

ANTEN ĐA CÔNG TRÊN HỘP CỘNG HƯỞNG ỨNG DẪN SÓNG TÍCH HỢP VỚI KHẢ NĂNG TÁI CẤU HÌNH PHÂN CỰC (TUYẾN TÍNH – TRÒN) CHO NHỮNG ỨNG DỤNG 5G TẦN SỐ MILLIMET

A MIMO SIW-CAVITY ANTENNA WITH LINEAR/CIRCULAR POLARIZATION RECONFIGURABLE FOR 5G MILLIMETER WAVE APPLICATIONS

Nguyễn Trương Khang^{1*}, Đỗ Hữu Quân¹, Nguyễn Thị Thanh Kiều²

¹Khoa Công nghệ thông tin, Trường Công nghệ, Trường Đại học Văn Lang, Việt Nam

²Trường Cao đẳng Bình Thuận, Việt Nam

*Tác giả liên hệ / Corresponding author: khang.nt@vlu.edu.vn

(Nhận bài / Received: 04/02/2025; Sửa bài / Revised: 11/4/2025; Chấp nhận đăng / Accepted: 15/4/2025)

DOI: 10.31130/ud-jst.2025.038

Tóm tắt - Bài báo này đề xuất một mô hình anten 2 cổng hoạt động ở dải tần số 24-28 GHz cho các ứng dụng 5G tần số millimet. Anten được thiết kế dựa trên kỹ thuật ống dẫn sóng tích hợp kết hợp một khe hình chữ L có gắn phần tử chủ động (PIN đi-ốt) cho khả năng tái cấu hình về sự phân cực (tuyến tính-tròn) tại vùng tần số 26 GHz. Việc tối ưu hóa hiệu suất hoạt động của anten đơn được thực hiện bởi mô hình học máy. Mô hình anten đa kênh (MIMO) được khảo sát và so sánh với 3 thiết kế nhằm chọn ra thiết kế tối ưu về hiệu suất hoạt động và kích thước tổng thể. Kết quả cho thấy anten MIMO đề xuất hoạt động tốt với băng thông trở kháng đạt khoảng 20,2% (23,6 GHz – 28,9 GHz), độ phân lập khoảng -18 dB, độ lợi biến đổi ổn định (< 3dB) với giá trị cực đại khoảng 7,5dB, và phân cực tròn trái tại tần số 26 GHz. Anten cũng đạt các thông số yêu cầu đối với một anten MIMO trong toàn dải băng tần.

Từ khóa - Antenna tái cấu hình; ống dẫn sóng tích hợp; MIMO; 5G tần số millimet; học máy.

1. Đặt vấn đề

Sự phát triển của công nghệ 5G, cung cấp tốc độ dữ liệu cao và khả năng truyền tải không dây đáng tin cậy, là một trọng tâm nghiên cứu chính cả trong lĩnh vực học thuật lẫn công nghiệp trong những năm gần đây. Một trong những băng tần quan trọng trong truyền thông không dây 5G là băng tần 28 GHz, thuộc phổ sóng milimet (mm-Wave). Băng tần này có vai trò quan trọng trong việc mở rộng mạng lưới 5G và hỗ trợ truyền thông không dây tốc độ nhanh với độ trễ thấp [1, 2].

Trong hệ thống truyền thông không dây, anten đóng vai trò quan trọng và cần đáp ứng các yêu cầu của công nghệ 5G như thiết kế nhỏ gọn, khả năng tích hợp vào nhiều thiết bị khác nhau và chi phí chế tạo thấp. Để hiện thực hóa các yêu cầu này, kỹ thuật ống dẫn sóng tích hợp trên vật liệu nền - SIW (Substrate Integrated Waveguide) - là sự lựa chọn phù hợp do có thiết kế phẳng và gọn nhẹ. Về mặt lý thuyết, SIW hoạt động như một hộp cộng hưởng giúp giới hạn trường điện từ trong vật liệu nền, tạo ra các anten định hướng có hiệu suất cao và cấu trúc nhỏ gọn. Do đó, anten dùng kỹ thuật SIW đặc biệt phù hợp với truyền thông sóng

Abstract - In this paper, we present a 2-port antenna operating in the 24-28 GHz frequency range for millimeter-wave 5G applications. The antenna is designed based on substrate-integrated-waveguide techniques for compactness and incorporates an L-shaped slot with an active element (PIN-diode) to enable polarization reconfigurability (linear/circular) at the center frequency 26 GHz. The performance optimization of the single antenna is discussed through machine learning models. The MIMO configuration is evaluated with three different designs to select the optimal one in terms of overall performance and dimension. The antenna obtains an impedance bandwidth of about 20.2% (23.6 GHz - 28.9 GHz), an isolation level of about -18 dB, a stable gain variation (<3dB) with a peak of approximately 7.5dB and good left-handed circular polarization at the frequency 26 GHz. The final design also meets the required specifications for a MIMO antenna across the desired frequency range.

Key words - Reconfigurable antenna; substrate-integrated-waveguide; MIMO; 5G mm-wave; machine learning.

milimet [3]. Đặc biệt, SIW còn cho phép kết hợp nhiều thành phần RF chủ động (PIN đi-ốt, varactor đi-ốt) và thụ động trên cùng một vật liệu nền.

Bên cạnh yêu cầu nhỏ gọn và chi phí chế tạo thấp, công nghệ 5G còn đòi hỏi kỹ thuật truyền đa đầu-cuối MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) và Mảng pha (Phased Array) để nâng cao chất lượng kênh truyền [4, 5]. MIMO tận dụng nhiều phần tử anten ở cả hai đầu phát và thu, khai thác sự phân tán không gian và hiện tượng truyền đa đường để tăng cường hiệu suất kênh truyền. Phương pháp này rất quan trọng để vượt qua tổn thất đường truyền và sự hấp thụ sóng của khí quyển ở tần số millimet, từ đó tăng cường hiệu năng tổng thể của toàn hệ thống.

Ngoài ra, công nghệ 5G cũng đòi hỏi tính linh hoạt của anten tái cấu hình (Reconfigurable Antennas) với khả năng điều chỉnh các đặc tính như tần số cộng hưởng, đồ thị bức xạ, và độ phân cực. Ví dụ như anten phân cực tuyến tính thường dùng trong hệ thống truyền thông cố định, còn anten phân cực tròn thích hợp cho vệ tinh và thiết bị di động do khả năng duy trì kết nối ổn định từ mọi hướng. Đặc biệt trong hệ thống MIMO, anten phân cực tuyến tính tăng hiệu

¹ Faculty of Information Technology, School of Technology, Van Lang University, Vietnam (Truong Khang Nguyen, Huu Quan Do)

² Binh Thuan College, Vietnam (Thi Thanh Kieu Nguyen)

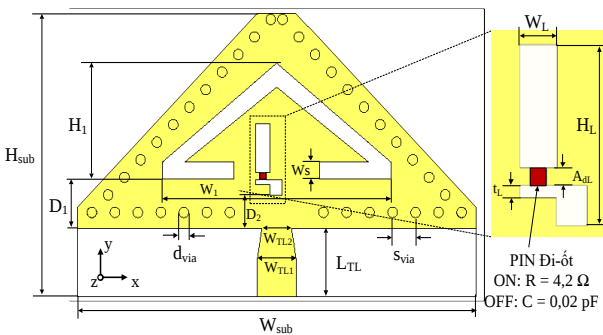
suất và giảm nhiễu, trong khi anten phân cực tròn duy trì tín hiệu ổn định và chống nhiễu đa kênh. Do đó, anten MIMO với khả năng tái cấu hình độ phân cực tròn (CP - Circular Polarization) giúp cải thiện hiệu suất hệ thống MIMO bằng cách cải thiện dung lượng kênh truyền và hỗ trợ khả năng phân tập độ lợi bức xạ [6, 7].

Khi cấu trúc anten ngày càng phức tạp, việc thiết kế và tối ưu hóa đòi hỏi nhiều thời gian và tài nguyên máy tính. Gần đây, các mô hình học máy (ML - Machine Learning) được sử dụng giúp tiết kiệm thời gian đáng kể khi thiết kế của anten trong khi vẫn duy trì độ chính xác cao, giúp tăng tốc quá trình tối ưu hóa để đạt được những kết quả mong muốn [8].

Các thiết kế anten gần đây đã thành công trong việc áp dụng công nghệ SIW và MIMO cho các ứng dụng 5G tần số millimet [9-11]. Tuy nhiên, việc kết hợp thêm khả năng tái cấu hình vào những thiết kế anten này hiện gần như chưa có. Trong bài báo này, nhóm tác giả trình bày một anten đa cổng (MIMO) trên hộp cộng hưởng ống dẫn sóng tích hợp (SIW) với khả năng tái cấu hình độ phân cực (tuyến tính/tròn) và hoạt động trong dải tần 24-28 GHz cho các ứng dụng 5G tần số millimet.

2. Thiết kế và thông số anten đơn

Anten đề xuất (Hình 1) là một hộp cộng hưởng hình tam giác SIW, chiều rộng $W_{sub} = 20,17$ mm và chiều cao $H_{sub} = 13,28$. Vật liệu nền là Roger RT5880 (độ dày $t_s = 0,787$ mm, chiết suất $\epsilon_r = 2,2$ và hằng số suy hao $\delta = 0,0025$) được bao xung quanh bởi 1 hàng rào “via” (lỗ xuyên qua vật liệu) ở viền ngoài nhằm mục đích kiểm soát hoặc điều chỉnh sự phân bố dòng điện trên bề mặt của anten hoặc khoang SIW. Hàng rào “via” này với đường kính mỗi “via” và khoảng cách giữa các “via” lần lượt là $d_{via} = 0,98$ mm và $s_{via} = 1,16$ mm. Anten được cấp nguồn qua một đường truyền vi dải hình côn (tapered microstrip-line) với các kích thước ($L_{TL} = 3,2$ mm, $W_{TL1} = 1,99$ mm, $W_{TL2} = 1,49$ mm) được tính toán theo trở kháng đặc tính là 50Ω .



Hình 1. Thiết kế anten đơn

Ở lớp kim loại (lossy metal) trên cùng là 1 khe hình tam giác giúp tạo ra băng thông trở kháng rộng và bức xạ định hướng. Khe hình tam giác này có chiều rộng đáy, chiều cao, và độ rộng khe lần lượt là $W_1 = 11,54$ mm, $H_1 = 5,43$ mm, và $W_s = 0,8$ mm. Bên trong khe hình tam giác này (gần trung tâm hộp cộng hưởng SIW) là 1 khe hình chữ L (kích thước trong Bảng 1) được gắn 1 PIN đi-ốt để tạo khả năng tái cấu hình phân cực (tuyến tính/tròn) cho anten. PIN đi-ốt này được mô hình hóa tương đương như một điện trở.

Bảng 1. Thông số thiết kế của khe hình L (đơn vị: mm)

Ký hiệu	Kích thước	Ký hiệu	Kích thước
H_L	3,38	t_L	0,22
W_L	0,75	A_{dL}	0,33

$R_{diode} = 4,2 \Omega$ trong chế độ BẬT (ON) hoặc một tụ điện $C_{diode} = 0,02$ pF trong chế độ TẮT (OFF), hoạt động như một công tắc điều khiển dòng điện bề mặt cho khả năng tái cấu hình phân cực. Theo đó, anten sẽ cho phân cực tròn (CP) khi PIN đi-ốt ở chế độ OFF và phân cực tuyến tính (LP) khi PIN đi-ốt ở chế độ ON [12]. Khoảng cách từ cạnh của khe hình tam giác và khe hình L đến cạnh dưới của hộp cộng hưởng SIW lần lượt là $D_1 = 2,3$ mm và $D_2 = 1,54$ mm. Anten được thiết kế và mô phỏng bằng phần mềm CST Microwave Studio.

Kích thước của hộp cộng hưởng hình tam giác SIW đề xuất được tính từ công thức hộp cộng hưởng hình chữ nhật (half-mode) [13], theo đó, tần số cộng hưởng được tính như sau:

$$f_{TE_{m0n}} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{W_{eff}}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L_{eff}}\right)^2} \quad (1)$$

với

$$W_{eff} = W_{cavity} - \frac{d_{via}^2}{0.95s_{via}}; L_{eff} = L_{cavity} - \frac{d_{via}^2}{0.95s_{via}} \quad (2)$$

Trong đó, m, n là bậc của các mode truyền sóng, và μ_r, ϵ_r lần lượt là độ từ thẩm và độ điện thẩm của vật liệu đế. Từ các thông số của anten ($W_{cavity} = 21,17$ mm và $L_{cavity} = 10,08$ mm), ta tính được tần số hoạt động ($f_{TE_{102}}$) của hộp cộng hưởng hình tam giác SIW này vào khoảng 22,6 GHz, như vậy là phù hợp với kết quả mô phỏng.

3. Mô hình MIMO (1x2)

3.1. Các thiết kế đề xuất

Mô hình MIMO (2 cổng) được đề xuất gồm 3 thiết kế khác nhau như sau (Hình 2):

- Thiết kế 1 (MIMO-0): anten-2 được đặt cạnh anten-1 theo trục-x, xem như anten-2 xoay 1 góc 0° so với anten-1 (Hình 2a);

- Thiết kế 2 (MIMO-90): anten-2 và anten-1 dùng chung 1 cạnh tam giác của hộp cộng hưởng SIW, xem như anten-2 xoay 1 góc 90° so với anten-1 (Hình 2b);

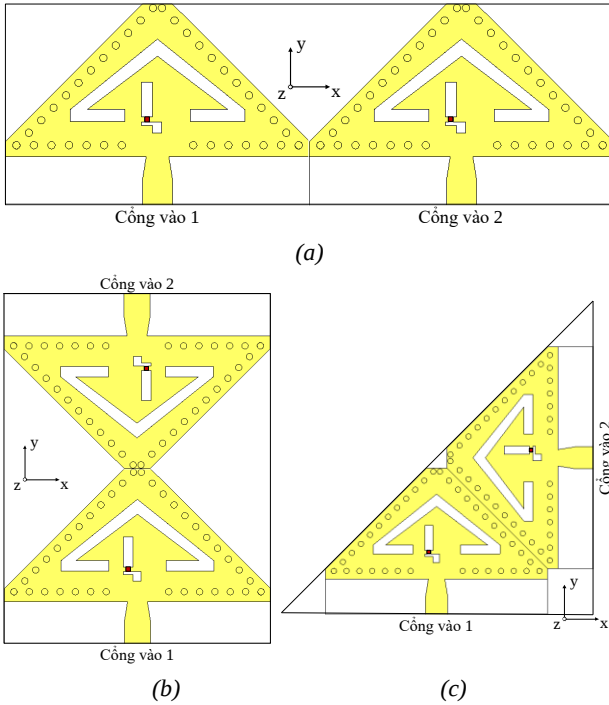
- Thiết kế 3 (MIMO-180): anten-2 được đặt đối diện anten-1 theo trục-y, xem như anten-2 xoay 1 góc 180° so với anten-1 (Hình 2c).

3.2. Đánh giá và so sánh

Các thiết kế MIMO được mô phỏng bằng phần mềm CST Microwave Studio sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) và tạo lưới bằng các phần tử tứ diện (tetrahedral), giúp đảm bảo độ chính xác cao khi mô phỏng các anten vùng tần số millimet. Các kết quả dùng để đánh giá và so sánh giữa các thiết kế MIMO bao gồm: tham số tán xạ (S-parameters) gồm $S_{11} = S_{22}$ (hệ số phản xạ điện áp tại cổng vào/ra) và $S_{21} = S_{12}$ (hệ số truyền dẫn giữa 2 cổng vào/ra), độ lợi (Gain) và tỷ số trục (Axial Ratio-AR).

So sánh giữa các thiết kế MIMO ở Hình 3 cho thấy, ở

chế độ phân cực tuyến tính LP (Đi-ốt ON, Hình 3a, 3b), S_{11} (trục y-trái) của MIMO-90 là tốt nhất, trong khi S_{21} (trục y-phải) của MIMO-0 là tốt nhất. Cả 3 thiết kế MIMO ở chế độ LP này đều cho độ lợi biến đổi trong khoảng 3dB, tuy nhiên MIMO-90 cho độ lợi tối đa ($G_{\max}$) tốt nhất. Ở chế độ phân cực tròn CP (Đi-ốt OFF, Hình 3c, 3d), cả ba thiết kế MIMO đều cho S_{11} tốt gần như nhau, trong khi S_{21} của MIMO-0 là tốt nhất. Tỷ số trực (AR) (trục y-trái) của cả ba thiết kế MIMO đều tốt như nhau ($<3\text{dB}$) tại tần số trung tâm 26 GHz, trong khi kết quả về độ lợi (Gain) (trục y-phải) của MIMO-90 là tốt nhất trong ba thiết kế khảo sát.



Hình 2. Các thiết kế mô hình MIMO: (a) Thiết kế 1 (MIMO-0); (b) Thiết kế 2 (MIMO-90); (c) Thiết kế 3 (MIMO-180)

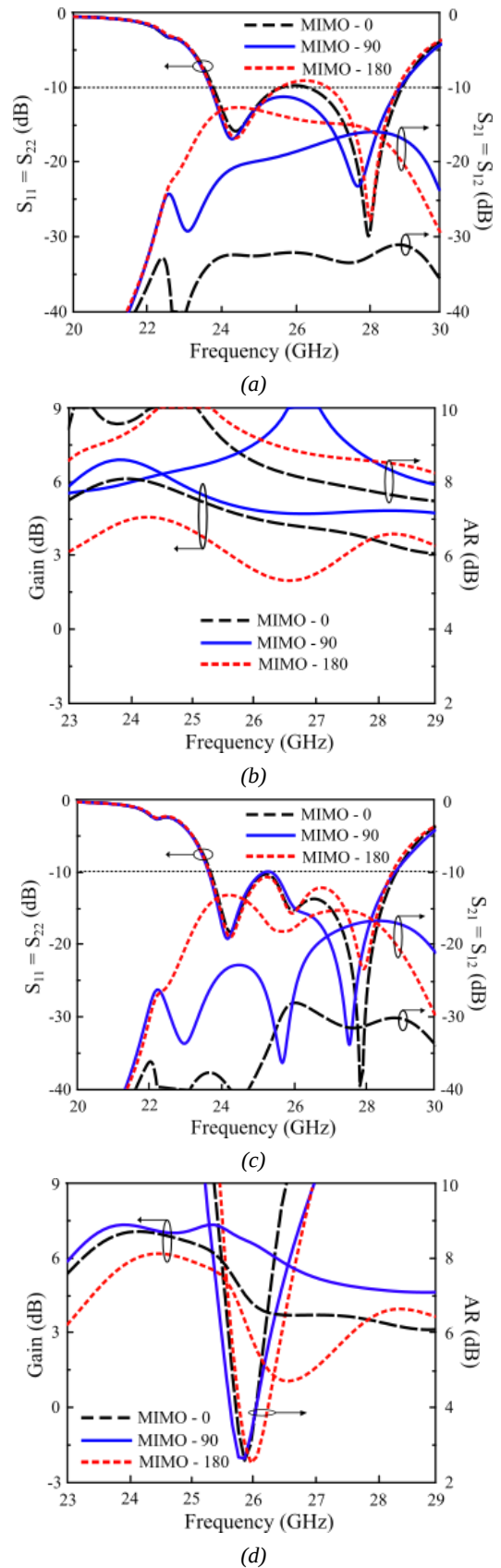
Bảng 2. So sánh giữa các thiết kế MIMO để xuất (CP)

MIMO (CP)	Diện tích (mm)	S_{11} (-10dB) (%)	S_{12} (dB)*	$G_{\max}$ (dB)*	AR (dB)
MIMO-0	40,3 x 13,3	19,4	-28	7,1	2,7
MIMO-90	½ (28,5 x 28,5)	20,2	-18	7,5	2,7
MIMO-180	20,2 x 26,6	19,3**	-13	6,2	2,6

* Giá trị tốt nhất trong dải băng thông của S_{11} (~23,6 – 28,9 GHz)

** Băng thông cho $S_{11} < -9\text{ dB}$

Bảng 2 trình bày và so sánh theo giá trị cụ thể của thông số tán xạ S, tỷ số trực AR và độ lợi tối đa $G_{\max}$, cùng với kích thước tổng thể của ba thiết kế MIMO khảo sát. Thiết kế MIMO-0 cho kết quả S_{12} tốt nhất tuy nhiên kích thước khá lớn và độ lợi cũng như băng thông trở kháng không tốt bằng MIMO-90. Thiết kế MIMO-180 thua hai thiết kế MIMO-0 và MIMO-90 về tất cả các thông số so sánh. Theo đó, thiết kế MIMO-90 được đánh giá là tốt nhất với băng thông trở kháng $S_{11} \sim 20,2\%$ và độ lợi tối đa $G_{\max} \sim 7,5\text{ dB}$ và được dùng để khảo sát các thông số MIMO liên quan.



Hình 3. Kết quả so sánh giữa các thiết kế MIMO (a-b) đi-ốt chế độ ON (phân cực tuyến tính - LP), (c-d) đi-ốt chế độ OFF (phân cực tròn - CP)

3.3. Kết quả Anten MIMO-90

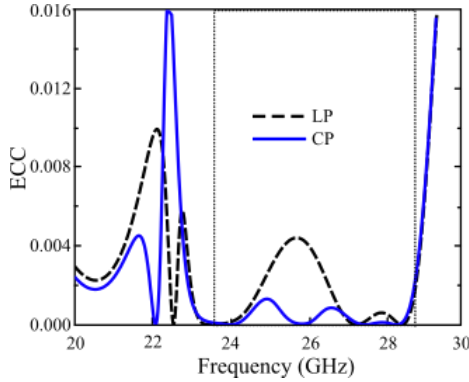
Trong phần này, các thông số cơ bản của Anten MIMO-90 như hệ số tương quan (ECC), độ lợi phân tập (DG), tổng hệ số phản xạ tích cực (TARC) và tổn thất dung lượng kênh (CCL) được trình bày và thảo luận.

3.3.1. Hệ số tương quan ECC (Envelope Correlation Coefficient)

Hệ số tương quan (ECC) là thông số quan trọng trong hệ thống Anten MIMO, đo mức độ tương quan giữa các tín hiệu nhận được. ECC thấp cho thấy các tín hiệu truyền độc lập, điều này giúp cải thiện hiệu suất tổng thể của MIMO. ECC lý tưởng là gần 0, với $ECC = 0$ biểu thị các Anten phân lập hoàn toàn, còn $ECC = 1$ biểu thị hiện tượng “ngắn mạch”. ECC được tính theo công thức (3):

$$\rho_e = \frac{|S_{12}S_{11}^* + S_{22}S_{21}^*|^2}{(1-|S_{11}|^2-|S_{21}|^2)(1-|S_{22}|^2-|S_{12}|^2)} \quad (3)$$

Kết quả từ Hình 4 cho thấy, giá trị tối đa của ECC trong dải băng tần hoạt động của Anten MIMO-90 là 0,004, đây là một giá trị tốt giúp cải thiện độ lợi phân tập (DG) và dung lượng kênh. ECC của Anten MIMO trong chế độ phân cực tròn (CP) tốt hơn chế độ phân cực tuyến tính (LP).



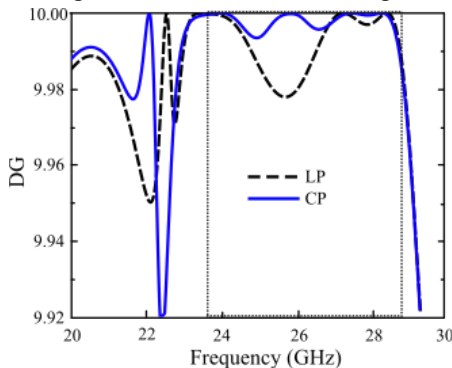
Hình 4. Kết quả ECC của mô hình MIMO-90

3.3.2. Độ lợi phân tập DG (Diversity Gain)

Độ lợi phân tập DG đặc trưng cho khả năng phân tập đường truyền giúp cải thiện độ tin cậy và chất lượng tín hiệu, từ đó giảm thiểu ảnh hưởng của hiện tượng fading và nhiễu. Giá trị lý tưởng của DG trong hệ thống MIMO 2 Anten là khoảng 10. DG được tính theo công thức (4):

$$DG \approx 10\sqrt{1 - |\rho_e|} \quad (4)$$

Kết quả từ Hình 5 cho thấy, DG tối đa cho Anten MIMO-90 ở cả hai chế độ hoạt động (LP và CP) đều gần bằng 10 trong toàn bộ dải tần số hoạt động.

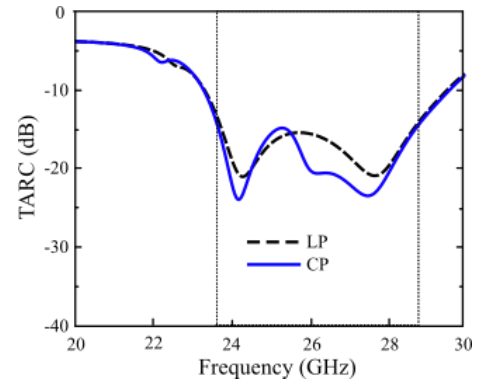


Hình 5. Kết quả DG của mô hình MIMO-90

3.3.3. Tổng hệ số phản xạ tích cực TARC (Total Active Reflection Coefficient)

Hệ số phản xạ chủ động toàn phần TARC cũng là một thông số quan trọng, phản ánh đặc tính phản xạ tổng thể của hệ thống Anten MIMO khi có sự mất phối hợp trở kháng. TARC thấp cho thấy, hệ thống Anten có hiệu suất tốt, với giá trị lý tưởng < 0 dB. TARC được tính theo công thức (5):

$$TARC = \sqrt{\frac{(|S_{11}|+|S_{12}|)^2 + (|S_{21}|+|S_{22}|)^2}{4}} \quad (5)$$



Hình 6. Kết quả TARC của mô hình MIMO-90

Kết quả từ Hình 6 cho thấy, TARC Anten MIMO-90 phù hợp toàn bộ dải băng tần hoạt động trong cả hai chế độ phân cực CP và LP.

3.3.4. Tổn thất dung lượng kênh CCL (Channel Capacity Loss)

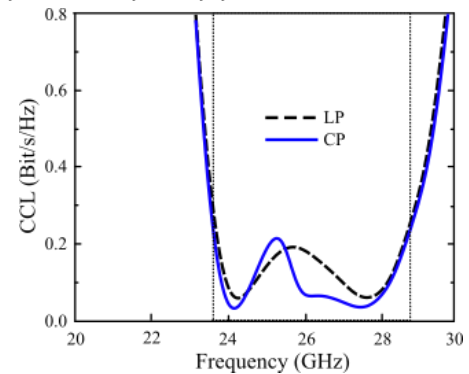
Tổn thất dung lượng kênh (CCL) đặc trưng cho mức giảm dung lượng kênh do sự suy giảm tín hiệu và tương tác lẫn nhau giữa các Anten. Trong hệ thống MIMO, CCL cần nhỏ hơn 0,4 bps/Hz trong dải tần số hoạt động của Anten để đảm bảo hiệu suất tốt nhất. CCL được tính theo công thức (6) – (9):

$$C(loss) = -\log_2 |\psi^R| \quad (6)$$

$$\psi^R = \begin{bmatrix} \psi_{11} & \psi_{12} \\ \psi_{21} & \psi_{22} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\psi_{ii} = 1 - (|S_{ii}|^2 + |S_{ij}|^2) \quad (8)$$

$$\psi_{ij} = -(S_{ii}^* S_{ij} + S_{ij} S_{ji}^*) \quad (9)$$

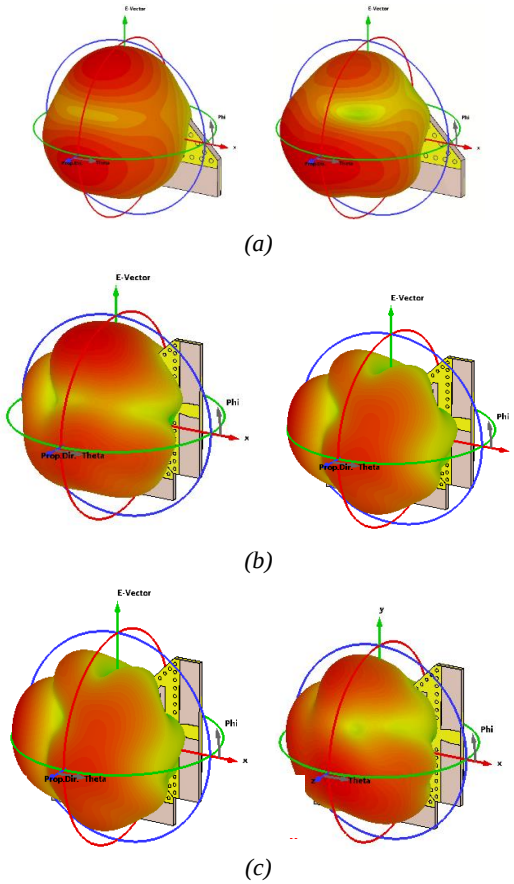


Hình 7. Kết quả CCL của mô hình MIMO-90

Hình 7 cho thấy, Anten MIMO-90 đạt được CCL thấp hơn 0,2 Bit/s/Hz trong toàn bộ băng tần hoạt động, thấp hơn nhiều so với giá trị chuẩn thực tế (0,4 Bit/s/Hz), cho thấy Anten đề xuất đạt thông lượng cao.

3.3.5. Đồ thị bức xạ

Hình 8 biểu diễn đồ thị bức xạ tại 26,0 GHz của anten đơn và anten MIMO-90 (công vào 1 và công vào 2) ở 2 chế độ phân cực tròn và tuyến tính. Kết quả cho thấy, đồ thị bức xạ của anten MIMO-90 không thay đổi nhiều so với đồ thị bức xạ của anten đơn. Đồ thị bức xạ của anten MIMO-90 thể hiện anten bức xạ định hướng vuông góc với bề mặt (broadside) của anten với độ định hướng (directivity) của búp chính khoảng 7,3 dBi. Các đồ thị bức xạ gần như tương đồng nhau ở cả 2 công vào và cả 2 chế độ phân cực, chứng tỏ anten MIMO đề xuất hoạt động khá ổn định. Hiệu suất bức xạ của anten có giá trị trung bình khoảng 95% trong toàn dải tần số hoạt động.



Hình 8. Đồ thị bức xạ tại 26.0 GHz:

(a) mô hình anten đơn, (b) mô hình MIMO-90 công vào 1, (c) mô hình MIMO-90 công vào 2. (Bên trái: phân cực tuyến tính (đi-ốt ON) và bên phải: phân cực tròn (đi-ốt OFF))

4. Phân tích các mô hình học máy (ML)

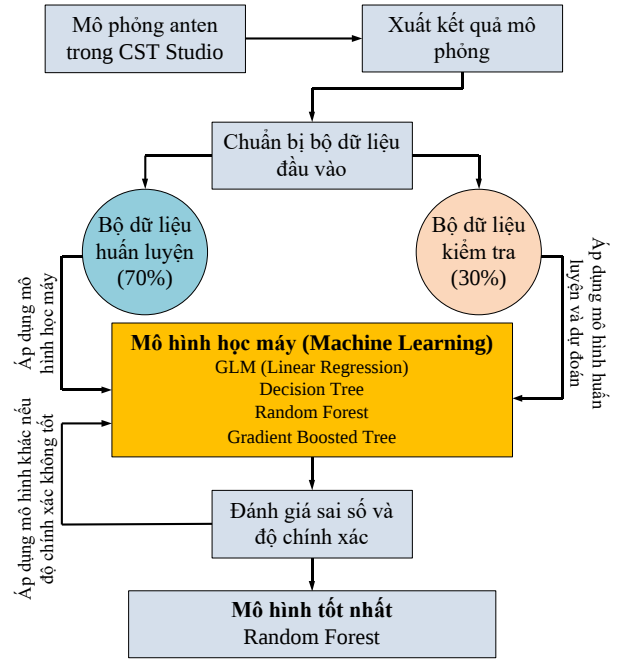
Hình 9 minh họa các giai đoạn tạo mô hình học máy. Đầu tiên, thiết kế anten MIMO-90 được mô phỏng nhiều lần (818 lần) trong CST Microwave Studio với bộ thông số thiết kế (H_1 , W_1 , H_L , W_L , D_1 , và D_2) được tạo ngẫu nhiên, và kết quả sau mỗi lần chạy mô phỏng là bộ thông số đầu ra được dán nhãn theo điều kiện như trong Bảng 3. Bộ dữ liệu này sau đó được chia thành 70% cho tập huấn luyện (training) và 30% cho tập kiểm tra (test), và đưa vào các mô hình học máy (GLM - Generalized Linear Regression, Decision Tree, Random Forest và Gradient Boosted Tree) để đánh giá và so sánh độ chính xác và sai số của từng mô hình.

Bảng 3. Thông số đầu ra sử dụng cho các mô hình học máy

Ký hiệu	Ý nghĩa	Dải tần số	Điều kiện
S_{11}	Tham số tán xạ	24 – 28 GHz	<-10 dB
G_{min}	Độ lợi cực tiểu	24 – 28 GHz	>5dB*
G_{max}	Độ lợi cực đại	24 – 28 GHz	<8dB*
AR	Tỷ số trực	26 GHz	<3dB

*Đảm bảo khác biệt độ lợi <3dB trong toàn dải tần số hoạt động.

Các chỉ số đo lường độ chính xác và sai số trong các mô hình bao gồm R-squared (R^2), Explained Variance Score (Var Score), Mean Absolute Error (MAE), Mean Squared Error (MSE) và Root Mean Squared Error (RMSE), được định nghĩa theo các công thức (10)-(14):



Hình 9. Sơ đồ minh họa các giai đoạn tạo mô hình học máy

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|, \quad (10)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (11)$$

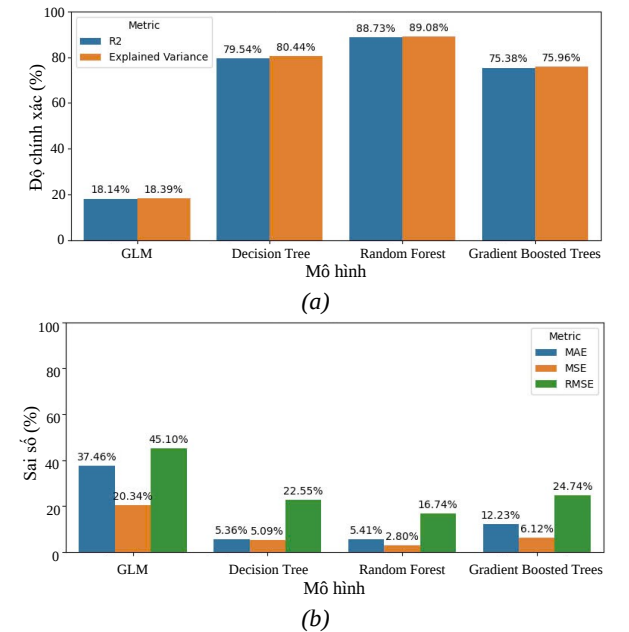
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}, \quad (12)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (13)$$

$$EVS = 1 - \frac{Var(y_i - \hat{y}_i)}{Var(y_i)} \quad (14)$$

Trong đó, n là số lượng mẫu; y_i là giá trị thực tế của mẫu thứ i ; $\hat{y}_i$ là giá trị dự đoán của mẫu thứ i ; $\bar{y}$ là giá trị trung bình của toàn bộ dữ liệu thực tế; $Var(y - \hat{y})$ là phương sai của phần dư (lỗi dự đoán); $Var(y)$ là phương sai của dữ liệu thực tế.

Kết quả so sánh giữa các mô hình học máy ở Hình 10 cho thấy GLM có sai số cao nhất và độ chính xác thấp nhất, chứng tỏ mối quan hệ giữa các tham số đầu vào và kết quả không mang tính tuyến tính. Ngược lại, Random Forest đạt hiệu suất tốt nhất khi cho kết quả độ chính xác cao nhất ($R^2 = 88,73\%$, Explained Variance = $89,08\%$) với sai số thấp nhất (MAE = $5,41\%$, MSE = $2,80\%$, RMSE = $16,74\%$). Gradient Boosted Trees và Decision Tree cũng mang lại kết quả khả quan nhưng vẫn kém hơn Random Forest. Do đó, trong 4 mô hình học máy khảo sát, Random Forest là lựa chọn phù hợp nhất để tối ưu hiệu suất anten, nhờ khả năng xử lý quan hệ phi tuyến tính giữa các biến và cung cấp dự báo chính xác nhất.



Hình 10. Kết quả so sánh giữa các mô hình học máy sử dụng

5. Kết luận

Bài báo đề xuất mô hình anten MIMO 2 cổng (2-port MIMO) hoạt động ở dải tần sóng millimet cho ứng dụng truyền thông không dây 5G. Anten đề xuất cho kết quả tốt với băng thông trở kháng 20,2%, bức xạ định hướng (broadside) ổn định trong băng tần hoạt động với giá trị cực đại 7,5dB, và khả năng tái cấu hình phân cực tròn/tuyến tính tại tần số trung tâm 26 GHz. Các thông số MIMO của anten đề xuất đều đạt giá trị yêu cầu, bên cạnh diện tích tổng thể nhỏ. Ngoài ra, anten MIMO đề xuất mở ra khả năng có thể phát triển cho mô hình 4 cổng ở các dải tần số khác nhau theo từng ứng dụng cụ thể.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển Khoa học và Công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 102.04-2023.36.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] S. A. Ali, M. Wajid, and M. S. Alam, “Antenna design challenges for 5G: Assessing future direction”, in *Enabling Technologies for Next Generation Wireless Communication*, 1st ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2020, ch. 9, pp. 149–152. [Online]. Available: <http://www.taylorfrancis.com>

[2] L. Dussopt, O. El Bouayadi, J. A. Z. Luna, C. Dehos, and Y. Lamy, “Millimeter-wave antennas for radio access and backhaul in 5G heterogeneous mobile networks”, in *Proc. 9th Eur. Conf. Antennas Propag. (EuCAP)*, Lisbon, Portugal, 2015, pp. 1–4.

[3] F. Giuppi, H. Sheng, C. Men, I. Russo, R. Lombardi, and M. Mattivi, “Substrate integrated waveguide-oriented design applied to the antenna section of mm-W communication systems: Challenges and advantages”, in *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, Los Angeles, CA, USA, 2019, pp. 1–3.

[4] D. T. T. My, H. N. B. Phuong, B. T. M Tu, and T. T. Huong, “Design antenna array for mm wave applications”, *The University of Danang - Journal of Science and Technology*, vol. 20, no. 7, pp. 47–53, Jul. 2022.

[5] H. D. T. Ngoc, “Wideband MIMO antenna for 5G base station”, *The University of Danang - Journal of Science and Technology*, vol. 21, no. 6.2, pp. 60–67, Jun. 2023.

[6] F. Arshad, A. Ahmad, Y. Amin, M. Ali Babar Abbasi, and D-Y. Choi, “MIMO antenna array with the capability of dual polarization reconfiguration for 5G mm-wave communication”, *Scientific reports*, vol. 12, no. 1, pp. 18298, 2022.

[7] H. T. P. Thao, “A Review of achieving frequency reconfiguration for antennas in wireless communications”, *The University of Danang - Journal of Science and Technology*, vol. 21, no. 6.2, pp. 7–13, Jun. 2023.

[8] N. Sarker, P. Podder, M. R. H. Mondal, S. S. Shafin, and J. Kamruzzaman, “Applications of machine learning and deep learning in antenna design, optimization and selection: A review”, *IEEE Access*, vol. 11, pp. 103890-103915, 2023.

[9] S.A. Ali, M. Wajid, A. Kumar, and M. S. Alam, “Design challenges and possible solutions for 5G SIW MIMO and phased array antennas: A review”, *IEEE Access*, vol. 10, pp. 88567-88594, 2022

[10] V. JayaPrakash, and D. S. Chandu, “Compact four-element quartermode circular SIW based MIMO antenna with enhanced isolation”, *Wireless Personal Communications*, vol. 133, no. 1 pp. 25-640, 2023.

[11] M. Pant and L. Malviya, “SIW MIMO antenna with high gain and isolation for fifth generation wireless communication systems”, *Frequenz*, vol. 78, no. 9-10, pp. 479-497, 2024.

[12] T. K. Nguyen, C. D. Bui, T-K. Pham, and T. D. Nguyen, “Polarization Reconfigurable Antenna Based on SIW Cavity for mmWave Applications”, in *Proc. 2024 IEEE Int. Conf. Antenna Meas. App. (CAMA)*, Da Nang, Vietnam, 2024, pp. 135-137.

[13] L. Zhang, A. Wu, P. Zhang, and Z. Zhang, “Triangular cavity multipassband hmsiw filter based on odd-even mode analysis”, *Electronics*, vol. 10, no. 23, p. 2927, 2021.