

THỰC NGHIỆM, KIỂM CHỨNG MÔ HÌNH UNET-ROOTMUSIC ĐỊNH HƯỚNG NGUỒN TÍN HIỆU VÔ TUYẾN

EXPERIMENT AND VERIFICATION OF THE UNET-ROOTMUSIC MODEL FOR DIRECTION OF ARRIVAL ESTIMATION OF RADIO SIGNAL

Nguyễn Duy Thái^{1,*}

DOI: <https://doi.org/10.57001/huivh5804.2026.049>

TÓM TẮT

Để loại bỏ ảnh hưởng của các yếu tố như: nhiễu, các khiếm khuyết về cấu hình phần cứng do lỗi trong quá trình sản xuất và thiết đặt mảng ăng ten... lên độ chính xác định hướng nguồn tín hiệu, các mô hình ứng dụng mạng nơ ron học sâu đã được nghiên cứu, đề xuất. Trong đó mô hình kết hợp mạng nơ ron hình chữ U (UNet) với thuật toán rootMUSIC (UNet-rootMUSIC) có nhiều ưu điểm nổi bật: UNet đóng vai trò như bộ tự động điều chỉnh sai số, mã hóa và giải mã ma trận hiệp phương sai để đưa về ma trận lý tưởng (loại bỏ các sai số), trong khi đó rootMUSIC có khả năng tính toán trực tiếp góc DOA với độ phân giải siêu cao. Tuy nhiên, việc đánh giá khả năng và hiệu quả khi ứng dụng các mô hình học sâu nói chung, UNet-rootMUSIC nói riêng đang dựa trên dữ liệu được tạo ra bằng mô phỏng, chưa có thực nghiệm kiểm chứng với dữ liệu đo đạc thực tế. Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu xây dựng mô hình đo đạc tạo bộ dữ liệu, thực nghiệm, kiểm chứng mô hình UNet-rootMUSIC với dữ liệu đo đạc thực tế, so sánh với hai phương pháp ESPRIT và rootMUSIC. Theo đó, mảng anten tuyến tính 4 phần tử cách đều nhau nửa bước sóng được sử dụng. Kết quả cho thấy mô hình UNet-rootMUSIC cho độ chính xác ước lượng DOA rất tốt với tập dữ liệu đo đạc. Ngoài ra, tập dữ liệu đo đạc có thể được sử dụng cho việc nghiên cứu, phát triển, kiểm chứng các mô hình, thuật toán khác trong định hướng nguồn tín hiệu.

Từ khóa: *Ước lượng hướng đến, mảng ăng ten tuyến tính, tín hiệu vô tuyến, đo đạc thực nghiệm, UNet-rootMUSIC.*

ABSTRACT

To eliminate the influence of factors such as noise and hardware imperfections stemming from errors in the manufacturing and setup of the antenna array on the accuracy of signal source localization, deep neural network models have been studied and proposed. Among them, the model combining a U-shaped neural network (UNet) with the rootMUSIC algorithm, named UNet-rootMUSIC, exhibits several outstanding advantages: UNet functions as an auto-encoder that denoises and corrects the covariance matrix by encoding and decoding it into its ideal form, while rootMUSIC directly computes the Direction of Arrival (DOA) angles with very high resolution. However, the evaluation of the performance and effectiveness of deep learning models in general, and UNet-rootMUSIC in particular, has relied on simulation-generated data, lacking experimental verification with real-world measurement data. This paper presents the results of building a measurement setup to create a dataset, experimentally validating the UNet-rootMUSIC model with real-world measurement data, and comparing it with the ESPRIT and rootMUSIC methods. Accordingly, a 4-element uniform linear array with half-wavelength inter-element spacing was used. The results demonstrate that the UNet-rootMUSIC model achieves excellent DOA estimation accuracy with the measured dataset. Furthermore, this dataset can be utilized for the research, development, and validation of other models and algorithms for signal source localization.

Keywords: *Direction of Arrival (DOA) Estimation, Uniform Linear Array (ULA), radio signal, experimental measurement, UNet-rootMUSIC.*

¹Viện Công nghệ thông tin - Điện tử, Viện Khoa học và Công nghệ Quân sự

*Email: ndthai03@gmail.com

Ngày nhận bài: 05/11/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 20/12/2025

Ngày chấp nhận đăng: 30/3/2026

KÝ HIỆU

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
θ	độ	Hướng (góc) đến trong mặt phẳng phương vị
H		Phép chuyển vị liên hiệp phức Hamilton
A		Ma trận định hướng
I		Ma trận đơn vị
R		Ma trận hiệp phương sai

CHỮ VIẾT TẮT

DOA	Hướng đến
ULA	Mảng ăng ten tuyến tính đồng đều
ADC	Bộ biến đổi tương tự - số
RMSE	Sai số quân phương

1. GIỚI THIỆU

Trong lĩnh vực giám sát vô tuyến, trinh sát - tác chiến điện tử, hướng đến (DOA: Direction of Arrival) của nguồn tín hiệu là một trong những tham số đặc biệt quan trọng, nó cho phép xác định hướng, vị trí của nguồn phát trong phạm vi quan sát [1]. Có rất nhiều phương pháp, thuật toán, mô hình được xây dựng, áp dụng cho bài toán định hướng nguồn tín hiệu vô tuyến, trong đó phương pháp ứng dụng mạng nơ ron học sâu đang nhận được sự quan tâm rộng rãi của cộng đồng nghiên cứu [2, 3]. Với tính chất và ưu thế từ việc học tập, phân tích, trích chọn các đặc trưng của dữ liệu, các mô hình mạng nơ ron có khả năng thích ứng rất tốt với dữ liệu mà không cần thông tin tiên nghiệm về mảng ăng ten hay đường truyền. Do đó, nó có thể tự động hiệu chỉnh các sai số để cho kết quả định hướng chính xác hơn. Điều này rất có ý nghĩa vì trong thực tế, các yếu tố như: nhiễu, các khiếm khuyết về cấu hình phần cứng do lỗi trong quá trình sản xuất, thiết đặt mảng ăng ten [4]... luôn tồn tại, dẫn đến các sai lệch về pha và biên độ tín hiệu thu nhận, từ đó gây ra sai số về độ chính xác ước lượng DOA.

Hiện nay, việc đánh giá khả năng và hiệu quả khi ứng dụng các mô hình mạng nơ ron cho bài toán định hướng nguồn tín hiệu vô tuyến chủ yếu dựa trên dữ liệu được tạo ra bằng mô phỏng, với đầu vào được mô hình hóa bằng lý thuyết thu tín hiệu mảng. Có rất ít mô hình được thực nghiệm kiểm chứng với dữ liệu đo đạc thực tế. Trong khi đó, để đưa các mô hình vào áp dụng trong thực tiễn thì một vấn đề quan trọng không thể bỏ qua đó là thực nghiệm, kiểm chứng với dữ liệu thực tế. Điều này dễ hiểu

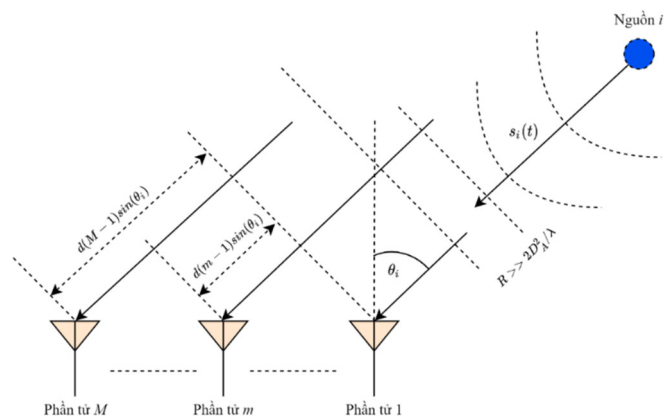
bởi vì các yếu tố tác động từ bên ngoài khi triển khai trong thực tế là khó kiểm soát và chưa được đánh giá trong mô phỏng.

UNet-rootMUSIC [5] là mô hình có nhiều ưu điểm khi kết hợp được thế mạnh của mạng nơ ron Unet và thuật toán rootMUSIC cho bài toán định hướng nguồn tín hiệu vô tuyến. Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu xây dựng mô hình thực nghiệm, đo đạc tạo bộ dữ liệu, kiểm chứng mô hình UNet-rootMUSIC. Mảng anten tuyến tính 4 phần tử được sử dụng, khoảng cách 2 phần tử ăng ten liền kề là $\lambda/2 \approx 13,7\text{cm}$. Một nguồn phát tín hiệu được đo đạc từ góc -60° đến 60° với bước cách 1° . Dữ liệu đo được xử lý bởi mô hình UNet-rootMUSIC, trong đó: UNet có vai trò biến đổi ma trận hiệp phương sai tín hiệu thu được thành ma trận hiệp phương sai tiệm cận lý tưởng, trước khi áp dụng thuật toán rootMUSIC để ước lượng hướng (góc) đến. Góc ước lượng sẽ được đối sánh, kiểm tra sai số so với góc đúng (góc thực tế được xác định bằng thước đo góc) để đánh giá khả năng và hiệu quả của mô hình.

2. MÔ HÌNH UNET-ROOTMUSIC ĐỊNH HƯỚNG NGUỒN TÍN HIỆU VÔ TUYẾN

2.1. Mô hình thu tín hiệu mảng ăng ten

Xem xét mảng ăng ten tuyến tính đồng đều (ULA: Uniform Linear Array) bao gồm M phần tử được sắp xếp đều nhau trên một đường thẳng như minh họa trong hình 1.



Hình 1. Mô hình thu tín hiệu mảng ăng ten ULA

Giả thiết có P nguồn tín hiệu truyền tới mảng ăng ten ULA trong mặt phẳng phương vị ở các góc lần lượt là $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_P$.

2.1.1. Trường hợp lý tưởng

Tín hiệu thu được tại đầu ra của mảng là [6]:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}(\theta)\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \tag{1}$$

trong đó, $\mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_P(t)]^T$ là véc-tơ tín hiệu của P nguồn, $\mathbf{n}(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_M(t)]^T$ là véc-tơ của nhiễu tạp

tương ứng với M kênh thu, $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_M(t)]^T$ là véc-tơ tín hiệu đầu ra, $\mathbf{A}(\theta)$ là ma trận định hướng của mảng, được biểu diễn như sau [6]:

$$\mathbf{A}(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ e^{-j\frac{2\pi d_1 \sin \theta_1}{\lambda}} & e^{-j\frac{2\pi d_1 \sin \theta_2}{\lambda}} & \dots & e^{-j\frac{2\pi d_1 \sin \theta_p}{\lambda}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-j\frac{2\pi d_{M-1} \sin \theta_1}{\lambda}} & e^{-j\frac{2\pi d_{M-1} \sin \theta_2}{\lambda}} & \dots & e^{-j\frac{2\pi d_{M-1} \sin \theta_p}{\lambda}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Tại máy thu, tín hiệu từ các phần tử ăng ten sẽ được chuyển từ tương tự sang số để xử lý. Gọi T_s là chu kỳ lấy mẫu của bộ biến đổi tương tự sang số (ADC: Analog to Digital Converter), đầu ra của mảng ăng ten có thể biểu diễn như sau:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{x}_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1(T_s) & x_1(2T_s) & \dots & x_1(NT_s) \\ x_2(T_s) & x_2(2T_s) & \dots & x_2(NT_s) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_M(T_s) & x_M(2T_s) & \dots & x_M(NT_s) \end{bmatrix} \quad (3)$$

ở đây, N là số lượng mẫu tín hiệu trong một cửa sổ tín hiệu. Tín hiệu thu \mathbf{x} là ma trận số có kích thước $M \times N$. Ma trận hiệp phương sai của các tín hiệu đầu ra thu bởi mảng ăng ten được xác định như sau:

$$\mathbf{R}_x = \mathbf{x}\mathbf{x}^H = \mathbf{A}\mathbf{s}\mathbf{s}^H\mathbf{A}^H + \mathbf{R}_n = \mathbf{A}\mathbf{R}_s\mathbf{A}^H + \sigma_n^2\mathbf{I} \quad (4)$$

Trong đó: \mathbf{x}^H là ma trận chuyển vị liên hiệp phức Hamilton của ma trận \mathbf{x} . \mathbf{R}_s và \mathbf{R}_n lần lượt là ma trận hiệp phương sai của tín hiệu và nhiễu, σ_n^2 đại diện cho công suất trung bình của nhiễu, \mathbf{I} là ma trận đơn vị. Ma trận \mathbf{R}_x trong trường hợp mảng lý tưởng này là dữ liệu đầu ra huấn luyện mô hình UNet-rootMUSIC định hướng nguồn tín hiệu vô tuyến.

2.1.2. Trường hợp trong thực tế

Trong thực tế, hệ thống thu nhận tín hiệu nói chung, mảng ăng ten nói riêng không tránh khỏi các sai lệch nảy sinh trong quá trình sản xuất, thiết đặt, sự không đồng nhất giữa các phần tử ăng ten, tuyến thu và các tác động bất định khác từ môi trường bên ngoài. Các yếu tố này gây ra các sai số không lường trước trong quá trình ước lượng DOA. Cụ thể là làm sai lệch đáp ứng mảng, dẫn đến ma trận định hướng bị thay đổi. Khi đó, tín hiệu thu được bởi mảng ăng ten trong thực tế:

$$\hat{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(\theta, \varepsilon)\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (5)$$

Trong đó, $\mathbf{A}(\theta, \varepsilon)$ là ma trận định hướng của mảng có sai số, ε là hệ số đại diện cho các sai số. Ma trận hiệp phương sai của tín hiệu thu được:

$$\hat{\mathbf{R}}_x = E\{\hat{\mathbf{x}}(t)\hat{\mathbf{x}}(t)^H\} = \mathbf{A}(\theta, \varepsilon)\mathbf{R}_s\mathbf{A}(\theta, \varepsilon)^H + \sigma^2\mathbf{I}_M \quad (6)$$

So sánh phương trình (6) với phương trình (4) có thể thấy, ma trận $\hat{\mathbf{R}}_x$ có sai khác so với ma trận \mathbf{R}_x là do sai số hệ thống ε . Nếu sử dụng trực tiếp $\hat{\mathbf{R}}_x$ làm đầu vào các thuật toán ước lượng thì góc ước lượng được sẽ có sai số.

2.2. Mô hình UNET-ROOTMUSIC

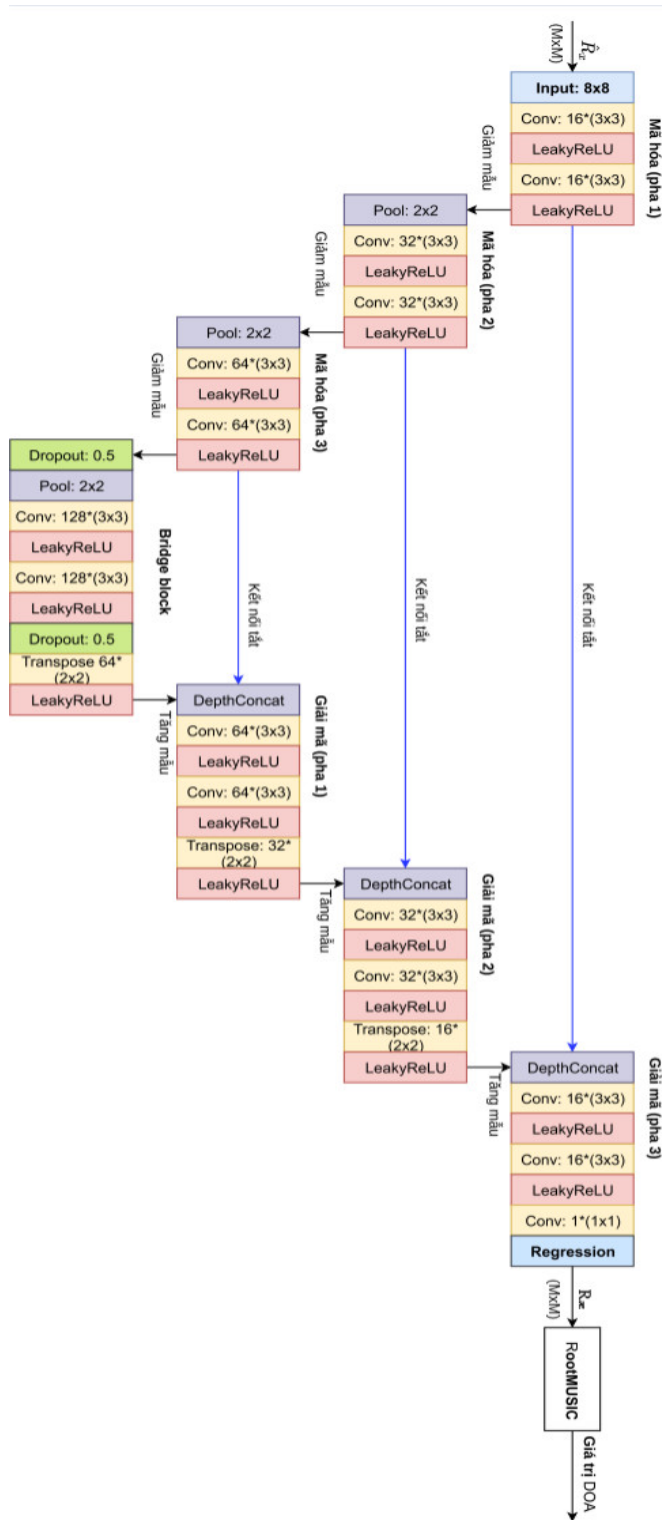
UNet-rootMUSIC là mô hình kết hợp mạng nơ ron học sâu kiến trúc hình chữ U (xây dựng từ các lớp tích chập) với thuật toán rootMUSIC, được tác giả và cộng sự nghiên cứu, đề xuất trong [5] nhằm nâng cao hiệu năng định hướng nguồn tín hiệu vô tuyến. Trong sự kết hợp này, mô hình UNet có nhiệm vụ loại bỏ các sai số tồn tại trong thực tế có trong tín hiệu thu nhận được thông qua việc học tập từ dữ liệu. Trong khi đó, thuật toán rootMUSIC có lợi thế ước lượng DOA với độ phân giải siêu cao thông qua việc tính toán trực tiếp giá trị góc ước lượng [7]. Cụ thể, Unet được đề xuất với mục đích chuyển đổi ma trận $\hat{\mathbf{R}}_x$ thành ma trận gần đúng với ma trận lý tưởng \mathbf{R}_x :

$$\mathbf{R}_{predicted} \approx \text{Unet}\{\hat{\mathbf{R}}_x\} \text{ sao cho } \mathbf{R}_{predicted} \approx \mathbf{R}_x \quad (7)$$

Sau đó thuật toán rootMUSIC được sử dụng để ước lượng DOA với đầu vào là ma trận $\mathbf{R}_{predicted}$. Vì $\mathbf{R}_{predicted} \approx \mathbf{R}_x$, nên giá trị DOA ước lượng được sẽ tiệm cận đúng với giá trị DOA thực tế.

Cấu trúc, tham số các lớp của mô hình UNet-rootMUSIC được trình bày trên hình 2.

Có thể thấy UNet được chia thành hai phần: phần mã hóa và phần giải mã. Trong phần mã hóa, ma trận hiệp phương sai $\hat{\mathbf{R}}_x$ với kích thước $M \times M$ đi qua ba giai đoạn của quá trình mã hóa, mỗi giai đoạn chứa hai lớp tích chập theo sau bởi lớp kích hoạt LeakyReLU. Sau mỗi đoạn, kích thước của ma trận đặc trưng giảm đi một nửa nhưng tăng hai lần về số lượng kênh. Do đó, tất cả các phần tử của ma trận hiệp phương sai sẽ được mã hóa thành một véc-tơ có số phần tử (số lượng đặc trưng) đúng bằng số phần tử của ma trận hiệp phương sai. Sau đó số đặc trưng này được giải mã để phục hồi lại thành ma trận hiệp phương sai lý tưởng \mathbf{R}_x với kích thước $M \times M$. Trong quá trình đó, các sai số sẽ được loại bỏ. Mô hình UNet có các kết nối bỏ qua giúp truyền các ma trận đặc trưng từ các giai đoạn mã hóa sang các giai đoạn giải mã để ghép với các ma trận đặc trưng phục hồi. Kết nối bỏ qua cũng giúp sắp xếp lại vị trí ma trận đặc trưng trong quá trình giải mã.



Hình 2. Cấu trúc mô hình UNet-rootMUSIC

Để huấn luyện và kiểm tra mô hình Unet, một tập dữ liệu được tạo ra thông qua mô phỏng, với $\hat{\mathbf{R}}_x$ là dữ liệu vào và \mathbf{R}_x là nhãn đáp ứng để điều chỉnh các trọng số của mô hình. Sau huấn luyện, mô hình UNet được sử dụng để chuyển đổi ma trận $\hat{\mathbf{R}}_x$ thành ma trận $\mathbf{R}_{predicted}$ với kỳ

vọng $\mathbf{R}_{predicted} \approx \mathbf{R}_x$. Sau đó thuật toán rootMUSIC sẽ sử dụng ma trận $\mathbf{R}_{predicted}$ để ước lượng DOA. Độ chính xác ước lượng DOA được xác định bằng sai số quân phương (RMSE: Root Mean Square Error) tính theo công thức (tổng quát) sau:

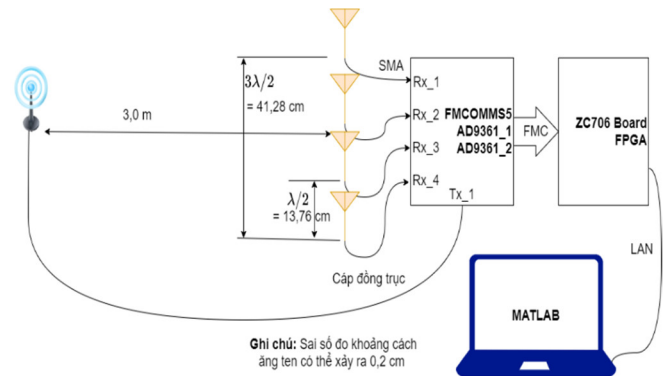
$$RMSE_{DOA} = \sqrt{\frac{1}{QP} \sum_{i=1}^Q \sum_{j=1}^P (\tilde{\theta}_{i,j} - \theta_{i,j})^2} \quad (8)$$

Trong đó, $\tilde{\theta}$ và θ lần lượt là góc ước lượng được và góc đúng; P là số nguồn tín hiệu đến; Q là số lượng mẫu kiểm tra.

3. XÂY DỰNG MÔ HÌNH ĐO ĐẶC, TẠO LẬP BỘ DỮ LIỆU THỰC NGHIỆM, KIỂM CHỨNG MÔ HÌNH UNET-ROOTMUSIC

3.1. Xây dựng mô hình đo đặc, tạo lập bộ dữ liệu

Mô hình đo đặc dữ liệu thực nghiệm được xây dựng như sơ đồ trên hình 3. Theo đó, mô hình gồm phần phát, phần thu và xử lý tín hiệu.



Hình 3. Mô hình đo đặc dữ liệu thực nghiệm

Phần phát (nguồn tín hiệu đến) là một nguồn, phát tín hiệu ở tần số 1090 MHz thông qua 01 ăng ten bức xạ đẳng hướng. Tín hiệu cấp cho ăng ten phát được tạo bởi mạch thu phát FMCOMMS5 [8]. Để tạo tín hiệu phát, một chương trình Matlab được thực hiện trên máy tính để điều khiển mạch FMCOMMS5 thông qua bo mạch FPGA ZC706 [9]. Quá trình điều khiển truyền qua giao tiếp Ethernet bằng dây LAN. Cụ thể, tín hiệu được tạo ra trong chương trình Matlab ở băng tần cơ sở là 100kHz, tần số sóng mang thiết lập là 1090MHz. Quá trình nâng tần số từ 100kHz lên 1090MHz được thực hiện bên trong chip AD9361. Việc phát tín hiệu tần số 1090MHz bằng ăng ten phát được thực hiện liên tục.

Phần thu là mảng gồm bốn ăng ten GRPS GSM, được kết nối với bốn kênh thu của mạch FMCOMMS5 bằng bốn dây cáp đồng trục cao tần có độ dài vật lý bằng nhau với cổng kết nối SMA. Các ăng ten thu được thiết đặt thẳng

hàng, cách nhau một khoảng $\lambda/2$, tức bằng 13,76cm với sai số khoảng 0,2cm, thành dạng mảng ULA có trục đối xứng là đường thẳng đi qua điểm giữa và vuông góc với mảng. Ban đầu, ăng ten phát được thiết đặt nằm trên trục đối xứng của mảng ăng ten thu và cách mảng một khoảng 3,0 m. Khoảng cách này đảm bảo điều kiện nguồn phát (nguồn tín hiệu đến) nằm ở trường xa đối với mảng ăng ten thu bốn phần tử và sóng tới là sóng phẳng. Kênh thu Rx_1, Rx_2 được kết nối với AD9361_1, kênh thu Rx_3, Rx_4 được nối với AD9361_2. Bốn kênh thu này có khả năng đồng bộ pha với nhau. Mạch FCOMMS5 kết nối với mạch điều khiển FPGA ZC706 thông qua giao tiếp FMC. Hình ảnh thực nghiệm đo đạc dữ liệu như trên hình 4. Góc đến của tín hiệu được xác định là 0° khi nguồn phát nằm trên trục đối xứng của mảng ăng ten thu, dương khi nguồn phát ở bên phải, âm khi nguồn phát ở bên trái trục đối xứng nhìn từ điểm giữa mảng.



Hình 4. Thực nghiệm đo đạc dữ liệu

Việc thu tín hiệu cũng được điều khiển bởi một chương trình Matlab trên máy tính. Các tham số của việc thu tín hiệu được thiết lập như mô tả trong bảng 1. Theo đó, chương trình Matlab sẽ thiết lập các tham số với tốc độ lấy mẫu 20MHz, tín hiệu thu về sẽ có băng cơ sở là 100 kHz và số lượng mẫu trong một lần thu là 2000. Do có I/Q nên tín hiệu thu được từ bốn kênh sẽ có kích thước 4×2000 ở dạng số phức.

Bảng 1. Tham số thu tín hiệu

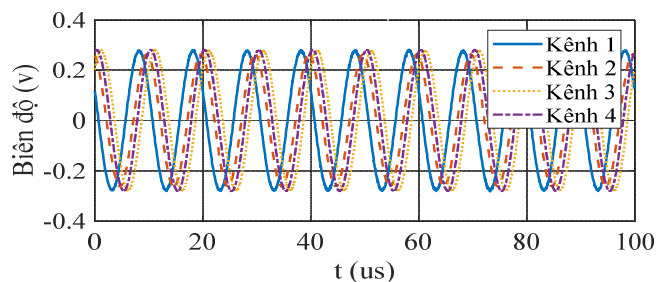
Tham số	Giá trị	Tham số	Giá trị
Mạch thu	FCOMMS5, 2xAD9361	Tính đồng bộ pha	Có
Mạch điều khiển	ZC706 FPGA	Tốc độ lấy mẫu	20MHz
Thiết bị xử lý	Laptop, Matlab	Tần số trung tâm	1090MHz
Ăng ten	GRPS GSM	Tần số cơ sở	100kHz

Mảng ăng ten	ULA	Số lượng mẫu/khung	2000 mẫu
Số kênh	4	Định dạng tín hiệu	I/Q (số phức)

Quá trình thực nghiệm được tiến hành trong phòng âm, có trang bị các vách xốp hấp thụ sóng điện từ để giảm thiểu tối đa ảnh hưởng của tín hiệu đa đường và nhiễu từ môi trường xung quanh.

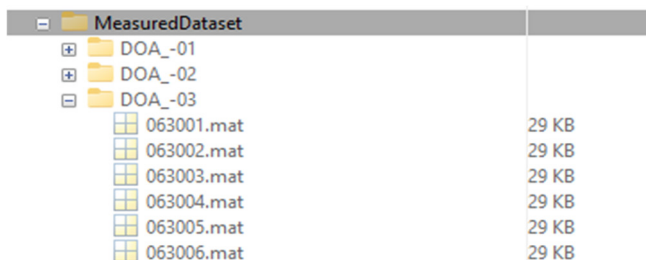
3.2. Tập dữ liệu đo đạc

Quá trình đo đạc để tạo tập dữ liệu được thực hiện lặp đi lặp lại. Cụ thể, thay vì phải di chuyển ăng ten phát đến các vị trí góc khác nhau thì việc thay đổi này sẽ được thực hiện bằng cách xoay mảng ăng ten thu bốn phần tử quanh một trục cố định (trục đối xứng ban đầu đi qua nguồn phát), có thước đo góc để xác định góc quay. Giá trị thể hiện trên thước đo góc được xác định là giá trị góc đúng của ăng ten phát. Lưu ý rằng, giá trị đọc được từ thước đo góc cũng có thể chứa sai số, nhưng rất nhỏ. Hình 5 thể hiện dạng sóng tín hiệu thu được từ 4 phần tử ăng ten ở băng tần cơ sở 100kHz khi đo tín hiệu từ nguồn phát đặt ở góc 10° .



Hình 5. Dạng tín hiệu thu được từ 4 phần tử ăng ten ở băng tần cơ sở

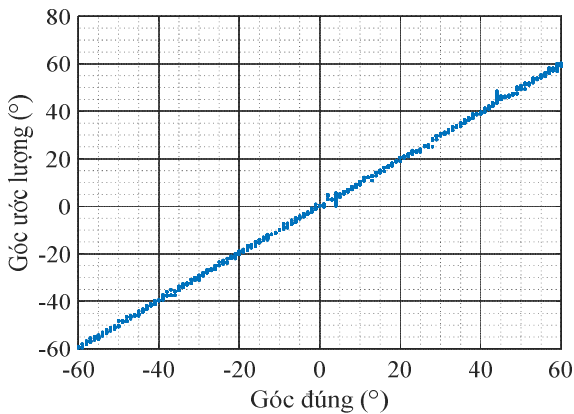
Quá trình đo thực hiện lần lượt cho các góc từ -60° đến 60° với bước cách là 1° . Tại mỗi góc đo, thực hiện 1000 lần thu tín hiệu, số lượng mẫu này là đủ lớn để đảm bảo độ tin cậy, tính ổn định khi tính toán ma trận hiệp phương sai và đánh giá sai số quân phương (RMSE). Tổng số tín hiệu thu được cho tất cả các góc là 121000 tín hiệu, kích thước 4×2000 ở dạng số phức. Mỗi tín hiệu thu được lưu vào tệp với định dạng *.mat để phục vụ cho quá trình xử lý tiếp theo cũng như kiểm chứng các mô hình, thuật toán. Hình 6 biểu thị cấu trúc dữ liệu đo đạc lưu trên máy tính. Dung lượng dữ liệu khoảng 3,69GB.



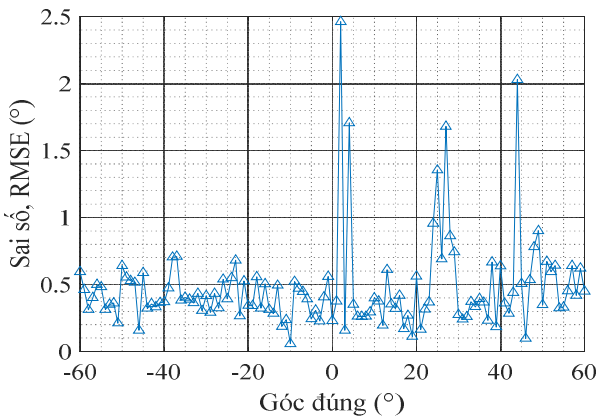
Hình 6. Cấu trúc dữ liệu đo đạc

3.3. Kiểm chứng mô hình UNet-rootMUSIC với bộ dữ liệu đo đạc

Để kiểm chứng mô hình UNet-rootMUSIC với dữ liệu thực tế đo được, cần biến đổi dữ liệu tín hiệu thu được thành ma trận hiệp phương sai tương ứng. Sau đó, mô hình UNet-rootMUSIC đã được huấn luyện với dữ liệu mô phỏng sẽ thực hiện học chuyển tiếp với dữ liệu thực tế. Tập dữ liệu sẽ được chia ngẫu nhiên với tỉ lệ 50% cho huấn luyện và 50% còn lại để kiểm chứng. Sau khi huấn luyện chuyển tiếp, mô hình UNet-rootMUSIC được áp dụng để ước lượng DOA cho 50% dữ liệu còn lại. Kết quả kiểm chứng thể hiện trên hình 7, trong đó hình 7a thể hiện mối tương quan giữa góc đến thực tế (góc đúng) và góc ước lượng được bởi mô hình UNet-rootMUSIC, hình 7b biểu thị sai số quân phương RMSE theo góc ước lượng.



a) Đối sánh giữa góc đúng với góc ước lượng



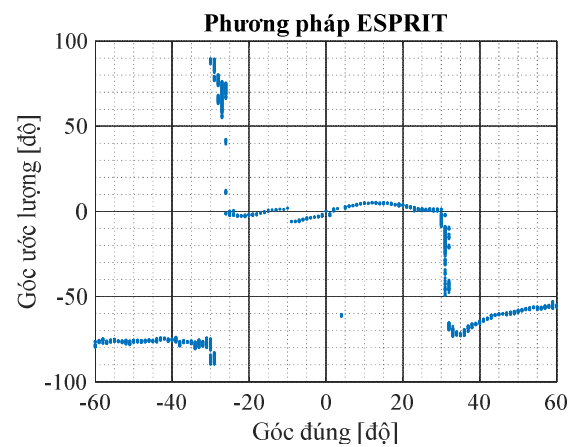
b) Sai số quân phương RMSE tại từng góc đo

Hình 7. Kết quả kiểm chứng mô hình UNet-rootMUSIC với dữ liệu đo đạc thực tế

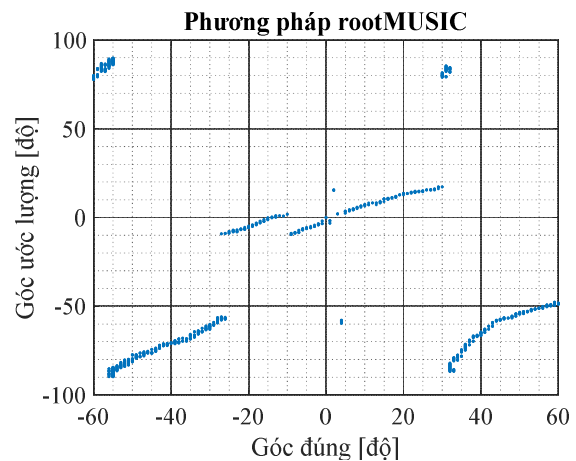
Có thể quan sát thấy, với dữ liệu đo đạc thực tế, mô hình UNet-rootMUSIC cho độ chính xác ước lượng DOA rất tốt cho phần lớn các góc, với sai số quân phương nhỏ nhất tại góc -10° là $0,06^\circ$ và sai số lớn nhất tại góc 2° là $2,46^\circ$. Sai số cực đại xuất hiện tại góc 2° được nhận định là dữ liệu ngoại lai (outlier), ngẫu nhiên trong quá trình thực

nghiệm. Nguyên nhân có thể do sự cộng hưởng nhiễu hoặc sai lệch pha cục bộ của kênh thu tại thời điểm đo góc này, dẫn đến ma trận hiệp phương sai thu được bị biến dạng mạnh so với tại các góc khác.

Cũng trên tập dữ liệu đo đạc thực tế này, tác giả đã thực hiện kiểm chứng ước lượng hướng đến với các phương pháp truyền thống là ESPRIT [7] và rootMUSIC để so sánh. Cần chú ý rằng, trước khi áp dụng các phương pháp này, tín hiệu đã được chuẩn hóa và hiệu chỉnh pha. Việc hiệu chỉnh này giúp cải thiện đáng kể tính ổn định khi ước lượng hướng đến. Kết quả đối sánh giữa góc đúng và góc ước lượng của hai phương pháp thể hiện trên hình 8.



a) Phương pháp ESPRIT



b) Phương pháp rootMUSIC

Hình 8. Kết quả kiểm chứng phương pháp ESPRIT và rootMUSIC với dữ liệu đo đạc thực tế

Có thể thấy rằng, với dữ liệu đo đạc thực tế, cả hai phương pháp ESPRIT và rootMUSIC cho sai số và sự nhầm lẫn góc rất lớn ở hầu hết các góc, đặc biệt là phương pháp ESPRIT. Điều này một lần nữa khẳng định, khi áp dụng mô hình UNet-rootMUSIC, các sai số hệ thống đã được hiệu chỉnh thông qua quá trình huấn luyện chuyển tiếp bởi mô hình

UNet, do đó Unet-rootMUSIC đã cho kết quả ước lượng DOA rất tốt, như thể hiện trên hình 7a.

4. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, tác giả đã trình bày kết quả nghiên cứu xây dựng mô hình đo đạc, tạo lập bộ dữ liệu, thực nghiệm kiểm chứng mô hình UNet-rootMUSIC định hướng nguồn tín hiệu vô tuyến. Kết quả thực nghiệm, kiểm chứng, kết hợp so sánh với cả hai phương pháp ESPRIT, rootMUSIC cho thấy mô hình UNet-rootMUSIC cho độ chính xác ước lượng DOA rất tốt ở phần lớn các góc được đo đạc. Điều này một lần nữa khẳng định các sai số do môi trường đo không lý tưởng, các phần tử ăng ten không đồng nhất, có sai lệch vị trí, sự không đồng nhất về pha và biên độ của cáp đồng trục và các yếu tố bất định khác đã được loại bỏ trong quá trình học tập, huấn luyện từ dữ liệu tín hiệu thu được bởi mô hình mạng nơ ron UNet. Tập dữ liệu đo đạc có thể được sử dụng cho việc nghiên cứu, phát triển, kiểm chứng các mô hình, thuật toán khác trong định hướng nguồn tín hiệu. Hướng nghiên cứu tiếp theo, tác giả sẽ mở rộng phạm vi thực nghiệm với góc tới của tín hiệu $> |60^\circ|$, thực hiện thu thập, xây dựng bộ dữ liệu thực tế từ các thiết bị định hướng hiện có trong biên chế, tối ưu hóa thuật toán, tiến hành thực nghiệm kiểm chứng mô hình UNet-rootMUSIC với bộ dữ liệu này. Với lợi thế kích thước đầu vào nhỏ (ma trận hiệp phương sai kích thước 8×8), cấu trúc mạng nông và nhẹ (mô hình được thiết kế với 3 pha mã hóa, 3 pha giải mã, sử dụng các lớp tích chập với kích thước kernel 3×3 và số lượng filter không quá lớn, từ 16 đến 128 filter), mục tiêu cài đặt, triển khai UNet-rootMUSIC lên các hệ thống nhúng (FPGA, DSP...) xử lý thời gian thực để sử dụng trong thực tiễn là khả thi và rất tiềm năng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. R. Wiley, *ELINT: The Interception and Analysis of Radar Signals*. Artech House, 2006.
- [2]. Ge S., et al., "Deep Learning Approach in DOA Estimation: A Systematic Literature Review," *Mobile Information Systems*, 1-14, 2021. doi: <https://doi.org/10.1155/2021/6392875>
- [3]. Trong T.H, et al., "DOA Estimation Based on LSTM Neural Network with Uniform Linear Antenna Array," *Journal of Science and Technology, The University of Danang*, 19-24, 2022.
- [4]. J. Li, X. Shao, J. Li, L. Ge., "Direction of arrival estimation of array defects based on deep neural network," *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 2022. doi:10.1007/s00034-022-02011-9

[5]. Duy-Thai Nguyen, Thanh-Hai Le, Van-Sang Doan, Van-Phuc Hoang, "UNet-rootMUSIC: A high accuracy direction of arrival estimation method under array imperfection," *AEUE - International Journal of Electronics and Communications*, 173, 2024. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2023.155008>.

[6]. Zengin Tuncer. T, Benjamin Friedlander, *Classical and Modern Direction-of-Arrival Estimation*. Elsevier Inc, 2009

[7]. Dhope T.S., *Application of MUSIC, ESPRIT and ROOT MUSIC in DOA Estimation*. 2010

[8]. FMCOMMS5 - Analog Device [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/design-center/evaluationhardware-and-software/evaluation-boards-kits/eval-adfmcmm5-ebz.html>

[9]. AMD Zynq 7000 SoC ZC706 Evaluation Kit - XILINX Online. Available: <https://www.xilinx.com/products/boardsand-kits/ek-z7-zc706-g.html>.

AUTHOR INFORMATION

Nguyen Duy Thai

Institute of Information Technology - Electronics, Military Academy of Science and Technology, Vietnam