pháp CFAR hai giai đoạn giảm hơn 90% số báo động lầm so với CA-CFAR truyền thống và đáp ứng yêu cầu thời gian thực trên ra-đa cảnh giới 3D tầm 360 km.

Thứ ba, các kết quả nghiên cứu đã được công bố trên 02 tạp chí và 04 hội nghị khoa học uy tín quốc tế, đồng thời được đăng ký 01 sáng chế trong nước. Các giải pháp đã được triển khai trên các hệ thống ra-đa đang vận hành, góp phần tự chủ công nghệ quốc phòng.

Chương 1
TỔNG QUAN VỀ LỌC NHIỄU RA-ĐA PHÂN GIẢI CAO VÀ XÁC ĐỊNH NỘI DUNG KHOA HỌC CẦN GIẢI QUYẾT TRONG LUẬN ÁN

1.1 Phân loại nhiễu trong ra-đa phân giải cao

1.1.1 Nguyên lý đạt độ phân giải cao và tính nhạy cảm với nhiễu

Ra-đa phân giải cao (HRR) đạt được độ phân giải cao theo cả chiều cự ly, góc và vận tốc thông qua ba yếu tố công nghệ: *(1)* tín hiệu băng thông rộng với kỹ thuật nén xung LFM hoặc mã pha đối với ra-đa xung, hoặc tín hiệu FMCW kết hợp phân tích tần số phách đối với ra-đa điều tần liên tục; *(2)* cấu trúc ăng-ten mảng pha chủ động (AESA) cho phép điều khiển búp sóng linh hoạt và hình thành đồng thời nhiều búp sóng độc lập; *(3)* kỹ thuật xử lý tín hiệu hiện đại như xử lý không gian-thời gian, lọc thích nghi và phát hiện thích nghi. Tuy nhiên, chính các đặc điểm này lại làm gia tăng mức độ nhạy cảm với nhiễu: băng thông rộng tỉ lệ thuận với công suất nhiễu nhiệt, búp sóng hẹp tăng độ nhạy với sai lệch pha, cấu hình đa kênh đặt ra thách thức về nhiễu chéo và đồng bộ.

1.1.2 Phân loại nhiễu theo nguồn gốc

Theo nguồn gốc, nhiễu được chia thành:

Tạp nội bộ (nhiễu pha): phát sinh từ dao động ngẫu nhiên trong pha tín hiệu sóng mang do bất ổn của bộ tạo dao động nội (LO) và các tầng nhân tần, tạo thành phần phổ phụ xung quanh tần số trung tâm, nâng nền nhiễu và thu hẹp dải động. Trong ra-đa FMCW, nhiễu pha đặc biệt nghiêm trọng do tín hiệu thu trộn trực tiếp với tín hiệu phát: sự không tương quan pha do trễ truyền sóng tạo nhiễu dư trong phổ tín hiệu tần số phách.

Nhiễu tiêu cực (nhiễu môi trường): phát sinh khi tín hiệu phản xạ trên các vật thể không phải mục tiêu, bao gồm nhiễu bề mặt (địa hình, mặt

biển), nhiễu thể tích (khí tượng), và nhiễu rời rạc điểm (chim, côn trùng, công trình) rất dễ bị nhầm với mục tiêu thực ...

Nhiễu tích cực: tạo ra bằng các nguồn năng lượng điện từ bên ngoài (máy phát gây nhiễu, ra-đa lân cận).

Luận án xác định hai hướng nghiên cứu:

(1) Xử lý nhiễu pha và nhiễu rời rạc trong ra-đa FMCW, nơi tín hiệu rò gây nhiễu pha nội tại và drone ($RCS \approx 0{,}01m^2$) phải được tách khỏi nền nhiễu từ chim, ô tô, xe máy;

(2) Xử lý nhiễu hỗn hợp trong ra-đa xung cảnh giới, nơi nhiễu địa vật, biển, khí tượng chồng chất tạo nền phi Gaussian, không đồng nhất.

1.2 Tổng quan các công trình và xác định bài toán

1.2.1 Giảm nhiễu pha trong ra-đa FMCW

Các nghiên cứu tiếp cận theo nhiều hướng: triệt rò miền RF bằng IQ-Mixer (Chen, Niknejad, 2024), oversampling + NCO (Park, 2017), bộ tổng hợp ADPLL với TDC (Weyer, 2018), tối ưu PLL (Siddiq, 2019), giải bài toán ngược qua đường trễ (Rezaei, 2020), khai thác đối xứng phổ (Cooper, 2021), kiểm soát hài bậc cao (El-Awamry, 2025). Mặc dù đạt cải thiện 15÷20 dB, các giải pháp đều tăng đáng kể độ phức tạp phần cứng hoặc xử lý số.

Đáng chú ý, Chen và Niknejad (2024) triệt rò > 20 dB nhưng tăng diện tích chip 25-30%; Park (2017) cải thiện nền nhiễu 2,1÷7,0 dB nhưng cần tốc độ lấy mẫu gấp 4 lần Nyquist; Rezaei (2020) giảm sàn nhiễu 15÷20 dB nhưng đòi hỏi DSP/FPGA hiệu năng cao. Phần lớn các giải pháp này hoạt động ở khối phát hoặc hậu xử lý, trong khi hướng tiếp cận từ thiết kế ăng-ten để hạn chế trực tiếp tín hiệu rò chưa được khai thác đầy đủ.

Khoảng trống, bài toán thứ nhất: Hướng thiết kế ăng-ten thu-phát có hệ số cách ly cao chưa được khai thác hệ thống. Cần xây dựng cấu

trúc ăng-ten đáp ứng cách ly mà không gia tăng độ phức tạp. Nội dung trình bày trong *Chương 2, Mục 2.1*.

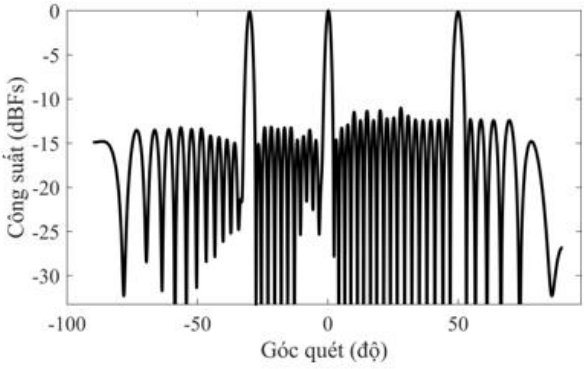
1.2.2 Xử lý nhiễu rời rạc trong ra-đa FMCW

Các phương pháp gồm phân biệt chim/côn trùng (Martin & Shapiro), SVM (Zaugg), K-SVD (Wei-Kun He), phân cực (Jatau), Naïve Bayes + LSTM, CNN (GoogLeNet), Random Forest (Jia Liu). Hầu hết yêu cầu chiếu xạ liên tục, ra-đa phân cực hoặc chi phí tính toán lớn, chưa xử lý đầy đủ nhiễu từ phương tiện mặt đất.

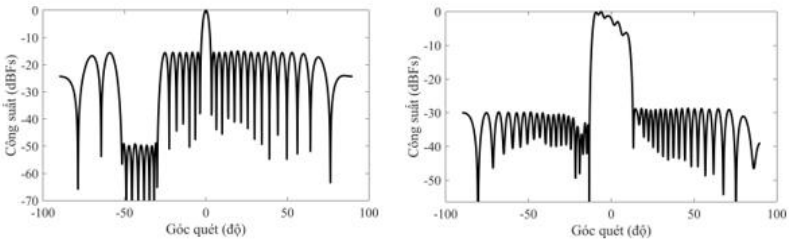
Khoảng trống, bài toán thứ hai: Cần phương pháp giảm nhiễu rời rạc dựa trên đặc trưng chuyển động và vi đốp-le, phân tách drone khỏi đối tượng gây nhiễu đa dạng, chi phí tính toán hợp lý. Nội dung trình bày trong *Chương 2, Mục 2.2*.

1.2.3 Xử lý nhiễu hỗn hợp trong ra-đa xung

Bốn nhóm phương pháp: MTI/MTD; các biến thể CFAR Gaussian (CA, OS, GO/SO, TM, GM); CFAR phi Gaussian (Weibull, K, Gamma, compound-Gaussian, FSNF, MLG, HCE); CFAR + học máy (SVM-CFAR, 3D-DCNN, CK-CFAR). Kỹ thuật đa búp sóng số (*Hình 1-4, Hình 1-5*) cho phép tạo null theo hướng nhiễu nhưng chưa kết hợp đầy đủ với phát hiện thích nghi.



Hình 1-4. Đa búp sóng áp dụng trên các đài ra-đa



Hình 1-5. Búp sóng nulling (trái) và búp sóng cô-séc (phải)

Khoảng trống, bài toán thứ ba: Cần phương pháp kết hợp đa búp sóng nâng cao SNR với CFAR hai giai đoạn dựa trên phân cụm HDBSCAN và xấp xỉ Bernstein. Nội dung trình bày trong *chương 3*.

Kết luận chương

Trên cơ sở phân tích và tổng hợp có hệ thống, *chương 1* đã chỉ ra ba bài toán nghiên cứu.

Về cơ sở khoa học, *chương 1* luận giải mối quan hệ biện chứng giữa đặc tính công nghệ và tính nhạy cảm với nhiễu của HRR.

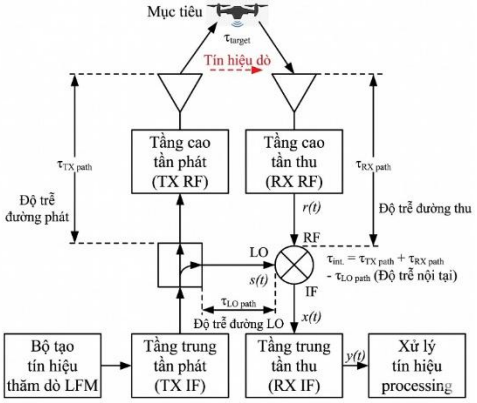
Về khoảng trống khoa học, kết quả khảo sát cho thấy: *(1)* giải pháp giảm nhiễu pha chủ yếu ở khối phát hoặc hậu xử lý, hướng thiết kế ăng-ten chưa được khai thác đầy đủ; *(2)* nghiên cứu nhiễu rời rạc chưa giải quyết bài toán phát hiện drone trong môi trường hỗn hợp với ràng buộc chiếu xạ ngắn; *(3)* phương pháp CFAR truyền thống phụ thuộc giả định phân bố, chưa kết hợp hiệu quả với đa búp sóng.

Chương 2
ĐỀ XUẤT GIẢI PHÁP GIẢM NHIỄU PHA, NHIỄU RỜI RẠC NÂNG CAO CHẤT LƯỢNG ĐÀI RA-ĐA FMCW

2.1 Nhiễu pha và đề xuất giải pháp giảm nhiễu pha

2.1.1 Mô hình toán học

Sơ đồ khối hệ thống ra-đa FMCW *(Hình 2-1)* sử dụng kiến trúc máy thu trộn tần. Tín hiệu phát LFM tại cổng LO (công thức *2.2*); tín hiệu thu tại cổng RF gồm thành phần rò và phản xạ từ K mục tiêu (công thức *2.3*). Phân tích nhiễu pha sau trộn FMCW (công thức *2.4-2.11*) cho thấy hai cơ chế: *(1)* thành phần *"không tương quan"* $(\varphi_s(t) - \varphi_s(t - \tau int))$ triệt theo cự ly khi τint nhỏ; *(2)* các bộ LO RF độc lập phát sinh nhiễu pha không bị triệt, lan toả trên toàn phổ tần số phách, nâng sàn nhiễu và che lấp tín hiệu phản xạ từ mục tiêu RCS thấp.



Hình 2-1. Sơ đồ khối của ra-đa FMCW

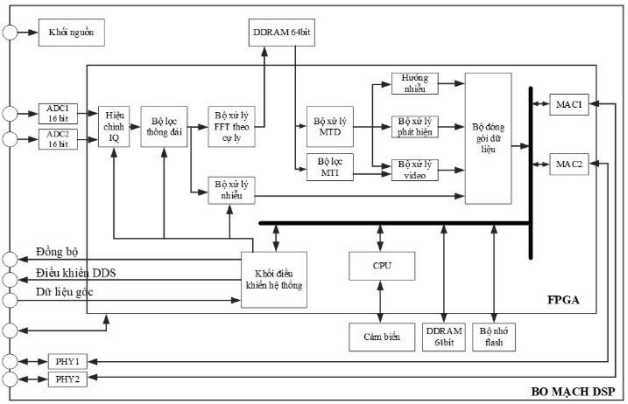
2.1.2 Yêu cầu định lượng

Từ chuỗi tính toán mật độ nhiễu nhiệt, SNR ADC, mật độ nhiễu nền, độ lợi xử lý FFT (công thức *2.12* đến *2.19*), xác định hệ số cách ly tối thiểu: $Iso_{Ant} > P_{phase\,noise} + G_{RX} - P_{minInputADC}$ (*2.20*). Với $P_{phase\,noise} = -58{,}95$ dBm, $GRX = 50$ dB, $P_{minInputADC} =$

$-91{,}2$ dBm $\Rightarrow Iso_{Ant} > 82{,}25$ dB (*Bảng 2-1*).

2.1.3 Thiết kế xử lý tín hiệu số

Tín hiệu tần số phách từ đầu ra khối thu được số hóa qua hai kênh ADC 16-bit, đi qua khối hiệu chỉnh IQ, bộ lọc thông dải, rồi vào Range FFT *(Hình 2-2)*. Đầu ra chia hai nhánh: nhánh chính qua MTI và MTD, nhánh phụ qua xử lý video; cả hai hội tụ tại bộ phát hiện CFAR. Toàn bộ triển khai trên FPGA kết hợp DSP. Các tham số $N_{rangeFFT}$, N_{pulse} và ngưỡng CFAR xác định mức tín hiệu tối thiểu mà hệ thống cần đạt.



Hình 2-2. Thiết kế xử lý tín hiệu số cho ra-đa FMCW

2.1.4 Thiết kế ăng-ten mảng khe ống dẫn sóng

Bốn giải pháp triển khai đồng thời:

(1) Mảng khe ống dẫn sóng: khảo sát N (92÷110) và d (0,47÷0,49 λ_g), chọn $N = 104$, $d = 0{,}47\lambda_g$, $L_{array} \approx 1970$ mm, đạt $\theta_{3dB} = 1{,}2^o$, $SLL = 30{,}6$ dB (*Bảng 2-2*). Khảo sát d_{sep} (50÷250 mm) cho $d_{sep} = 200$ mm tối ưu, đạt $Iso_{space} \approx 72{,}6$ dB (*Bảng 2-3*).

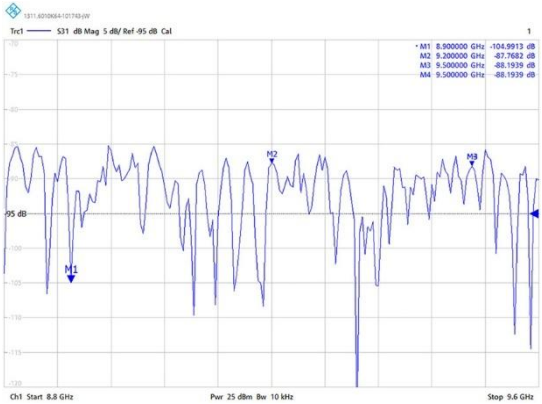
(2) Mặt mở loa chắn nhiễu xạ: khảo sát h_{flare} (60÷90 mm) cho $h_{flare} = 75$mm, đạt HPBW góc tà 20,7°, $Iso_{horn} = 17{,}4$ dB, Iso_{Ant} tổng cộng ≈ 90 dB (*Bảng 2-4*).

(3) Khe trên thành hẹp: hai bậc tự do δ và θ (công thức 2.23) giảm

hệ số phẩm chất Q, mở rộng $S_{11} \leq -20$ dB trên dải 600 MHz, gấp 2,4 lần so với khe thành rộng (*Bảng 2-5*).

(4) Lưới lọc phân cực kim loại: khảo sát p (10÷16 mm) và w/p (0,3÷0,45), chọn $p = 10$ mm, $w = 4$ mm, suy giảm phân cực chéo 19,8 dB (*Bảng 2-6).*

Kết quả mô phỏng đối chiếu (*Bảng 2-7*): $Iso_{Ant} \geq 90$ dB; độ lợi 30,3 dBi; $\theta_{3dB} = 1{,}2^o$; băng thông 600 MHz. Đo kiểm thực tế (*Hình 2-8*) cho hệ số cách ly TX/RX đạt 85 dB trên toàn dải 8.900-9.500 MHz, vượt yêu cầu 82,25 dB và cao hơn 5 dB so với ăng-ten vi dải truyền thống.



Hình 2-8. Kết quả đo hệ số cách ly giữa ăng-ten Phát và Thu

So với các giải pháp đã công bố, phương pháp đề xuất triệt tín hiệu rò ngay trước LNA, bảo toàn dải động cho toàn bộ chuỗi xử lý và giảm độ phức tạp phần cứng. Cụ thể, so với kỹ thuật SPC của Park, cải thiện nền nhiễu 2,1÷7,0 dB nhưng phụ thuộc vào tín hiệu rò chiếm ưu thế; so với phương pháp khai thác đối xứng phổ của Cooper, cải thiện 18 dB dải động nhưng yêu cầu DSP công suất lớn; so với miền RF của Chen và Niknejad, triệt rò > 20 dB nhưng cần IQ-Mixer và đồng bộ pha chính xác. Giải pháp ăng-ten đạt 85 dB trên băng rộng 600 MHz, không đòi hỏi thuật toán xử lý bổ sung.

2.2 Nhiễu rời rạc và giải pháp đề xuất

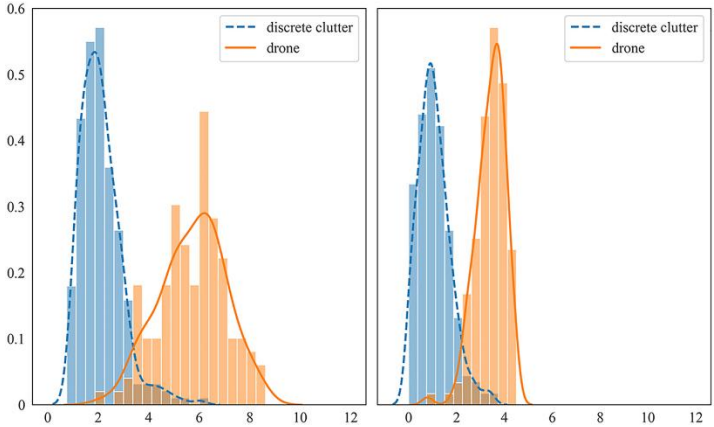
a. Phân tích đặc trưng và xây dựng cơ sở dữ liệu thực nghiệm

Mô hình động học mục tiêu (các công thức *(2.30)-(2.49)*) tách tần số đốp-le tổng hợp thành thành phần tịnh tiến $(2f/c).v_{radial}$ và thành phần vi đốp-le $(2f/c).[\omega.v]_{radial}$ do phép quay của các điểm phân tán trên mục tiêu. Vi đốp-le f_{mD} phụ thuộc đồng thời vào vận tốc góc Ω, vị trí r_0 và hướng quan sát n, tạo ra chữ ký vi đốp-le đặc trưng cho mỗi loại mục tiêu.

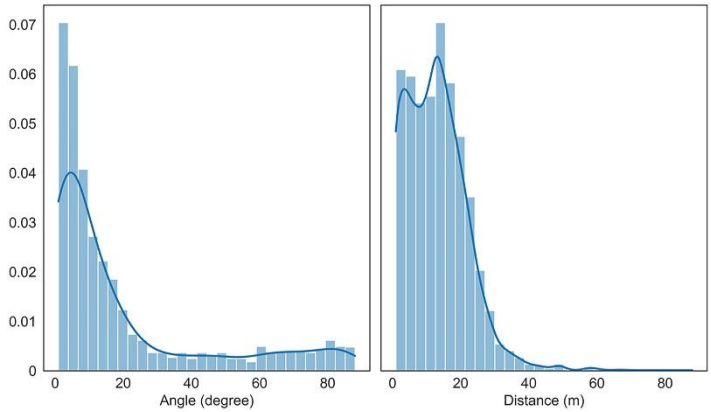
Sử dụng thiết bị quang-điện tử kết hợp ra-đa, NCS thu thập 26.800 mẫu quỹ đạo trên bốn lớp (chim, trực thăng, ô-tô, drone). Bốn đặc trưng động học $(v_{mean}, v_{std}, h_{std}, \sigma)$ được trích xuất cho thấy chỉ trực thăng có thể phân biệt được nhờ vận tốc vượt trội; với drone và ô-tô/chim, dải vận tốc chồng lấp gần như hoàn toàn (drone 1÷11 m/s; ô-tô 2÷12 m/s; chim 2÷8 m/s).

Phân tích phổ đốp-le trên 20.000 mẫu (10.000 drone + 10.000 nhiễu rời rạc) trong cự ly 1,7 km cho thấy nhiễu rời rạc có phổ đốp-le hẹp tập trung ở 2-3 band liền kề, trong khi drone có phổ trải rộng do chuyển động cánh quạt. Hai đặc trưng được định nghĩa: Δf_D *(2.48)* và $\sigma_{\Delta f_D}$ *(2.49)* qua M = 5 vòng quét. Phân bố hai đặc trưng này cho nhiễu rời rạc tập trung ở vùng giá trị thấp ($\Delta f_D \approx 2,\ \sigma_{\Delta f_D} \approx 1 \div 2$), drone dịch sang vùng cao ($\Delta f_D \approx 6, \sigma_{\Delta f_D} \approx 3 \div 4$), tạo ra tách biệt thống kê rõ ràng *(Hình 2-13)*.

Bản đồ đường giao thông được xây dựng từ *OpenStreetMap* (các công thức *(2.50)-(2.54)*) với độ phân giải 1 m/pixel khớp với phân giải cự ly nghiêng của ra-đa. Thống kê 10.676 mẫu khoảng cách và 9.311 mẫu hướng di chuyển từ 380 mục tiêu nhiễu rời rạc cho thấy đa số tập trung trong phạm vi 30 m từ tuyến đường và lệch hướng < 30° *(Hình 2-15)*. Hai ngưỡng này được chọn làm tiêu chí phân biệt - drone (bay tự do) thường không thoả mãn đồng thời cả hai.



Hình 2-13. Phân bố của Δf_D (trái) và $\sigma_{\Delta f_D}$ (phải) của drone và nhiễu rời rạc



Hình 2-15. Phân bố xác suất của góc lệch hướng di chuyển (trái) và khoảng cách đến tuyến đường gần nhất (phải) của nhiễu rời rạc

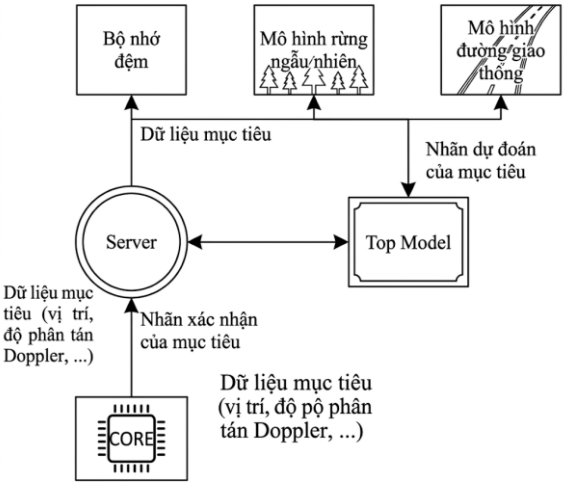
b. Mô-đun DDDCR

Mô-đun DDDCR (Drone Detection and Discrete Clutter Reduction) được tích hợp như khối xử lý hậu trong chuỗi xử lý FMCW *(Hình 2-16)*, gồm các thành phần:

- **CORE** - trích xuất đặc trưng (cự ly, phương vị, vận tốc đốp-le, biên

độ) và tính ($\Delta f_D, \sigma_{\Delta f_D}$) cùng quỹ đạo từ $M = 5$ vòng quét liên tiếp.

- **SERVER** - điều phối dữ liệu, phân phối song song đến hai mô hình phân loại và lưu lịch sử trong Cache Data.
- **Random Forest Model (RFM)** - rừng ngẫu nhiên 20 cây, huấn luyện trên 20.000 mẫu, dùng ($\Delta f_D, \sigma_{\Delta f_D}$) để phân loại Drone/Nhiễu rời rạc khi $R \leq 1{,}7\ km$.
- **Street Model (SM)** - kiểm tra trạng thái *"gần đường"* (cửa sổ vuông cạnh 60 m) và đánh giá hướng chuyển động (cửa sổ trượt $k = 5$, ngưỡng 30°) trong $N = 15$ vòng quét; áp dụng cho toàn cự ly ≤ 12 km.
- **Top Model** - tổng hợp kết quả từ RFM và SM theo logic phân cấp kết hợp quy tắc ổn định MN ($M = 6,\ N = 10$) để đưa ra nhãn cuối: Drone, Nhiễu rời rạc, hoặc Không xác định.



Hình 2-16. Thiết kế của mô-đun phân loại DDDCR

Thử nghiệm thực tế tại Hoà Lạc với ra-đa FMCW lắp đặt trên nóc nhà cao 60 m, mục tiêu chính là DJI Phantom 4 ($\sigma \approx -20\ dBsm$) qua ba kịch bản: (1) chuyển động theo hướng tâm về phía ra-đa; (2) chuyển

động theo quỹ đạo tiếp tuyến so với ra-đa; và (3) chuyển động dọc theo các tuyến giao thông trong vùng quan sát.

c. Kết quả thực nghiệm

Street Model phân loại đúng drone ở cự ly 3,5 km dù RFM ngừng hoạt động.

Với kịch bản tiếp tuyến ở 2,9 km, hệ thống vẫn phân loại chính xác nhờ Street Model nhận ra quỹ đạo bay không bám theo đường phố.

Trong kịch bản drone bay dọc đường, kịch bản khó nhất, hệ thống chuyển sang RFM ở cự ly 1,7 km và phân loại thành công.

So sánh với ra-đa thương mại Elvira: $TRCR = 0{,}97$ (loại bỏ 97% nhiễu rời rạc); $TRDC = 1{,}0$ (phân loại đúng 100% drone); cự ly phát hiện 3,5 km (cải thiện 1,2 lần so với 3 km của Elvira); $MRDC$ cắt ngang 3,5 km (cải thiện 3,2 lần so với 1,1 km); $MRDC$ dọc đường 1,8 km (cải thiện 1,6 lần). Phương pháp đề xuất vượt mức yêu cầu thiết kế ($TRCR, TRDC \geq 0{,}95$).

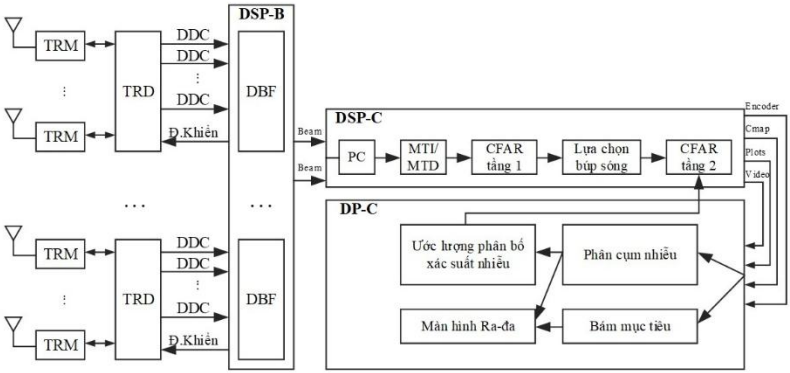
Kết luận chương

Chương 2 đã giải quyết hai bài toán nghiên cứu nhằm nâng cao chất lượng hệ thống ra-đa FMCW phân giải cao. Đối với bài toán nhiễu pha, giải pháp cấu trúc ăng-ten mảng khe ống dẫn sóng tích hợp loa kết hợp lưới lọc phân cực đạt hệ số cách ly 85 dB trên toàn dải tần 8.900-9.500 MHz, đáp ứng băng thông 600 MHz và mức triệt phân cực chéo khoảng 20 dB. Đối với bài toán nhiễu rời rạc, giải pháp giảm nhiễu rời rạc dựa trên đặc trưng vi đốp-le kết hợp hệ quy tắc phân loại phân cấp Top Model đạt $TRCR = 97\%$ và $TRDC = 100\%$, mở rộng tầm phân loại từ 1,6 lần đến 3,2 lần so với Elvira. Khi tích hợp cả hai giải pháp, nguyên mẫu ra-đa phát hiện ổn định DJI Phantom 4 tại cự ly 3,5 km với $P_D = 0{,}7$ và $P_{fa} \leq 10^{-4}$.

Chương 3
ĐỀ XUẤT GIẢI PHÁP ĐA BÚP SÓNG THÍCH NGHI VÀ CFAR HAI GIAI ĐOẠN, NÂNG CAO CHẤT LƯỢNGPHÁT HIỆN ĐÀI RA-ĐA XUNG

3.1 Đề xuất giải pháp đa búp sóng nâng cao SNR

Hệ thống ra-đa xung được tổ chức theo kiến trúc phân tầng *(Hình 3-1)*: DSP-B xử lý tín hiệu băng gốc và DBF; DSP-C thực hiện nén xung, MTI/MTD, CFAR tầng 1, lựa chọn búp sóng và CFAR tầng 2; DP-C xử lý phân cụm nhiễu, ước lượng phân bố và bám mục tiêu.



Hình 3-1. Kiến trúc xử lý đa búp sóng đề xuất

Theo phương trình ra-đa xung *(3.1)*, trong các yếu tố cấu thành, chỉ tích $G_t G_r$ có thể chủ động điều khiển. Trong giai đoạn phát hiện ban đầu, hướng mục tiêu chưa biết chính xác và nhiễu địa vật phân bố không đồng nhất - một búp sóng cố định không thể duy trì *SNR* tối ưu trên toàn vùng quan sát.

Giải pháp đề xuất: tại mỗi góc phương vị, hệ thống phát đồng thời hai búp sóng với góc tà khác nhau; với mỗi búp phát, ba búp thu được tạo đồng thời và tổ hợp bằng kết hợp xử lý đơn xung và MLE. Khoảng

cách giữa hai búp phát = ½ $HPBW$; giữa các búp thu = ¼ $HPBW$. Bài toán lựa chọn búp sóng tối ưu *(3.5)*:

$$k^* = argmax\, SNR_k \tag{3.5}$$

Hệ quả: việc lựa chọn búp sóng theo cực đại SNR khiến mức nhiễu tại đầu vào bộ phát hiện trở nên không đồng nhất - đặt ra yêu cầu CFAR thích nghi.

3.2 Đề xuất CFAR hai giai đoạn thích nghi

a. Đặc điểm nền nhiễu và mô hình tổng quát

Mức công suất nhiễu nền thay đổi đáng kể theo cự ly và búp sóng; MTI/MTD tuy giảm nhiễu tĩnh nhưng có thể tăng nền nhiễu tại các vùng vốn không chứa nhiễu đáng kể. Mối quan hệ ràng buộc P_d - P_{fa} khiến việc duy trì P_d ổn định trong nhiễu không đồng nhất dẫn tới gia tăng đáng kể P_{fa} nếu không có cơ chế điều chỉnh ngưỡng.

Bốn đặc điểm của nền nhiễu trong ra-đa xung: *(1)* hỗn hợp; *(2)* không đồng nhất theo không gian; *(3)* biến đổi theo thời gian; *(4)* không tuân theo phân bố cố định trên toàn vùng quan sát.

Năm yêu cầu đối với bộ phát hiện: *(1)* duy trì P_{fa} ổn định; *(2)* thích nghi theo từng vùng nhiễu; *(3)* khai thác tín hiệu sau xử lý đa búp sóng; *(4)* ước lượng phân bố từ dữ liệu đo thực; *(5)* triển khai thời gian thực.

Bài toán phát hiện được phát biểu dưới dạng kiểm định giả thuyết nhị phân *(3.6)-(3.8)*. Mở rộng các mô hình tín hiệu cơ bản *(3.9)-(3.12)*, luận án đề xuất mô hình tổng quát cho nhiễu hỗn hợp, không đồng nhất:

$$i(t,x) = \sum_{k=1}^{m} \chi(x, A_k)\, p^{(k)}(t,x) \tag{3.15}$$

Trong đó, các vùng A_k rời nhau phủ toàn bộ không gian quan sát, và mỗi p_k là tổ hợp tuyến tính của các PDF con *(3.17)*. Bài toán phát hiện chuyển thành bài toán ước lượng và thích nghi theo phân bố nhiễu cục bộ.

b. Quy trình CFAR hai giai đoạn (Thuật toán 1)

Quy trình tổng thể thực hiện 7 bước: *(1)* nén xung; *(2)* tích phân xung MTI/MTD; *(3)* phát hiện sơ cấp bằng CA-CFAR với P_{fa} toàn cục; *(4)* lựa chọn búp sóng SNR cực đại tại mỗi CUT; *(5)* phân cụm nhiễu HDBSCAN; *(6)* ước lượng PDF cho từng vùng A_k bằng Thuật toán 2; *(7)* tính ngưỡng cục bộ λ_k và loại bỏ các plot có công suất nhỏ hơn ngưỡng.

$$\lambda_k = {F_k}^{-1}(1 - p_{fa}) \qquad (3.18)$$

c. Xấp xỉ hàm mật độ xác suất nhiễu (Thuật toán 2)

Tín hiệu phản xạ chỉ thu được trong dải $[a, b]$ (ngưỡng nhạy đến ngưỡng bão hoà), nên phân bố nhiễu quan sát luôn ở dạng cắt ngắn *(3.19)*. Theo định lý Hausdorff, hàm mật độ cắt ngắn xác định duy nhất bởi các moment.

Luận án sử dụng hai phương pháp xấp xỉ song song: *(1)* đa thức Bernstein bậc n *(3.20)* - hội tụ đều theo định lý Bernstein *(3.21)*; (*2)* cơ sở đa thức trực giao xây dựng từ định thức ma trận Hankel của các moment *(3.22)* và khai triển PDF theo các hệ số c_n *(3.23)*. *Thuật toán 2 – Ước lượng hàm mật độ xác suất nhiễu* gồm 5 bước: xây dựng histogram cắt ngắn → xấp xỉ Bernstein → tính các moment m_0 đến m_{2n} → xác định $P_n(y)$ → tính c_n và xác lập xấp xỉ moment.

3.3 Kết quả thực nghiệm trên ra-đa cảnh giới 3D

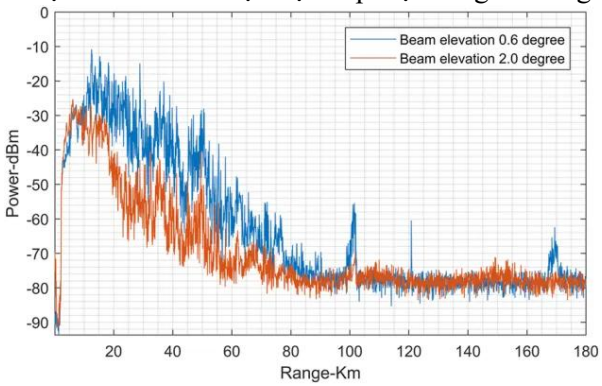
a. Cấu hình hệ thống và kịch bản thử nghiệm

Ra-đa cảnh giới phòng không 3D làm việc băng tần S, tầm hoạt động 360 km, độ rộng búp sóng theo phương cao ≤ 3,5°, tốc độ quét 0,1 Hz. Tại mỗi hướng, hệ thống phát hai búp sóng (cách nhau 1,4°) và thu sáu búp sóng (cách nhau 0,5°). Tham số P_{fa} toàn cục = 10^{-3}, p_{fa} cục bộ = 0,1. Mục tiêu thử nghiệm là máy bay thể thao ATEC 321 Faeta, bay 160 km/h ở độ cao 1.000 m. Khối DSP-C/DP-C triển khai trên ba máy tính Intel Xeon Gold 6242R (3,1 GHz, 20 lõi, 24 GB

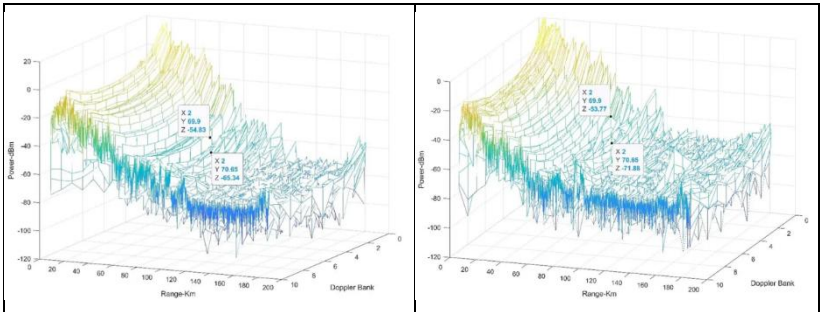
RAM) - DSP-C < 1 ms, DP-C < 0,3 s, đáp ứng chu kỳ quét 10 s.

b. Kết quả tăng SNR bằng đa búp sóng

Hình 3-8 cho thấy ba vùng đặc trưng: vùng < 10 km đỉnh nhiễu cao (≈ −25 dBm trên búp 0,6° và −30 dBm trên búp 2,0°); vùng 10-80 km là vùng nhiễu địa vật chủ đạo với chênh lệch tới 10 dB giữa hai búp; từ 80 km trở đi hai đường hội tụ về nhiễu nhiệt ≈ −78 dBm. *Hình 3-9* cho thấy *SNR* mục tiêu tại 70 km tăng từ 10 dB (búp 0,6°) lên 18 dB (búp 2,0°), chênh lệch 8 dB - cải thiện trực tiếp hiệu năng CFAR giai đoạn 1.



Hình 3-8. Công suất nhiễu tương ứng với hai búp sóng phát ở góc tà 0,6° và 2,0°



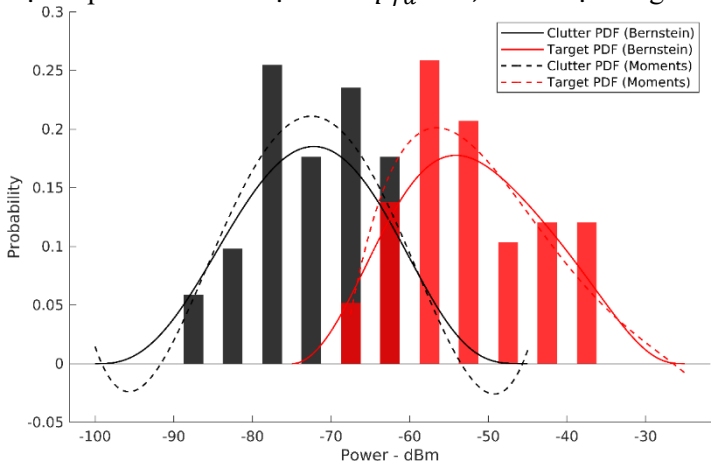
Góc tà 0,6° là 10 dB tại cự ly 70 km | *Góc tà 2,0° là 18 dB tại cự ly 70 km*

Hình 3-9. SNR của mục tiêu tương ứng với búp sóng ở các góc tà khác nhau

c. Kết quả CFAR hai giai đoạn

Sau CFAR giai đoạn 1, các báo động lầm xuất hiện ở vùng nhiễu phi Gauss được phân cụm bằng HDBSCAN; vòng quét đầu tiên dùng phân cụm, sau mỗi 6 vòng quét (1 phút) cập nhật vùng nhiễu.

Hình 3-11 so sánh hai phương pháp xấp xỉ trên cùng tập dữ liệu: histogram nhiễu (đen) tập trung trong dải −90 đến −65 dBm (đỉnh ≈ −75 dBm), histogram mục tiêu (đỏ) trong dải −65 đến −35 dBm (đỉnh ≈ −55 dBm). Đường Bernstein ($n = 6$) bám sát đỉnh và độ rộng histogram, không tạo giá trị âm; đường moment dao động mạnh ở hai biên và xuất hiện giá trị âm ở vùng −95 dBm và −65 dBm. Luận án lựa chọn xấp xỉ Bernstein bậc 6 với $p_{fa} = 0{,}1$ cho mọi vùng nhiễu.

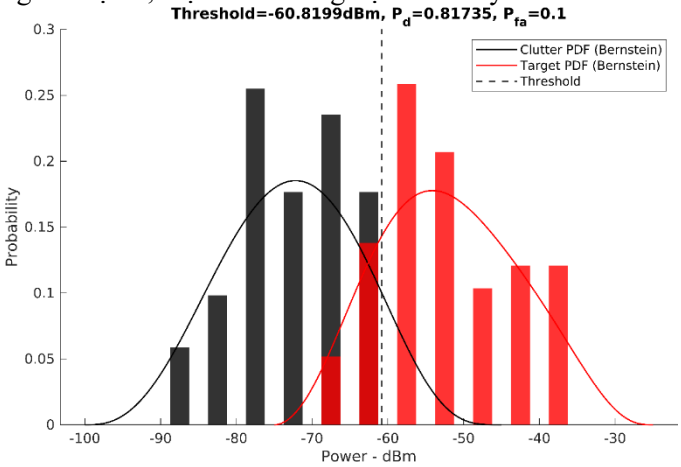


Hình 3-11. PDF của mục tiêu (đường đỏ) và nhiễu (đường đen) ước lượng bằng phương pháp Bernstein (nét liền) và phương pháp moment (nét đứt)

Hình 3-12 minh hoạ ngưỡng CFAR giai đoạn 2 ≈ −61 dBm, tách biệt hai phân bố: phần lớn nhiễu nằm bên trái, phần lớn mục tiêu nằm bên phải ngưỡng.

Sau CFAR giai đoạn 2, số báo động lầm giảm > 90% so với CA-

CFAR giai đoạn 1, mục tiêu thử nghiệm vẫn duy trì với *SNR* ổn định.



Hình 3-12. Ngưỡng CFAR giai đoạn 2 cho vùng nhiễu chứa mục tiêu thử nghiệm (≈ −61 dBm)

d) So sánh với các phương pháp khác

So sánh với 5 thuật toán CFAR phổ biến (OS, SOCA, GOCA, VI, PI) tại cùng $P_{fa} = 10^{-3}$, kết quả cụ thể như sau:

- Xác suất phát hiện trong vùng nhiễu P_{dc}: đề xuất 0,86 vượt trội so với mức cao nhất 0,32 (GOCA) và thấp nhất 0,14 (SOCA), cải thiện 2,7÷6,1 lần.
- Số báo cáo mục tiêu giả F_{TrC}: đề xuất 7 báo động/lượt quét, các thuật toán đối chứng 31÷74 báo động (giảm 4,4÷10,6 lần).
- Tỷ lệ rớt quỹ đạo TD_{rc}: đề xuất $TD_{rc} = 0$ (quỹ đạo duy trì liên tục); cả năm thuật toán truyền thống đều có $TD_{rc} = 1$ (quỹ đạo bị rớt khi mục tiêu đi vào vùng nhiễu).

So sánh với phương pháp học máy của *Perdóck và cộng sự (2024)*: tại cùng $SNR \approx 10$ dB và $p_{fa} = 0{,}1$, phương pháp *[57]* cho $P_{dc} \approx 0{,}6$ thấp hơn đáng kể so với $P_{dc} = 0{,}86$ của giải pháp đề xuất. Ưu thế còn

nằm ở việc không cần huấn luyện dữ liệu lớn và không phụ thuộc giả định trước về phân bố nhiễu.

Kết luận chương

Chương 3 đã đề xuất giải pháp đa búp sóng kết hợp CFAR hai giai đoạn thích nghi trên nền nhiễu hỗn hợp cho ra-đa xung. Cấu hình đa búp sóng kết hợp lựa chọn búp tối ưu theo tiêu chí SNR giúp cải thiện đáng kể chất lượng tín hiệu tại cự ly 70 km, SNR tăng từ 10 dB lên 18 dB. Phương pháp CFAR hai giai đoạn cho phép thích nghi theo đặc tính nhiễu cục bộ thông qua phân cụm và ước lượng phân bố xác suất bằng đa thức Bernstein. Kết quả đo kiểm: số báo động lầm giảm trên 90% so với CA-CFAR, xác suất phát hiện $P_D \geq 0{,}8$ với $P_{fa} \leq 10^{-3}$, và ngưỡng phát hiện được thiết lập riêng cho từng vùng nhiễu, phản ánh đúng đặc tính thống kê của môi trường quan sát. Thời gian xử lý DSP-C nhỏ hơn 1 ms, DP-C nhỏ hơn 0,3 s, đáp ứng yêu cầu thời gian thực.

KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN LUẬN ÁN

Kết luận và tổng quát giá trị đóng góp của luận án

Trên cơ sở phân tích cơ chế hình thành và đặc trưng của nhiễu, luận án đã xây dựng mô hình toán học, thực hiện mô phỏng và thử nghiệm thực tế, qua đó đề xuất ba giải pháp khoa học - kỹ thuật và một nội dung kiểm chứng thực nghiệm trên các đài ra-đa đang vận hành, cụ thể như sau:

Đóng góp thứ nhất: Đề xuất giải pháp giảm nhiễu pha cho ra-đa FMCW thông qua cấu trúc mảng ăng-ten khe ống dẫn sóng có kiểm soát bức xạ, xẻ khe trên thành hẹp, kết hợp lưới lọc phân cực và mặt mở loa tối ưu. Cấu trúc đề xuất đạt hệ số cách ly phát-thu 85 dB trong dải làm việc, vượt giá trị tính toán yêu cầu, qua đó cải thiện độ ổn định đo cự ly và vận tốc, nâng cao chất lượng tổng thể của đài ra-đa FMCW.

Đóng góp thứ hai: Đề xuất giải pháp giảm nhiễu rời rạc và phân loại drone trong ra-đa FMCW dựa trên đặc trưng vi đốp-le kết hợp hệ quy tắc phân loại phân cấp Top Model. Phương pháp khai thác đặc trưng vi đốp-le sinh ra từ cánh quạt drone để phân biệt với các nguồn nhiễu chuyển động khác như ô tô, chim, xe máy, đồng thời tích hợp bản đồ giao thông để nhận dạng và phân tích quỹ đạo chuyển động của mục tiêu. Kết quả thực nghiệm loại bỏ 97 % nhiễu rời rạc, phân loại chính xác 100 % số drone ở cự ly tới 3,5 km, tầm phân loại cải thiện 1,6÷3,2 lần tùy kịch bản bay so với ra-đa Elvira (1,1 km), qua đó nâng cao chất lượng phát hiện và bám quỹ đạo của đài ra-đa FMCW.

Đóng góp thứ ba: Đề xuất giải pháp đa búp sóng kết hợp CFAR hai giai đoạn thích nghi trên nền nhiễu hỗn hợp cho ra-đa xung. Trong đó, phân bố nhiễu phi Gaussian được ước lượng bằng đa thức Bernstein, cho phép xác định ngưỡng phát hiện cục bộ tối ưu theo từng vùng nhiễu. Kết quả thử nghiệm trên ra-đa xung cảnh giới 3D cho thấy

tỷ số tín-tạp tăng khoảng 8 dB (tại cự ly 70 km), xác suất báo động lầm giảm hơn 90% so với CA-CFAR truyền thống, đồng thời thời gian xử lý đáp ứng yêu cầu thời gian thực của hệ thống.

Đóng góp thứ tư: Các giải pháp đề xuất được kiểm chứng thực nghiệm và đánh giá hiệu quả trên các đài ra-đa phân giải cao đang vận hành. Kết quả cụ thể: *(1)* trên ra-đa FMCW, khả năng phát hiện drone DJI Phantom 4 đạt cự ly 3,5 km, loại bỏ 97 % nhiễu rời rạc và 100 % số drone được nhận dạng chính xác; *(2)* trên ra-đa xung 3D, tỷ số tín-tạp SNR tăng đáng kể, xác suất báo động lầm giảm hơn 90 % so với CFAR truyền thống, đồng thời thời gian xử lý đáp ứng yêu cầu thực tế của hệ thống.

Các hướng nghiên cứu tiếp theo

Hướng thứ nhất: Tiếp tục nghiên cứu nhằm bảo đảm độ ổn định pha giữa các phần tử phát-thu trong hệ thống FMCW, qua đó hạn chế sai lệch búp sóng và nâng cao độ chính xác đo đạc. Song song, cần cải tiến các thành phần phần cứng then chốt như bộ trộn, dao động nội và khuếch đại công suất để đồng bộ pha và tăng độ tin cậy của hệ thống.

Hướng thứ hai: Mở rộng tập dữ liệu huấn luyện và kiểm chứng cho bài toán tách nhiễu - nhận dạng mục tiêu, bao gồm nhiều mức nhiễu và nhiều chủng loại drone khác nhau. Đồng thời, nghiên cứu ứng dụng học máy và học sâu để khai thác sâu hơn đặc trưng vi đốp-le, nâng cao hiệu quả phân biệt mục tiêu trong môi trường phức tạp.

Hướng thứ ba: Mở rộng thử nghiệm trên nhiều cấu hình ra-đa (đa kênh, đa băng tần) và trong các điều kiện địa hình khác nhau (trên biển, trên đảo, địa hình phức tạp) để đánh giá khả năng thích ứng và phạm vi ứng dụng của hệ thống trong thực tế.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC CỦA TÁC GIẢ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

[1] *"A design of a high-resolution frequency modulated continuous wave radar for drone detection based on spurious phase noise and discrete clutter reduction,"* IET Radar, Sonar & Navigation, vol. 18, no. 5, pp. 704-714. DOI: 10.1049/rsn2.12512.

[2] *"Improving Aerial Target Detection for 3D Radar Based on Two-Stage CFAR Method with Adaptive Clutter Distribution Estimation,"* Frontiers in Signal Processing, 2025. DOI: 10.3389/frsip.2025.1688944.

[3] *"An Adaptive IMM for Tracking Maneuvering Target with High Variability of Environment,"* Fuzzy Systems and Data Mining X. DOI: 10.3233/FAIA241441.

[4] *"Enhanced Multi-Target Tracking with Combination of Position, Power and Ambiguous Doppler Measurements,"* Fuzzy Systems and Data Mining IX. DOI: 10.3233/FAIA231011.

[5] *"Ambiguity Resolution for Ground-based Pulse-Doppler Radars Using Multiple Medium PRF,"* Proc. Int. Conf. on Signal Processing Systems (ICSPS), Jiangsu, China. DOI: 10.1109/ICSPS58776.2022.00024.

[6] *"A Discrete Clutter Reduction Method for Drone Detection with High Resolution Radars,"* Proc. 12th Int. Conf. on Electronics, Communications and Networks (CECNet 2022). DOI: 10.3233/FAIA220543.

[7] *"Phương pháp chuyển đổi và hiển thị dữ liệu quét ra-đa độ phân giải cao,"* Bằng độc quyền sáng chế số VN1-0052696-000, cấp ngày 25/9/2025, Cục Sở hữu trí tuệ Việt Nam.