

KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN CỦA LUẬN ÁN

Một số kết quả đạt được của luận án

1. Đề xuất một cấu trúc phần tử mảng phản xạ tái cấu hình băng rộng hai lớp và hai cấu trúc phần tử mảng phản xạ tái cấu hình băng rộng một lớp không quay phân cực và quay phân cực. Cả ba phần tử này được tái cấu hình nhờ 4 đi-ốt PIN và được điều khiển bởi 1 bit. Phần tử hai lớp có hệ số phản xạ lớn hơn -1,4 dB và đạt băng thông là 40,6%. Phần tử một lớp không quay phân cực sử dụng đi-ốt giá rẻ, đạt băng thông là 33,8% cho phân cực tròn và 40,6% cho phân cực tuyến tính với các hệ số phản xạ đều lớn hơn -1,7 dB. Phần tử một lớp quay phân cực đạt được băng thông là 28,5% với hệ số phản xạ lớn hơn -2 dB đối với phân cực tuyến tính. Ngoài ra, luận án còn đề xuất một giải pháp mô hình hóa đi-ốt PIN cho phần tử mảng phản xạ tái cấu hình. Các đóng góp này được công bố trong các công trình khoa học **J1** (Q3, SCIE) và **J2** (Q1, SCIE), **C2** (Scopus Index).
2. Đề xuất hai anten mảng phản xạ tái cấu hình một lớp, băng rộng, tăng ích cao, 1 bit không quay phân cực và quay phân cực. Cả hai anten này có kích thước 16 x 16 phần tử, hoạt động ở băng tần X và Ku, có khả năng điều hướng bức sóng trong phạm vi $\pm 50^\circ$. Băng thông 1-dB và tăng ích cực đại của hai anten mảng phản xạ tái cấu hình không quay phân cực và quay phân cực đạt được lần lượt là 12,2% và 14,9%; 23,1 dBi và 22,9 dBi. Hai đóng góp này được công bố trong các công trình khoa học **C1**, **C2** (Scopus Index) và **C3**. Trong đó, hai bài báo **C1**, **C2** đăng trong kỷ yếu của các hội nghị quốc tế có phản biện còn bài báo **C3** đăng trong kỷ yếu hội nghị khoa học quốc gia có phản biện.

Hướng phát triển của luận án

1. Nghiên cứu anten mảng phản xạ tái cấu hình 2 bit nhằm tăng hiệu suất mặt mở của anten;
2. Nghiên cứu bề mặt thông minh cho mạng 6G trên nền tảng các kết quả đạt được.

MỞ ĐẦU

1. Động lực nghiên cứu

Ngày nay, nhu cầu về dịch vụ internet băng rộng đã thúc đẩy sự phát triển của các mạng di động thế hệ thứ năm (5G: Fifth Generation), mạng di động thế hệ thứ sáu (6G: Sixth Generation), hệ thống thông tin vệ tinh thế hệ mới và mạng không dây trong nhà.

Mạng 5G đã đáp ứng được nhu cầu cơ bản của người dùng khi tốc độ trải nghiệm của người dùng đạt đến 100 Mb/s. Tuy nhiên, sự phát triển nhanh của nhiều ứng dụng như trí tuệ nhân tạo, thực tế ảo và IoE (IoE: Internet of Everything) tiếp tục tạo ra cơn khát về dữ liệu trong các năm tới và mạng 6G sẽ ra đời để đáp ứng các yêu cầu đó. Dự kiến, mạng di động này sẽ có tốc độ dữ liệu người dùng trải nghiệm khoảng 1 Gb/s [1].

Song song với sự phát triển của các mạng di động, trong những năm gần đây, hệ thống thông tin vệ tinh cũng có những bước phát triển vượt bậc. Thông tin vệ tinh có thể cung cấp dịch vụ internet băng rộng, dịch vụ trao đổi dữ liệu cho các thiết bị di chuyển như tàu biển, máy bay, tàu cao tốc, hoặc dịch vụ internet cho các vùng sâu, vùng xa, các khu vực cứu hộ, thảm họa nơi mà hệ thống mạng mặt đất chưa triển khai hoặc bị gián đoạn do sự cố [2]. Thông tin vệ tinh cũng đóng vai trò hỗ trợ mạng 5G vì chúng có khả năng cung cấp các đường kết nối vào mạng lõi cho các trạm phát sóng 5G và 6G ở các vùng không có mạng cáp quang [3].

Mạng không dây chuẩn 802.11ad (WiGig: 60 GHz Wi-Fi) và chuẩn kết nối không dây tốc độ cao (Wireless HD: Wireless transmission of High-Definition video) cũng có tốc độ phát triển không kém để đáp ứng các nhu cầu trao đổi dữ liệu của các thiết bị trong nhà. Mạng WiGig và chuẩn kết nối wireless HD đều đang tiến đến sử dụng tần số 60 GHz và đạt tốc độ truyền tối đa lần lượt là 7 Gb/s và 28 Gb/s.

Để đạt được các tính năng đã đặt ra, mạng di động 5G đã nâng cao dải tần số lên khoảng 28 GHz hoặc 37 GHz, sử dụng sơ đồ điều chế FBMC (FBMC: Filter bank multicarrier), sử dụng giao thức đa truy nhập không trực giao (NOMA: Non Orthogonal Multiple Access) và sử dụng kiến trúc mạng 2D (2D: Two direction)... Mạng 6G ngoài việc sử dụng sơ đồ điều chế FBMC và giao thức đa truy nhập không trực giao NOMA, chúng còn tiến đến sử dụng dải

tần số terahertz và kiến trúc mạng 3D... Hệ thống thông tin vệ tinh cũng đang tiến đến khai thác các dải tần số băng V, W. Mạng wireless HD (WiGig) và WirelessHD sử dụng sơ đồ điều chế OFDM. Ngoài ra, các hệ thống này đều đề xuất giao diện vô tuyến mới với khả năng điều hướng búp sóng (Beam steering). Gần đây, sự bùng nổ các dự án ô tô tự lái cũng thúc đẩy sự phát triển của hệ thống anten có khả năng điều hướng búp sóng trong các hệ thống ra-đa hỗ trợ lái. Do đó, việc nghiên cứu các hệ anten có khả năng điều hướng búp sóng là cần thiết cho sự phát triển của các hệ thống thông tin vô tuyến thế hệ mới.

Trong các anten có khả năng điều hướng búp sóng, anten mảng phản xạ tái cấu hình (MPXTCH) là một loại quan trọng, có tiềm năng phát triển trong thời gian tới. Anten này đã và đang được ứng dụng cho các hệ thống thông tin vệ tinh. Gần đây, bề mặt thông minh - RIS (cùng nguyên lý hoạt động với anten mảng phản xạ tái cấu hình) đã được đề xuất là anten cho mạng 6G đã cho thấy tiềm năng to lớn của loại anten này.

Tuy nhiên, thách thức chung đối với loại anten này là băng thông hẹp, chi phí chế tạo cao do yêu cầu mạch in nhiều lớp và số lượng lớn đi-ốt PIN cho mảng phản xạ cũng như mạch điều khiển phức tạp. Do đó, trong luận án này, NCS (nghiên cứu sinh) chọn đề tài “Nghiên cứu giải pháp cải thiện băng thông và tăng ích của anten mảng phản xạ tái cấu hình cho các hệ thống thông tin vô tuyến” để làm luận án tiến sĩ. Đề tài này sẽ nghiên cứu các giải pháp và đề xuất anten mảng phản xạ tái cấu hình băng rộng, độ lợi cao với chi phí chế tạo hợp lý. Tại thời điểm hiện nay, đề tài này có tính cấp thiết, có ý nghĩa khoa học và thực tiễn.

2. Các đóng góp của luận án:

1. Đề xuất một cấu trúc phần tử mảng phản xạ tái cấu hình băng rộng hai lớp, một cấu trúc phần tử mảng phản xạ tái cấu hình băng rộng một lớp không quay phân cực và một cấu trúc phần tử mảng phản xạ tái cấu hình băng rộng một lớp quay phân cực. Đồng thời, đề xuất một giải pháp mô hình hóa đi-ốt PIN cho phần tử mảng phản xạ tái cấu hình.
2. Đề xuất hai anten mảng phản xạ tái cấu hình băng rộng, tăng ích cao, một lớp, 1 bit, không quay phân cực và quay phân cực, hoạt động ở băng tần X và Ku.

3. Bố cục luận án:

Bố cục luận án bao gồm: lời mở đầu; 3 chương nội dung; kết luận và hướng nghiên cứu tiếp theo; danh mục các công trình công bố và tài liệu tham khảo.

Bảng 3.3: So sánh anten này với các anten mảng phản xạ tái cấu hình QPC khác.

Tài liệu/ Năm	[86]/2016	[80]/2021	Nghiên cứu này
Tần số (GHz)	12-14,5	11,6-14,3	11,5-16
Số lớp	3	2	1
Loại đi-ốt PIN	KCB	MADP-000907-04020	MADP-000907-04020
Số phần tử	10 x 10	16 x 16	16 x 16
G_{max} (dBi)/HHMM (%)	17,5/15	20,5/15,4	22,9/22,4
BW 1-dB (%) Góc quét (°)	KCB/ $\pm 40^\circ$	15,4 / $\pm 50^\circ$	14,92/$\pm 50^\circ$
Phân cực	DL, CP, RP	SL, RP	SL, RP

3.4 So sánh hai anten mảng phản xạ tái cấu hình đã đề xuất

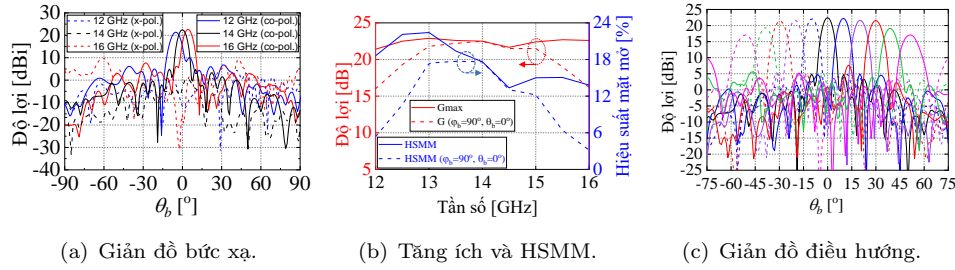
Bảng 3.4: So sánh hai anten mảng phản xạ tái cấu hình đã đề xuất.

Loại anten/ Loại đi-ốt PIN	f (GHz)	G (dBi)	HSMM (%)	BW 1-dB (%)	SLL (dB)	x-pol (dB)	Góc quét (°)
Không QPC/ SMP	10,5 - 14,5	23,1	24,7	12,2	-17	-49	$\pm 50^\circ$
QPC/MADP	11,5 - 16	22,9	22,4	14,9	-19,5	-20,24	$\pm 50^\circ$

Bảng 3.4 cho thấy: hai anten này có tăng ích gần bằng nhau và hiệu suất mặt mở rất tốt. Anten MPXTCH không quay phân cực và không quay phân cực đạt được tăng ích lần lượt là 23,1 dBi và 22,9 dBi. Anten MPXTCH quay phân cực đạt băng thông 1-dB cao hơn anten không quay phân cực khoảng 2,7%. Mức búp sóng phụ của anten quay phân cực tại tần số trung tâm thấp hơn anten không quay phân cực 2,5 dB. Mức phân cực chéo của anten quay phân cực cao hơn rất nhiều so với anten không quay phân cực (-20,24 dB so với -49 dB) do phần tử quay phân cực có mức phân cực chéo cao. Cả hai anten đều có khả năng điều hướng búp sóng trong phạm vi $\pm 50^\circ$.

3.5 Kết luận Chương 3

Chương 3 đề xuất hai cấu trúc anten MPXTCH không quay phân cực và quay phân cực sử dụng cấu trúc mạch in một lớp, hoạt động ở băng tần X và Ku. Hai anten này đều có sự cải thiện về độ lợi so với các nghiên cứu gần đây và có khả năng điều hướng búp sóng trong phạm vi $\pm 50^\circ$. Các anten này đều có tiềm năng ứng dụng vào các hệ thống thông tin vô tuyến khác có tính năng điều hướng búp sóng. Các nghiên cứu trong chương này đã được công bố trong các bài báo [C1, C2, C3].



(a) Giảm độ bức xạ. (b) Tăng ích và HSM. (c) Giảm độ điều hướng.

Hình 3.4: Kết quả mô phỏng của anten MPXTCH một lớp quay phân cực đạt 22,4% tại 13 GHz. Cả tăng ích và hiệu suất mặt mở đều có xu hướng giảm về hai bên khi tần số xa tần số trung tâm. Băng thông 1-dB theo tăng ích cực đại đạt 24,6% (từ 12,5 GHz đến 16 GHz). Tại góc cố định ($\varphi_b = 90^\circ, \theta = 0^\circ$), băng thông của anten đạt 14,92% (từ 13 GHz đến 15 GHz).

Để chứng minh khả năng điều hướng bức sóng, anten được mô phỏng tạo các bức sóng trong mặt phẳng YOZ. Kết quả trong Hình 3.4c cho thấy: khả năng điều hướng bức sóng của anten trong phạm vi $\pm 50^\circ$; Tăng ích tại các góc thay đổi trong phạm vi 5,4 dB; mức phân cực chéo cũng rất tốt, nhỏ hơn -17,17 dB, góc nửa bức sóng luôn nhỏ hơn $9,9^\circ$. Mức bức sóng phụ hơi cao, từ -17,5 dB đến -11,9 dB. Tuy nhiên, đây là một giá trị chấp nhận được cho một anten mảng phản xạ tái cấu hình quay phân cực 1 bit vì sai số pha và phân cực chéo của phân tử khá lớn như đã trình bày trong Mục 2.3.1. Đối với một anten mảng phản xạ vừa tái cấu hình vừa quay phân cực, đây là một anten có tính năng khá tốt. Kết quả này đạt được là nhờ tính năng của phân tử. Bên cạnh đó, quy trình thiết kế đã đề xuất cũng đóng góp một phần để phát huy các tính năng vốn có của phân tử này.

3.3.4 Đánh giá anten MPXTCH một lớp, quay phân cực

Bảng 3.3 so sánh anten được đề xuất với một số nghiên cứu gần đây. Kết quả trong bảng cho thấy: Anten này đạt được tăng ích vượt trội (cao hơn 2,4 dB) so với nghiên cứu [80] (cùng kích thước mảng và dải tần số hoạt động). Do đó, nó cũng có hiệu suất mặt mở tốt nhất (22,4%) so với khoảng 15% của hai anten còn lại. Băng thông 1-dB của anten này gần bằng với nghiên cứu [80]. Khả năng điều hướng bức sóng của anten này tương đương với anten [80] ($\pm 50^\circ$). Về phân cực, anten [86] có thể sử dụng cho cả phân cực tròn và phân cực tuyến tính còn anten đề xuất và anten [80] chỉ sử dụng cho phân cực tuyến tính. Kết quả này có được là nhờ phân tử của anten này có độ lệch pha tuyến tính và hệ số chuyển đổi phân cực khá cao so với hai anten còn lại.

Chương 1

Tổng quan về anten mảng phản xạ tái cấu hình

1.1 Các hệ thống thông tin vô tuyến

Thế giới đang chứng kiến sự bùng nổ về nhu cầu dịch vụ internet băng rộng và số lượng thiết bị kết nối mạng. Các nhu cầu đó đã thúc đẩy sự phát triển các hệ thống thông tin vô tuyến thế hệ mới như mạng di động 5G, 6G, hệ thống thông tin vệ tinh băng rộng, mạng WiGig và chuẩn kết nối video HD không dây. Để hiện thực hóa các yêu cầu về tốc độ truyền dữ liệu, độ trễ và một số yêu cầu khác, nhiều công nghệ đã được áp dụng trên giao diện vô tuyến của các hệ thống này nhằm giải quyết các vấn đề truyền sóng, làm tăng tỷ số tín hiệu trên nhiễu, giảm nhiễu cho các thiết bị khác, tái sử dụng tần số, nâng cao hiệu quả sử dụng phổ và năng lượng. Một trong các giải pháp đó là điều hướng bức sóng.

1.1.1 Sự cần thiết của anten điều hướng bức sóng trong các hệ thống thông tin vô tuyến

Do các hệ thống thông tin vô tuyến ở trên đều hoạt động ở các dải tần số cao, suy hao truyền sóng lớn nên tất cả các hệ thống này đều sử dụng anten có khả năng điều hướng bức sóng. Mạng 5G, 6G tiến đến khai thác tần số dải mili-mét và terahertz nên các anten này cần phải điều hướng bức sóng nhằm tạo bức sóng hẹp và bám theo sự di chuyển thiết bị đầu cuối. Mạng 6G còn đang được đề xuất sử dụng bề mặt thông minh (RIS) để tránh các hiện tượng che khuất do công trình kiến trúc. Các hệ thống thông tin tốc độ cao trong phạm vi hẹp như hệ thống không dây 802.11ad (WiGig) và chuẩn kết nối Wireless HD sử dụng tần số 60 GHz (băng tần V) và do đó, anten của chúng cũng thực hiện điều hướng bức sóng để tập trung năng lượng cho thiết bị đầu cuối.

Các hệ thống thông tin vệ tinh băng rộng hiện nay cũng đang trang bị các anten sử dụng phương pháp điều hướng bức sóng bằng phương pháp số nhằm vừa có thể tăng tốc độ dữ liệu, tăng số lượng thiết bị đầu cuối có thể phục vụ, đồng thời giảm sự công kênh, trọng lượng, chi phí bảo dưỡng. Ra-đa hỗ trợ lái cho ô tô điều khiển bằng phương pháp số cũng đang được đề xuất sử dụng kỹ thuật điều hướng bức sóng nhằm cung cấp một góc quét rộng, tăng cự li bất mục tiêu, độ bền cao hơn so với các ra-đa cổ điển và điều hướng theo phương pháp cơ khí [15].

1.1.2 Các loại anten điều hướng búp sóng

Hiện nay, có bốn loại anten trạm gốc phổ biến có khả năng điều hướng búp sóng, gồm có: anten mảng pha, anten mảng phản xạ tái cấu hình, anten thấu kính phẳng tái cấu hình và anten holographic. Anten mảng pha có tính năng tốt nhất với khả năng điều hướng búp sóng 2D với góc quét rộng đến $\pm 75^\circ$ [21] nhưng chi phí chế tạo cao. Anten thấu kính phẳng tái cấu hình và anten mảng phản xạ tái cấu hình có khả năng điều hướng búp sóng 2D đến $\pm 60^\circ$ và chi phí thấp hơn nhưng kích thước công kênh hơn vì chúng bao gồm cả anten loa. Anten holographic có cấu trúc đơn giản hơn anten mảng phản xạ tái cấu hình và anten thấu kính phẳng tái cấu hình khi có thể dùng nguồn cấp dạng vi dải. Tuy nhiên, chúng chưa đáp ứng được yêu cầu của các hệ thống thông tin vô tuyến khi chỉ mới điều chỉnh hướng búp sóng một cách rời rạc theo một hướng.

1.2 Tổng quan về anten mảng phản xạ tái cấu hình

Anten mảng phản xạ tái cấu hình là biến thể của anten mảng phản xạ. Các phần tử trong mảng phản xạ tái cấu hình được điều khiển để thay đổi pha để điều hướng búp sóng.

Nguyên lý hoạt động của anten mảng phản xạ tương tự như anten mảng pha nên pha chính là tham số cần được điều khiển để điều hướng búp sóng. Do vậy, tái cấu hình anten mảng phản xạ là thay đổi cấu trúc cộng hưởng của từng phần tử trong mảng nhằm thay đổi pha phản xạ của chúng. Pha của phần tử trong mảng phản xạ là cố định, còn pha của phần tử trong mảng phản xạ tái cấu hình có thể thay đổi thông qua điều khiển bằng nguồn một chiều. Pha của các phần tử trong mảng phản xạ tái cấu hình có thể thay đổi một cách liên tục hoặc rời rạc tùy thuộc vào phương pháp thiết kế phần tử. Nếu đi-ốt biến dung được sử dụng để tái cấu hình phần tử thì phần tử có thể thay đổi pha một cách liên tục còn nếu phần tử sử dụng các linh kiện khác như đi-ốt PIN, chuyển mạch MEMs... thì phần tử có các trạng thái pha rời rạc.

1.2.1 Phương pháp tái cấu hình phần tử mảng phản xạ

Để tái cấu hình anten mảng phản xạ, người ta thường ghép các linh kiện bán dẫn tích cực (đi-ốt PIN, đi-ốt biến dung, chuyển mạch MEMs và tinh thể lỏng...) vào cấu trúc cộng hưởng của phần tử để điều khiển pha của các phần tử trong mảng. Các linh kiện này được điều khiển làm thay đổi đặc tính cộng hưởng của phần tử, gây ra thay đổi pha phản xạ. Số bit của mạch điều khiển tương ứng với số trạng thái pha của phần tử. Giả sử k là số bit điều khiển thì số trạng thái pha của các phần tử là 2^k . Pha của các phần tử được lượng tử

(25%). Khả năng điều hướng búp sóng của anten này là $\pm 50^\circ$, tương đương với các nghiên cứu [85, 48, 80] và thấp hơn nghiên cứu [70] ($\pm 60^\circ$). Đây là kết quả khá tốt đối với một anten MPXTCH sử dụng các đi-ốt SMP-1340-040.

3.3 Thiết kế anten mảng phản xạ tái cấu hình một lớp, QPC

Kế thừa từ các ưu điểm của cấu trúc một lớp của anten MPXTCH trong Mục 3.2, trong mục này, NCS sẽ đề xuất một anten mảng phản xạ tái cấu hình một lớp quay phân cực sử dụng phần tử đã trình bày ở Mục 2.3.1.

3.3.1 Thiết kế cấu trúc anten MPXTCH một lớp, QPC

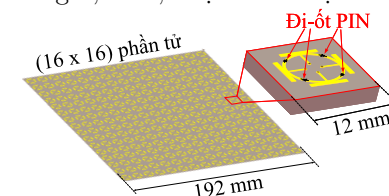
Kích thước mảng được xác định là $D_m \times D_m = 192 \text{ mm} \times 192 \text{ mm}$ (16 x 16 phần tử) (xem Hình 3.3). Anten loa sử dụng để cấp nguồn cho anten mảng phản xạ giống như anten loa sử dụng cho anten MPXTCH một lớp ở Mục 3.2.1. Tuy nhiên, do khác dải tần số hoạt động, hệ số q của anten loa tại 14 GHz là 8, tương đương với khoảng 14 dBi.

3.3.2 Xác định vị trí anten loa và tối ưu vị trí anten loa theo tâm pha

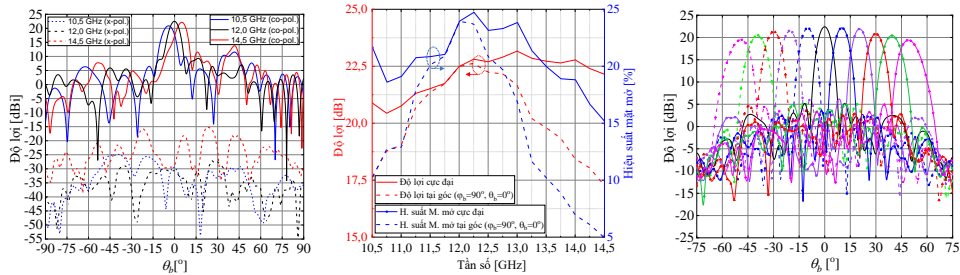
Để xác định được hiệu suất mặt mở tốt nhất, NCS cũng thực hiện khảo sát hiệu suất mặt mở theo tham số H , θ_0 và mô phỏng hai vị trí điển hình để xác định vị trí anten loa. Sau đó, NCS đã điều chỉnh vị trí anten loa theo các giá trị của Δl trong khi pha của các phần tử vẫn giữ pha cũ. Kết quả cho thấy tại vị trí anten loa với $H = 153,6 \text{ mm}$; $x_f = 112,8$; $\theta_0 = 25^\circ$; $\Delta l = -3 \text{ mm}$, anten có tăng ích tốt nhất (22,5 dBi). Vì vậy, NCS chọn chúng làm tham số vị trí của anten loa.

3.3.3 Kết quả mô phỏng anten MPXTCH băng rộng một lớp, QPC

Kết quả mô phỏng của anten trong Hình 3.4a cho thấy: tại tần số 14 GHz, tăng ích của anten đạt 22,5 dBi, mức phân cực chéo luôn nhỏ hơn -20,24 dB, mức búp sóng phụ đạt -19,5 dB. Tại các tần số 12 GHz và 16 GHz, góc búp sóng chính bị lệch khỏi giá trị thiết lập khoảng $\pm 4^\circ$, tăng ích đạt được lần lượt là 21,4 dBi và 22,63 dBi; Hình 3.4b cho thấy: Tăng ích cực đại của anten đạt 22,9 dBi (13 GHz) và tăng ích khá đồng đều trong dải tần rộng từ 12 GHz đến 16 GHz, với độ lệch khoảng 1,5 dB; Hiệu suất mặt mở tốt nhất của anten cũng



Hình 3.3: Mảng phản xạ tái cấu hình quay phân cực.



(a) Giảm đồ bức xạ. (b) Tăng ích và HSM. (c) Giảm đồ điều hướng.

Hình 3.2: Kết quả mô phỏng của anten MPXTCH một lớp

cả dải tần. Hình 3.2b cho thấy: Tăng ích cực đại của anten đạt 23,1 dBi (13 GHz). Hiệu suất mặt mở của anten này đạt 24,7% và có xu hướng giảm đối với các tần số xa tần số trung tâm. Băng thông 1-dB theo tăng ích cực đại đạt 18,8% (từ 12 GHz đến 14,5 GHz). Tại góc ($\varphi = 90^\circ, \theta = 0^\circ$), băng thông 1-dB đạt khoảng 12,2%, tương ứng từ 11,5 GHz đến 12,75 GHz. Hình 3.2c cho thấy: Phạm vi điều hướng búp sóng của anten trong mặt phẳng YOZ này đạt được là $\pm 50^\circ$, sai số góc quét nhỏ hơn $0,8^\circ$, mức phân cực chéo luôn nhỏ hơn -19 dB; Tăng ích giữa các góc lệch khoảng 3,1 dB; Mức búp sóng phụ thấp hơn -14 dB.

3.2.4 Đánh giá anten mảng phản xạ tái cấu hình một lớp

Bảng 3.2 cho thấy: anten này đã có sự cải tiến đáng kể về băng thông so với các nghiên cứu [85, 48]. Băng thông 1-dB của anten này (12,2%) thấp hơn nghiên cứu vừa công bố trong năm 2021 [80] (15,4%) và 2022 [70] (22,5%). Bù lại, tăng ích của anten đề xuất đạt cao nhất, khoảng 23,1 dBi, trong khi các anten có cùng kích thước mảng có tăng ích chỉ đạt từ 19,22 dBi đến 21,6 dBi. Hiệu suất mặt mở của anten này đạt 24,7%, chỉ hơi thấp hơn nghiên cứu [70]

Bảng 3.2: So sánh anten MPXTCH một lớp với các công bố khác.

Tài liệu/năm	[85]/2016	[48]/2019	[80]/2021	[70]/2022	Nghiên cứu này
Tần số (GHz)	12,5	5,0	12,5	15,0	12,0
Số lớp	2	2	3	3	1
Loại di-ốt PIN	MADP	SMP	MADP	MADP	SMP
Số phần tử	10 x 10	16 x 16	16 x 16	16 x 16	16 x 16
Tăng ích cực đại (dBi)	17,5	19,22	20,5	21,6	23,1
Hiệu suất mặt mở (%)	17,9	15,26	15,4	25	24,7
Băng thông 1-dB (%)	KCB	8,4	15,4	22,5	12,2
Góc quét ($^\circ$)	$\pm 50^\circ$	$\pm 50^\circ$	$\pm 50^\circ$	$\pm 60^\circ$	$\pm 50^\circ$

hóa về các giá trị pha rời rạc như công thức 1.1.

$$\phi_{rr}(x_i, y_i) = \frac{2\pi}{2^k}, \frac{2\pi}{2^k} - \frac{2\pi}{2^{k+1}} < \phi(x_i, y_i) \leq \frac{2\pi}{2^k} + \frac{2\pi}{2^{k+1}} \quad (1.1)$$

Trong đó, $\phi(x_i, y_i)$ là pha của phần tử. Ví dụ với $k = 2$, pha của phần tử mảng phản xạ có 4 trạng thái: $90^\circ, 180^\circ, 270^\circ, 360^\circ$. Tất cả các pha của phần tử đều được làm tròn về các giá trị pha này như công thức 1.2:

$$\phi_{rr}(x_i, y_i) = \begin{cases} 360^\circ, & -45^\circ < \phi(x_i, y_i) \leq 45^\circ \\ 90^\circ, & 45^\circ < \phi(x_i, y_i) \leq 135^\circ \\ 180^\circ, & 135^\circ < \phi(x_i, y_i) \leq 225^\circ \\ 270^\circ, & 225^\circ < \phi(x_i, y_i) \leq 315^\circ \end{cases} \quad (1.2)$$

Do pha của các phần tử được làm tròn về các giá trị chuẩn hóa nên giá trị pha rời rạc của các phần tử luôn mang sai số pha $\Delta\phi_{rr}$ theo công thức 1.3 [62].

$$\Delta\phi_{rr}(x_i, y_i) = \phi(x_i, y_i) - \phi_{rr}(x_i, y_i) \quad (1.3)$$

Sai số pha này sẽ gây ra giảm tăng ích, tăng mức búp sóng phụ và các ảnh hưởng khác [62].

1.2.2 Phần tử tích cực sử dụng để tái cấu hình phần tử của anten mảng phản xạ

Trong số các linh kiện này dùng để tái cấu hình phần tử, chuyển mạch MEMs, di-ốt biến dung và di-ốt PIN được sử dụng thường xuyên hơn. Trong đó, di-ốt PIN được sử dụng nhiều nhất do chúng có chi phí chế tạo thấp, nhiều chủng loại, sẵn có trên thị trường [64, 48, 38, 79, 80, 70] và mạch điều khiển của chúng cũng đơn giản.

1.3 Băng thông của phần tử và anten mảng phản xạ tái cấu hình

Băng thông của phần tử MPXTCH được đánh giá thông qua độ lệch pha giữa các trạng thái pha của phần tử. Cụ thể, tiêu chuẩn để đánh giá sai số độ lệch pha thường là $\pm 20^\circ$ đối với phần tử có hai trạng thái pha và $\pm 10^\circ$ đối với phần tử có bốn trạng thái pha [48, 68, 69, 66, 70]. Ngoài ra, hệ số phản xạ thường phải lớn hơn -2 dB để đảm bảo hơn 60% năng lượng điện từ trường phản xạ trở lại.

Băng thông của anten MPXTCH thường được đánh giá theo tăng ích. Tham số này đánh giá khả năng giữ được hệ số tăng ích của một anten trong một khoảng tần số nào đó và được tính theo đơn vị phần trăm theo công thức 1.4.

$$BW = \frac{f_U - f_L}{f_C} \times 100 = 2 \frac{f_U - f_L}{f_U + f_L} \times 100 \quad [\%] \quad (1.4)$$

Trong đó, f_C là tần số trung tâm, f_U là điểm tần số cận trên còn f_L là tần số điểm cận dưới mà anten này thỏa mãn điều kiện độ lệch tăng ích trong phạm vi xác định.

Bảng thông theo tăng ích hay được sử dụng để đánh giá chúng là bảng thông 3-dB hoặc 1-dB, tức là tăng ích của anten chỉ được lệch trong phạm vi 3 dB hoặc 1 dB.

1.3.1 Tổng quan về các xu hướng nghiên cứu anten mảng phản xạ tái cấu hình trong và ngoài nước

a) Các nghiên cứu ngoài nước

Hiện nay, các nhà khoa học trên thế giới tập trung vào các xu hướng nghiên cứu chính như sau:

- Nghiên cứu cải tiến bảng thông sử dụng dây trễ pha [85, 83] hoặc sử dụng phương pháp thay đổi tần số cộng hưởng [86, 70].

- Nghiên cứu cải tiến tăng ích của anten bằng cách sử dụng chất nền có hệ số điện môi thấp như Arlon 880 [38], TLX-08 [77], F4B [87], AD 255C [80], RT5880 [88] và các đi-ốt PIN suy hao thấp [77, 89] hoặc sử dụng các kỹ thuật thiết kế để giảm suy hao [79, 90];

- Nghiên cứu cải tiến phân cực của anten mảng phản xạ tái cấu hình, bao gồm: đa phân cực, phân cực tròn [72, 86, 79, 91] và quay phân cực [80, 86];

- Nghiên cứu các anten mảng phản xạ tái cấu hình đa băng tần [76, 97]. Các nghiên cứu này đã đề xuất các anten có thể hoạt động đồng thời trên hai băng tần X và Ku;

- Nghiên cứu về các anten mảng phản xạ tái cấu hình 2 bit. Các phần tử 1 bit có sai pha lớn nên một vài công bố gần đây đã đề xuất phần tử 2 bit để giảm sai pha cho phần tử, từ đó tăng tăng ích và giảm mức búp sóng phụ của anten [69, 65, 66, 89].

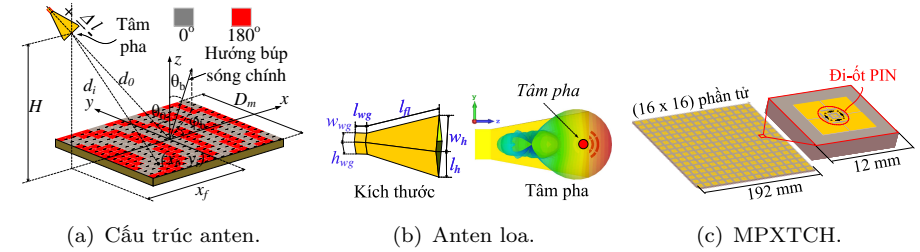
b) Các nghiên cứu trong nước

Ở trong nước, nhóm nghiên cứu của Phó Giáo sư, tiến sĩ Nguyễn Bình Dương thuộc Trường Đại học Quốc tế đã thực hiện nhiều nghiên cứu về anten mảng phản xạ tái cấu hình. Cụ thể, nhóm này đã mô phỏng và đo kiểm phần tử phần tử mảng phản xạ tái cấu hình 1 bit [100, 102] và 2 bit [101]. Ngoài ra, nhóm nghiên cứu của Giáo sư, tiến sĩ Vũ Văn Yên cũng quan tâm nghiên cứu anten tái cấu hình theo tần số sử dụng đi-ốt PIN. Nhóm nghiên cứu của TS. Nguyễn Khắc Kiểm tại Đại học Bách khoa Hà Nội cũng thực hiện nhiều nghiên cứu về anten mảng pha và anten tái cấu hình.

3.2 Thiết kế anten MPXTCH một lớp

3.2.1 Thiết kế cấu trúc anten MPXTCH một lớp

Cấu trúc của anten mảng phản xạ tái cấu hình như Hình 3.1a. Các phần tử trong mảng của anten này được điều khiển bởi một bit nên pha của chúng chỉ có hai trạng thái là 0° và 180° . Trạng thái pha của các phần tử này có thể thay đổi tùy theo hướng búp sóng chính.



Hình 3.1: Cấu trúc tổng quát của anten mảng phản xạ tái cấu hình, anten loa cấp nguồn và mảng phản xạ tái cấu hình một lớp.

Bảng 3.1: Bảng kích thước và tâm pha của anten loa.

Tham số	w_{wg}	h_{wg}	l_{wg}	l_{fl}	w_h	l_h	Tần số (GHz)	10	11	12	13	14	15	16
Giá trị (mm)	9,52	19,05	10	65,49	37	42	Vị trí tâm pha theo trục z (mm)	-0,4	-1,1	-3,3	-4,3	-7,5	-6,9	-7,4

Anten này sử dụng phần tử ở Mục 2.2.2 để thiết kế mảng. Kích thước mảng được xác định là $D_m \times D_m = 192 \text{ mm} \times 192 \text{ mm}$ (16 x 16 phần tử) (xem Hình 3.1c). Anten loa sử dụng để cấp nguồn cho anten mảng phản xạ có cấu trúc như Hình 3.1b. Kích thước cụ thể và bảng giá trị tâm pha của anten loa như Bảng 3.1. Anten loa có hệ số $q = 7,4$ (13,96 dBi) tại tần số 12 GHz.

3.2.2 Xác định vị trí anten loa và tối ưu vị trí anten loa theo tâm pha

Để xác định được hiệu suất mặt mở tốt nhất, NCS thực hiện khảo sát hiệu suất mặt mở theo tham số H , θ_0 và mô phỏng hai vị trí điển hình để xác định vị trí anten loa. Sau đó, NCS đã điều chỉnh vị trí anten loa theo các giá trị của Δl trong khi pha của các phần tử vẫn giữ pha cũ. Kết quả cho thấy tại vị trí anten loa với $H = 156,6 \text{ mm}$, $x_f = -120 \text{ mm}$, $\theta_0 = 28^\circ$ và $\Delta l = 0 \text{ mm}$, anten có tăng ích tốt nhất (22,5 dBi).

3.2.3 Kết quả mô phỏng anten MPXTCH một lớp

Kết quả mô phỏng của anten trong Hình 3.2a cho thấy: tăng ích của anten tại tần số 12 GHz đạt 22,5 dBi. Tăng ích giảm xuống lần lượt là 20,9 dBi và 22,1 dBi; Mức búp sóng phụ tại tần số 12 GHz đạt -17 dB và tăng lên -13,8 tại 10,5 GHz và -14,5 dB tại 14,5 GHz. Mức phân cực chéo nhỏ hơn -37 dBi trong

Chương 3

Thiết kế anten mảng phản xạ tái cấu hình bằng rộng, tăng ích cao

Trong chương này, NCS sẽ trình bày một quy trình thiết kế anten mảng phản xạ và sau đó, thiết kế hai cấu trúc anten mảng phản xạ tái cấu hình bằng rộng, tăng ích cao, 1 bit, không quay phân cực và quay phân cực. Các anten này sử dụng cấu trúc một lớp để giảm chi phí chế tạo.

3.1 Phương pháp thiết kế anten mảng phản xạ

Việc thiết kế một hệ thống anten có thể bắt đầu từ nhiều yêu cầu khác nhau như: tăng ích, băng thông hoặc mức búp sóng phụ...nhưng đối với các loại anten mặt mở như anten mảng phản xạ, anten mảng pha, anten gương, anten thấu kính... thì tăng ích là tham số đầu tiên cần xem xét. Các anten kiểu này có tăng ích luôn luôn tỉ lệ với kích thước diện (kích thước tỷ lệ theo bước sóng) của mặt mở. Vì thế, việc xác định được hiệu suất mặt mở sẽ ước lượng được kích thước của anten và ngược lại. Đối với anten mảng phản xạ, hiệu suất mặt mở phụ thuộc chủ yếu vào hiệu suất cấp nguồn và hệ số tràn. Hai tham số này lại phụ thuộc vào các đặc trưng bức xạ của nguồn cấp, tỷ số giữa độ cao của nguồn cấp và kích thước mặt mở, hướng, vị trí của nguồn cấp cùng một vài yếu tố khác. Do đó, để xác định được hiệu suất mặt mở phải xuất phát từ đặc tính bức xạ của nguồn cấp.

3.1.1 Quy trình thiết kế anten mảng phản xạ

Quy trình thiết kế anten mảng phản xạ này dựa vào các công thức ở tài liệu [115], gồm hai bước:

- Bước 1: Thiết kế anten mảng, bao gồm: xác định kích thước mảng theo tăng ích dự kiến; chọn anten loa theo kích thước mảng, xác định hệ số q của anten loa. Từ đó, xác định vị trí của cửa anten loa theo hiệu suất mặt mở tối ưu nhờ công thức tính hiệu suất mặt mở ở tài liệu [115]. Sau đó, xác định phân bố pha, cấu trúc cộng hưởng của từng phần tử. Đối với anten mảng phản xạ tái cấu hình, pha còn được lượng tử hóa theo công thức 1.1.

- Bước 2: Tối ưu tăng ích theo tâm pha. Trên cơ sở tâm pha anten loa, vị trí của anten loa được điều chỉnh để đạt tăng ích tốt nhất. Trong bước này, chỉ điều chỉnh vị trí của anten loa mà không tính lại phân bố pha của mảng.

1.3.2 Đánh giá các xu hướng nghiên cứu, cải tiến anten mảng phản xạ tái cấu hình

Qua đánh giá các xu hướng nghiên cứu, ta có thể thấy rằng các nhà khoa học đang cố gắng cải tiến tính năng của anten mảng phản xạ tái cấu hình để đáp ứng các yêu cầu của các hệ thống thông tin vô tuyến. Băng thông và tăng ích của anten mảng phản xạ tái cấu hình đã được cải tiến khá tốt. Các tính năng như đa phân cực, phân cực tròn hoặc quay phân cực, đa băng tần cũng được các nhà khoa học quan tâm nghiên cứu, cải tiến. Nó tạo cho anten này có thêm nhiều tính năng, đáp ứng nhiều ứng dụng khác nhau với các yêu cầu khác nhau. Xu hướng nghiên cứu anten mảng phản xạ tái cấu hình 2 bit cũng được một số nhà khoa học quan tâm nhưng số lượng nghiên cứu không nhiều bởi vì cấu trúc phần tử khá phức tạp, dẫn đến một số hiệu ứng không mong muốn như pha phản xạ không tuyến tính và suy hao cao. Tuy nhiên, việc thiết kế anten mảng phản xạ tái cấu hình cũng còn nhiều thách thức như: Băng thông và tăng ích vẫn chưa đáp ứng được nhu cầu của hệ thống thông tin vô tuyến; Chi phí chế tạo cao do sử dụng cấu trúc nhiều lớp và sử dụng số lượng lớn linh kiện tích cực như đi-ốt PIN; Khó khăn trong việc xác định mô hình đi-ốt PIN cho phần tử mảng phản xạ tái cấu hình; Khó khăn trong việc thiết kế và tối ưu anten mảng phản xạ tái cấu hình do anten này là một hệ anten bao gồm anten loa và mảng phản xạ.

Trên cơ sở đó, NCS đã chọn đề tài nghiên cứu là "Nghiên cứu giải pháp cải thiện băng thông và tăng ích của anten mảng phản xạ tái cấu hình cho các hệ thống thông tin vô tuyến". Đề tài này sẽ đề xuất các giải pháp để khắc phục các khó khăn đó.

1.4 Kết luận chương 1

Chương 1 trình bày về các hệ thống thông tin vô tuyến, xu hướng bùng nổ dịch vụ băng rộng và sự cần thiết sử dụng anten điều hướng búp sóng trong các hệ thống này. Bốn loại anten điều hướng búp sóng cũng được trình bày, so sánh và đánh giá ưu nhược điểm của chúng.

Tiếp theo đó, lý thuyết về anten MPXTCH cũng đã được trình bày để làm rõ nguyên lý hoạt động của chúng. Cuối cùng, để có cơ sở xác định được hướng nghiên cứu và đề xuất các cấu trúc anten, luận án thực hiện đánh giá, so sánh các linh kiện tích cực dùng để tái cấu hình mảng phản xạ, phân tích và đánh giá các xu hướng nghiên cứu và các kết quả nghiên cứu mới nhất hiện nay. Trên cơ sở đó, NCS đã chọn hướng nghiên cứu cụ thể cho luận án.

Chương 2

Thiết kế phần tử mảng phản xạ tái cấu hình băng rộng

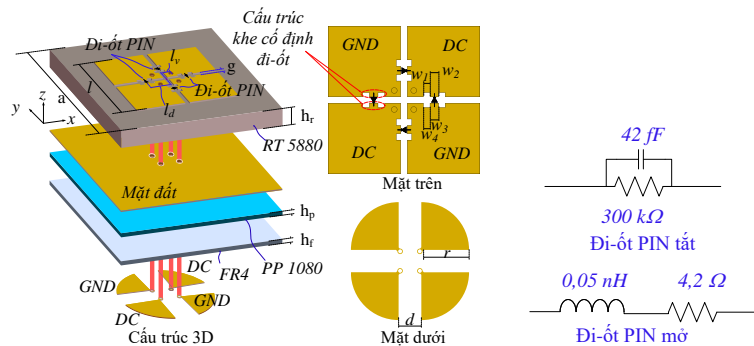
Trong chương này, NCS sẽ đề xuất một giải pháp mô hình đi-ốt PIN và ba kiểu phần tử tái cấu hình như sau:

- Phần tử MPXTCH băng rộng hai lớp;
- Phần tử MPXTCH một lớp;
- Phần tử MPXTCH một lớp quay phân cực (QPC).

2.1 Thiết kế phần tử MPXTCH hai lớp

2.1.1 Cấu trúc của phần tử MPXTCH hai lớp

Cấu trúc của phần tử này cùng mô hình đi-ốt PIN MADP-000907-14020 (MADP) sử dụng để thiết kế phần tử được mô tả trong Hình 2.1. Phần tử này có kích thước 12 mm, bao gồm hai lớp điện môi RT5880, FR4 và lớp keo PP1080 (có đặc tính và hằng số điện môi như lớp FR4 sau khi ghép lớp và đông cứng). Lớp kim loại trên cùng là bốn anten vi dải hình chữ nhật, là cấu trúc cộng hưởng chính của phần tử. Lớp kim loại thứ hai là lớp đất (mặt đất). Lớp kim loại thứ ba là bốn cấu trúc giả đất kiểu hình quạt, hoạt động như các bộ lọc, ngăn tín hiệu cao tần từ lớp kim loại trên cùng truyền vào bảng mạch điều khiển. NCS đã sử dụng bốn đi-ốt PIN để tái cấu hình phần tử, thay đổi cấu trúc cộng hưởng của phần tử. Bốn đi-ốt này được điều khiển bởi một bit thông qua bốn lỗ khoan từ mặt đất đến mặt trên. Kích thước cụ thể như sau (đơn vị là mili-mét): $a = 12$; $l_d = 1,4$; $h_p = 0,1$; $d = 1,21$; $w_3 = 0,2$; $l = 7$; $g = 0,3$; $h_f = 0,18$; $w_1 = 0,4$; $w_4 = 0,5$; $l_v = 0,5$; $h_r = 3,175$; $r = 1,8$; $w_2 = 0,3$.



Hình 2.1: Cấu trúc phần tử hai lớp và mô hình đi-ốt PIN.

2.4 So sánh ba phần tử mảng phản xạ tái cấu hình đề xuất

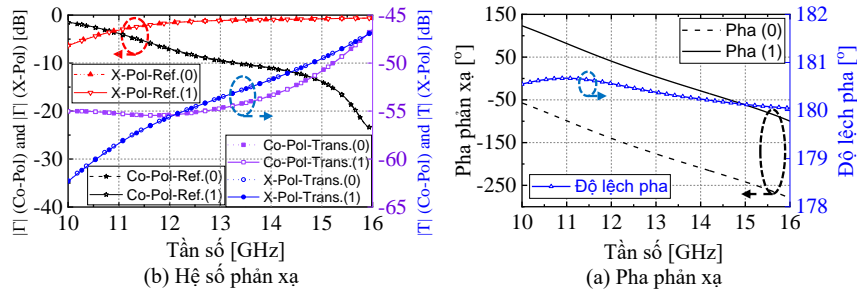
Kết quả trong Bảng 2.5 cho thấy: ba phần tử đều có đặc tính băng thông rộng, từ 28,5% đến 40,6%; Hệ số phản xạ cũng có kết quả rất tốt, đều lớn hơn -2 dB mặc dù tất cả phần tử đều sử dụng 4 đi-ốt PIN. Phần tử hai lớp có hệ số phản xạ cao nhất do sử dụng đi-ốt MADP-000907-14020 của hãng MACOM; Phần tử một lớp quay phân cực có hệ số phản xạ thấp nhất, tuy nhiên, đây là phần tử quay phân cực nên có sự hao hụt năng lượng do sự chuyển đổi phân cực; Phần tử một lớp, không quay phân cực mặc dù sử dụng đi-ốt SMP-1340-040 nhưng hệ số phản xạ đạt được khá tốt với hiệu suất phản xạ trung bình khoảng 90%. Nhờ có cấu trúc đối xứng, cả hai phần tử không quay phân cực đều có thể sử dụng cho cả phân cực tuyến tính và phân cực tròn, còn phần tử quay phân cực chỉ mới nghiên cứu ở phân cực tuyến tính. Hai phần tử không quay phân cực cũng đã được đo kiểm bằng ống dẫn sóng với kết quả đo tương đối phù hợp với kết quả mô phỏng.

Bảng 2.5: Bảng so sánh các phần tử tái cấu hình 1 bit đã đề xuất.

Kiểu phần tử	f [GHz]/BW	Loại đi-ốt PIN	Số lượng đi-ốt PIN	Số lớp/độ dày [mm]	Γ “tắt”/“mở” [dB]	Phân cực
Hai lớp	10,4 - 15,7/ 40,6%	MADP	4	2/3,405	-0,9 đến -1,4/ -0,05	DL, CP
Một lớp	9,2 - 13,9/ 40,6%; 33,8%**	SMP	4	1/3,175	-0,16 đến -1,7	DL, CP
Một lớp, QPC	12 - 16/ 28,5%	MADP	4	1/3,175	-0,8 đến -2	DL, RP

2.5 Kết luận chương 2

Trong Chương 2, luận án đã tập trung đề xuất ba kiểu phần tử mảng phản xạ tái cấu hình 1 bit sử dụng đi-ốt PIN, gồm có: phần tử hai lớp, phần tử một lớp và phần tử một lớp quay phân cực. Các phần tử này có sự cải thiện đáng kể về băng thông so với các nghiên cứu gần đây (từ 33,8% đến 40,6% đối với phần tử không quay phân cực và 28,5% đối với phần tử quay phân cực). Mặc dù tất cả các phần tử đều sử dụng 4 đi-ốt PIN để tái cấu hình nhưng hệ số phản xạ trong băng thông đều đạt kết quả khá tốt, tương đồng với các nghiên cứu gần đây. Với kết quả như vậy, ba phần tử này đều có thể sử dụng để thiết kế anten mảng phản xạ tái cấu hình 1 bit băng thông rộng, tăng ích cao. Ba kết quả nghiên cứu này cũng đã công bố trong các tài liệu [J1, J2, C2].



Hình 2.10: Đặc tính phản xạ của phần tử một lớp QPC.

2.10 cho thấy: phần tử có hiệu suất bức xạ theo phân cực chéo khá tốt trong dải tần số từ 12 GHz đến 16 GHz. Hệ số phản xạ theo phân cực chéo luôn lớn hơn -2 dB, trong khi đó, hệ số phản xạ của thành phần phân cực thuận luôn nhỏ hơn -7 dB. Ở các tần số thấp hơn 12 GHz, tỷ lệ chuyển đổi phân cực thấp dần dần đến mức phân cực chéo chỉ đạt khoảng -6 dB tại tần số 10 GHz. Pha phản xạ của thành phần phân cực chéo có độ lệch pha khoảng 180° trong dải tần từ 10 GHz đến 16 GHz. Các hệ số truyền của thành phần phân cực thuận và phân cực chéo đều nhỏ hơn -47 dB. Điều đó cho thấy rằng: các tụ điện đã đóng khe hở về mặt tín hiệu RF tại mặt đất nên chỉ có một lượng rất nhỏ năng lượng trường điện từ rò rỉ ra ngoài.

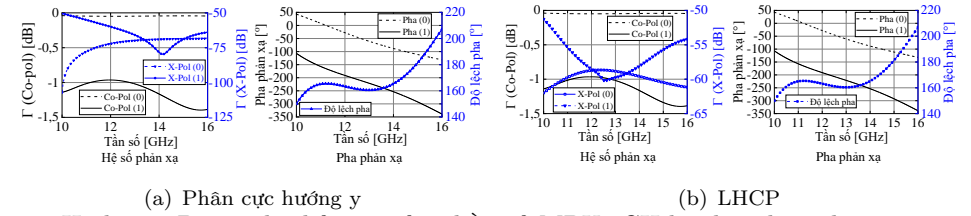
2.3.3 Đánh giá tính năng của phần tử một lớp QPC

Bảng 2.4: Bảng so sánh phần tử đề xuất với các phần tử QPC khác.

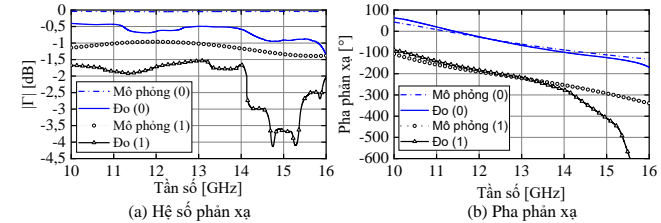
TLTK/ Năm	f [GHz]/BW (%)	No. đi-ốt PIN	Số lớp /độ dày [mm]	$ \Gamma $ [dB]	Phân cực
[86]/2016 (1 bit)	12 - 14,5/ 8,8%	4	4/KCB	-0,5 đến -1	DL, CP, RP
[80]/2021 (1 bit)	11,6 - 14,3/ 20,8%	2	2/3,357	-1,2 đến -2,5	SL, RP
Nghiên cứu này	12 - 16/ 28,5%	4	1/3,175	-0,8 đến -2	DL, RP

Bảng 2.4 cho thấy: phần tử này có băng thông khá tốt, đạt 28,5%. Hệ số phản xạ của phần tử này cũng đạt khá tốt, chỉ nhỏ hơn nghiên cứu [86] mặc dù phần tử này dùng đến 4 đi-ốt PIN. Các kết quả này đạt được những kết quả trên nhờ các yếu tố sau: cấu trúc phần tử đối xứng; hiệu suất chuyển đổi phân cực của cấu trúc; đi-ốt PIN có hệ số suy hao thấp; kết cấu một lớp (suy hao thấp). Cụ thể, cấu trúc một lớp kết hợp với tụ điện đã loại bỏ được các cấu trúc phụ (phục vụ cấp nguồn để điều khiển đi-ốt PIN), từ đó giảm hiện tượng rò rỉ và phản xạ. Về phân cực, nhờ cấu trúc đối xứng, phần tử này có thể hoạt động ở phân cực tuyến tính đôi hoặc đơn.

2.1.2 Kết quả mô phỏng của phần tử hai lớp



Hình 2.2: Đặc tính phản xạ của phần tử MPXTCH hai lớp theo phân cực.



Hình 2.3: Kết quả đo và mô phỏng của phần tử hai lớp.

Phần tử được mô phỏng theo phương pháp chu kỳ với nguồn phát là sóng phẳng từ cổng Floquet. Kết quả mô phỏng được trình bày trên Hình 2.2. Phần tử phản xạ có kết quả mô phỏng rất tốt cho cả phân cực tuyến tính và phân cực tròn. Hệ số phản xạ theo phân cực thuận (Co-Pol: phân cực thuận) gần như bằng 0 dB đối với trạng thái đi-ốt “tắt” và từ -1,2 dB đến khoảng -0,9 dB đối với trạng thái đi-ốt “mở”. Băng thông của phần tử theo độ lệch pha $180^\circ \pm 20^\circ$ cho cả hai phân cực là từ 10,4 GHz đến 15,7 GHz, tương đương với 40,6%.

Phần tử được chế tạo và đo bằng máy phân tích mạng véc-tơ Keysight N5242A (VNA) thông qua cáp cao tần và ống dẫn sóng WR75 tại Phòng thí nghiệm của Khoa Vô tuyến điện tử, Học viện Kỹ thuật Quân sự. Kết quả đo và mô phỏng của phần tử (xem Hình 2.3) cho thấy: Hệ số phản xạ có sai lệch từ 0,5 dB đến gần 1 dB đối với các tần số lớn hơn 14 GHz. Pha phản xạ của trạng thái “tắt” và “mở” có sự tương đồng với kết quả mô phỏng trong dải tần này. Với tần số lớn hơn 14 GHz, do đi-ốt PIN phi tuyến và chất lượng phần tử không tốt dẫn đến sự sai khác rất lớn giữa hai đặc tuyến pha mô phỏng và đo.

2.1.3 Đánh giá phần tử MPXTCH hai lớp

Bảng 2.1 cho thấy phần tử này có sự vượt trội về băng thông so với các công trình khác. Do sử dụng bốn đi-ốt PIN, hệ số phản xạ của phần tử có suy hao cao ở trạng thái “mở”, chỉ thấp hơn tài liệu [80]. Ngoài ra, phần tử này cũng có thể làm việc với cả hai phân cực tuyến tính và phân cực tròn. Hạn chế của

Bảng 2.1: So sánh phần tử hai lớp đề xuất với các phần tử đã công bố.

TLTK/năm	f [GHz]/BW	No. đi-ốt	Số lớp	$ \Gamma $ Mở/Tắt [dB]	Phân cực
[48]/2019	4,7-5,3/12%	1	2	-0,1 đến -0,9	SL
[80]/2021	11,6-14,3/20,8%	2	3	Lớn hơn -1,7	SL
Đề xuất này	10,4-15,7/40,6%	4	2	-0,9 đến -1,4/ -0,05	DL, CP

phần tử này là chi phí cao do sử dụng cấu trúc nhiều lớp và bốn đi-ốt PIN rất đắt. Đây cũng là lý do NCS đề xuất sử dụng cấu trúc anten một lớp và đi-ốt PIN giá rẻ (SMP-1340-040) cho nghiên cứu trong Mục 2.2.

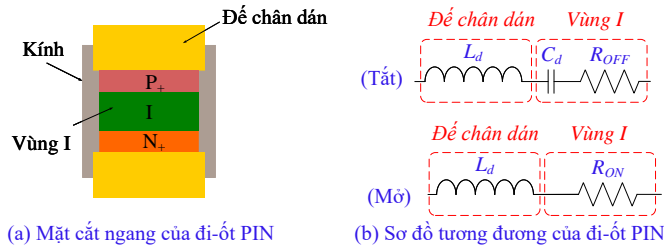
2.2 Thiết kế phần tử một lớp sử dụng đi-ốt PIN đã mô hình hóa

Trong trong mục này, luận án sẽ đề xuất một giải pháp mô hình đi-ốt PIN và đề xuất một phần tử MPXTCH một lớp sử dụng đi-ốt PIN đã mô hình hóa.

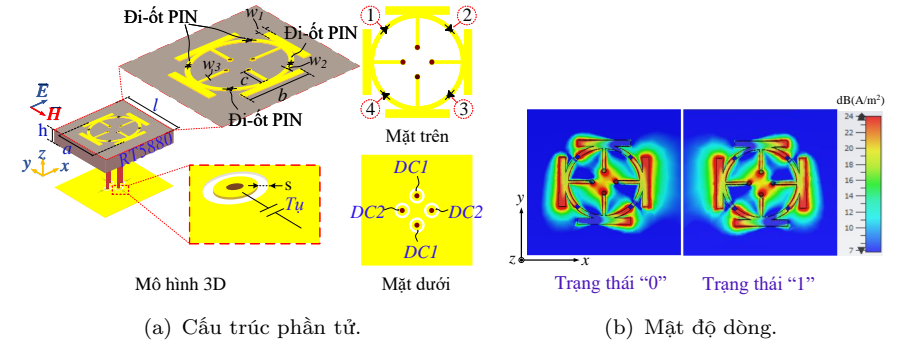
2.2.1 Mô hình đi-ốt PIN

Mô hình đi-ốt PIN cho phần tử MPXTCH vẫn còn là một thách thức và không có tài liệu nào công bố hoặc đưa ra giải pháp hợp lý để mô hình hóa đi-ốt PIN.

Cấu tạo của đi-ốt PIN bao gồm: hai đế chân dẫn kim loại ở hai đầu một lớp P^+ , một lớp N^+ và một vùng không có điện tích (Vùng “I”) như trong Hình 2.4a. Khi sử dụng cho phần tử MPXTCH, đi-ốt PIN chỉ hoạt động ở chế độ chuyển mạch với hai trạng thái: “tắt” và “mở”. Sơ đồ mạch tương đương của đi-ốt PIN ở chế độ chuyển mạch được trình bày trong Hình 2.4b [110]. Ở trạng thái “mở”, đi-ốt PIN được mô hình như một điện trở R_{ON} mắc nối tiếp với một cuộn cảm L_d . R_{ON} thể hiện đặc tính của vùng “I” khi được lấp đầy lỗ trống và electron còn cuộn cảm L_d là mô hình của chân dẫn kim loại của đi-ốt. Đi-ốt PIN ở trạng thái “tắt” được mô hình như một điện trở R_{OFF} nối tiếp với một tụ điện C_d và một cuộn cảm L_d . R_{OFF} và C_d thể hiện các đặc tính của vùng



Hình 2.4: Cấu trúc và sơ đồ tương đương tổng quát của đi-ốt PIN.



Hình 2.9: Cấu trúc phần tử một lớp QPC và phân bố dòng mô phỏng.

Bảng 2.3: Trạng thái của phần tử tái cấu hình QPC.

Trạng thái phần tử	Trạng thái pha	DC1/DC2	Đi-ốt PIN 1, 3	Đi-ốt PIN 2, 4
0	0°	+V/0	“Mở”	“Tắt”
1	180°	0/+V	“Tắt”	“Mở”

của phần tử chỉ một cặp đi-ốt PIN được mở như trong Bảng 2.3. Do các cung tròn này đối xứng qua đường chéo, khi kích thích một sóng điện từ theo hướng cố định nào đó (ví dụ là hướng phân cực y) tín hiệu nhận từ nguồn cấp, truyền dọc theo các cung, phản xạ trở lại, tạo nên sóng dừng. Khi đó, phần lớn năng lượng điện từ trường phát xạ theo hướng phân cực x , tạo ra sự chuyển đổi phân cực. Bốn lưỡng cực được thêm vào cạnh các cung tròn tạo ra sự cách ly phân cực tốt hơn. Mỗi cung tròn được ngăn mạch với lớp đất thông qua một đường mạch vi dải và một lỗ mạ, cho phép điều khiển các đi-ốt PIN. Lớp đất được xẻ rãnh thành bốn tấm vi dải hình tròn quanh lỗ mạ như trong Hình 2.9a và các tín hiệu DC được kết nối tới các tấm mạch vi dải này để điều khiển đi-ốt PIN. Bốn tụ điện 30 pF dùng để nối bốn mạch vi dải đó với mặt đất còn lại để giảm sự rò rỉ năng lượng điện từ trường qua các khe hở này. Tín hiệu DC1 và DC2 điều khiển “tắt/mở” các đi-ốt như Bảng 2.3 để tạo ra hai trạng thái pha lệch nhau 180° .

2.3.2 Kết quả mô phỏng của phần tử một lớp QPC

Hình 3D về mật độ dòng điện của phần tử tại tần số 14 GHz ở hai trạng thái “tắt” và “mở” được trình bày trong Hình 2.9b cho thấy: mật độ dòng ở hai trạng thái này là trái ngược nhau. Do đó, sóng điện từ phát xạ từ hai trạng thái dòng điện này sẽ có độ lệch pha khoảng 180° . Kết quả mô phỏng ở Hình

Bảng 2.2: Bảng so sánh phần tử một lớp băng rộng với các công bố khác.

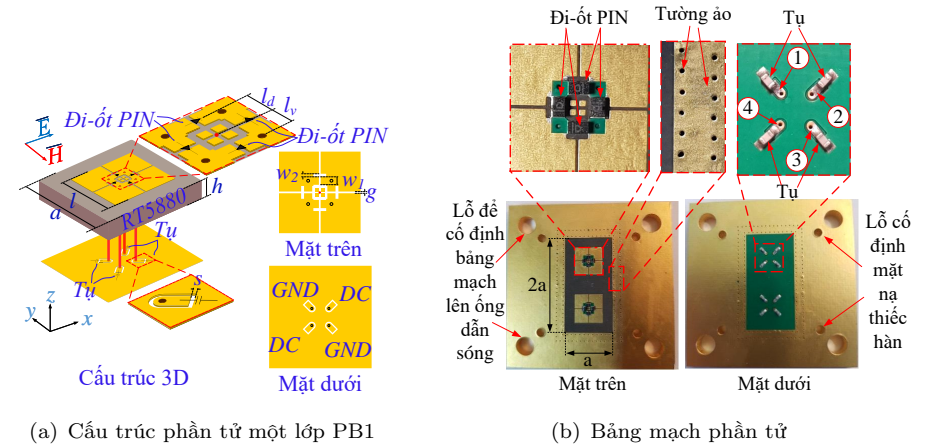
TLTK/ Năm	[86]/ 2016	[48]/ 2019	[80]/ 2021	[70]/ 2022	Nghiên cứu này
f (GHz)	12,0 - 14,5	4,7 - 5,3	11,6 - 14,3	12,9 - 16,5	9,2 - 13,9
Băng thông (%)	18,8	12	20,8	23,8	40,6*; 33,8**
Số lượng đi-ốt	4	1	2	1	4
Đi-ốt PIN	KCB	SMP	MADP	MADP	SMP
Số lớp	4	2	2	2	1
Độ dày (mm)	NP	2,7	3,357	2,54	3,175
$ Γ $ (dB)	-0,5 đến -1	-0,1 đến -0,9	-1,66 đến -1,7	-0,1 đến -0,6	-0,16 đến -1,7
Phân cực	DL, CP, RP	SL	SL	SL	DL; CP

cho phân cực tuyến tính và phân cực tròn trong khi các công bố mới nhất gần đây chỉ sử dụng cho phân cực tuyến tính đơn [48, 80, 70]. Cụ thể, băng thông của phần tử này đạt từ 33,8% cho phân cực tròn và 40,6% cho phân cực tuyến tính, còn hai nghiên cứu mới nhất cũng chỉ đạt khoảng 20% cho phân cực tuyến tính [80, 70]. Đối với phân cực tròn, băng thông của nghiên cứu [86] cũng chỉ đạt khoảng 18%. Một ưu điểm khác của phần tử này là cấu trúc đơn giản và độ bền cao hơn các phần tử của các nghiên cứu khác trong bảng này vì nó chỉ sử dụng một lớp chất nền còn các phần tử khác đều sử dụng cấu trúc từ 2 đến 4 lớp. Vì vậy, phần tử này cũng có chi phí chế tạo và thử nghiệm thấp hơn các phần tử khác và có ưu thế để chế tạo các mảng lớn với hàng trăm, hàng nghìn phần tử. Đối với hệ số phản xạ, do sử dụng 4 đi-ốt PIN nên phần tử có suy hao cao hơn nên hệ số phản xạ thấp hơn các nghiên cứu khác [86, 48, 70]. Tuy nhiên, giá trị này có thể chấp nhận được (vẫn lớn hơn -2 dB), tương tự như tài liệu [80]. Với những kết quả như vậy, phần tử này có thể sử dụng để thiết kế các anten mảng phản xạ tái cấu hình băng rộng.

2.3 Thiết kế phần tử mảng phản xạ tái cấu hình quay phân cực sử dụng cấu trúc một lớp

2.3.1 Cấu trúc của phần tử MPXTCH một lớp QPC

Cấu trúc của phần tử như trong Hình 2.9a còn kích thước chi tiết của nó như sau (đơn vị là mili-mét): $h = 3,175$; $l = 12$; $a = 6,4$; $b = 4$; $c = 1,9$; $g = 0,035$; $w_1 = 0,5$; $w_2 = 0,3$; $w_3 = 0,2$; $s = 0,15$. Phần tử này hoạt động trong dải tần từ 11 GHz đến 16 GHz. Thành phần cộng hưởng chính của phần tử là hình tròn ở lớp trên cùng. Hình tròn này được chia thành bốn cung tròn và chúng được nối với nhau bằng bốn đi-ốt PIN. Bốn đi-ốt này được chia thành hai cặp: 1 và 3; 2 và 4. Để tạo ra cấu trúc QPC, tại mỗi trạng thái “0” hoặc “1”

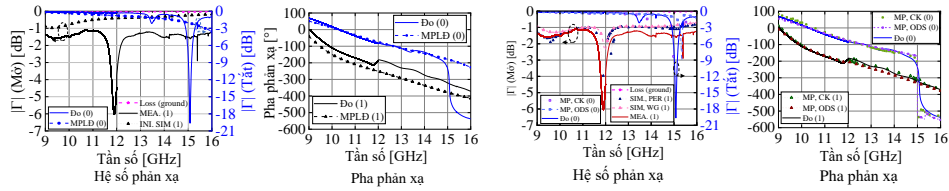


Hình 2.5: Bảng mạch phần tử một lớp phiên bản 1 đã chế tạo.

“1” khi không có điện tích, còn L_d mô phỏng đặc tính của chân dán kim loại của đi-ốt, tương tự như ở trạng thái “mở”. Như vậy, đi-ốt PIN là linh kiện tích cực, có thể thay đổi tham số để điều chỉnh đặc tính cộng hưởng của phần tử và cũng là linh kiện có tổn hao. Các điện trở R_{ON} và R_{OFF} sẽ là thành phần gây tổn hao năng lượng điện từ trường trong nội bộ phần tử sử dụng linh kiện này còn các thành phần L_d và C_d góp phần làm thay đổi đặc tính cộng hưởng của phần tử đó. Thông thường, hầu hết các giá trị thành phần L_d , R_{ON} , R_{OFF} và C_d đều bị thay đổi theo từng điều kiện hoạt động cụ thể như tần số, chất nền sử dụng, dòng điện và điện áp điều khiển...

NCS chọn đi-ốt PIN SMP-1340-040 (SMP) của hãng Skywork để mô hình hóa vì nó có chi phí thấp hơn khoảng bằng 1/8 so với đi-ốt MADP-000907 và bằng 1/15 so với đi-ốt MA4AGP907 của hãng MACOM mặc dù nó phi tuyến và suy hao cao hơn các đi-ốt PIN đó. Mạch tương đương của đi-ốt này giống như một đi-ốt PIN thông thường như đã trình bày ở Hình 2.4b. Để mô hình hóa được đi-ốt này, NCS đã thực hiện một quy trình gồm bốn bước như sau:

Bước 1: Thiết kế một phần tử ban đầu (phiên bản 1) (xem Hình 2.5a) sử dụng mô hình đi-ốt ban đầu được ($L_d = 500$ pH, $C_d = 100$ fF, $R_{ON} = 1$ Ω và $R_{OFF} = 10$ Ω) [77]. Kích thước của phần tử là 12 mm x 12 mm. Chỉ một lớp chất nền Duroid RT5880 (hằng số điện môi là 2,2) và hai lớp đồng được sử dụng để thiết kế phần tử. Kích thước chi tiết của cấu trúc như sau (đơn vị là mili-mét): $a = 12$, $l = 7$, $h = 3,175$, $l_d = 1$, $l_v = 1$, $g = 0,15$, $s = 0,15$, $w_1 = 0,7$, $w_2 = 0,25$.



(a) Mô hình ban đầu.

(b) Mô hình đã xác định.

Hình 2.6: Kết quả đo và mô phỏng của phần tử PB1 theo hai mô hình đi-ốt PIN

Bước 2: Mô phỏng, chế tạo và đo phần tử phiên bản 1 đã được thiết kế ở Bước 1. Phần tử phiên bản 1 được chế tạo (xem Hình 2.5b) và đo kiểm bằng ống dẫn sóng WR75 như phần tử hai lớp để xác định sai số mô hình đi-ốt PIN. So sánh kết quả đo và mô phỏng trong Hình 2.6a cho thấy hai kết quả sai lệch với nhau rất lớn là do các nguyên nhân sau: mô hình đi-ốt PIN chưa phù hợp và cấu hình phương pháp mô phỏng chưa tương hợp với điều kiện đo.

Bước 3: Cấu hình phương pháp mô phỏng. Trong phần này, điều kiện phương pháp mô phỏng được thiết lập để tương đồng với điều kiện thực tế truyền sóng trong ống dẫn sóng. Cụ thể, góc tới được điều chỉnh để thay đổi theo tần số và mặt phẳng chuẩn được thiết lập tại bề mặt của phần tử tương tự như phép đo.

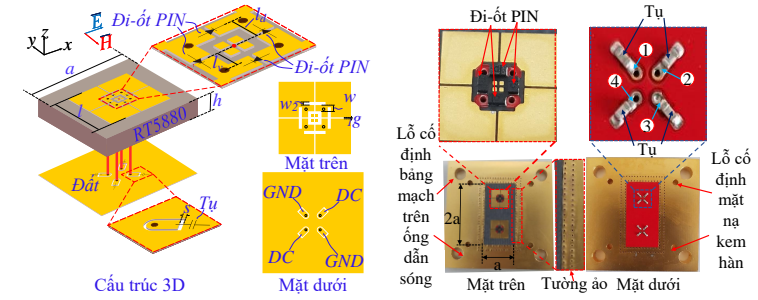
Bước 4: Thực hiện vòng lặp mô phỏng-điều chỉnh-mô phỏng để xác định mô hình đi-ốt PIN thực tế. Các tham số L_d , R_{ON} , R_{OFF} và C_d được lần lượt thêm các giá trị biến thiên ΔL_d , ΔR_{ON} , ΔC_d và ΔR_{OFF} và chúng được điều chỉnh theo từng bước trong các vòng lặp để đưa hệ số phản xạ mô phỏng tương đồng với kết quả đo. Mô hình đi-ốt PIN mới được xác định như sau: $R'_{ON} = 2,5 \Omega$, $L'_d = 122 \text{ pH}$, $C'_d = 0,125 \text{ pF}$ và $R'_{OFF} = 5 \Omega$. Kết quả ở Hình 2.6b cho thấy có sự tương hợp giữa kết quả đo và mô phỏng cả về hệ số phản xạ và pha chứng minh mô hình đi-ốt PIN đã đúng.

2.2.2 Thiết kế và tối ưu phần tử MPXTCH một lớp băng rộng sử dụng đi-ốt PIN đã mô hình hóa

Trên cơ sở mô hình đi-ốt PIN đã xác định, NCS đã thiết kế phần tử băng rộng (phiên bản 2) bằng cách điều chỉnh một số các tham số của phiên bản 1 thành các giá trị như sau (đơn vị là mili-mét): $l_d = 0,95$, $l_v = 0,85$, $g = 0,12$, $w_1 = 0,6$ và $w_2 = 0,3$ để đạt được độ lệch pha khoảng 180° giữa trạng thái “mở” và “tắt” như Hình 2.7a.

2.2.3 Đặc tính phản xạ của phần tử một lớp băng rộng

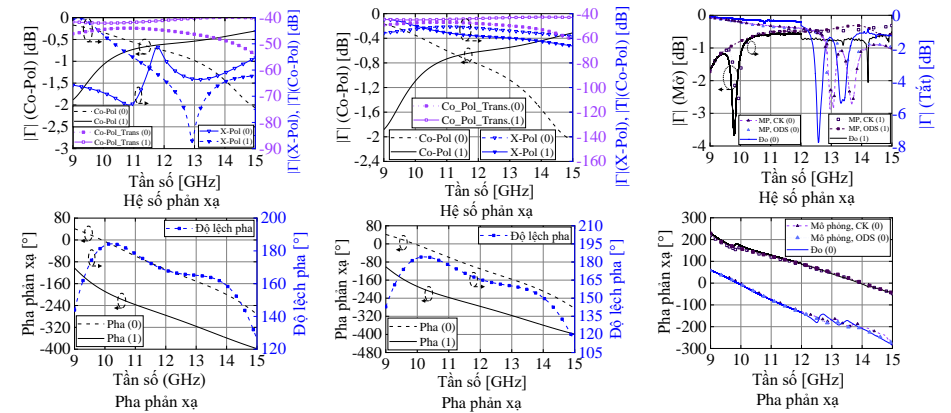
Phần tử phiên bản 2 được mô phỏng, chế tạo (xem Hình 2.7b) và đo kiểm. Kết quả (xem Hình 2.8) cho thấy: phần tử có băng thông dịch pha $180^\circ \pm 20^\circ$ là



(a) Cấu trúc của phần tử.

(b) PT một lớp đã chế tạo.

Hình 2.7: Cấu trúc và bảng mạch của phần tử băng rộng



(a) Hướng y .

(b) LHCP.

(c) Kết quả đo.

Hình 2.8: Đặc tính phản xạ theo phân cực và kết quả đo của phần tử một lớp.

40,6% (từ 9,2 GHz đến 13,9 GHz) theo phân cực tuyến tính hướng y và 33,8% (từ 9,26 GHz đến 13,03 GHz) theo phân cực LHCP. Hệ số phản xạ của phần tử đều lớn hơn $-1,7 \text{ dB}$. Hệ số phản xạ mô phỏng có sự tương đồng với kết quả đo tuy nó có sự sai lệch tần số khoảng 500 MHz. Pha phản xạ mô phỏng có sự tương đồng khá tốt với kết quả đo trong cả hai trạng thái. Điều đó một lần nữa kiểm chứng tính đúng đắn của mô hình đi-ốt PIN và chứng minh đặc tính băng rộng của phần tử. Với kết quả này, phần tử có thể được sử dụng để thiết kế anten MPXTCH băng thông rộng.

2.2.4 Đánh giá phần tử MPXTCH băng rộng một lớp

Bảng 2.2 cho thấy: Phần tử có băng thông tốt nhất mặc dù nó sử dụng đi-ốt PIN SMP-1340-040. Nhờ cấu trúc đối xứng, phần tử này cũng có thể sử dụng

