

MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ ANTEN VI DẪI VỚI CẤU TRÚC DGS CHO CÁC THIẾT BỊ BLUETOOTH NĂNG LƯỢNG THẤP

Simulate and Evaluate 2.4Ghz Microstrip Patch Antenna with Defected Ground Structure for Bluetooth Low Energy

Lê Hữu Phúc¹

Hồ Thiên Luân²

Tóm tắt

Trong vài năm gần đây với sự tiến bộ trong lãnh vực vi mạch ở siêu cao tần và trong truyền thông không dây, các nghiên cứu và thiết kế các anten vi dải (MAs) đòi hỏi kích thước nhỏ và hiệu suất cao. Do đó, đã ra đời nhiều phương pháp cải tiến các anten vi dải, một trong những phương pháp đó là thay đổi cấu trúc mặt phẳng nền nổi đất (DGS.). Kỹ thuật này đơn giản là tạo các dị tật trên nền các anten vi dải (MAs). Bài báo sau đây trình bày ảnh hưởng của các dị tật nền trên một anten vi dải hình chữ nhật lên một số thông số anten: hệ số suy hao do phản xạ... Dùng phần mềm HFSS mô phỏng các thông số anten này với cấu trúc DGS đề nghị, kết quả cho thấy cải thiện đáng kể các thông số này.

Từ khóa: Bluetooth năng lượng thấp, anten vi dải, cấu trúc mặt phẳng nền nổi đất, phần mềm HFSS.

Abstract

With the advancement of microwave intergrated circuits and wireless telecommunicative technologies, the study and design of a new range of microstrip antennas (MAs) which requires compact size, high performance is increasingly being emphasized. In recent years, there have been several new methods to improve microstrip circuits; one of which is used to modify the antenna ground plane in enhancing the performance of antenna. This technique is simply to put a "defect" on the ground plane of MAs; it has opened the door for the next series of this application. This paper is to present a simple rectangular microstrip patch antenna (R-MPA) and three other R-MPAs with three different samples of DGS, the proposed antenna has been simulated at 2.4 GHz frequency, used for bluetooth low energy devices. The antenna is simulated by the software HFSS. HFSS, high frequency structure simulator is employed to analyze the proposed antenna and simulated results on return loss. The resultant antenna with Defected Ground Structure has improved in parameters performance.

Key words: Bluetooth Low Energy, Microstrip Antenna, Defected Ground Structure, HFSS.

I. Giới thiệu

Công nghệ không dây đã ra đời và đang phát triển mạnh mẽ, tạo rất nhiều thuận lợi cho con người trong đời sống hằng ngày. Kỹ thuật không dây phục vụ rất nhiều nhu cầu khác nhau của con người, từ nhu cầu làm việc, học tập đến các nhu cầu giải trí như chơi game, xem phim, nghe nhạc,... Với các nhu cầu đa dạng và phức tạp đó, Viện Kỹ sư Điện và Điện tử đưa ra IEEE 802.11, đó là tập chuẩn không dây với các đặc điểm kỹ thuật khác nhau để có thể phù hợp với từng nhu cầu, mục đích và khả năng của người sử dụng

như IrDA, WLAN, ZigBee, UWB, Bluetooth,... Mỗi chuẩn kỹ thuật đều có những ưu, khuyết điểm riêng của nó, và Bluetooth đang dần nổi lên là kỹ thuật không dây tầm ngắn có nhiều ưu điểm, rất thuận lợi cho những thiết bị di động. Với sự cải tiến Bluetooth V4.0 - Bluetooth năng lượng thấp (Bluetooth Low Energy - BLE) trong năm 2011, nó đã được ứng dụng rộng rãi hơn nữa và đặc biệt trong các thiết bị yêu cầu hoạt động với thời gian lâu.

Tất nhiên, phần quan trọng trong việc giao tiếp bằng sóng là phần anten vi dải, đó là phần đảm nhận nhiệm vụ thu/phát trong thiết bị Bluetooth năng lượng thấp và cũng là phần tiêu tốn năng

¹ Tiến sĩ, Đại học Khoa học Tự nhiên TP Hồ Chí Minh

² Thạc sĩ, Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông TP Hồ Chí Minh

lượng nhiều nhất trong thiết bị Bluetooth. Trước đây cũng có một số bài báo đề cập đến mô phỏng anten vi dải cho thiết bị Bluetooth. Với bài báo này, chúng ta cũng tập trung việc mô phỏng và đánh giá anten vi dải cho thiết bị Bluetooth năng lượng thấp nhưng có kết hợp với cấu trúc dị tật trên mặt phẳng đất - Defected Ground Structure (DGS). DGS là một kỹ thuật sửa đổi lại mặt phẳng đất trong anten để nâng cao hiệu suất hoạt động của anten. Việc kết hợp DGS trong anten vi dải sẽ cải thiện hiệu suất hoạt động của anten như cải thiện suy hao phản xạ, tăng băng thông truyền, tăng độ lợi...

Với bài báo này, chúng ta sẽ tiến hành thiết kế và mô phỏng anten vi dải hình chữ nhật thông thường, anten vi dải có kết hợp các mẫu dị tật trên mặt phẳng đất (Defected Ground Structure). Kết quả của việc mô phỏng sẽ cho ta thấy những ảnh hưởng của DGS đến hiệu suất hoạt động của anten vi dải.

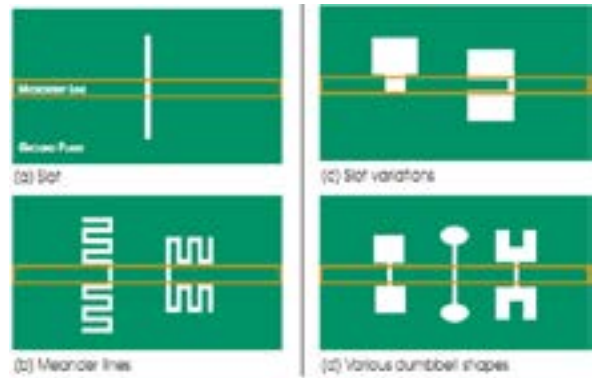
II. Phương pháp tạo dị tật trên mặt phẳng đất – Defected Ground Structure và ứng dụng của nó trong anten vi dải

1. Phương pháp tạo dị tật trên mặt phẳng đất – Defected Ground Structure

Như chúng ta biết, dải tần của anten vi dải vốn thường là dải tần hẹp và có thể mở rộng tùy theo các yêu cầu ứng dụng thực tế. Anten vi dải có nhiều ưu điểm và được ứng dụng rộng rãi trong hệ thống thông tin liên lạc, vì vậy việc cải tiến chất lượng anten như mở rộng băng thông, giảm thiểu kích thước, tăng độ lợi, giảm suy hao do phản xạ,... luôn luôn được đặt lên hàng đầu.

Trong những năm trở lại đây, đã có một vài phương pháp mới để cải tiến các mạch vi dải. Một trong số đó là kỹ thuật Defected Ground Structure (DGS), DGS là một kỹ thuật dùng để sửa đổi lại mặt phẳng đất trong anten để nâng cao hiệu suất hoạt động của anten. Kỹ thuật này được hiểu đơn giản là đặt một “dị tật” lên trên mặt phẳng đất của anten vi dải, nó đã mở ra cánh cửa cho những ứng dụng hàng loạt sau này. Rất nhiều nghiên cứu về DGSs đã được đề xuất và DGSs trở thành một mảng thú vị cho việc nghiên cứu ứng dụng nó trong các mạch vi dải (Gary Breed 2008, tr.50).

Hình 2.1 cho chúng ta thấy một số cấu trúc DGS được sử dụng phổ biến hiện nay. Các mẫu DGS có sự khác nhau về hình dạng, mạch tương đương L-C, hệ số ghép nối, đáp ứng tần số và các thông



Hình 2.1 Một số khuôn mẫu DGS

số khác. Mặc dù các “dị tật” đặt thêm sẽ làm mất đi tính đồng nhất của mặt phẳng đất, tuy nhiên, chúng không làm mặt phẳng đất bị lỗi. Người sử dụng phải chọn cho mình một cấu trúc hiệu quả cho mạch vi dải của mình.

Một khuôn mẫu DGS cơ bản là một rãnh cộng hưởng trên mặt phẳng đất, đặt trực tiếp dưới đường truyền vi dải và ghép nối một cách hiệu quả cho đường truyền vi dải. Khuôn mẫu DGS được kết hợp trên mặt phẳng đất sẽ làm thay đổi sự phân bố dòng trong lớp chắn điện, sự thay đổi này phụ thuộc vào hình dạng và kích thước của DGS. Sự thay đổi này cũng ảnh hưởng đến trở kháng đầu vào và dòng điện chảy trong anten. Nó cũng có thể điều khiển được sự kích thích và sóng điện từ truyền qua lớp nền.

Khi chúng ta sử dụng anten vi dải, sự suy hao luôn luôn xảy ra trong quá trình truyền tín hiệu. Suy hao do sự kích thích sóng bề mặt sẽ làm giảm hiệu suất sử dụng, độ lợi, băng thông vì khi có sóng bề mặt xảy ra, nó sử dụng một phần năng lượng dự trữ để truyền sóng ra không gian. Với những anten không có cấu trúc DGS thì có băng thông hẹp, suy hao do phản xạ cao, độ lợi thấp,... mặt khác những anten kết hợp cấu trúc DGS hiệu quả sẽ cho băng thông cao hơn, giảm suy hao do phản xạ,... (Rajeshwar Lal Dua, et al 2012, tr. 263)

2. Ứng dụng của DGS trong thiết kế mạch vi dải

DGS được ứng dụng rộng rãi trong các thiết bị thụ động hoặc tích cực, đặc biệt rất hữu ích cho các thiết kế nhỏ gọn (anten vi dải là ví dụ điển hình về điều này). Nó được dùng cho việc lọc các tín hiệu không mong muốn, nâng cao chất lượng hệ thống (ví dụ trong anten vi dải nó có tác dụng cải thiện suy hao phản xạ tại tần số cộng hưởng, tăng băng thông đường truyền...). Mỗi DGS có một đặc tính riêng của mình, tùy thuộc vào hình dạng, kích

thước và vị trí của nó. Nó dễ dàng thực hiện bằng cách đặt một mẫu “dị tật” DGS trên mặt phẳng đất để làm tăng hiệu quả hoạt động của mạch được thiết kế mà không làm mạch phức tạp thêm.

Đã có rất nhiều công trình nghiên cứu về Defected Ground Structure và tích hợp nó trong anten vi dải. (Rajeshwar Lal Dua, et al 2012), (Z. Atlasbaf, K. Forooghi and S.A. Hosseini 2008). Khi chúng ta sử dụng anten vi dải để truyền tín hiệu, sóng cần truyền đi di chuyển vào anten qua đường cấp nguồn và lan rộng xuống phía dưới. Sau đó nó tiến sát đến cạnh của anten, tại đây một phần năng lượng sẽ phản xạ trở lại và phần còn lại sẽ bức xạ ra không gian tự do. Năng lượng phản xạ trở lại càng lớn, tức là suy hao do phản xạ càng cao, dẫn đến hiệu suất anten thấp. Với một số anten vi dải không kết hợp DGS sẽ có băng thông thấp, suy hao do phản xạ cao và ngược lại anten vi dải có kết hợp DGS sẽ cho băng thông rộng hơn và suy hao do phản xạ thấp hơn.

Một khuôn mẫu DGS tích hợp trên mặt phẳng đất sẽ gây ảnh hưởng có lợi đến hiệu suất hoạt động của anten như giảm kích thước của anten, giảm sự phân cực chéo, giảm suy hao khớp nối trong mảng anten, giúp cho việc ngăn chặn các tín hiệu không mong muốn (như một filter), cải thiện suy hao phản xạ, tăng băng thông truyền dẫn,...

Bài báo này sẽ sử dụng mẫu DGS cơ bản đó là DGS hình chữ nhật (Rectangular Defected Ground Structure - RDGS) để đặt lên mặt phẳng đất của anten vi dải hình chữ nhật thông thường. (ba mẫu R-DGS với kích cỡ, vị trí đặt khác nhau trên mặt phẳng đất). Thực hiện mô phỏng, so sánh các thông số hoạt động của anten vi dải có kết hợp RDGS với anten vi dải ban đầu (không có kết hợp RDGS). Việc thực hiện và kết quả mô phỏng sẽ được trình bày trong phần III.

III. Thiết kế và mô phỏng anten vi dải

1. Thiết kế anten vi dải

Ta đặt ra bài toán thiết kế như sau: Thiết kế anten vi dải hình chữ nhật bằng đồng, cấp nguồn bằng đường truyền vi dải và phối hợp trở kháng dùng phương pháp inset feed. Bản kim loại hình chữ nhật được chọn vì cấu trúc đơn giản và dễ thiết kế. Anten đặt trên tần số 2.4 – 2.48 (Tần số kết nối giữa các thiết bị Bluetooth năng lượng thấp được ứng dụng rộng rãi theo chuẩn IEEE 802.11). Anten được đặt trên lớp điện môi với độ dày h . Những thông số này sẽ được thể hiện rõ ràng qua Bảng 3.1 sau:

Bảng 3.1 Các thông số cho trước để thiết kế anten

| | |
|--|--------------------------|
| Tần số hoạt động | 2.4 - 2.48 GHz |
| Hằng số điện môi của lớp điện môi (ϵ_r) | 2.2 (Neltec NY9220) |
| Độ dày lớp điện môi (h) | 1.6 mm |
| Phương thức cấp nguồn | Dùng đường truyền vi dải |
| Phối hợp trở kháng | Inset feed line |

Dựa vào các công thức tính toán các thông số của anten vi dải như sau:

$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (3.1)$$

Hằng số điện môi hiệu dụng của anten vi dải

$$\epsilon_{r_{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (3.2)$$

Chiều dài mở rộng của miếng patch:

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{r_{eff}} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{r_{eff}} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (3.3)$$

Chiều dài hiệu dụng L_{eff} của patch:

$$L_{eff} = \frac{v_0}{2f_r \sqrt{\epsilon_{r_{eff}}}} \quad (3.4)$$

Chiều dài thực L của patch:

$$L = L_{eff} - 2 \times \Delta L \quad (3.5)$$

Để trở kháng ngõ vào của anten là 50 Ohm, thì điểm cấp tín hiệu cho anten sẽ lấn sâu vào trong anten một khoảng y_0 với:

$$\rightarrow y_0 = \frac{L}{\pi} \cos^{-1} \left(\sqrt{\frac{50}{R_{in}}} \right) \quad (3.6)$$

Để phối hợp trở kháng với đường dài dẫn 50 Ohm thì đường vi dải cấp tín hiệu cho anten tại vị trí y_0 cần có bề mặt w_0 với:

$$Z_c = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{r_{eff}} \left[\frac{w_0}{4h} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{w_0}{4h} + 1.444 \right) \right]}} = 50 \text{ (Ohm)} \quad (3.7)$$

Bảng 3.2 Các thông số của anten vi dải thông thường hoạt động tại tần số 2.4 GHz

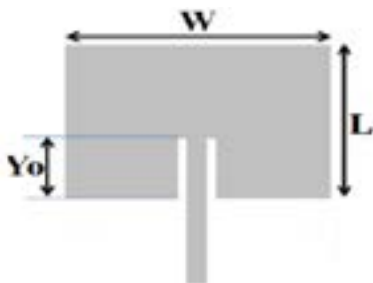
| Các thông số tính toán | Kết quả |
|-------------------------------|----------------|
| Chiều rộng (W) | 49.4106 (mm) |
| Chiều dài (L) | 41.3492 (mm) |
| Điện trở đầu vào (R_{in}) | 244.7439 (Ohm) |
| Điểm cấp nguồn (y_0) | 14.5018 (mm) |
| Chiều rộng feedline (W_0) | 4.852 (mm) |

Để việc thiết kế anten vi dải được dễ dàng, chúng ta sử dụng chương trình tính toán được viết bằng phần mềm matlab. Chương trình được viết tương đối đơn giản dựa trên các công thức đã được đưa ra ở các phần trên. Hình 3.1 đưa ra giao diện và thực hiện tính toán tham số bằng giao diện trên matlab.



Hình 3.1 Tính toán thông số anten bằng giao diện matlab

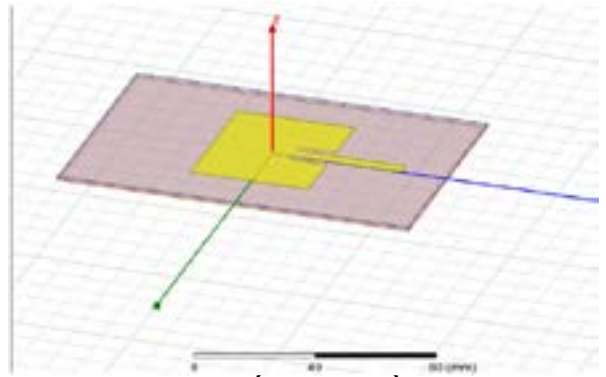
Sau khi tính toán ta đưa ra hình dạng anten vi dải như Hình 3.2



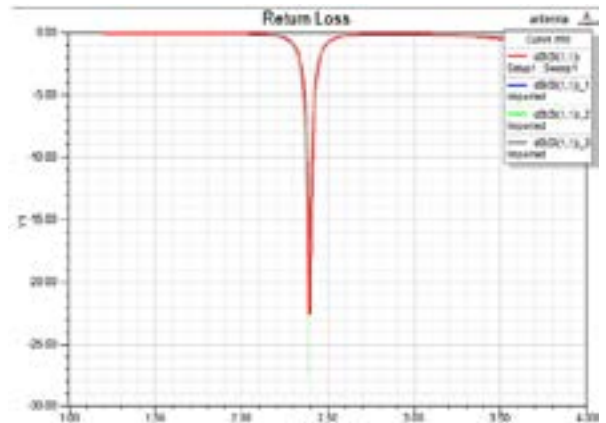
Hình 3.2 Hình dạng của anten vi dải đã được thiết kế

2. Mô phỏng anten vi dải

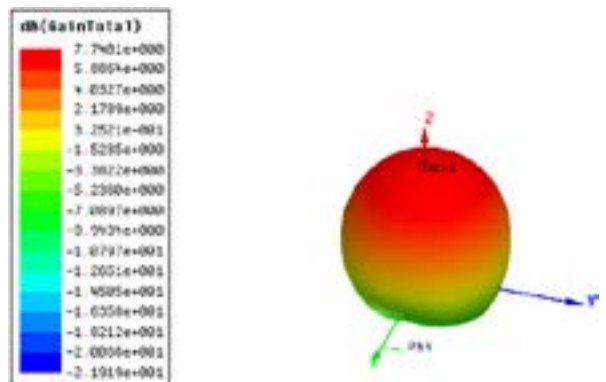
Dựa vào các thông số đã được trình bày như bảng 3.2, ta tiến hành vẽ cấu trúc 3 chiều của anten vi dải hình chữ nhật sử dụng chương trình Ansoft HFSS như Hình 3.3



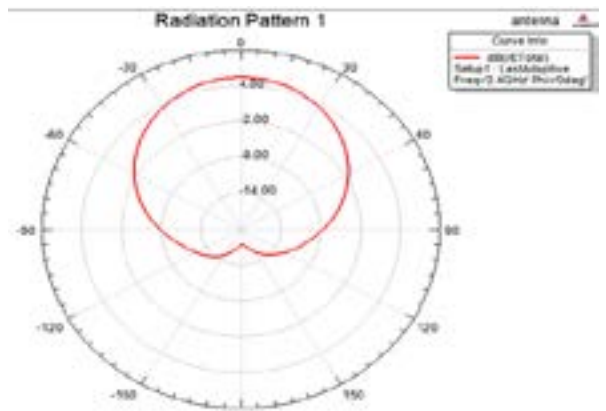
Hình 3.3 Mô phỏng cấu trúc 3 chiều của anten vi dải dùng chương trình Ansoft HFSS



Hình 3.4 Đáp ứng tần số của hệ số Return Loss



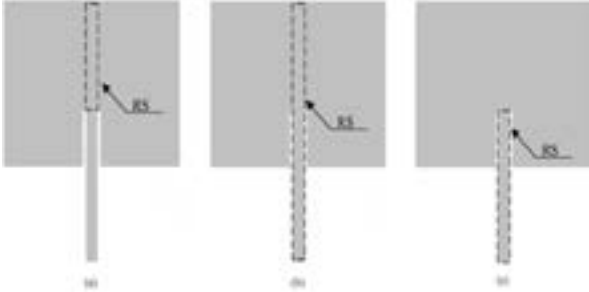
Hình 3.5 Đồ thị bức xạ 3D của anten vi dải



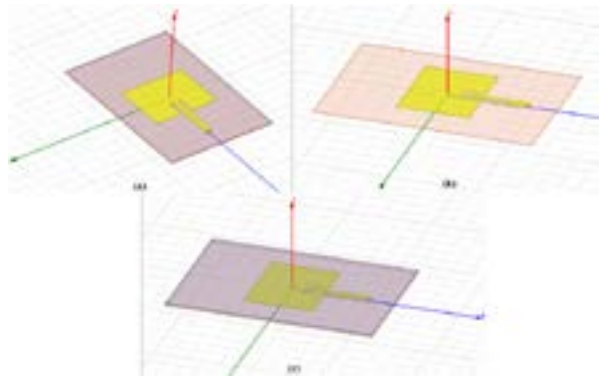
Hình 3.6 Đồ thị bức xạ 2D của anten vi dải

Sau khi mô phỏng anten vi dải hình chữ nhật thông thường với các tham số cho trước sử dụng phần mềm mô phỏng Ansoft HFSS, ta tiến hành kết hợp DGS trên mặt phẳng đất của anten, thực hiện mô phỏng để đánh giá ảnh hưởng của DGS lên hiệu suất hoạt động của anten (đánh giá theo

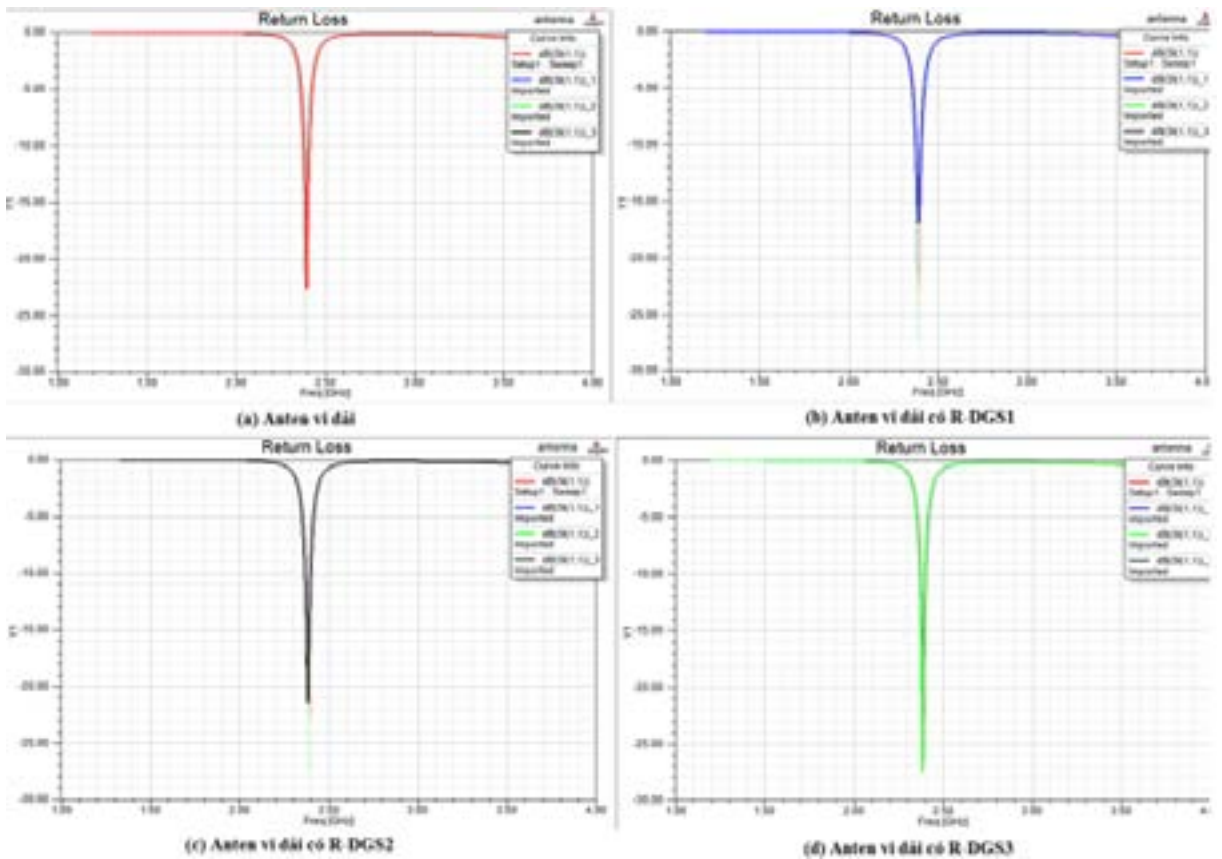
kết quả theo tham số Return Loss, DGS được ứng dụng trong bài báo này có dạng hình chữ nhật (Rectangular Defected Ground Structure). Chúng ta sẽ tiến hành đặt 3 khuôn mẫu DGS khác nhau chạy dọc theo đường vi dải. Hình 3.7 mô tả cách đặt 3 khuôn mẫu R-DGS trên mặt phẳng đất.



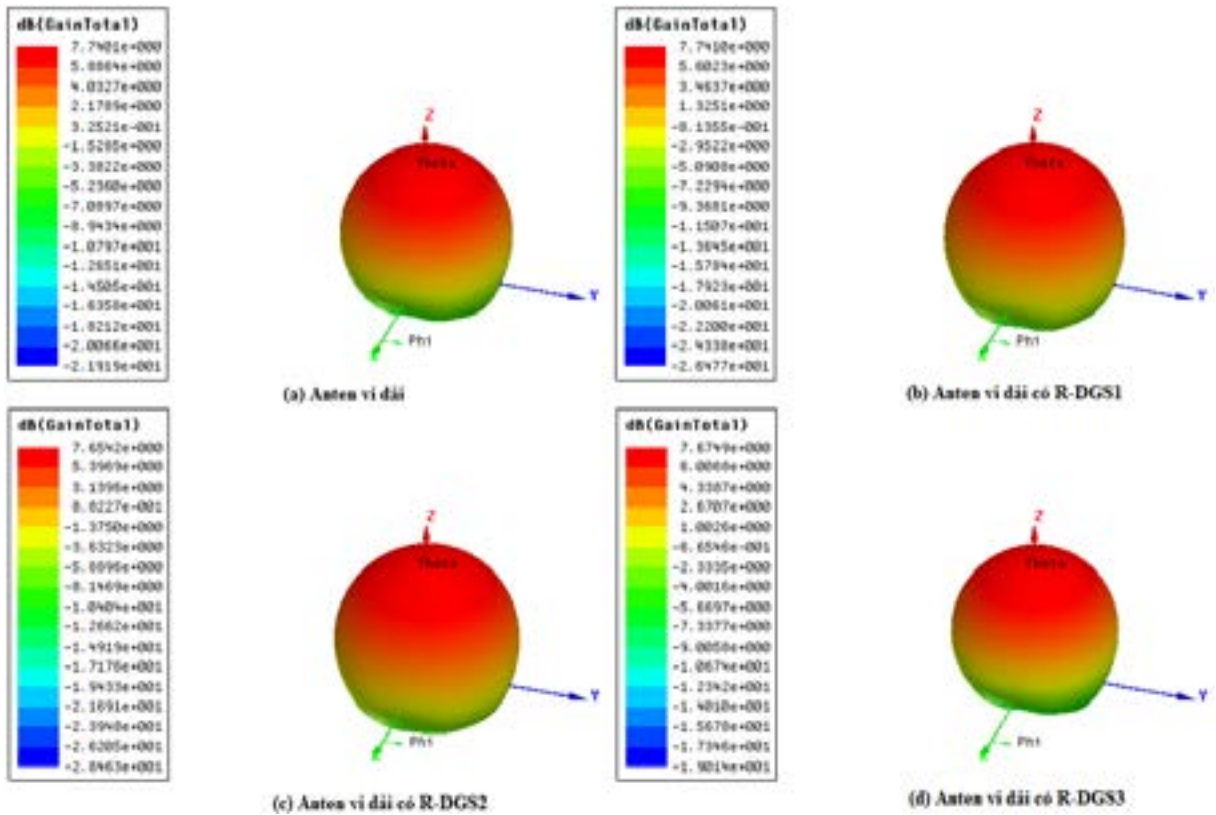
Hình 3.7 Các khuôn mẫu R-DGS đặt trong anten



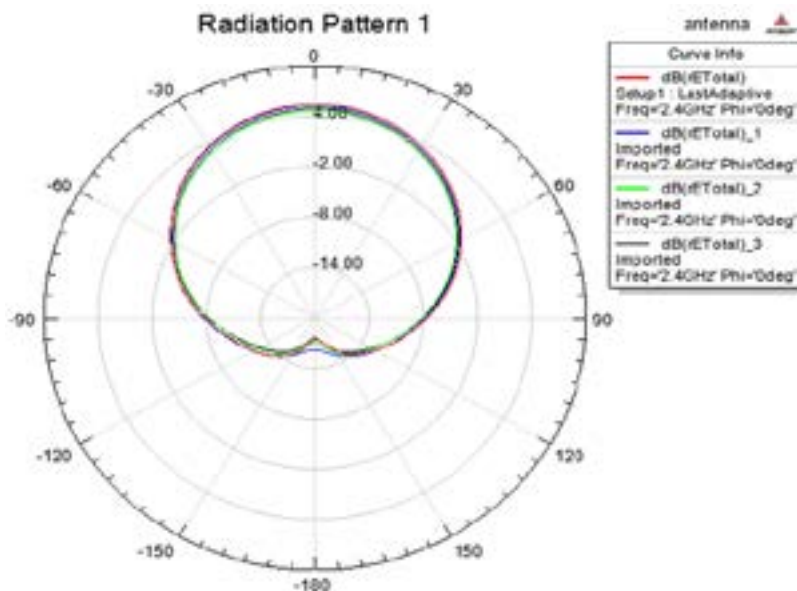
Hình 3.8 Mô phỏng các khuôn mẫu DGS dùng HFSS



Hình 3.9 Đáp ứng tần số của hệ số Return Loss với các anten vi dải



Hình 3.10 Đồ thị bức xạ 3D của các Anten vi dải



Hình 3.11 Đồ thị bức xạ 2D của các Anten vi dải

IV. Kết luận

Qua việc khảo sát Anten vi dải hình chữ nhật thông thường cùng với 3 Anten vi dải khác có kết hợp 3 mẫu DGS trên mặt phẳng đất như Hình 3.7. Với kết quả suy hao phản xạ đã được trình bày trong Hình 3.9, ta có:

- Hai Anten vi dải kết hợp với mẫu DGS 1 và mẫu DGS 2 lại cho kết quả suy hao phản xạ tại tần số cộng hưởng 2.4GHz thấp hơn Anten vi dải bình thường: $|RL(\text{Anten} - \text{DGS1})| = 17\text{dB}$, $|RL(\text{Anten} - \text{DGS2})| = 21.5\text{dB}$, $|RL(\text{Anten})| = 22.4\text{dB}$

- Với Anten vi dải kết hợp mẫu DGS3 thì lại cho kết quả suy hao phản xạ cao hơn: $|RL(\text{Anten}$

– $|DGS3| = 27.4\text{dB}$ so với $|RL(\text{Anten})| = 22.4\text{dB}$

Qua các kết quả ở trên ta thấy được sự cải thiện của hiệu suất Anten khi kết hợp mẫu DGS 3 trên mặt phẳng đất là khá cao.

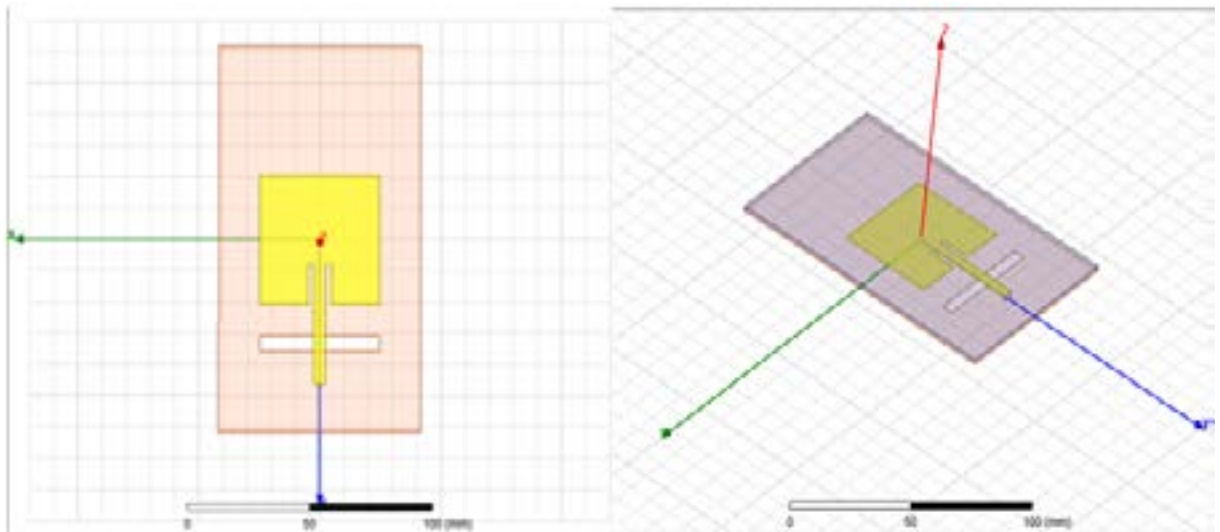
Chúng ta xét tới sự bức xạ của các Anten thông qua đồ thị bức xạ 2D và 3D được thể hiện trong Hình 3.10 và Hình 3.11 ta có các nhận xét:

- Độ lợi hướng cực đại của các Anten gần bằng nhau. Độ lợi hướng cực đại của Anten vi dải thông thường: $G_0 = 7.7401\text{ dB}$. Trong khi đó, độ lợi hướng cực đại của Anten vi dải có kết hợp các mẫu R-DGS là: $G_{DGS1} = 7.741\text{ dB}$, $G_{DGS2} = 7.76542\text{ dB}$ và $G_{DGS1} = 7.6749\text{ dB}$

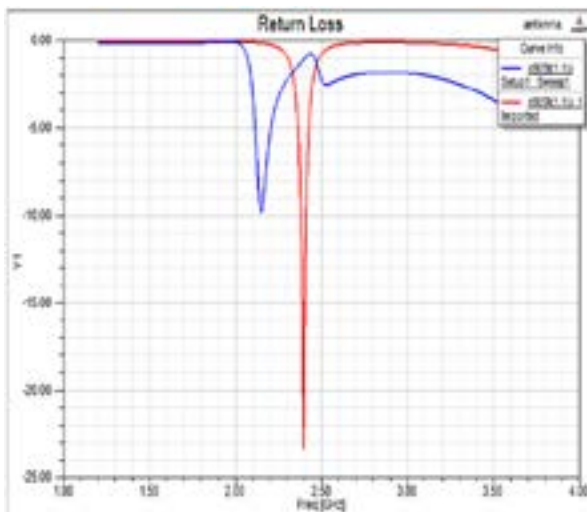
- Ta cũng nhận thấy rằng đồ thị bức xạ của các Anten gần giống nhau như Hình 3.11

Như vậy, việc chèn thêm các mẫu DGS trên mặt phẳng đất của Anten sẽ làm ảnh hưởng nhiều đến tham số Return Loss, còn các đồ thị bức xạ thì không bị ảnh hưởng nhiều.

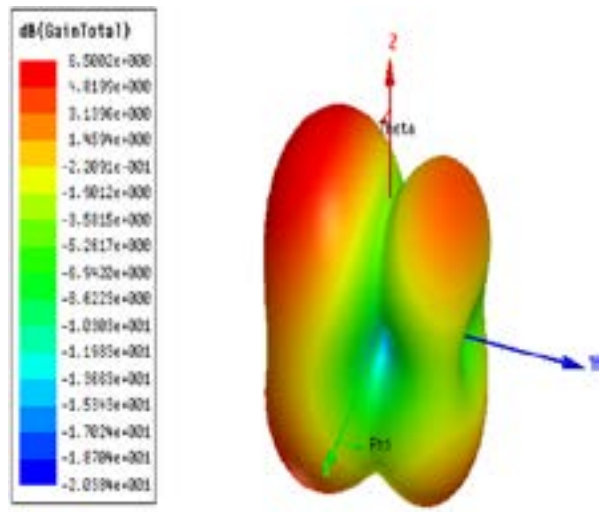
Tuy nhiên, việc đặt những “đị tật” DGS đôi khi cũng cho kết quả bất lợi, vì nó cũng có thể gây ra ảnh hưởng đến trở kháng tương đương của đường truyền vi dải, chính xác hơn là nâng cao trở kháng tương đương của đường truyền vi dải, việc thay đổi trở kháng tương đương sẽ ảnh hưởng đến sự phối hợp trở kháng của đường truyền vi dải với bản kim loại của Anten. Bài báo này cũng đã kết hợp mẫu DGS thứ 4 trên mặt phẳng đất của Anten vi dải hình chữ nhật đã thiết kế ở Phần III.1



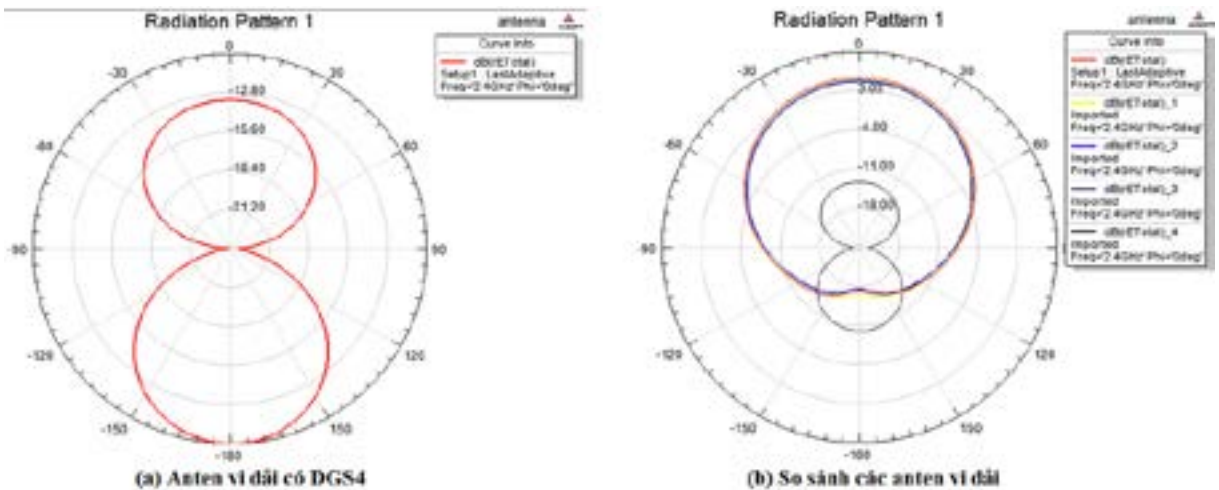
Hình 4.1 Kết hợp mẫu DGS4 trên Anten vi dải



Hình 4.2 Return Loss của Anten vi dải kết hợp mẫu DGS4 và Anten vi dải không kết hợp DGS



Hình 4.3 Đồ thị bức xạ 3D của Anten với mẫu DGS 4



Hình 4.4 Đồ thị bức xạ 2D của các Anten vi dải

Hình 4.2 cho ta thấy suy hao phân xạ của anten vi dải kết hợp mẫu DGS 4 (đường màu xanh) chỉ còn -10dB và đáp ứng tần số tại điểm suy hao -10dB là 2.15GHz. Hình 4.3 và Hình 4.4 cũng cho ta thấy sự ảnh hưởng của nó đến đồ thị bức xạ 2D và 3D của anten vi dải. Độ lợi hướng cực đại của nó chỉ còn 6.5002dB và hình dạng của đồ thị bức xạ cũng khác với anten vi dải thông thường hoặc

các anten vi dải kết hợp với 3 mẫu DGS như Hình 3.7. Kết quả mô phỏng này đã cho ta thấy sự ảnh hưởng không tốt của DGS đến anten vi dải. Vì vậy việc đặt “dị tật” trên mặt phẳng đất của anten vi dải phải được tính toán thật kỹ (cả về kích thước lẫn vị trí đặt nó trên mặt phẳng đất của anten vi dải). Chúng ta nên khảo sát bằng phần mềm mô phỏng trước khi đưa vào mạch thực tế.

Tài liệu tham khảo

- Balanis, C.A. 2006. *Antenna Theory – Analysis and Design*. John Willey & Son, INC.
- Breed, G. 2008. “An Introduction to Defected Ground Structures in Microstrip Circuits”, *High Frequency Electronics*, Copyright © 2008 Summit Technical Media, LLC.
- L. H. Weng, Y. C. Guo, X.W. Shi , X. Q. Chen. 2008. “An overview on defected ground structure“, *Progress in electromagnetic Research (PIER) B*, vol.7, pp.173-189.
- Mrabet, O.El. 2006. “High Frequency Structure Simulator (HFSS) Tutorial”, *Microwave and optical technology letters (MOTL)*, vol.23, no.2.
- Kilic, O. 2010. “Defected Ground Structure and its applications to microwave devices and antenna feed networks”. A graduation thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
- Phan, Anh. 2007. *Lý thuyết và kỹ thuật anten*. Hà Nội: NXB Khoa học Kỹ thuật.
- Rajeshwar Lal Dua, Himanshu Singh and Neha Gambhir. 2012. “2.45 GHz Microstrip Patch Antenna with Defected Ground Structure for Bluetooth”, *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)* ISSN: 2231-2307, volume-1, issue-6.
- Pradhan, S., Noh, S.K., and Choi, D. Y. 2012. “Design of Inset Microstrip Patch Antenna for Wireless Power Transmission at 2.45 GHz”, *Journal of information and communication convergence engineering (JICCE)*.
- Steven, Jensen. 2010. *Microstrip Patch Antenna*. Northern Arizona University.
- Vivekananda Lanka Subrahmanya. 2009. *The Rectangular Microstrip Patch Antenna*. University College of Boras, SE-501 90 Boras.
- Vadym Samosuyev. 2010. *Bluetooth Low Energy Compared to zigbee and blutooh classic*. Mikkeli University, Information Technology.
- Zalf Helge More. 2010. “Bluetooth Low Energy: Wireless Connectivity for Medical Monitoring”, *Journal of Diabetes Science and Technology*, vol 4, issue 2, Diabetes Technology Society.
- Atlasbaf, Z., Foroogh, K. and Hosseini, S.A. 2008. “Two new load compact planar ultra-wideband antennas using Defected Ground Structure”. *Progress In Electromagnetics Research (PIER) B*, vol. 2, pp. 165–176.