

ĂNG TEN MIMO 2x2 BẰNG SIÊU RỘNG CÓ HỆ SỐ CÁCH LY CAO ỨNG DỤNG CHO TRUYỀN THÔNG 5G BẰNG TẦN DƯỚI 6GHz

2x2 UWB MIMO ANTENNA WITH HIGH ISOLATION FOR 5G SUB-6GHz COMMUNICATIONS

Phạm Đình Hưng¹, Dương Thị Thanh Tú^{2*}

¹Tổng Công ty Công nghiệp Công nghệ cao Viettel, Việt Nam

²Học Viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông, Hà Nội, Việt Nam

*Tác giả liên hệ / Corresponding author: tudtt@ptit.edu.vn

(Nhận bài / Received: 23/9/2024; Sửa bài / Revised: 04/12/2024; Chấp nhận đăng / Accepted: 26/12/2024)

DOI: 10.31130/ud-jst.2025.415

Tóm tắt - Trong bài báo này, một ăng ten nhiều đầu vào, nhiều đầu ra (Multiple Input Multiple Output – MIMO) băng tần siêu rộng với độ cách ly cao giữa các phần tử được thiết kế để ứng dụng cho truyền thông 5G dưới 6GHz. Ăng ten được thiết kế gồm 4 phần tử vi dải đơn cực được in trên chất nền Roger 4350B với độ dày 0,762 mm và hằng số điện môi là 3,66. Các tham số thiết kế đã được tính toán và tối ưu để ăng ten MIMO được đề xuất hoạt động trong băng tần 2,35GHz – 6,43GHz. Cấu trúc mặt đất khuyết (DGS) được áp dụng nhằm đạt được hệ số cách ly toàn băng giữa các phần tử > 20dB (tối đa 66dB). Kết quả đo kiểm mẫu chế tạo có sự tương đồng cao ở tất cả các tham số so với mô phỏng. Với băng tần siêu rộng, thiết kế được giới thiệu hoàn toàn có thể ứng dụng cho 5G dưới 6GHz tại các băng tần No.41, No.46, No.77, No.78 và No.79.

Từ khóa - Ăng ten MIMO băng siêu rộng; tần số 5G dưới 6GHz; cách ly cao

1. Đặt vấn đề

Từ khi lần đầu công bố chuẩn kỹ thuật vào năm 2018 cho đến nay, truyền thông 5G vẫn luôn là một trong những đề tài nghiên cứu được quan tâm nhiều nhất. Công nghệ 5G hoạt động trên hai dải tần chính là Sub-6GHz (dưới 6GHz) và mmWave (24GHz – 71GHz) [1]. Tuy có dung lượng và tốc độ truyền cao nhưng mmWave lại có nhược điểm là vùng hoạt động thấp, suy hao trong không gian lớn, dễ bị tác động bởi các tín hiệu nhiễu và giá thành đắt đỏ. Vì thế, dù có tốc độ kém hơn nhưng với ưu điểm về vùng phủ và chi phí, tần số 5G dưới 6GHz là sự lựa chọn cân bằng, phù hợp ở cả vùng đô thị lẫn ngoại ô, nông thôn và đang dần được triển khai rộng rãi [2].

Trong truyền thông 5G, công nghệ MIMO đóng vai trò chủ chốt trong việc nâng cao thông lượng dữ liệu và chất lượng tín hiệu. Sự phát triển nhanh chóng của công nghệ ngày nay đang đặt ra yêu cầu nâng cao hiệu suất và chất lượng dịch vụ 5G. Để đáp ứng nhu cầu này, MIMO ứng dụng cho 5G đang phát triển theo hướng gia tăng số lượng ăng ten lên hàng chục hoặc thậm chí hàng trăm phần tử. Với số lượng ăng ten lớn và không gian trong thiết bị ngày càng thu nhỏ, hiện tượng tương hỗ lẫn nhau (mutual coupling) giữa các ăng ten phần tử là không thể tránh khỏi và làm giảm đáng kể hiệu suất của ăng ten [3]. Bởi vậy,

Abstract - This paper proposes an ultra-wideband (UWB) MIMO (Multiple Input Multiple Output) antenna with high isolation for 5G sub-6GHz communications. The antenna comprises four microstrip monopole elements printed on a Roger 4350B substrate with a thickness of 0.762 mm and a dielectric constant of 3.66. The design parameters were calculated and optimized to achieve an operating frequency range of 2.35GHz to 6.43GHz. A defected ground structure (DGS) was incorporated to obtain an isolation coefficient greater than 20dB, with a maximum of 66dB. There is a high coherence between simulation and experimental results at all parameters. With its ultra-wideband capabilities, the proposed antenna is applicable for 5G sub-6GHz operations in the No.41, No.46, No.77, No.78, and No.79 bands.

Key words - UWB MIMO antenna; 5G sub-6GHz; High isolation

việc nâng cao hệ số cách ly giữa các phần tử bức xạ đang được chú trọng nghiên cứu trong những năm gần đây.

Phương pháp giảm hiệu ứng tương hỗ giữa các phần tử đơn giản nhất chính là thêm các vách ngăn cơ khí giữa các phần tử. Trong [4], nhóm tác giả đã đạt được độ cách ly giữa các ăng ten phần tử lên đến hơn 40dB. Tuy nhiên, phương pháp này có nhược điểm là cần có không gian để triển khai vách ngăn, kích thước cấu trúc tổng thể lớn. Bởi thế, các cấu trúc cách ly trên cùng mặt phẳng như phần tử ký sinh, dải chắn điện từ (EBG), mặt phẳng đất khuyết (DGS), siêu vật liệu... là các phương pháp được nhiều nhà nghiên cứu lựa chọn [5]-[13]. Đa số các nghiên cứu này [5]-[10] đạt được hệ số cách ly phần tử ở mức tốt (> 20dB) đến rất tốt (>40dB) nhưng dải tần lại hẹp, chỉ từ vài chục đến vài trăm MHz. Còn các nghiên cứu cách ly băng tần rộng đến rất rộng như [11]-[13] thì chỉ đạt được mức cách ly toàn dải từ 16dB – 18dB.

Trong bài báo này, một ăng ten MIMO 2x2 băng siêu rộng (2,35GHz – 6,43GHz) được đề xuất. Để giảm thiểu hiệu ứng tương hỗ giữa các phần tử, ăng ten đã sử dụng cấu trúc mặt phẳng đất khuyết (DGS). Thiết kế được phân tích, mô phỏng và tối ưu trên phần mềm CST Suite Studio 2023. Ăng ten đề xuất đạt được hệ số cách ly ở mức tốt (>20dB), hệ số khuếch đại cao 6,3 dB tại tần số cộng

¹ Viettel High Technology Industries Corporation, Vietnam (Phạm Đình Hưng)

² Post and Telecommunications Institute of Technology, Vietnam (Dương Thị Thanh Tú)

hường 5,2GHz và hiệu suất bức xạ đạt trên 97% trên toàn băng tần hoạt động.

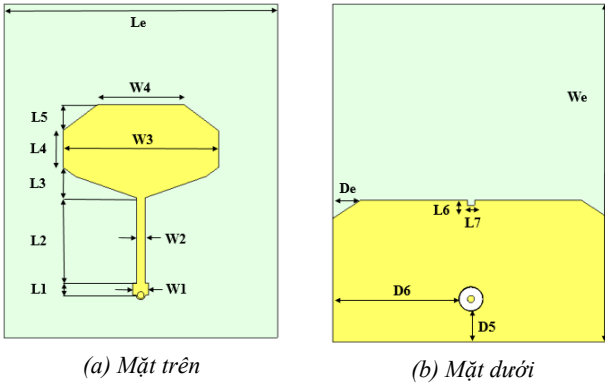
2. Thiết kế và phân tích tham số

2.1. Chấn tử đơn

Thiết kế của chấn tử đơn cho ăng ten MIMO được thể hiện ở Hình 1 với kích thước chi tiết của các tham số trong Bảng 1. Cấu trúc của ăng ten được in trên chất nền Roger 4350B có hằng số điện môi $\epsilon_r=3,66$ với kích thước tổng là $50 \times 61 \times 0,762 \text{ mm}^3$. Chấn tử này thuộc loại ăng ten vi dải đơn cực (microstrip monopole antenna) với tần số cộng hưởng được tính bằng các tham số kích thước theo công thức của [14] như sau:

$$f_r = \frac{15.3}{11 + 12 + b + \frac{R_1}{2\pi\sqrt{\epsilon_r + 1}} + \frac{R_2}{2\pi\sqrt{\epsilon_r + 1}}} \quad (1)$$

Với, R_1 là diện tích mặt đất, R_2 là diện tích miếng bức xạ, b là khoảng cách từ đỉnh mặt đất đến đáy của phần bức xạ, 11 và 12 lần lượt là độ dài của mặt đất và phần bức xạ.



Hình 1. Cấu trúc chấn tử đơn

Để tối ưu không gian và kích thước, ăng ten phần tử được cấp nguồn thông qua đầu kết nối SMA 50Ω được hàn vuông góc ở mặt dưới của chất nền. Trong Hình 1a, lõi đồng của đầu kết nối được hàn vào đường vi dải phối hợp trở kháng của ăng ten. Đường vi dải này gồm 2 phần, đoạn có độ dài L_1 có chức năng phối hợp trở kháng 50Ω của đầu kết nối SMA, đoạn L_2 còn lại sẽ phối hợp trở kháng với mặt bức xạ. Trở kháng của các đường vi dải được tính theo công thức của [15] như sau:

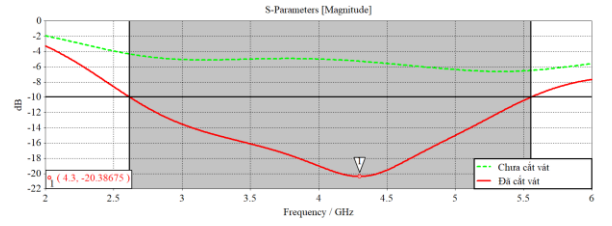
$$Z = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}} \times \left[\frac{W'}{h} + 1.393 + \frac{2}{3} \times \ln\left(\frac{W'}{h} + 1.444\right) \right]} \quad (2)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \times \left(1 + 12 \times \frac{h}{W'} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

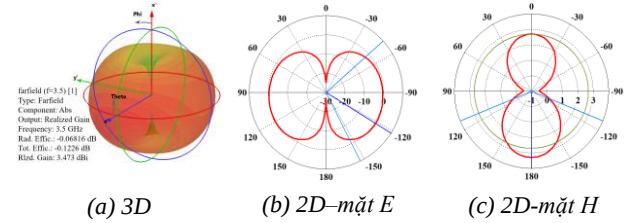
Với W' là độ rộng đường vi dải và h là độ dày chất nền. Đường vi dải này có tác dụng mở rộng băng tần hoạt động khi tối ưu kích thước để phối hợp trở kháng với mặt bức xạ. Cũng để tối ưu và mở rộng dải tần hoạt động, mặt bức xạ vuông được cắt vát ở 4 cạnh với các tham số L_3, L_5 . Sự ảnh hưởng của việc cắt vát này được thể hiện qua việc thay đổi hệ số suy hao phản hồi trong Hình 2.

Qua kết quả mô phỏng trên Hình 2, ăng ten vi dải đơn cực hoạt động ở băng tần 2,62GHz – 5,55GHz với hệ số phản xạ cực tiểu đạt -20,38dB tại 4,3GHz. Băng tần này đảm bảo có thể ứng dụng cho truyền thông 5G dưới 6GHz.

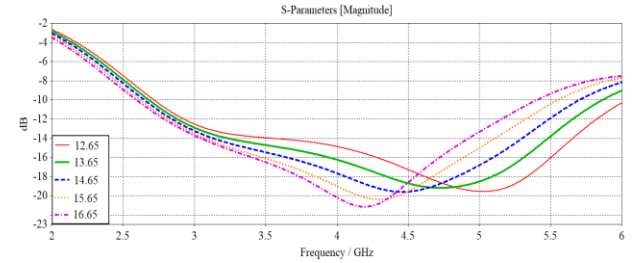
Hình 3 lần lượt giới thiệu đồ thị bức xạ 3D và 2D của ăng ten phần tử tại tần số 3,5 GHz. Từ đồ thị bức xạ, ăng ten vi dải đơn cực này đạt hiệu suất bức xạ -0,068dB (98,44%) với hệ số khuếch đại hiệu dụng ở mức 3,47dBi.



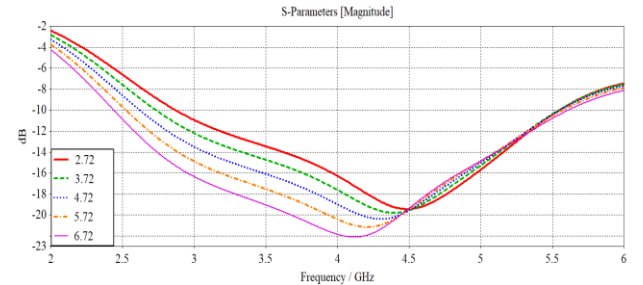
Hình 2. Hệ số suy hao phản hồi S_{11} của chấn tử đơn trong hai trường hợp



Hình 3. Đồ thị bức xạ 3D và 2D của chấn tử đơn



Hình 4. Ảnh hưởng của tham số L_2



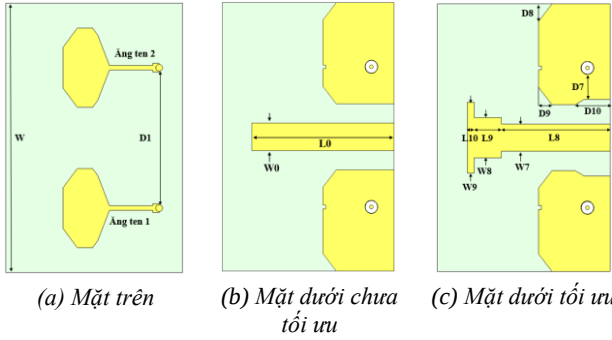
Hình 5. Ảnh hưởng của tham số L_4

Trên cấu trúc ăng ten đơn, mỗi một tham số kích thước đều có sự tác động nhất định lên tần số hoạt động. Trong số đó, đặc biệt nhất là hai tham số L_2 (độ dài đường vi dải phối hợp trở kháng) và L_4 (độ dài mặt bức xạ) ảnh hưởng nhiều nhất đến hệ số phản xạ của ăng ten. Trong Hình 4, khi tăng L_2 từ 12,65mm đến 16,65mm với bước nhảy 1mm, tần số cộng hưởng thấp nhất giảm nhẹ, độ rộng băng tần giảm từ 3,3GHz xuống còn 2,8GHz, tần số cộng hưởng cực đại di chuyển về tần số thấp hơn. Còn trong Hình 5, kết quả mô phỏng khi tăng L_4 mỗi 1mm từ 2,72mm thì băng tần cộng hưởng mở rộng hơn về phía các tần số thấp hơn, độ rộng băng tăng từ 2,68GHz đến 4,66GHz.

2.2. Cấu trúc cách ly

Hình 6 biểu diễn cấu trúc cải thiện hệ số cách ly được áp dụng cho thiết kế ăng ten MIMO đề xuất. Hai ăng ten đặt cách nhau một khoảng D_1 có giá trị xấp xỉ bằng nửa

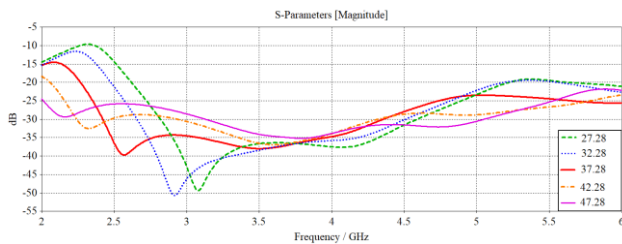
bước sóng của tần số trung tâm (Hình 6a). Cấu trúc DGS hình chữ nhật kích thước $L_0 \times W_0$ được thêm vào giữa hai ăng ten như Hình 6b. Cấu trúc DGS ở mặt dưới ăng ten, khoảng cách từ ăng ten đến cấu trúc này xấp xỉ $1/4$ bước sóng đóng vai trò như một mặt phản xạ, ngăn luồng công suất trên bề mặt truyền qua, từ đó giúp giảm hiệu ứng tương hỗ giữa các ăng ten. Để đảm bảo cấu trúc có thể chặn được hầu hết bức xạ, chiều dài L_0 được lựa chọn dài hơn chiều dài chân từ phát xạ, chiều rộng W_0 xấp xỉ $1/10$ bước sóng ở tần số trung tâm. Sau khi tối ưu, các kích thước và khoảng cách của cấu trúc cách ly được trình bày chi tiết trong Hình 6c và Bảng 1.



Hình 6. Ăng ten MIMO 2x2 với cấu trúc DGS

Bảng 1. Kích thước thiết kế

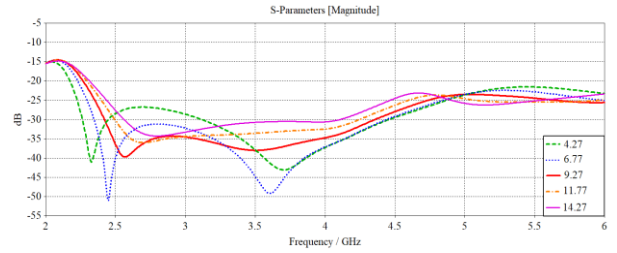
Tham số	Giá trị (mm)	Tham số	Giá trị (mm)	Tham số	Giá trị (mm)
L	118	W	90	D1	47
L1	2,17	W1	2,93	D2	38,29
L2	14,5	W2	1,62	D3	69,5
L3	5,59	W3	26,42	D4	20,57
L4	5,2	W4	13,49	D5	5,62
L5	4,81	W5	34,01	D6	19,36
L6	0,93	W6	24,5	D7	8,36
L7	1,28	W7	9,27	D8	5,84
L8	37,28	W8	13,54	D9	4,61
L9	9,33	W9	23,86	D10	12,09
L10	2,35	W10	61,15	De	5,07
Le	50	-	-	-	-



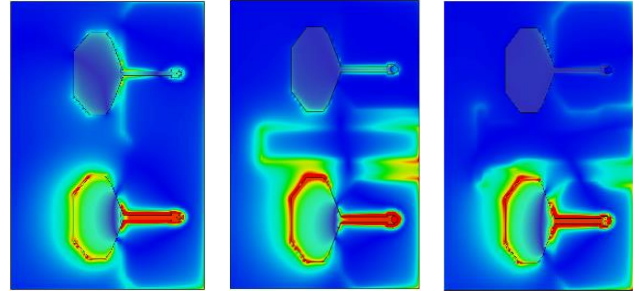
Hình 7. Ảnh hưởng của tham số L_8

Các tham số độ rộng và chiều dài của cấu trúc DGS có ảnh hưởng trực tiếp đến hệ số cách ly của ăng ten. Để đánh giá sự ảnh hưởng đến độ cách ly giữa hai ăng ten, L_8 và W_7 lần lượt được mô phỏng ở các bước ± 5 mm và $\pm 2,5$ mm so với kích thước đã được tối ưu. Hình 7 biểu diễn sự thay đổi của hệ số S_{21} khi L_8 tăng từ 27,28mm đến 47,28mm, băng tần cách ly mở rộng, điểm cách ly cực đại di chuyển về tần số thấp hơn và giảm dần cường độ. Còn khi tăng độ rộng đường cách ly W_7 từ 4,27mm

đến 14,27mm, độ cách ly cực đại có xu hướng giảm và dịch sang tần số cao hơn.

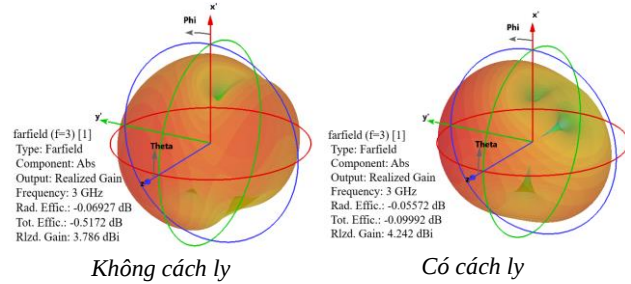


Hình 8. Ảnh hưởng của tham số W_7



Hình 9. Mật độ điện trường của ăng ten MIMO 1x2 ở các trường hợp

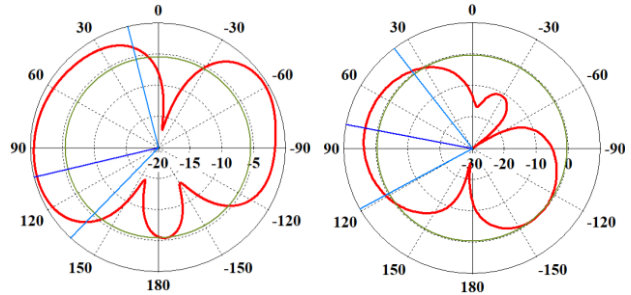
Hình 9. Mật độ điện trường của ăng ten MIMO 1x2 ở các trường hợp



Không cách ly

Có cách ly

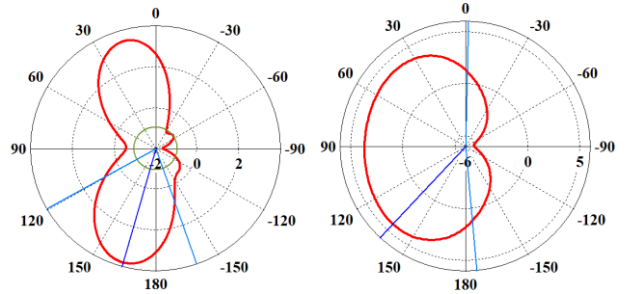
(a) 3D



Không cách ly

Có cách ly

(b) 2D - mặt E



Không cách ly

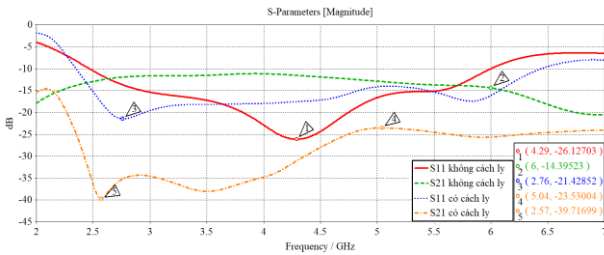
Có cách ly

(c) 2D - mặt H

Hình 10. Đồ thị bức xạ 3D và 2D ở hai trường hợp

Hình 9 biểu diễn mật độ điện trường trên ăng ten MIMO ở các trường hợp có và không có cấu trúc cách ly, hệ ăng ten được mô phỏng ở chế độ toàn sóng (Full-wave simulation), kích thích ở ăng ten 1. Khi chưa áp dụng cấu trúc cách ly, phần điện trường từ ăng ten 1 truyền sang ăng ten 2 như trong Hình 9a. Sau khi thêm cấu trúc DGS hình chữ nhật, điện trường từ ăng ten 1 bị chặn lại và phản xạ nhưng chưa triệt để (Hình 9b). Mặt đất được cắt khuyết kết hợp tối ưu hình dạng kích thước cấu trúc DGS (hình chữ T) có tác dụng triệt tiêu gần như toàn bộ công suất truyền sang ăng ten 2 (Hình 9c). Quan sát Hình 10, đồ thị bức xạ ở hai trường hợp đã chứng minh cấu trúc cách ly hoạt động như một phần tử phản xạ. Khi áp dụng cấu trúc cách ly, công suất không còn bức xạ sang phía ăng ten bên cạnh mà tập trung ở phía đối diện, hướng bức xạ chuyển từ phía trước và sau sang hướng cạnh của chất nền.

Hình 11 trình bày kết quả tổng hợp ảnh hưởng của cấu trúc DGS đến hệ ăng ten MIMO 1x2. Với ăng ten MIMO không có cấu trúc DGS, hệ số S11 dưới -10dB trong khoảng tần từ 2,46GHz đến 6,0GHz, giá trị cực tiểu đạt -26,12dB tại 4,29GHz. Khi áp dụng cấu trúc cách ly, băng tần của ăng ten rộng hơn 550MHz (từ 2,35GHz đến 6,4GHz) với giá trị thấp nhất trên toàn băng là -21,43dB tại 2,76GHz.



Hình 11. Hệ số S11 và S21 trong hai trường hợp

Bên cạnh đó, so sánh hệ số tương hỗ thông qua S21 khi có và không có cấu trúc cách ly. ăng ten MIMO khi không sử dụng cấu trúc DGS được đề xuất có hệ số tương hỗ trên toàn dải cao nhất là -14,41dB tại 6GHz. Với cấu trúc cách ly, mẫu ăng ten MIMO này đã giảm hệ số tương hỗ cao nhất xuống còn -23,53dB tại 5,04GHz và thấp nhất là -39,71dB tại 2,57GHz. Qua những kết quả trên, cấu trúc cách ly không chỉ giúp mở rộng băng tần mà còn giảm lượng công suất tương hỗ từ 9,12dB đến 25,3dB.

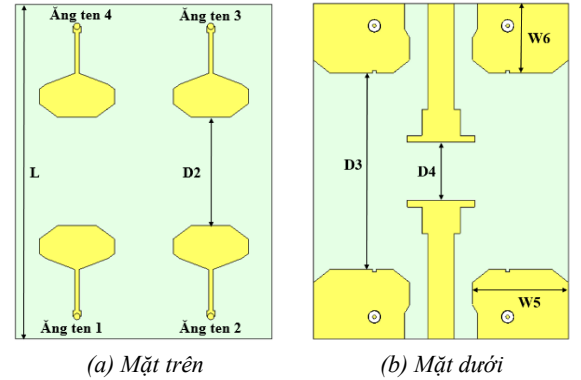
3. Thiết kế MIMO 2x2 được đề xuất

3.1. Cấu trúc và kết quả mô phỏng

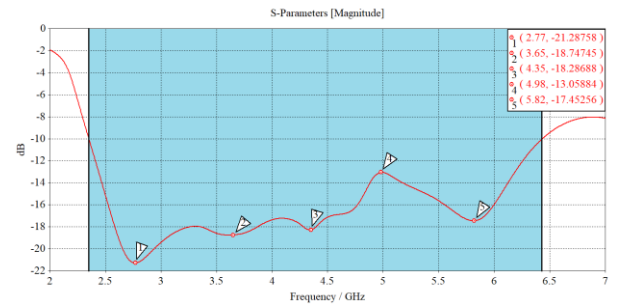
Thiết kế của ăng ten MIMO 2x2 trong Hình 12 có kích thước tổng là 118 x 90 x 0,762 mm³, được hợp thành từ hai ăng ten MIMO 1x2 được trình bày ở phần 2.2.

Trong Hình 13, dải tần hoạt động của ăng ten MIMO được đề xuất rộng 4,08GHz với giá trị S11 thấp nhất là -21,28dB tại 2,77GHz. Khi so sánh với ăng ten MIMO 1x2, độ rộng dải tần không đổi, đảm bảo băng tần hoạt động khi ghép lên các hệ MIMO lớn hơn. Với dải tần làm việc siêu rộng, ăng ten MIMO được đề xuất hoàn toàn có thể ứng dụng cho truyền thông 5G dưới 6GHz. Các hệ số S21, S31 và S41 trên Hình 14 thể hiện độ cách ly giữa các ăng ten MIMO trên cùng hệ. Trên toàn băng tần hoạt động, hệ số tương hỗ giữa các ăng ten phần tử đều đạt mức tốt (< -20,7dB), cụ thể các thông số được trình bày trong Bảng

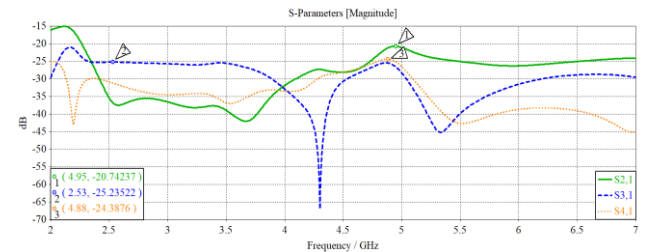
2. Bên cạnh đó, Hình 15 cũng cho thấy, điện trường của ăng ten được cấp nguồn gần như không truyền sang các phần tử MIMO khác. So sánh với hệ số cách ly của ăng ten MIMO 1x2, kết quả chênh lệch không nhiều cho thấy cấu trúc DGS có hiệu suất hoạt động ổn định khi áp dụng lên các hệ ăng ten MIMO nhiều phần tử hơn.



Hình 12. Thiết kế ăng ten MIMO 2x2



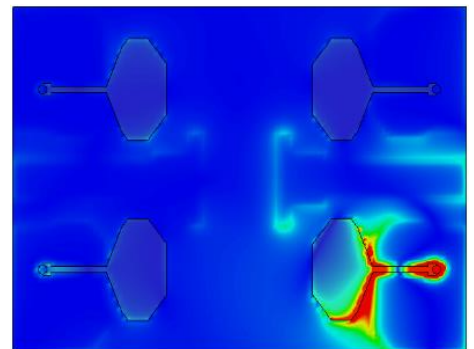
Hình 13. Hệ số S11 của ăng ten được đề xuất



Hình 14. Hệ số truyền của ăng ten MIMO 2x2

Bảng 2. Các thông số cách ly

Tham số	Giá trị cực đại (dB)	Giá trị cực tiểu (dB)
S21	-20,74	-42,05
S31	-25,23	-66,9
S41	-24,38	-42,62



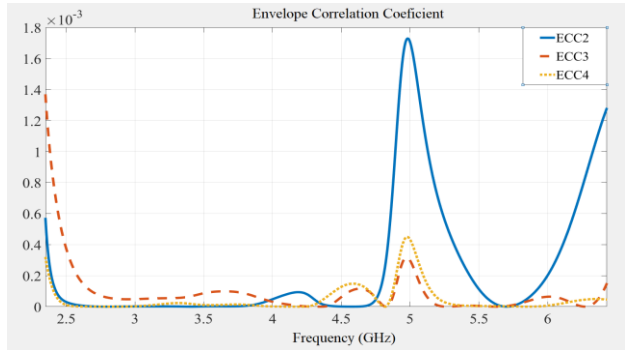
Hình 15. Mật độ điện trường ăng ten MIMO 2x2

Hệ số tương quan bao (ECC) là một hệ số quan trọng trong việc đánh giá độc lập của một phần tử trên hệ MIMO. Trong điều kiện lý tưởng, ăng ten phần tử được đánh giá hoàn toàn độc lập với các phần tử khác khi ECC=0, và độc lập ở mức có thể chấp nhận khi ECC < 0,5. Hệ số này được tính theo công thức [16]:

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

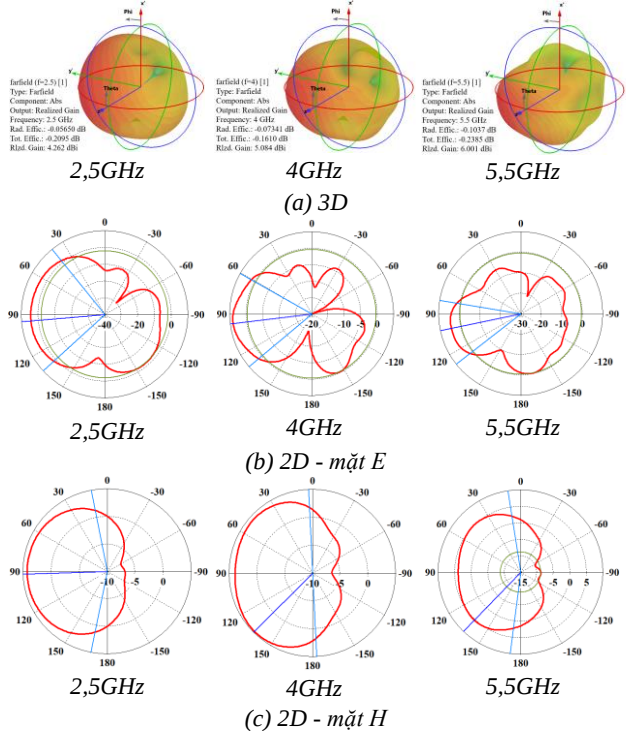
(4)

Từ công thức trên, hệ số ECC của ăng ten xét đến các phần tử khác được tính và trình bày trên Hình 16. Mẫu ăng ten đề xuất có hệ số tương quan bao cao nhất với ăng ten phần tử bên cạnh. Tuy nhiên, hệ số ECC trên toàn dải lại đạt mức cực tốt là <0,002. Điều này cho thấy, các ăng ten trên hệ MIMO đề xuất, hệ số ECC tiệm cận mức lý tưởng.



Hình 16. ECC của ăng ten MIMO 2x2

Hình 17 biểu diễn đồ thị bức xạ 3D và 2D của ăng ten MIMO được đề xuất tại các băng tần tiêu biểu của 5G dưới 6GHz (2,5GHz, 4GHz và 5,5GHz). Quan sát đồ thị 2D, công suất bức xạ tập trung ở phía bên ăng ten với góc 3dB siêu rộng từ 160 độ đến 180 độ.



Hình 17. Đồ thị bức xạ 3D, 2D tại các tần số 5G

Xét trên toàn dải 2,35GHz-6,43GHz, hệ số khuếch đại, hiệu suất bức xạ và hiệu suất tổng của mẫu ăng ten MIMO

2x2 được thể hiện trên Hình 18 và Hình 19. Với hiệu suất bức xạ (Radiation efficiency - ϵ_r) tốt từ 96,8% đến 98,7%, hệ ăng ten MIMO 2x2 đạt hệ số khuếch đại hiệu dụng (Realized gain - G_{re}) từ 4,1dBi đến 6,27dBi với giá trị cực đại tại 5,25GHz. Bên cạnh đó, hiệu suất tổng (Total efficiency - ϵ_t) đạt 86,7%-97,2% cho thấy, thiết kế có hệ số suy hao đường truyền thấp. Mối quan hệ của các kết quả này được thể hiện ở các công thức (5)-(7):

$$\epsilon_r = \frac{P_r}{P_{in}}$$

(5)

$$\epsilon_t = \epsilon_r \times M_L$$

(6)

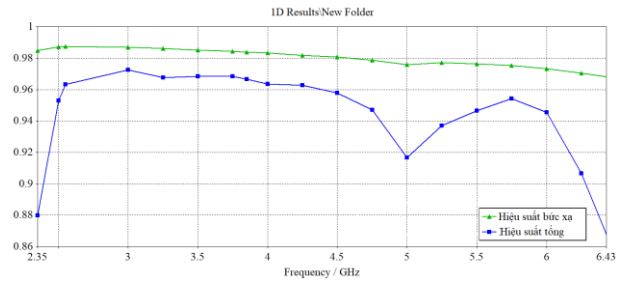
$$G_{re} = D \times \epsilon_t$$

(7)

Với P_r và P_{in} lần lượt là công suất bức xạ và công suất đầu vào ăng ten; M_L là suy hao phối hợp trở kháng đầu vào và D là hệ số định hướng của ăng ten.



Hình 18. Hệ số khuếch đại hiệu dụng của ăng ten MIMO được đề xuất



Hình 19. Hiệu suất bức xạ và hiệu suất tổng của ăng ten MIMO được đề xuất

Bảng 3. So sánh thiết kế được đề xuất với các nghiên cứu gần đây

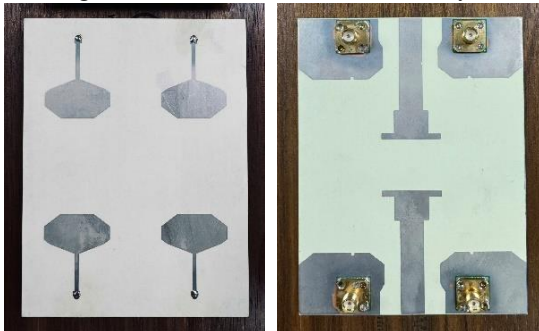
Tài liệu	Dải tần (GHz)	Kỹ thuật cách ly	Hệ số cách ly cực tiểu (dB)	Hệ số khuếch đại (dBi)
[5]	3,4 – 3,6	Cách ly phân cực và phần tử phụ	20	5,06 – 5,41
[6]	1,95 – 2,5	Phần tử cộng hưởng	24	1,6
	3,15 – 3,85		22	3,5
	4,95 – 6,6		22,5	4,15
[7]	2,5 – 2,55	DGS	20	6,1
[8]	2,37 – 2,42	Tải khe	29,96	1,8
	3,33 – 3,39		24,98	1,2
[9]	1,34 – 3,92	Siêu vật liệu	18	2,6
	4,34 – 6,34		34	4,9
[10]	4,82 - 5	EBG và DGS	22	NA
[11]	3 - 6	Siêu vật liệu	16	3,28
[12]	3,6 – 17,9	EBG	18	1,4 - 4
[13]	3 - 4	DGS	16,53	3,84 – 6,24
	4,3 – 5,6		18,17	
	8,4 – 9,5		17,95	
Đề xuất	2,35 – 6,43	DGS	20,73	4,2-6,27

Bảng 3 so sánh mẫu ăng ten MIMO 2x2 được đề xuất với các nghiên cứu về cách ly trên ăng ten Hệ số cách ly của ăng ten MIMO 2x2 bằng hoặc thấp hơn các nghiên cứu [5]-[10] nhưng khi so về băng tần hoạt động, các thiết kế này có dải tần chỉ từ vài chục đến vài trăm MHz trong khi ăng ten đề xuất lại rộng đến 4,08GHz. Nếu xét đến các nghiên cứu cách ly trên băng rộng như [11]-[13] thì thiết kế cách ly được trình bày trong bài nghiên cứu này lại tối ưu hơn với hệ số cách ly cực tiểu đạt 20,734dB. Ngoài ra, hệ số khuếch đại của thiết kế cao nhất khi so với [11]-[13] và cao hơn phần lớn các nghiên cứu [5]-[10].

3.2. Kết quả thực nghiệm

Để đánh giá hiệu suất trong thực tế, mẫu ăng ten MIMO 2x2 đã được chế tạo với kích thước 118 x 90 x 0,762 mm³ trên chất nền RO4350B, quá trình chế tạo mạch in sử dụng phương pháp ăn mòn truyền thống, phổ biến hiện nay tại Việt Nam với chi phí rẻ và phù hợp cho sản xuất loạt. Phần đế của đầu kết nối được hàn lên mặt đất còn phần lõi đồng được hàn vào đường vi dải cấp nguồn của ăng ten như trong Hình 20.

Sau khi đo ăng ten trên máy phân tích mạng Rohde & Schwarz ZNB-20, kết quả có sự đồng nhất cao khi so sánh với kết quả mô phỏng. Trong Hình 23, kết quả S11 đã được có biên độ tần số cắt gần như trùng với kết quả mô phỏng và đặc biệt là băng tần cộng hưởng rộng hơn so với băng tần hoạt động được đề xuất ở phần 3.1. Hình 24 thể hiện hệ số S21 của hai kết quả gần như trùng lặp nhau, tuy các tần từ 2,5GHz đến 4GHz có độ cách ly kém hơn nhưng vẫn ở mức rất tốt là <-30dB. Với hệ số S31 và S41 trong Hình 25 và Hình 26, kết quả đo kiểm giống kết quả mô phỏng trên 90% từ biên dạng, tần số cắt cho đến các điểm cách ly cực đại.



(a) Mặt trên

(b) Mặt dưới

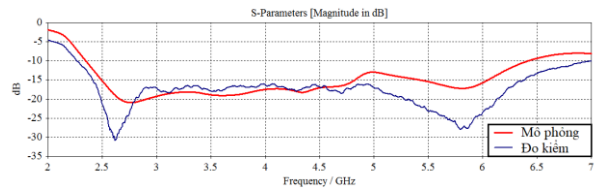
Hình 20. Ăng ten được chế tạo



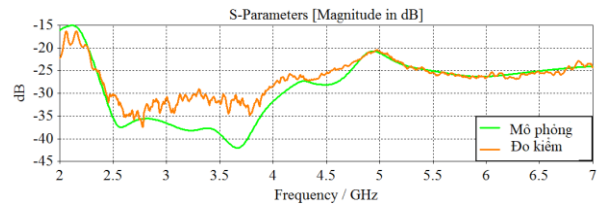
Hình 21. Ăng ten kết nối với máy đo



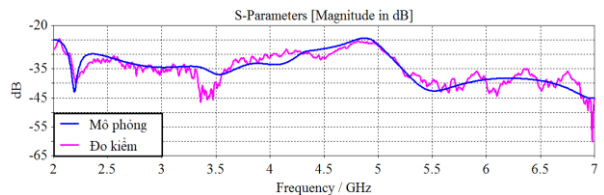
Hình 22. Kết quả trên máy đo



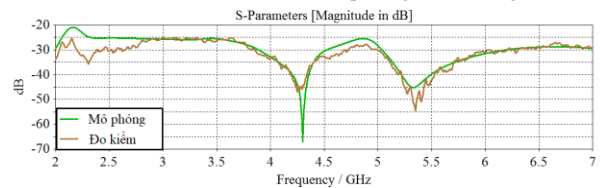
Hình 23. So sánh hệ số S11 mô phỏng và thực nghiệm



Hình 24. So sánh hệ số S21 mô phỏng và thực nghiệm



Hình 25. So sánh hệ số S31 mô phỏng và thực nghiệm



Hình 26. So sánh hệ số S41 mô phỏng và thực nghiệm

4. Kết luận

Trong bài nghiên cứu này, một mẫu ăng ten MIMO 2x2 băng siêu rộng có hệ số cách ly cao được trình bày. Dải tần hoạt động của mẫu ăng ten này hoàn toàn phù hợp với các băng No.41, No.46, No.77, No.78 và No.79 của truyền thông 5G tần số dưới 6GHz. Bên cạnh đó, các kết quả mô phỏng từ chân từ đơn đến ăng ten MIMO 2x2 đã được trình bày cho thấy hiệu suất của thiết kế có tính ổn định và có thể áp dụng lên các hệ MIMO lớn hơn nữa. Đặc biệt, áp dụng mô hình thiết kế này cho kết quả đo kiểm thực nghiệm có sự tương đồng cao khi so với kết quả mô phỏng. Từ những kết quả nghiên cứu trong bài viết, thiết kế ăng ten MIMO 2x2 băng rộng có độ cách ly cao này đảm bảo khả năng ứng dụng trong thực tế và đủ tiềm năng để trở thành sản phẩm thương mại.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] S. Saxena, S. Dwari, and B. K. Kanaujia, "Design of 4(N+1) Element Dual-CP Massive MIMO Antenna for 5G Systems Operating in Sub-6 GHz Band", *2020 Third International Conference on Advances in Electronics, Computers and Communications (ICAEECC)*, Bengaluru, India, 2020, pp. 1-4.
- [2] J. Gieske, "5G mmWave vs. Sub-6: A Comparative Study of Two 5G Frequency Bands", *NYBSYS.com*, August 18, 2024. [Online]. Available: <https://nybsys.com/5g-mmwave-vs-sub-6/#:~:text=mmWave%20and%20Sub%2D6%20GHz,range%20remains%20under%206%20GHz>. [Accessed September 10, 2024].
- [3] Z. Chen, J. Li, and T. Yuan, "A Compact Dual-Band and High-Isolation MIMO Antenna System for 5G Smartphone Applications", *2020 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP)*, Suzhou, China, 2020, pp. 1-3.
- [4] J. Liu, Y. Yue, and C. Liu, "Design of a Miniaturized Dual-Polarized Slot-Coupled Patch Antenna Element and Its Sub-array", *2020 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP)*, Suzhou, China, 2020, pp. 1-3.
- [5] K. Liao, W. Chen, and C. Sim, "Massive MIMO 5G small cell antenna with high isolation", *2017 International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition*, London, UK, 2017, pp. 26-28.
- [6] A. Ramachandran, S. Mathew, V. Rajan, and V. Kesavath, "A Compact Triband Quad-Element MIMO Antenna Using SRR Ring for High Isolation", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 1409-1412, 2017. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2016.2640305>.
- [7] M. Y. Jamal, M. Li, and K. L. Yeung, "Isolation Enhancement of Closely Packed Dual Circularly Polarized MIMO Antenna Using Hybrid Technique", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 11241-11247, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2964902>.
- [8] R. Ramesh and U. K. Kommuri, "Isolation enhancement for dual-band MIMO antenna system using multiple slots loading technique", *International Journal of Communication Systems*, vol. 33, no. 12, e4470, 2020. <https://doi.org/10.1002/dac.4470>.
- [9] S. Roy and U. Chakraborty, "Mutual Coupling Reduction in a Multi-band MIMO Antenna Using Meta-Inspired Decoupling Network", *Wireless Personal Communications*, vol. 114, pp. 3231-3246, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07526-5>.
- [10] Y. Liu, X. Yang, Y. Jia, and Y. J. Guo, "A Low Correlation and Mutual Coupling MIMO Antenna", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 127384-127392, 2019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2939270>.
- [11] N. Supreeyatitkul, A. Phungasem, and P. Aeimopas, "Design of Wideband Sub-6 GHz 5G MIMO Antenna with Isolation Enhancement Using an MTM-Inspired Resonators", *2021 Joint International Conference on Digital Arts, Media and Technology with ECTI Northern Section Conference on Electrical, Electronics, Computer and Telecommunication Engineering*, Cha-am, Thailand, 2021, pp. 206-209.
- [12] T. Dabas, D. Gangwar, B. K. Kanaujia, and A.K. Gautam, "Mutual coupling reduction between elements of UWB MIMO antenna using small size uniplanar EBG exhibiting multiple stop bands", *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, Vol. 93, pp. 32-38, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2018.05.033>.
- [13] K. V. Babu and B. Anuradha, "Design of UWB MIMO Antenna to Reduce the Mutual Coupling Using Defected Ground Structure", *Wireless Personal Communications*, vol. 118, pp. 3469-3484, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11277-021-08189-6>.
- [14] T. Addepalli, K. V. Babu, T. Vidyavathi, R. Manda, and B. K. Kumar, "Design and analysis of nonagonal patch unite with rectangular shaped 4-element UWB-MIMO antenna for portable wireless device applications", *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, vol. 114, pp. 459-473, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10470-023-02138-y>.
- [15] E. O. Hammerstad, "Equations for Microstrip Circuit Design", *1975 5th European Microwave Conference*, Hamburg, Germany, 1975, pp. 268-272.
- [16] C. Votis, G. Tatsis, and P. Kostarakis, "Envelope Correlation Parameter Measurements in a MIMO Antenna Array Configuration", *International Journal of Communications, Network and System Sciences*, Vol. 3, No. 4, pp. 350-354, 2010. <http://dx.doi.org/10.4236/ijcns.2010.34044>.