

**ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC KHOA HỌC TỰ NHIÊN**

NGUYỄN XUÂN LƯƠNG

**NGHIÊN CỨU NÂNG CAO KHẢ NĂNG PHÁT HIỆN VÀ
XÁC ĐỊNH TỌA ĐỘ CÁC MỤC TIÊU DẤU VẾT NHỎ CHO
HỆ THỐNG ĐỊNH VỊ VÔ TUYẾN SỬ DỤNG ĂNG TEN
MẠNG PHA**

Chuyên ngành : Vật lý vô tuyến điện tử

Mã số : 9 440130.03

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Hà Nội – 2025

**CÔNG TRÌNH ĐƯỢC HOÀN THÀNH TẠI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC KHOA HỌC TỰ NHIÊN
ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI**

Người hướng dẫn khoa học:

- 1. PGS-TS Đặng Thị Thanh Thủy, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên - ĐHQG Hà Nội.**
- 2. TS Nguyễn Phùng Bảo, Học viện Kỹ thuật Quân sự Bộ Quốc Phòng.**

Phản biện 1: PGS. TS. Phạm Tiến Lâm, Trường Công nghệ thông tin – Đại học Phenikaa.

Phản biện 2: PGS. TS. Trần Mạnh Cường, Trường Đại học Sư phạm Hà Nội.

Phản biện 3: PGS. TS. Lê Đức Tuyên, Trường Đại học Mở-Địa chất.

Luận án được bảo vệ tại Hội đồng đánh giá luận án cấp
theo quyết định số, ngày ... tháng ... năm 202...
của, họp tại Đại học Khoa
học Tự nhiên vào hồi ... giờ ... ngày ... tháng ... năm 2025.

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Đại học Khoa học Tự nhiên/ĐHQG Hà Nội
- Thư viện Quốc gia

CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ CỦA TÁC GIẢ

1. **Xuan Luong N.**, Dang T., Phung Bao N., Van Bac N. (2022), “Research and Design of an X-Band UHF Power Amplifier”, *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*. ISSN 2658-4794. 25(5):56-66.
2. **Nguyen, Xuan Luong**, Thanh Thuy Dang Thi, Phung Bao Nguyen, and Viet Hung Tran (2024), “Receiving Paths Improvement of Digital Phased Array Antennas Using Adaptive Dynamic Range”, *Electronics*, 13, ISSN: 2079-9292, no. 21: 4161 (WoS, Q2).
3. **Nguyen, Xuan Luong**, Nguyen Trong Nhan, Thanh Thuy Dang Thi, Tran Van Thanh, Phung Bao Nguyen, and Nguyen Duc Trien (2024), “Phased Array Antenna Calibration Based on Autocorrelation Algorithm”, *Sensors* 24, ISSN: 1424-8220, no. 23: 7496, (WoS, Q1).
4. **Nguyen Xuan Luong**, Dang Thi Thanh Thuy, Nguyen Phung Bao (2024), “Nghiên cứu ứng dụng AI engine trong thiết kế bộ tích lũy tương can đa kênh sử dụng FFT của ra đa mảng pha số”, *Hội nghị khoa học Vật lý 2024* do trường VNU tổ chức.
5. **Nguyen Xuan Luong**, Nguyen Trong Nhan, Tran Van Thanh, Dang Thi Thanh Thuy (2025), “Calibration of phased array antenna with the minimum point finding method of the array factor”, *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. Vol.38, No.2, May, 2025, pp. 854-864, ISSN: 2502-4752, (Scopus, Q3).
6. **Xuan Luong Nguyen**, Nguyen Trong Nhan, Tran Van Thanh, Phung Bao Nguyen (2025), “Autocorrelation Method of Phased Array Antenna Calibration Based on Far-Field Measurement System”, *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2025, 28 (3):106-115, ISSN 2658-4794.
7. Nguyen Trong Nhan, **Xuan Luong Nguyen**, Phung Bao Nguyen (2025), “Automatic calibration of the receiving line of the information and control systems in real-time”, *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. Issue 3, Volume 25, 2025, (Scopus, Q4).

MỞ ĐẦU

1. Đặt vấn đề

Việc phát hiện các mục tiêu trong không gian được xác định dựa trên nguyên tắc bức xạ định hướng nguồn năng lượng siêu cao tần với mức công suất đủ lớn vào vùng quan sát và thu tín hiệu phản xạ về. Các tham số tọa độ mục tiêu được xác định bằng phương trình ra đa. Trong phương trình ra đa, “diện tích phản xạ hiệu dụng”, DTPXHD, ký hiệu là $\bar{\sigma}_{m.tieu}$ là tham số duy nhất mang thông tin về mục tiêu. Để tăng cường khả năng sống sót cho mục tiêu, việc giảm độ lớn $\bar{\sigma}_{m.tieu}$ là yêu cầu tất yếu. Mỹ là quốc gia đầu tiên sử dụng “công nghệ tàng hình - Stealth technology” để giảm $\bar{\sigma}_{m.tieu}$. Sau đó, hàng loạt phương tiện bay kể cả phương tiện bay không người lái sử dụng công nghệ này đã ra đời để làm giảm đáng kể cự ly phát hiện bằng các hệ thống ra đa truyền thống. Và các phương tiện bay có $\bar{\sigma}_{m.tieu} \sim 10^{-2} \dots 10^{-3} [m^2]$ là các mục tiêu dấu vết nhỏ (MTDVN). Khi đó, nếu giảm $\bar{\sigma}_{m.tieu}$ từ 50% đến 70% thì cự ly phát hiện cũng sẽ giảm xuống từ 20% đến 40% tương ứng, và làm giảm khả năng sẵn sàng ứng phó của các lực lượng bảo vệ quốc gia.

Phát hiện và xác định tọa độ mục tiêu là nhiệm vụ hàng đầu của các hệ thống ra đa. Do các MTDVN thường hoạt động kết hợp với các mục tiêu thông thường, nên trong số các phương pháp ra đa thì mô hình ra đa đa chức năng sử dụng *hệ thống anten mảng pha* là cách giải quyết phù hợp và có tính cấp thiết trong điều kiện thực tế của Việt Nam. Từ đây, tên đề tài được xác định là “**Nghiên cứu nâng cao khả năng phát hiện và xác định tọa độ các mục tiêu dấu vết nhỏ cho hệ thống định vị vô tuyến sử dụng anten mạng pha**” nhằm mục tiêu tìm kiếm các cách tiếp cận mới, các phương pháp, giải pháp kỹ thuật, công nghệ khác nhau để tăng cường khả năng phát hiện, xác định tọa độ lớp các MTDVN nói trên.

2. Đối tượng, phạm vi nghiên cứu và phương pháp nghiên cứu.

Đối tượng nghiên cứu: là hệ thống anten mảng pha số (AMPS) tích hợp bởi tập các mô đun thu phát số (MDTPS) bố trí trên mặt mở trong ra đa đa chức năng khi thực hiện bài toán phát hiện, xác định tọa độ các mục tiêu có $\bar{\sigma}_{m.tieu} \geq 10^{-3} [m^2]$.

Phạm vi nghiên cứu: Thuộc chuyên ngành Vật lý vô tuyến và điện tử với lĩnh vực hẹp là kỹ thuật và công nghệ ra đa

Phương pháp nghiên cứu: Được xây dựng trên cơ sở của lý thuyết vật lý vô tuyến thông kê, anten truyền sóng, anten mảng pha và mảng pha số; nguyên lý ra đa; kỹ thuật thu và xử lý tín hiệu, dữ liệu số và khai thác dữ liệu tiến tới đề xuất phương pháp luận giải quyết; xây dựng mô hình hệ thống, kiểm định thông qua mô hình hóa kết hợp thực nghiệm và sử dụng phương pháp gián tiếp để đánh giá hiệu quả.

3. Nội dung nghiên cứu

Các nội dung nghiên cứu cụ thể trong luận án gồm:

- + Phân tích đặc điểm của *MTDVN*, mô hình *AMPS* để hình thành phương pháp ra đa nâng cao chất lượng phát hiện, xác định tọa độ các mục tiêu có $\bar{\sigma}_{m.tieu} \geq 10^{-3}[m^2]$ trên cơ sở hình thành GDH_{ph} và GDH_{th} đảm bảo khả năng tích lũy không gian – thời gian góp phần tăng SNR_{Σ}

- + Hoàn thiện cấu trúc *MDTPS* được tổng hợp trên cơ sở điều chế và giải điều chế cầu phương ứng dụng trong *AMPS*. Trong đó, đường phát đảm bảo khả năng khuếch đại tuyến tính. Đường thu được hoàn thiện theo mô hình lọc phối hợp hoàn toàn có tính tới việc xử lý tích lũy để $SNR_{\Sigma} \gg 1$ đáp ứng các yêu cầu phát hiện *MTDVN* và mục tiêu thông thường.

- + Nghiên cứu nội dung nâng cao chất lượng đo, hiệu chuẩn *AMPS* tại cơ sở chế tạo và tại vị trí triển khai.

- + Nghiên cứu nội dung tổng hợp hệ con tự động đo, hiệu chuẩn nội thời gian thực *MDTPS* để giảm thiểu các lỗi về pha và biên độ tín hiệu nhằm nâng cao chất lượng xử lý tích lũy để tăng SNR_{Σ} đáp ứng các yêu cầu phát hiện và xác định tọa độ tọa độ các *MTDVN*.

Với các nội dung đã xác định, luận án có bố cục gồm:

Mở đầu.

Chương 1: Ra đa đa chức năng sử dụng *AMPS* và vấn đề phát hiện, xác định tọa độ các *MTDVN*

Chương 2: Cải tiến *MDTPS* nâng cao khả năng phát hiện và xác định tọa độ các *MTDVN*

Chương 3: Các giải thuật hiệu chuẩn *AMPS* góp phần đảm bảo khả năng phát hiện các *MTDVN*

Kết luận.

4. Tính thực tiễn, tính khoa học và những đóng góp mới của luận án

Tính thực tiễn: Các kết quả nghiên cứu có thể được ứng dụng trong thiết kế chế tạo mới ra đa đa chức năng sử dụng *AMPS*. Các kết quả nghiên cứu độc lập có thể sử dụng để cải tiến, hoàn thiện và làm mới nhiều thành phần trong các ra đa sử dụng *AMPS* thế hệ cũ.

Tính khoa học của luận án: Góp phần bổ sung, hoàn thiện những giải pháp tăng cường chất lượng phát hiện, xác định tọa độ các mục tiêu nói chung và *MTDVN* nói riêng cho ra đa hiện đại dùng *AMPS*.

Những đóng góp mới của luận án

1. Hoàn thiện việc tổng hợp, hình thành các dạng khác nhau của $GDHS_{th,\Sigma}$, $GDHS_{ph,\Sigma}$ theo thời gian thực. Ứng dụng phương pháp đơn xung kỹ thuật số đối với *AMPS* trong việc nâng cao chất lượng xác định tọa độ góc các mục tiêu, kể cả *MTDVN*.
2. Cải tiến cấu trúc *MDTPS* với đường thu được tổng hợp theo mô hình lọc phối hợp toàn phần nhằm đảm bảo không bị mất mát, méo dạng các tín hiệu yếu phản xạ từ *MTDVN* để đảm bảo điều kiện $SNR_{\Sigma}|\bar{\sigma}_{m,t} \sim 3[\text{cm}^2] > 1$ góp phần cao chất lượng phát hiện các loại mục tiêu
3. Đề xuất mới phương pháp hiệu chuẩn *AMPS* tại cơ sở sản xuất và tại vị trí triển khai trong môi trường nhiễu ngoài nhằm đảm bảo các tham số của búp sóng chính theo yêu cầu kỹ thuật và giảm thiểu các búp sóng phụ nhằm nâng cao và duy trì chất lượng phát hiện và xác định tham số tọa độ của các mục tiêu nói chung và *MTDVN* nói riêng.
4. Đề xuất mới giải thuật tự động đo, hiệu chuẩn đường thu của các *MDTPS* (sau hoàn thiện cấu trúc) để duy trì điều kiện phát hiện $SNR_{\Sigma}|\bar{\sigma}_{m,t} \sim 3[\text{cm}^2] > 1$ trong quá trình khai thác, vận hành góp phần nâng cao chất lượng phát hiện và xác định tham số tọa độ góc.

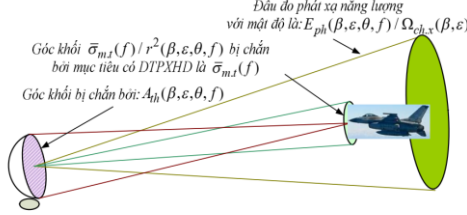
CHƯƠNG 1. RA ĐA ĐA CHỨC NĂNG SỬ DỤNG ANTEN MẢNG PHA SỐ VÀ VẤN ĐỀ PHÁT HIỆN, XÁC ĐỊNH TỌA ĐỘ CÁC MỤC TIÊU DẤU VẾT NHỎ

1.1. Mục tiêu dấu vết nhỏ – đối tượng cần quản lý của hệ thống cảnh giới phòng không quốc gia

1. Từ việc diễn giải bản chất vật lý của quá trình phát hiện các mục tiêu bằng ra đa (*hình 1.1*), có thể hình thành biểu thức xác định mức công suất thu tín hiệu phản xạ từ mục tiêu tới đầu vào máy thu:

$$P_{th}(\beta, \varepsilon, f) = \frac{P_{ph}(\beta, \varepsilon, f) \times G^2 \times \lambda^2 \times \bar{\sigma}_{m.t}(f)}{(4\pi)^3 \times r^4(\beta, \varepsilon, f) \times L} \quad (1.2)$$

Trong đó, $P_{ph}(\beta, \varepsilon, f)$, G , λ , $r(\beta, \varepsilon, f)$ và L - tương ứng là công suất phát, hệ số khuếch đại anten, bước sóng, cự ly phát hiện mục tiêu và hệ số tổn hao.



Hình 1.1. Minh họa hình học phương trình radar đa phát hiện mục tiêu.

Để phát hiện, $P_{th}(\beta, \varepsilon, f)$ phải lớn hơn ngưỡng xác định:

$$P_{th}(\beta, \varepsilon, f) \geq P_{th.min} = (SNR) \times P_{tap} \quad (1.3)$$

Trong đó, $P_{th.min}$, P_{tap} và SNR tương ứng là mức công suất thu tối thiểu, mức tạp máy thu và tỷ số tín/tạp.

Phương trình radar xác định cự ly cực đại phát hiện sẽ có dạng:

$$r_{max}(\beta, \varepsilon, f) = \sqrt[4]{\frac{P_{ph}(\beta, \varepsilon, f) \times G^2 \times \lambda^2 \times \bar{\sigma}_{m.t}(f)}{(4\pi)^3 \times P_{th.min}(\beta, \varepsilon, f) \times L}} \quad (1.4)$$

Với điều kiện tiên quyết để phát hiện.

$$SNR = P_{th.min}/P_{tap} \geq 1 \quad (1.5)$$

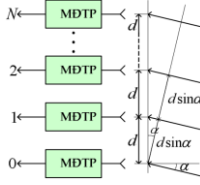
2. Từ (1.4), ta có, $r(\beta, \varepsilon, f) \sim \sqrt[4]{\bar{\sigma}_{m.t}(f)}$. Với đẳng điều kiện đo, cự ly phát hiện phụ thuộc chủ yếu vào $\bar{\sigma}_{m.t}$. Trong radar, có một số giải pháp giảm dấu vết radar (*giảm DTPXHD* $\bar{\sigma}_{m.t}$) như: hoàn thiện dạng khí động mục tiêu; sử dụng vật liệu hấp thụ (hoặc trong suốt) sóng điện từ; giảm dấu vết cho các hệ thống điện tử trên mục tiêu; hiệu ứng đám mây hấp thụ sóng điện từ hoặc giảm kích thước v.v thuộc công nghệ “Stealth” hoặc công nghệ chế tạo UAV, drone v.v.

3. Phân tích, lựa chọn phương pháp radar và giải pháp kỹ thuật đảm bảo việc phát hiện các *MTDVN* cho thấy: phương pháp tổng hợp dựa trên tăng khả năng năng lượng (*tăng khả năng tích lũy không gian – thời gian*) kết hợp với nâng cao chất lượng xử lý tín hiệu (*ứng dụng tín hiệu phức tạp, xử lý số tín hiệu v.v.*) là cách tiếp cận có ý nghĩa thực tiễn. Theo đó, radar sử dụng mô hình *AMP* nói

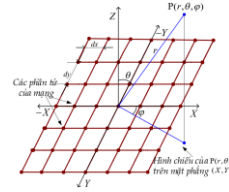
chung và *AMPS* nói riêng có tính ưu việt hơn. Hệ *AMPS* cho phép hình thành $GDHS_{th.\Sigma}$ và $GDHS_{ph.\Sigma}$ một cách đồng thời, độc lập về vị trí không gian, đa búp, đa hình dạng đáp ứng các yêu cầu của tích lũy không gian.

1.2. Tổng hợp thích nghi GDHS và phép biến đổi Fourier

1. Các biểu thức hình thành giản đồ hướng số (GDHS) hai mô hình của *AMPS* tuyến tính và phẳng (hình 1.5, 1.6) có dạng sau:



Hình 1.5. AMP tuyến tính



Hình 1.6. AMP phẳng

$$\dot{Y}(\alpha) = \sum_{n=0}^{N-1} \dot{W}_n X_n \exp \left[-j \frac{2\pi n d \sin \alpha}{\lambda} \right] \quad (1.9)$$

$$\dot{Y}(\alpha) \quad (1.11)$$

$$\begin{aligned} &= \sum_{n=0}^{N-1} \dot{W}_n X_n \exp \left[-j \frac{2\pi n d \sin \alpha_r}{\lambda} \right] \exp \left[-j \frac{2\pi n d \sin \alpha}{\lambda} \right] \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} \dot{W}_n X_n \exp \left[-j \frac{2\pi n d \sin (\alpha_r - \alpha)}{\lambda} \right] \end{aligned}$$

Trong đó, N , $\dot{W}_n$ và $\dot{X}_n$ – tương ứng là số các phần tử trong mảng, trọng số phức cần thiết để hình thành *GDHS* và tín hiệu phức của phần tử thứ n ; λ , d , α và α_r – tương ứng là bước sóng, khoảng cách giữa các phần tử, góc lan truyền của mặt sóng tới và tọa độ góc để thiết lập búp sóng trong *GDHS*.

Khi bỏ qua $\dot{W}_n$ thì (1.9) và (1.11) là phép biến đổi Fourier rời rạc đối với tín hiệu X_n

2. Kết quả hình thành GDHS của AMP tuyến tính (hình 1.7) N phần tử và AMP phẳng với $N \times M$ được tổng hợp theo hai thuật toán (1.20) và (1.21.a), (1.22.b):

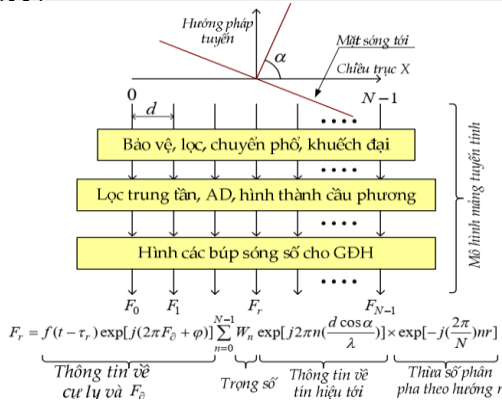
$$\dot{F}_r = f(t - \tau_r) \times \exp[j(2\pi F_\theta + \varphi)] \quad (1.20)$$

$$\sum_{n=0}^{N-1} \dot{W}_n \exp \left[2\pi n \left(\frac{d \cos \alpha}{\lambda} \right) \right] \exp \left[-j \left(\frac{2\pi}{N} \right) nr \right]$$

$$\dot{F}_{r,s}$$

$$(1.21a)$$

$$\begin{aligned}
&= U(t) \sum_{n=0}^{N-1} \left\{ \sum_{m=0}^{M-1} \dot{W}_{n,m} \dot{S}(n, m) \exp \left[-j \left(\frac{2\pi}{M} \right) ms \right] \right\} \\
&\times \exp \left[-j \left(\frac{2\pi}{N} \right) nr \right] \\
\dot{F}_{s,r} &= U(t) \sum_{m=0}^{M-1} \left\{ \sum_{n=0}^{N-1} \dot{W}_{n,m} \dot{S}(n, m) \exp \left[-j \left(\frac{2\pi}{N} \right) nr \right] \right\} \\
&\times \exp \left[-j \left(\frac{2\pi}{M} \right) ms \right]
\end{aligned} \tag{1.21b}$$



Hình 1.7: Sơ đồ tổng hợp thuật toán hình thành GDHS của AMPS tuyến tính

Trong đó, hai biểu thức (1.21.a) và (1.21.b) chỉ ra các điểm mạnh của AMPS phẳng nhằm nâng cao khả năng phát hiện các *MTDVN*. Nhờ vào phép biến đổi Fourier, AMPS có khả năng tạo đồng thời $GDH_{ph,\Sigma}$ và $GDH_{th,\Sigma}$ độc lập, nhanh chóng, chính xác cho phép ra đa quan sát cả hai mặt phẳng phương vị và góc tầ.

1.3. Phương pháp tạo GDHS nâng cao chất lượng xác định tọa độ mục tiêu.

1. Phương pháp đơn xung đã được xác định là phương pháp đo tọa độ có độ chính xác cao và thường được dùng cho các ra đa điều khiển hỏa lực. Với AMPS có N hàng và M cột, thì tín hiệu ở hướng $\beta_{m.tieu}$, $\varepsilon_{m.tieu}$ tới đầu vào AMPS là:

$$F_{r,s} = \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{m=1}^{M-1} U \times \exp [j(n-1) \frac{2\pi d_x (\sin \varepsilon_{m.tieu}) (\cos \beta_{m.tieu})}{\lambda} \times \exp [j(m-1) \frac{2\pi d_x (\sin \varepsilon_{m.tieu}) (\sin \beta_{m.tieu})}{\lambda}]] \quad (1.22)$$

Việc tạo các tín hiệu tổng-hiệu tương ứng theo hàng và cột sẽ là:

$$\dot{U}_{\Sigma.hang} = \dot{F}_r \times \dot{W}_{\Sigma} \quad \dot{U}_{\Sigma.cot} = \dot{F}_s \times \dot{W}_{\Sigma} \quad (1.27)$$

$$\dot{U}_{\Delta.hang} = \dot{F}_r \times \dot{W}_{\Delta} \quad \dot{U}_{\Delta.cot} = \dot{F}_s \times \dot{W}_{\Delta}$$

Và tọa độ góc mục tiêu được xác định theo biểu thức:

$$\hat{\beta}_{m.tieu} = R^{-1} \left\{ Re \left[\frac{\dot{U}_{\Delta.cot}}{\dot{U}_{\Sigma.cot}} \right] \right\}; \hat{\varepsilon}_{m.tieu} = R^{-1} \left\{ Re \left[\frac{\dot{U}_{\Delta.hang}}{\dot{U}_{\Sigma.hang}} \right] \right\} \quad (1.30)$$

Trong đó: $F_{r,s}$, $\dot{U}_{\Sigma.hang}$, $\dot{U}_{\Delta.hang}$, $\dot{U}_{\Sigma.cot}$, $\dot{U}_{\Delta.cot}$, $\dot{W}_{\Sigma}$ và $\dot{W}_{\Delta}$ - tương ứng là *GDH* của *AMPS*, các tín hiệu tổng và hiệu theo hàng, cột và các hệ số trọng số điều theo hàng cột tương ứng.

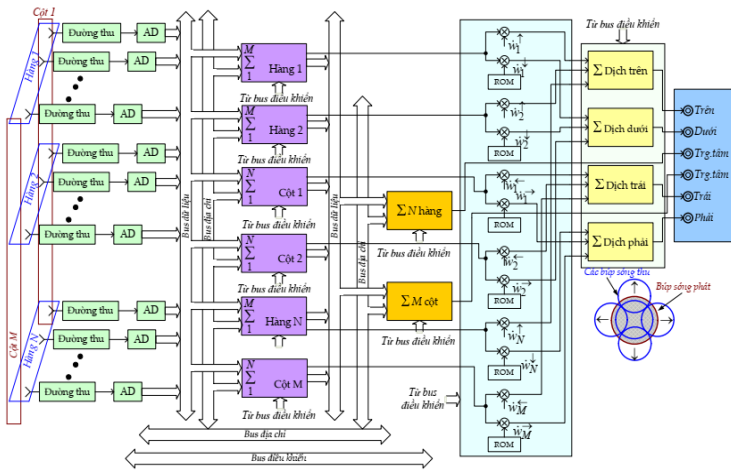
Việc mô phỏng xác định giá trị trung bình sai số đo $\beta_{m.tieu}$, $\varepsilon_{m.tieu}$ với mô hình *AMPS* gồm $[6 \times 6]$ phần tử đã chứng minh rằng: $\sigma_{\hat{\beta}_{m.tieu}}$ $\sigma_{\hat{\varepsilon}_{m.tieu}}$ là hàm tỷ lệ của SNR_{Σ} : với SNR_{Σ} càng tăng thì độ chính xác đo cũng tăng theo. Từ đây, có thể tiên lượng là *khi chất lượng phát hiện được nâng cao nhờ xử lý tích lũy để tăng SNR_{Σ} tại đầu vào bộ phát hiện thì chất lượng (độ chính xác đo) xác định tọa độ cũng tăng theo.*

2. Bản chất các giải thuật tạo *GDHS* là tổ chức liên kết xử lý giữa các *MDTPS* dưới sự điều hành của bộ điều khiển và xử lý trung tâm (*DK&XLTT*). Việc tổng hợp *GDHS* trong bài toán phát hiện *MTDVN* với *GDHS_{ph.Σ}* và *GDHS_{th.Σ}* tích hợp dạng bông hoa được thực hiện theo hai biểu thức hai thuật toán (1.21.a), (1.21.b) chính là tiền đề để tổng hợp phương pháp đơn xung trong *AMPS*.

a) *Tạo GDHS_{ph.Σ}*: Theo N hàng và M cột các *MDTPS*, tín hiệu đường phát sẽ được xử lý bởi theo (1.21 a) và (1.21 b).

b) *Tạo GDHS_{th.Σ}*: Tổng hợp tín hiệu theo hàng với $n = 1 \div N$; lấy tổng các bộ cộng theo hàng trên để tạo búp sóng thu trung tâm của *GDHS_{th.Σ}*. Tín hiệu đầu ra của từng bộ lấy được tổng theo hàng ($n = 1 \div N$) đưa tới hai bộ nhân hàng. Một trong số đó được thực hiện phép nhân để bổ sung lượng pha cần thiết vào tín hiệu dùng cho

việc hình thành búp sóng trên. Bộ nhân hàng còn lại bổ sung lượng pha cần thiết vào tín hiệu dùng cho việc hình thành búp sóng dưới; thực hiện lấy tổng các kết quả của phép nhân hàng ở trên hình thành búp sóng trên và búp sóng dưới trong $GDHS_{th}$. Thực hiện tương tự đối với các cột để tạo các búp sóng phải, trái trong $GDHS_{th}$. Hình 1.14 có trình bày sơ đồ tổng hợp theo phương pháp xử lý song song tạo GDH_{Σ} dạng bông hoa ứng dụng trong ra đa đơn xung nâng cao chất lượng phát hiện và xác định tọa độ các $MTDVN$.



Hình 1.14. Sơ đồ tổng hợp tạo GDH_{Σ} dạng bông hoa nhằm nâng cao chất lượng phát hiện và xác định tọa độ

1.4. Vấn đề xử lý không gian – thời gian tín hiệu yếu phản xạ từ $MTDVN$

Vấn đề xử lý không gian – thời gian tín hiệu yếu phản xạ từ $MTDVN$, thì tích lũy theo thời gian (tích lũy mẫu tín hiệu trong khoảng thời gian tương ứng với thời gian thiết lập mẫu) và theo không gian (tích lũy mẫu tín hiệu thu nhờ vào tăng số lượng các tín hiệu phản xạ về dựa trên tăng thời gian chiếu xạ lại chính là nội dung cần được quan tâm.

1.5. Xây dựng nội dung nghiên cứu nâng cao chất lượng phát hiện $MTDVN$

Nội dung nghiên cứu tại các chương tiếp sau là: “nghiên cứu để

đảm bảo $SNR_{\Sigma}|_{\bar{\sigma}_{m,t} \sim \geq 3[cm^2]} > 1$ tại đầu vào bộ phát hiện và duy trì nó trong toàn bộ thời gian vận hành hệ thống”

1.6. Kết luận chương 1.

Trên cơ sở phân tích đặc điểm của *MTDVN*, chương 1 tập trung xem xét tổng quát các điểm mạnh của *AMPS*, nhằm đề khai thác trong việc phát hiện các mục tiêu có $\bar{\sigma}_{m,t} \sim \geq 4[cm^2]$. Nền tảng lý thuyết của các phương pháp được trình bày trong chương không là mới. Tuy nhiên, việc triển khai tổng hợp các giải pháp kỹ thuật để giải bài toán phát hiện, xác định tọa độ các mục tiêu có $\bar{\sigma}_{m,t} \sim \geq 4[cm^2]$ theo mục tiêu, yêu cầu được trình bày tại phần Mở đầu có thể xem là mới.

Các kết quả nghiên cứu của chương 1 gồm:

1. Trên cơ sở nghiên cứu lý thuyết, *đã ứng dụng phép biến đổi FFT* trong hình thành $GDHS_{ph,\Sigma}$ và $GDHS_{th,\Sigma}$ của *AMPS* đáp ứng yêu cầu xử lý không gian – thời gian tín hiệu. Đặc biệt trong chương, *đã phát triển* sơ đồ dùng xử lý song song tạo $GDHS_{th,\Sigma}$ dạng kim để tăng cường khả năng phát hiện, theo dõi các *MTDVN*; *đã tổng hợp mới cấu trúc mặt mở anten với các MDTPS* để thực hiện xử lý tích lũy thời gian đảm bảo yêu cầu phát hiện các mục tiêu có $\bar{\sigma}_{m,t} \sim \geq 4[cm^2]$.

2. Đã mô tả giải pháp cụ thể tăng cường tích lũy không gian dựa trên việc tăng số lần tích lũy để tăng $SNR_{\Sigma}|_{ra} \gg 1$ đảm bảo khả năng phát hiện *MTDVN*.

3. Đã *ứng dụng giải pháp ra đa đơn xung kỹ thuật số* dùng cho *AMPS* nhằm nâng cao chất lượng đo tọa độ các mục tiêu có $\bar{\sigma}_{m,t} \sim \geq 4[cm^2]$.

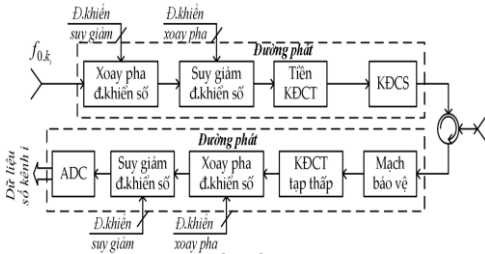
4. Đã xây dựng các nội dung cần thực hiện cho các chương tiếp theo, trong đó việc cải thiện *MDTPS* và bài toán hiệu chuẩn là những nội dung quan trọng đảm bảo $SNR_{\Sigma}|_{ra} \gg 1$ để nâng cao chất lượng phát hiện các *MTDVN*.

CHƯƠNG 2. CẢI TIẾN MÔ ĐUN THU PHÁT SỐ NÂNG CAO KHẢ NĂNG PHÁT HIỆN VÀ XÁC ĐỊNH TỌA ĐỘ CÁC MỤC TIÊU DẤU VẾT NHỎ

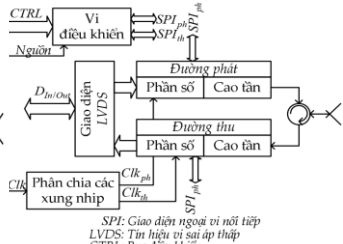
2.1. Bài toán tổng hợp mô hình MDTPS

1. Yêu cầu cao trong hình thành $GDHS_{ph}$ và $GDHS_{th}$ tất yếu dẫn tới sự cần thiết hoàn thiện cấu trúc *MDTPS*. Trong đó, việc đáp ứng các tham số kỹ thuật, trọng lượng, kích thước, năng lượng tiêu

hao đóng vai trò quyết định tới các đặc trưng chủ yếu như: dải tần công tác, công suất tín hiệu thăm dò, cấu trúc đường thu trong việc đảm bảo biểu thức (1.5) v.v. Trên cơ sở phân tích mô hình truyền thống (hình 2.1) và các kết quả nghiên cứu cấu trúc của *MDTP* ứng dụng trong kỹ thuật thông tin kỹ thuật số, có thể đề xuất mô hình *MDTS* của *AMPS* (hình 2.2) dùng trong ra đa. Ưu điểm quan trọng của mô hình *MDTS* đề xuất là loại bỏ được hệ thống chia và truyền tín hiệu cao tần tới từng mô đun, giảm thiểu các lỗi pha và biên độ của tín hiệu, góp phần tăng hiệu quả tích lũy. *MDTPS* đề xuất sử dụng kỹ thuật điều chế và giải điều chế cầu phương (*DCCP*, *GDCCP*) trong tạo tín hiệu phát, thu và xử lý tín hiệu thu. *MDTPS* gồm hai đường thu, phát độc lập. Mỗi đường có hai phần: phần kỹ thuật số và phần tương tự. Bộ vi điều khiển (VĐK) tích hợp trong mô đun thực hiện chức năng tiếp nhận các lệnh điều khiển từ *DK&XLTT* điều hành hoạt động của mọi phần tử trong mô đun.

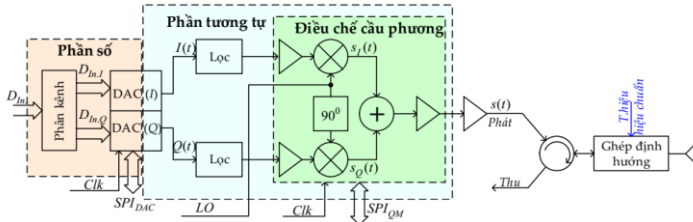


Hình 2.1. Sơ đồ cấu trúc MDTP truyền thống



Hình 2.2. Sơ đồ cấu trúc MDTPS đề xuất

2. Tại phần tương tự của đường phát (hình 2.4), bộ điều chế cầu phương là phần tử quyết định sự phân bố biên độ – pha ở chế độ phát. Hai đầu vào bộ biến đổi số – tương tự thuộc phần số là các dữ liệu *I* và *Q* chứa thông tin về tham số cấu trúc tín hiệu cần tạo.



Hình 2.4. Sơ đồ cấu trúc đường phát trong MDTPS
Với tín hiệu đầu ra của bộ *DCCP* có dạng:

$$s(t) = I(t) \times \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) + Q(t) \times \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) \quad (2.1)$$

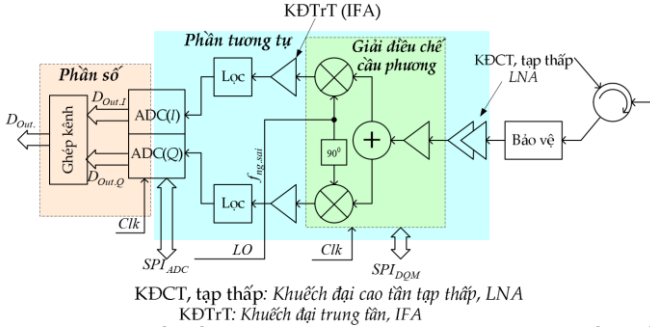
Trong đó, f_0 , φ_0 , $I(t)$ và $Q(t)$ – tương ứng là tần số mang, pha đầu và hai tín hiệu đồng pha và cầu phương.

Nếu lấy chuẩn hóa $I(t) = Q(t) = 1$, thì đối với $MDTPS$ thứ n, m trong $AMPS$, biểu thức (2.1) có dạng:

$$\dot{s}_{nm}(t) = 1(t) \times \exp(2\pi f_0 t + \varphi_{0.nm}) \quad (2.2)$$

Như vậy, việc thay đổi tọa độ góc của búp sóng sẽ phụ thuộc vào sự thay đổi dữ liệu $\varphi_{0.nm}$ được lấy từ bộ nhớ thuộc $DK\&XLTT$.

3. Trong $AMPS$, $GDH_{th.\Sigma}$ được tổng hợp ở dạng các búp sóng số. Để phát hiện các $MTDVN$, một trong những yêu cầu đối với đường thu số là dải động phải lớn. Từ đó, mô hình đường thu số được đề xuất là mô hình mà trong đó, phân tương tự được tổng hợp theo sơ đồ máy thu siêu ngoại sai (hình 2.5)



Hình 2.5. Sơ đồ cấu trúc đường thu trong MDTPS đề xuất.

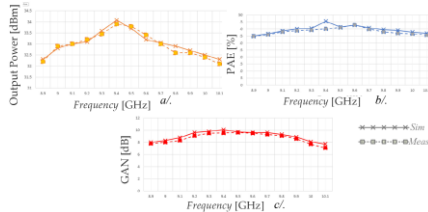
4. Phân tích từ việc tổng hợp cấu trúc hai đường thu phát cho $MDTPS$ đề xuất cho thấy rằng, để giảm thiểu các lỗi pha và biên độ của tín hiệu tác động tới chất lượng tích lũy, cần thiết phải cải tiến, hoàn thiện thiết kế bộ khuếch đại công suất ($KDCS$) trong đường phát và hoàn thiện trong thiết kế đường thu theo mô hình lọc phối hợp toàn phần.

2.2. Nghiên cứu tổng hợp bộ $KDCS$ của đường phát trong MDTPS

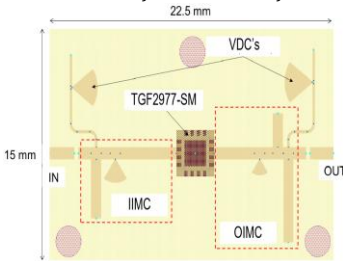
1. Việc thiết kế bộ $UHF KDCS$ hiện đại dựa trên sự kết hợp giữa tính toán và thực nghiệm với các tham số gồm: dải tần làm việc, công suất ra, hệ số khuếch đại, hiệu suất công suất bổ sung (PAE) và đặc biệt là độ méo phi tuyến Nonlinear Distortion (ND). Cách tiếp

cận giải quyết ở đây là ứng dụng công cụ mô phỏng cao tần Keysight ADS kết hợp kỹ thuật kéo nguồn tải (*Source/Load pull*) để thực hiện.

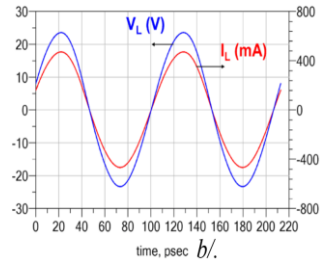
2. Luận án đã sử dụng việc tổng hợp bộ *UHF KDCS* ở băng tần X để minh họa tính đúng đắn của cách tiếp cận. Tại các hình 2.15, 2.16 và 2.17 có trình bày kết quả tổng hợp bộ *UHF KDCS* băng X sử dụng linh kiện TGF2977-SM công nghệ HEMT. Tính đúng đắn của cách tiếp cận trên tạo tiền đề trong bài toán nghiên cứu thiết kế mới phân đo, tự động hiệu chuẩn đường phát.



Hình 2.16. Các kết quả mô phỏng và đo thực nghiệm $P_{Out}|_f$ (a), $PAE|_f$ (b) và $G_P|_f$ của *UHF KDCS* băng X



Hình 2.15. Sơ đồ sắp đặt của *UHF KDCS* băng X



Hình 2.17. Dạng sóng của I và U trên tải ra của *UHF KDCS* băng X

2.3. Tổng hợp cấu trúc đường thu trong *MDTPS* của *AMPS* đảm bảo khả năng phát hiện các *MTDVN*

1. Dựa trên các kết quả tính toán định tính (Bảng 2.4), đã chứng minh rằng: ở tất cả các băng tần của ra đa, công suất tín hiệu phản xạ từ các *MTDVN* (tương ứng với $\sigma_{m.t.}$ nằm trong dải từ $0.01[m^2]$ tới $0.05[m^2]$) luôn nhỏ hơn mức nội tạp phân tương tự.

Trong đó: $P_{noi.tap.}$, $P_{thu.}$ và $P_{thu.MD}$ – tương ứng là công suất nội tạp đường thu, công suất đầu vào máy thu số của ra đa sử dụng anten thông thường và công suất đầu vào đường thu:

$$SNR_{vao.dg.thu}|_p = SNR_{vao.tg.tu}|_p = \frac{P_{thu.MD}}{P_{noi.tap.}} \ll 1 \quad (2.10)$$

$$SNR_{vao.tg.tu}|_U = \frac{U_{thu.MD}}{\sigma_{noi.tap.MD}} \sim (10^{-4} \dots 10^{-3}) \ll 1 \quad (2.12)$$

Bảng 2.4. Kết quả ước lượng định tính $P_{noi.tap.}$, $P_{thu.}$ và $P_{thu.MD}$

Tham số	Băng VHF	Băng L	Băng X
$P_{noi.tap.} [W]$	$\sim (6..9) \times 10^{-15}$	$\sim 10^{-15}$	$\sim (1..4) \times 10^{-19}$
$P_{thu.} [W]$	$\sim 10^{-15}$	$\sim (8..9) \times 10^{-16}$	$\sim (1..3) \times 10^{-15}$
$P_{thu.MD} [W]$	$\sim 10^{-19}$	$\sim 10^{-20}$	$\sim 10^{-21}$

Trong đó, $SNR_{vao.dg.thu}|_p$; $SNR_{vao.tg.tu}|_p$ và $SNR_{vao.tg.tu}|_U$ – tương ứng ký hiệu là tỷ số tín/nội tap theo công suất tại đầu vào đường thu (đầu vào phần tương tự) và tỷ số tín/nội tap theo áp tại đầu vào phần tương tự đường thu.

2. Để giải quyết bài toán phát hiện các $MTDVN$, biểu thức (1.5) có thể viết lại dưới dạng $SNR_{\Sigma} \geq 1$.

Đề xuất giải quyết của luận án về vấn đề đã nêu gồm: giảm thiểu các lỗi về pha và biên độ tín hiệu yếu phản xạ từ các $MTDVN$ dựa trên việc điều chỉnh khái niệm dải động đường thu số:

+ Dải động phần tương tự là dải nằm trong giới hạn cận dưới $U_{c.duoi}$ và cận trên $U_{c.tren}$ của điện áp nội tap tính chuyển đổi tới đầu vào tương ứng với khoảng tuyến tính trong đặc tuyến biên độ

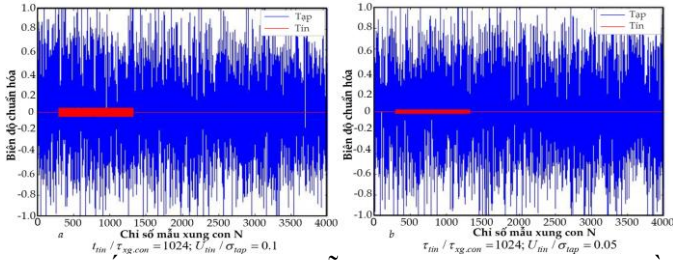
$$D_{ph.tg.tu} = 20 \lg (U_{c.tren}/U_{c.duoi}) \quad (2.14)$$

+ Dải động phần số được là dải danh định đầu vào của ADC ΔU_{ADC} và phải lớn hơn dải thăng giáng ở đầu ra phần tương tự $\Delta U_{ra.tg.tu}$.

$$\Delta U_{ADC} \geq \Delta U_{ra.tg.tu}; h_{ADC} = (\Delta U_{ADC})/2^p \quad (2.15)$$

Trong đó, h_{ADC} là bước lượng tử tương ứng với bit thấp đảm bảo khả năng “nhận diện” được các tín hiệu phản xạ yếu. Đường thu sẽ chuyển từ mô hình lọc tối ưu sang lọc phối hợp toàn phần

3. Để đường thu số xử lý cả mục tiêu thông thường và $MTDVN$, luận án đề xuất điều khiển thích nghi dải động phần tương tự trong đường thu dựa trên việc bổ sung mạch phản hồi từ đầu ra của ADC tới đầu vào phần tử tiền khuếch đại trung tần. Mô hình đề xuất cải thiện cấu trúc đường thu và điều khiển thích nghi dải động



Hình 2.24. Kết quả mô phỏng hỗn hợp cộng tính tín hiệu điều chế theo mã PSK 1024 vị trí và nội tap với $U_{tin}/\sigma_{tap} = 0.1$ (a) và $U_{tin}/\sigma_{tap} = 0.05$ (b)

Tron đó $S_{CSG}(n), N(n) = N_I(n) + jN_Q(n)$ – tương ứng là tín hiệu do và nội tap. Việc xử lý tương quan cho phép xác định lỗi :

$$\delta_U[dB] = 20\lg\left(1 + \frac{18 \times \sigma_{(tap+logr)}}{M} + \frac{6\sqrt{2}\sigma_{(tap+logr)}}{\sqrt{M}}\right) \quad (2.32)$$

$$\delta_\varphi = |Arg(F)| = Arg\left[1 + j \frac{3\sqrt{2}\sigma_{(tap+logr)}}{\sqrt{M}}\right] \quad (2.33)$$

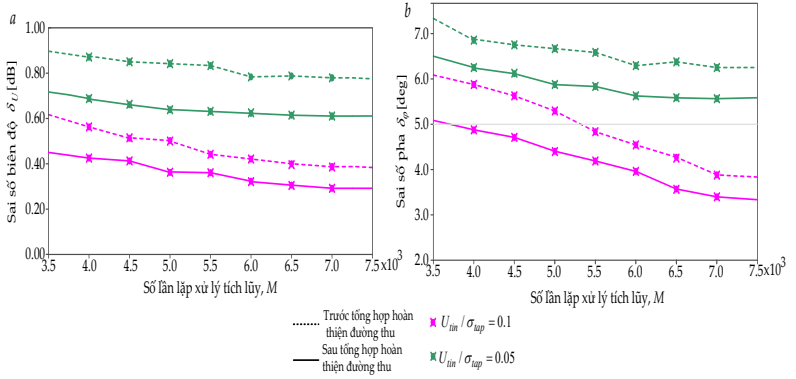
Các bảng 2.3 và 2.4 là kết quả xác định $\delta_U[dB]$ δ_φ trước (*) và sau tổng hợp, hoàn thiện (**) đường thu. Hình 2.25 biểu diễn đồ thị đánh giá sai số biên độ (a), và pha (b) với M trước và sau tổng hợp, hoàn thiện đường thu.

Bảng 2.3. Sai số biên độ

Sai số biên độ [dB]										
$M = (x) \times 10^3$		3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5
$U_{tin}/\sigma_{tap} \sim 0.1$	(*)	0.91	0.88	0.86	0.85	0.83	0.78	0.79	0.78	0.77
	(**)	0.72	0.69	0.68	0.64	0.64	0.63	0.62	0.61	0.61
$U_{tin}/\sigma_{tap} \sim 0.05$	(*)	0.61	0.57	0.52	0.50	0.45	0.43	0.41	0.40	0.38
	(**)	0.44	0.42	0.41	0.38	0.38	0.36	0.35	0.34	0.35

Bảng 2.4. Sai số pha

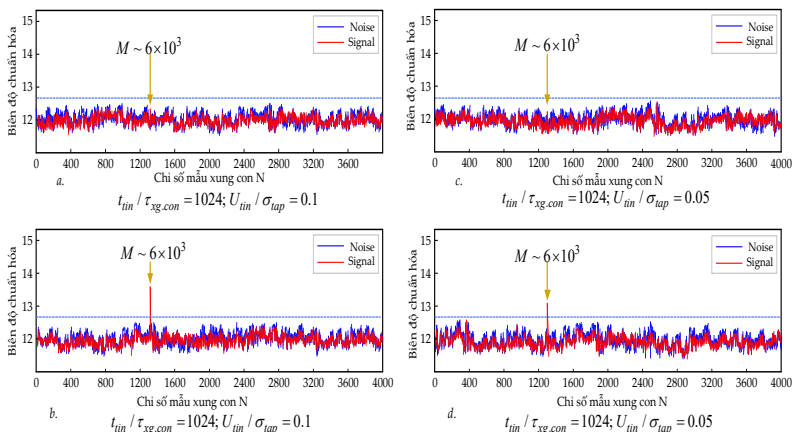
Sai số pha [độ]										
$M = (x) \times 10^3$		3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5
$U_{tin}/\sigma_{tap} \sim 0.1$	(*)	7.67	6.85	6.77	6.66	6.52	6.31	6.46	6.26	6.27
	(**)	6.51	6.25	6.13	5.88	5.86	5.62	5.55	5.61	5.63
$U_{tin}/\sigma_{tap} \sim 0.05$	(*)	6.15	5.84	5.63	5.33	4.77	4.52	4.26	3.89	3.81
	(**)	5.16	4.88	4.72	4.33	4.21	3.93	3.56	3.33	3.24



Hình 2.25. Sai số biên độ và pha tín hiệu trước và sau hoàn thiện đường thu.

Với $U_{tin}/\sigma_{tap} \sim 0.1$, thì $SNR_{vao.dg.thu}|_p \sim 0.01$. Với giả thiết mục tiêu có $\bar{\sigma}_{muc.tieu} \sim 1.0 \text{ m}^2$ và điều kiện $SNR_{vao.dg.thu}|_p = 1$ có thể coi mô phỏng được tiến hành với mục tiêu có $\bar{\sigma}_{muc.tieu} \sim 1 \text{ [dm}^2\text{]}$ (hình 2.25.a). Tương tự, với $U_{tin}/\sigma_{tap} \sim 0.05$, thì mục tiêu sẽ có $\bar{\sigma}_{muc.tieu} \sim 2.5 \text{ [cm}^2\text{]}$ (hình 2.25.b).

Kết quả mô phỏng tích lũy tín hiệu khi $M \sim 6 \times 10^3$ trước và sau khi tổng hợp hoàn thiện đường thu với hai tình huống: $(U_{thu.MD})/(\sigma_{noi.tap.MD}) \sim 0.1$ tương ứng với $\bar{\sigma}_{muc.tieu} \sim 0.01 \text{ [m}^2\text{]}$ (hình 2.27a,b) và $(U_{thu.MD})/(\sigma_{noi.tap.MD}) \sim 0.1$ tương ứng với $\bar{\sigma}_{muc.tieu} \sim 0.025 \text{ [m}^2\text{]}$. (hình 2.27). Như vậy, việc hoàn thiện cấu trúc đường thu theo hình lọc phối hợp (khớp toàn phần) có điều khiển thích nghi dải động đã cho phép làm tăng hiệu quả tích lũy mạch lạc tín hiệu phản xạ yếu. Theo các kết quả mô phỏng minh họa cho thấy, với $\bar{\sigma}_{muc.tieu} \sim 1 \text{ [dm}^2\text{]}$, $M = 6 \times 10^3$, thì $SNR_{MDTPS}|_U \approx 1.7$ và với $\bar{\sigma}_{muc.tieu} \sim 2.5 \text{ [cm}^2\text{]}$ thì $SNR_{MDTPS}|_U \approx 1.1 > 1$. Và khi số lượng các MDTPS là N_{mod} thì SNR_{Σ} tại đầu vào bộ phát hiện có thể tăng tiệm cận tới $(SNR_{MDTPS}) \times 10 \log(N_{mod})$ thỏa mãn $SNR_{\Sigma}|_{\bar{\sigma}_{m.t} \geq 3 \text{ [cm}^2\text{]}} > 1$ đồng thời thỏa mãn yêu cầu nâng cao chất lượng phát hiện và xác định tọa độ.



Hình 2.27. Kết quả mô phỏng tích lũy tín hiệu khi $M \sim 6 \times 10^3$ trước và sau hoàn thiện đường thu theo đề xuất.

2.5. Kết luận chương 2

Chương 2 nghiên cứu nội dung tổng hợp *MDTPS* của hệ thống *AMPS* trong giải quyết bài toán quan trắc, phát hiện các *MTDVN* đã đạt được các kết quả sau:

1. Ứng dụng phương pháp điều chế và giải điều chế cầu phương để hoàn thiện việc tổng hợp cấu trúc *MDTPS* nhằm loại trừ các lỗi không mong muốn do hệ thống chia và truyền tín hiệu từ một nguồn tới đầu của từng mô đun gây ra.

2. Đã tổng hợp sơ đồ cấu trúc đường phát; hoàn thiện phương pháp thiết kế kỹ thuật và nguyên lý bộ *KĐCS* đầu ra đường phát đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật. Đặc biệt trong đó đảm bảo hệ số mấp mô trong đặc tuyến biên độ – tần số của *KĐCS*, $\Delta G|_f$ góp phần giảm lỗi biên độ và pha của tín hiệu phát xạ. kết quả nghiên cứu đã được công bố tại Tạp chí của các trường đại học Nga. Điện tử vô tuyến, 2022, tập 25, số 5, trang 56–66 (*Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 5, pp. 56–66*).

3. Đã hoàn thiện cấu trúc đường thu dựa trên việc điều chỉnh mô hình máy thu số lọc tối ưu sang đường thu số lọc phối hợp hoàn toàn; điều khiển thích nghi dải động phản tương tự đường thu góp phần đảm bảo (không gây lỗi) cho tín hiệu yêu phản xạ từ các *MTDVN* đáp ứng bài toán lọc và tích lũy tín hiệu. Kết quả nghiên cứu ở băng tần L trước và sau khi hoàn thiện đường thu cho thấy, sai số biên độ giảm 2.1 dB còn sai số pha giảm 4.8°.

4. Kết quả nghiên cứu, hoàn thiện cấu trúc đường thu *cho phép sau tích lũy tương can* thỏa mãn điều kiện $SNR_{\Sigma}|_{\bar{\sigma}_{m,t} \sim \geq 3[\text{cm}^2]} > 1$, góp phần nâng cao chất lượng phát hiện và đo tham số tọa độ góc các *MTDVN*. Một phần kết quả nghiên cứu đã được trích đăng trong bài báo: Nguyen Xuan Luong, Thanh Thuy Dang Thi, Phung Bao Nguyen, and Viet Hung Tran (2024), “Receiving Paths Improvement of Digital Phased Array Antennas Using Adaptive Dynamic Range”, *Electronics*, ISSN: 2079-9292, no. 21: 4161, (WoS, Q2).

Việc nâng cao chất lượng phát hiện và xác định tọa độ các *MTDVN* không chỉ mang tính nhất thời mà còn cần được duy trì trong toàn bộ quá trình hoạt động của ra đa. Quá trình này được thực hiện dựa trên việc đo đặc và hiệu chuẩn *AMPS*. Kết quả nghiên cứu nội dung này được trình bày trong chương 3.

CHƯƠNG 3. CÁC GIẢI THUẬT HIỆU CHUẨN ANTEN MẢNG PHA SỐ GÓP PHẦN ĐẢM BẢO KHẢ NĂNG PHÁT HIỆN CÁC MỤC TIÊU DẤU VẾT NHỎ

Nội dung của chương 3 tập trung trình bày các kết quả nghiên cứu một số giải thuật hiệu chuẩn *AMPS* tại cơ sở sản xuất và trong quá trình khai thác, sử dụng, nhằm đảm bảo hiệu chuẩn đạt độ chính xác cao với hệ số khuếch đại tại búp sóng chính lớn, độ lớn các búp phụ thấp góp phần nâng cao chất lượng hình thành $GDHS_{thu,\Sigma}$.

3.1. Tổng hợp giải thuật hiệu chuẩn hệ thống *AMPS* sử dụng phương pháp xác định điểm cực tiểu của hàm hệ số mảng

Việc tổng hợp *GDHS* mà đặc biệt là $GDHS_{th}$ phụ thuộc vào sự đồng bộ của từng *MDTPS* trên không gian mặt mở anten để đảm bảo sai lệch về biên độ và pha của tín hiệu là nhỏ nhất. Giải thuật hiệu chuẩn *AMPS* được nghiên cứu đề xuất trong mục này là phương pháp ước lượng điểm cực tiểu của hàm hệ số mảng.

Bản chất phương pháp tìm điểm cực tiểu của hàm hệ số mảng là ước lượng độ bù pha γ_m theo phương pháp tìm điểm cực tiểu (*xác định điểm cực trị của hàm*), cần xác định góc γ_i mà ở đó, hàm hệ số mảng $AF_N \rightarrow \min$.

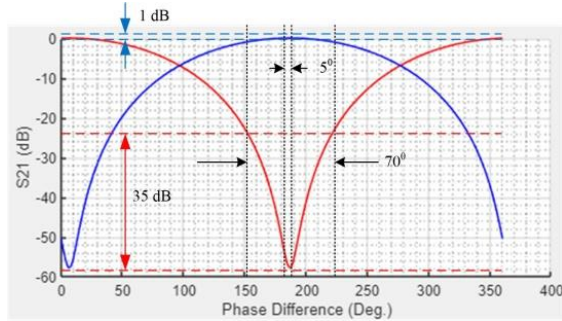
$$Y_1 = Y_{i_{\min AF_N(\gamma)}} + 180^\circ, \gamma = \overline{0^\circ \ 360^\circ} \quad (3.6)$$

Phương pháp rotating-element electric-field vectors (REV) đề xuất được áp dụng cho *AMPS* và so sánh với phương pháp vector trường điện phân tử quay truyền thống. Kiểm chứng thực nghiệm mô hình toán học của phương pháp đề xuất cho thấy: phương pháp tìm điểm cực tiểu xác định độ lệch pha chính xác hơn phương pháp tìm

điểm cực đại của hệ số mảng; phương pháp đề xuất cho thấy cự ly phát hiện tốt hơn trên mỗi lần thay đổi pha tương ứng với độ phân giải cao hơn 35 dB (hình 3.9). Phạm vi lỗi của phương pháp tìm điểm cực tiểu và cực đại lần lượt là 5^0 và 70^0 . Đỉnh của búp sóng tổng khi sử dụng phương pháp tìm điểm cực tiểu cao hơn phương pháp tìm điểm cực đại là 3,7 ... 4,1 dB (Bảng 3.1).

Bảng 3.1. Dữ liệu kết quả đo mức khuếch đại đỉnh (dB) của GDH_{ph} trong phẳng E theo ba kịch bản

PP. đo	Chỉ số lần đo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
K.h.chuẩn	-9.8	-9.6	-9.5	-9.7	-9.8	-9.6	-9.7	-9.7	-9.6	-9.8
REVmax	-4.9	-4.8	-5.0	-4,1	-5.0	-4.9	-5.0	-5.1	-4.8	-4.9
REVmin	-1.0	-0.9	-1.1	-1.2	-1.0	-1.0	-0.9	-1.0	-1.1	-1.0



Hình 3.9. Kết quả đo mức công suất thu phụ thuộc vào độ bù pha của anten 1 và 2 với: REV_{max} (màu xanh nước biển) và REV_{min} (màu đỏ).

3.2. Hiệu chuẩn *AMPS* tại vị trí triển khai theo giải thuật tự tương quan

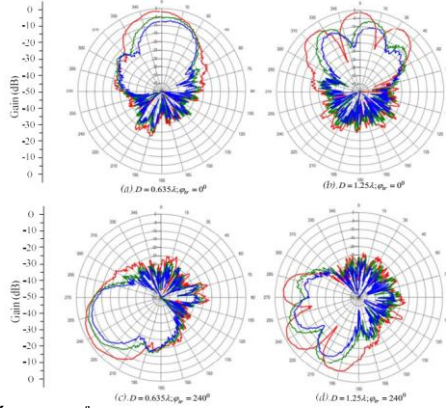
Mục này đề xuất phương pháp hiệu chuẩn trường xa mới dựa trên thuật toán tự tương quan (TTQ) cho phép giảm thiểu tác động của môi trường nhiễu phức tạp trong quá trình triển khai tại vị trí làm việc đối với đầu đo ra đa. Nguyên lý cơ bản của phương pháp hiệu chuẩn trường xa dựa trên thuật toán *TTQ* là xác định trọng số cần bù cho sự sai lệch về pha và biên độ sau khi tìm được giá trị cực đại của hàm *TTQ* của tín hiệu nhận được tại mỗi kênh thu và tín hiệu tham chiếu. Trọng số a_i cần bù cho tín hiệu đầu vào khi lấy tín hiệu tham chiếu làm kênh chuẩn được xác định như sau:

$$\begin{aligned}
a_i &= \frac{w_0}{w_i} = \frac{\max(X_0(t))}{\max(X_i(t))} = \frac{\max(x_0(t) \times x_0(t))}{\max(x_i(t) \times x_0(t))} = \\
&= \frac{\max(s_0(t) \times s_0(t) + s_0(t) \times n_0(t) + n_0(t) \times s_0(t) + n_0(t) \times n_0(t))}{\max(s_i(t) \times s_0(t) + s_i(t) \times n_0(t) + n_i(t) \times s_0(t) + n_i(t) \times n_0(t))} = \\
&= \frac{\max(s_0^2(t) + 2s_0(t) \times n_0(t) + n_0^2(t))}{\max(s_i(t) \times s_0(t) + s_i(t) \times n_0(t) + n_i(t) \times s_0(t) + n_i(t) \times n_0(t))}.
\end{aligned} \tag{3.10}$$

Trong đó, $X_i(t)$ là hàm TTQ của tín hiệu thu được $x_i(t)$ và tín hiệu tham chiếu $x_0(t)$; $x_i(t) = s_i(t) + n_i(t)$, $s_i(t)$ – tín hiệu có ích dạng phức ở chân tử thứ i tại thời điểm t , $i = 1, 2, \dots, N$; $n_i(t)$ – nhiễu; $x_0(t) = s_0(t) + n_0(t)$, $s_0(t)$ – tín hiệu tham chiếu dạng phức tại thời điểm t ; $n_0(t)$ – nội tạp được tạo ra trong quá trình tạo tín hiệu và truyền tín hiệu đến bộ nhân.

Khi đó, hệ số mảng ở đầu ra bộ cộng có dạng sau:

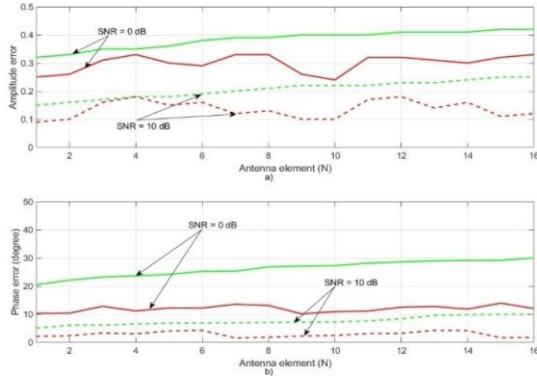
$$\begin{aligned}
AF_i &= Y_1(t) + Y_2(t) + Y_3(t) + \dots + Y_N(t) = \sum_{i=1}^N Y_i(t) = \\
&= \sum_{i=1}^N \frac{(s_i(t) \times s_0(t) + s_i(t) \times n_0(t) + n_i(t) \times s_0(t) + n_i(t) \times n_0(t)) \times \max(s_0^2(t) + 2s_0(t) \times n_0(t) + n_0^2(t))}{\max(s_i(t) \times s_0(t) + s_i(t) \times n_0(t) + n_i(t) \times s_0(t) + n_i(t) \times n_0(t))}.
\end{aligned} \tag{3.12}$$



Hình 3.18. Kết quả tổng hợp $GDH_{thu,\Sigma}$ sau hiệu chuẩn mảng 2 chân tử bằng các phương pháp khác nhau với các giá trị D và góc φ_{tr} (TTQ – đen; $REVmin$ – xanh lá cây; $REVmax$ – xanh nước biển).

Phương pháp đề xuất được so sánh với các phương pháp vector trường điện phân tử quay truyền thống, bao gồm việc xác định các điểm tổng vector cực đại $REVmax$ và cực tiểu $REVmin$ (Hình 3.17 và 3.18). Hệ thống đề xuất được thực hiện ở tần số 3 GHz. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm cho thấy phương pháp TTQ xác định biên

độ và độ bù pha chính xác hơn các phương pháp truyền thống. Độ lợi đỉnh đo được của búp sóng trong mặt phẳng E tăng từ 7,83 lên 8,37 dB và 3,57 lên 4,36 dB so với các phương pháp REVmax và REVmin, và lỗi pha được cải thiện tương ứng từ 47° lên $55,48^\circ$ và $19,43^\circ$ lên $29,16^\circ$.



Hình 3.19. Kết quả hiệu chuẩn khi sử dụng các phương pháp khác nhau: phương pháp đề xuất (đỏ) và phương pháp thông thường (xanh lá cây).

3.3. Giải thuật tự động hiệu chuẩn *AMPS* thời gian thực

1. Điểm hạn chế chung của các phương pháp đã công bố là quan tâm nhiều tới sự cân bằng giữa hai kênh I và Q của đường thu. Ngoài ra, các vấn đề về hiệu chuẩn thời gian thực chưa được đặt ra một cách rõ ràng.

2. Giải thuật tự động hiệu chuẩn *AMPS* thời gian thực nhằm đảm bảo khả năng phát hiện các *MTDVN* theo nguyên lý tự động căn chỉnh phân bố biên độ – pha của trường điện từ trên mặt mở anten như sau: tại từng đường thu, thực hiện nhân biên độ phức của tín hiệu đầu ra với hệ số hiệu chuẩn phức được ước lượng cho chính đường thu đó. Hệ số hiệu chuẩn được xác định dựa trên so sánh tín hiệu đầu ra của các tất cả *MDTPS* với tín hiệu đầu ra của *MDTPS* tham chiếu “ảo” với các dữ liệu được theo tính toán lý thuyết.

Với tín hiệu mã ma níp pha M vị trí để ước lượng chính xác các tham số hệ số hiệu chuẩn, tín hiệu đầu ra đường thu phải được xử lý tích lũy theo tham số $M_{v.tr}$. Việc tạo giá trị hiệu chuẩn của biên độ phức tín hiệu đầu ra đối với từng mô đun được hình thành bằng cách nhân biên độ phức tín hiệu ra với hệ số hiệu chuẩn tương ứng. Giá trị biên độ phức đã được hiệu chuẩn của tín hiệu đi tới đầu vào đường thu đối với *MDTPS* thứ i được ký hiệu là $S_i^{sau.h.ch}$ và có dưới dạng:

$$S_i^{sau.h.ch} = |\dot{S}_0| \exp(j\varphi_0) \quad (3.31)$$

Hoặc:

$$\begin{aligned} Re(S_i^{sau.h.ch}) &= |\dot{S}_0| \times \cos(\varphi_0); Im(S_i^{sau.h.ch}) \\ &= |\dot{S}_0| \times \sin(\varphi_0) \end{aligned} \quad (3.32)$$

Trong đó, $|\dot{S}_0|$ và φ_0 – tương ứng là biên độ và pha tín hiệu đã tích lũy đối với đường thu. Kết quả nghiên cứu ở băng tần L cho thấy lỗi biên độ giảm còn 3,79 dB, lỗi pha giảm còn 5,67°.

3.4. Kết luận chương 3

1. Đã phân tích và lựa chọn phương pháp hiệu chuẩn min of rotating-element electric-field vectors – REV_{min} để thực hiện hiệu chuẩn *AMPS* tại cơ sở sản xuất (nhà máy). Xây dựng mô hình toán học của phương pháp REV_{min} . Kết quả mô phỏng và thực nghiệm ở băng tần L cho thấy: phương pháp REV_{min} xác định sai số pha chính xác hơn phương pháp REV_{max} ; phương pháp REV_{min} có phạm vi phát hiện tốt hơn trên mỗi lần thay đổi pha tương ứng với độ phân giải cao hơn 35 dB; sai số pha của phương pháp REV_{min} là 5°, còn với phương pháp REV_{max} – 70°; mức khuếch đại đỉnh của búp sóng tổng bằng phương pháp REV_{min} cao hơn REV_{max} là 3,7...4,1 dB. Kết quả nghiên cứu đã được tổng hợp dưới dạng bài báo khoa học “Calibration of phased array antenna with the minimum point finding method of the array factor”, *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. V.38, N.2, pp. 854–864, ISSN: 2502-4752, Scopus, Q3.

2. Đã ứng dụng phương pháp hiệu chuẩn trường xa rotating-element electric-field vectors – REV bằng giải thuật TTQ để giải quyết bài toán đo, hiệu chuẩn *AMPS* tại cơ sở sản xuất và đặc biệt là tại vị trí triển khai có tính tới tác động của các nguồn nhiễu ngoài. Sai số biên độ và pha của kết quả hiệu chuẩn khi sử dụng phương pháp TTQ đề xuất đảm bảo theo tiêu chuẩn kỹ thuật tương ứng là dưới 1 dB và 5°. Kết quả nghiên cứu đã được công bố ở các bài báo khoa học: “Phased Array Antenna Calibration Based on Autocorrelation Algorithm” đăng tại tạp chí *Sensors* 2024, 24(23), 7496; hạng Q1; “Autocorrelation Method of Phased Array Antenna Calibration Based on Far-Field Measurement System”. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2025. 28 (3):106-115.

3. Đã tổng hợp giải thuật tự động đo, hiệu chuẩn bên trong đối với đường thu của các *MDTPS* mà đã được hoàn thiện về cấu trúc đường phát, đường thu đã được trình bày ở chương 2. Lược đồ quá trình tự động đo, hiệu chuẩn đường thu (hình 3.20) và sơ đồ cấu trúc

hệ con tự động hiệu chuẩn đường thu (*hình 3.21*) đảm bảo duy trì tốt khả năng phát hiện và xác định tọa độ của tất cả các mục tiêu có $\bar{\sigma}_{m,t} \sim \geq 4[\text{cm}^2]$ trong quá trình vận hành, khai thác chiến đấu. Kết quả nghiên cứu đã được công bố tại bài báo “Automatic calibration of the receiving line of information and control systems in real time” của tạp chí Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and mechatronics. 2025, Issue 3, Volume 25, pp. 554-564 (Scopus, Q4).

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

AMP nói chung và *AMPS* nói riêng là thành quả của sự phát triển khoa học kỹ thuật, công nghệ trong lĩnh vực điện tử và vô tuyến điện tử. Và là thành tố quyết định hình thành các tổ hợp vô tuyến điện tử đa chức năng hiện đại. Nhờ khả năng hình thành $GDHS_{th}$, $GDHS_{ph}$ một cách độc lập, với hình dạng, vị trí không gian khác nhau các hệ thống ra đa đa chức năng đã và đang giải quyết được các nhiệm vụ bảo vệ vùng trời quốc gia. Đề tài luận án “*Nghiên cứu nâng cao khả năng phát hiện và xác định tọa độ mục tiêu dấu vết nhỏ cho hệ thống định vị vô tuyến sử dụng anten mảng pha*” là kết quả của quá trình tổng hợp nghiên cứu của nghiên cứu sinh không chỉ giới hạn trong thời gian ba năm là mà đã kéo dài trong gần như toàn bộ quá trình hoạt động thực tiễn tại đơn vị công tác.

Do nội dung nghiên cứu liên quan tới gần như toàn bộ các thành phần cơ bản của đối tượng nghiên cứu – hệ thống *AMPS* trong giải bài toán phát hiện các *MTDVN*, nên cách tiếp cận giải quyết cũng theo hướng hệ thống trải đều từ vấn đề hình thành $GDHS$; cải tiến, hoàn thiện cấu trúc đường thu đến vấn đề hiệu chuẩn *AMPS* tại cơ sở chế tạo, cũng như trong quá trình vận hành, khai thác. Các kết quả nghiên cứu nhằm giải quyết một số điểm tồn tại mang tính nguyên tắc của toàn hệ thống khi đối phó với lớp các *MTDVN*. Các kết quả nghiên cứu quan trọng của luận án đã công bố tại các tạp chí chuyên ngành trong và ngoài nước có uy tín.

A. Một số đóng góp mới của luận án

Từ các kết quả nghiên cứu, một số giải pháp kỹ thuật đã đề xuất, luận án tổng hợp lại thành một số đóng góp mới như sau:

1. Hoàn thiện việc tổng hợp, hình thành các dạng khác nhau của $GDHS_{th,\Sigma}$, $GDHS_{ph,\Sigma}$ theo thời gian thực. Ứng dụng phương pháp đơn xung kỹ thuật số đối với *AMPS* trong việc nâng cao chất lượng xác định tọa độ góc các mục tiêu, kể cả các *MTDVN*.

2. Cải tiến cấu trúc *MDTPS* với đường thu được hoàn thiện theo mô hình lọc phối hợp toàn phần nhằm đảm bảo không bị mất mát, méo dạng các tín hiệu yếu phản xạ từ *MTDVN* để đảm bảo điều kiện $SNR_{\Sigma} | \bar{\sigma}_{m,t} \sim \geq 4 [\text{cm}^2] > 1$ góp phần nâng cao chất lượng phát hiện các loại mục tiêu.

3. Đề xuất mới phương pháp hiệu chuẩn *AMPS* tại cơ sở sản xuất và tại vị trí triển khai trong môi trường nhiễu ngoài nhằm đảm bảo các tham số của búp sóng chính theo yêu cầu kỹ thuật và giảm thiểu các búp sóng phụ nhằm nâng cao và duy trì chất lượng phát hiện và xác định tham số tọa độ của các mục tiêu nói chung và *MTDVN* nói riêng.

4. Đề xuất mới phương pháp tự động đo, hiệu chuẩn đường thu của các *MDTPS* (sau hoàn thiện cấu trúc) để duy trì điều kiện phát hiện $SNR_{\Sigma} | \bar{\sigma}_{m,t} \sim \geq 4 [\text{cm}^2] > 1$ trong quá trình khai thác, vận hành góp phần nâng cao chất lượng phát hiện và xác định tham số tọa độ góc.

Các kết quả nghiên cứu lý thuyết đều được minh chứng định lượng thông qua mô phỏng và thử nghiệm thực tế. Các kết quả nghiên cứu trên đều thực hiện theo quan điểm ra đa đa chức năng được thiết kế theo mô hình hệ thống tích hợp cấu hình mềm.

B. Định hướng nghiên cứu tiếp theo

Việc chế tạo mới, cải tiến hoàn thiện hệ thống *AMPS* là hoạt động tất yếu trong lực lượng vũ trang nói chung và bộ đội Phòng không quốc gia nói riêng. Một số định hướng nghiên cứu tiếp theo phát triển trên cơ sở luận án là:

+ Khảo sát, mở rộng dải tần công tác trong quá trình hoàn thiện và đưa các kết quả nghiên cứu vào sản phẩm thực theo quy mô yêu cầu.

+ Tiếp tục hoàn thiện, tối ưu các phần mềm hệ thống và các thuật toán xử lý theo định hướng sử dụng trí tuệ nhân tạo (*AI*).

+ Tiếp tục nghiên cứu, hoàn thiện bài toán tự động đo, hiệu chuẩn đối với các đường phát để tiến tới hình thành hệ con tự động hiệu chuẩn bên trong của các *MDTPS* theo thời gian thực.

+ Ứng dụng phát triển định hướng thiết kế, chế tạo và tổng hợp các trang thiết bị đầu đo ra đa theo cách tiếp cận cấu hình mềm nhằm phát huy và mở rộng khả năng đa chức năng của chúng trong việc ứng phó với nhiều chủng loại đối tượng cần quan trắc khác nhau./.