

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG



Nguyễn Như Thành

**NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ MẢNG THỬA
CHO MẢNG ĂNG-TEN TÍCH CỰC**

Chuyên ngành
Mã số:

Kỹ thuật viễn thông
8.52.02.08

TÓM TẮT ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ

HÀ NỘI – NĂM 2024

Đề án tốt nghiệp được hoàn thành tại:
HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG

Người hướng dẫn khoa học: PGS.TS. Nguyễn Tiến Ban

Phản biện 1: PGS.TS Lê Hải Châu

Phản biện 2: PGS.TS Hà Duyên Trung

Đề án tốt nghiệp sẽ được bảo vệ trước Hội đồng chấm đề án tốt nghiệp thạc sĩ tại
Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông

Vào lúc: 9 giờ 15 ngày 13 tháng 06 năm 2024

Có thể tìm hiểu đề án tốt nghiệp tại:

- Thư viện của Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông.

cần được tính toán chi tiết. Ngoài ra, công nghệ này kết hợp với các yếu tố khác như dạng chấn tử ăng-ten, phân tập tần số để cải thiện tốt hơn hiệu suất của hệ thống ăng-ten mảng thưa tích cực. Nhờ những cải tiến này, độ chính xác và hiệu quả của hệ ăng-ten có thể được nâng cao, mở ra nhiều ứng dụng thực tế tiềm năng. Hiện tại các tính toán tối ưu đang được đưa vào đề án là sử dụng mô hình chấn tử ăng ten đẳng hướng. Hướng phát triển tiếp theo của đề án là tính toán tối ưu có quan tâm đến các tham số của từng chấn tử ăng ten để tăng hiệu quả và tính tương đồng trong toàn bộ phạm vi quét của ăng ten mảng tích cực.

I. MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài

Với sự phát triển của thế hệ mạng viễn thông thế hệ thứ 5 (5G) và ra-đa sử dụng công nghệ ăng-ten mảng pha, ăng-ten mảng pha tích cực đóng vai trò quan trọng và quyết định chất lượng cũng như tính năng của các sản phẩm. Trong ăng-ten mảng tuyến tính đồng dạng (ULA – Uniform Linear Array), việc tăng số phần tử ăng-ten tích cực tương đương với việc tăng số lượng các kênh thu phát, làm tăng độ phức tạp của hệ thống gây nên chi phí sản xuất và tổn hao về năng lượng tiêu thụ. Thông thường, để giảm số phần tử ăng-ten (bao gồm phần tử thu – phát) mà vẫn giữ được độ rộng mặt mở ăng-ten, khoảng cách giữa hai phần tử ăng-ten liên tiếp có thể được sắp xếp lớn hơn một nửa bước sóng ($> \lambda/2$). Tuy nhiên, khi khoảng cách giữa các ăng-ten lớn sẽ gây ra các hài bấu bên (grating lobe) cao và làm giảm chất lượng của hệ thống.

Kiến trúc ăng-ten mảng thưa được áp dụng kết hợp với các thuật toán lựa chọn vị trí chấn tử, điều chỉnh trọng số pha – biên độ của các chấn tử để giảm thiểu và loại bỏ các nhược điểm đã nêu trên. Ưu điểm của công nghệ này là vừa đảm bảo các thông số chính của hệ thống ăng-ten mảng pha cỡ lớn vừa tối ưu chi phí và độ phức tạp của hệ thống. Tuy nhiên, khi ứng dụng công nghệ mảng thưa cho ăng-ten mảng pha tích cực, các tham số như phạm vi lái tia điện, mức búp bên cần được nghiên cứu cải thiện.

Các đặc điểm chính của công nghệ mảng thưa và ăng-ten mảng tích cực cùng với ưu/nhược điểm của các công nghệ này là lý do để học viên lựa chọn đề tài: “**Nghiên cứu ứng dụng công nghệ mảng thưa cho mảng ăng-ten tích cực**”.

2. Tổng quan về vấn đề nghiên cứu

Có nhiều phương pháp tạo dạng kiến trúc ăng-ten mảng thưa đã được đề cập trong các nghiên cứu trước đây. Phương pháp MRA (Minimum Redundancy Arrays) có hiệu quả và tính ứng dụng cao trong truyền thông thiên văn học và cũng được ứng dụng trong truyền thông số. Tương tự, phương pháp MHA (Minimum Hold Arrays) cũng được ứng dụng nhiều trong truyền thông thiên văn học. Hai phương pháp MRA và MHA là các phương pháp đã được phát triển từ khá lâu, một số giải pháp mới được phát triển gần đây bao gồm CPA (Co-Prime Arrays), NA (Nested Array), SNA (Supper Nested Array). Tuy nhiên, các giải pháp nêu trên chưa đặt yêu cầu cao về mức búp bên và phạm vi quét

điện từ khi áp dụng cho ăng-ten mảng pha tích cực. Ví dụ trong ứng dụng ra-đa, búp bên được yêu cầu ở mức tối thiểu là 25 dB và phạm vi quét tối thiểu là 30 độ. Do đó, để nâng cao tính ứng dụng của công nghệ mảng thừa trong ăng-ten mảng tích cực, ngoài việc xem xét các tham số như hệ số chọn lọc không gian và hệ số tối ưu thành phần, các tiêu chí về mức búp bên và phạm vi quét điện từ được bổ sung nghiên cứu trong đề tài này để cải thiện khả năng hoạt động của hệ thống ăng-ten mảng thừa trong nhiều mảng ứng dụng.

3. Mục đích nghiên cứu

Nghiên cứu nhằm đạt được 2 mục đích chính sau đây:

- Nghiên cứu giải pháp tối ưu tham số khi áp dụng công nghệ ăng-ten mảng thừa cho ăng-ten mảng pha tích cực.
- Xây dựng hệ thống thực tế và đánh giá tham số của giải pháp.

4. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

- Đối tượng nghiên cứu: giải pháp tối ưu tham số công nghệ ăng-ten mảng thừa khi áp dụng cho ăng-ten mảng pha tích cực,
- Phạm vi nghiên cứu: Đề án tập trung vào nghiên cứu giải pháp tối ưu tham số công nghệ ăng-ten mảng thừa khi áp dụng cho ăng-ten mảng pha tích cực. Xây dựng hệ thống thực tế, đánh giá tham số trên hệ thống này.

5. Phương pháp nghiên cứu

Trong quá trình nghiên cứu để đạt được mục tiêu, đề án dự kiến sử dụng các phương pháp:

- Tiếp cận bằng lý thuyết: sử dụng các công thức toán học và cơ sở lý thuyết để đặt vấn đề và giải quyết vấn đề.
- Tiếp cận bằng mô phỏng: sử dụng công cụ mô phỏng MATLAB để mô phỏng và kiểm chứng kết quả từ cơ sở lý thuyết. Đánh giá được hiệu quả của giải pháp thông qua kết quả gián đồ hướng trên mô phỏng.
- Tiếp cận bằng thực tiễn: xây dựng hệ thống thực tế để áp dụng và đánh giá kết quả tính toán và mô phỏng.

KẾT LUẬN

Trong khuôn khổ đề án với mục tiêu "Nghiên cứu ứng dụng công nghệ mảng thừa cho mảng ăng-ten tích cực", đề án đã tiến hành xây dựng tổng quan về công nghệ ăng-ten mảng thừa, phân tích các nhược điểm và định hướng giải quyết của dạng ăng-ten này, đồng thời trình bày kết quả mô phỏng và đo kiểm đánh giá các giải pháp cải thiện. Các nội dung đạt được của đề án được bố cục trong các chương với nội dung như sau:

Chương 1 cung cấp tổng quan về công nghệ ăng-ten mảng thừa. Chương này trình bày định nghĩa và cấu trúc cơ bản của công nghệ ăng-ten mảng và ăng-ten mảng thừa. Ngoài ra, chương cũng đề cập đến các ứng dụng của các kiến trúc ăng-ten này trong thiết kế truyền thông di động, hệ thống ra-đa và truyền thông vệ tinh. Nội dung của chương này cung cấp nền tảng kiến thức cơ bản về công nghệ ăng-ten mảng thừa và các lĩnh vực ứng dụng tiêu biểu.

Chương 2 tập trung vào vấn đề búp sóng bên cao trong kiến trúc ăng-ten mảng thừa và các giải pháp cải thiện. Dựa trên kết quả của các nghiên cứu trước, tác giả nhận thấy mức độ búp bên của các loại ăng-ten này chưa đáp ứng yêu cầu của một số hệ thống, đặc biệt trong lĩnh vực ra-đa. Do đó, chương đề xuất cấu trúc ăng-ten mảng thừa để cải thiện các nhược điểm này. Chương trình bày các giải pháp cụ thể nhằm giảm mức độ búp bên cho từng ứng dụng, sử dụng mẫu bức xạ một chiều (5G, 6G) và hai chiều (ra-đa). Kết quả mô phỏng và phân tích ưu, nhược điểm của từng phương án được trình bày rõ ràng. Các kết quả này sẽ được so sánh với kết quả đo thực nghiệm trên hệ thống.

Chương 3 mô tả chi tiết về hệ ăng-ten mảng thừa thực tế đã đề xuất trong chương 2, cùng với hệ thống thực nghiệm được sử dụng để đo kiểm các thông số búp sóng của ăng-ten. Kết quả đo kiểm đã được ghi nhận và đạt được những kết quả tương tự với kết quả mô phỏng trên phần mềm đo kiểm tự xây dựng. Tuy nhiên, kết quả thông số búp sóng ăng-ten có sai lệch so với kết quả mô phỏng vì một số các lý do khách quan như môi trường đo kiểm phức tạp và sai số trong quá trình lắp đặt hệ thống đo kiểm.

Dựa trên những kết quả đạt được trong đề án, có thể thấy công nghệ ăng-ten mảng thừa là hướng nghiên cứu có tiềm năng được ứng dụng rộng rãi trên các sản phẩm cụ thể và mang lại nhiều lợi ích trong thực tế. Để ứng dụng được hệ ăng-ten này, các đối tượng có thể ứng dụng dạng ăng-ten này cần được cân nhắc để lựa chọn. Bên cạnh đó, các thông số cần tính toán chi tiết như độ lợi ăng-ten, vùng phủ sóng phát xạ, ... cũng

3.4 Kết luận chương

Trong chương 3, tác giả đã trình bày chi tiết hệ ăng-ten mảng thưa thực tế đã đề xuất trong chương 2, bên cạnh đó là hệ thống thực nghiệm để đảm bảo đo kiểm các thông số búp sóng ăng-ten và kết quả đo kiểm búp sóng thực tế. Đánh giá chung, kết quả cho thấy sự tương đồng cao giữa thực nghiệm và lý thuyết đối với trường hợp góc quét 0 độ, tỉ lệ tương đồng giảm dần theo góc quét tăng. Cụ thể, khi quét góc búp sóng thực tế, mức búp bên có xu hướng mở rộng và hình dạng búp bị méo. Hướng góc quét cũng có sai lệch nhỏ hơn 4% so với hướng góc quét mong muốn (dựa trên giá trị lệch góc quét lớn nhất trong các trường hợp quét góc). Các sai số này có thể được giải thích bởi những yếu tố sau: môi trường đo kiểm không lý tưởng, sai số trong quá trình lắp đặt hệ thống đo kiểm, lấy dữ liệu và biến đổi.

II. NỘI DUNG

Nội dung đề án tốt nghiệp được trình bày trong 03 chương như sau:

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ CÔNG NGHỆ ĂNG-TEN MẢNG THƯA

1.1 Giới thiệu về ăng-ten mảng

1.1.1 Ăng-ten mảng

Ăng-ten mảng là sự sắp xếp hình học của tập hợp các phần tử cảm biến riêng lẻ có cùng kiểu bức xạ, các phần tử này được kết nối hoạt động cùng nhau như một ăng-ten duy nhất để truyền hoặc nhận sóng vô tuyến.

a. Ăng-ten mảng tuyến tính

Các phần tử ăng-ten thành phần được sắp xếp dọc theo một trục với một bộ dịch pha. Với cấu trúc này, ăng-ten được bố trí đơn giản nhưng việc điều khiển chùm tia bị giới hạn trong một mặt phẳng.

b. Ăng-ten mảng phẳng

Ăng-ten mảng phẳng bao gồm nhiều ăng-ten riêng lẻ, mỗi ăng-ten được kết nối với một bộ dịch pha riêng. Các ăng-ten được sắp xếp theo cấu trúc ma trận trên một mặt phẳng. Nhờ cấu trúc này, chùm tia tạo ra có thể được lệch trong hai chiều phẳng khác nhau. Tuy nhiên, một nhược điểm của ăng-ten mảng phẳng là cần có số lượng lớn bộ dịch pha.

c. Ăng-ten mảng quét tần số

Trong trường hợp việc điều khiển chùm tia phụ thuộc vào tần số của máy phát, ăng-ten mảng pha được gọi là ăng-ten mảng quét tần số. Ăng-ten mảng quét tần số không sử dụng bộ dịch pha và việc điều khiển chùm tia được thực hiện thông qua việc điều chỉnh tần số của máy phát.

d. Ăng-ten mảng pha

Ăng-ten mảng pha là ăng-ten mảng được điều khiển bằng điện tử để tạo ra chùm sóng vô tuyến, trong đó hình dạng và hướng của mẫu bức xạ có thể thay đổi thông qua việc quét điện tử mà không cần di chuyển ăng-ten về mặt vật lý. Điều này đạt được bằng cách truyền tín hiệu có cùng tần số từ tất cả các phần tử riêng lẻ trong mảng nhưng có

độ lệch, độ dịch pha nhất định giữa mỗi phần tử ăng-ten. Ăng-ten mảng pha gồm hai loại chính là ăng-ten mảng pha thụ động và ăng-ten mảng pha tích cực. Trong nghiên cứu hiện đại, ăng-ten mảng, đặc biệt là ăng-ten mảng pha tích cực, đang thu hút sự quan tâm rất lớn vì những lợi ích mà nó mang lại.

1.1.2 Ứng dụng của ăng-ten mảng

a. Truyền thông di động

Trong truyền thông 5G, các công nghệ như MIMO, đa chùm tia, đa truy cập và mạng siêu mật độ được sử dụng để nâng cao hiệu suất hệ thống trên tần số sóng milimet. Điều này quan trọng để đạt được băng thông rộng, vùng phủ sóng rộng, công suất lớn và khả năng tạo ra nhiều chùm tia độc lập trong môi trường 5G. Một số lợi ích khi ứng dụng kiến trúc ăng-ten mảng trong 5G là tối ưu hóa hiệu suất mạng, bảo đảm kết nối mạng và thúc đẩy phát triển ứng dụng:

b. Hệ thống ra-đa

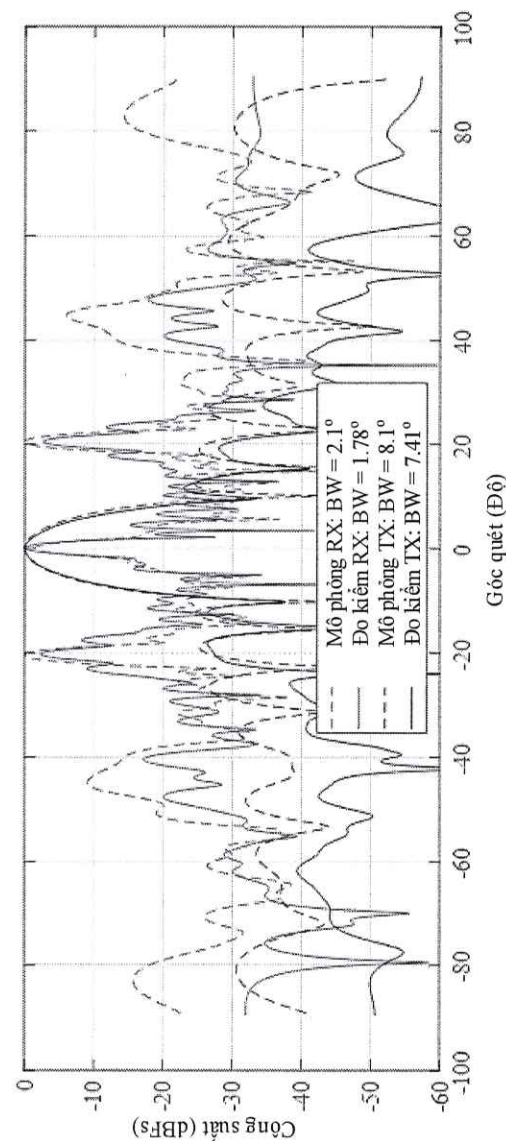
Ăng-ten mảng được sử dụng trong ra-đa để phát hiện, theo dõi và xác định vị trí các đối tượng di động. Một số các sản phẩm ra-đa quân sự thế hệ mới do Viettel sản xuất sử dụng kiến trúc ăng-ten mảng như VRS-SRS, VRS – MRS đã bắt kịp xu hướng với các sản phẩm của các hãng sản xuất ra-đa nổi tiếng trên thế giới như Thales (Pháp), Lockheed Martin (Mỹ), ...

c. Truyền thông vệ tinh

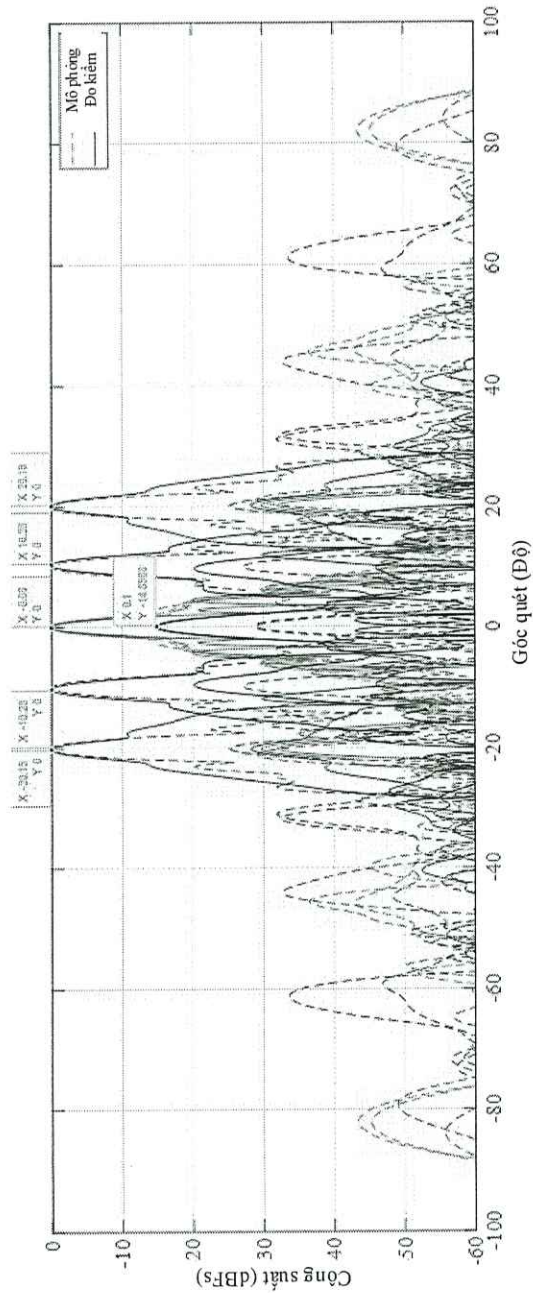
Ăng-ten mảng pha cho phép điều chỉnh góc phát sóng và tạo mẫu pha, điều này mang lại nhiều lợi ích, bao gồm khả năng quét rộng, tạo mô hình phát sóng đa hướng cho phép phục vụ các khu vực hẹp và mật độ dân số cao, beamforming cho phép tập trung tín hiệu vệ tinh vào các khu vực cụ thể, cải thiện chất lượng tín hiệu và giảm nhiễu. Ngoài ra, ăng-ten mảng cũng có khả năng điều chỉnh để tránh nhiễu, đảm bảo ổn định liên lạc trong môi trường khác nghiệt.

1.2 Giới thiệu về công nghệ ăng-ten mảng thưa

Trong kiến trúc ăng-ten mảng, đặc biệt trong các ứng dụng sử dụng nhiều phần tử thu phát (TRM) như ra-đa, giá trị của mỗi TRM thường rất cao (một khối TRM có giá khoảng 16,000 \$). Để giảm chi phí sản xuất và thời gian lắp đặt, kiến trúc ăng-ten mảng thưa đang là một hướng nghiên cứu đang rất được quan tâm.



Hình 3.15. Tương quan độ rộng xung giữa TX và RX lý thuyết và đo kiểm tại góc 0°



Hình 3.14. Búp sóng 2 chiều tại các góc quét $\{0^\circ; \pm 10^\circ; \pm 20^\circ\}$

1.2.1 Cấu trúc và đặc điểm của công nghệ ăng-ten mảng thưa

Ăng-ten mảng thưa tuyến tính là một dạng của mảng tuyến tính không đồng nhất, có độ rộng khẩu độ bằng mảng ULA nhưng mật độ các phần tử thưa hơn so với mảng ULA [20]. Cấu trúc mảng thưa cần ít phần tử phát xạ hơn để cung cấp cùng khẩu độ so với mảng ULA. Phần tử phát xạ đầu tiên và cuối cùng được giả định rằng luôn hoạt động để bảo toàn khẩu độ mảng.

Cấu trúc ăng-ten mảng thưa giảm đáng kể chi phí do giảm số phần tử thu phát và ăng-ten, giảm yêu cầu về nguồn năng lượng và không gian vật lý. Cấu trúc này cũng giúp giảm hiện tượng ghép nối lẫn nhau trong mảng ăng-ten. Tuy nhiên, khả năng thu thập thông tin từ một hướng cụ thể của kiến trúc này có thể bị hạn chế do việc khuyết ăng-ten tại một số vị trí và gia công phức tạp.

1.2.2 Ứng dụng của công nghệ ăng-ten mảng thưa

a. Truyền thông di động

Các mảng ăng-ten yêu cầu khả năng quét rộng để phục vụ các yêu cầu phủ sóng không gian hiện đại như trong các ứng dụng 5G MIMO. Hệ thống 5G khai thác công nghệ tạo chùm tia để tập trung tín hiệu truyền và thu sóng tới các thiết bị di động cụ thể, thay vì phát và thu sóng rộng rãi. Cụ thể, việc triển khai ăng-ten mảng thưa trên các trạm cơ sở là một trong những giải pháp phổ biến. Thiết kế này không chỉ giúp giảm chi phí và độ phức tạp của hệ thống ăng-ten, mà còn giảm nhu cầu về năng lượng và không gian vật lý. Massive MIMO, một trong những kỹ thuật của 5G, sử dụng ăng-ten mảng thưa với hàng trăm cột phát tại các ô cắm cáp, từ đó cải thiện hiệu suất của hệ thống.

b. Hệ thống ra-đa

Kiến trúc ăng-ten mảng thưa được sử dụng tạo ra MIMO ra-đa. Thiết kế mảng ăng-ten thưa cho phép tạo ra các đường tín hiệu phân cực giao thoa, tạo ra các chùm tia phức tạp và đa hướng. Điều này cho phép ra-đa phát hiện và phân loại mục tiêu trong không gian 3D, cải thiện độ chính xác và độ tin cậy của hệ thống.

Đối với ra-đa sử dụng trong quân sự, kiến trúc mảng thưa được áp dụng trong các đài có kích thước và công suất lớn như đài SBX (Sea-based X-band) của Raytheon. So với ra-đa không sử dụng cấu trúc mảng thưa như ra-đa AN/TPY-2, SBX được thiết kế với vùng hoạt động rất lớn, xấp xỉ 40 lần so với AN/TPY-2 mặc dù chỉ có số lượng mô-đun TRM gấp đôi.

c. Truyền thông vệ tinh

Để cung cấp phủ sóng linh hoạt cho dịch vụ vệ tinh, mảng hoạt động với các phần tử kích thích riêng lẻ là giải pháp thay thế hấp dẫn cho ăng-ten phân xạ thông thường. Mảng tuần hoàn truyền thống có chi phí và trọng lượng lớn do số lượng phần tử bức xạ và chuỗi RF. Mảng thưa thớt với bộ bức xạ đẳng điện giảm chi phí và trọng lượng. Các nghiên cứu về tổng hợp mảng thưa cho thấy sự quan tâm lớn đến việc ứng dụng chúng, bao gồm việc tạo ra các chùm bút chì có thể điều khiển để phủ sóng toàn cầu từ quỹ đạo GEO.

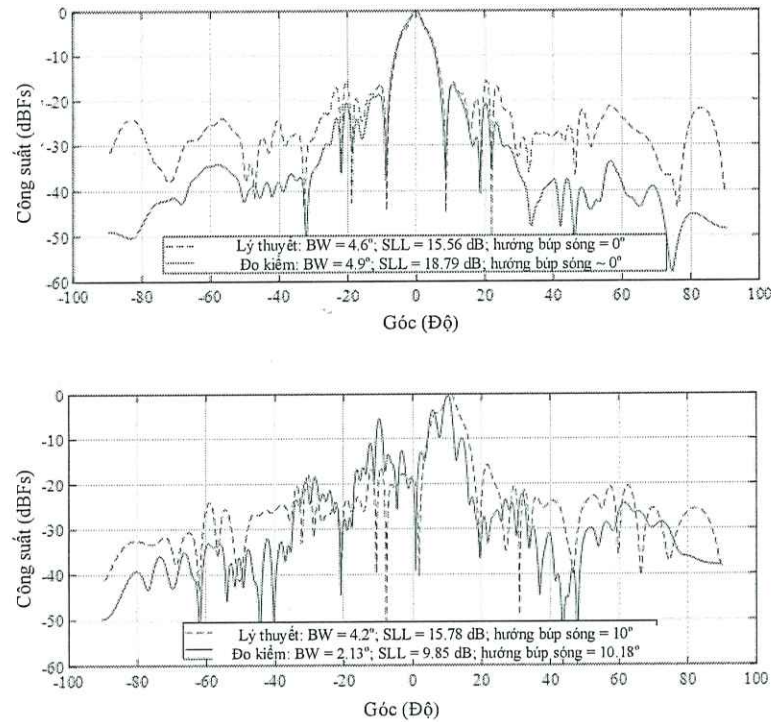
1.3 Kết luận chương

Chương 1 đã giới thiệu các kiến thức cơ bản về định nghĩa và cấu trúc của công nghệ ăng-ten mảng và ăng-ten mảng thưa. Cụ thể, phần 1.1 định nghĩa ăng-ten mảng và trình bày các ưu điểm so với ăng-ten đơn phần tử để tăng khả năng định hướng. Phần 1.2 giới thiệu công nghệ ăng-ten mảng thưa, một hướng nghiên cứu nhằm giảm chi phí nhưng vẫn giữ được các ưu điểm của ăng-ten mảng bằng cách giảm số lượng phần tử. Bên cạnh đó, ứng dụng của các kiến trúc ăng-ten này trong thiết kế truyền thông di động, hệ thống ra-đa và truyền thông vệ tinh cũng được đề cập. Đây là các cơ sở nền tảng của các nghiên cứu tiếp theo về lĩnh vực này.

Bảng 3.4. Kết quả đo kiểm búp sóng hai chiều

STT	Thông số	Tham số tham chiếu	Kết quả		Đánh giá	Ghi chú
			Mô phỏng	Đo kiểm		
1	Mặt mở	Tương đương 64 phần tử ULA	64	64	Đạt	
2	Sidelobe	≥ 20 dB	25 dB	20 dB	Đạt	
3	Độ lợi về số lượng phần tử ăng-ten	≥ 50 %	62.5 %	62.5 %	Đạt	
4	Khả năng quét búp sóng	$-30^\circ \rightarrow 30^\circ$	$-30^\circ \rightarrow 30^\circ$	$-20^\circ \rightarrow 20^\circ$	Không đạt	Sidelobe khi quét búp sóng tăng

Có thể thấy rằng kết quả thực tế và lý thuyết tương đồng với độ chính xác cao nhất tại góc 0° , góc quét càng lớn thì hình dạng và hướng búp sóng sai khác càng lớn do sai số khi lắp đặt ăng-ten, ảnh hưởng của hiện tượng tương hợp (mutual coupling) mutual coupling, ... Đặc biệt trong trường hợp số phần tử ít như búp sóng thu, khi hướng búp sóng đến góc 30° , công suất của búp chính giảm rõ rệt (~ 13.5 dB) so với các búp sóng hài (harmonic) liền kề. Hình 3.14 mô tả búp sóng 2 chiều nhận được từ tổng hợp công suất của búp sóng phát và búp sóng thu. Kết quả cho thấy mức búp bên đều đạt chỉ tiêu đặt ra ≥ 20 dB. Theo kết quả đo được có sự sai khác nhỏ về các tham số như độ rộng búp sóng chính khoảng 10% giá trị, đây có thể đến từ sự sai khác về quá trình lắp đặt và sai số trong quá trình lấy dữ liệu và biến đổi.



Hình 3.11. Búp sóng một chiều của 24 phần tử theo mô phỏng và theo đo kiểm tại góc 0° (trên) và 10° (dưới)

3.3.2 Kết quả đo kiểm búp sóng hai chiều

Búp sóng hai chiều là tổng của búp sóng phát 16 phần tử (khoảng cách giữa các phần tử là $\lambda/2$) và búp sóng thu 11 phần tử (khoảng cách giữa các phần tử là 3λ). Kết quả các thông số của búp sóng phát xạ được ghi lại trong Bảng 3.4.

CHƯƠNG 2. VẤN ĐỀ BÚP SÓNG BÊN CAO VÀ GIẢI PHÁP CẢI THIỆN

2.1 Các dạng ăng-ten mảng thưa đang được nghiên cứu

2.1.1 Minimum redundancy arrays (MRAs)

Mảng dự phòng tối thiểu (MRA) được tổng hợp từ ULA bằng cách loại bỏ các phần tử phát xạ có cùng khoảng cách không gian sao cho các phần tử được giữ lại có khả năng tạo tất cả các khoảng cách có thể có giữa 0 và khẩu độ được chỉ định. Cấu hình MRA ưu tiên về sự xuất hiện tất cả khoảng cách giữa khẩu độ ăng-ten.

Ưu điểm của cấu trúc MRA là tăng hiệu quả không gian do chỉ giữ lại các phần tử ăng-ten cần thiết để đạt được hiệu suất mong muốn và giảm hiệu ứng mutual coupling, ... Tuy nhiên, cách sắp xếp phần tử trong kiến trúc này không được tính toán qua biểu thức mà mất thời gian do cần tìm kiếm lựa chọn kiến trúc tối ưu. Bên cạnh đó, hiệu suất phát xạ của cấu trúc này bị suy giảm so với cấu trúc ăng-ten mảng ULA.

2.1.2 Minimum hole arrays (MHAs)

Cấu trúc MHA được xây dựng bằng cách tối ưu hóa các vị trí phần tử phát xạ để các khoảng cách không gian giữa các ăng-ten thành phần chỉ xuất hiện một lần, không có hai cặp phần tử phát xạ nào mà khoảng cách giữa chúng là bằng nhau. Giống như MRA, không có công thức để xác định vị trí tối ưu của phần tử phát xạ trong MHA.

Ưu điểm và nhược điểm của cấu trúc MHA tương tự cấu trúc MRA.

2.1.3 Co-prime arrays

Cấu trúc mảng co-prime đặt các phần tử ăng-ten thành phần sao cho khoảng cách giữa chúng là tỉ lệ của hai số đồng nguyên tố. Cấu trúc mảng co-prime được xây dựng dựa trên hai mảng ULA. Một ULA có 2P phần tử và khoảng cách giữa từng phần tử là Q; tương tự, ULA còn lại có Q phần tử và khoảng cách giữa từng phần tử là P. Trong đó P, Q là hai số nguyên tố cùng nhau ($P < Q$).

Cấu hình mảng co-prime được tính toán tức thời với thông tin số hai số đồng nguyên tố được cung cấp. Bằng cách thay đổi các số nguyên cùng nhau, khoảng cách giữa các phần tử ăng-ten có thể được điều chỉnh. Tuy nhiên, mảng co-prime giới hạn hiệu suất phát xạ so với cấu trúc ăng-ten mảng ULA.

2.1.4 Nested arrays, super-nested arrays

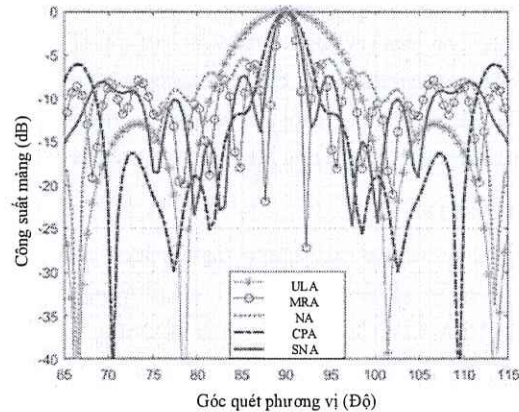
Cấu trúc mảng lồng nhau (nested arrays) cung cấp các mảng chứa đầy đủ khoảng cách giữa các khẩu độ ăng-ten. Cần có hai ULA để có được một mảng lồng nhau.

Cấu trúc mảng siêu lồng nhau (super-nested arrays): Mảng lồng nhau bị ảnh hưởng nghiêm trọng bởi sự ghép nối lẫn nhau giữa các phần tử liền kề do kích thước ULA dày đặc ở đầu (cấp 1). Mảng siêu lồng nhau được sử dụng để khắc phục nhược điểm này. Các phần tử cấp 1 của mảng lồng nhau được sắp xếp xen kẽ đến các vị trí khác nhau trong phạm vi của mảng để giảm số lượng phát xạ có khoảng cách đơn vị.

Ưu điểm của cấu trúc mảng này là cấu hình mảng được tính toán tức thời theo thông tin số hai số đồng nguyên tố được cung cấp và mức độ thưa hơn của mảng super-nested giúp giảm nhiễu từ các nguồn tín hiệu khác nhau và cải thiện chất lượng tín hiệu thu. Tuy nhiên, cấu trúc này cũng giới hạn hiệu suất phát xạ so với cấu trúc mảng ULA.

2.2 Nhược điểm của các nghiên cứu về kiến trúc ăng-ten mảng thưa

- Cấu trúc ăng-ten trên có mức búp sóng bên cao do các phần tử ăng-ten được đặt cách xa nhau, từ đó khiến công suất búp sóng chính bị suy giảm và tăng nguy cơ nhận nhiễu tiêu cực ngoài búp sóng chính (Hình 2.3).



Hình 2.3. Mức búp bên và búp sóng chính của một số kiến trúc mảng thưa

Thiết kế của cấu trúc ăng-ten mảng thưa phức tạp hơn so với ăng-ten ULA truyền thống do khoảng cách giữa các phần tử không đồng đều, cần sự chính xác hơn trong gia công thiết kế. Trong trường hợp các mảng ăng-ten lớn chứa nhiều phần tử, việc chia thiết kế thành các khối có khả năng sản xuất hàng loạt là một thách thức. Nếu áp dụng

3.3 Kết quả đo kiểm và đánh giá

So sánh hai phần mềm mô phỏng, kết quả trên phần mềm Ansys HFSS và CST studio đạt độ tin cậy cao hơn do cung cấp mô phỏng 3D tiên tiến của các thành phần điện từ phổ biến và ăng-ten; mô phỏng chính xác các hiện tượng điện từ phức tạp như phản xạ, giao thoa, suy giảm, ... Trong khi đó, kết quả thu được từ MATLAB dựa trên các công thức tính toán diễn hình của lý thuyết truyền sóng. Do đó, kết quả trên phần mềm Ansys HFSS và CST studio được sử dụng làm tham chiếu để đánh giá kết quả đo kiểm thực tế.

3.3.1 Kết quả đo kiểm búp sóng một chiều

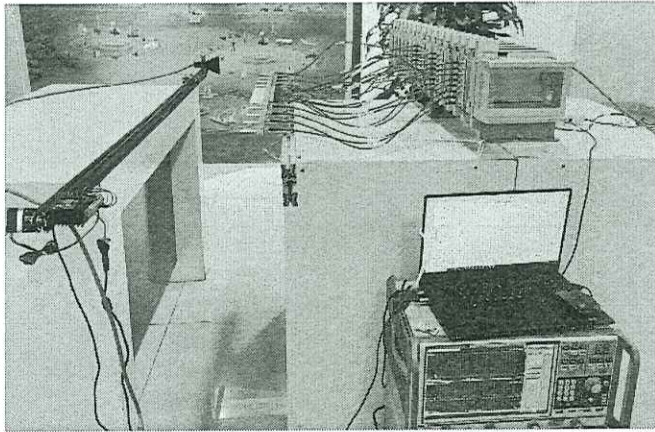
Kết quả đo kiểm trường xa được ghi lại theo chỉ tiêu trong Bảng 3.3. Kết quả đo kiểm tương tự với kết quả mô phỏng tại góc 0° , tuy nhiên, khi thực hiện quét búp sóng, mức búp bên có xu hướng tăng và hình dạng búp chính không được đảm bảo so với mô phỏng. Đặc tính của búp sóng phát xạ trong trường hợp này được thể hiện trong Hình 3.11.

Bảng 3.3. Kết quả đo kiểm búp sóng một chiều

STT	Thông số	Tham số tham chiếu	Kết quả		Đánh giá	Ghi chú
			Mô phỏng	Đo kiểm		
1	Mặt mở	Tương đương 64 phần tử ULA	64	64	Đạt	
2	Sidelobe	≥ 15 dB	15.56 dB	15 dB	Đạt	
3	Độ lợi về số lượng phần tử ăng-ten	≥ 50 %	62.5 %	62.5 %	Đạt	
4	Khả năng quét búp sóng	$-30^\circ \rightarrow 30^\circ$	$-20^\circ \rightarrow 20^\circ$	$-5^\circ \rightarrow 5^\circ$	Không đạt	Sidelobe khi quét búp sóng tăng trong thực tế

3.2.2 Các bước thực hiện

Đầu tiên, thiết lập hệ thống theo cấu hình như được minh họa trong Hình 3.8.



Hình 3.8. Hình ảnh hệ thống đo kiểm thực tế

Tiếp theo, thực hiện kiểm tra kết nối từ máy tính đến máy phân tích mạng (VNA), động cơ, và theo dõi các thông số của các khối chức năng trên thiết bị TRM bằng cách truy cập vào tab Monitor trên giao diện phần mềm đo kiểm.

Sau đó, kiểm tra hệ thống điều khiển và khả năng đáp ứng của hệ thống thu thông qua việc sử dụng bộ chia để loopback tín hiệu, đo kiểm búp sóng tại 0 độ. Tiếp theo, thực hiện hiệu chỉnh biên độ và pha của đầu ra TRM (và dây SMA) trước khi kết nối vào hệ ăng-ten, kết quả hiệu chỉnh cần đạt được sai số biên độ giữa các kênh $< \pm 0.5$ dB, sai số pha giữa các kênh $< \pm 5^\circ$ để đảm bảo độ chính xác khi đo kiểm.

Tiếp theo, nhấn nút 'Start' trên giao diện phần mềm điều khiển động cơ bước và nhận dữ liệu đo kiểm trường gần để đo kiểm và thu dữ liệu trường gần. Khi bài đo hoàn tất, dữ liệu trường gần sẽ được tự động lưu dưới định dạng file .s1p để dùng cho các bước tính toán tiếp theo.

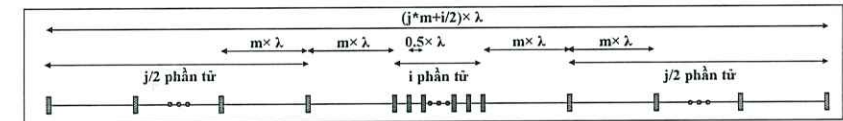
Cuối cùng, để xử lý dữ liệu thu trường gần, chương trình tính toán biến đổi trường gần sang trường xa (Nearfield-to-Farfield - NF2FF) được sử dụng. Đầu vào của chương trình này là các file .s1p thu được trước đó, kết quả đầu ra sẽ là hình ảnh bức xạ ăng-ten đính kèm các thông số chi tiết như mức búp bên, độ rộng búp sóng, góc quét và những thông số liên quan khác.

kiến trúc mảng thưa, quá trình sản xuất hàng loạt sẽ trở nên phức tạp, tăng thời gian và chi phí.

Với các ứng dụng yêu cầu mức búp bên thấp đảm bảo cả khi quét búp sóng và có khả năng block hóa phục vụ sản xuất loạt như ăng-ten trên các đài ra-đa, các dạng ăng-ten mảng thưa đã trình bày không đáp ứng các yêu cầu thiết kế. Do đó, các phương pháp để đảm bảo các yêu cầu áp dụng trên kiến trúc mảng thưa được tập trung nghiên cứu.

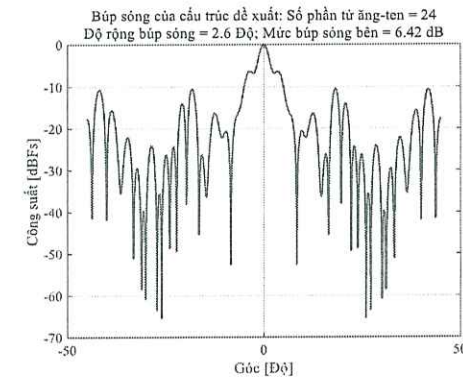
2.3 Giải pháp đề xuất

Dựa trên quá trình phân tích các kiến trúc ăng-ten mảng thưa, tác giả nhận thấy phương pháp nested arrays và các biến thể của nó được nghiên cứu sâu hơn để giải quyết các bất cập còn tồn đọng. Mô hình ăng-ten mảng phẳng đề xuất dựa trên kiến trúc nested array được chia thành 2 phần thể hiện trong Hình 2.4:



Hình 2.4. Kiến trúc ăng-ten mảng thưa đề xuất

Giả sử $i = 16$, $j = 8$, $d_{\text{outer}} = 3 \times \lambda$ ($m=3$), $d_{\text{inner}} = \lambda/2$, hình dạng búp sóng được mô phỏng bằng MATLAB như sau:



Hình 2.6. Hình dạng búp sóng với cấu trúc đề xuất tại góc quét 0°

Hình 2.6 chỉ ra nhiều điểm mức búp bên với công suất cao, gây nguy cơ nhiễu tín hiệu. Vì vậy, cần nghiên cứu và triển khai các giải pháp để giảm thiểu các vị trí búp bên. Các giải pháp này được dựa trên yêu cầu cụ thể của từng ứng dụng.

2.3.1 Ứng dụng sử dụng mẫu bức xạ một chiều

Trong các hệ thống sử dụng mẫu bức xạ một chiều như hệ thống 4G, 5G, việc suy giảm các mức búp bên được thực hiện dựa trên việc tìm bộ hệ số phức w sao cho công suất tại các vị trí có mức búp bên lớn được giảm đến mức mong muốn. Các bước thực hiện cụ thể như sau:

Bước 1: Xây dựng hàm mục tiêu F với đầu vào các hệ số w , đầu ra là giá trị thể hiện mối quan hệ giữa các đại lượng cần quan tâm như hướng búp sóng chính, hướng góc cần vô hiệu hóa Nghiệm w cần được tìm để hàm cực tiểu hóa hàm F .

$$F = \min \|w^T X_{null}\|^2 - \alpha \|w^T X_{main}\|^2 \quad (2.3)$$

Trong đó:

- w là vector trọng số beamforming – các hệ số cần tìm
- $X_{null} = \{X_{n_1}, X_{n_2}, \dots, X_{n_{N-1}}, X_{n_N}\}$ và $X_{main} = \{X_{m_1}, X_{m_2}, \dots, X_{m_{M-1}}, X_{m_M}\}$ lần lượt là vector tín hiệu thu bởi các phần tử ăng-ten ứng với N vị trí góc nulling (θ_{null}) và M vị trí góc muốn hướng tới (θ_{main}).
- Giá trị của các đại lượng vector thuộc X_{null} và X_{main} là tổng hợp tín hiệu của n phần tử ăng-ten.

Bước 2: Tìm nghiệm tối ưu w thông qua các thuật toán tối ưu.

Việc sử dụng đề xuất trên có thể tìm nghiệm w để đạt hiệu suất lớn nhất trong không gian tìm kiếm, tuy nhiên phương pháp này cũng gặp một số khó khăn khi thực hiện liên quan đến việc xây dựng hàm mục tiêu, lựa chọn thuật toán tối ưu và thông tin đầu vào. Điều này có thể yêu cầu nguồn tài nguyên tính toán mạnh mẽ và thời gian xử lý kéo dài.

2.3.2 Ứng dụng sử dụng mẫu bức xạ hai chiều

Đối với các ứng dụng sử dụng mẫu bức xạ hai chiều như trong các hệ thống ra-đa, theo nguyên tắc nhân mẫu phát xạ, các mức búp bên cao có thể được loại bỏ bằng cách đặt các giá trị rỗng (null) của búp sóng phát (TX) trùng với thùy cách từ của búp sóng thu (RX) tạo ra bằng ăng-ten mảng thừa. Việc tổng hợp búp sóng hai chiều cho phép tự do hơn trong việc sử dụng các giá trị null của búp sóng TX.

$$AF_{2way} = AF_{TX} \times AF_{RX} \quad (2.5)$$

3.2 Phương pháp và quy trình đo kiểm

3.2.1 Công cụ sử dụng đo kiểm

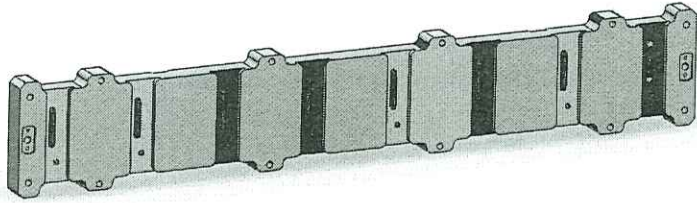
Để thực hiện đo kiểm, ngoài các thành phần chính đã trình bày, một số công cụ và thiết bị cần thiết được chuẩn bị, tổng thể các công cụ được trình bày trong Bảng 3.1.

Bảng 3.1. Danh sách công cụ dụng cụ đo kiểm

STT	Tên công cụ	Số lượng	Yêu cầu tính năng
1	Hệ ăng-ten mảng thừa	1	Thiết bị được kiểm tra
2	Module thu phát	3	Hoạt động ở băng X. 8 kênh thu-phát có thể điều khiển pha, biên độ độc lập.
3	Bộ chia lớp 1	1	Cấp nguồn cho TRM. Chia tín hiệu điều khiển từ khối MON đến các TRM. Cộng/ chia tín hiệu cao tần ra/ vào khối TRM.
4	Module giám sát điều khiển	1	Gom thông tin từ TRM gửi lên PC và trung chuyển tín hiệu điều khiển từ PC đến TRM.
5	Máy tính điều khiển	1	Cài đặt phần mềm đo kiểm
6	Máy phân tích mạng	1	Hoạt động ở băng X
7	Ăng-ten chuẩn	1	Hoạt động ở băng X Sử dụng ăng-ten loa
8	Động cơ bước	1	Bước < 1 độ
9	Đường ray	1	Chiều dài không nhỏ hơn kích thước ăng-ten
10	Dây cáp cao tần đồng pha	24	(Kết nối TRM đến các chân từ ăng-ten). Hoạt động tốt ở băng X.
11	Dây cáp cao tần thường	2	(Kết nối đến máy đo). Độ dài đảm bảo ăng-ten chuẩn di chuyển được hết hành trình.
12	Cáp tín hiệu	3	01 cáp từ MON đến Bộ chia. 01 cáp từ PC đến MON. 01 cáp từ PC đến động cơ. Đảm bảo tốc độ Modbus 3 Mbps.

3.1.2 Hệ mô-đun thu phát

Hệ mô-đun thu phát (Transmitter and Receiver Module - TRM) bao gồm ba mô-đun, mỗi mô-đun TRM có 8 kênh thu/phát được kết nối trực tiếp với 8 chấu từ ăng-ten. Điểm nổi bật của mô-đun là có khả năng điều chỉnh pha và biên độ cho mỗi kênh TRM với độ chính xác cao và thời gian đáp ứng nhanh. Các mô-đun được cấp nguồn và ghép nối thông qua bộ chia bao gồm chia nguồn, chia tín hiệu điều khiển và chia tín hiệu cao tần.



Hình 3.3. Hình ảnh bộ chia

3.1.3 Hệ tính toán và điều khiển

Hệ tính toán và điều khiển bao gồm một hệ thống máy tính cùng hai phần mềm chính được triển khai trên nền tảng máy tính, với những nhiệm vụ chủ yếu sau đây:

Đầu tiên, phần mềm đo kiểm trường gần (Near-Field) được phát triển trên nền tảng C#, hoạt động như một công cụ tính toán và điều khiển chính xác các thông số về pha và biên độ của từng kênh thu phát TRM, nhằm thay đổi biểu đồ sóng của hệ thống ăng-ten được đo kiểm. Bên cạnh đó, nó còn có khả năng điều khiển động cơ để thay đổi vị trí của ăng-ten chuẩn trên đường ray và thu thập các giá trị trường gần tại từng điểm đo bằng cách sử dụng máy phân tích mạng (VNA).

Tiếp theo, phần mềm tính toán chuyển đổi tín hiệu trường gần – trường xa (Near-Field to Far-Field - NF2FF) được xây dựng bằng MATLAB, được sử dụng để xử lý dữ liệu trường gần thu được khi đo kiểm. NF2FF chuyển đổi thông tin phân bố sóng gần trường thu thập được từ một hoặc một hệ ăng-ten sang thông tin phân bố sóng xa, tức là bức sóng của ăng-ten thông qua các phương trình toán học như Fourier và Hankel. Cuối cùng, kết quả bức sóng trường xa sau biến đổi sẽ được so sánh với kết quả mô phỏng bằng phần mềm ăng-ten.

Với cấu trúc biểu diễn trên Hình, phương án này được minh họa cụ thể như sau: các ăng-ten nằm ở vị trí inner đóng vai trò là thành phần phát, trong khi các ăng-ten ở vị trí outer và một số ăng-ten ở phần inner là thành phần thu được xếp thành một mảng thưa có khoảng cách giữa các phần tử là đều nhau. Phương pháp trên cho phép loại bỏ các mức búp bên theo mức mong muốn. Tuy nhiên, điều này dẫn đến sự suy giảm công suất của bức sóng chính do sử dụng các bộ suy hao công suất cho các phần tử phát/thu.

2.4 Kết quả mô phỏng các giải pháp đề xuất

2.4.1 Kích bản và tham số mô phỏng

Nhằm cụ thể hóa hiệu quả của giải pháp đề xuất, một số tham số được thiết lập để sử dụng làm tham chiếu trong việc đánh giá kết quả khi thực hiện mô phỏng và kiểm tra thực tế.

Bảng 2.1. Tham chiếu cần đáp ứng với kiến trúc mảng thưa đề xuất

STT	Tham số	Tham chiếu	Ghi chú
1	Mức búp bên	≥ 15 dB	
2	Độ lợi về số lượng phần tử ăng-ten G_E	≥ 60 %	$G_E = (1 - \frac{N_u}{N_v}) * 100\%$ N_u : số phần tử ăng-ten thực tế, N_v : số phần tử ăng-ten sử dụng dạng uniform tương đương với mặt mở theo yêu cầu.
3	Khả năng quét bức sóng	$-30^\circ \rightarrow 30^\circ$	Góc quét bức sóng vẫn đảm bảo sidelobe theo yêu cầu và hình dạng bức sóng tương quan với bức sóng tại vị trí 0° .

2.4.2 Kết quả mô phỏng

Để trực quan hóa việc mô phỏng và đo kiểm giải pháp đề xuất, các thông số trên Hình được lựa chọn như sau: $i = 16$, $j = 8$, $d_{outer} = 3 \times \lambda$ ($m=3$), $d_{inner} = \lambda/2$.

a. Ứng dụng sử dụng mẫu bức xạ một chiều

Với các thông số và phương pháp đã lựa chọn, tác giả thực hiện tìm kiếm và áp dụng bộ hệ số phức tương ứng với từng phần tử ăng-ten. Kết quả cụ thể được thể hiện trong Bảng 2.2.

Bảng 2.2. Kết quả mô phỏng với trường hợp bức sóng một chiều

STT	Thông số	Tham số tham chiếu	Kết quả mô phỏng	
			MATLAB	Ansys HFSS và CST studio
1	Mức bức bên	≥ 15 dB	17.1 dB	15.56 (Tại góc 0°)
2	Độ lợi về số lượng phần tử ăng-ten G_E	≥ 50 %	62.5 %	62.5 %
3	Khả năng quét bức sóng	$-30^\circ \rightarrow 30^\circ$	$-45^\circ \rightarrow 45^\circ$	$-20^\circ \rightarrow 20^\circ$

b. Ứng dụng sử dụng mẫu bức xạ hai chiều

Kết quả mô phỏng về đặc tính hướng bức sóng đã được tổng kết trong Bảng 2.3.

Bảng 2.3. Kết quả mô phỏng với trường hợp bức sóng hai chiều

STT	Thông số	Chỉ tiêu	Kết quả mô phỏng	
			MATLAB	Ansys HFSS và CST studio
1	Mức bức bên	≥ 15 dB	25 dB	24 (Tại góc 0°)
2	Độ lợi về số lượng phần tử ăng-ten G_E	≥ 50 %	62.5 %	62.5 %
3	Khả năng quét bức sóng	$-30^\circ \rightarrow 30^\circ$	$-45^\circ \rightarrow 45^\circ$	$-30^\circ \rightarrow 30^\circ$

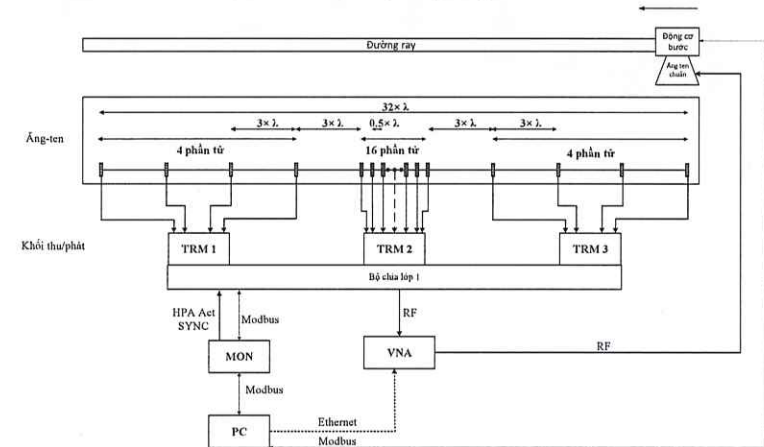
2.5 Kết luận chương

Chương 2 đã trình bày các cấu hình và đặc điểm cơ bản của các loại ăng-ten mảng thừa được sử dụng phổ biến trong các nghiên cứu gần đây. Dựa trên kết quả mô phỏng được công bố trong các công trình trước đó, tác giả nhận thấy mức độ bức bên của các loại ăng-ten này thường chưa đáp ứng được yêu cầu của một số hệ thống ăng-ten, đặc biệt trong lĩnh vực ra-da. Bên cạnh đó, việc gia công khó khăn do không thể block hóa cũng là vấn đề đáng chú ý. Để cải thiện những nhược điểm trên, cấu trúc ăng-ten mảng thừa có thể block hóa đã được tác giả đề xuất. Các giải pháp để giảm mức bức bên cho từng ứng dụng sử dụng mẫu bức xạ một chiều và hai chiều được trình bày cụ thể. Kết quả mô phỏng, ưu - nhược điểm của từng phương án cũng được phân tích rõ ràng. Các kết quả này sẽ được sử dụng để so sánh với kết quả đo thực nghiệm trên hệ thống.

CHƯƠNG 3. XÂY DỰNG HỆ THỐNG THỰC NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

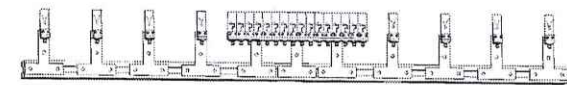
3.1 Xây dựng hệ thống thực nghiệm

Các phương pháp đề xuất đã đạt kết quả tốt trong lý thuyết và mô phỏng, tuy nhiên, nó vẫn cần được kiểm tra tính khả thi khi ứng dụng trong thực tế. Tác giả lựa chọn thực hiện đo kiểm trường gần và sử dụng phép biến đổi tín hiệu trường gần – trường xa (Near-Field to Far-Field - NF2FF) để thu nhận bức sóng ăng-ten.

**Hình 3.1. Hệ thống đo kiểm trường gần kiến trúc ăng-ten mảng thừa đề xuất**

3.1.1 Hệ ăng-ten

Hệ thống ăng-ten mảng thừa thử nghiệm gồm một hàng ăng-ten Vivaldi 24 phần tử trên công nghệ PCB. Trong đó, 16 phần tử ăng-ten phía trong được sắp xếp thành một khối với khoảng cách giữa mỗi phần tử là $\lambda/2$, 8 phần tử ăng-ten phía ngoài được lắp đặt riêng, có khả năng thay đổi khoảng cách trên thanh trượt, cố định khoảng cách là 3λ . Các phần tử ăng-ten kết nối tới khối TRM qua các connector SMA và dây cáp kết nối.

**Hình 3.2. Cấu trúc hệ ăng-ten khi được lắp đặt trên giá cơ khí theo mô phỏng**