

**ĐẠI HỌC BÁCH KHOA HÀ NỘI**  
**TRƯỜNG ĐIỆN – ĐIỆN TỬ**

## **ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP**

**Thiết kế anten vi dải tự bù bằng tần kép sử dụng bề mặt dẫn từ nhân tạo cho ứng dụng mạng không dây WIFI**

**CHU QUANG KHẢI**

khai.cq210457@sis.hust.edu.vn

**Giảng viên hướng dẫn:**

TS. Đoàn Thị Ngọc Hiền

**Ngành:**

Kỹ thuật máy tính

**HÀ NỘI, 7-2025**

**ĐÁNH GIÁ ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP**  
**(DÀNH CHO CÁN BỘ HƯỚNG DẪN)**

Tên đề tài: Thiết kế anten vi dải tự bù bằng tần kép sử dụng bề mặt dẫn từ nhân tạo cho ứng dụng mạng không dây WIFI.

Họ tên SV: Chu Quang Khải

MSSV: 20210457

Cán bộ hướng dẫn: TS. Đoàn Thị Ngọc Hiền

STT	Tiêu chí (Điểm tối đa)	Hướng dẫn đánh giá tiêu chí	Điểm tiêu chí
1	Thái độ làm việc (2,5 điểm)	Nghiêm túc, tích cực và chủ động trong quá trình làm ĐATN	
		Hoàn thành đầy đủ và đúng tiến độ các nội dung được GVHD giao	
2	Kỹ năng viết quyển ĐATN (2 điểm)	Trình bày đúng mẫu quy định, bố cục các chương logic và hợp lý: Bảng biểu, hình ảnh rõ ràng, có tiêu đề, được đánh số thứ tự và được giải thích hay đề cập đến trong đồ án, có căn lề, dấu cách sau dấu chấm, dấu phẩy, có mở đầu chương và kết luận chương, có liệt kê tài liệu tham khảo và có trích dẫn, v.v.	
		Kỹ năng diễn đạt, phân tích, giải thích, lập luận: Cấu trúc câu rõ ràng, văn phong khoa học, lập luận logic và có cơ sở, thuật ngữ chuyên ngành phù hợp, v.v.	
3	Nội dung và kết quả đạt được (5 điểm)	Nêu rõ tính cấp thiết, ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài, các vấn đề và các giả thuyết, phạm vi ứng dụng của đề tài. Thực hiện đầy đủ quy trình nghiên cứu: Đặt vấn đề, mục tiêu đề ra, phương pháp nghiên cứu/ giải quyết vấn đề, kết quả đạt được, đánh giá và kết luận.	
		Nội dung và kết quả được trình bày một cách logic và hợp lý, được phân tích và đánh giá thỏa đáng. Biện luận phân tích kết quả mô phỏng/ phần mềm/ thực nghiệm, so sánh kết quả đạt được với kết quả trước đó có liên quan.	
		Chỉ rõ phù hợp giữa kết quả đạt được và mục tiêu ban đầu đề ra đồng thời cung cấp lập luận để đề xuất hướng giải quyết có thể thực hiện trong tương lai. Hàm lượng khoa học/ độ phức tạp cao, có tính mới/tính sáng tạo trong nội dung và kết quả đồ án.	
4	Điểm thành tích (1 điểm)	Có bài báo KH được đăng hoặc chấp nhận đăng/ đạt giải SV NCKH giải 3 cấp Trường trở lên/ Các giải thưởng khoa học trong nước, quốc tế từ giải 3 trở lên/ Có đăng ký bằng phát minh sáng chế. (1 điểm)	
		Được báo cáo tại hội đồng cấp Trường trong hội nghị SV NCKH nhưng không đạt giải từ giải 3 trở lên/ Đạt giải khuyến khích trong cuộc thi khoa học trong nước, quốc tế/ Kết quả đồ án là sản phẩm ứng dụng có tính hoàn thiện cao, yêu cầu khối lượng thực hiện lớn. (0,5 điểm)	
Điểm tổng các tiêu chí:			
Điểm hướng dẫn:			

**Cán bộ hướng dẫn**  
(Ký và ghi rõ họ tên)

**ĐÁNH GIÁ ĐỒ ÁN TỐT NGHIỆP**  
**(DÀNH CHO CÁN BỘ PHẢN BIỆN)**

Tên đề tài: Thiết kế anten vi dải tự bù bằng tần kép sử dụng bề mặt dẫn từ nhân tạo cho ứng dụng mạng không dây WIFI.

Họ tên SV: Chu Quang Khải

MSSV: 20210457

Cán bộ phản biện: .....

STT	Tiêu chí (Điểm tối đa)	Hướng dẫn đánh giá tiêu chí	Điểm tiêu chí
1	<b>Trình bày quyển ĐATN (4 điểm)</b>	<p>Đồ án trình bày đúng mẫu quy định, bố cục các chương logic và hợp lý: Bảng biểu, hình ảnh rõ ràng, có tiêu đề, được đánh số thứ tự và được giải thích hay đề cập đến trong đồ án, có căn lề, dấu cách sau dấu chấm, dấu phẩy, có mở đầu chương và kết luận chương, có liệt kê tài liệu tham khảo và có trích dẫn, v.v.</p> <p>Kỹ năng diễn đạt, phân tích, giải thích, lập luận: cấu trúc câu rõ ràng, văn phong khoa học, lập luận logic và có cơ sở, thuật ngữ chuyên ngành phù hợp, v.v.</p>	
2	<b>Nội dung và kết quả đạt được (5,5 điểm)</b>	<p>Nêu rõ tính cấp thiết, ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài, các vấn đề và các giả thuyết, phạm vi ứng dụng của đề tài. Thực hiện đầy đủ quy trình nghiên cứu: Đặt vấn đề, mục tiêu đề ra, phương pháp nghiên cứu/ giải quyết vấn đề, kết quả đạt được, đánh giá và kết luận.</p> <p>Nội dung và kết quả được trình bày một cách logic và hợp lý, được phân tích và đánh giá thỏa đáng. Biện luận phân tích kết quả mô phỏng/ phần mềm/ thực nghiệm, so sánh kết quả đạt được với kết quả trước đó có liên quan.</p> <p>Chỉ rõ phù hợp giữa kết quả đạt được và mục tiêu ban đầu đề ra đồng thời cung cấp lập luận để đề xuất hướng giải quyết có thể thực hiện trong tương lai. Hàm lượng khoa học/ độ phức tạp cao, có tính mới/ tính sáng tạo trong nội dung và kết quả đồ án.</p>	
3	<b>Điểm thành tích (1 điểm)</b>	<p>Có bài báo KH được đăng hoặc chấp nhận đăng/ đạt giải SV NCKH giải 3 cấp Trường trở lên/ Các giải thưởng khoa học trong nước, quốc tế từ giải 3 trở lên/ Có đăng ký bằng phát minh sáng chế. <b>(1 điểm)</b></p> <p>Được báo cáo tại hội đồng cấp Trường trong hội nghị SV NCKH nhưng không đạt giải từ giải 3 trở lên/ Đạt giải khuyến khích trong cuộc thi khoa học trong nước, quốc tế/ Kết quả đồ án là sản phẩm ứng dụng có tính hoàn thiện cao, yêu cầu khối lượng thực hiện lớn. <b>(0,5 điểm)</b></p>	
<b>Điểm tổng các tiêu chí:</b>			
<b>Điểm hướng dẫn:</b>			

**Cán bộ phản biện**  
(Ký và ghi rõ họ tên)

## LỜI NÓI ĐẦU

Trong thời đại công nghệ thông tin phát triển mạnh mẽ, nhu cầu kết nối không dây với tốc độ cao, ổn định và hiệu quả ngày càng trở nên thiết yếu. Công nghệ WIFI, dựa trên chuẩn IEEE 802.11 đã và đang đóng vai trò quan trọng trong việc cung cấp kết nối mạng linh hoạt cho các thiết bị điện tử trong môi trường gia đình, văn phòng, cũng như trong các hệ thống Internet vạn vật (IoT). Trước những yêu cầu ngày càng khắt khe về mặt hiệu năng và tích hợp hệ thống, anten sử dụng trong các thiết bị WIFI cần được thiết kế sao cho đáp ứng đồng thời nhiều tiêu chí như kích thước nhỏ gọn, khả năng hoạt động ở nhiều băng tần, phân cực phù hợp và hệ số tăng ích cao. Trong đó, anten vi dải là một hướng tiếp cận tiềm năng nhờ cấu trúc phẳng, kích thước nhỏ và khả năng chế tạo đơn giản. Tuy nhiên, nhiều cấu trúc anten vi dải truyền thống vẫn còn tồn tại những hạn chế như băng thông hẹp, hệ số tăng ích thấp. Nhằm cải thiện các đặc tính này, đề án tốt nghiệp với đề tài “Thiết kế anten vi dải tự bù băng tần kép sử dụng bề mặt dẫn từ nhân tạo cho ứng dụng mạng không dây WIFI” được thực hiện với mục tiêu phát triển một anten hoạt động hiệu quả tại hai dải tần 2,45 GHz và 5,5 GHz, sử dụng phân cực tròn, có hệ số tăng ích cao. Thiết kế đề xuất kết hợp cấu trúc tự bù nhằm mở rộng băng thông trở kháng, đồng thời tích hợp bề mặt dẫn từ nhân tạo AMC (Artificial Magnetic Conductor) để cải thiện độ định hướng và tăng cường hệ số tăng ích bức xạ, đáp ứng yêu cầu của các hệ thống WIFI hiện đại.

Trong quá trình thực hiện đề án tốt nghiệp, em đã nhận được sự hướng dẫn tận tình, hỗ trợ quý báu và động viên kịp thời từ thầy cô và bạn bè. Em xin bày tỏ lòng biết ơn chân thành đến tất cả những người đã giúp đỡ em hoàn thành đề tài này. Em xin gửi lời cảm ơn sâu sắc tới giảng viên hướng dẫn là cô Đoàn Thị Ngọc Hiền, người đã trực tiếp hướng dẫn, định hướng chuyên môn và hỗ trợ em trong suốt quá trình nghiên cứu và thực hiện đề án. Những ý kiến đóng góp quý báu và tinh thần tận tâm của cô là nguồn động lực to lớn giúp em hoàn thiện đề tài. Cuối cùng, em xin dành những lời yêu thương nhất tới người thân trong gia đình đã luôn ở bên cạnh, động viên và tạo điều kiện tốt nhất để em có thể yên tâm hoàn thành chặng đường học tập ở trên giảng đường đại học. Dù đã nỗ lực hết mình, song chắc chắn đề tài vẫn còn những thiếu sót nhất định. Em rất mong nhận được sự góp ý của thầy cô để hoàn thiện hơn nữa.

## LỜI CAM ĐOAN

Tôi là Chu Quang Khải, mã số sinh viên 20210457, sinh viên lớp ĐTVT 08, khóa 66. Giảng viên hướng dẫn là TS. Đoàn Thị Ngọc Hiền. Tôi xin cam đoan toàn bộ nội dung được trình bày trong đồ án “Thiết kế anten vi dải tự bù bằng tần kép sử dụng bề mặt dẫn từ nhân tạo cho ứng dụng mạng không dây WIFI” là kết quả quá trình tìm hiểu và nghiên cứu của tôi. Các dữ liệu được nêu trong đồ án hoàn toàn là trung thực, phản ánh đúng kết quả mô phỏng thực tế. Mọi thông tin trích dẫn đều tuân thủ các quy định về sở hữu trí tuệ; các tài liệu tham khảo được liệt kê rõ ràng. Tôi xin chịu trách nhiệm với những nội dung được viết trong đồ án này.

*Hà Nội, ngày    tháng    năm 2025*

Người cam đoan

CHU QUANG KHẢI

# MỤC LỤC

DANH MỤC BẢNG BIỂU VÀ CHỮ VIẾT TẮT.....	i
DANH MỤC HÌNH VẼ .....	ii
DANH MỤC BẢNG BIỂU.....	v
TÓM TẮT ĐỒ ÁN .....	vi
CHƯƠNG 1. CƠ SỞ LÝ THUYẾT .....	1
1.1 Tổng quan về công nghệ mạng không dây WIFI .....	1
1.1.1 Cấu trúc hệ thống WIFI.....	1
1.1.2 Sự phát triển của các chuẩn WIFI .....	2
1.1.3 Yêu cầu kỹ thuật đối với anten trong hệ thống WIFI.....	3
1.2 Giới thiệu về anten vi dải .....	5
1.2.1 Tổng quan về anten vi dải .....	5
1.2.2 Ưu nhược điểm của anten vi dải trong thiết kế anten ứng dụng WIFI.....	5
1.2.3 Cấu trúc của anten vi dải .....	6
1.2.4 Các phương pháp cấp nguồn cho ăng-ten vi dải .....	8
1.2.5 Các thiết kế anten vi dải ứng dụng cho mạng không dây WIFI.....	10
1.3 Các kỹ thuật cải thiện băng thông của anten vi dải .....	12
1.3.1 Sử dụng các phần tử bức xạ ký sinh đồng phẳng. ....	12
1.3.2 Xếp chồng các phần tử bức xạ. ....	13
1.3.3 Tạo các khe trên phần tử bức xạ.....	14
1.3.4 Sử dụng mảng các phần tử bức xạ theo cấu trúc loga chu kỳ .....	15
1.3.5 Sử dụng đầu dò hình chữ L (L-probe).....	16
1.3.6 Sử dụng cấu trúc tự bù (self – complementary) .....	17
1.4 Các kỹ thuật cải thiện hệ số tăng ích của anten vi dải.....	19
1.4.1 Sử dụng lớp vật liệu superstrate .....	19
1.4.2 Sử dụng shorting pin .....	20
1.4.3 Sử dụng cấu trúc anten mảng. ....	21
1.4.4 Sử dụng cấu trúc dải chắn điện từ EBG (Electromagnetic Band Gap) .....	22
1.4.5 Sử dụng bề mặt phản xạ .....	23
1.5 Kết luận chương .....	27

CHƯƠNG 2. Thiết kế anten vi dải tự bù bằng tần kép sử dụng bề mặt dẫn từ nhân tạo cho ứng dụng mạng không dây WIFI .....	28
2.1 Cấu trúc hình học của anten đề xuất.....	28
2.2 Tiến trình thiết kế.....	31
2.2.1 Anten vi dải tự bù .....	31
2.2.2 Anten vi dải tự bù sử dụng bề mặt dẫn từ nhân tạo AMC .....	37
2.3 Kết quả mô phỏng .....	39
2.4 Kết luận chương .....	46
KẾT LUẬN .....	48
TÀI LIỆU THAM KHẢO .....	49

DANH MỤC BẢNG BIỂU VÀ CHỮ VIẾT TẮT

AMC	Artificial Magnetic Conductor	Bề mặt dẫn từ nhân tạo
AP	Access Point	Điểm truy cập
AR	Axial Ratio	Tỉ số trục
EBG	Electromagnetic Band Gap	Dải chắn điện từ
HPBW	Half Power Beamwidth	Độ rộng búp sóng nửa công suất
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	Viện Kỹ sư Điện và Điện tử
IoT	Internet of Things	Internet vạn vật
LHCP	Left-Hand Circular Polarization	Phân cực tròn trái
PEC	Perfect Electric Conductor	Chất dẫn điện lý tưởng
RF	Radio Frequency	Tần số vô tuyến
RHCP	Right-Hand Circular Polarization	Phân cực tròn phải
UWB	Ultra-Wideband	Băng tần siêu rộng
WLAN	Wireless Local Area Network	Mạng cục bộ không dây



## DANH MỤC HÌNH VẼ

Hình 1.1. Cấu trúc hệ thống WIFI cơ bản .....	2
Hình 1.2. (a) Anten đa hướng (b) Anten định hướng .....	4
Hình 1.3. Anten vi dải.....	5
Hình 1.4. (a) Cấu trúc cơ bản của anten vi dải, (b) Hình chiếu cạnh [1] .....	6
Hình 1.5. Các hình dạng thường thấy của phần tử bức xạ [1].....	7
Hình 1.6. Cấp nguồn bằng đường truyền vi dải [1].....	8
Hình 1.7. Cấp nguồn bằng cáp đồng trục [1] .....	8
Hình 1.8. Cấp nguồn bằng ghép khâu độ [1].....	9
Hình 1.9. Cấp nguồn bằng ghép gần [1].....	9
Hình 1.10. Anten định hướng hai băng dùng cho ứng dụng WIFI [2] .....	10
Hình 1.11. Anten vi dải hình chữ nhật cấp nguồn kép dùng cho ứng dụng WIFI [3] ...	11
Hình 1.12. Anten đơn cực phẳng dùng cho ứng dụng WIFI [4].....	11
Hình 1.13. Các cách sắp xếp các phần tử bức xạ ký sinh (a) Ghép nối qua 2 cạnh bức xạ, (b) Ghép nối qua 2 cạnh không bức xạ, (c) Ghép nối qua cả 4 cạnh [5] .....	12
Hình 1.14. Anten xếp chồng các phần tử bức xạ sử dụng ghép nối điện từ [5] .....	13
Hình 1.15. Anten xếp chồng các phần tử bức xạ sử dụng ghép khâu độ [7].....	14
Hình 1.16. (a) Phần tử bức xạ hình chữ C, (b) Phần tử bức xạ hình chữ H, (c) Phần tử bức xạ hình vòng chữ nhật [5].....	15
Hình 1.17. Cấu trúc anten sử dụng mảng các phần tử bức xạ theo cấu trúc loga chu kỳ [15].....	16
Hình 1.18. Anten vi dải cấp nguồn bằng đầu dò chữ L .....	16
Hình 1.19. Anten tự bù (a) Cấu trúc xoắn ốc Archimedes, (b) Cấu trúc log-periodic, (c) Cấu trúc lưỡng cực [19].....	17
Hình 1.20. (a) Cấu trúc anten vi dải gần như tự bù, (b) Đồ thị hệ số phản xạ S11 [23]19	
Hình 1.21 Anten sử dụng lớp superstrate (a) Lớp superstrate điện môi rỗng [25], (b) Lớp superstrate có cấu trúc metasurface [27] .....	20
Hình 1.22. Anten vi dải sử dụng 4 chốt ngắn mạch [28].....	21
Hình 1.23. Cấu trúc mảng anten vi dải.....	22
Hình 1.24. Cấu trúc EBG hình nấm .....	23
Hình 1.25. Anten vi dải sử dụng tấm kim loại phản xạ [30] .....	24

Hình 1.26. Anten vi dải đơn cực sử dụng bề mặt phản xạ AMC [33] .....	26
Hình 1.27. (a) Cấu trúc mặt phản tử bức xạ của AMC, (b) Đồ thị pha phản xạ của AMC .....	26
Hình 1.28. Đồ thị đánh giá các tham số của anten vi dải đơn cực sử dụng bề mặt phản xạ AMC, (a) Đồ thị hệ số phản xạ S11, (b) Đồ thị hệ số tăng ích .....	26
Hình 2.1. Cấu trúc anten đề xuất (a) Hình chiếu bằng, (b) Hình chiếu cạnh .....	28
Hình 2.2. Cấu trúc hình học của anten vi dải tự bù (a) Mặt trên, (b) Mặt dưới, (c) Hình chiếu cạnh .....	29
Hình 2.3. Cấu trúc hình học của phần tử đơn AMC .....	30
Hình 2.4. Cấu trúc hình học của anten #1, (a) Hình chiếu bằng, (b) Hình chiếu cạnh .....	31
Hình 2.5. Kết quả mô phỏng của anten #1, (a) Hệ số phản xạ S11, (b) Tỷ lệ trực AR, (c) Hệ số tăng ích thực .....	32
Hình 2.6. Cấu trúc hình học của anten #2, (a) Hình chiếu bằng, (b) Hình chiếu cạnh .....	33
Hình 2.7 Kết quả mô phỏng của anten #2. (a) Hệ số phản xạ S11, (b) Tỷ lệ trực AR, (c) Hệ số tăng ích thực .....	34
Hình 2.8. Cấu trúc hình học của anten #3 (a) Hình chiếu bằng, (b) Hình chiếu cạnh .....	35
Hình 2.9. Kết quả mô phỏng của anten #3. (a) Hệ số phản xạ S11, (b) Tỷ lệ trực AR, (c) Hệ số tăng ích thực .....	36
Hình 2.10. Cấu trúc 3D của anten đề xuất.....	37
Hình 2.11. (a) Cấu trúc của một phần tử AMC, (b) Mạch LC tương đương.....	38
Hình 2.12. Kết quả mô phỏng pha phản xạ của phần tử đơn AMC .....	38
Hình 2.13. Kết quả mô phỏng hệ số phản xạ S11 của anten đề xuất .....	40
Hình 2.14. Kết quả mô phỏng tỷ số trực AR của anten đề xuất .....	40
Hình 2.15. Kết quả mô phỏng hệ số tăng ích thực của anten đề xuất .....	41
Hình 2.16. Kết quả mô phỏng hệ số tăng ích thực của các anten #1, #2, #3 và anten đề xuất .....	41
Hình 2.17. Kết quả mô phỏng hệ số phản xạ S11 của các anten #1, #2, #3 và anten đề xuất .....	42
Hình 2.18. Kết quả mô phỏng tỷ số trực AR của các anten #1, #2, #3 và anten đề xuất .....	43
Hình 2.19. Đồ thị bức xạ của anten đề xuất tại tần số 2,45 GHz .....	44
Hình 2.20. Đồ thị bức xạ của anten đề xuất tại tần số 5,5 GHz .....	45

Hình 2.21. Kết quả mô phỏng hiệu suất bức xạ của anten đề xuất .....	45
Hình 2.22. Đồ thị bức xạ 3D của anten đề xuất tại tần số 2,45 GHz .....	46
Hình 2.23. Đồ thị bức xạ 3D của anten đề xuất tại tần số 5,5 GHz .....	46

## **DANH MỤC BẢNG BIỂU**

Bảng 1.1 So sánh các tham số của các chuẩn WIFI .....	3
Bảng 2.1. Giá trị của các tham số kích thước anten. ....	30

# TÓM TẮT ĐỒ ÁN

Đồ án tập trung vào việc thiết kế anten vi dải tự bù băng tần kép sử dụng bề mặt dẫn từ nhân tạo AMC, được sử dụng cho các ứng dụng mạng không dây WIFI. Cấu trúc anten được đề xuất nhằm đạt được hệ số tăng ích cao, băng thông rộng, sử dụng phân cực tròn và phù hợp với chuẩn WIFI tại hai dải tần phổ biến là 2.45 GHz và 5,5 GHz. Nội dung chính của đồ án được chia thành hai chương như sau:

- Chương 1: Cơ sở lý thuyết.

Chương 1 trình bày các kiến thức nền tảng phục vụ cho quá trình thiết kế anten, bao gồm tổng quan về công nghệ mạng không dây WIFI, lý thuyết cơ bản của anten vi dải, các phương pháp cải thiện băng thông và hệ số tăng ích của anten.

- Chương 2: Thiết kế anten vi dải tự bù băng tần kép sử dụng bề mặt dẫn từ nhân tạo cho ứng dụng mạng không dây WIFI.

Dựa trên cơ sở lý thuyết đã trình bày ở Chương 1, chương này sẽ mô tả chi tiết cấu trúc của anten đề xuất, quá trình thiết kế, tối ưu hóa và kết quả mô phỏng thu được. Anten được nghiên cứu nhằm đáp ứng yêu cầu hoạt động tại hai băng tần là 2.45 GHz và 5,5 GHz. Các thông số thiết kế được điều chỉnh để đạt được hệ số tăng ích cao, trở kháng phù hợp và hoạt động phân cực tròn. Các kết quả mô phỏng thu được sẽ được phân tích kỹ lưỡng để đánh giá đặc tính hoạt động của anten, từ đó đưa ra nhận xét và đánh giá tổng quan về hiệu quả của cấu trúc anten được đề xuất.

Phần kết luận cuối cùng tóm tắt lại toàn bộ kết quả mà đồ án đã đạt được.

# CHƯƠNG 1. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Chương 1 sẽ giới thiệu về công nghệ WIFI, lý thuyết cơ bản về anten vi dải, các phương pháp mở rộng băng thông và cải thiện hệ số tăng ích cho anten vi dải. Đây là nền tảng lý thuyết để áp dụng vào thiết kế anten ở chương 2.

## 1.1 Tổng quan về công nghệ mạng không dây WIFI

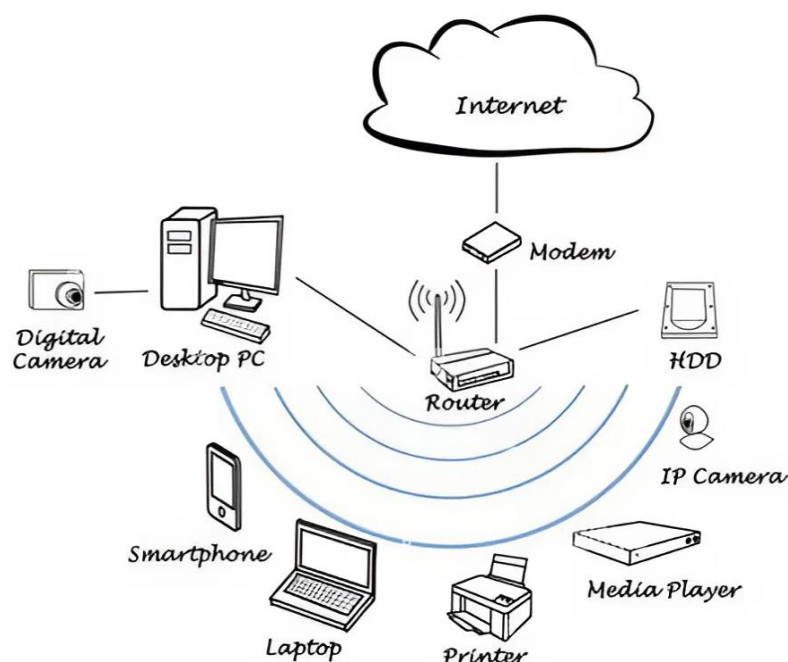
WIFI là một công nghệ mạng cục bộ không dây (WLAN) cho phép các thiết bị điện tử trong một khu vực nhất định giao tiếp thông qua sóng vô tuyến. Công nghệ WIFI dựa trên chuẩn kết nối không dây IEEE 802.11, là một bộ tiêu chuẩn được Viện Kỹ sư Điện và Điện tử Hoa Kỳ (IEEE) phát triển và duy trì, xác định các giao thức truy cập môi trường truyền thông (MAC) và lớp vật lý (PHY) cho mạng LAN không dây (WLAN).

Công nghệ WIFI đã trở thành một phần không thể thiếu trong đời sống hiện đại, được ứng dụng rộng rãi trong gia đình, văn phòng, trường học, trung tâm thương mại và các không gian công cộng. Sự phát triển nhanh chóng của Internet vạn vật (IoT), nhà thông minh, và các thiết bị di động đòi hỏi hệ thống WIFI không chỉ ổn định mà còn phải có phạm vi phủ sóng rộng, tốc độ cao và hiệu suất truyền dẫn tối ưu.

### 1.1.1 Cấu trúc hệ thống WIFI

Một hệ thống WIFI cơ bản bao gồm các thành phần chính:

- **Điểm truy cập (Access Point):** là thiết bị trung tâm có nhiệm vụ phát và thu tín hiệu vô tuyến, đóng vai trò cầu nối giữa mạng có dây (Ethernet) và các thiết bị không dây. Trong thực tế, AP thường được tích hợp trong router không dây và đi kèm với các chức năng như định tuyến, tường lửa, DHCP, ... AP xác định vùng phủ sóng của mạng WIFI, quản lý việc truy cập, phân bổ tài nguyên mạng và đảm bảo an toàn thông qua các giao thức mã hóa như WPA/WPA2/WPA3.
- **Thiết bị đầu cuối:** Là các thiết bị sử dụng WIFI để truy cập mạng, bao gồm máy tính xách tay, điện thoại thông minh, máy tính bảng, camera IP, smart TV, các thiết bị IoT, ... Các thiết bị này được tích hợp mô-đun WIFI để giao tiếp không dây với AP. Mỗi thiết bị có thể kết nối với AP trong vùng phủ sóng để truyền và nhận dữ liệu theo thời gian thực.
- **Modem:** Thiết bị chuyển đổi tín hiệu số thành tín hiệu analog và ngược lại, kết nối mạng nội bộ với nhà cung cấp dịch vụ Internet (ISP). Modem thường là cầu nối giữa hệ thống WIFI và Internet.
- **Anten:** là thành phần điện tử thực hiện chức năng phát xạ và thu sóng điện từ trong quá trình truyền dữ liệu không dây. Hiệu suất của anten ảnh hưởng trực tiếp đến phạm vi phủ sóng, chất lượng tín hiệu, tốc độ truyền dữ liệu, độ ổn định của kết nối của toàn hệ thống mạng WIFI.



Hình 1.1. Cấu trúc hệ thống WIFI cơ bản

### 1.1.2 Sự phát triển của các chuẩn WIFI

Công nghệ WIFI lần đầu tiên được thương mại hóa vào năm 1997 khi Viện Kỹ sư Điện và Điện tử (IEEE) công bố tiêu chuẩn kỹ thuật đầu tiên mang tên IEEE 802.11. Chuẩn này cho phép truyền dữ liệu không dây với tốc độ lên đến 2 Mbps, sử dụng dải tần số 2,4 GHz – một dải tần công nghiệp, khoa học và y tế (ISM) không yêu cầu cấp phép.

Kể từ đó, công nghệ WIFI đã trải qua nhiều giai đoạn phát triển mạnh mẽ, với hàng loạt sửa đổi và mở rộng của chuẩn IEEE 802.11 như 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n, 802.11ac, 802.11ax và mới đây nhất được công bố là 802.11be. Mỗi phiên bản mới đều mang lại những cải tiến đáng kể về tốc độ truyền tải, khoảng cách phủ sóng, khả năng chống nhiễu, và tính bảo mật. Đặc biệt, từ WIFI 6 trở đi, các chuẩn mới tập trung vào tối ưu hóa hiệu năng trong môi trường có nhiều thiết bị kết nối đồng thời – chẳng hạn như nhà thông minh, văn phòng, nhà máy IoT và khu vực công cộng.

Một đặc điểm quan trọng trong thiết kế của các chuẩn WIFI là tính tương thích ngược (backward compatibility). Điều này có nghĩa là các thiết bị tuân thủ các chuẩn WIFI mới hơn vẫn có thể kết nối và hoạt động được với các thiết bị sử dụng chuẩn cũ hơn, đảm bảo khả năng tương tác và tính bền vững trong triển khai thực tế.

Dưới đây là những chuẩn WIFI đã được phát triển trong lịch sử:

Bảng 1.1 So sánh các tham số của các chuẩn WIFI

Chuẩn WIFI	Năm phát hành	Tần số hoạt động (GHz)	Băng thông (MHz)	Tốc độ tối đa
802.11(WIFI 0)	1997	2.4	20	2 Mbps
802.11b (WIFI 1)	1999	2.4	20	11 Mbps
802.11a (WIFI 2)	1999	5	20	54 Mbps
802.11g (WIFI 3)	2003	2.4	20	54 Mbps
801.11n (WIFI 4)	2009	2.4/5	20/40	600 Mbps
802.11ac (WIFI 5)	2013	5	20/40/80/160	6.92 Gbps
802.11ax (WIFI 6)	2019	2.4/5	20/40/80/160	9.6 Gbps
802.11ax (WIFI 6E)	2021	2.4/5/6	20/40/80/160	9.6 Gbps
802.11be (WIFI 7)	2024	2.4/5/6	20/40/80/160/320	46.4 Gbps

Hiện nay, WIFI 5 (802.11ac) và WIFI 6 (802.11ax) là hai chuẩn phổ biến nhất trong hầu hết các thiết bị mạng gia đình, văn phòng và doanh nghiệp. WIFI 6E và WIFI 7 đang bắt đầu được triển khai nhưng chưa phổ biến rộng rãi do chi phí cao và yêu cầu phần cứng tương thích.

### 1.1.3 Yêu cầu kỹ thuật đối với anten trong hệ thống WIFI

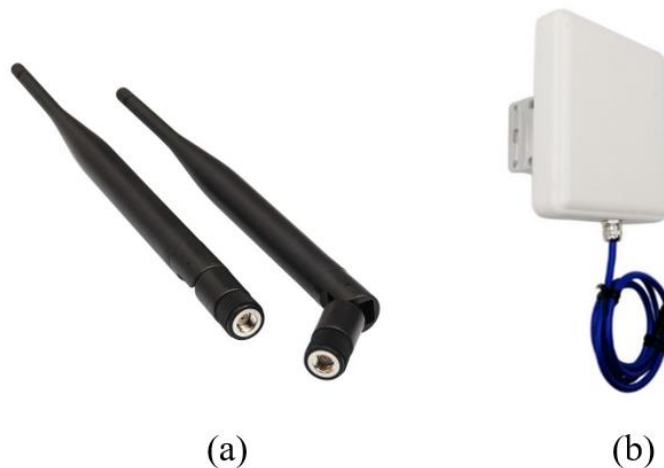
Một trong những yếu tố quan trọng ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng kết nối WIFI chính là thiết kế và hiệu suất của anten WIFI. Anten đóng vai trò phát và thu tín hiệu vô tuyến, quyết định phạm vi phủ sóng, độ ổn định và tốc độ truyền dữ liệu. Do đó, nghiên cứu và cải tiến anten là một hướng đi quan trọng trong việc nâng cao hiệu suất của hệ thống WIFI.

- Tần số hoạt động: Anten WIFI cần hoạt động chính xác trong các dải tần mà chuẩn WIFI sử dụng. WIFI hoạt động chủ yếu trên các băng tần:
  - 2.4 GHz (2.400–2.4835 GHz): Phạm vi phủ sóng rộng, khả năng xuyên tường tốt nhưng dễ bị nhiễu do trùng tần với nhiều thiết bị (Bluetooth, lò vi sóng,...).
  - 5 GHz (5.150–5.825 GHz): Tốc độ cao, ít nhiễu, phù hợp cho các ứng dụng yêu cầu băng thông lớn như truyền hình trực tuyến và chơi game, nhưng phạm vi phủ sóng ngắn hơn.
  - Các chuẩn WIFI hiện đại (như WIFI 6E và WIFI 7) có thể khai thác băng tần 6 GHz (5.925 GHz –7.125 GHz), cung cấp tốc độ cao hơn và độ trễ thấp hơn đáng kể lý tưởng cho các ứng dụng thế hệ mới như thực tế ảo và video 8K.
- Hệ số tăng ích: Hệ số tăng ích là một chỉ số phản ánh khả năng định hướng và tập trung năng lượng bức xạ của anten theo một hướng nhất định. Trong các hệ thống WIFI, anten cần đạt được hệ số tăng ích phù hợp để đảm bảo phạm vi phủ sóng mong muốn, duy trì chất lượng kết nối ổn định và đáp ứng các yêu cầu về hiệu suất truyền thông không dây. Tùy theo môi trường triển khai (trong nhà hay ngoài trời), loại hình ứng dụng và băng tần hoạt động, anten có thể được thiết kế với



cấu trúc và hệ số tăng ích khác nhau. Mức tăng ích cần đảm bảo đủ lớn để bù đắp tổn hao truyền sóng, nhưng cũng cần được kiểm soát để tuân thủ các giới hạn về công suất phát xạ theo quy định của các tổ chức quản lý tần số. Một thiết kế anten hiệu quả cho WIFI cần đạt được sự cân bằng hợp lý giữa hệ số tăng ích, độ phủ sóng, phân bố bức xạ và kích thước vật lý của anten, nhằm tối ưu hóa hiệu suất hoạt động trong điều kiện thực tế sử dụng.

- Đồ thị bức xạ và định hướng: Tùy thuộc vào mục đích sử dụng, anten WIFI có thể được thiết kế với kiểu bức xạ khác nhau:
  - Anten đa hướng (Omnidirectional): Bức xạ tín hiệu đều theo mặt phẳng ngang  $360^\circ$ , lý tưởng cho phủ sóng rộng như trong nhà, văn phòng, khu thương mại. Thường được sử dụng trong các thiết bị như router hoặc AP cố định. Các dạng anten phổ biến như là anten lưỡng cực, anten Collinear.
  - Anten định hướng (Directional): Tập trung tín hiệu vào một hướng cụ thể, cho phép truyền tín hiệu ở khoảng cách xa và giảm nhiễu từ các hướng khác. Ứng dụng trong kết nối điểm-điểm (point-to-point), kết nối liên tòa nhà, hoặc điểm-đa điểm. Các dạng phổ biến gồm anten Yagi, anten Parabol, anten panel phẳng.



Hình 1.2. (a) Anten đa hướng (b) Anten định hướng

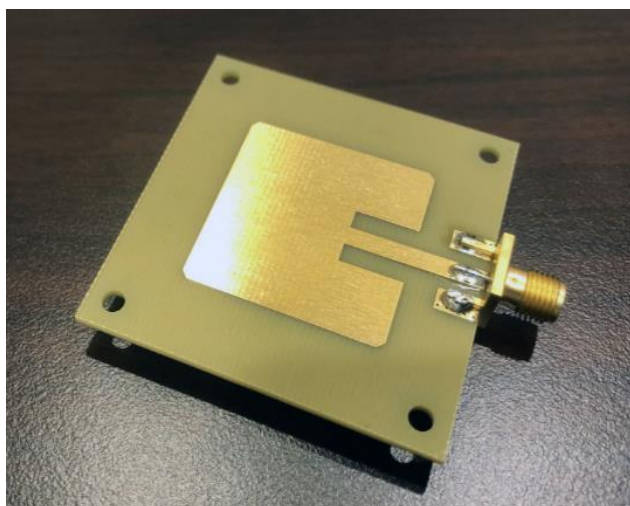
- Phân cực: Biểu thị hướng dao động của thành phần điện trường trong sóng điện từ. Trong WIFI, có các kiểu phân cực phổ biến là phân cực tuyến tính (bao gồm phân cực dọc và phân cực ngang) và phân cực tròn. Để tối ưu hiệu suất, phân cực của anten phát và anten thu phải trùng khớp. Nếu không, tín hiệu sẽ bị suy hao nghiêm trọng.
- Băng thông: WIFI hiện đại sử dụng các kênh có băng thông lớn như 40 MHz, 80 MHz, 160 MHz và 320 MHz (WIFI 7). Do đó, anten cần có dải tần làm việc đủ rộng để hỗ trợ nhiều kênh và tránh suy hao tín hiệu ở các biên kênh. Băng thông anten càng rộng thì khả năng hỗ trợ đa kênh, đa thiết bị, đồng thời giảm nhiễu và tăng cường tốc độ truyền dẫn.

- Hiệu suất bức xạ: Trong các hệ thống WIFI, anten cần có hiệu suất bức xạ cao để đảm bảo phần lớn công suất đưa vào được chuyển thành năng lượng bức xạ điện từ. Hiệu suất thấp dẫn đến tổn hao năng lượng, làm suy giảm phạm vi phủ sóng và tốc độ truyền dữ liệu.
- Phối hợp trở kháng: Anten WIFI cần có trở kháng đầu vào tiêu chuẩn là  $50\ \Omega$ , phù hợp với hầu hết thiết bị phát sóng và hệ thống mạng. Việc không khớp trở kháng dẫn đến phản xạ tín hiệu và làm giảm công suất hiệu dụng.

## 1.2 Giới thiệu về anten vi dải

### 1.2.1 Tổng quan về anten vi dải

Anten vi dải là một loại anten có cấu trúc đơn giản và chi phí chế tạo thấp, được phát triển và sử dụng rộng rãi từ những năm 1970. Ban đầu, các anten vi dải được ứng dụng chủ yếu trong các hệ thống không gian. Ngày nay, chúng đã trở nên phổ biến trong nhiều lĩnh vực khác nhau bao gồm các ứng dụng như truyền thông di động, hệ thống định vị và các thiết bị không dây.



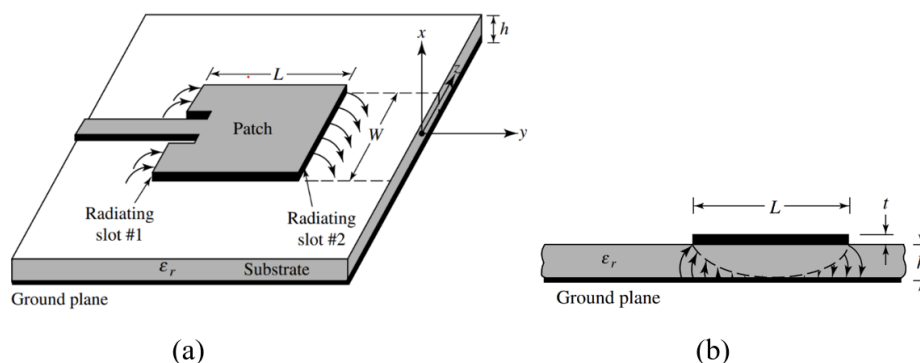
Hình 1.3. Anten vi dải

### 1.2.2 Ưu nhược điểm của anten vi dải trong thiết kế anten ứng dụng WIFI

- Ưu điểm: Anten vi dải là một lựa chọn phổ biến trong các hệ thống WIFI hiện đại nhờ vào nhiều ưu điểm nổi bật về hình thức, khả năng chế tạo và hiệu suất hoạt động. Cụ thể:
  - Kích thước nhỏ gọn, trọng lượng nhẹ: Anten vi dải có cấu trúc phẳng và mỏng, thường được chế tạo trên nền vật liệu điện môi với lớp kim loại mỏng phía trên. Điều này giúp giảm đáng kể kích thước và trọng lượng so với các loại anten truyền thống như anten dây hay anten Yagi. Đây là yếu tố đặc biệt quan trọng trong các thiết bị WIFI di động (laptop, điện thoại, IoT) cũng như các hệ thống yêu cầu tiết kiệm không gian như UAV hoặc thiết bị nhúng.

- Dễ dàng chế tạo và tích hợp: Anten vi dải có thể được sản xuất bằng các kỹ thuật in mạch vi điện tử thông thường giúp tối ưu hóa quy trình chế tạo và giảm chi phí sản xuất. Ngoài ra, anten có thể dễ dàng tích hợp trực tiếp lên cùng một bảng mạch với các linh kiện RF khác, phù hợp với thiết kế module WIFI tích hợp cao.
- Đa dạng về thiết kế: Cấu trúc anten vi dải rất linh hoạt, có thể được thiết kế với nhiều hình dạng như hình chữ nhật, hình tròn, hình tam giác, vòng khuyên, hay thậm chí là dạng fractal để mở rộng băng thông. Bằng cách điều chỉnh các thông số như kích thước patch, hình dạng feed, khe cộng hưởng, hay sử dụng kỹ thuật ghép đôi, anten có thể được tối ưu hóa theo yêu cầu cụ thể về băng thông, hướng bức xạ, hệ số tăng ích, và phân cực – điều này rất cần thiết trong các hệ thống WIFI hoạt động ở 2.4 GHz hoặc 5 GHz.
- Chi phí thấp: Nhờ cấu trúc đơn giản, kỹ thuật chế tạo phổ biến và khả năng tích hợp cao, anten vi dải mang lại chi phí thấp hơn so với các loại anten phức tạp khác. Đây là lợi thế lớn trong sản xuất hàng loạt cho các thiết bị WIFI tiêu dùng như router, camera IP, thiết bị IoT,...
- Nhược điểm
  - Băng thông hẹp: Anten vi dải cơ bản thường có băng thông hẹp, giới hạn khả năng hoạt động trong một dải tần số nhỏ. Điều này gây khó khăn khi cần đáp ứng các tiêu chuẩn WIFI hiện đại yêu cầu băng thông rộng hơn (đặc biệt là chuẩn 802.11ac hoặc 802.11ax ở 5 GHz và 6 GHz).
  - Hiệu suất thấp: Do tổn hao trên đế điện môi và kim loại dẫn điện, hiệu suất bức xạ của anten vi dải thường thấp hơn so với các loại anten khác.
  - Hệ số tăng ích thấp: Do kích thước nhỏ, hệ số tăng ích của anten vi dải thường thấp hơn so với các loại anten lớn hơn.

### 1.2.3 Cấu trúc của anten vi dải

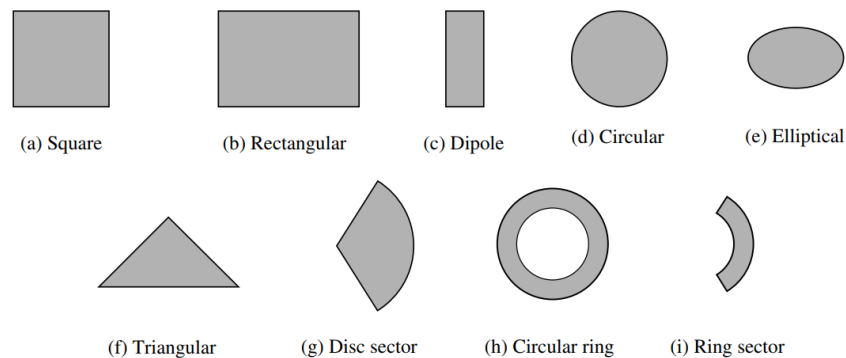


Hình 1.4. (a) Cấu trúc cơ bản của anten vi dải, (b) Hình chiếu cạnh [1]

Hình 1.4 minh họa cấu trúc cơ bản của một anten vi dải bao gồm: phần tử bức xạ (Patch), đế điện môi (Substrate) và mặt phẳng đất (Ground Plane).

- **Phần tử bức xạ (Patch):** Đây là phần tử bức xạ chính của anten. Phần tử bức xạ thường có dạng hình học đơn giản như hình vuông, hình chữ nhật, hình tròn, hoặc hình elip, lưỡng cực (dipole) nhưng cũng có thể có hình dạng phức tạp hơn. Độ dày của tấm kim loại rất nhỏ so với bước sóng hoạt động ( $t \ll \lambda_0$ , với  $\lambda_0$  là bước sóng hoạt động).

Phần tử bức xạ được thiết kế để hướng bức xạ cực đại của nó vuông góc với bề mặt phần tử bức xạ, hay còn gọi là bức xạ chính diện. Điều này được thực hiện bằng cách lựa chọn chế độ trường (mode) kích thích dưới phần tử bức xạ một cách thích hợp. Đối với phần tử bức xạ hình chữ nhật, chiều dài  $L$  của nó thường nằm trong khoảng  $\lambda_0/3 < L < \lambda_0/2$ .



Hình 1.5. Các hình dạng thường thấy của phần tử bức xạ [1]

- **Đế điện môi (Substrate):** Đây là lớp vật liệu cách điện đặt giữa tấm kim loại và mặt phẳng đất. Đế điện môi có độ dày nhỏ hơn nhiều so với bước sóng ( $h \ll \lambda_0$ , thường là  $0.003 \lambda_0 \leq h \leq 0.05 \lambda_0$ ) và hằng số điện môi nằm trong khoảng  $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$ . Đế điện môi có vai trò quan trọng trong việc xác định các đặc tính bức xạ của anten như băng thông, hiệu suất và hướng bức xạ. Đế điện môi có thể được làm từ nhiều loại vật liệu khác nhau, mỗi loại có ưu điểm và nhược điểm riêng:

- Đế điện môi với hằng số điện môi thấp: Hiệu suất cao, băng thông rộng, trường điện từ lỏng lẻo, nhưng kích thước phần tử lớn.
- Đế điện môi với hằng số điện môi cao: Kích thước phần tử nhỏ, phù hợp tích hợp với mạch vi sóng, nhưng hiệu suất thấp và băng thông hẹp.

Việc lựa chọn chất nền phụ thuộc vào yêu cầu cụ thể của ứng dụng, thường là sự cân bằng giữa hiệu suất anten và thiết kế mạch.

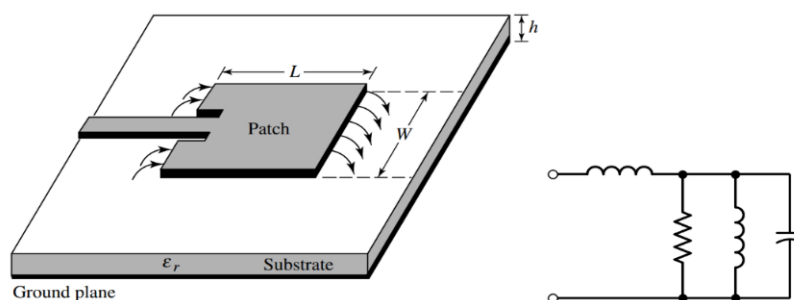
- **Mặt phẳng đất** là lớp kim loại nằm ở đáy anten, có vai trò làm điểm tham chiếu điện và phản xạ năng lượng điện từ về phía patch để tạo ra hướng bức xạ mong muốn. Kích thước và hình dạng của mặt phẳng đất có thể ảnh hưởng rõ rệt đến hệ số tăng ích và băng thông của anten. Một mặt phẳng đất có kích thước quá nhỏ

có thể dẫn đến rò rỉ sóng và làm thay đổi hướng bức xạ mong muốn, trong khi một mặt phẳng đất đủ lớn sẽ giúp ổn định trở kháng và cải thiện độ định hướng.

### 1.2.4 Các phương pháp cấp nguồn cho ăng-ten vi dải

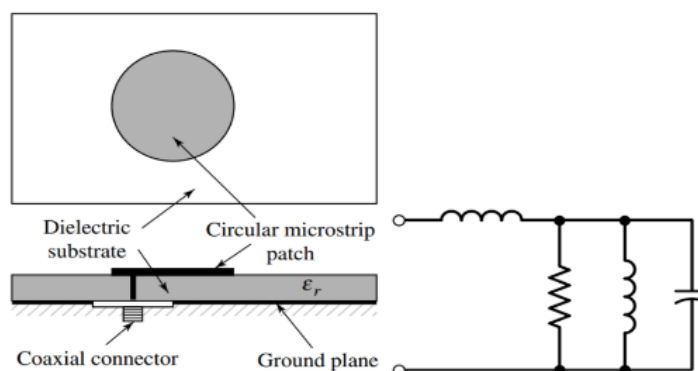
Có nhiều phương pháp được sử dụng để cấp nguồn cho ăng-ten vi dải. Bốn phương pháp phổ biến nhất là cấp bằng dây truyền vi dải, đầu dò đồng trục, ghép khe và ghép gần.

- Đường truyền vi dải (Microstrip Line Feed):
  - Đường truyền vi dải cũng là một dải dẫn, thường có bề rộng nhỏ hơn nhiều so với phần tử bức xạ.
  - Cấp nguồn bằng đường truyền vi dải dễ chế tạo, dễ dàng điều chỉnh bằng cách kiểm soát vị trí đặt vào và khá đơn giản để mô hình hóa.
  - Tuy nhiên, khi độ dày của chất nền tăng, sóng bề mặt và bức xạ cấp nguồn không mong muốn tăng lên, dẫn đến giới hạn băng thông (thường từ 2–5%).



Hình 1.6. Cấp nguồn bằng đường truyền vi dải [1]

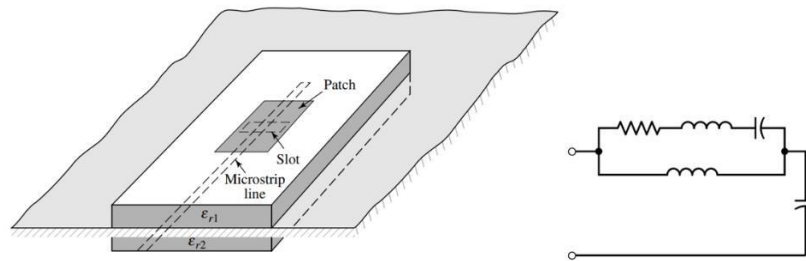
- Cấp nguồn bằng cáp đồng trục (Coaxial Probe Feed):
  - Trong phương pháp này, dây dẫn trong của cáp đồng trục được gắn vào bản vá bức xạ, trong khi dây dẫn ngoài được kết nối với mặt phẳng đất.
  - Cáp đồng trục dễ chế tạo và điều chỉnh, có bức xạ không mong muốn thấp.
  - Tuy nhiên, nó cũng có băng thông hẹp và khó mô hình hóa hơn, đặc biệt với các chất nền dày ( $h > 0.02\lambda_0$ ).



Hình 1.7. Cấp nguồn bằng cáp đồng trục [1]

- Ghép khâu độ (Aperture Coupling):

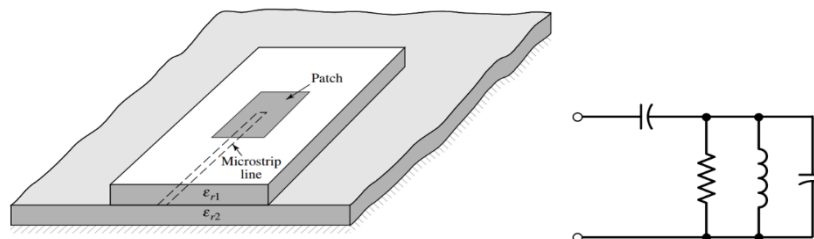
- Ghép khâu độ là phương pháp khó chế tạo nhất trong bốn kỹ thuật ghép, với băng thông rộng hơn, nhưng lại dễ mô hình hóa và có mức bức xạ không mong muốn vừa phải.
- Phương pháp này sử dụng hai đế điện môi ngăn cách bởi mặt phẳng đất. Một đường truyền vi dải đặt ở mặt dưới đế điện môi dưới sẽ ghép năng lượng vào phần tử bức xạ thông qua một khe mở trên mặt phẳng đất.
- Cấu trúc này cho phép tối ưu riêng biệt giữa cơ chế cấp nguồn và phần tử bức xạ. Thường dùng vật liệu điện môi cao cho lớp dưới và vật liệu điện môi thấp, dày cho lớp trên.
- Mặt phẳng đất giữa hai lớp giúp cách ly nguồn khỏi phần tử bức xạ, giảm nhiễu và tăng độ tinh khiết phân cực.
- Các thông số như hằng số điện môi, bề rộng dây cáp, kích thước và vị trí khe có thể được điều chỉnh để tối ưu thiết kế, chủ yếu bằng cách thay đổi bề rộng dây và chiều dài khe.



Hình 1.8. Cấp nguồn bằng ghép khâu độ [1]

- Ghép gần (Proximity Coupling):

- Trong bốn phương pháp cấp nguồn, ghép gần có băng thông lớn nhất (có thể lên tới 13%), dễ mô hình hóa và có bức xạ không mong muốn thấp. Tuy nhiên, chế tạo phương pháp này phức tạp hơn.
- Chiều dài của phần cấp nguồn và tỉ lệ chiều rộng/dài của phần tử bức xạ có thể được sử dụng để điều chỉnh độ phù hợp.



Hình 1.9. Cấp nguồn bằng ghép gần [1]

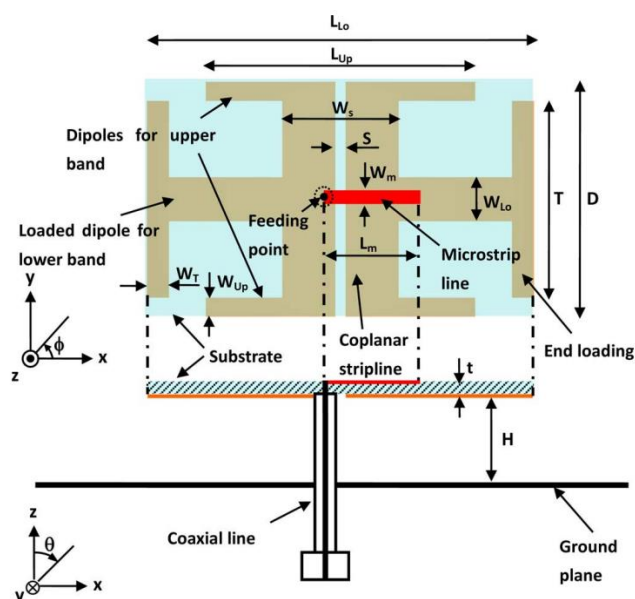
Tóm lại, mỗi phương pháp cấp nguồn có những ưu điểm và nhược điểm riêng, và lựa chọn phương pháp nào sẽ phụ thuộc vào yêu cầu cụ thể của ứng dụng cũng như các hạn chế về thiết kế và chế tạo.



### 1.2.5 Các thiết kế Anten vi dải ứng dụng cho mạng không dây WIFI

Trong các hệ thống mạng không dây WIFI hiện nay, anten vi dải được ứng dụng rộng rãi nhờ ưu điểm nhỏ gọn, dễ chế tạo và dễ tích hợp với các thiết bị điện tử hiện đại. Đặc biệt, để đáp ứng nhu cầu kết nối trong các băng tần phổ biến như 2,4 GHz và 5 GHz, nhiều cấu trúc anten vi dải đã được nghiên cứu và phát triển, với đa dạng về hình dạng, cách cấp nguồn và hướng bức xạ.

Tùy theo yêu cầu sử dụng và đặc điểm môi trường ứng dụng, các thiết kế anten có thể ưu tiên cho tính định hướng, bức xạ đa hướng, hoạt động đơn băng hoặc hai băng tần. Một số thiết kế sẽ được trình bày trong phần này nhằm minh họa cho xu hướng triển khai anten vi dải trong các thiết bị WIFI hiện đại.



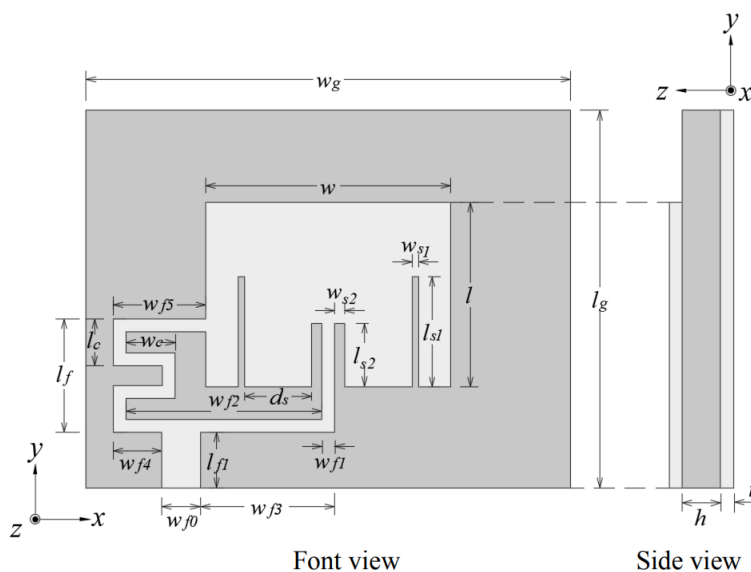
Hình 1.10. Anten định hướng hai băng dùng cho ứng dụng WIFI [2]

Hình 1.10 minh họa một loại anten định hướng hai băng có kích thước nhỏ gọn, được đề xuất để ứng dụng trong các điểm truy cập không dây WIFI hoạt động tại hai băng tần 2,4 GHz và 5 GHz. Cấu trúc anten bao gồm một phần tử lưỡng cực dài hơn cho băng tần thấp (2,4 GHz) và một cặp lưỡng cực ngắn hơn dành cho băng tần cao (5 GHz). Các phần tử lưỡng cực được kích thích thông qua một đầu cấp nguồn đồng trục. Anten đạt được bức xạ định hướng với hệ số tăng ích xấp xỉ 8 dBi tại băng tần thấp và 9–10 dBi tại băng tần cao.

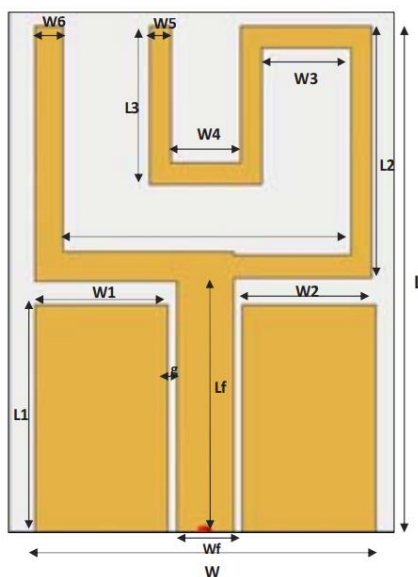
Hình 1.11 trình bày một thiết kế anten vi dải hình chữ nhật được cấp nguồn kép, ứng dụng cho mạng cục bộ không dây (WLAN) hoạt động tại tần số trung tâm 2,45 GHz. Anten được chế tạo trên nền vật liệu FR4 phù hợp với các ứng dụng thực tế có yêu cầu chi phí thấp. Cấu trúc anten bao gồm một phần tử bức xạ hình chữ nhật với hai cặp khe rãnh được cắt trên bề mặt và tải điện dung tại điểm cấp nguồn kép. Kết quả cho thấy anten bức xạ theo hướng vuông góc với mặt phẳng anten với độ định hướng tối đa đạt

7,02 dBi. Tham số S11 nhỏ hơn  $-10$  dB trong toàn dải tần WLAN, cho thấy khả năng khớp trở kháng tốt và hiệu suất truyền dẫn cao.

Hình 1.12 minh họa một thiết kế Anten đơn cực phẳng có kích thước nhỏ gọn, hoạt động tại hai băng tần 2,4 GHz và 5,2 GHz, phù hợp với các hệ thống mạng không dây WIFI. Cấu trúc anten bao gồm hai dải kim loại gấp khúc, một mặt phẳng đất đồng phẳng và một đường cấp nguồn. Anten cho kết quả tốt về mặt trở kháng, với băng thông hoạt động khoảng 50 MHz tại băng tần 2,4 GHz và 2400 MHz tại băng tần 5,2 GHz. Kết quả này cho thấy anten đáp ứng tốt yêu cầu băng thông cho các ứng dụng WLAN hiện đại trong khi vẫn đảm bảo kích thước rất nhỏ gọn – một yếu tố quan trọng đối với các thiết bị không dây kích thước hạn chế như cảm biến IoT hoặc thiết bị đeo thông minh.



Hình 1.11. Anten vi dải hình chữ nhật cấp nguồn kép dùng cho ứng dụng WIFI [3]



Hình 1.12. Anten đơn cực phẳng dùng cho ứng dụng WIFI [4]



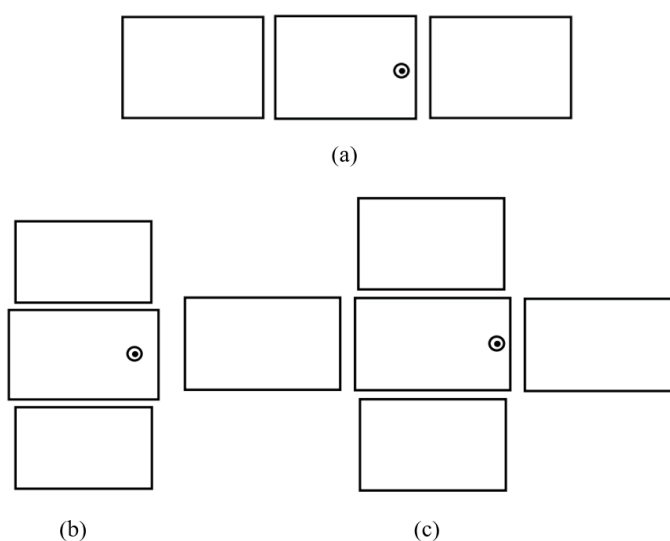
## 1.3 Các kỹ thuật cải thiện băng thông của anten vi dải

### 1.3.1 Sử dụng các phần tử bức xạ ký sinh đồng phẳng.

Một trong những phương pháp hiệu quả và phổ biến để mở rộng băng thông cho anten vi dải là sử dụng các phần tử bức xạ ký sinh. Trong cấu trúc này, các phần tử bức xạ đều được đặt trên cùng một mặt phẳng nhưng chỉ một tấm vi dải trung tâm được cấp nguồn trực tiếp, trong khi các phần tử bức xạ còn lại được bố trí lân cận và hoạt động như các phần tử ký sinh. Các phần tử này không được cấp nguồn mà được kích thích thông qua hiện tượng ghép điện từ với phần tử bức xạ chính. Sự ghép nối giữa các patch được thực hiện thông qua các khe hở nhỏ hoặc đường vi dải mảnh nối trực tiếp. Sự kết hợp cộng hưởng giữa phần tử bức xạ chính và các phần tử ký sinh sẽ tạo ra nhiều đỉnh cộng hưởng gần nhau, từ đó giúp mở rộng băng thông làm việc của anten.

Có nhiều cách bố trí phần tử ký sinh dựa trên vị trí tương đối so với phần tử bức xạ chính:

- Ghép nối qua các cạnh bức xạ: Trong Hình 1.13(a), một anten vi dải sử dụng hai phần tử ký sinh không đồng đều tại lớp bức xạ được trình bày. Trong cấu hình anten được đề xuất, phần tử bức xạ chính được cấp nguồn bằng cáp đồng trục và hai phần tử bức xạ ký sinh được đặt ở hai bên. Trong cấu trúc này, các phần tử bức xạ ký sinh được ghép điện từ với phần tử bức xạ chính thông qua các cạnh bức xạ của phần tử bức xạ chính. Kích thước của các phần tử bức xạ được thiết kế khác nhau đáng kể, tạo ra ba tần số cộng hưởng khác nhau. Mức độ ghép nối giữa các tấm bức có thể được điều chỉnh thông qua khoảng cách giữa chúng, từ đó kiểm soát khả năng phối hợp trở kháng của anten. Bằng kỹ thuật này có thể đạt được băng thông ở mức 20% [5].



Hình 1.13. Các cách sắp xếp các phần tử bức xạ ký sinh (a) Ghép nối qua 2 cạnh bức xạ, (b) Ghép nối qua 2 cạnh không bức xạ, (c) Ghép nối qua cả 4 cạnh [5]

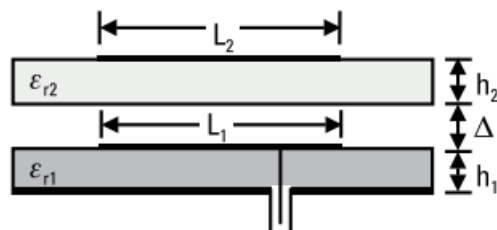
- Ghép nối qua các cạnh không bức xạ: Trong phương pháp này, trong Hình 1.13(b), hai phần tử ký sinh không đồng đều được đặt ở cả hai phía của phần tử bức xạ chính nhưng thông qua các cạnh không bức xạ của phần tử bức xạ chính. Do các trường không đồng nhất ở các cạnh không bức xạ nên sự ghép nối giữa phần tử bức xạ chính và các phần tử ký sinh yếu hơn so với trường hợp ghép nối thông qua các cạnh bức xạ. Vì vậy, khoảng cách giữa chúng phải nhỏ hơn so với khoảng cách trong trường hợp trước. Bằng kỹ thuật này có thể đạt được băng thông ở mức 14.5% [5].
- Ghép nối qua bốn cạnh: Kết hợp hai phương pháp trên, bốn phần tử ký sinh được đặt bao quanh patch chính tại cả cạnh bức xạ và không bức xạ. Cách bố trí này tối ưu hiệu quả ghép nối từ mọi phía, từ đó tăng cường băng thông và hệ số khuếch đại. Băng thông đạt được có thể vượt quá 18% [6].

### 1.3.2 Xếp chồng các phần tử bức xạ.

Tương tự như kỹ thuật sử dụng các phần tử bức xạ ký sinh để tạo ra nhiều cộng hưởng nhằm mở rộng băng thông, nhưng thay vì dùng phương pháp ghép đồng phẳng, các phần tử bức xạ được xếp chồng trên nhau ở các lớp khác nhau của chất nền điện môi. Phương pháp này làm tăng chiều cao tổng thể của anten, nhưng kích thước theo mặt phẳng vẫn giữ nguyên như anten sử dụng một phần tử bức xạ duy nhất.

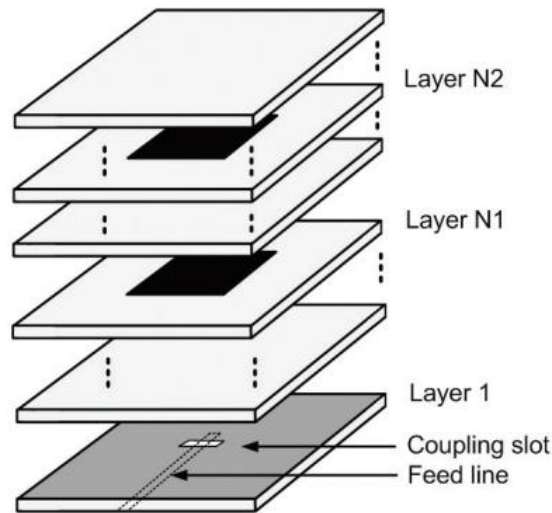
Các phần tử bức xạ có thể được ghép nối với nhau thông qua các cách như:

- Ghép nối điện từ: cấu hình của anten vi dải ghép điện từ được thể hiện trong Hình 1.14. Trong đó, phần tử bức xạ phía dưới được cấp nguồn bằng cáp đồng trục, còn phần tử bức xạ ký sinh phía trên được kích thích thông qua cơ chế ghép điện từ với tấm dưới. Kích thước anten được tối ưu hóa sao cho tần số cộng hưởng của hai phần tử bức xạ gần nhau nhằm đạt được băng thông rộng. Nguyên lý này có thể áp dụng cho bất kỳ hình dạng phần tử bức xạ nào. Các cấu trúc gồm từ hai đến ba lớp phần tử bức xạ có thể đạt được băng thông trở kháng từ 10% đến 30% với  $VSWR \leq 2$  [5]. Việc tăng băng thông có được là nhờ chiều cao tổng thể của anten được tăng lên, Hằng số điện môi hiệu dụng giảm xuống nếu có chèn lớp không khí hoặc xốp và hiệu ứng đa cộng hưởng. Thông qua việc lựa chọn phù hợp độ dày và hằng số điện môi của từng lớp, có thể đạt được mức ghép mong muốn.



Hình 1.14. Anten xếp chồng các phần tử bức xạ sử dụng ghép nối điện từ [5]

- Ghép khâu độ: Cấu trúc anten phân tử bức xạ xếp chồng ghép khâu độ là một cấu trúc nhiều lớp, có khả năng đạt được băng thông trong khoảng từ 50 –70% so với tần số trung tâm. Hình 1.15 minh họa cấu trúc tổng quát của anten thuộc loại này, bao gồm N đế điện môi, hai phần tử bức xạ và một mặt phẳng tiếp đất có khắc khe ghép. Khác với anten xếp chồng sử dụng ghép nối điện từ, phần tử bức xạ chính trong cấu hình này được cấp nguồn gián tiếp thông qua khe ghép khâu độ, làm xuất hiện thêm một cơ chế ghép điện từ giữa đường truyền và phần tử bức xạ. Điều này góp phần mở rộng đáng kể băng thông trở kháng.

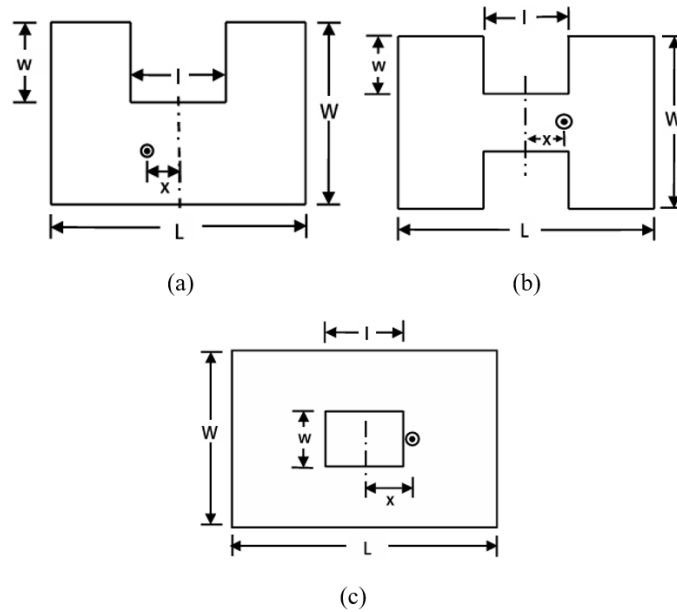


Hình 1.15. Anten xếp chồng các phần tử bức xạ sử dụng ghép khâu độ [7]

### 1.3.3 Tạo các khe trên phần tử bức xạ

Một trong những phương pháp hiệu quả để mở rộng băng thông hoặc giảm tần số cộng hưởng của anten vi dải là tạo các khe (slot) trên phần tử bức xạ. Việc này giúp tăng chiều dài đường đi của dòng điện bề mặt, từ đó thay đổi đặc tính cộng hưởng của anten mà không cần tăng kích thước vật lý tổng thể. Điều này cho phép anten cộng hưởng ở tần số thấp hơn so với cấu hình không khe. Ngoài ra, cấu trúc khe còn tạo ra các chế độ cộng hưởng bổ sung, từ đó giúp mở rộng dải tần làm việc và cải thiện băng thông của anten. Không chỉ ảnh hưởng đến tần số cộng hưởng và băng thông, khe còn có tác động đáng kể đến trở kháng đầu vào và mẫu bức xạ. Khi thiết kế khe một cách hợp lý, ta có thể cải thiện sự phù hợp trở kháng (impedance matching), giảm hệ số phản xạ ( $S_{11}$ ), và điều khiển hướng bức xạ theo yêu cầu ứng dụng.

Các dạng khe thường dùng bao gồm khe hình chữ U [8] [9], chữ H [10] [11]. Ngoài ra thêm các khe có thể tạo hình phần tử bức xạ thành các hình như hình chữ E [12] [13], chữ H [14], chữ C, hình vòng chữ nhật.



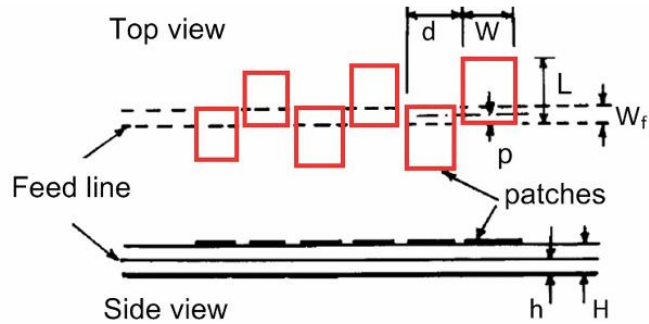
Hình 1.16. (a) Phần tử bức xạ hình chữ C, (b) Phần tử bức xạ hình chữ H, (c) Phần tử bức xạ hình vòng chữ nhật [5]

#### 1.3.4 Sử dụng mảng các phần tử bức xạ theo cấu trúc loga chu kỳ

Cấu trúc loga chu kỳ (log-periodic) là một dạng sắp xếp hình học mà trong đó các phần tử có kích thước và khoảng cách phân bố theo một hàm số logarit. Trong thiết kế anten, cấu trúc log-periodic thường được sử dụng để thiết kế anten có băng thông rộng. Khác với mảng tuần hoàn thông thường (periodic array), mảng log-periodic không có chu kỳ hình học cố định mà tuân theo quy luật biến thiên logarit. Nhờ đó, các phần tử trong mảng lần lượt cộng hưởng tại các tần số khác nhau, giúp cho toàn bộ mảng có thể hoạt động liên tục trong một dải tần rất rộng. Cấu trúc này thường thấy ở các mảng lưỡng cực (log-periodic dipole array – LPDA), vốn có hướng bức xạ dọc theo trục mảng (end-fire).

Khi mở rộng ý tưởng này sang lĩnh vực anten vi dải các nhà nghiên cứu đã đề xuất việc sắp xếp các phần tử bức xạ theo quy luật log-periodic để tận dụng đặc tính băng thông rộng vốn có của cấu trúc này [15]. Thay vì sử dụng các phần tử bức xạ giống nhau như trong mảng vi dải truyền thống, mỗi phần tử bức xạ trong mảng log-periodic được thiết kế với kích thước và khoảng cách khác nhau sao cho mỗi phần tử bức xạ cộng hưởng tại một tần số khác biệt. Nhờ đó, toàn bộ mảng có thể bao phủ một dải tần rộng hơn rất nhiều so với chỉ một phần tử đơn lẻ.

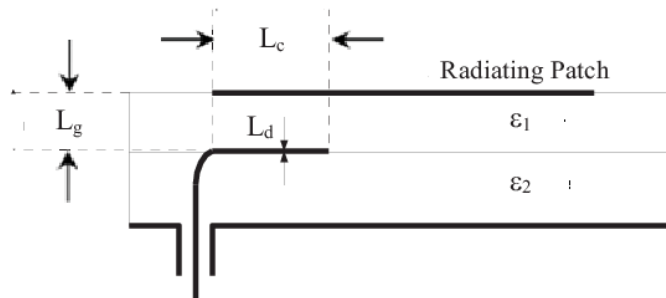
Ở cấu trúc Hình 1.17, mỗi phần tử bức xạ được ghép nối với đường truyền vi dải nằm ở lớp dưới. Mẫu bức xạ của các anten trong Hình là kiểu vuông góc với mặt phẳng anten (boardside), trái ngược với mảng lưỡng cực log-periodic truyền thống, vốn bức xạ dọc theo trục của mảng (end-fire). Mặc dù cấu hình log-periodic giúp đạt được băng thông rất rộng, nhưng hướng bức xạ chính lại thay đổi theo tần số, điều này khiến cho anten không thể duy trì một hướng bức xạ cố định trong toàn dải băng thông.



Hình 1.17. Cấu trúc anten sử dụng mảng các phần tử bức xạ theo cấu trúc loga chu kỳ [15]

### 1.3.5 Sử dụng đầu dò hình chữ L (L-probe)

Anten vi dải sử dụng L-probe cấp nguồn đã được biết đến như một cấu hình anten phẳng băng rộng hiệu quả [16] [17]. L-probe là một kỹ thuật cấp nguồn bằng đầu dò hình chữ L, trong đó đầu dò có phần nằm ngang (song song với phần tử bức xạ) kết hợp với phần thẳng đứng (vuông góc với mặt đất). Cấu hình này tạo ra ghép cảm ứng giữa đường cấp và phần tử bức xạ mà không cần tiếp xúc trực tiếp.



Hình 1.18. Anten vi dải cấp nguồn bằng đầu dò chữ L

Kỹ thuật cấp nguồn bằng L-probe mang lại nhiều ưu điểm nổi bật:

- Mở rộng băng thông: Nhờ đặc tính ghép cảm ứng và hiệu ứng khớp trở linh hoạt, anten sử dụng L-probe có thể đạt được băng thông lớn hơn đáng kể so với cấp nguồn trực tiếp hoặc cấp qua khe. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra băng thông có thể mở rộng trên 20%, thậm chí đến 40% [17].
- Phối hợp trở kháng tốt: Cấu trúc ba chiều của L-probe giúp điều chỉnh trở kháng đầu vào một cách hiệu quả mà không cần sử dụng thêm mạch ghép trở phức tạp. Việc thay đổi chiều dài phần ngang hoặc khoảng cách giữa đầu dò và phần tử bức xạ có thể được dùng để tối ưu hóa trở kháng.
- Tăng tính linh hoạt trong thiết kế: L-probe cho phép cấu trúc cơ khí đơn giản hơn so với ghép khâu độ, đồng thời dễ điều chỉnh hơn so với cấp vi dải truyền thống.
- Cách ly cao: Phần tử cấp nguồn được cách ly tốt hơn với phần tử bức xạ chính, giúp giảm nhiễu ngược và tăng độ tinh khiết phân cực.

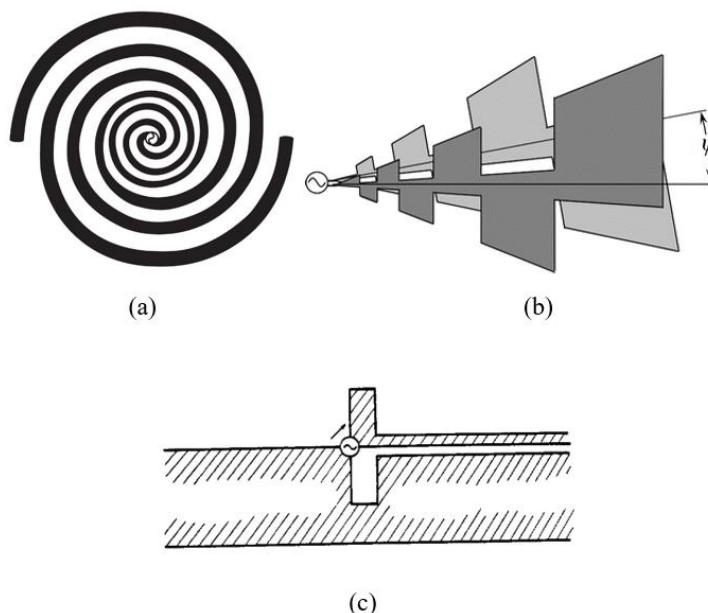
### 1.3.6 Sử dụng cấu trúc tự bù (self – complementary)

#### (a) Cấu trúc tự bù

Cấu trúc tự bù là một phương pháp thiết kế hình học đặc biệt được áp dụng cho các anten nhằm mở rộng băng thông hoạt động. Trong một hình học tự bù, phần dẫn điện và phần không dẫn điện (khe) của anten có hình dạng giống hệt nhau. Nói cách khác, nếu thay thế phần kim loại bằng khoảng trống và ngược lại, ta vẫn thu được hình dạng tương tự. Khái niệm hình học tự bù lần đầu được giới thiệu bởi Mushiake vào năm 1948 [18] [19], với phát hiện rằng các anten có hình dạng tự bù có trở kháng vào lý tưởng độc lập với tần số và bằng một hằng số xác định, cụ thể là:

$$Z_{in} = \frac{Z_0}{2} \approx 188,5 \, \Omega,$$

trong đó  $Z_0 = 377 \, \Omega$  là trở kháng sóng trong chân không. Tính chất này khiến anten tự bù trở nên lý tưởng cho các ứng dụng yêu cầu hoạt động băng thông rộng, ổn định trở kháng, và hiệu suất bức xạ cao trên toàn dải tần.



Hình 1.19. Anten tự bù (a) Cấu trúc xoắn ốc Archimedes, (b) Cấu trúc log-periodic, (c) Cấu trúc lưỡng cực [19]

Cấu trúc tự bù có thể được áp dụng cho nhiều loại anten khác nhau, bao gồm:

- Anten lưỡng cực tự bù: Là một dạng anten lưỡng cực với hai phần kim loại hình đối xứng, trong đó phần kim loại và khe có hình dạng giống nhau. Anten này thường được sử dụng trong các hệ thống băng rộng nhờ tính đơn giản và hiệu quả.
- Anten xoắn ốc tự bù: Ví dụ như anten xoắn ốc Archimedes hai nhánh, có thể được thiết kế tự bù để đạt trở kháng không đổi và phân cực tròn trên dải tần rộng. Đây là lựa chọn phổ biến cho các ứng dụng yêu cầu băng thông cực rộng.

- Anten log-periodic tự bù: Kết hợp thiết kế log-periodic với cấu trúc tự bù, loại anten này không chỉ có trở kháng ổn định mà còn duy trì đặc tính bức xạ độc lập với tần số trong một phạm vi nhất định.

(b) Anten vi dải tự bù

Anten vi dải tự bù là một hướng phát triển quan trọng nhằm kết hợp những ưu điểm của cấu trúc tự bù với khả năng tích hợp, chế tạo đơn giản và đồng phẳng của anten vi dải. Trong cấu trúc này, phần dẫn điện và phần khe hở (slot) của anten được bố trí sao cho đối ngẫu nhau về hình học trên bề mặt điện môi.

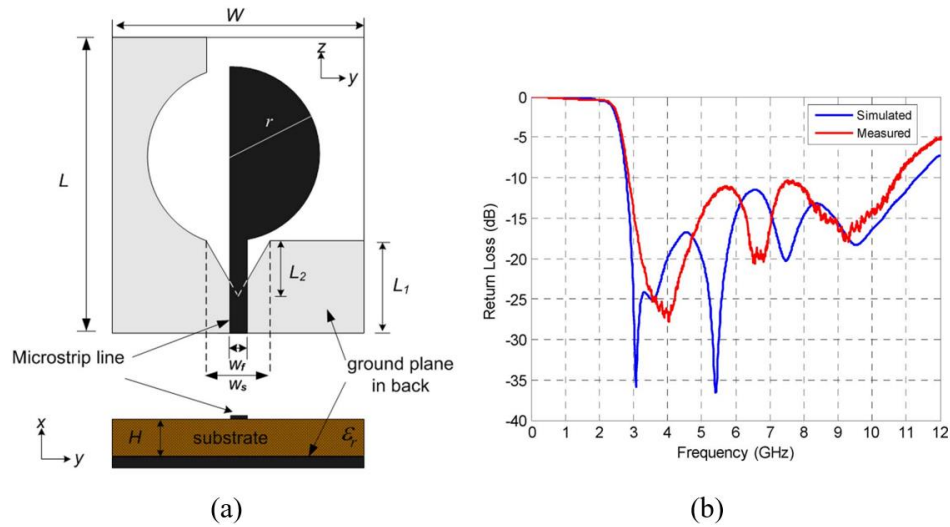
Về lý thuyết, khi cấu trúc hình học của anten là tự bù, trở kháng đầu vào lý tưởng không phụ thuộc tần số có thể đạt giá trị khoảng  $188,5 \Omega$ . Tính chất này đặc biệt hữu ích trong các hệ thống truyền thông không dây băng rộng hoặc đa băng tần, nơi yêu cầu hiệu suất ổn định trên một dải tần số lớn. Tuy nhiên, trở ngại lớn nhất khi triển khai anten tự bù là sự không tương thích trở kháng với các cổng RF tiêu chuẩn (thường là  $50 \Omega$ ). Do đó cần một mạch ghép nối để chuyển đổi trở kháng từ  $188,5 \Omega$  về  $50 \Omega$  để đưa anten tự bù vào ứng dụng thực tiễn.

Để khắc phục vấn đề không tương thích trở kháng, nhiều nghiên cứu đã đề xuất các giải pháp thiết kế mạch phối hợp trở kháng. Tuy nhiên, các mạch phối hợp này thường yêu cầu thiết kế phức tạp, chiếm thêm không gian trên mạch in và có thể làm suy giảm hiệu suất bức xạ nếu không được tối ưu hóa chính xác. Chính vì vậy, nhiều nghiên cứu gần đây đã tập trung vào việc cải tiến trực tiếp hình học của anten để điều chỉnh trở kháng đầu vào mà không cần đến mạch phối hợp phụ trợ. Một trong những giải pháp hiệu quả là sử dụng cấu trúc gần như tự bù (quasi-self-complementary structure) [20] [21] [22]. Trong đó, hình học của phần dẫn điện và khe không hoàn toàn đối ngẫu như cấu trúc tự bù lý tưởng, nhưng vẫn giữ được sự đối xứng cần thiết để đảm bảo dải tần hoạt động rộng tương tự anten tự bù chuẩn.

Dưới đây là một ví dụ về thiết kế anten vi dải tự bù:

Hình 1.20(a) mô tả cấu trúc của một anten vi dải tự bù. Anten được thiết kế trên một đế điện môi sử dụng vật liệu FR4 với độ dày 1.6 mm, hằng số điện môi  $\epsilon_r = 4,4$  kích thước  $16 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$  ( $0,15 \lambda_0 \times 0,24 \lambda_0$  ở tần số 2.86 GHz). Mặt bức xạ hình bán nguyệt được in lên mặt trên của đế điện môi. Đường truyền vi dải được in cùng mặt phẳng với phần tử bức xạ. Mặt phẳng đất được thiết kế đặc biệt với một phần không dẫn điện, tạo thành một khe hở đối xứng với phần tử bức xạ ở mặt trên. Thiết kế này giúp anten đạt được tính chất gần như tự bù. Ngoài ra còn thêm vào mặt phẳng đất một khe hình tam giác với mục đích để dễ cải thiện sự phối hợp trở kháng của anten, đưa nó gần hơn với giá trị tiêu chuẩn  $50 \Omega$ , thay vì trở kháng lý thuyết  $188,5 \Omega$  của cấu trúc tự bù lý tưởng. Điều này giảm thiểu sự cần thiết của mạch phối hợp trở kháng phụ trợ, giúp thiết kế đơn giản hơn và tiết kiệm không gian.

Kết quả đo được thể hiện ở hình 1.20(b) cho thấy Anten có băng thông  $|S_{11}| < -10$  dB đạt xấp xỉ 116% trong khoảng tần số từ 2,86 GHz đến 10,7 GHz.



Hình 1.20. (a) Cấu trúc Anten vi dải gần như tự bù, (b) Đồ thị hệ số phản xạ  $S_{11}$  [23]

## 1.4 Các kỹ thuật cải thiện hệ số tăng ích của Anten vi dải

### 1.4.1 Sử dụng lớp vật liệu superstrate

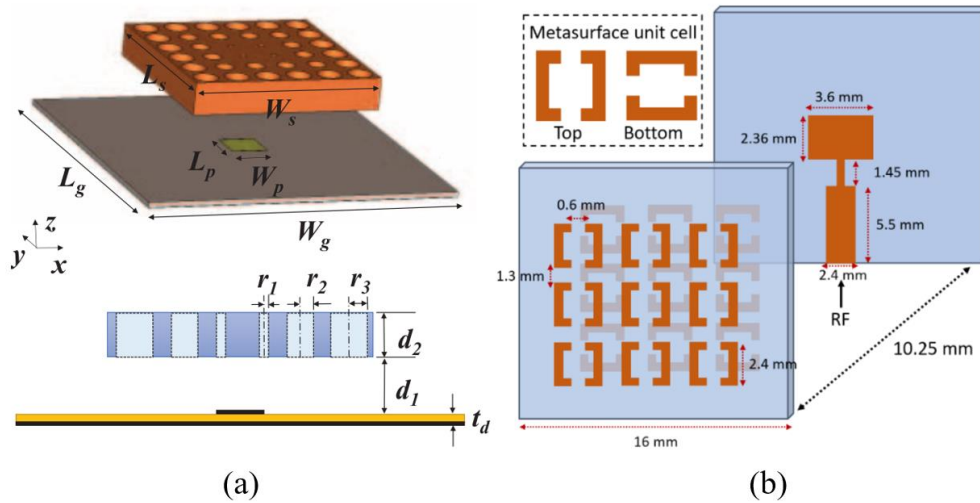
Một trong những phương pháp hiệu quả để tăng hệ số tăng ích của Anten vi dải là sử dụng lớp superstrate, hay còn gọi là lớp phủ điện môi, được đặt cách một khoảng nhất định phía trên phần tử bức xạ. Lớp vật liệu này có thể là điện môi đồng nhất, điện môi bị đục lỗ [24] [25], hoặc tích hợp các cấu trúc vật liệu nhân tạo (metamaterial) [26] [27]. Mục đích chính là tạo ra trường điện đồng pha phía trên Anten, qua đó tập trung năng lượng bức xạ vào hướng chính. Phương pháp này có thể giúp tăng hệ số tăng ích của Anten từ 3db [24] đến 8db [26].

Lớp superstrate đóng vai trò điều hướng và tái cộng hưởng sóng bức xạ. Khi sóng điện từ từ Anten truyền lên phía trên, một phần sóng sẽ xuyên qua lớp superstrate và bức xạ ra môi trường, phần còn lại sẽ bị phản xạ từ bề mặt trên của superstrate quay trở lại Anten. Nếu chiều dày và hằng số điện môi của lớp superstrate được chọn phù hợp, thì pha của sóng phản xạ sẽ trùng với pha sóng phát ra từ Anten tại thời điểm giao thoa. Kết quả là hiện tượng giao thoa tăng cường xảy ra, tạo ra một trường bức xạ mạnh hơn ở hướng chính giúp làm tăng đáng kể hệ số tăng ích Anten. Các thiết kế superstrate thường gặp:

- Superstrate là đế điện môi rỗng: Là lớp vật liệu điện môi có các lỗ nhỏ được khoét theo một cấu trúc định sẵn nhằm làm giảm hằng số điện môi hiệu dụng, giúp điều chỉnh tốc độ và pha của sóng truyền qua lớp này.



- Superstrate tích hợp metasurface: Bằng cách thêm các phần tử cộng hưởng vào lớp superstrate, người thiết kế có thể kiểm soát biên độ và pha sóng một cách tinh vi hơn, giúp tối ưu hóa hướng bức xạ và mở rộng băng thông hoạt động.



Hình 1.21 Anten sử dụng lớp superstrate (a) Lớp superstrate điện môi rỗng [25], (b) Lớp superstrate có cấu trúc metasurface [27]

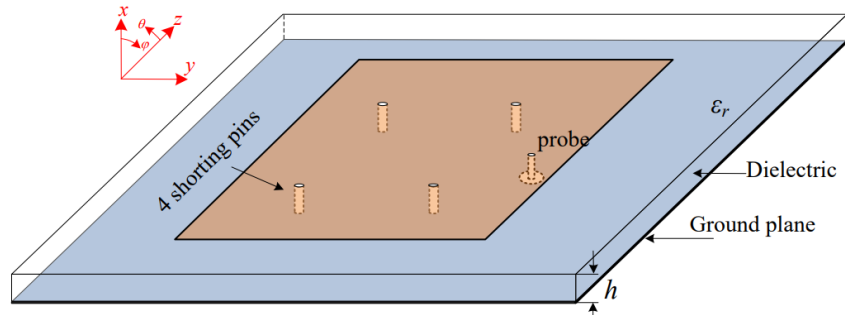
#### 1.4.2 Sử dụng shorting pin

Phương pháp thứ ba để tăng cường hệ số tăng ích là Sử dụng shorting pins, trong đó các chân kết nối (thường là các thanh hoặc via) được sử dụng để kết nối cấu trúc patch với mặt phẳng đất. Kỹ thuật này đặc biệt hữu ích trong các ứng dụng WIFI, IoT, và thiết bị không dây nhỏ gọn.

Trong một anten vi dải, dòng điện trên phần tử bức xạ phân bố theo một mô hình cụ thể, thường đạt cực đại ở giữa và giảm dần về các cạnh. Khi thêm chốt ngắn mạch, dòng điện bị giới hạn tại vị trí chốt, vì chốt tạo ra một điểm có điện áp bằng 0 (ngắn mạch với mặt phẳng đất). Điều này thay đổi phân bố dòng điện và trường điện từ trên phần tử bức xạ. Việc thêm các chốt ngắn mạch vào thiết kế dẫn đến sự gia tăng mật độ dòng điện và tính đồng nhất hơn trên bề mặt. Dòng điện trên phần tử bức xạ và mặt phẳng đất di chuyển cùng một hướng và dẫn đến sự chồng chéo bức xạ. Do đó, hệ số tăng ích của ăng-ten được tăng lên.

Trong việc cải thiện hệ số tăng ích, chốt ngắn mạch là một phương pháp tốt vì việc thêm chốt ngắn mạch vào anten mà kích thước vẫn giữ nguyên ở tần số cộng hưởng. Một nghiên cứu cụ thể đã chứng minh hiệu quả của kỹ thuật này trong việc cải thiện hệ số tăng ích anten. Trong [6], một anten vi dải hình vuông được thiết kế với bốn chốt ngắn mạch (shorting pins) được bố trí đối xứng theo hai đường chéo của phần tử bức xạ. Các chốt này kết nối trực tiếp phần tử bức xạ với mặt phẳng đất, đóng vai trò như phần tử cảm kháng mắc song song (shunt inductive elements), gây xáo trộn đáng kể phân bố trường điện từ dưới phần tử bức xạ. Một nghiên cứu cụ thể đã chứng minh hiệu quả của kỹ thuật này trong việc cải thiện hệ số tăng ích anten. Trong [28], một anten vi dải hình

vuông được thiết kế với bốn chốt ngắn mạch (shorting pins) được bố trí đối xứng theo hai đường chéo của phần tử bức xạ. Các chốt này kết nối trực tiếp phần tử bức xạ với mặt phẳng đất, đóng vai trò như phần tử cảm kháng mắc song song (shunt inductive elements), gây xáo trộn đáng kể phân bố trường điện từ dưới phần tử bức xạ.



Hình 1.22. Anten vi dải sử dụng 4 chốt ngắn mạch [28]

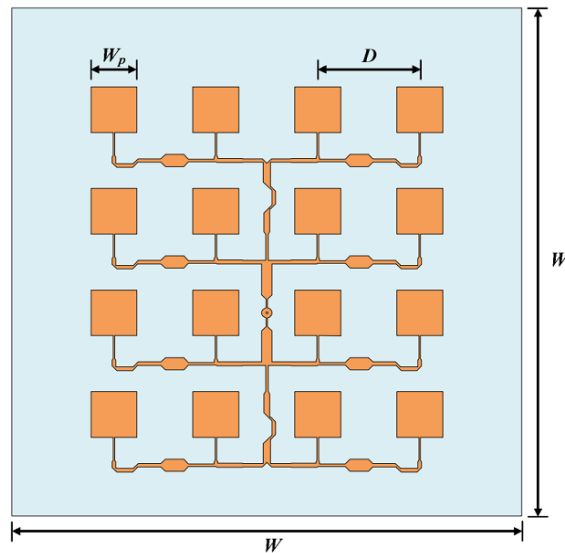
#### 1.4.3 Sử dụng cấu trúc anten mảng.

Việc tăng cường hệ số tăng ích của ăng-ten vi dải bằng cách tạo thành các mảng anten patch đã trở nên rất phổ biến trong truyền thông không dây điểm tới điểm hiện đại do tính đơn giản và hiệu quả về chi phí của phương pháp này.

Anten mảng là hệ thống gồm nhiều phần tử anten (lưỡng cực, vi dải, ...) được sắp xếp theo một cấu trúc nhất định (tuyến tính, mặt phẳng, vòng tròn, ...).

Nguyên lý hoạt động anten mảng phản xạ dựa vào khả năng bù pha của các phần tử anten mảng phản xạ (hay phần tử phản xạ) với mục tiêu bù vào sự lệch pha giữa các phần tử do quãng đường đi khác nhau từ nguồn phát đến các phần tử anten phản xạ để năng lượng tập trung vào hướng bức xạ xác định, nâng cao hiệu suất truyền – nhận tín hiệu. Mỗi phần tử anten trong mảng phát ra sóng điện từ. Khi các sóng từ các phần tử được đồng bộ về pha trong một hướng cụ thể, chúng cộng hưởng làm tăng cường độ trường điện từ ở hướng đó. Ngược lại, ở các hướng khác, các sóng có thể triệt tiêu lẫn nhau làm giảm bức xạ ở các hướng không mong muốn.

Với việc sử dụng công nghệ vi dải, anten thấu kính phẳng có khả năng cho phép các linh kiện điện tử như varactor, RF-MEMS, PIN diode tích hợp vào phần tử anten để thay đổi pha của phần tử phản xạ nhằm thay đổi hướng bức xạ. Đây là một ưu điểm rất lớn của anten mảng phản xạ. Hiện nay, các hệ thống anten mảng phản xạ điều khiển điện tử đang được nghiên cứu và phát triển mạnh mẽ nhằm đáp ứng yêu cầu ngày càng khắt khe của các hệ thống truyền thông vệ tinh, đặc biệt là trong các ứng dụng di động như vệ tinh cỡ nhỏ, máy bay không người lái và thiết bị đầu cuối mặt đất di động. Tuy nhiên, một thách thức lớn vẫn còn tồn tại là độ phức tạp và tổn hao trong mạng điều khiển pha sẽ gia tăng đáng kể theo số lượng phần tử, đòi hỏi các giải pháp tối ưu hóa trong cả thiết kế mạch điều khiển lẫn cấu trúc anten để đảm bảo hiệu suất toàn hệ thống.



Hình 1.23. Cấu trúc mảng Anten vi dải

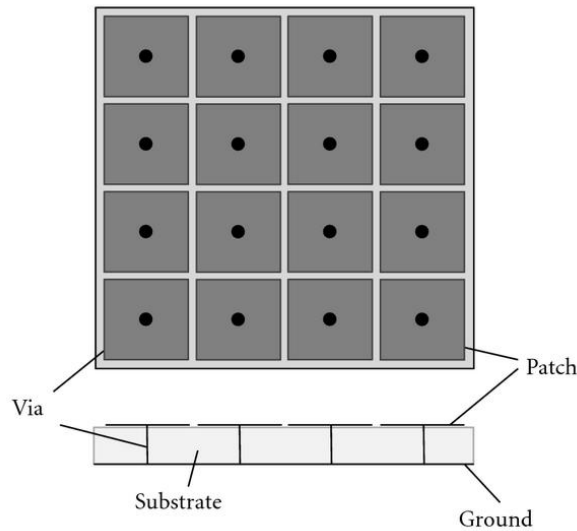
#### 1.4.4 Sử dụng cấu trúc dải chắn điện từ EBG (Electromagnetic Band Gap)

Cấu trúc dải chắn điện từ EBG (Electromagnetic Band Gap) là một loại vật liệu điện từ nhân tạo được cấu thành từ các phần tử lặp lại định kỳ có khả năng tạo ra hiện tượng “vùng cấm” cho sóng điện từ ở một hoặc nhiều dải tần số xác định. Đặc điểm nổi bật của các cấu trúc EBG là chúng có thể ức chế hoặc cho phép sự lan truyền của sóng trong các khoảng tần số được thiết kế trước. Khi được ứng dụng trong Anten vi dải, đặc tính chặn sóng điện từ của EBG trở nên đặc biệt hữu ích vì sóng bề mặt – nguyên nhân làm giảm hiệu suất và hệ số tăng ích của Anten – sẽ bị triệt tiêu trong vùng cấm, qua đó giúp tăng hệ số tăng ích và cải thiện chất lượng bức xạ của Anten.

Sóng bề mặt trong Anten vi dải là loại sóng lan truyền dọc theo biên giữa tấm kim loại bức xạ và đế điện môi. Không giống như sóng được bức xạ ra ngoài môi trường tự do sóng bề mặt bị giam giữ trong cấu trúc vật liệu, làm tiêu hao năng lượng điện từ và gây ra sự méo dạng trong mô hình bức xạ. Năng lượng lẽ ra phải được truyền ra ngoài thì lại bị hấp thụ hoặc phản xạ nhiều lần trong nền, dẫn đến giảm hệ số tăng ích, giảm hiệu suất và gây rò rỉ năng lượng không mong muốn. Việc tích hợp cấu trúc EBG vào Anten đóng vai trò như một rào chắn điện từ. Nhờ đặc tính cộng hưởng theo chu kỳ, EBG tạo ra một vùng tần số cấm – nơi mà sóng bề mặt không thể tồn tại hoặc lan truyền. Khi được bố trí hợp lý quanh phần tử bức xạ hoặc giữa phần tử bức xạ và mặt đất, cấu trúc EBG chủ động triệt tiêu các kênh truyền ngầm của sóng bề mặt, buộc toàn bộ năng lượng bức xạ phải hướng ra ngoài theo trục chính. Nhờ đó, mô hình bức xạ trở nên rõ ràng, tập trung và cân xứng hơn, đồng thời giúp nâng cao hệ số tăng ích của Anten. Sử dụng cấu trúc EBG có thể giúp Anten tăng được 2dB [29].

Cấu trúc EBG có thể được hiện thực dưới nhiều hình thức khác nhau. Trong số đó, cấu trúc dạng giống cây nấm như ở Hình 1.25 được ứng dụng rộng rãi nhất nhờ tính hiệu quả và dễ chế tạo. Cấu trúc này gồm các miếng kim loại vuông nhỏ được nối với mặt

đất thông qua các lỗ via, được bố trí đều đặn trên bề mặt điện môi. Đây là dạng EBG hai chiều đơn giản, nhẹ, chi phí thấp và rất phù hợp để tích hợp lên các bảng mạch in.



Hình 1.24. Cấu trúc EBG hình nấm

#### 1.4.5 Sử dụng bề mặt phản xạ

Một trong những kỹ thuật hiệu quả để tăng hệ số tăng ích của anten vi dải là sử dụng bề mặt phản xạ đặt phía dưới phần tử bức xạ. Bề mặt phản xạ có thể là tấm kim loại đơn giản, hoặc các cấu trúc phức tạp hơn như bề mặt dẫn từ nhân tạo (AMC – Artificial Magnetic Conductor). Mục đích chính của phương pháp này là phản xạ phần bức xạ hướng xuống dưới của anten trở lại và tạo ra sóng phản xạ đồng pha với sóng bức xạ chính, từ đó làm tăng mật độ năng lượng ở hướng thẳng đứng.

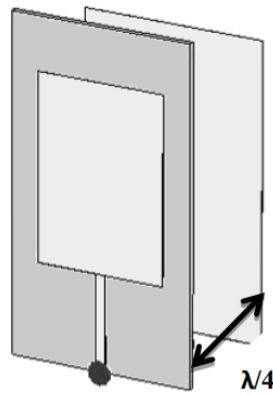
Khi sóng điện từ phát ra từ phần tử bức xạ, một phần sẽ hướng xuống dưới và bị phản xạ ngược trở lại bởi bề mặt phản xạ. Nếu khoảng cách giữa phần tử bức xạ và bề mặt phản xạ được thiết kế tối ưu, thì sóng phản xạ sẽ đạt được điều kiện đồng pha với sóng trực tiếp phát ra phía trước. Nhờ hiện tượng giao thoa tăng cường, tổng trường bức xạ sẽ được củng cố đáng kể theo hướng mong muốn, giúp cải thiện hệ số tăng ích anten.

Bên cạnh hiệu quả tăng hệ số tăng ích, việc sử dụng bề mặt phản xạ cũng giúp giảm thiểu bức xạ không mong muốn ở phía sau anten, cải thiện mô hình bức xạ và tăng hệ số định hướng.

##### (a) Sử dụng tấm kim loại làm bề mặt phản xạ

Tấm kim loại phản xạ là phương án đơn giản và phổ biến nhất khi thiết kế bề mặt phản xạ nhằm tăng hệ số tăng ích cho anten vi dải. Tấm phản xạ này được đặt song song và phía sau phần tử bức xạ với khoảng cách tối ưu là  $\lambda/4$ , với  $\lambda$  là bước sóng tại tần số hoạt động, để đảm bảo sóng phản xạ quay trở lại đúng pha với sóng phát ra, tạo ra hiện tượng giao thoa tăng cường. Nguyên lý hoạt động dựa trên việc tận dụng lệch pha 180

độ khi sóng điện từ phản xạ từ tấm kim loại (chất dẫn điện hoàn hảo - PEC) và chênh lệch đường đi của sóng. Khi khoảng cách giữa anten và tấm phản xạ là  $\lambda/4$ , tổng chênh lệch đường đi của sóng phản xạ là  $\lambda/2$ , tương ứng với lệch pha 180 độ, kết hợp với lệch pha 180 độ từ phản xạ, tổng cộng thành 360 độ (tức 0 độ), giúp sóng phản xạ và sóng phát ra trùng pha, tối ưu hóa hệ số tăng ích. Việc thêm một tấm kim loại phản xạ có thể cải thiện hệ số tăng ích của anten vi dải đến 3 dB [30].



Hình 1.25. Anten vi dải sử dụng tấm kim loại phản xạ [30]

Tấm kim loại phản xạ có ưu điểm nổi bật là dễ chế tạo, chi phí thấp, và phù hợp với nhiều loại anten vi dải khác nhau. Tuy nhiên, nhược điểm chính là kích thước tổng thể có thể tăng lên do yêu cầu về khoảng cách  $\lambda/4$ , điều này có thể không phù hợp với các hệ thống anten tích hợp yêu cầu nhỏ gọn.

#### (b) Sử dụng cấu trúc AMC làm bề mặt phản xạ

Trong các hệ thống anten vi dải hiện đại, nhu cầu tối ưu hóa kích thước, giảm chiều cao tổng thể trong khi vẫn duy trì được hiệu suất bức xạ cao là một thách thức thiết kế quan trọng. Để giải quyết vấn đề này, cấu trúc bề mặt dẫn từ nhân tạo (AMC – Artificial Magnetic Conductor) đã trở thành một giải pháp tiên tiến, thay thế cho tấm kim loại phản xạ truyền thống trong nhiều ứng dụng anten vi dải hệ số tăng ích cao.

Bề mặt AMC là một loại bề mặt điện từ nhân tạo, được thiết kế để mô phỏng đặc tính của một vật liệu từ tính lý tưởng tại một tần số nhất định. Không giống như kim loại phản xạ thông thường – vốn có đặc tính dẫn điện hoàn hảo (PEC) và tạo ra pha phản xạ đảo ngược 180° – bề mặt AMC được đặc trưng bởi hệ số phản xạ có pha gần bằng 0° tại tần số cộng hưởng. Điều này đồng nghĩa với việc sóng điện từ phản xạ từ bề mặt AMC sẽ đồng pha với sóng tới, tạo điều kiện lý tưởng cho giao thoa tăng cường mà không cần phải duy trì khoảng cách vật lý  $\lambda/4$  như với PEC. Nhờ vậy mà khoảng cách giữa phần tử bức xạ và bề mặt AMC có thể được giảm xuống rất nhiều, thậm chí chỉ còn từ  $\lambda/10$  đến  $\lambda/20$ , tùy thuộc vào dải pha phản xạ của AMC. Điều này giúp thu gọn đáng kể kích thước anten theo phương thẳng đứng, tạo điều kiện thuận lợi để tích hợp vào các thiết bị không gian hạn chế như hệ thống di động, IoT, UAV hoặc thiết bị y sinh.

Một cấu trúc AMC điển hình bao gồm các phần tử kim loại lặp lại tuần hoàn được in trên nền điện môi, với mỗi phần tử nối đất bằng một lỗ dẫn điện hoặc đặt trên đế điện môi có mặt đất kim loại phía dưới. Cấu trúc tạo thành một mạch cộng hưởng LC, trong đó điện dung được hình thành bởi khe hở giữa các patch kim loại, còn độ tự cảm xuất hiện do dòng điện chạy quanh mặt bức xạ hoặc qua các lỗ dẫn điện nối đất. Sự kết hợp của L và C tạo ra một tần số cộng hưởng nhất định, tại đó mặt AMC có trở kháng bề mặt rất cao – tương đương với một mạch hở lý tưởng – dẫn đến hiện tượng phản xạ gần như hoàn toàn sóng tới bề mặt và có pha phản xạ bằng  $0^\circ$ .

Cấu trúc của một đơn vị AMC gồm 1 đế điện môi, phía trên đế điện môi là phần tử bức xạ kim loại hình vuông, phía dưới phủ mặt đất kim loại. Chiều rộng đế điện môi là  $W_s$ , chiều rộng phần tử bức xạ là  $W_p$  khoảng cách giữa 2 phần tử bức xạ là  $g$ , độ dày đế điện môi  $h$  và hằng số điện môi  $\epsilon_r$  các giá trị của cấu trúc AMC được xác định bởi công thức sau [31] [32]:

Tần số cộng hưởng:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_s + L_d)C_s}} \quad \text{PT 1.1}$$

trong đó,  $L_s$  là điện cảm sinh ra do các dòng điện chạy qua bề mặt phần tử bức xạ,  $C_s$  là điện dung hình thành giữa 2 phần tử bức xạ lân cận và  $L_d$  là điện cảm gây ra bởi sự truyền sóng trong đế điện môi có tiếp đất.

Giá trị điện dung  $C_s$ :

$$C_s = \frac{W_p \epsilon_0 (1 + \epsilon_r)}{\pi} \cosh^{-1} \frac{W_s}{g} \quad \text{PT 1.2}$$

Giá trị tự cảm  $L_d$ :

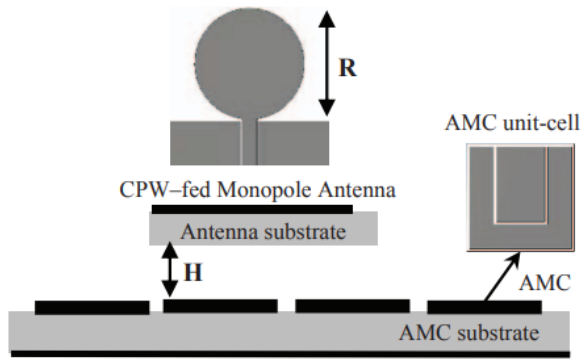
$$L_d = \mu_0 h \quad \text{PT 1.3}$$

Băng thông:

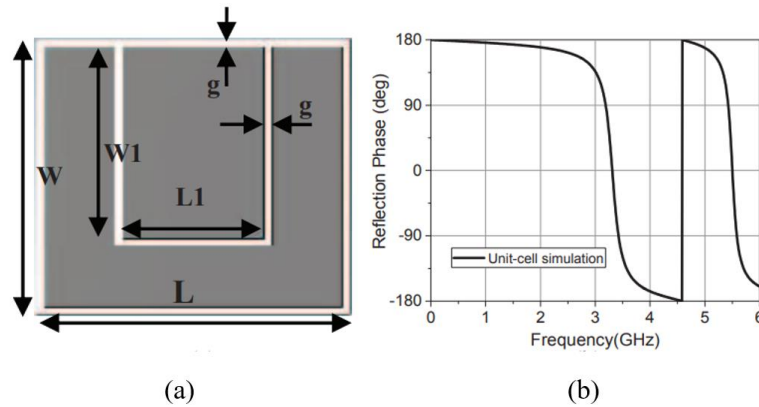
$$BW = \frac{\pi}{8\eta_0} \sqrt{\frac{L_s + L_d}{C_s}} \times \left( \frac{L_d}{L_s + L_d} \right)^2 \quad \text{PT 1.4}$$

trong đó,  $\eta_0$  là trở kháng đặc trưng trong không gian tự do,  $\epsilon_0$  là hằng số điện môi của không khí,  $\mu_0$  là độ từ thẩm của không khí.

Dưới đây là một số ví dụ sử dụng AMC làm bề mặt phản xạ để tăng hệ số tăng ích cho anten vi dải:

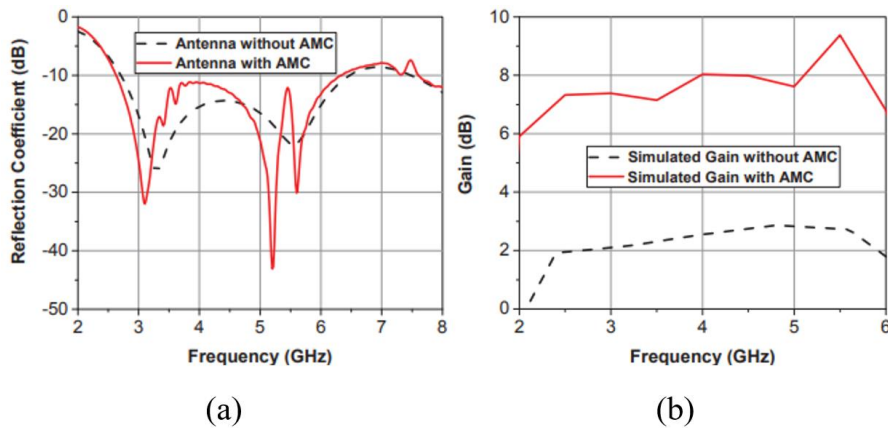


Hình 1.26. Anten vi dải đơn cực sử dụng bề mặt phản xạ AMC [33]



Hình 1.27. (a) Cấu trúc mặt phản tử bức xạ của AMC, (b) Đồ thị pha phản xạ của AMC

Cấu trúc anten trên hình 1.26 gồm 2 lớp, lớp đầu tiên là cấu trúc anten đơn cực vi dải được tiếp điện đồng phẳng, có mặt bức xạ hình tròn được in ở mặt trên để điện môi, mặt đất kim loại nằm trên cùng mặt phẳng với mặt bức xạ nhưng chỉ bao phủ xung quanh đường truyền vi dải. Lớp bên dưới là cấu trúc AMC cách cấu anten một khoảng  $H = 0,11\lambda$ . Mặt bức xạ của mỗi phần tử AMC có hình vuông và được tạo khe hình chữ U. Nhờ cấu trúc vậy mà AMC đạt được pha phản xạ bằng  $0^\circ$  tại 2 tần số là 3.3 GHz và 5.5 GHz với băng thông pha phản xạ  $\pm 90^\circ$  lần lượt từ 240 MHz và 160 MHz. Một mảng 4x4 phần tử AMC được tạo ra để bao phủ toàn bộ bề mặt của anten [33].



Hình 1.28. Đồ thị đánh giá các tham số của anten vi dải đơn cực sử dụng bề mặt phản xạ AMC, (a) Đồ thị hệ số phản xạ S11, (b) Đồ thị hệ số tăng ích

Nhìn vào hình 1.29, khi được bổ xung thêm cấu trúc AMC, băng thông  $|S_{11}| < -10$  dB của anten vẫn được duy trì như lúc chưa có AMC, hệ số tăng ích của anten được tăng lên đến 6 dB.

## 1.5 Kết luận chương

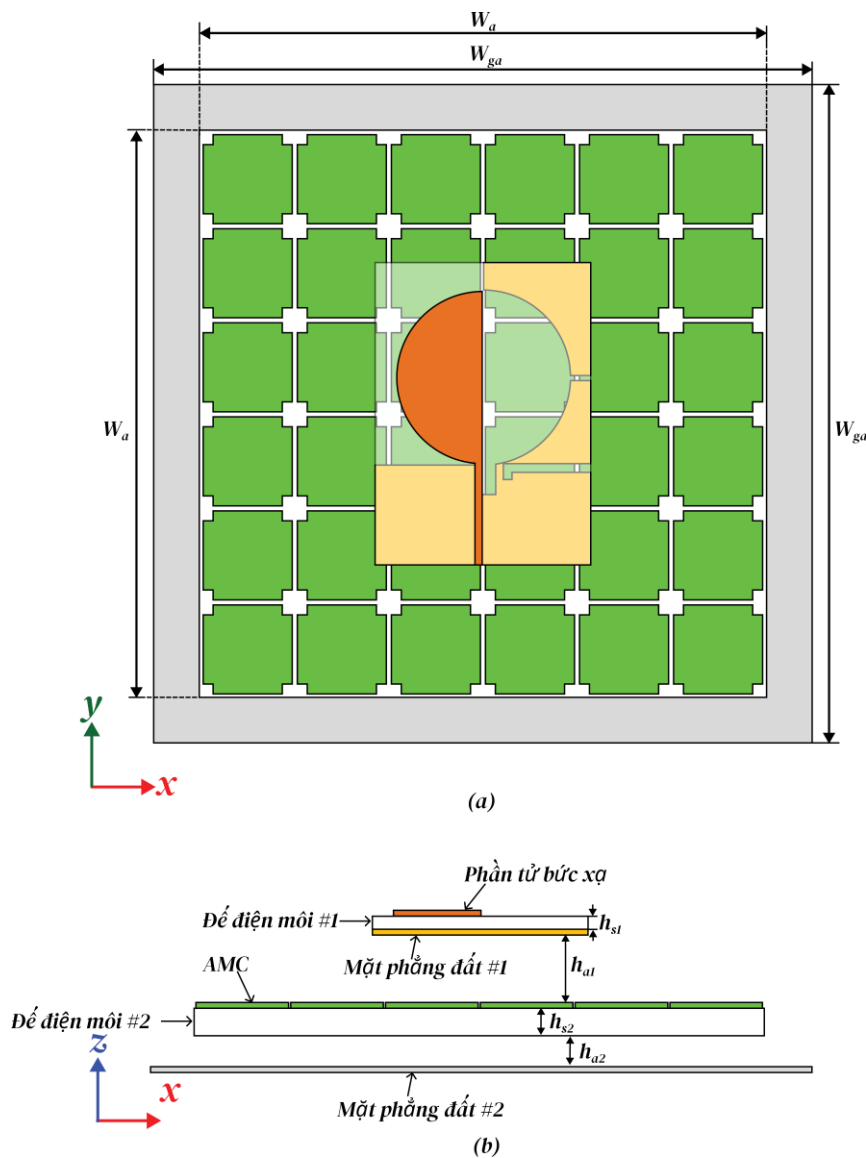
Chương 1 đã giới thiệu tổng quan về cấu trúc và nguyên lý hoạt động của hệ thống mạng không dây WIFI. Bên cạnh đó, chương này cũng trình bày khái quát về anten vi dải, đồng thời liệt kê các phương pháp nhằm mở rộng băng thông và cải thiện hệ số tăng ích của loại anten này. Dựa trên cơ sở lý thuyết đã trình bày ở chương 1, chương 2 sẽ tiến hành thiết kế anten hai băng tần phục vụ cho hệ thống WIFI hoạt động ở hai dải tần 2,45 GHz và 5,5 GHz.



## CHƯƠNG 2. THIẾT KẾ ANTEN VI DẢI TỰ BÙ BẰNG TẦN KÉP SỬ DỤNG BỀ MẶT DẪN TỪ NHÂN TẠO CHO ỨNG DỤNG MẠNG KHÔNG DÂY WIFI

Sau khi đã tìm hiểu tổng quan về hệ thống mạng không dây WIFI, nguyên lý hoạt động của Anten vi dải, cùng các kỹ thuật mở rộng băng thông và tăng hệ số tăng ích trong chương 1, chương 2 sẽ tập trung vào việc thiết kế một anten vi dải băng tần kép ứng dụng cho hệ thống WIFI. Anten được yêu cầu hoạt động hiệu quả tại hai dải tần: 2,45 GHz (2,4 – 2,5 GHz) và 5,5 GHz (5,15 – 5,85 GHz), tương ứng với các chuẩn WIFI hiện nay như IEEE 802.11b/g/n/ac. Quá trình thiết kế và tối ưu hóa anten được thực hiện bằng phần mềm mô phỏng điện từ ANSYS Electronics Desktop.

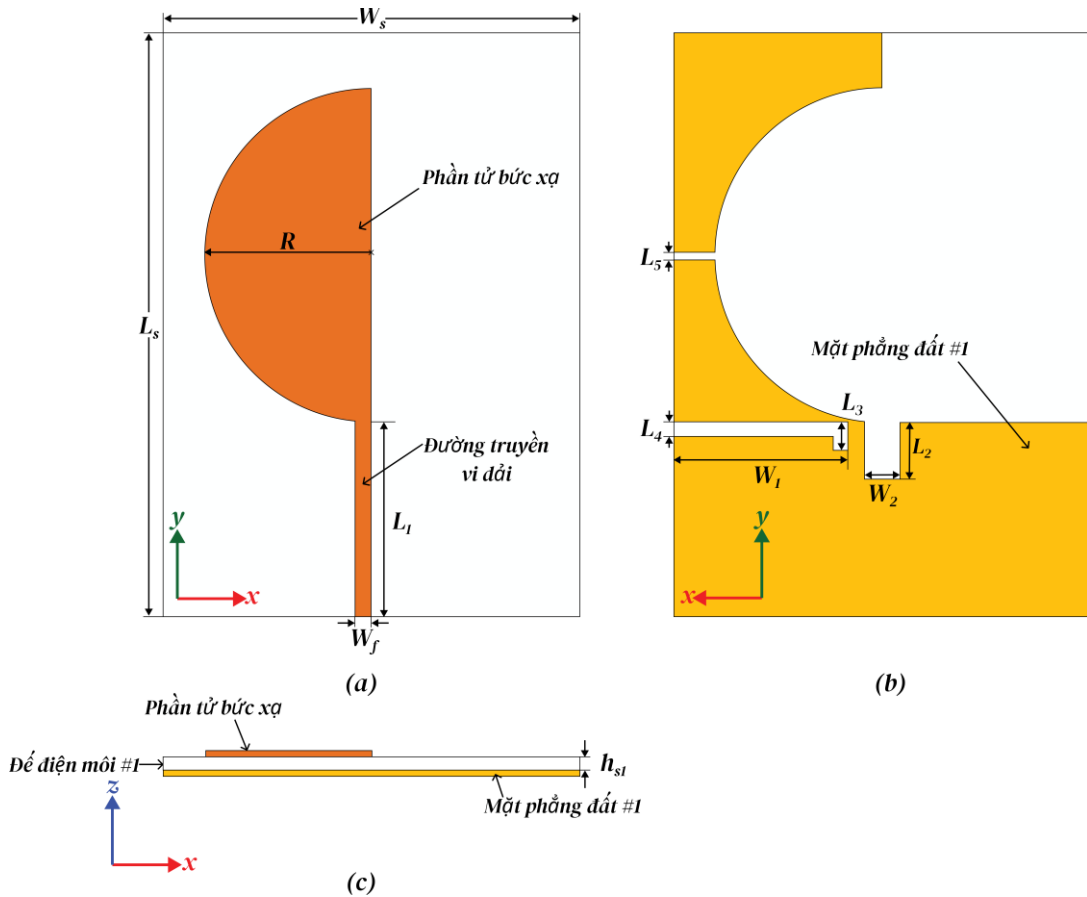
### 2.1 Cấu trúc hình học của anten đề xuất



Hình 2.1. Cấu trúc anten đề xuất (a) Hình chiếu bằng, (b) Hình chiếu cạnh

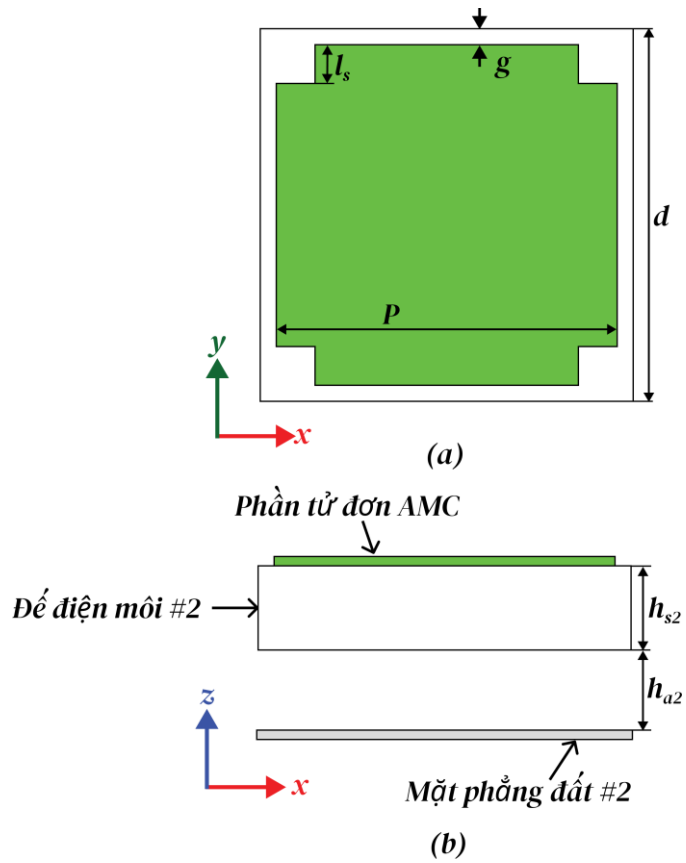
Cấu trúc hình học của anten đề xuất được minh họa trong Hình 2.1, bao gồm hai đế điện môi, phần tử bức xạ, mặt phẳng đất thứ nhất có cấu trúc tự bù với phần tử bức xạ, cấu trúc bề mặt dẫn từ nhân tạo AMC và mặt phẳng đất thứ hai. Cả hai đế điện môi đều sử dụng vật liệu FR4 với hằng số điện môi  $\epsilon_r = 4,4$  và hệ số tổn hao điện môi  $\tan\delta = 0,02$ , độ dày của đế điện môi thứ nhất và đế điện môi thứ hai lần lượt là  $h_{s1} = 0,8$  mm và  $h_{s2} = 3,2$  mm. Đế điện môi #1 cách đế điện môi #2 và đế điện môi #2 cách mặt phẳng đất #2 bởi các lớp không khí dày lần lượt là  $h_{a1}$  và  $h_{a2}$ .

Cấu trúc hình học của anten vi dải tự bù được phát triển dựa trên thiết kế của anten trình bày trong [22] và được minh họa ở Hình 2.2. Phần tử bức xạ có dạng bán nguyệt, nằm ở mặt trên của đế điện môi 1. Anten được cấp nguồn nhờ đường truyền 50  $\Omega$ . Mặt dưới của đế điện môi này là một mặt phẳng đất kim loại được thiết kế đặc biệt, trong đó có một vùng không dẫn điện tạo thành một khe hở đối xứng với phần tử bức xạ ở mặt trên. Cấu trúc này tạo nên một hình tròn hoàn chỉnh khi kết hợp giữa phần bán nguyệt kim loại ở trên và khe hở cùng hình dạng ở dưới, mang lại đặc tính gần như tự bù cho anten.



Hình 2.2. Cấu trúc hình học của anten vi dải tự bù (a) Mặt trên, (b) Mặt dưới, (c) Hình chiếu cạnh

Một cấu trúc bề mặt dẫn từ nhân tạo AMC gồm  $6 \times 6$  phần tử nằm ở mặt trên đế điện môi thứ hai. Cấu trúc của phần tử đơn AMC được minh họa trong Hình 2.3, với mặt bức xạ hình vuông được cắt thêm bốn khe hình vuông nhỏ tại các góc.



Hình 2.3. Cấu trúc hình học của phần tử đơn AMC

Chi tiết kích thước của các tham số trong thiết kế anten đề xuất được trình bày trong Bảng 2.1.

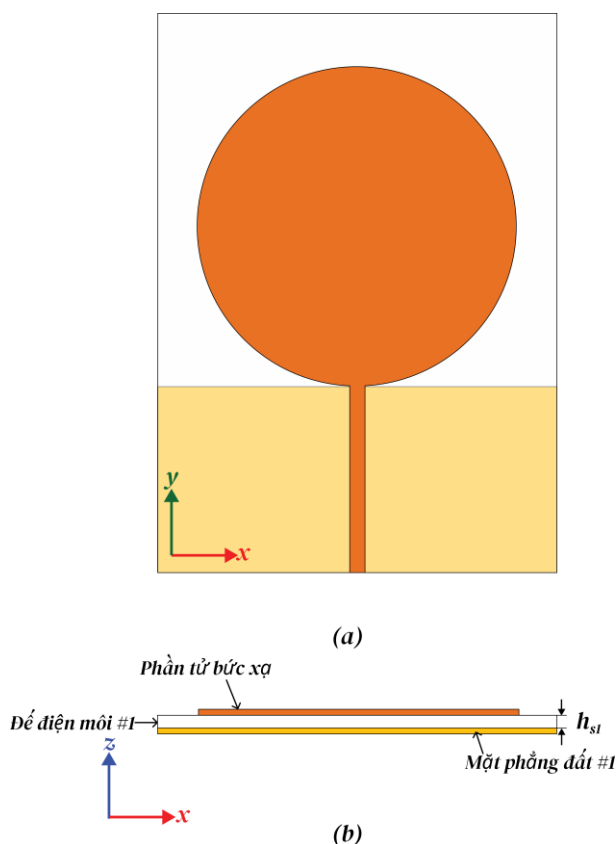
Bảng 2.1. Giá trị của các tham số kích thước anten.

Tham số	Giá trị (mm)	Tham số	Giá trị (mm)	Tham số	Giá trị (mm)
$W_s$	30	$L_3$	2	$g$	0,25
$L_s$	42	$L_4$	1	$l_s$	1,5
$h_{s1}$	0,8	$L_5$	0,3	$h_{s2}$	3,2
$R$	12,5	$W_1$	12,8	$h_{a1}$	13
$W_f$	1,2	$W_2$	2,4	$h_{a2}$	3
$L_1$	14	$d$	13,1	$W_a$	78,6
$L_2$	4	$P$	12,6	$W_{ga}$	91,7

## 2.2 Tiến trình thiết kế

### 2.2.1 Anten vi dải tự bù

(a) Anten #1



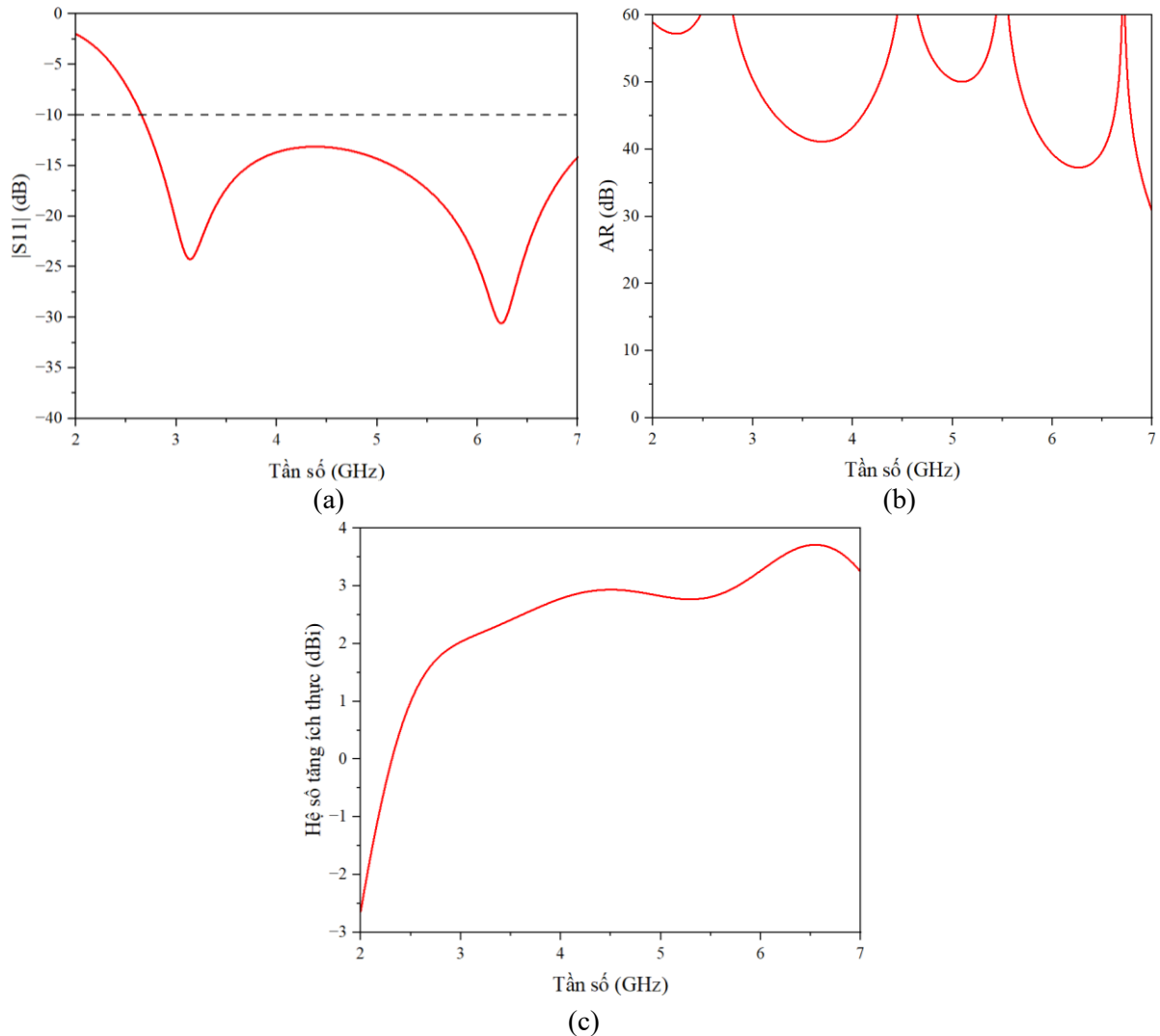
Hình 2.4. Cấu trúc hình học của anten #1, (a) Hình chiếu bằng, (b) Hình chiếu cạnh

Trong thiết kế đầu tiên được minh họa ở Hình 2.4, anten có cấu trúc dạng anten đơn cực vi dải với phần tử bức xạ hình tròn được đặt ở mặt trên đế điện môi, trong khi mặt phẳng đất ở mặt dưới chỉ kéo dài đến hết phần đường truyền vi dải, thay vì phủ kín toàn bộ đế điện môi như trong các anten vi dải truyền thống. Điều này tạo ra một sự khác biệt quan trọng trong cơ chế bức xạ. Nếu như anten vi dải truyền thống thường được xem như một hộp cộng hưởng kín nhờ mặt phẳng đất lớn giúp định hướng và kiểm soát bức xạ, thì anten đơn cực vi dải lại có cách hoạt động tương tự như một anten đơn cực được trải phẳng trên lớp nền, làm thay đổi đáng kể trường điện từ phân bố xung quanh.

Cơ chế bức xạ của anten này dựa vào việc kích thích đồng thời nhiều chế độ dao động bậc cao trong phần tử bức xạ. Bằng cách tối ưu hóa hình dạng phần tử bức xạ và mặt đất, trở kháng đầu vào của anten có thể được điều chỉnh để duy trì giá trị phù hợp trong toàn bộ dải tần, từ đó đạt được băng thông rộng.

Kết quả mô phỏng của anten #1 được trình bày ở hình 2.5:

- Băng thông trở kháng rộng với  $|S_{11}| < -10$  dB trên dải tần từ 2,65 GHz đến hơn 7 GHz. Anten cộng hưởng ở hai tần số 3,14 GHz và 6,24 GHz. Giá trị  $|S_{11}|$  xác định được ở 2 tần số này lần lượt là  $-24,25$  dB và  $-30,6$  dB.
- Tỷ số trực cao trên 40 dB trong toàn dải tần số. Cho thấy anten hoạt động phân cực tuyến tính.
- Hệ số tăng ích thực trong vùng băng thông trở kháng đạt cực đại tại 6,56 GHz với giá trị là 3,71 dBi. Hệ số tăng ích tại 2,45 GHz và 5,5 GHz lần lượt là 0,77 dBi và 2,81 dBi.

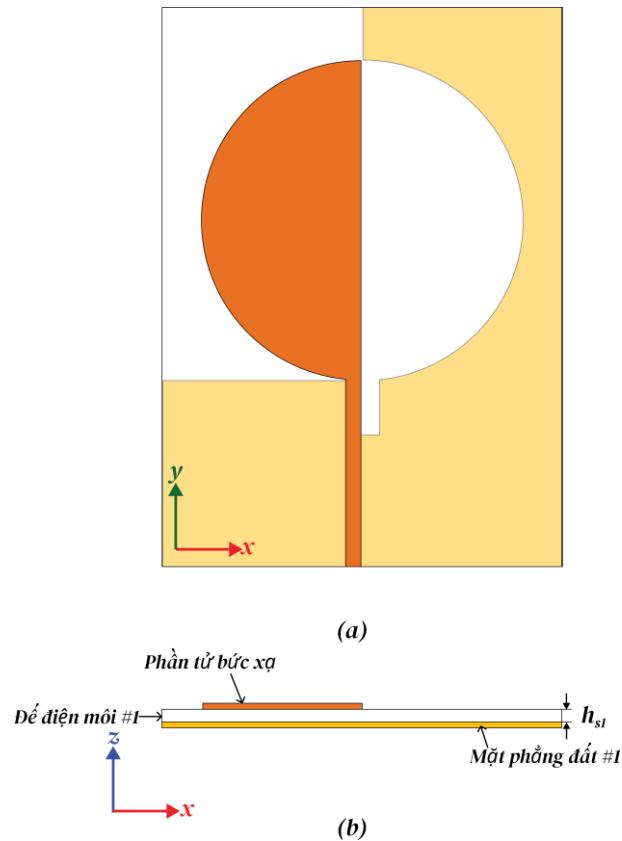


Hình 2.5. Kết quả mô phỏng của anten #1, (a) Hệ số phản xạ  $S_{11}$ , (b) Tỷ lệ trực AR, (c) Hệ số tăng ích thực

#### (b) Anten #2

Hình 2.6 mô tả cấu trúc của anten thứ hai, phần tử bức xạ được cắt đôi tạo thành hình bán nguyệt nằm ở mặt trên đế điện môi, trong khi mặt phẳng đất phía dưới được tạo khuyết một khe hở bán nguyệt tương ứng. Cả hai phần này có bán kính bằng nhau  $R$ , tạo thành một hình tròn hoàn chỉnh về mặt hình học khi kết hợp. Cấu trúc này được xây

dựng dựa trên nguyên lý của anten tự bù – trong đó hình dạng của phần tử dẫn điện và phần tử không dẫn điện là đối xứng bổ sung lẫn nhau.



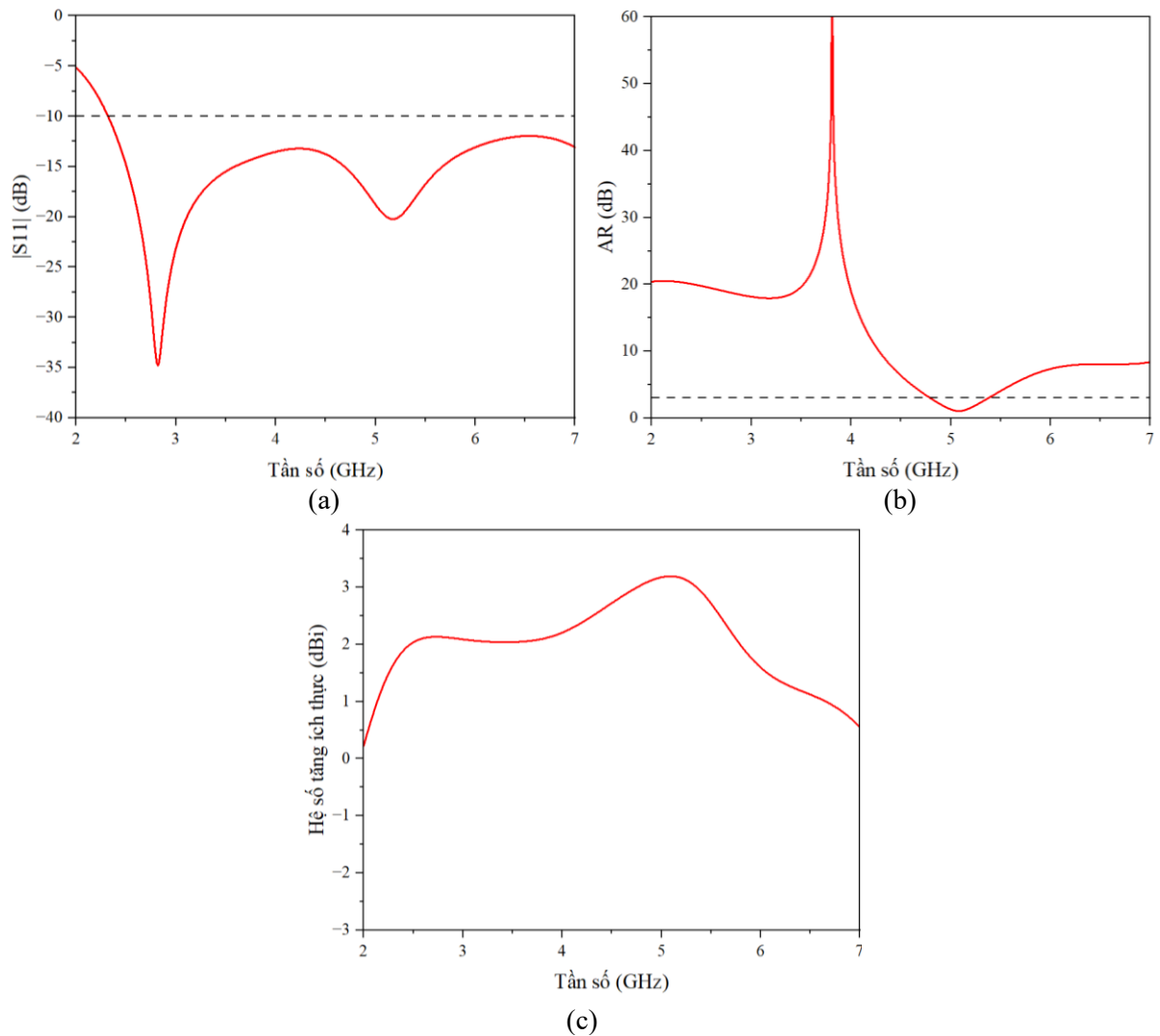
Hình 2.6. Cấu trúc hình học của anten #2, (a) Hình chiếu bằng, (b) Hình chiếu cạnh

Theo lý thuyết trình bày trong Chương 1, anten tự bù lý tưởng trong môi trường đồng nhất sẽ có trở kháng đầu vào không phụ thuộc vào tần số, giúp cải thiện khả năng khớp trở và giảm hệ số phản xạ trên một dải tần rộng. Mặc dù thiết kế không đạt được đối xứng lý tưởng hoàn toàn, nhưng vẫn đủ để tạo ra đặc tính xấp xỉ tự bù, từ đó khai thác hiệu quả đặc điểm băng rộng vốn có của cấu trúc. Nhờ đó, anten có thể hoạt động ổn định trong nhiều băng tần khác nhau, bao gồm cả hai băng tần WIFI phổ biến là 2.45 GHz và 5,5 GHz.

Để tăng cường khả năng phối hợp trở kháng giữa anten và đường truyền, một khe chữ nhật nhỏ được cắt tại mặt phẳng đất, ngay bên dưới điểm nối giữa đường truyền vi dải và phần tử bức xạ. Khe này đóng vai trò như một phần tử điều chỉnh cộng hưởng, có tác dụng thay đổi phân bố dòng điện và điện trường tại vùng tiếp xúc. Nhờ đó, trở kháng đầu vào của anten được điều chỉnh hiệu quả hơn, giảm thiểu sự không khớp trở kháng giữa anten và đường truyền.

Ngoài ra, việc cắt đôi phần tử bức xạ thành hình bán nguyệt cũng góp phần tạo ra phân cực tròn cho anten ở băng tần trên. Khi anten được kích thích, dòng điện không phân bố đối xứng trên tấm bán nguyệt, dẫn đến việc hình thành hai thành phần điện trường trực giao nhau với độ lệch pha xấp xỉ 90 độ. Khi hai thành phần này dao động

lệch pha như vậy, chúng kết hợp để tạo ra một vector điện trường quay đều trong mặt phẳng vuông góc với hướng lan truyền.

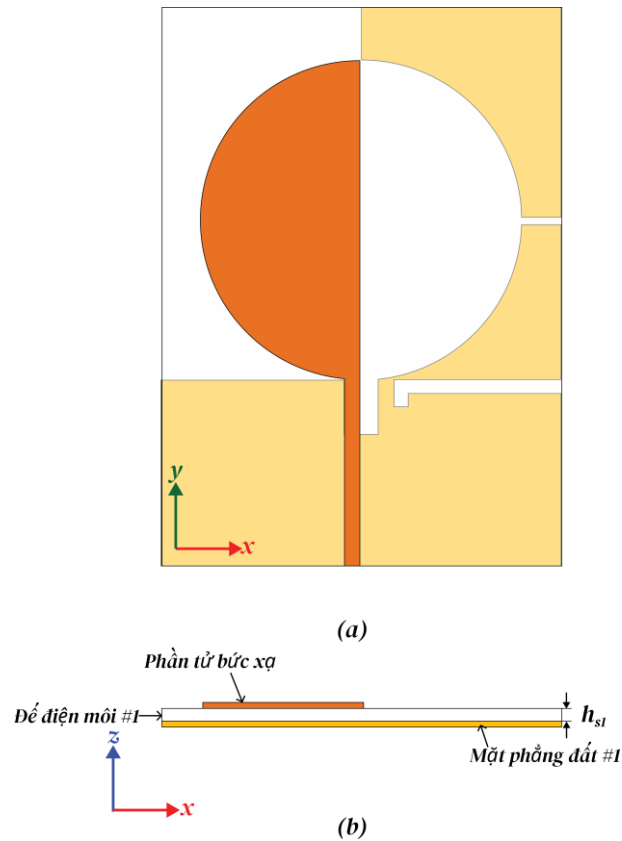


Hình 2.7 Kết quả mô phỏng của anten #2. (a) Hệ số phản xạ  $S_{11}$ , (b) Tỷ lệ trục AR, (c) Hệ số tăng ích thực

Kết quả mô phỏng của anten #2 được trình bày ở Hình 2.7:

- Băng thông trở kháng rộng với  $|S_{11}| < -10$  dB trên dải tần từ 2,32 GHz đến hơn 7 GHz. Anten cộng hưởng ở hai tần số 2,82 GHz và 5,17 GHz. Giá trị  $|S_{11}|$  xác định được ở 2 tần số này lần lượt là -34,78 dB và -20,23 dB.
- Xuất hiện phân cực tròn ở dải tần số cao với  $AR < 3$  dB trong khoảng từ 4,71 GHz đến 5,48 GHz. Ở dải tần số thấp vẫn là phân cực tuyến tính với giá trị AR dao động quanh mức 20dB.
- Hệ số tăng ích thực cực đại trong vùng băng thông  $AR < 3$  dB (4,71 GHz – 5,48 GHz) đạt được là 3,19 dBi tại tần số 5,1 GHz. Hệ số tăng ích tại 2,45 GHz và 5,5 GHz lần lượt là 1,98 dBi và 2,72 dBi.

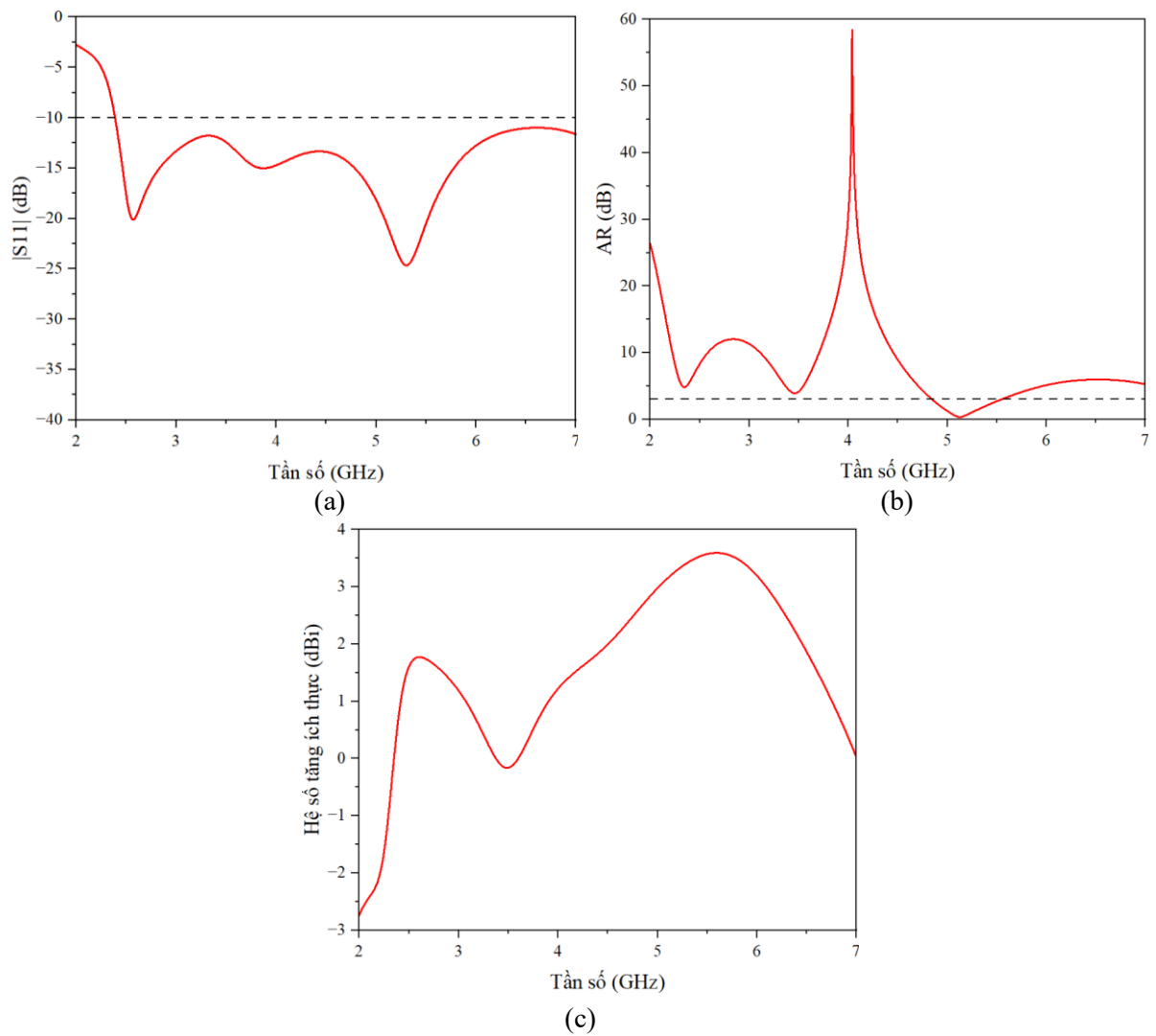
(c) Anten #3



Hình 2.8. Cấu trúc hình học của anten #3 (a) Hình chiều bằng, (b) Hình chiều cạnh

Hình 2.8 mô tả cấu trúc của anten thứ ba, để tạo thêm phân cực tròn cho anten tại băng tần dưới 2,45 GHz, mặt phẳng đất được bổ sung một khe chữ L và một khe chữ nhật. Khe chữ L được bố trí lệch về bên có khe hình bán nguyệt, gần điểm nối giữa đường truyền vi dải và phần tử bức xạ, hoạt động như một phần tử cộng hưởng bổ xung. Khi anten hoạt động ở tần số thấp, dòng điện cảm ứng trong khe này sinh ra một thành phần điện trường phụ có hướng lệch pha so với trường chính trên phần tử bức xạ. Đồng thời, khe hình chữ nhật cắt vào mặt phẳng đất làm thay đổi chiều dài đường truyền dòng cảm ứng trên mép khe, từ đó gây trễ pha cho dòng điện. Sự kết hợp của hai khe này làm thay đổi phân bố điện trường theo hai phương trục giao Ox và Oy, dẫn đến sự hình thành của hai thành phần trường điện lệch pha xấp xỉ  $90^\circ$ , từ đó hình thành phân cực tròn ở băng tần 2.45 GHz. Mặc dù vậy, anten vẫn chưa đạt được điều kiện phân cực tròn lý tưởng ( $AR < 3$  dB) tại băng tần 2,45 GHz. Cụ thể, tỉ số trục trong vùng tần số này vẫn dao động quanh ngưỡng lớn hơn 5 dB, cho thấy sự không hoàn hảo trong việc tạo ra hai thành phần điện trường trục giao và lệch pha chính xác  $90^\circ$ . Điều này có thể xuất phát từ việc sự cộng hưởng giữa các khe chưa đủ mạnh hoặc chưa được điều chỉnh tối ưu về vị trí và kích thước để tạo ra hiệu ứng trễ pha cần thiết.





Hình 2.9. Kết quả mô phỏng của anten #3. (a) Hệ số phản xạ  $S_{11}$ , (b) Tỷ lệ trực AR, (c) Hệ số tăng ích thực

Hình 2.9 minh họa kết quả mô phỏng của anten 3:

- Băng thông trở kháng rộng với  $|S_{11}| < -10$  dB trên dải tần từ 2,39 GHz đến hơn 7 GHz. Anten cộng hưởng ở ba tần số 2,57 GHz, 3,86 GHz và 5,3 GHz. Giá trị  $|S_{11}|$  xác định được ở 3 tần số này lần lượt là -20,11 dB, -15,01 dB, và -24,64 dB.
- Về tỉ số trực, ở dải tần số cao, băng thông  $AR < 3$  dB trong khoảng từ 4,85 GHz đến 5,55 GHz. Ở dải tần số thấp xuất hiện hai cực tiểu AR tại 2,34 GHz và 3,46 GHz với giá trị là 4,83 dB và 3,91 dB. Tuy nhiên cả hai vẫn chưa đạt ngưỡng phân cực tròn ( $AR < 3$  dB).
- Hệ số tăng ích thực cực đại trong vùng băng thông  $AR < 3$  dB (4,85 GHz – 5,55 GHz) là 3,59 dBi tại tần số 5,6 GHz. Hệ số tăng ích tại 2,45 GHz và 5,5 GHz lần lượt là 1,31 dBi và 3,57 dBi.

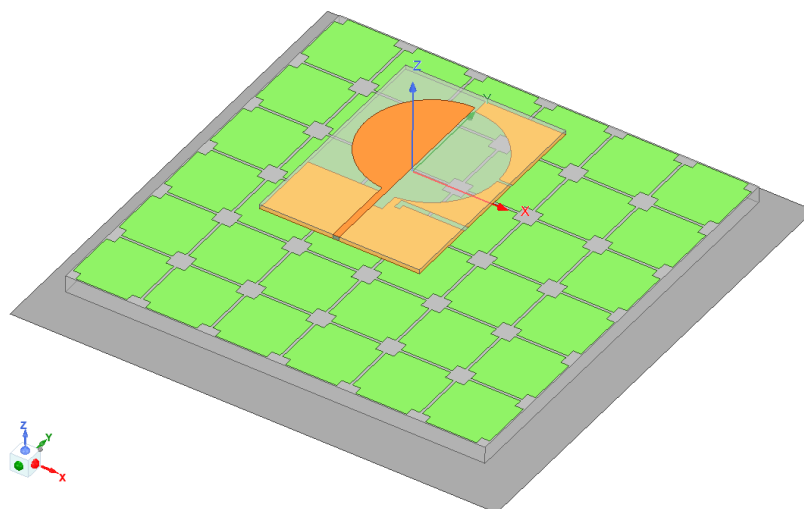
Quá trình thiết kế Anten vi dải tự bù cho thấy hiệu quả rõ rệt của nguyên lý tự bù trong việc mở rộng băng thông trở kháng. Việc tận dụng tính đối xứng hình học giữa phần tử dẫn điện và không dẫn điện đã giúp duy trì trở kháng đầu vào ổn định trong một dải tần rộng, tạo tiền đề cho khả năng hoạt động đa băng tần.

Trong quá trình phát triển, các kỹ thuật cải tiến như thêm các khe tại mặt đất, điều chỉnh hình dạng phần tử bức xạ và kết hợp các yếu tố bất đối xứng đã được khai thác để hướng đến mục tiêu tạo phân cực tròn. Đặc biệt, việc can thiệp vào phân bố dòng và trường điện thông qua các khe cộng hưởng cho thấy có thể tạo được phân cực tròn ở băng tần thấp mặc dù tỉ lệ trực AR vẫn còn hạn chế.

### 2.2.2 Anten vi dải tự bù sử dụng bề mặt dẫn từ nhân tạo AMC

Để tăng hệ số tăng ích của anten vi dải tự bù, đồng thời cải thiện các tham số đặc trưng khác như hệ số phản xạ  $S_{11}$  và tỷ số trực AR, một bề mặt dẫn từ nhân tạo AMC đã được thêm vào phía dưới của anten vi dải tự bù. Cấu trúc 3D của anten đề xuất sau khi bổ sung bề mặt AMC được thể hiện trong Hình 2.10.

Cấu trúc mặt bức xạ của phần tử AMC có dạng hình vuông, được cắt thêm bốn khe hình vuông tại bốn góc. Các khe này đóng vai trò điều chỉnh dòng điện bề mặt, từ đó giúp cải thiện thêm hiệu quả tạo phân cực tròn cho anten.

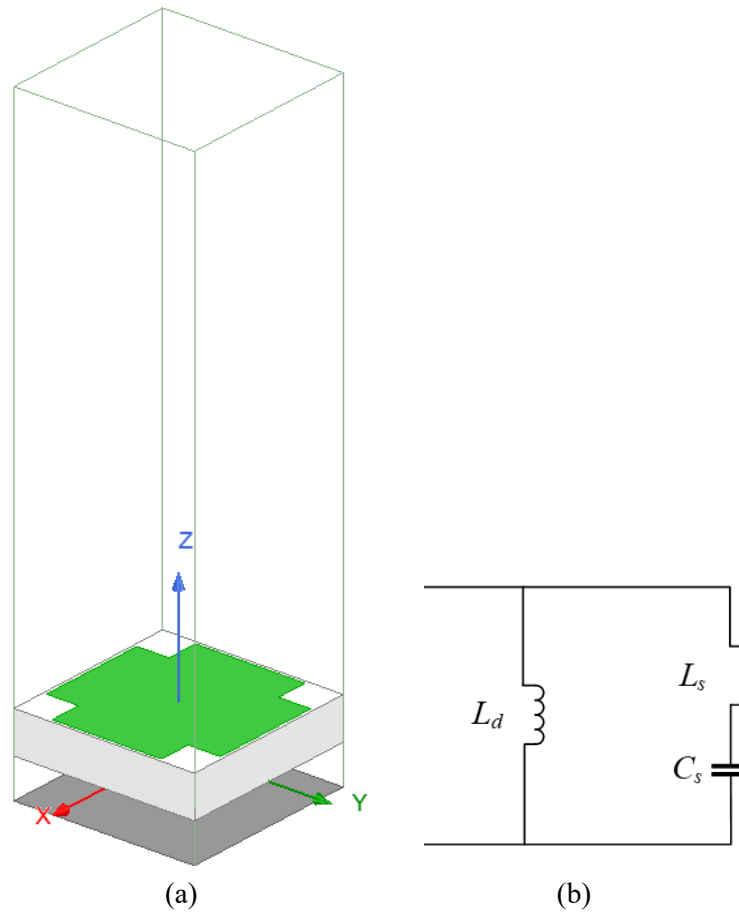


Hình 2.10. Cấu trúc 3D của anten đề xuất

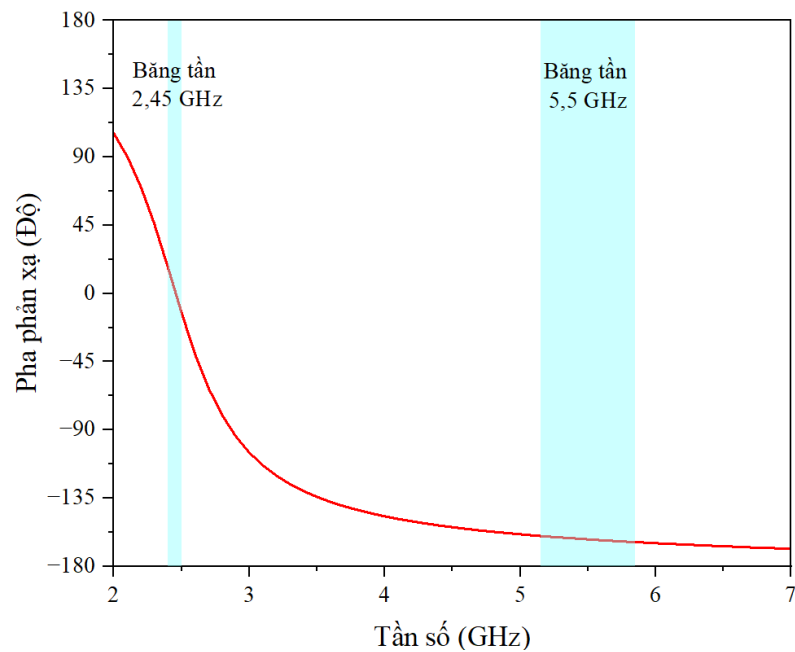
Hình 2.11 minh họa cấu trúc hình học của phần tử AMC. Mô hình được xây dựng thông qua mô phỏng các tham số tán xạ của một ô đơn vị, với điều kiện biên tuần hoàn áp dụng theo hai hướng x và y, và một cổng Floquet đặt ở phía trên (hướng +z). Cách mô phỏng này tương đương với việc xét ô đơn vị trong một mảng vô hạn, giúp xác định đặc tính phản xạ của cấu trúc một cách chính xác. Đồng thời, mô hình mạch tương đương của phần tử AMC cũng được thể minh họa.

Trong cấu trúc này, khoảng cách giữa các miếng kim loại liền kề tạo ra một tụ điện ( $C_s$ ) và miếng kim loại hình vuông cung cấp một cuộn cảm ( $L_s$ ) và hai mặt dẫn từ hoàn

hảo (PMC) được sử dụng cho mô phỏng thiết kế. Ngoài ra, đường truyền tải điện môi ngắn mạch có thể tương đương với cuộn cảm ( $L_d$ ). Tần số cộng hưởng  $f_R$  của AMC có thể được tính qua công thức được đề cập ở Chương 1.



Hình 2.11. (a) Cấu trúc của một phần tử AMC, (b) Mạch LC tương đương



Hình 2.12. Kết quả mô phỏng pha phản xạ của phần tử đơn AMC

Kết quả mô phỏng pha phản xạ của phần tử đơn AMC, được thể hiện trong Hình 2.12 cho thấy phần tử này đạt pha phản xạ gần bằng  $0^\circ$  trong khoảng tần số từ 2,4 GHz đến 2,5 GHz. Điều này cho thấy AMC hoạt động hiệu quả như một mặt phản xạ trong pha tại băng tần 2,45 GHz. Trong khi đó, ở băng 5,5 GHz (từ 5,15 GHz đến 5,85 GHz), pha phản xạ của phần tử AMC nằm trong khoảng từ  $-160^\circ$  đến  $-164^\circ$ , thể hiện đặc tính phản xạ tương đương với một mặt phản xạ điện hoàn hảo (PEC) có khả năng phản xạ sóng mạnh nhưng với pha đảo ngược.

Có thể thấy, phần tử AMC được thiết kế nhằm tối ưu hóa hiệu năng của anten trong cả hai băng tần 2,45 GHz và 5,5 GHz. Để khai thác hiệu quả các đặc tính phản xạ này, một mảng  $6 \times 6$  phần tử AMC được sử dụng làm lớp phản xạ phía sau anten. Với đặc tính thiết kế như vậy, bề mặt AMC sẽ được đặt cách anten một khoảng  $h_1 \approx \lambda_{5,5\text{GHz}}/4$ . Ở băng tần 5,5 GHz, mặt phản xạ AMC có đặc tính đảo pha giống như mặt PEC, do đó việc đặt khoảng cách  $\lambda/4$  sẽ khiến sóng phản xạ quay trở lại anten với pha cùng chiều, nhờ đó tăng cường bức xạ. Đồng thời, tại băng 2,45 GHz, khoảng cách khoảng cách này tương ứng khoảng  $0,11\lambda_{2,45\text{GHz}}$ . Khoảng cách này nhỏ hơn nhiều so với bước sóng tại tần số đó nhờ vậy mà kích thước tổng thể của anten theo chiều cao không quá lớn.

Cuối cùng, để đảm bảo hoạt động ổn định cho toàn mảng phản xạ, mặt phẳng đất thứ hai được thiết kế với kích thước lớn hơn để điện môi #2 chứa mảng phần tử AMC và đặt cách bởi một lớp không khí độ dày  $h_2$ . Thiết kế này không chỉ giúp tăng cường đặc tính phản xạ của AMC mà còn hạn chế hiệu ứng biên, giúp các phần tử ở mép mảng duy trì đặc tính điện từ tương đương với phần tử ở trung tâm. Nhờ đó, pha phản xạ trên toàn bộ bề mặt AMC trở nên đồng đều hơn, nâng cao hệ số tăng ích và cải thiện hiệu năng tổng thể của anten.

## 2.3 Kết quả mô phỏng

Hình 2.13 minh họa kết quả mô phỏng hệ số phản xạ  $|S_{11}|$  của anten đề xuất:

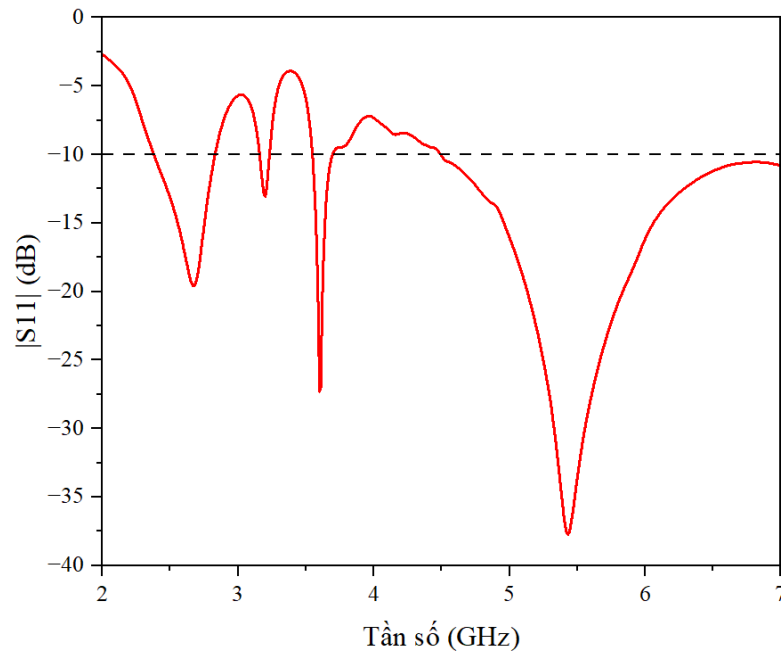
- Ở dải tần thấp, băng thông trở kháng đo được cho  $|S_{11}| < -10$  dB từ 2,38 GHz tới 2,86 GHz. Trong dải tần 2,45 GHz (2,4 – 2,5 GHz), giá trị  $|S_{11}|$  dao động từ  $-10,51$  dB đến  $-12,74$  dB.
- Đối với băng tần trên, băng thông trở kháng đo được cho  $|S_{11}| < -10$  dB đạt từ 4,49 GHz đến hơn 7 GHz. Trong dải tần 5,5 GHz (5,15 – 5,85 GHz), giá trị  $|S_{11}| < -19,61$  dB trên toàn dải.

Hình 2.14 biểu diễn kết quả mô phỏng tỷ số trực AR < 3 dB của anten đề xuất:

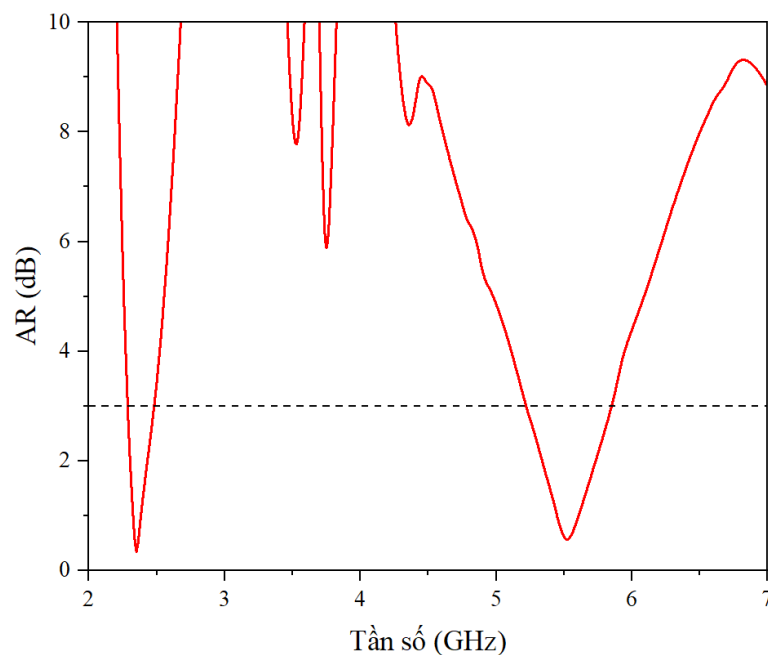
- Ở dải tần số thấp, băng thông AR < 3 dB đạt 7,97% (2,29 GHz – 2,48 GHz). Băng thông này gần như bao phủ toàn bộ băng tần 2,45 GHz.
- Đối với dải tần số cao, băng thông AR < 3 dB đạt 11,38% (5,22 – 5,85 GHz). Kết quả này cho thấy anten duy trì phân cực tròn ổn định trên gần như toàn bộ băng tần 5,5 GHz.

Hệ số tăng ích thực của Anten đề xuất theo hướng vuông góc với mặt phẳng Anten được thể hiện trong Hình 2.15:

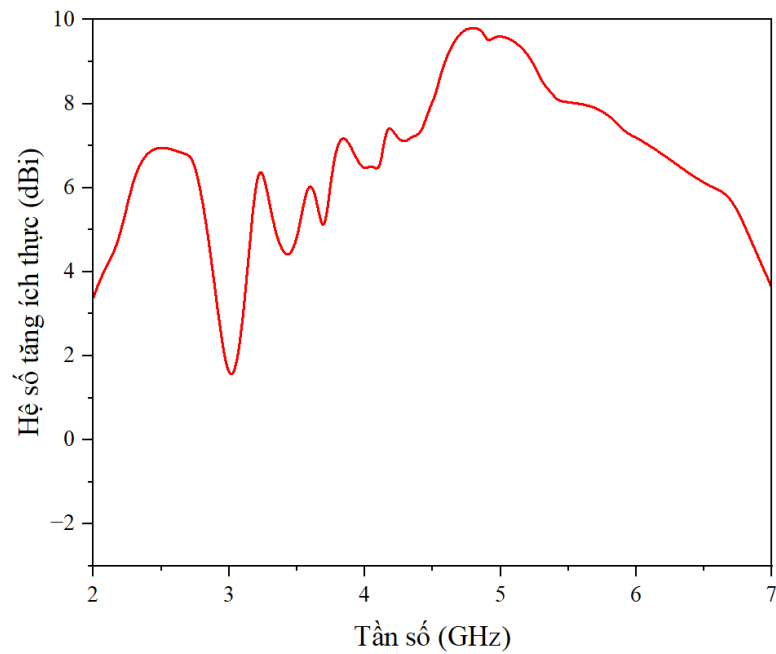
- Ở băng tần 2,45 GHz (2,4 – 2,5 GHz), hệ số tăng ích thực trong khoảng từ 6,8 dBi đến 6,95 dBi. Hệ số tăng ích thực ở tần số 2,45 GHz xác định được là 6,91 dBi.
- Ở băng tần 5,5 GHz (5,15 – 5,85 GHz), hệ số tăng ích thực trong khoảng từ 7,56 dBi đến 9,34 dBi hệ số tăng ích thực ở tần số 5,5 GHz xác định được là 8,03 dBi.



Hình 2.13. Kết quả mô phỏng hệ số phản xạ S11 của Anten đề xuất

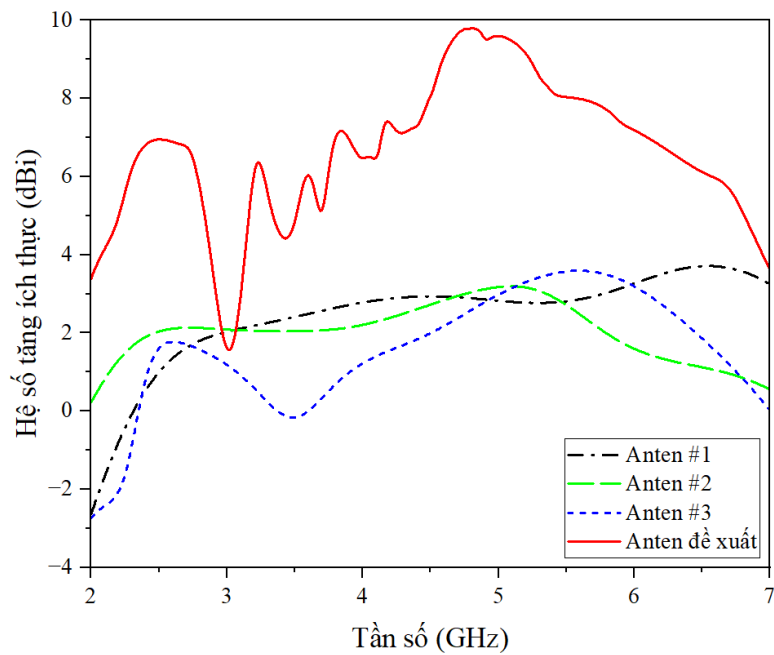


Hình 2.14. Kết quả mô phỏng tỷ số trực AR của Anten đề xuất



Hình 2.15. Kết quả mô phỏng hệ số tăng ích thực của Anten đề xuất

Để đánh giá vai trò của bề mặt dẫn từ nhân tạo AMC trong việc cải thiện hệ số tăng ích của anten, Hình 2.16 minh họa kết quả mô phỏng hệ số tăng ích thực theo tần số của các anten #1, #2, #3 và anten đề xuất. Các anten #1, #2, #3 không có bề mặt AMC, trong khi anten đề xuất được tích hợp mảng AMC  $6 \times 6$  vào phía sau.

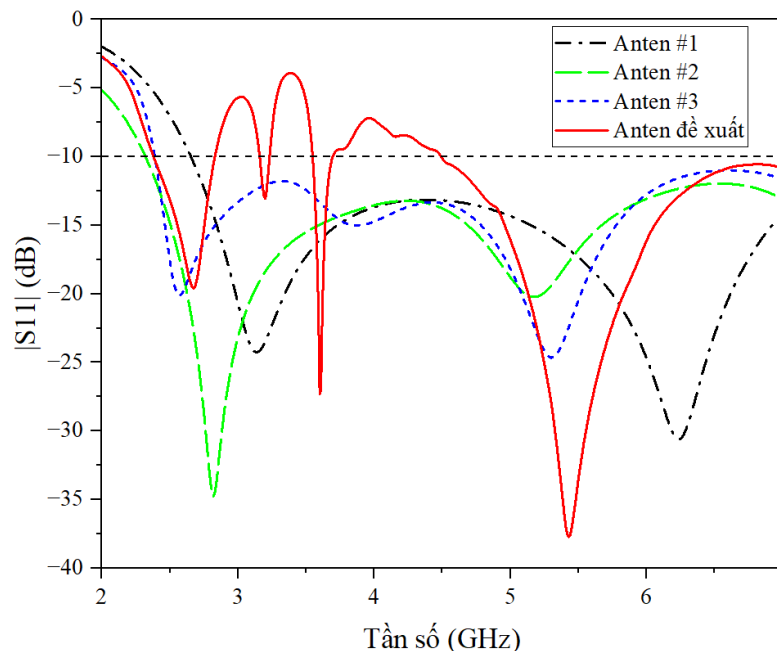


Hình 2.16. Kết quả mô phỏng hệ số tăng ích thực của các anten #1, #2, #3 và anten đề xuất

Kết quả cho thấy rõ ràng rằng việc sử dụng AMC giúp tăng đáng kể hệ số tăng ích anten trong cả hai băng tần WIFI mục tiêu:

- Ở băng tần 2,45 GHz (2,4 GHz – 2,5 GHz):

- Khi không có AMC, hệ số tăng ích thực của Anten #1,2,3 ở tần số 2,45 GHz lần lượt là 0,77 dBi, 1,98 dBi và 1,31 dBi.
- Khi có AMC, hệ số tăng ích thực của Anten đề xuất ở tần số 2,45 GHz là 6,92 dBi.
- Hệ số tăng ích thực tại tần số 2,45 GHz tăng hơn 5 dBi khi sử dụng bề mặt AMC.
- Ở băng tần 5,5 GHz (5,15 GHz – 5,85 GHz):
  - Khi không có AMC, hệ số tăng ích thực của Anten #1,2,3 ở tần số 5,5 GHz lần lượt là 1,81 dBi, 2,72 dBi và 3,57 dBi.
  - Khi có AMC, hệ số tăng ích thực của Anten đề xuất ở tần số 5,5 GHz là 8,03 dBi
  - Hệ số tăng ích thực tại tần số 5,5 GHz tăng khoảng 4,5 dBic khi sử dụng bề mặt AMC.



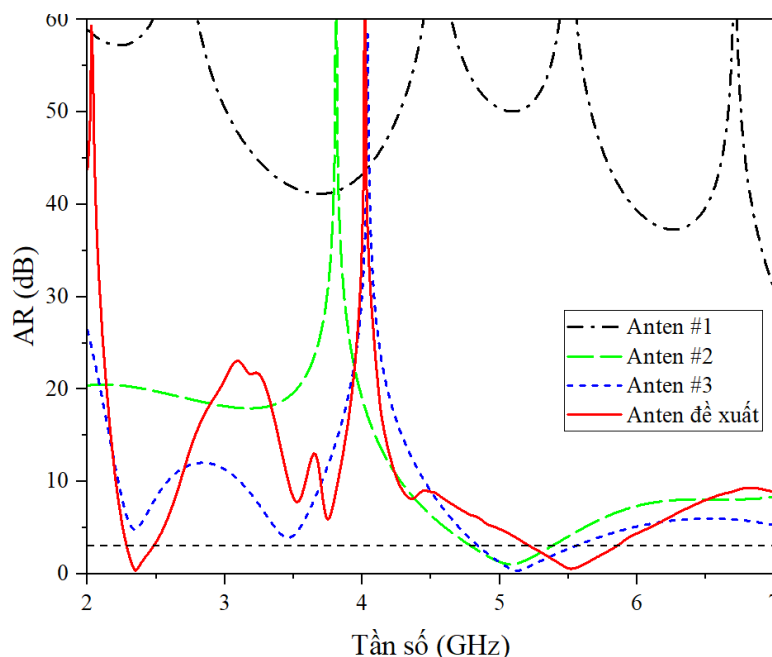
Hình 2.17. Kết quả mô phỏng hệ số phản xạ  $S_{11}$  của các Anten #1, #2, #3 và Anten đề xuất

Quan sát kết quả mô phỏng hệ số phản xạ  $|S_{11}|$  ở Hình 2.17 có thể thấy rằng, đối với các Anten #1, #2 và #3 (không sử dụng bề mặt AMC), băng thông hệ số phản xạ của các Anten này rất rộng bao phủ hoàn toàn hai băng tần 2,45 GHz và 5,5 GHz. Tuy nhiên, khi tích hợp bề mặt dẫn từ nhân tạo AMC vào phía sau Anten, hệ số phản xạ bị thay đổi rõ rệt. Băng thông  $|S_{11}| < -10$  dB không còn liên tục mà bị tách thành các dải tần riêng biệt, trong đó có hai dải bao phủ trọn vẹn băng 2,45 GHz và băng 5,5 GHz là dải tần từ 2,38 – 2,83 GHz và dải tần từ 4,49 GHz đến trên 7GHz.

Nguyên nhân của hiện tượng này bắt nguồn từ đặc tính phản xạ chọn lọc theo tần số của mặt AMC. Với khả năng điều chỉnh pha phản xạ, bề mặt AMC chỉ hỗ trợ phản xạ tăng cường tại những tần số cộng hưởng, cụ thể là gần 2,45 GHz (với pha phản xạ gần

0°, như mặt phản xạ PMC) và 5,5 GHz ( tại đây bề mặt AMC tương đương mặt PEC kết hợp khoảng cách  $\lambda/4$ ). Tại những tần số này, sóng phản xạ từ AMC trở lại Anten có pha cùng chiều với sóng phát xạ, tạo ra hiện tượng giao thoa tăng cường, làm tăng trở kháng đầu vào và cải thiện đáng kể hệ số tăng ích. Ngược lại, tại các tần số nằm giữa hai cộng hưởng này, đặc tính pha của AMC không còn đồng bộ với sóng Anten, gây ra hiện tượng triệt tiêu một phần và làm suy giảm khả năng khớp trở, dẫn đến hiệu ứng chia tách băng.

Tóm lại, việc tích hợp bề mặt AMC đã làm thay đổi cấu trúc cộng hưởng của Anten, từ dạng băng rộng ban đầu thành Anten băng kép, hoạt động hiệu quả trong hai băng tần mong muốn là 2,45 GHz và 5,5 GHz.



Hình 2.18. Kết quả mô phỏng tỷ số trực AR của các Anten #1, #2, #3 và Anten đề xuất

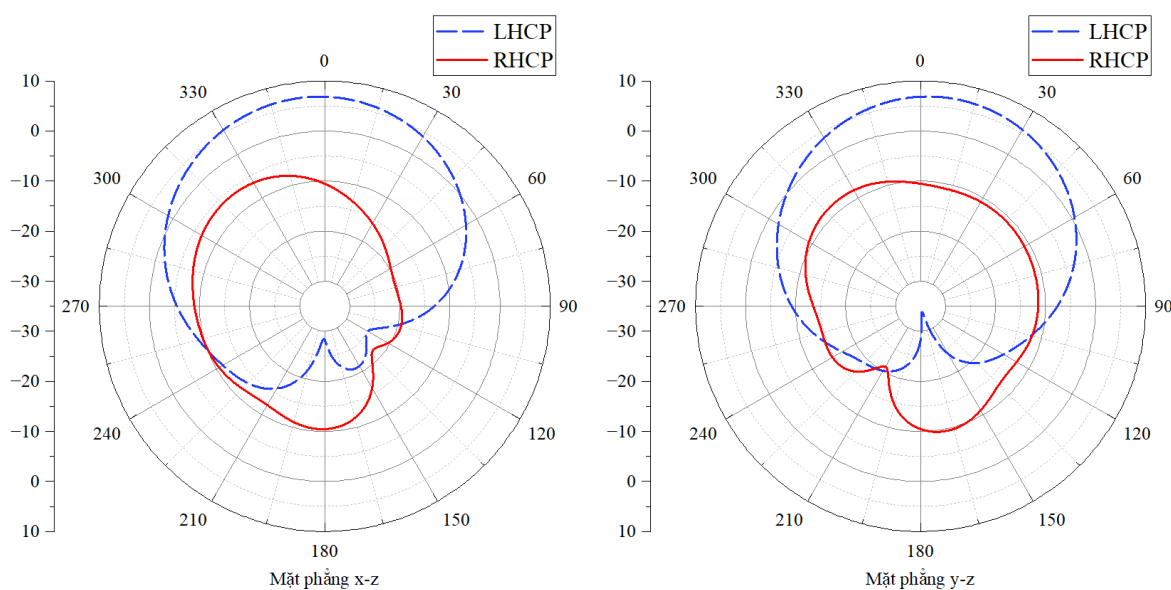
Ngoài ra, nhờ cấu trúc AMC có mặt bức xạ hình vuông được cắt thêm 4 khe ở góc, tỉ số trực AR của Anten cũng được cải thiện đáng kể. Hình 2.18 là kết quả mô phỏng tỉ số trực của Anten #1, #2, #3 và Anten đề xuất. Trước khi thêm AMC, Anten #3 chỉ đạt điều kiện phân cực tròn tại băng tần trên với băng thông  $AR < 3$  dB (4,85 – 5,55 GHz), và hoàn toàn không đạt phân cực tròn tại băng tần dưới. Sau khi có AMC, Anten đề xuất xuất hiện hai vùng phân cực tròn rõ rệt ở băng tần 2,45 GHz, với băng thông  $AR < 3$  dB (2,29 GHz – 2,48 GHz) và ở băng tần 5,5 GHz, với băng thông  $AR < 3$  dB (5,22 GHz – 5,85 GHz). Điều này cho thấy AMC đã giúp ổn định phân cực tròn ở băng tần 2,45 GHz, đồng thời điều chỉnh lại phân cực tròn ở băng 5,5 GHz sao cho trùng khớp với dải WIFI mong muốn.

Hình 2.19 trình bày đồ thị bức xạ của Anten đề xuất tại tần số 2,45 GHz trong hai mặt phẳng cắt chính: mặt phẳng x-z và mặt phẳng y-z. Dễ dàng nhận thấy trong cả hai mặt phẳng, biên độ bức xạ của thành phần LHCP luôn vượt trội so với RHCP, cho thấy Anten phát xạ ưu thế với phân cực tròn trái tại tần số 2,45 GHz. Kết quả này khẳng định tính



hiệu quả của cấu trúc anten trong việc tạo ra phân cực tròn tại băng tần 2,45 GHz. Đặc biệt, độ cách ly giữa hai phân cực tại hướng chính vượt quá 17 dB, phản ánh khả năng khử phân cực chéo hiệu quả và mức độ thuần phân cực cao. Đây là một lợi thế quan trọng đối với các hệ thống truyền thông không dây trong môi trường nhiễu xạ và thay đổi phân cực, giúp nâng cao độ ổn định và độ tin cậy của kênh truyền.

Hình dạng đồ thị bức xạ trong hai mặt phẳng x-z và y-z thể hiện rõ đặc tính bức xạ định hướng. Anten cho thấy đặc tính búp sóng rộng và cân đối, đảm bảo hiệu quả phủ sóng tốt trong không gian ba chiều. Tại tần số 2,45 GHz, độ rộng búp sóng nửa công suất (HPBW) đạt  $76^\circ$  trong mặt phẳng xz và  $74^\circ$  trong mặt phẳng yz.



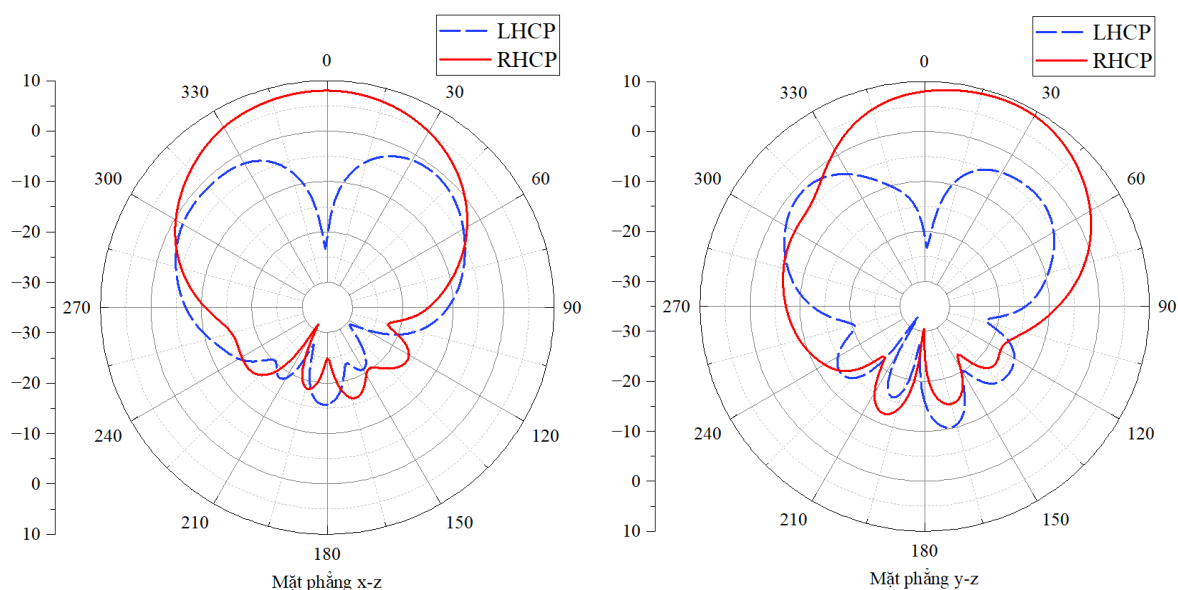
Hình 2.19. Đồ thị bức xạ của anten đề xuất tại tần số 2,45 GHz

Hình 2.20 thể hiện đồ thị bức xạ của anten đề xuất tại tần số 5,5 GHz trong hai mặt phẳng x-z và y-z. Đường nét liền màu đỏ biểu diễn biên độ thành phần phân cực tròn phải (RHCP), trong khi đường nét đứt màu xanh dương tương ứng với phân cực tròn trái (LHCP). Có thể quan sát rõ ràng trong cả hai mặt phẳng, RHCP chiếm ưu thế rõ rệt tại hướng chính, khẳng định anten bức xạ chủ yếu với phân cực tròn phải tại tần số này. So sánh giữa hai thành phần phân cực cho thấy độ suy giảm của LHCP lớn hơn 31dB tại hướng bức xạ cực đại, phản ánh mức độ cách ly phân cực cao.

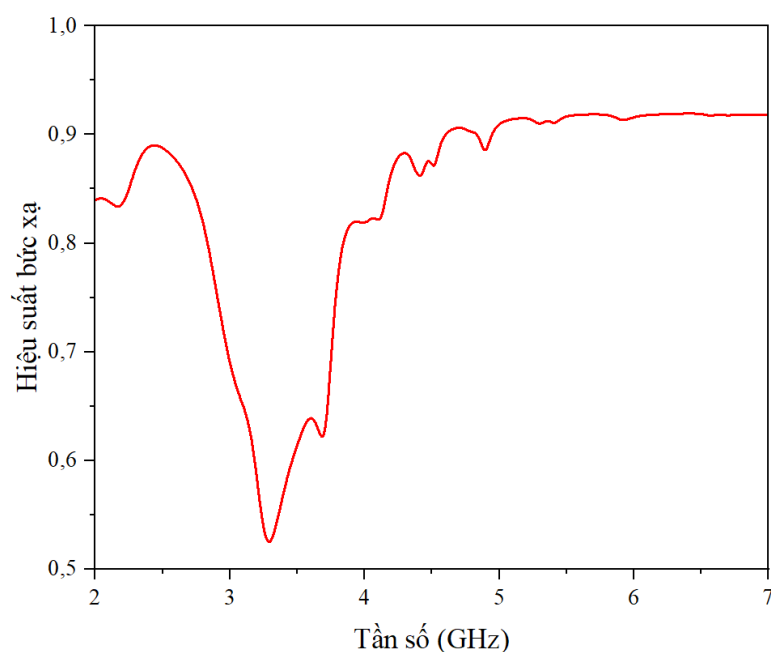
Hình dạng búp sóng trong cả hai mặt phẳng đều cho thấy sự tập trung năng lượng rõ rệt theo phương hướng trước, cùng với cấu trúc lan tỏa cân đối, cho thấy anten không chỉ duy trì phân cực tròn ổn định mà còn đảm bảo vùng phủ tốt. Độ rộng búp sóng nửa công suất (HPBW) đạt giá trị lần lượt là  $68^\circ$  trong mặt phẳng x-z và  $71^\circ$  trong mặt phẳng y-z, minh chứng cho khả năng phát xạ hiệu quả trong vùng không gian rộng.

Nhìn chung, kết quả bức xạ tại 2,45 GHz và 5,5 GHz xác nhận hiệu quả hoạt động của anten đề xuất trong cả hai băng tần WIFI là 2,45 GHz và 5,5 GHz, với khả năng duy

trì phân cực tròn đúng hướng, độ thuần phân cực cao và tính định hướng phù hợp cho các ứng dụng WIFI thế hệ mới.



Hình 2.20. Đồ thị bức xạ của anten đề xuất tại tần số 5,5 GHz

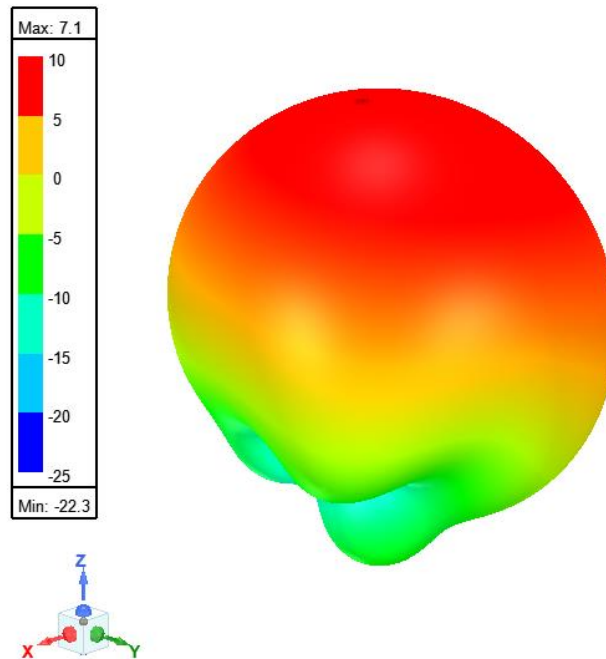


Hình 2.21. Kết quả mô phỏng hiệu suất bức xạ của anten đề xuất

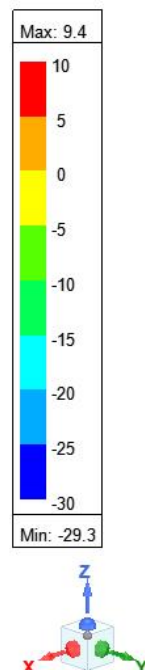
Hình 2.21 minh họa kết quả mô phỏng hiệu suất bức xạ của anten. Ở băng tần thấp, hiệu suất bức xạ đạt được 89%. Ở băng tần cao, hiệu suất bức xạ đạt được 92%

Hình 2.22 và Hình 2.23 minh họa kết quả mô phỏng 3D đồ thị bức xạ của anten tại hai tần số 2,45 GHz và 5,5 GHz. Có thể thấy rõ rằng anten duy trì đặc tính bức xạ định hướng rõ rệt ở cả hai dải tần, với năng lượng phát xạ chủ yếu tập trung theo phương vuông góc với mặt phẳng anten. Điều này phản ánh hiệu quả của lớp phản xạ AMC

trong việc triệt tiêu bức xạ ngược, nhờ khả năng phản xạ sóng với pha đồng bộ, từ đó tăng cường bức xạ về phía trước và cải thiện hệ số tăng ích của anten.



Hình 2.22. Đồ thị bức xạ 3D của anten đề xuất tại tần số 2,45 GHz



Hình 2.23. Đồ thị bức xạ 3D của anten đề xuất tại tần số 5,5 GHz

## 2.4 Kết luận chương

Chương 2 đã trình bày quá trình thiết kế và mô phỏng một anten vi dải băng tần kép kết hợp bề mặt dẫn từ nhân tạo AMC cho ứng dụng WIFI hoạt động tại hai băng tần 2,45 GHz (2,4 – 2,5 GHz) và 5,5 GHz (5,15 – 5,85 GHz).

Kết quả mô phỏng cho thấy anten có băng thông trở kháng với  $|S_{11}| < -10$  dB trong khoảng từ 2,38 GHz đến 2,86 GHz ở dải tần thấp và 4,5 GHz đến hơn 7 GHz ở dải tần số cao, đồng thời đảm bảo phân cực tròn với băng thông AR  $< 3$  dB tương ứng là 7,97% (2,28 – 2,47 GHz) và 11,38% (5,23 – 5,84 GHz). Hệ số tăng ích anten tại 2,45 GHz đạt 6,91 dBi và tại 5,5 GHz đạt 8,03 dBi. Ngoài ra, anten còn cho đồ thị bức xạ định hướng tốt và cân xứng trong cả hai mặt phẳng x-z và y-z với búp sóng rộng tại cả hai tần số 2,45 GHz và 5,5 GHz. Với hệ số tăng ích cao, phân cực tròn ổn định và băng thông hoạt động rộng trên cả hai băng tần WIFI, anten được đề xuất trong chương này hoàn toàn phù hợp cho các hệ thống truyền thông không dây hiện đại.

## KẾT LUẬN

Báo cáo đồ án đã trình bày quá trình nghiên cứu, thiết kế và mô phỏng Anten vi dải tự bù bằng tần kép tích hợp bề mặt dẫn từ nhân tạo AMC, hướng đến ứng dụng trong các hệ thống WIFI hoạt động ở hai dải tần 2,45 GHz và 5,5 GHz. Anten đề xuất đạt được bức xạ phân cực tròn bằng tần kép với băng thông rộng và hệ số tăng ích được cải thiện.

Báo cáo đã lần lượt trình bày tổng quan về công nghệ WIFI, lý thuyết cơ bản về Anten vi dải cũng như các phương pháp để cải thiện băng thông và hệ số tăng ích của Anten vi dải, trong đó có lý thuyết về cấu trúc tự bù và bề mặt dẫn từ nhân tạo AMC. Trên cơ sở đó, chương trình mô phỏng và tối ưu hóa Anten được tiến hành qua nhiều bước, với các thay đổi dần trong cấu trúc hình học nhằm đạt được đặc tính đề ra cho Anten.

Kết quả mô phỏng cho thấy Anten đạt băng thông trở kháng rộng với  $|S_{11}| < -10$  dB trong khoảng từ 2,38 GHz đến 2,86 GHz ở băng tần thấp và từ 4,5 GHz đến hơn 7 GHz ở băng tần cao. Băng thông AR < 3 dB tương ứng là 7,97% (2,28 – 2,47 GHz) và 11,38% (5,23 – 5,84 GHz) xác nhận đặc tính phân cực tròn kép. Hệ số tăng ích thực tại đỉnh của Anten đạt 6,91 dBi tại 2,45 GHz và 8,03 dBi tại 5,5 GHz. Ngoài ra, hiệu suất bức xạ ước tính vượt 89%, cùng với búp sóng định hướng rõ rệt và vùng phủ rộng.

Với những đặc tính trên, Anten đề xuất trong đề tài có tiềm năng ứng dụng cao trong các thiết bị thu phát WIFI thế hệ mới, đặc biệt trong môi trường truyền thông không dây phức tạp cần ổn định về phân cực và hiệu suất cao.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] C. A. Balanis, “Microstrip Antennas,” trong *Antenna Theory: Analysis and Design*, Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc, 2005, p. 811–875.
- [2] X. Quan, R. Li, Y. Cui và M. M. Tentzeris, “Analysis and Design of a Compact Dual-Band Directional Antenna,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, tập 11, pp. 547 - 550, 2012.
- [3] C. Jansri, C. Phongcharoenpanich và S. Lamultree, “Double-Fed Rectangular Microstrip Patch Antenna for WLAN Applications,” trong *International Electrical Engineering Congress* , Krabi, Thailand, 2018.
- [4] A. Ghaffar, X. J. Li và B.-C. Seet, “Compact Dual-Band Broadband Microstrip Antenna at 2.4 GHz and 5.2 GHz for WLAN Applications,” trong *IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation* , Auckland, New Zealand, 2018.
- [5] G. Kumar và K. P. Ray, *Broadband Microstrip Antennas*, Boston: Artech House, 2003.
- [6] G. Kumar và K. Gupta, “Nonradiating edges and four edges gap-coupled multiple resonator broad-band microstrip antennas,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, tập 33, pp. 173-178, 1985.
- [7] Parizi, Razavi và S. Ali, “Bandwidth Enhancement Techniques,” trong *Trends in Research on Microstrip Antennas*, 2017, pp. 3-34.
- [8] B. Vedaprabhu và K. J. Vinoy, “An integrated wideband multifunctional antenna using a microstrip patch with two U-slots,” trong *Progress In Electromagnetics Research B*, 2010.
- [9] H. Wang, X. B. Huang và D. G. Fang, “A Single Layer Wideband U-Slot Microstrip Patch,” *IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters*, tập 7, pp. 9-12, 2008.
- [10] W. Li, Z. Xia, B. You và Y. Liu, “Dual-Polarized H-Shaped Printed Slot Antenna,” *IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters*, tập 16, pp. 1484-1487, 2017.

- [11] Gao, Steven, Sambell và Alistair, “Dual-Polarized Broad-Band Microstrip Antennas Fed by Proximity Coupling,” *IEEE Transactions On Antennas And Propagation*, tập 53, pp. 526-530, 2005.
- [12] A. A. Deshmukh, A. A. Desai, P. Kadam và K. P. Ray, “Ultra-wide band E-shaped patch antenna,” trong *IEEE Annual India Conference*, 2016.
- [13] Y. Chen, S. Yang và Z. Nie, “Bandwidth Enhancement Method for Low Profile E-Shaped Microstrip Patch Antennas,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, tập 58, pp. 2442 - 2447, 2010.
- [14] Xian-Ling, Denidni và T. A.Liang, “H-Shaped Dielectric Resonator Antenna for Wideband Applications,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, tập 7, pp. 163 - 166, 2008.
- [15] K. R và K. G, “Stagger tuned microstrip log-periodic antenna,” trong *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 1996.
- [16] Y. Kimura, K. Furukawa, S. Saito, Y. Kimura và T. Fukunaga, “Design of Wideband Multi-Ring Microstrip Antennas Fed by an L-Probe for Single-Band and Dual-Band Operations,” *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting*, pp. 541 - 542, 2020.
- [17] R. Makino và Y. Kimura, “Design of a circularly dual-polarized wideband microstrip antenna fed by two orthogonally-arranged L-probes and a hybrid coupler,” *International Symposium on Antennas and Propagation*, 2024.
- [18] Y. Mushiake, “Self-complementary antennas,” *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, tập 34, pp. 23 - 29, 1992.
- [19] Z. N. Chen, D. Liu, H. Nakano, X. Qing và T. Zwick, “Self-Complimentary and Broadband Antennas,” trong *Handbook of Antenna Technologies*, Singapore, Springer Nature, 2016, p. 1163–1185.
- [20] r. sanyal, p. p. sarkar và s. k. chowdhury, “Quasi-self-complementary ultra-wideband antenna with band rejection characteristics,” *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, pp. 1-9, 2018.

- [21] C.-C. Lin và C.-Y. Huang, “Self-complementary antenna for ultra-wideband applications,” *IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation*, pp. 105-106, 2016.
- [22] W. Liang, Y.-C. Jiao, Y. Luan và C. Tian, “A Dual-Band Circularly Polarized Complementary Antenna,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, tập 14, pp. 1153 - 1156, 2015.
- [23] L. Guo, S. Wang, X. Chen và C. Parini, “A Small Printed Quasi-Self-Complementary Antenna for Ultrawideband Systems,” *IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters*, tập 8, pp. 554-557, 2009.
- [24] J. H. Kim, C.-H. Ahn và J.-K. Bang, “Antenna Gain Enhancement Using a Holey Superstrate,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, tập 64, số 3, pp. 1164 - 1167, 2016.
- [25] M. Asaadi và A. Sebak, “Gain and Bandwidth Enhancement of  $2 \times 2$  Square Dense Dielectric Patch Antenna Array Using a Holey Superstrate,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, tập 16, pp. 1808 - 1811, 2017.
- [26] P. D. Sinha, B. Ghosh và B. Deepa, “Gain Enhancement of Patch Antenna Array Using a Metamaterial Superstrate,” trong *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*, 2021.
- [27] A. Bilal, A. Quddious, H. Votsi, A. Kanno, T. Kawanishi và M. A. Antoniadis, “Metasurface Superstrate for 5G Bandwidth and Gain Enhancement,” trong *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*, 2022.
- [28] X. Zhang và L. Zhu, “Gain-Enhanced Patch Antennas With Loading of Shorting Pins,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, tập 64, số 8, pp. 3310 - 3318, 2016.
- [29] P. Ketkuntod, T. Hongnara, W. Thaiwirot và P. Akkaraekthalin, “Gain enhancement of microstrip patch antenna using I-shaped Mushroom-like EBG structure for WLAN application,” trong *International Symposium on Antennas and Propagation*, 2017.



- [30] A. J. Abdulqader và Y. A. Ali, “Microstrip Array Antenna Design with Directivity Enhancement Using Reflector Surface,” trong *International Conference on Advanced Science and Engineering*, 2018.
- [31] D. F. Sievenpiper, High-Impedance Electromagnetic Surfaces, Los Angeles: University of California, 1999.
- [32] H. R. Raad, A. I. Abbosh, H. M. Al-Rizzo và D. G. Rucker, “Flexible and Compact AMC Based Antenna for Telemedicine Applications,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, tập 61, số 2, pp. 524 - 531, 2013.
- [33] M. A. Meriche, H. Attia, A. Messai và T. A. Denidni, “Gain Improvement of a Wideband Monopole Antenna with Novel Artificial Magnetic Conductor,” trong *17th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics*, Canada, 2016.