

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ QUỐC PHÒNG

HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ

PHAN VĂN HƯNG

NGHIÊN CỨU PHÁT TRIỂN ANTEN THẤU KÍNH
CÓ CHỈ SỐ KHÚC XẠ ÂM TẠO ĐA BÚP SÓNG
CHO TRẠM GỐC TRONG THÔNG TIN DI ĐỘNG
BĂNG TẦN 28 GHz

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

HÀ NỘI - NĂM 2023

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ QUỐC PHÒNG

HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ

PHAN VĂN HƯNG

NGHIÊN CỨU PHÁT TRIỂN ANTEN THẤU KÍNH
CÓ CHỈ SỐ KHỨC XẠ ÂM TẠO ĐA BÚP SÓNG
CHO TRẠM GỐC TRONG THÔNG TIN DI ĐỘNG
BĂNG TẦN 28 GHz

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Chuyên ngành: KỸ THUẬT ĐIỆN TỬ
Mã số: 9 52 02 03

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:
PGS. TS NGUYỄN QUỐC ĐỊNH

HÀ NỘI - NĂM 2023

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan Luận án và các kết quả trình bày trong luận án là công trình nghiên cứu của tôi dưới sự hướng dẫn của cán bộ hướng dẫn. Các số liệu, kết quả trình bày trong luận án là hoàn toàn trung thực và chưa được công bố trong bất kỳ công trình nào trước đây. Các kết quả sử dụng tham khảo đều đã được trích dẫn đầy đủ và theo đúng quy định.

Hà Nội, ngày tháng 01 năm 2023

Tác giả

Phan Văn Hưng

LỜI CẢM ƠN

Trong quá trình học tập, nghiên cứu và hoàn thành luận án, nghiên cứu sinh đã nhận được nhiều sự giúp đỡ và đóng góp quý báu.

Đầu tiên, nghiên cứu sinh xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc nhất tới thầy giáo hướng dẫn PGS. TS *Nguyễn Quốc Định*, Khoa VTĐT. Đồng thời nghiên cứu sinh cũng vô cùng biết ơn vì sự giúp đỡ lớn lao của GS. *Yoshihide Yamada*, GS. *Naobumi Michishita* và GS. *Mohammad Tariqul Islam*. Các thầy không chỉ là người hướng dẫn, giúp đỡ nghiên cứu sinh hoàn thành luận án này mà còn là người định hướng và truyền động lực quyết tâm cho nghiên cứu sinh trên con đường nghiên cứu khoa học đầy gian khó này.

Nghiên cứu sinh cũng chân thành cảm ơn các thầy giáo trong Bộ môn Cơ sở kỹ thuật vô tuyến, Khoa Vô tuyến Điện tử, Học viện Kỹ thuật Quân sự, đã luôn quan tâm, động viên, tận tình giúp đỡ và tạo điều kiện mọi mặt trong suốt thời gian nghiên cứu sinh học tập, nghiên cứu tại đây.

Nghiên cứu sinh cũng chân thành cảm ơn Phòng Sau đại học - Học viện KTQS; Trường Sĩ quan thông tin - Binh chủng Thông tin liên lạc là các đơn vị chủ quản đã thường xuyên hỗ trợ, tạo điều kiện và giúp đỡ nghiên cứu sinh hoàn thành luận án này.

Cuối cùng, nghiên cứu sinh trân trọng cảm ơn vợ, con, người thân trong gia đình, các đồng nghiệp đã luôn quan tâm, động viên, chia sẻ những khó khăn tạo động lực rất lớn để nghiên cứu sinh hoàn thành công trình này.

Xin chân thành cảm ơn!

MỤC LỤC

MỤC LỤC.....	i
DANH MỤC CÁC TỪ VIẾT TẮT.....	iv
DANH MỤC HÌNH VẼ.....	vii
DANH MỤC BẢNG.....	x
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU TOÁN HỌC.....	xi
MỞ ĐẦU.....	1
Chương 1. TỔNG QUAN VỀ ANTEN CHO TRẠM GỐC TRONG THÔNG TIN DI ĐỘNG BĂNG TẦN 28 GHz.....	8
1.1. Những vấn đề chung về anten cho trạm gốc trong thông tin di động 5G.....	8
1.2. Tổng quan về anten thấu kính.....	12
1.2.1. Giới thiệu chung.....	12
1.2.2. Ưu điểm và nhược điểm của anten thấu kính.....	14
1.2.3. Phân loại và ứng dụng.....	15
1.2.4. Vật liệu của thấu kính.....	17
1.2.5. Nguồn phát xạ của anten thấu kính.....	25
1.3. Kỹ thuật tạo đa búp sóng cho anten thấu kính.....	28
1.4. Các công trình nghiên cứu có liên quan.....	33
1.4.1. Các nghiên cứu ngoài nước.....	33

1.4.2. Các nghiên cứu trong nước.....	41
1.4.3. Đánh giá chung.....	43
1.5. Kết luận chương 1.....	47
Chương 2. NGHIÊN CỨU PHÁT TRIỂN ANTEN THẤU KÍNH CÓ CHỈ SỐ KHÚC XẠ ÂM ĐỊNH HƯỚNG ỨNG DỤNG CHO TRẠM GỐC BĂNG TẦN 28 GHz.....	48
2.1. Mô hình cấu trúc anten thấu kính.....	49
2.1.1. Nguồn phát xạ của anten thấu kính.....	50
2.1.2. Các mô hình cấu trúc thấu kính.....	51
2.1.3. Phương pháp và các tham số mô phỏng.....	56
2.1.4. Mô phỏng và đánh giá kết quả.....	58
2.2. Đề xuất giải pháp tính toán, xác định cấu trúc anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện Straight line.....	64
2.2.1. Phương pháp tính toán cấu trúc thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện Straight line.....	65
2.2.2. Mô hình cấu trúc anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện Straight line.....	70
2.2.3. Mô phỏng, đánh giá kết quả.....	72
2.3. Kết luận chương 2.....	78

Chương 3. NGHIÊN CỨU GIẢI PHÁP TẠO ĐA BÚP SÓNG CHO ANTEN THẤU KÍNH CÓ CHỈ SỐ KHÚC XẠ ÂM...	79
3.1. Xác định vùng hội tụ của thấu kính có chỉ số khúc xạ âm bằng phương pháp ray tracing	80
3.1.1. Phương pháp xác định vùng hội tụ	80
3.1.2. Các bước tính toán vùng hội tụ	83
3.1.3. Đánh giá đặc tính bức xạ của anten thấu kính khi nguồn phát xạ dịch chuyển trên các quỹ đạo	87
3.2. Nghiên cứu thiết kế anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm tạo đa búp sóng	91
3.2.1. Cấu trúc anten thấu kính NRI tạo đa búp sóng	91
3.2.2. Mô phỏng đánh giá kết quả	92
3.3. Kết luận chương 3	101
KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG NGHIÊN CỨU	102
DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ	105
PHỤ LỤC	107
TÀI LIỆU THAM KHẢO	118

DANH MỤC CÁC TỪ VIẾT TẮT

Từ viết tắt	Nghĩa Tiếng Anh	Nghĩa Tiếng Việt
1G	The First Generation	Hệ thống thông tin di động thế hệ thứ nhất
4G	The Fourth Generation	Hệ thống thông tin di động thế hệ thứ tư
5G	The Fifth Generation	Hệ thống thông tin di động thế hệ thứ năm
ABC	Absorbing Boundary Condition	Điều kiện không gian hấp thụ
AL TSA	Antipodal Linearly Tapered Slot Antenna	Ăng-ten khe dạng nhọn tuyến tính đối cực
ANTEN	Antenna	Ăng-ten
ATTK		Ăng-ten thấu kính
BI	Boundary Integral	Tích phân biên
BTS	Base Transceiver Station	Trạm thu phát gốc
BTNL		Bảo toàn năng lượng
DDM	Domain Decomposition Method	Phương pháp phân tách miền tính toán
DN	Double Negative	Cặp giá trị âm
EM	Electromagnetic	Trường điện từ
FCC	Federal Communications Commission	Ủy ban Truyền thông Liên bang
FEBI	Finite Element Boundary Integral	Tích phân biên phần tử hữu hạn

FEM	Finite Element Method	Phương pháp phần tử hữu hạn
FPGA	Field Programmable Gate Arrays	Vi mạch khả trình
GO	Geometrical Optics	Quang hình
GPS	Global Positioning System	Hệ thống định vị toàn cầu
HFSS	High-Frequency Structure Simulator	Phần mềm mô phỏng cấu trúc tần số cao
IE	Integral Equation	Phương trình tích phân
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	Viện kỹ thuật điện-điện tử
IoT	Internet of Thing	Internet kết nối vạn vật
LH	Left Hand	Quy tắc bàn tay trái
M-MIMO	Massive Multiple Input Multiple Output	Hệ thống đa đầu vào đa đầu ra quy mô lớn
MBA _s	Multibeam Antennas	Anten đa búp sóng
MBPAA _s	Multibeam Phased-Array Antennas	Anten mảng pha đa búp sóng
MEFSS	Miniaturized-Element Frequency Selective Surface	Bề mặt chọn lọc tần số của các phần tử thu nhỏ
ML	Matching Layer	Lớp phối hợp phản xạ
MMW	Milimeter Wave	Sóng milimét
MoM	Method of Moments	Phương pháp mô-men
NR	Negative Refractive	Khúc xạ âm
NRI	Negative Refractive Index	Chỉ số khúc xạ âm
PC	Phase center	Tâm pha
PO	Physical Optics	Quang lý
RF	Radio Frequency	Tần số vô tuyến
RFID	Radio Frequency Identification	Nhận dạng tần số vô tuyến

SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio	Tỉ số tín hiệu trên nhiễu và tạp âm
SIW	Substrate Intergate Waveguide	Ống dẫn sóng tích hợp đế điện môi
SL	Straight Line	Đường thẳng
SLL	Sidelobe Level	Biên độ cánh sóng bên
SNR	Signal-To-Noise	Tỉ số tín hiệu trên nhiễu
Sub-mmW	Sub-Milimeter Wave	Dải sóng ngắn hơn milimét
USAT	Ultra Small Aperture Terminal	Vệ tinh đầu cuối khẩu độ siêu nhỏ
VSAT	Very Small Aperture Terminal	Vệ tinh đầu cuối khẩu độ rất nhỏ
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio	Hệ số sóng đứng điện áp
WLAN	Wireless Local Area Network	Mạng nội bộ không dây

DANH MỤC HÌNH VẼ

1.1	Búp sóng hẹp của anten tại trạm gốc.	8
1.2	Cấu trúc vùng phủ sóng của các trạm gốc với $f_c = 900$ MHz và 28 GHz.	9
1.3	Mô hình về anten đa búp sóng cho trạm gốc trong thông tin di động 5G.	11
1.4	Cấu trúc anten thấu kính và anten mặt phản xạ.	14
1.5	Mối quan hệ giữa các véc-tơ \vec{E} , \vec{H} , \vec{P} và \vec{k} trong môi trường truyền sóng có chỉ số khúc xạ âm và chỉ số khúc xạ dương.	20
1.6	Sự khúc xạ tại mặt phân cách giữa hai môi trường truyền dẫn có chỉ số khúc xạ dương.	21
1.7	Sự khúc xạ tại mặt phân cách giữa hai môi trường truyền dẫn có chỉ số khúc xạ âm và chỉ số khúc xạ dương.	22
1.8	Mô hình cấu trúc tương đương của anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện Abbe sin.	24
1.9	Cấu trúc phần tử cộng hưởng và cấu trúc chế tạo của anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm.	24
1.10	Cấu trúc anten mạch dải và mảng anten.	25
1.11	Cấu trúc ống dẫn sóng trụ tròn và các loại anten loa nón.	26
1.12	Tâm pha của anten loa.	28
1.13	Cấu trúc anten thấu kính điện môi tạo đa búp sóng.	30
1.14	Anten thấu kính điện môi hình trụ tạo đa búp sóng.	31
1.15	Anten thấu kính dạng mảng truyền dẫn tạo đa búp sóng.	32
1.16	Anten thấu kính Luneburg hình trụ tạo đa búp sóng.	35
1.17	Anten mảng truyền dẫn kiểu Jerusalem tạo đa búp sóng.	38
1.18	Anten thấu kính Rotman và R-KR tạo đa búp sóng.	39

1.19	Anten thấu kính với điều kiện Abbe sin tạo đa búp sóng.	40
1.20	Anten MIMO tạo đa búp sóng.	41
1.21	Mảng truyền dẫn tạo đa búp sóng cho hệ thống anten 5G.	42
2.1	Cấu trúc chung của anten thấu kính.	49
2.2	Tham số bức xạ của anten loa nón.	51
2.3	Cấu trúc thấu kính dạng hyperbol.	52
2.4	Mô hình cấu trúc thấu kính với điều kiện Abbe sin.	53
2.5	Cấu trúc thấu kính có chỉ số khúc xạ âm.	55
2.6	Giản đồ bức xạ của anten loa nón và ATTK trong mặt phẳng E.	59
2.7	Biên độ cánh sóng bên và HPBW trong mặt phẳng E.	60
2.8	Phân bố trường trong mặt phẳng xOz và tại mặt mở của anten thấu kính.	62
2.9	Sự khúc xạ và phản xạ của tia sóng trên bề mặt thấu kính.	63
2.10	Cấu trúc anten thấu kính NRI với điều kiện Straight line.	65
2.11	Đường đi của tia sóng qua thấu kính NRI với điều kiện SL.	66
2.12	Tính toán góc bức xạ tại mặt trong S_1 của thấu kính.	66
2.13	Điểm bức xạ tại mặt cong phía ngoài S_2 của thấu kính.	68
2.14	Lưu đồ thuật toán xác định cấu trúc mặt cong thấu kính.	71
2.15	Cấu trúc mặt cong của thấu kính với điều kiện SL.	72
2.16	Giản đồ bức xạ 3D và mặt cắt trong mặt phẳng $\varphi = 0^0$, $\varphi = 90^0$ của cấu trúc ATTK đề xuất.	73
2.17	Phân bố trường trong mặt phẳng xOz và tại mặt mở của ATTK đề xuất.	74
2.18	Phân bố pha trên mặt mở của anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm.	75
2.19	Hệ số tăng ích cực đại của anten thấu kính NRI trong băng tần 28 GHz.	75
3.1	Quy trình xác định vùng hội tụ của thấu kính NRI.	81
3.2	Cấu trúc và vùng hội tụ của anten thấu kính NRI.	82

3.3	Xác định vùng hội tụ của thấu kính NRI dạng hyperbol.	84
3.4	Vùng hội tụ và quỹ đạo được xác định bằng phương pháp ray tracing.	86
3.5	Vị trí nguồn phát xạ trên các quỹ đạo.	87
3.6	Phân bố trường trong mặt phẳng xOz tại góc $\alpha = 15^0$ trên quỹ đạo R_4	88
3.7	Phân bố pha tại mặt mở của anten thấu kính NRI tại góc $\alpha = 15^0$ trên quỹ đạo R_4	89
3.8	Sự thay đổi của G_{max} và SLL khi dịch chuyển vị trí của nguồn phát xạ với $\alpha = 15^0$ và $\alpha = 30^0$	90
3.9	Cấu trúc anten thấu kính tạo đa búp sóng với nguồn phát xạ được thiết lập trên quỹ đạo R_4	92
3.10	Cấu trúc anten thấu kính tạo đa búp sóng với nguồn phát xạ được thiết lập trên quỹ đạo R_4	93
3.11	Hệ số tăng ích cực đại và biên độ cánh sóng bên khi α thay đổi.	94
3.12	Mức suy giảm hệ số tăng ích cực đại (G_i).	96
3.13	Độ lệch góc bức xạ và HPBW khi α thay đổi.	97

DANH MỤC BẢNG

1.1	Phân loại anten thấu kính dựa vào cấu trúc vật lý.	16
1.2	Các tham số điện môi của một số loại vật liệu.	18
1.3	Bảng thống kê các nghiên cứu về anten thấu kính đa búp sóng. . .	45
2.1	Phương pháp và các tham số mô phỏng.	58
2.2	Bảng tổng hợp kết quả mô phỏng.	61
2.3	Các tham số điều kiện đầu vào của cấu trúc thấu kính SL.	72
2.4	Bảng so sánh các kết quả nghiên cứu.	77
3.1	Tổng hợp kết quả khi dịch chuyển nguồn phát xạ từ R_1 đến R_5 . . .	99
3.2	Bảng tổng hợp kết quả của anten thấu kính khi góc bức xạ (α) thay đổi trên quỹ đạo R_4	99
3.3	Bảng tổng hợp so sánh các kết quả nghiên cứu.	100

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU TOÁN HỌC

Ký hiệu	Ý nghĩa
ε	Độ điện thẩm / Hằng số điện môi
ε_r	Độ điện thẩm tương đối / Hằng số điện môi tương đối
μ	Độ từ thẩm
μ_r	Độ từ thẩm tương đối
c	Vận tốc ánh sáng trong không gian tự do
ω	Tần số góc
n	Chỉ số khúc xạ / Chiết suất
F	Khoảng cách từ tiêu điểm tới đỉnh của thấu kính
D	Đường kính của thấu kính
T	Độ dày của thấu kính
r	Khoảng cách từ tiêu điểm đến mặt trong của thấu kính
f_c	Bán kính đường tròn giao điểm với điều kiện Abbe sin
f_T	Khoảng cách từ tiêu điểm đến đường thẳng SL
f	Tần số hoạt động
θ	Góc tạo bởi tia sáng từ tiêu điểm đến mặt trong của thấu kính và trục bức xạ
θ_B	Độ rộng cánh sóng chính theo mức nửa công suất
G_{max}	Hệ số tăng ích cực đại
φ	Góc tạo bởi tia sáng khúc xạ phía sau mặt cong thứ nhất và trục bức xạ
λ	Bước sóng trong không gian tự do
\vec{n}	Véc-tơ pháp tuyến
\vec{P}	Véc-tơ Poynting

MỞ ĐẦU

A. Động lực nghiên cứu

Trong những năm gần đây, chúng ta đã và đang chứng kiến sự phát triển mạnh mẽ của cuộc cách mạng về thông tin và truyền thông. Sự ra đời liên tiếp của các hệ thống thông tin di động từ thế hệ thứ nhất (1G: The First Generation) tới thế hệ thứ tư (4G: The Fourth Generation) đã tác động đến mọi mặt của đời sống, kinh tế, xã hội..., nó làm thay đổi đáng kể cách chúng ta nhìn nhận xã hội hiện đại và cách con người chúng ta tương tác với nhau. Với sự bùng nổ về số lượng các thiết bị di động, cùng với đó là nhu cầu ngày càng cao về tốc độ dữ liệu và độ trễ thấp của người sử dụng, đòi hỏi hệ thống thông tin phải thay đổi để đáp ứng được những yêu cầu cần thiết đó. Chính điều này đã thúc đẩy các nhà khoa học tập trung nghiên cứu phát triển ra hệ thống truyền thông không dây mới, được gọi là 5G (5G: The Fifth Generation) [1–3]. Về cơ bản, các dải tần số thông thường hiện nay được sử dụng cho truyền thông là hẹp và quá tải, vì vậy chúng không thể đáp ứng được truyền dẫn dữ liệu tốc độ cao như mong đợi trong tương lai. Do đó, mục tiêu của các nhà nghiên cứu và chế tạo là tạo ra được một hệ thống thông tin liên lạc hoạt động ở tần số cao hơn (mmW và Sub-mmW), trong đó các dải tần số hẹp vẫn có thể được sử dụng để truyền tải lượng lớn dữ liệu [4, 5]. Thế hệ thứ 5 của hệ thống truyền thông không dây dự kiến sẽ đảm bảo hiệu suất cao hơn nhiều so với những hệ thống được cung cấp bởi các tiêu chuẩn trước đó: chúng sẽ có thể cung cấp tổng lượng dữ liệu tăng lên khoảng 1000 lần, với tốc độ dữ liệu trải nghiệm người dùng thấp nhất là 1 Gb/s, độ trễ

dưới 1 ms, giảm chi phí sản xuất và năng lượng tiêu thụ [6, 7]. Một trong những phần khó khăn trong hệ thống thông tin tần số cao là thiết kế, chế tạo máy phát và máy thu, trong đó anten đóng vai trò quan trọng. Không giống như các anten thông thường cho hệ thống thông tin di động 4G và các thế hệ trước đó, các anten cho thông tin di động 5G phải có tính định hướng cao, khả năng bức xạ tốt để bù lại suy hao do sự hấp thụ của môi trường. Bên cạnh đó, để đáp ứng được số lượng thiết bị di động lớn, anten tại trạm gốc phải có khả năng tạo ra đa búp sóng, xoay búp sóng, điều khiển búp sóng trong thời gian thực [8]. Ngoài ra, chúng phải có suy hao thấp để giảm thiểu năng lượng tiêu thụ [9].

Với những yêu cầu khắt khe của anten cho trạm gốc trong thông tin di động 5G, các nhà khoa học đã sử dụng các phương pháp tiếp cận khác nhau trong nghiên cứu, thiết kế và chế tạo anten. Thông thường, các mảng anten được sử dụng để tạo ra các anten có tính định hướng cao ở dải tần số thấp. Tuy nhiên, ở dải sóng milimét và Sub-mmW, tổn hao của mạng cấp nguồn cao và chi phí thực hiện sản xuất hàng loạt là rất lớn. Trong khi đó, các loại anten tiềm năng khác, chẳng hạn như anten mặt phản xạ thông thường, chúng có tính định hướng cao nhưng lại gặp khó khăn trong việc tạo ra đa búp sóng do chịu ảnh hưởng bởi sự che khuất của nguồn phát xạ [10–12]. Các anten mảng pha và cụm các phần tử cấp nguồn được sử dụng khá phổ biến tạo thành các hệ thống đa đầu vào đa đầu ra quy mô lớn (M-MIMO: Massive Multiple Input Multiple Output), có tính linh hoạt cao, có khả năng tạo được nhiều búp sóng và chúng đã khắc phục vấn đề che khuất bởi nguồn phát xạ của anten mặt phản xạ [13–17], tuy nhiên, hệ thống điều khiển nguồn, điều khiển pha cho hệ anten khá phức tạp. Đối với anten thấu kính với cấu trúc

đặc trưng, các nguồn phát xạ được thiết kế ở phía sau thấu kính, do đó, anten không chịu sự ảnh hưởng bởi sự che khuất bởi nguồn phát xạ, cho phép anten thấu kính tạo ra đa búp sóng, xoay búp sóng dễ dàng hơn với tính định hướng cao. Vì vậy, anten thấu kính được xem là một trong những cấu trúc anten phù hợp và tiềm năng cho hệ thống thông tin di động 5G [18–22]. Với cấu trúc đặc biệt, khả năng tạo đa búp sóng với tính định hướng cao, anten thấu kính đang thu hút được sự quan tâm của nhiều nhà nghiên cứu, thiết kế, chế tạo và công ty sản xuất.

Các vấn đề nghiên cứu hiện nay về anten thấu kính thường tập trung chủ yếu vào đặc tính đa búp sóng, đa tần số, cấu trúc và vật liệu làm thấu kính và khả năng ứng dụng của anten thấu kính cho trạm gốc trong thông tin di động. Với việc sử dụng dải sóng milimét ở băng tần 28 GHz kích thước của anten trạm gốc được giảm xuống còn khoảng 30 centimét. Với kích thước nhỏ gọn như vậy cho phép các nhà nghiên cứu và chế tạo có thể thiết lập được nhiều phần tử anten trên cùng một mặt mở xác định và tạo ra được nhiều búp sóng hơn. Đối với anten thấu kính điện môi có chỉ số khúc xạ dương với ưu điểm là có khả năng bức xạ cao, biên độ cánh sóng bên thấp. Tuy nhiên, anten thấu kính điện môi có chỉ số khúc xạ dương có kích thước thấu kính lớn, điều này làm cho cấu trúc chung của hệ thống anten tại trạm gốc trở nên cồng kềnh, nặng và dễ bị ảnh hưởng bởi các tác động từ ngoài môi trường. Trong những năm gần đây, các nhà khoa học đang quan tâm nghiên cứu và phát triển vật liệu có chỉ số khúc xạ âm được cho là có cấu trúc mỏng hơn, gọn hơn, mà vẫn duy trì được khả năng bức xạ cao, đồng thời tạo được đa búp sóng. Vì vậy, việc nghiên cứu các giải pháp phát triển anten thấu kính với cấu trúc đặc biệt và vật liệu làm thấu kính có chỉ số khúc xạ âm cho

anten trạm gốc ở băng tần 28 GHz, nhằm cải thiện các đặc tính bức xạ, có khả năng tạo được đa búp sóng, giảm được kích thước của anten trạm gốc, giúp cho anten nhỏ gọn hơn, nhẹ hơn và ít chịu ảnh hưởng từ những tác nhân ngoài môi trường là yêu cầu quan trọng và cần thiết trong giai đoạn hiện nay, đồng thời nó cũng là giải pháp nghiên cứu có ý nghĩa khoa học. Do vậy, nghiên cứu sinh quyết định chọn đề tài: “*Nghiên cứu phát triển anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm tạo đa búp sóng cho trạm gốc trong thông tin di động băng tần 28 GHz*” để làm luận án tiến sĩ với mong muốn có được những đóng góp mang tính học thuật, hàn lâm để làm cơ sở khoa học, tiền đề cho quá trình nghiên cứu, thiết kế, chế tạo và ứng dụng anten đa búp sóng cho hệ thống trạm gốc trong thông tin di động băng tần milimét.

B. Mục tiêu, đối tượng, phạm vi và phương pháp nghiên cứu

1. Mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu tổng quát của luận án là nghiên cứu giải pháp phát triển cấu trúc anten thấu kính đa búp sóng định hướng ứng dụng cho trạm gốc trong thông tin di động băng tần 28 GHz. Trên cơ sở đó, luận án tiến hành giải quyết các mục tiêu cụ thể như:

- Nghiên cứu tổng quan về lý thuyết anten, các đặc điểm, tính chất, hiện tượng vật lý xảy ra trong anten nói chung và anten thấu kính tạo đa búp sóng nói riêng nhất là các hiện tượng vật lý này bị ảnh hưởng khi thay đổi vật liệu hoặc cấu trúc của anten đa búp sóng;
- Nghiên cứu đề xuất mô hình cấu trúc anten thấu kính với vật liệu có chỉ số khúc xạ âm định hướng ứng dụng cho trạm gốc trong thông tin di

động băng tần 28 GHz;

- Nghiên cứu giải pháp tính toán, xác định các vùng hội tụ của thấu kính có chỉ số khúc xạ âm sử dụng phương pháp ray tracing;

- Nghiên cứu phát triển mô hình cấu trúc anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm tạo đa búp sóng định hướng ứng dụng cho trạm gốc trong thông tin di động băng tần 28 GHz.

2. Đối tượng nghiên cứu

- Hệ thống thông tin, truyền thông vô tuyến, anten cho trạm gốc trong thông tin di động 5G;

- Vật liệu sử dụng làm thấu kính, vật liệu có chỉ số khúc xạ âm;

- Xác định các đặc tính bức xạ, khả năng hoạt động trong dải tần số rộng, khả năng tạo đa búp sóng, quét búp sóng góc rộng của cấu trúc anten thấu kính đề xuất.

3. Phạm vi nghiên cứu

- Nghiên cứu lý thuyết về anten bao gồm những vấn đề chung và các tham số đặc trưng của anten;

- Nghiên cứu chung về anten đa búp sóng, bao gồm đặc tính bức xạ, tham số điện, yêu cầu và phạm vi ứng dụng;

- Xây dựng mô hình toán học, khảo sát các tham số của cấu trúc anten đề xuất sử dụng phần mềm tính toán điện từ trường hiện đại để mô phỏng và kiểm chứng kết quả (Ansys HFSS, MATLAB).

4. Phương pháp nghiên cứu

- Nghiên cứu lý thuyết về kỹ thuật siêu cao tần, kỹ thuật anten và truyền sóng. Trên cơ sở nghiên cứu lý thuyết, tiến hành xây dựng mô hình, lựa

chọn các tham số mô phỏng phù hợp với yêu cầu nhiệm vụ nghiên cứu. Lựa chọn phần mềm mô phỏng, phương pháp mô phỏng phù hợp với mô hình bài toán cần giải quyết;

- Sử dụng phần mềm tính toán điện từ trường hiện đại (Ansys HFSS, MATLAB) để tính toán các tham số đặc trưng của anten, từ đó làm cơ sở đề xuất cấu trúc anten thấu kính đa búp sóng định hướng ứng dụng cho trạm gốc trong thông tin di động băng tần 28 GHz;

- Phân tích, tổng hợp, đánh giá và nhận xét các cấu trúc anten thấu kính đã đề xuất dựa trên kết quả tính toán và mô phỏng.

C. Đóng góp của luận án

1. Đề xuất giải pháp tính toán, xác định cấu trúc anten thấu kính theo điều kiện Straight line có chỉ số khúc xạ âm hoạt động ở băng tần 28 GHz.
2. Đề xuất giải pháp thiết kế anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm tạo đa búp sóng dựa trên phương pháp ray tracing, định hướng ứng dụng cho trạm gốc trong thông tin di động băng tần 28 GHz.

D. Bố cục của luận án

Luận án được tổ chức thành 03 chương, bố cục cụ thể như sau:

- **Chương 1:** Tổng quan về anten cho trạm gốc trong thông tin di động băng tần 28 GHz

Chương 1 trình bày những vấn đề chung về anten cho trạm gốc trong thông tin di động, tổng quan về anten thấu kính: phân loại, ứng dụng, vật liệu làm thấu kính và nguồn phát xạ cho anten thấu kính. Ngoài ra, trong chương này còn trình bày những kỹ thuật tạo đa búp sóng cho anten thấu kính đã và đang được các nhà khoa học quan tâm nghiên cứu. Để có cơ sở nghiên cứu và đề xuất cấu trúc anten thấu kính tạo

đa búp sóng mới, luận án thực hiện đánh giá tổng quan các nghiên cứu trong nước và ngoài nước về anten thấu kính, anten tạo đa búp sóng. Từ đó rút ra các ưu điểm và nhược điểm của các công bố trước đó. Đây là cơ sở lý thuyết quan trọng để đề xuất cấu trúc anten thấu kính ở các chương tiếp theo của luận án.

- **Chương 2:** Nghiên cứu phát triển anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm định hướng ứng dụng cho trạm gốc băng tần 28 GHz

Trên cơ sở nghiên cứu kiến thức tổng quan và thực tế đánh giá các công trình nghiên cứu ở Chương 1, Chương 2 luận án thực hiện nghiên cứu giải pháp tính toán xác định cấu trúc anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện giao điểm của tia sóng tới từ nguồn phát xạ và tia sóng khúc xạ đi ra từ mặt mở của thấu kính nằm trên một đường thẳng định hướng ứng dụng cho trạm gốc trong thông tin di động băng tần 28 GHz.

- **Chương 3:** Nghiên cứu giải pháp tạo đa búp sóng cho anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm

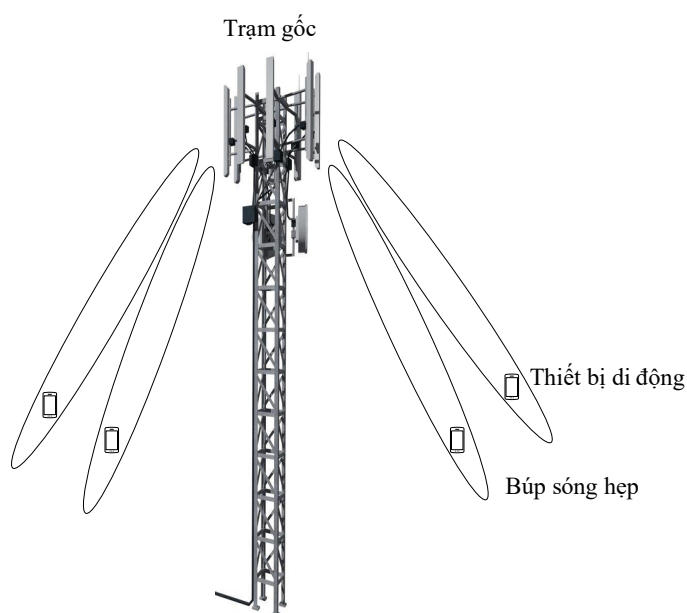
Trên cơ sở cấu trúc anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm được đề xuất trong Chương 2. Trong Chương 3, luận án thực hiện tính toán nhằm xác định được các vùng hội tụ của thấu kính có chỉ số khúc xạ âm sử dụng phương pháp ray tracing, làm cơ sở để thiết lập nguồn phát xạ lệch trục. Sử dụng phần mềm tính toán trường điện từ Ansys HFSS để mô hình hóa cấu trúc, thiết lập các nguồn phát xạ trên các vùng hội tụ và quỹ đạo đã xác định, thực hiện mô phỏng, phân tích và đánh giá khả năng tạo đa búp sóng của cấu trúc anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện đề xuất định hướng ứng dụng cho trạm gốc trong thông tin di động băng tần 28 GHz.

Chương 1

TỔNG QUAN VỀ ANTEN CHO TRẠM GỐC TRONG THÔNG TIN DI ĐỘNG BĂNG TẦN 28 GHz

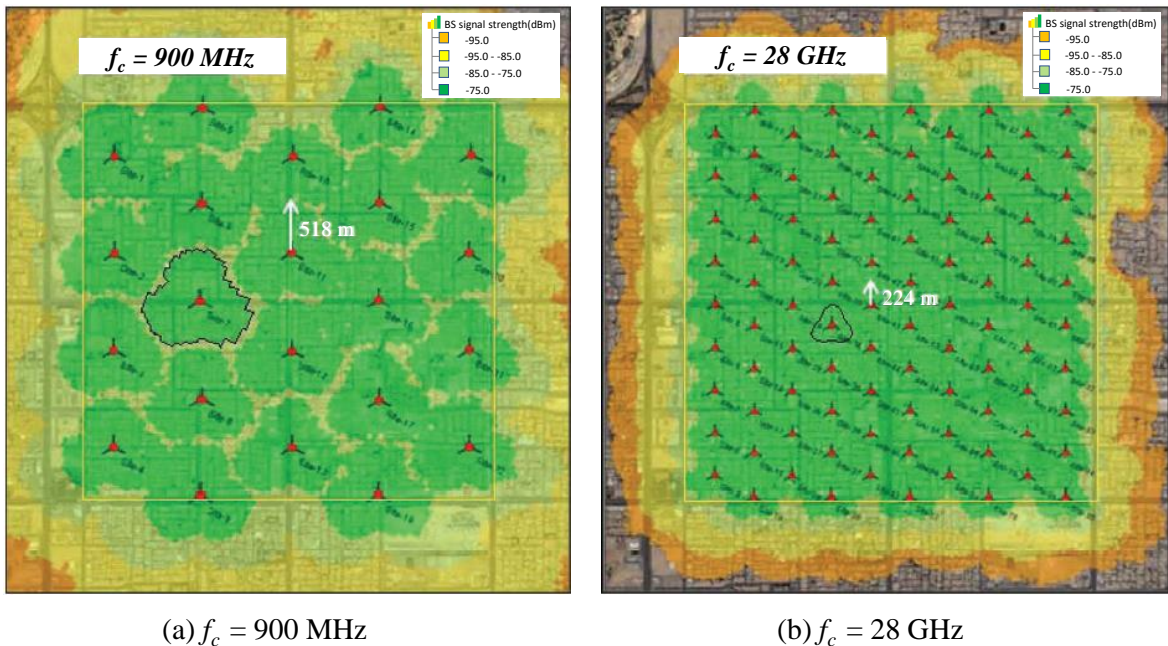
1.1. Những vấn đề chung về anten cho trạm gốc trong thông tin di động 5G

Trong hệ thống thông tin di động, anten là một thành phần quan trọng không thể thiếu, chúng là cầu nối giữa các thiết bị di động và hệ thống thông tin. Anten xuất hiện cả phía phát và phía thu, có nhiệm vụ bức xạ hoặc thu nhận sóng điện từ trong không gian và mang theo tín hiệu chứa tin tức cần truyền nhận. Anten tại các trạm gốc (BTS: Base Transceiver Station) có khả năng bức xạ toàn bộ vùng phủ sóng, cho phép cải thiện đáng kể phạm vi và dung lượng của hệ thống thông tin di động.



Hình 1.1: Búp sóng hẹp của anten tại trạm gốc.

Mô hình anten tại trạm gốc có búp sóng hẹp được thể hiện như trong Hình 1.1. Búp sóng hẹp hướng thẳng về phía thiết bị mong muốn và dịch chuyển theo sự di chuyển của thiết bị di động. Khi so sánh với anten đa hướng, anten định hướng có hệ số tăng ích cao, phạm vi liên lạc xa hơn, hạn chế nhiễu, và cho phép việc tái sử dụng tần số đối với các trạm gốc lân cận và khi triển khai thêm các trạm BTS mới.

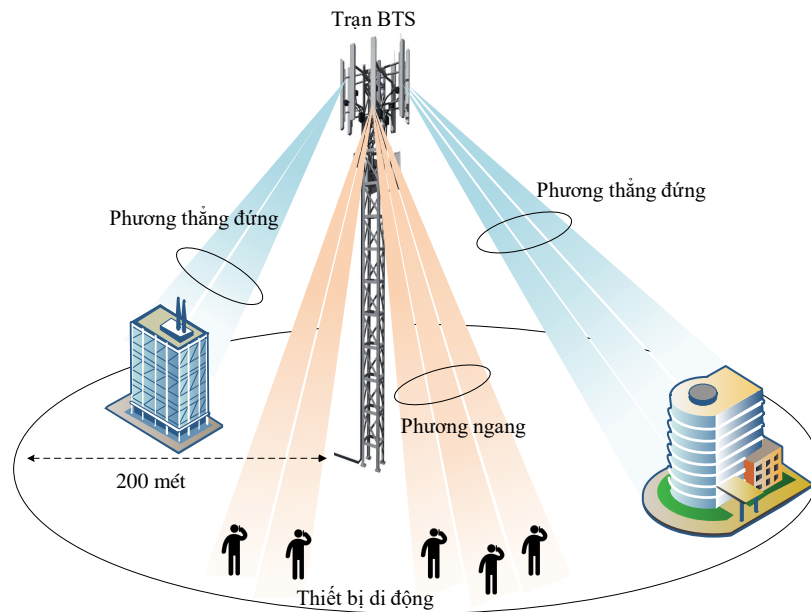


Hình 1.2: Cấu trúc vùng phủ sóng của các trạm gốc với $f_c = 900 \text{ MHz}$ và 28 GHz .

Đối với các trạm BTS thế hệ thứ tư trở về trước, cấu trúc mạng các trạm gốc hoạt động ở tần số trung tâm là 900 MHz có các trạm gốc nằm cách nhau khoảng 1 km và bán kính phạm vi phủ sóng khoảng 500 m , được thể hiện như trong Hình 1.2a [23]. Mật độ của các anten tại trạm gốc sẽ do số lượng người dùng thực tế quyết định. Đối với cấu trúc mạng các trạm gốc của hệ thống thông tin di động thế hệ thứ năm hoạt động ở băng tần 28 GHz có số lượng trạm gốc nhiều hơn, bố trí dày đặc hơn, được thể hiện trong Hình 1.2b. Do hoạt động ở dải sóng milimét nên suy hao đường truyền của anten tại trạm

gốc này cao hơn so với thế hệ anten tại trạm gốc trước đó. Để duy trì mức năng lượng đồng đều, đáp ứng được yêu cầu của người sử dụng, khoảng cách giữa các trạm gốc đã giảm từ 1 km xuống 400 m. Đối với hệ thống thông tin di động 4G hiện tại hoạt động ở băng tần 0,7 GHz - 2,7 GHz có suy hao đường truyền trong không gian tự do là 87 dB ở khoảng cách 200 m, trong khi đó đối với hệ thống thông tin di động 5G hoạt động ở băng tần 28 GHz có suy hao đường truyền cao là 107 dB [23]. Tuy nhiên, do sự suy hao đường truyền có thể ảnh hưởng bởi điều kiện thời tiết, các chướng ngại vật như tòa nhà, cây cối và địa hình nên khoảng cách giữa các trạm gốc được thiết lập trong khoảng bán kính 200 m. Do đó, anten tại trạm gốc trong thông tin di động 5G phải có khả năng bức xạ cao để bù lại suy hao truyền dẫn.

Bên cạnh đó, trong những năm gần đây, sự phát triển của các thiết bị không dây tăng lên nhanh chóng, các ứng dụng của các thiết bị không dây đa phương tiện ngày càng nhiều kéo theo nhu cầu về dữ liệu và tốc độ xử lý ngày càng lớn. Do đó, hệ thống anten ở trạm BTS phải có khả năng tạo ra đa búp sóng, quét búp sóng góc rộng. Anten đa búp sóng có ý nghĩa quan trọng trong việc hỗ trợ cải thiện tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu (SIR: Signal to Interference Ratio), tốc độ truyền dữ liệu cao, tăng hiệu suất sử dụng năng lượng và phổ tần, định hình búp sóng linh hoạt. Mô hình về anten đa búp sóng cho trạm gốc trong thông tin di động 5G được trình bày trong Hình 1.3. Anten trạm gốc trong hệ thống thông tin thế hệ mới phải có khả năng tạo ra được nhiều búp sóng trong cả phương thẳng đứng và phương ngang. Các búp sóng trong phương thẳng đứng sẽ đáp ứng cho người dùng di động ở các nhà cao tầng, chung cư. Trong khi đó các búp sóng phân bố theo phương ngang sẽ đáp ứng cho các thiết bị di động hoạt động trên mặt đất. Các anten



Hình 1.3: Mô hình về anten đa búp sóng cho trạm gốc trong thông tin di động 5G.

tại trạm gốc được thiết kế với một mạng chuyển mạch đa búp sóng để phân phối các búp sóng thích hợp cho mỗi người dùng di động cụ thể.

Hệ thống thông tin di động 5G được cho là đã tận dụng một cách tối ưu phổ tần khi sử dụng cả hai dải tần là dải tần số cao trên 24 GHz và dải tần số thấp dưới 6 GHz. Dải tần số thấp nằm trong phổ tần dưới 6 GHz, và các anten M-MIMO trong dải tần này được sử dụng để phủ sóng ở các macro cell và cung cấp dung lượng cơ bản. Tần số khả dụng trong băng tần này bao gồm 3,3 - 3,8 GHz và 4,4 - 5,0 GHz. Đối với dải tần số cao trên 24 GHz và các anten M-MIMO trong băng tần này được sử dụng cho các điểm phát sóng, vùng phủ sóng trong nhà và kết nối giữa mạng trung tâm (mạng trục, mạng lõi) và các mạng con từ xa. Trong những năm gần đây, nhiều quốc gia đã công bố dải tần số trên 24 GHz cho thông tin di động 5G, bao gồm các băng tần 24 - 29 GHz, 37 - 40 GHz và 60 - 76 GHz [24]. Ngoài ra, Ủy ban Truyền thông Liên bang (FCC: Federal Communications Commission) của

Mỹ và các quốc gia khác như Nhật Bản, Hàn Quốc đã xác định băng tần 28 GHz (N257) và 39 GHz (N260) là băng tần trung tâm sẽ được sử dụng trong các nghiên cứu về thông tin di động 5G. Đây là lần đầu tiên các nhà khoa học thực hiện ứng dụng công nghệ sóng milimét trong hệ thống thông tin di động, điều này sẽ thúc đẩy các nghiên cứu, thiết kế và ứng dụng các công nghệ anten dải sóng milimét.

Bằng việc sử dụng sóng milimét tại trạm gốc, kích thước anten của trạm gốc trở nên nhỏ hơn và gần bằng một phần mười kích thước của anten ở trạm gốc thế hệ trước đó [25]. Anten tại trạm gốc có kích thước nhỏ sẽ giúp cho việc triển khai, lắp đặt được dễ dàng hơn, giảm được các tác nhân từ bên ngoài môi trường và giảm chi phí sản xuất. Hệ thống anten ở trạm BTS cho thông tin di động 5G sử dụng dải sóng milimét cho phép các nhà nghiên cứu, chế tạo lựa chọn nhiều loại anten khác nhau như: anten mảng pha, anten mặt phản xạ, hoặc anten thấu kính, . . . Trong đó, anten thấu kính với khả năng bức xạ năng lượng tốt, tính định hướng cao, khả năng tạo đa búp sóng, xoay búp sóng là một trong những ứng viên tiềm năng ứng dụng cho trạm gốc trong thông tin di động dải sóng milimét.

1.2. Tổng quan về anten thấu kính

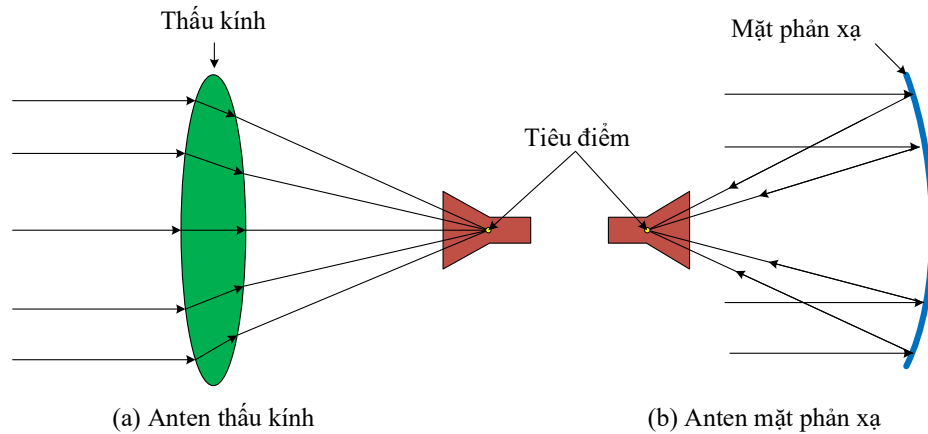
1.2.1. Giới thiệu chung

Vào đầu những năm 1880, Heinrich Hertz, một nhà vật lý người Đức, đã nghiên cứu thấu kính điện môi kết hợp với nguồn phát xạ và chứng minh sự hoạt động của thấu kính trong môi trường trường điện từ. Đến năm 1888, Oliver Lodge đã thiết kế anten thấu kính điện môi đầu tiên trong các thí nghiệm của mình hoạt động ở bước sóng 1 mét [26]. Tuy nhiên, phải đến

Chiến tranh Thế giới thứ hai, anten thấu kính mới được nghiên cứu và phát triển rộng rãi hơn. Nhưng tại thời điểm đó, ở dải sóng siêu cao tần, kích thước của anten thấu kính cồng kềnh và nặng hơn so với anten mặt phản xạ, do đó, anten thấu kính ít được quan tâm hơn so với anten mặt phản xạ.

Với những tiến bộ vượt bậc của công nghệ chế tạo mạch hoạt động trong dải sóng milimét và Sub-mmW trong hai thập kỷ qua, đã thúc đẩy các nhà nghiên cứu có sự quan tâm ngày càng nhiều đến anten thấu kính, với công nghệ mới, kích thước của loại anten này được chế tạo nhỏ gọn hơn, đáp ứng được các yêu cầu và ứng dụng thực tế. Với cấu trúc đặc biệt, nguồn phát xạ đặt phía sau thấu kính nên anten không bị ảnh hưởng bởi sự che khuất của nguồn phát xạ. Do đó, anten thấu kính có thể tạo được đa búp sóng dễ dàng hơn, có khả năng định hình búp sóng và xoay búp sóng theo mục tiêu. Trong hầu hết các trường hợp, dạng bức xạ của các tia sóng ở đầu ra của thấu kính là tia sóng chuẩn trực (sóng đầu ra có dạng sóng phẳng, đồng pha) cố định hoặc có khả năng quét búp sóng. Anten thấu kính là một dạng của anten mặt mở nên anten có tính định hướng cao, biên độ cánh sóng bên thấp và anten thấu kính được coi là một giải pháp thay thế đáng tin cậy cho anten mặt phản xạ ở dải sóng milimét.

Thấu kính có thể được sử dụng để hiệu chỉnh pha hoặc biên độ (hoặc cả hai) của nguồn phát xạ chính để biến nó thành dạng bức xạ đầu ra như mong muốn. Theo nghĩa này, thấu kính có chức năng tương đương với gương phản xạ. Tuy nhiên, thay vì phản xạ, nguyên tắc hoạt động của thấu kính dựa trên sự khúc xạ của sóng điện từ tại bề mặt thấu kính (trong trường hợp thấu kính đồng nhất đẳng hướng), hoặc bên trong vật liệu điện môi của thấu kính trong trường hợp thấu kính với chỉ số khúc xạ không đồng nhất. Hình 1.4(a)



Hình 1.4: Cấu trúc anten thấu kính và anten mặt phản xạ.

thể hiện cấu trúc cơ bản nhất của anten thấu kính, các tia song song của sóng phẳng đi tới thấu kính bị khúc xạ tại bề mặt sau đó đi xuyên qua thấu kính và hội tụ tại một điểm, gọi là tiêu điểm của thấu kính. Tất cả các tia này có cùng độ dài điện, nghĩa là chúng đến cùng pha tại tiêu điểm (nguyên lý Fermat), mặc dù độ dài vật lý của chúng khác nhau, nhưng chúng được bù bằng vận tốc pha chậm hơn ($v = c/n$) trong các phần khác nhau của thấu kính. Trong hầu hết các thiết kế, kích thước thấu kính lớn so với bước sóng hoạt động cho phép sử dụng các phương pháp thiết kế dựa trên nguyên lý quang hình [27].

1.2.2. Ưu điểm và nhược điểm của anten thấu kính

Sử dụng thấu kính là một giải pháp thiết kế anten hiệu quả trong đó có thể đạt được đồng thời khả năng định hình búp sóng, tạo đa búp sóng, làm giảm biên độ cánh sóng bên và điều khiển búp sóng trong không gian với cấu trúc kích thước nhỏ. Thấu kính điện môi và một số dạng thấu kính khác có thể mang lại những lợi thế về mặt kinh tế vì chúng có cấu trúc và quy trình sản xuất không quá phức tạp. Thấu kính hoạt động dựa trên nguyên

lý quang hình (GO: Geometrical Optics) và quang lý (PO: Physical Optics), theo đó thấu kính có khả năng chuyển từ sóng cầu/dạng pha cầu thành sóng phẳng/dạng pha phẳng, đồng pha trên mặt mở, điều này giúp cho anten nâng cao được khả năng bức xạ. Nguồn phát xạ được thiết lập phía sau thấu kính, đặc điểm này là chìa khóa để có thể xây dựng được nhiều cấu trúc anten thấu kính linh hoạt. Với cấu trúc đặc biệt, thấu kính có lợi thế vượt trội so với cấu trúc gương phản xạ. Anten thấu kính không bị ảnh hưởng bởi sự che chắn của nguồn phát xạ và các thanh đỡ mặt phản xạ, từ đó có thể giảm được hiện tượng méo và phân cực chéo tín hiệu. Với sự phát triển mạnh mẽ của công nghệ thiết kế, mô phỏng và chế tạo mới, vật liệu điện môi tổn hao thấp và với sự bùng nổ về điện môi nhân tạo đang giúp cho việc nghiên cứu, phát triển và chế tạo anten thấu kính hiệu suất cao, được ứng dụng thiết thực trong đời sống.

Anten thấu kính hoạt động ở dải sóng milimét tất nhiên không phải không có nhược điểm và một trong số đó là suy hao điện môi, hiện tượng phản xạ xảy ra bên trong và trên bề mặt thấu kính. Để giảm thiểu những suy hao nói trên, các nhà nghiên cứu, chế tạo đã sử dụng các vật liệu có mức suy hao thấp, chẳng hạn như Teflon, Polyethylene, Alumina,..., những vật liệu mà có thể được giảm tổn hao xuống mức thấp.

1.2.3. Phân loại và ứng dụng

Việc phân loại anten thấu kính thường dựa trên các đặc điểm cấu trúc vật lý của anten: vị trí nguồn phát xạ so với thấu kính (ở xa thấu kính hoặc tiếp xúc trực tiếp với thấu kính), đặc điểm chỉ số khúc xạ của thấu kính (đồng nhất, phân bậc hoặc không đồng nhất, chỉ số khúc xạ dương và âm); số lượng

Bảng 1.1: Phân loại anten thấu kính dựa vào cấu trúc vật lý.

Nguồn phát xạ	Ở xa thấu kính	- Thấu kính đồng nhất	Khúc xạ đơn
		+ Chỉ số khúc xạ dương + Chỉ số khúc xạ âm	Đa khúc xạ
	Gắn liền với thấu kính	Thấu kính đồng nhất	Khúc xạ đơn
		Thấu kính không đồng nhất	Chiết suất liên tục Chiết suất phân bậc
Cấu trúc thấu kính và dạng bức xạ đầu ra	Điện môi	- Búp sóng cố định - Quét búp sóng - Tạo đa búp sóng	
	Mảng dạng tấm		
	Mảng phẳng siêu vật liệu		

các bề mặt khúc xạ (khúc xạ đơn, đa khúc xạ); cấu trúc thấu kính (điện môi, mảng dạng tấm, mảng phẳng siêu vật liệu), được trình bày trong Bảng 1.1. Đối với mỗi loại anten này, các thấu kính có thể được phân loại thêm theo dạng bức xạ đầu ra: búp sóng cố định (búp sóng chuẩn trực hoặc búp sóng được định hình), tạo nhiều búp sóng hoặc quét búp sóng.

Anten thấu kính được ứng dụng khá rộng rãi trong hệ thống thông tin vô tuyến và có thể kể ra một số ứng dụng tiêu biểu như sau [28]:

- Ứng dụng trong dịch vụ không dây cố định cho kết nối internet, tại các trạm gốc trong thông tin di động 4G.

- Anten thu cho vô tuyến truyền hình kết nối thông qua vệ tinh, thông tin vệ tinh với khả năng tạo đa búp sóng. Ngoài ra anten thấu kính còn được ứng dụng trong thông tin vệ tinh với cấu trúc đầu cuối mặt mở rất nhỏ và siêu nhỏ (VSAT and USAT: Very and Ultra Small Aperture Terminal).

- Trong thông tin ra-đa, anten thấu kính được gắn trên các ô tô, có khả năng quét tín hiệu chủ động hoặc thụ động trong một khu vực rộng với mục đích tránh va chạm, hoạt động ở băng tần 77 GHz...

- Đối với anten tạo đa búp sóng, anten thấu kính được sử dụng cho các mạng nội bộ không dây (WLAN: Wireless Local Area Network), các kết nối điểm - đa điểm có thể đáp ứng được nhiều thiết bị cùng một lúc, điều này loại bỏ được việc làm chậm tốc độ dữ liệu khi các nút truyền tín hiệu theo kiểu đa hướng do đó gây nên nhiễu lẫn nhau.

- Đối với các cấu trúc thu phát nhỏ gọn thì thấu kính có chức năng như một vỏ bọc các linh kiện điện tử và các thành phần khác của thiết bị. Đây cũng là giải pháp để cách ly các thành phần của thiết bị với môi trường hoạt động của nó.

Với cấu trúc nhỏ gọn, có khả năng bức xạ tốt, tạo ra đa búp sóng, điều này cho phép anten thấu kính trở nên rất hấp dẫn để khai thác băng thông lớn có sẵn ở dải sóng milimét và phù hợp với các ứng dụng đòi hỏi tốc độ dữ liệu rất cao và hiệu suất phổ lớn.

1.2.4. Vật liệu của thấu kính

Các vật liệu được sử dụng làm thấu kính rất đa dạng, nó có thể được cấu tạo bởi các vật liệu dẫn điện tốt như bạc, đồng, nhôm... , hoặc các vật liệu điện môi như Teflon, Polyethylen,... hoặc kết hợp các vật liệu dẫn điện và vật liệu điện môi. Các vật liệu điện môi sử dụng làm thấu kính thường được lựa chọn dựa trên độ điện thẩm tương đối, chúng thường nằm trong khoảng từ 1,2 đến 12. Những dạng vật liệu điện môi này đang được sử dụng và dự kiến sẽ được sử dụng cho các hệ thống anten dải sóng milimét.

Anten thấu kính điện môi được chế tạo bằng vật liệu có độ điện thẩm cao làm tăng hiệu quả truyền năng lượng qua thấu kính và cải thiện tỷ lệ bức xạ trước và sau của anten thấu kính. Tuy nhiên, khi sử dụng vật liệu có độ

Bảng 1.2: Các tham số điện môi của một số loại vật liệu.

		Hệ số tổn hao điện môi ($\tan\delta$)						
		0,0001	0,0002	0,0003	0,0004	0,0006	0,001	0,01
Độ điện thẩm tương đối (ϵ_r)	1							
	1,2							MgCO ₃
	2,1	Teflon						
	2,2				Polypropylene			
	2,3	Polyethylene						
	2,5		Polystyrene					
	3	Quaz						
	5			Mica				
	9					Al ₂ O ₃		
	12,5						GaAs	

điện thẩm cao trong chế tạo anten thấu kính sẽ gây ra sự phản xạ trên bề mặt thấu kính, giữa lớp không khí và lớp điện môi của thấu kính. Điều này có thể ảnh hưởng đáng kể đến không chỉ trở kháng đầu vào của nguồn phát xạ, mà còn ảnh hưởng đến các đặc tính của anten thấu kính như: giảm hệ số tăng ích; biến dạng búp sóng; và tăng biên độ cánh sóng bên.

Khi sử dụng vật liệu điện môi làm thấu kính thì tham số hệ số tổn hao điện môi ($\tan\delta$) hay hệ số tiêu tán là một tham số quan trọng. Nó được xác định từ tiếp tuyến của góc tổn hao và do đó còn được gọi là tổn hao tiếp tuyến. Nói một cách khác, góc suy hao là góc mà tiếp tuyến của nó được suy ra từ tỷ số giữa phần ảo và phần thực của độ điện thẩm: $\text{Im}(\epsilon)/\text{Re}(\epsilon)$. Bảng 1.2 trình bày các tham số điện môi của một số vật liệu thường được sử dụng làm thấu kính.

a) Vật liệu có chỉ số khúc xạ âm (NRI: Negative Refractive Index)

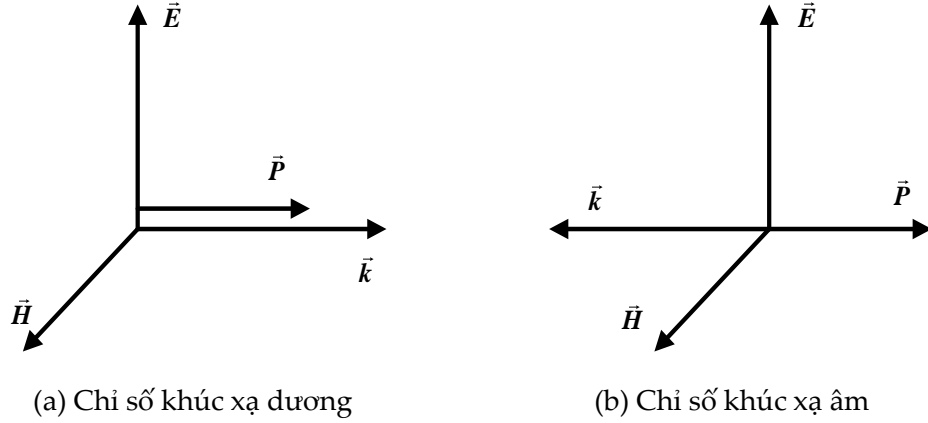
Hiện nay, các nhà khoa học khi chế tạo thường lựa chọn vật liệu có độ

điện thẩm trung bình như Teflon, Polyethylene,... làm anten thấu kính. Tuy nhiên trong những năm gần đây, các nhà khoa học đang có xu hướng quan tâm đến thấu kính siêu vật liệu (Metamaterial) hoặc thấu kính có chỉ số khúc xạ âm. Đối với một vật liệu được sử dụng trong môi trường trường điện từ, ta cần xem xét hai tham số quan trọng đó là độ điện thẩm ε và độ từ thẩm μ . Nó là những đại lượng đặc trưng cơ bản quyết định đến sự truyền sóng điện từ trong môi trường vật chất. Mối liên hệ giữa chúng trong môi trường đẳng hướng được thể hiện thông qua công thức [29]:

$$n^2 = \varepsilon\mu \quad (1.1)$$

Trong đó, n là chỉ số khúc xạ của vật liệu. Nếu chúng ta không tính đến tổn thất và coi n , ε và μ là các số thực, thì từ phương trình (1.1) có thể thấy rằng sự thay đổi đồng thời các dấu của ε và μ không ảnh hưởng đến các quan hệ giữa chúng. Điều này khiến cho các nhà khoa học đã có những quan điểm khác nhau về đặc tính của vật liệu. Quan điểm thứ nhất cho rằng, chúng ta có thể thừa nhận các đặc tính của một chất thực sự không bị ảnh hưởng bởi sự thay đổi đồng thời các dấu của ε và μ . Quan điểm thứ hai thì khẳng định rằng, $\varepsilon < 0$ và $\mu < 0$ là mâu thuẫn với một số quy luật cơ bản của tự nhiên, vì vậy không có chất nào có đồng thời $\varepsilon < 0$ và $\mu < 0$. Trong khi đó, quan điểm thứ ba cho rằng, có thể tồn tại một môi trường vật chất mà ở đó có đồng thời $\varepsilon < 0$ và $\mu < 0$ nhưng chúng có một số tính chất khác so với các vật liệu có $\varepsilon > 0$ và $\mu > 0$.

Vào cuối những năm 1960 một nhà vật lý người Nga tên là Veselago đã đưa ra một nghiên cứu, tính toán và khẳng định rằng, có thể tồn tại một môi trường vật chất mà ở đó độ điện thẩm ε và độ từ thẩm μ đồng thời có giá trị

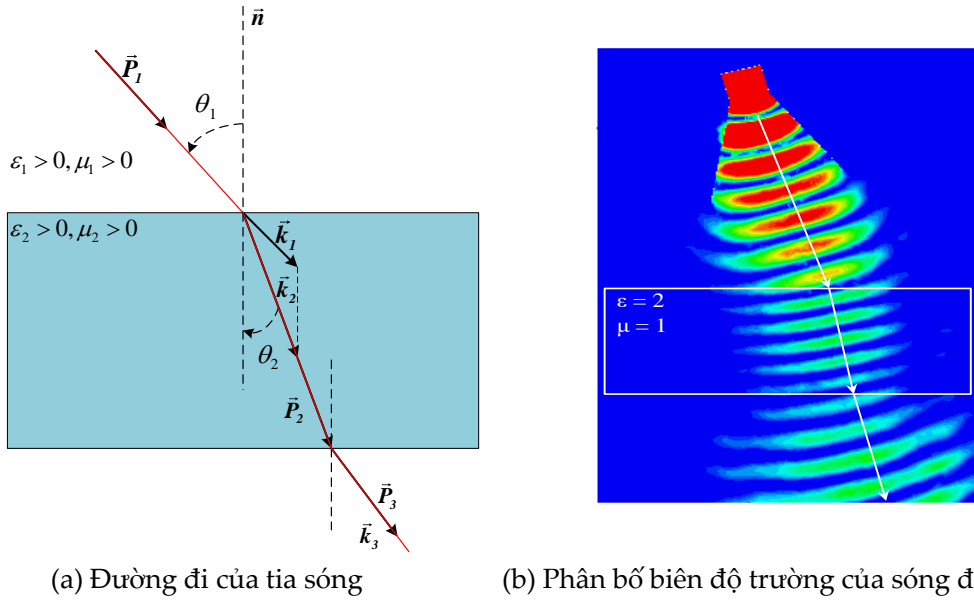


Hình 1.5: Mối quan hệ giữa các véc-tơ \vec{E} , \vec{H} , \vec{P} và \vec{k} trong môi trường truyền sóng có chỉ số khúc xạ âm và chỉ số khúc xạ dương.

âm. Môi trường vật chất này cho phép sóng điện từ đi xuyên qua, nhưng tuân theo quy tắc bàn tay trái tức là véc-tơ Poynting (\vec{P}) và véc-tơ truyền sóng (\vec{k}) cùng phương nhưng ngược chiều nhau, hay là tia sóng tới và tia sóng khúc xạ cùng nằm một bên so với pháp tuyến tại mặt phân cách [29–31], được thể hiện như trong Hình 1.5. Tuy nhiên phải đến 30 năm sau, các nhà khoa học mới nghiên cứu và chế tạo ra một số cấu trúc vật chất hoạt động theo quy tắc bàn tay trái (LH: Left Hand) đầu tiên [29, 32]. Sau đó còn được gọi với một số cái tên khác như: môi trường có khúc xạ âm [29]; môi trường khúc xạ ngược (backward) [33]; môi trường có cặp giá trị âm (DN: Double Negative) [34] và môi trường Veselago [35]. Hằng số truyền lan sóng của sóng phẳng được cho bởi công thức, $k = \omega \sqrt{\epsilon \mu}$ vì vậy sự truyền lan sóng có thể xảy ra trong môi trường có chỉ số khúc xạ âm (NRI).

b) Sự khúc xạ trên mặt phân cách của vật liệu

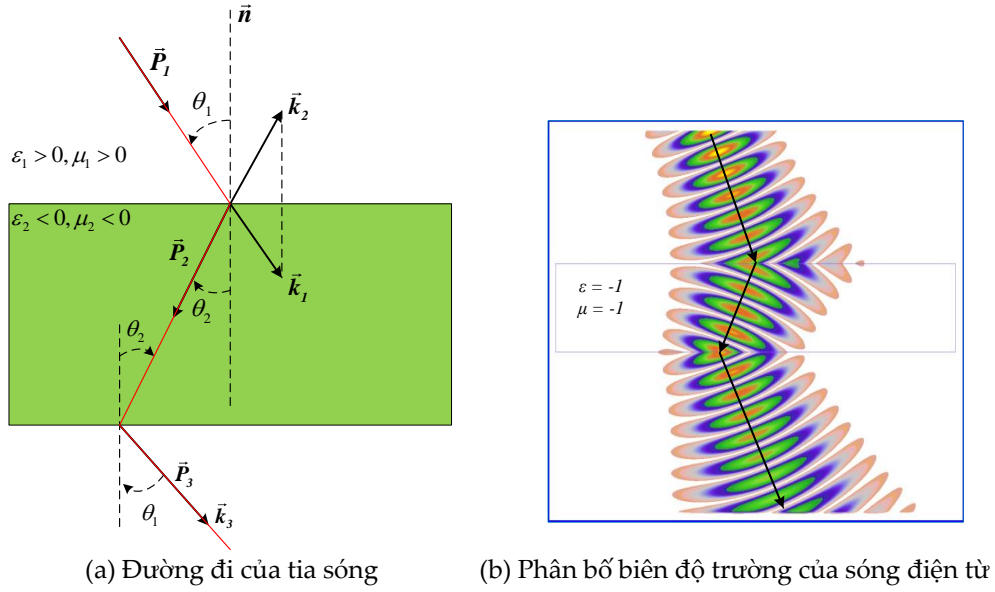
Xem xét đường đi của tia sóng và sự truyền lan năng lượng của sóng điện từ xảy ra ở mặt phân cách khi sóng điện từ đi từ môi trường này sang môi trường khác được thể hiện như trong Hình 1.6 và 1.7.



Hình 1.6: Sự khúc xạ tại mặt phân cách giữa hai môi trường truyền dẫn có chỉ số khúc xạ dương.

Trong Hình 1.6, khi tia sóng đi từ môi trường thứ nhất có $\varepsilon_1 > 0$ và $\mu_1 > 0$ sang môi trường thứ hai có $\varepsilon_2 > 0$ và $\mu_2 > 0$ sẽ xảy ra hiện tượng khúc xạ tại mặt phân cách giữa hai môi trường. Tia sóng tới P_1 và tia sóng khúc xạ P_2 nằm về hai phía của véc-tơ pháp tuyến \vec{n} tại mặt phân cách. Véc-tơ poynting \vec{P}_2 và véc-tơ truyền sóng \vec{k}_2 cùng phương và cùng chiều với nhau. θ_1 là góc tới và θ_2 là góc khúc xạ của tia sóng. Các tia sóng tuân theo định luật khúc xạ Snell. Phân bố biên độ điện trường của sóng điện từ truyền lan qua mặt phân cách giữa hai môi trường có chỉ số khúc xạ dương được thể hiện như trong Hình 1.6b.

Tuy nhiên, theo nhà khoa học Veselago, khi tia sóng đi từ môi trường thứ nhất có $\varepsilon_1 > 0$ và $\mu_1 > 0$ sang môi trường thứ hai có $\varepsilon_2 < 0$ và $\mu_2 < 0$ áp dụng điều kiện bờ đối với các thành phần điện từ trường dọc theo mặt phân cách thì tia sóng P_1 vẫn xảy ra hiện tượng khúc xạ nhưng tia sóng khúc xạ P_2 nằm cùng bên với tia sóng tới P_1 so với véc-tơ pháp tuyến \vec{n} , như trong



Hình 1.7: Sự khúc xạ tại mặt phân cách giữa hai môi trường truyền dẫn có chỉ số khúc xạ âm và chỉ số khúc xạ dương.

Hình 1.7. Véc-tơ poynting \vec{P}_2 và véc-tơ truyền sóng \vec{k}_2 cùng phương nhưng lại ngược chiều với nhau. Các góc của tia sáng tới và tia sáng khúc xạ tại mặt phân cách được xác định dựa vào định luật Snell với điều kiện khúc xạ âm [29, 30]. Khi tia sáng đi từ môi trường có $\varepsilon_2 < 0$ và $\mu_2 < 0$ sang môi trường có $\varepsilon_1 > 0$ và $\mu_1 > 0$ thì sự khúc xạ tại mặt phân cách xảy ra tương tự. Trong nghiên cứu [31], các nhà khoa học đã mô phỏng và xem xét sự truyền lan của sóng điện từ trong môi trường đồng nhất có chỉ số khúc xạ âm với giá trị $n = -1$. Thông qua sự phân bố biên độ điện trường của sóng điện từ từ môi trường có chỉ số khúc xạ dương sang môi trường có chỉ số khúc xạ âm chúng ta có thể dễ dàng nhận thấy sự khúc xạ ngược của sóng điện từ trong môi trường có chỉ số khúc xạ âm, được thể hiện như trong Hình 1.7b.

Từ Hình 1.7a, ta có: $k_2 = \omega\sqrt{\varepsilon_2\mu_2} = \omega n_2$ và $k_1 = \omega\sqrt{\varepsilon_1\mu_1} = \omega n_1$. Do véc-tơ truyền sóng \vec{k}_2 trong môi trường có chỉ số khúc xạ âm cùng phương nhưng ngược hướng với véc-tơ poynting \vec{P}_2 nên ta có mối quan hệ sau [30]:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{-k_2}{k_1} \Leftrightarrow \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{-n_2}{n_1} > 0 \quad (1.2)$$

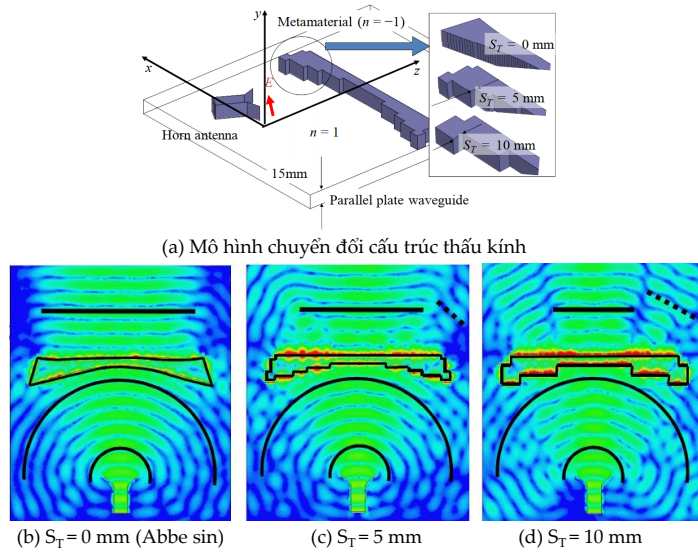
Trong trường hợp tia sóng đi từ môi trường không gian tự do với $n_1 > 0$ sang môi trường có chỉ số khúc xạ n_2 . Để thỏa mãn phương trình (1.2) thì n_2 phải mang giá trị âm hay $n_2 < 0$. Điều này có nghĩa là chỉ số khúc xạ của môi trường theo quy tắc bàn tay trái mang giá trị âm.

$$n = -\sqrt{\varepsilon\mu} < 0 \quad (1.3)$$

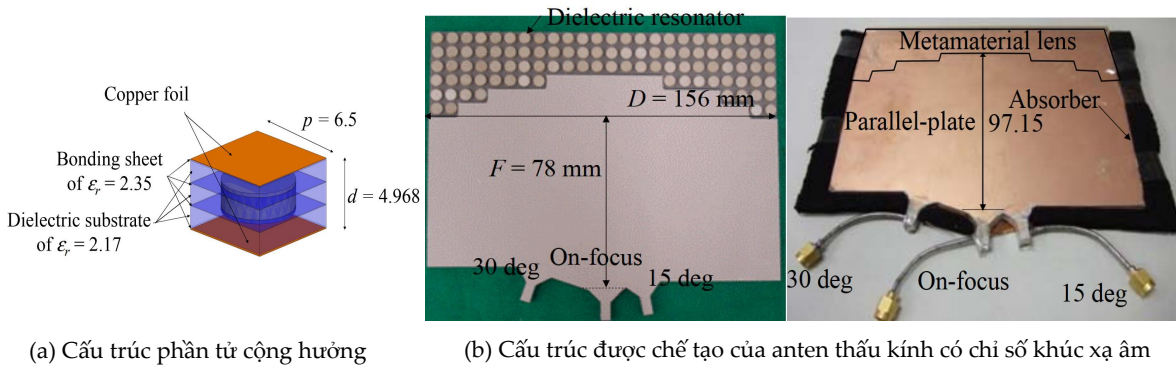
Đây là đặc điểm quyết định đến tính chất của môi trường vật liệu có chỉ số khúc xạ âm. Bằng cách lần theo đường đi của các tia quang học qua thấu kính làm bằng vật liệu tuân theo quy tắc bàn tay trái hay có chỉ số khúc xạ âm, có thể chỉ ra rằng thấu kính lõm trở thành hội tụ và thấu kính lồi trở nên phân kỳ, do đó đảo ngược nguyên tắc hoạt động của thấu kính như trong môi trường thông thường [29, 30].

Hiện nay, vật liệu có độ điện thẩm (ε) và độ từ thẩm (μ) mang giá trị âm đồng nhất, đẳng hướng với sóng điện từ chưa được tìm thấy trong tự nhiên. Tuy nhiên, trong những năm gần đây, các nhà khoa học đã thực hiện nghiên cứu chuyển đổi các cấu trúc có vật liệu đồng nhất với chỉ số khúc xạ âm thành các dạng cấu trúc tương đương bằng cách sử dụng các phần tử cộng hưởng kết hợp với lớp điện môi để tạo một môi trường vật chất có chỉ số khúc xạ âm hoạt động trong một dải tần số nhất định [36–40]. Với cách tiếp cận này, các nhà khoa học đã nghiên cứu, thiết kế và chế tạo ra được cấu trúc có chỉ số khúc xạ âm.

Trong nghiên cứu [36, 37], các nhà nghiên cứu đã biến đổi cấu trúc thấu kính với điều kiện Abbe sin có chỉ số khúc xạ âm đồng nhất thành cấu trúc



Hình 1.8: Mô hình cấu trúc tương đương của anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện Abbe sin.



Hình 1.9: Cấu trúc phần tử cộng hưởng và cấu trúc chế tạo của anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm.

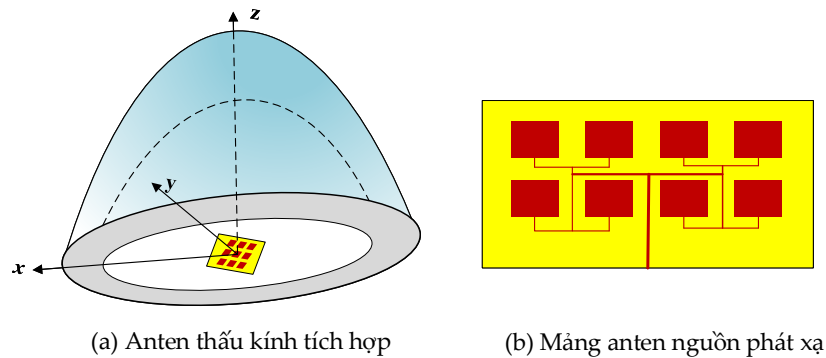
tương đương có bề mặt phân bậc và sử dụng các phần tử cộng hưởng điện môi, được thể hiện như trong Hình 1.8, [36]. Với các phần tử cộng hưởng rời rạc được thiết lập thứ tự theo cấu trúc bề mặt phân bậc cho phép các nhà nghiên cứu có thể chế tạo được cấu trúc anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm ($n = -1$) hoạt động ở tần số 11 GHz, có kích thước nhỏ với đường kính $D = 156$ mm và độ dày 39 mm, như trong Hình 1.9, [36]. Điều này minh chứng rằng khả năng có thể chế tạo được anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm ứng dụng trong điều kiện thực tế.

1.2.5. Nguồn phát xạ của anten thấu kính

Có nhiều phương pháp cấp nguồn cho anten thấu kính, chúng có thể là các loại anten như: anten loa, anten mạch dải, anten chân tử, và có thể là mảng các phần tử anten. Trong thực tế, anten loa (hoặc chỉ là ống dẫn sóng đầu hở) và anten mạch dải là hai loại anten được sử dụng phổ biến nhất, ngoài ra, các anten này có thể kết hợp với nhau thành một mảng các phần tử.

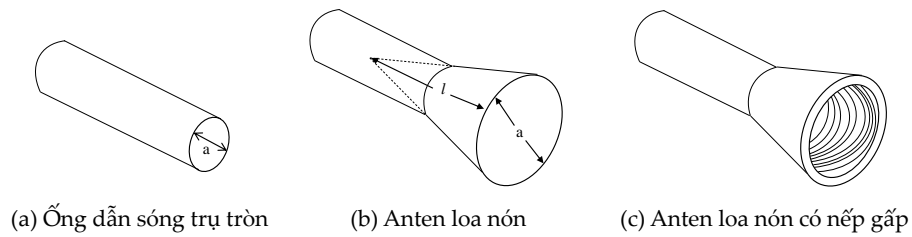
a) Nguồn phát xạ là anten mạch dải

Khi anten mạch dải được sử dụng làm nguồn phát xạ cho anten thấu kính, nó có những đặc điểm mà các anten khác không có được đó là: cấu trúc anten thấu kính nhỏ gọn, chắc chắn, bề mặt của anten có thể được gắn sát với thấu kính do đó không chịu ảnh hưởng bởi khoảng không gian giữa ống dẫn sóng hoặc loa với thấu kính, như được thể hiện trong Hình 1.10. Tuy nhiên, nhược điểm của anten mạch dải có băng thông hẹp, trở tổn hao xảy ra ở lớp kim loại và lớp điện môi khi thay đổi tần số [41].



Hình 1.10: Cấu trúc anten mạch dải và mảng anten.

Nhiều loại cấu trúc của anten mạch dải có thể được sử dụng như hình chữ nhật, hình tròn, hình vuông, hình nón phẳng, ... Khi chúng được kết hợp với nhau tạo thành mảng, thì cấu trúc này cho phép cải thiện được khả năng bức xạ của anten, khẩu độ bức xạ của anten rộng hơn.



Hình 1.11: Cấu trúc ống dẫn sóng trụ tròn và các loại anten loa nón.

b) Nguồn phát xạ là anten loa

Trái ngược với anten mạch dải băng tần hẹp và hiệu suất thấp đã thảo luận ở trên, khi sử dụng ống dẫn sóng hoặc anten loa cho phép anten có dải tần rộng hơn và hiệu quả hơn. Anten loa hoặc ống dẫn sóng đầu hở có thể được sử dụng kết hợp với thấu kính điện môi để tạo thành anten thấu kính hoạt động ở dải tần rất rộng. Khi anten loa được sử dụng làm nguồn phát xạ góc rộng thì chúng hoạt động tương tự như nguồn phát cho anten mặt phản xạ, tuy nhiên anten thấu kính với cấu trúc đặc biệt, anten loa được thiết lập phía sau thấu kính nên không gây nên hiện tượng che chắn hướng phát xạ như anten mặt phản xạ.

Để nâng cao hiệu quả bức xạ của anten thấu kính, thì giản đồ bức xạ của anten loa phải gần giống với hình dạng mặt mở của thấu kính, bức xạ phải cơ bản đồng nhất và ít bị tràn hoặc thiếu bức xạ lên mặt thấu kính. Trong thực tế khi thiết kế nguồn phát xạ, năng lượng bức xạ của anten loa phải tập trung vào thấu kính, đặt mức -10 dB ở mép của thấu kính so với điểm trung tâm. Khi đó, hiệu suất của anten về hệ số định hướng là tối ưu. Anten loa thấp phù hợp khi sử dụng mặt mở là thấu kính dạng hình trụ vì búp sóng chính của anten có mặt cắt ngang hình chữ nhật. Đối với anten loa nón có mặt mở tự nhiên thì mặt cắt ngang búp sóng chính có dạng gần tròn, phù hợp với thấu kính dạng tròn xoay. Tuy nhiên, hiệu quả của việc bức xạ trên

mặt mở của thấu kính là không thể đạt được trong cả hai trường hợp, bởi vì bức xạ trên các mặt phẳng chính của chúng khác nhau.

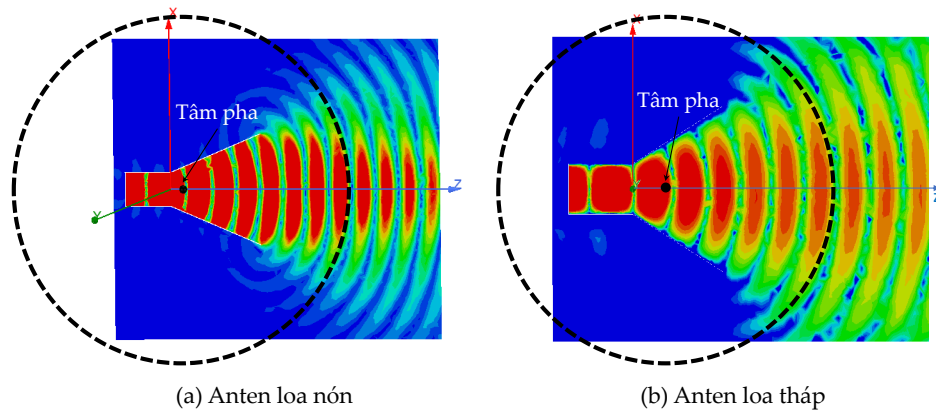
Trong cả hai loại anten loa thấp và loa nón, biên độ cánh sóng bên trong mặt phẳng E cao và mặt phẳng H thấp. Anten loa nón chế độ kép (TE₁₁/TM₁₁) tạo ra các búp sóng trong mặt phẳng E và H gần bằng nhau và các cánh sóng bên thấp tương đối bằng nhau, đây là nguồn phát xạ hiệu quả đối với mặt mở tròn trên dải tần số hẹp [42]. Anten loa nón có nếp gấp ở bên trong loa là một giải pháp băng thông rộng cho phép tạo được búp sóng không đối xứng, như trong Hình 1.11(c) [42]. Chúng tạo ra một phân bố trường trên mặt mở của loa nón gần như hình sin theo mọi hướng và do đó tạo ra giản đồ bức xạ không đối xứng trực với biên độ cánh sóng bên thấp.

c) Tâm pha của anten

Khi nghiên cứu về anten, tâm pha (PC: Phase center) của một anten thường không được quan tâm và biết đến nhiều như các đặc tính định hướng, độ rộng búp sóng, hay tỷ lệ trực, v.v. Tuy nhiên, đối với một số ứng dụng, hoặc thiết kế đòi hỏi phải xác định được vị trí tâm pha để có thể tính toán chính xác các đặc trưng bức xạ của anten. Do đó, Viện kỹ thuật điện - điện tử (IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers) đã định nghĩa về tâm pha như sau:

Tâm pha: Vị trí của một điểm gắn với một anten sao cho nếu nó được coi là tâm của một mặt cầu (hình cầu) có bán kính mở rộng ra trường xa, thì pha của một thành phần trường nhất định trên bề mặt của đồ thị cầu bức xạ về cơ bản là không đổi. [43]

Từ quan điểm quang hình, chúng ta có thể thấy rằng anten thấu kính sẽ bức xạ cực đại khi sóng cầu của nguồn phát xạ được bắt đầu từ tiêu điểm



Hình 1.12: Tâm pha của anten loa.

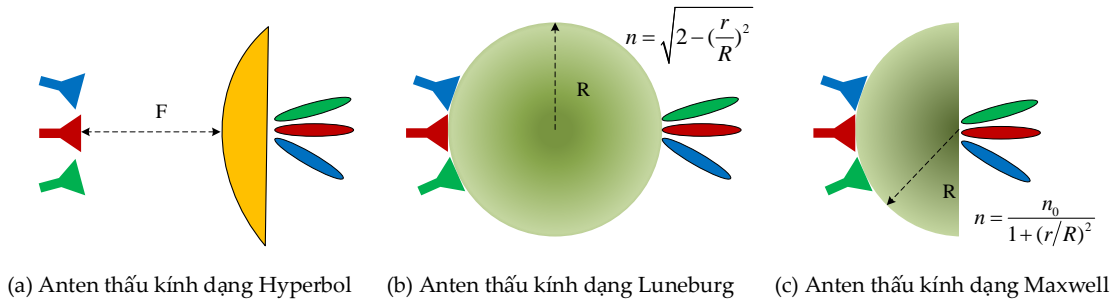
của cấu trúc thấu kính. Tương tự, sóng phẳng từ môi trường đi qua thấu kính sẽ hội tụ tại tiêu điểm của nó [41]. Tâm pha của anten nguồn phát xạ phải được thiết lập trùng với tiêu điểm của thấu kính hoặc mặt phản xạ. Vì lý do này, việc xác định vị trí của tâm pha của nguồn phát xạ là một nhiệm vụ quan trọng trong thiết kế và chế tạo của anten thấu kính. Với việc thiết kế chính xác này, sóng cầu bức xạ từ nguồn phát xạ sẽ trở thành sóng phẳng, đồng pha bức xạ ra ngoài môi trường sau khi đi xuyên qua thấu kính.

Đối với anten loa, do đặc tính cơ điện và khả năng hoạt động ở băng tần rộng nên nó thường được sử dụng làm nguồn phát xạ cho anten mặt phản xạ và anten thấu kính. Tâm pha của anten loa có xu hướng nằm dọc theo trục bức xạ và nằm trong khoảng từ miệng loa dịch chuyển vào ống dẫn sóng. Hình 1.12 thể hiện vị trí tâm pha của anten loa tháp và loa nón. Tâm pha nằm trên trục bức xạ Oz và là tâm của đường tròn màu đen mà pha trên đó không đổi khi xem xét ở trường xa.

1.3. Kỹ thuật tạo đa búp sóng cho anten thấu kính

Ở băng tần milimét, sóng điện từ chịu tác động bởi suy hao trong không gian tự do và hiện tượng che chắn, làm suy giảm tỉ số tín hiệu trên nhiễu và

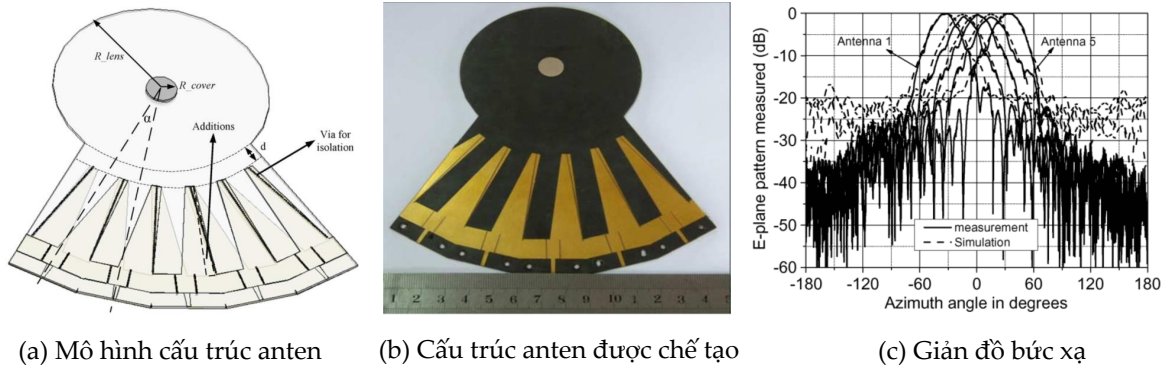
tạp âm (SINR: Signal to Interference plus Noise Ratio). Để khắc phục những hạn chế này, các nhà khoa học đã sử dụng các anten có hệ số tăng ích cao với búp sóng có tính định hướng tốt (có thể ở cả hai đầu phát và thu), điều này làm tăng đáng kể tỉ số SINR, giảm hiệu ứng Doppler, và cải thiện được bảo mật dữ liệu, do đó được ứng dụng rộng rãi trong liên lạc điểm – điểm ở dải sóng milimét trong tầm nhìn thẳng (LoS: Line of Sight). Tuy nhiên, búp sóng hẹp chỉ đáp ứng được vùng phủ giới hạn, nó không thể cho phép đáp ứng được nhiều người sử dụng. Chính vì lý do đó, các nhà khoa học đã nghiên cứu và đưa ra một giải pháp đó là sử dụng anten đa búp sóng (MBAs: Multibeam Antennas). Anten đa búp sóng có khả năng tạo ra được đồng thời nhiều búp sóng độc lập nhau với giá trị hệ số tăng ích cao để che phủ được vùng xác định, cung cấp một giải pháp để giải quyết những hạn chế của anten đơn búp sóng. Bằng việc kết hợp các kỹ thuật và lợi thế của công nghệ chế tạo mới, giúp cho anten đa búp sóng khẳng định vai trò quan trọng đối với cả trạm thu phát gốc và các thiết bị đầu cuối trong hệ thống thông tin di động. Có nhiều kỹ thuật tạo đa búp sóng cho anten, tuy nhiên đối với anten thấu kính, các nhà nghiên cứu thường áp dụng kỹ thuật tạo đa búp sóng thụ động, chúng có khả năng tạo được đa búp sóng theo nhu cầu trong miền tần số vô tuyến (RF) mà không sử dụng các phần tử tích cực [44]. Anten thấu kính tạo đa búp sóng bao gồm các nguồn phát xạ độc lập được hỗ trợ bởi bộ thu phát (Tx/Rx), và điều khiển một búp sóng hẹp duy nhất chỉ theo một hướng được xác định trước. Do đó, đa búp sóng có thể bức xạ đồng thời từ một mặt thấu kính chung để bao phủ một góc nhất định. Tùy thuộc vào cấu trúc của từng dạng thấu kính mà các nhà nghiên cứu sử dụng các kỹ thuật tạo đa búp sóng khác nhau.



Hình 1.13: Cấu trúc anten thấu kính điện môi tạo đa búp sóng.

Đối với các thấu kính điện môi có chỉ số khúc xạ đồng nhất, phân bậc hoặc biến thiên liên tục xuyên tâm, anten thấu kính hoạt động dựa trên đường đi của các tia sóng và sự khúc xạ khi xuyên qua mặt mở liên tục hay nói cách khác là thực hiện các phép biến đổi chuỗi Fourier trong việc phân bố lại năng lượng từ sóng truyền lan trong không gian tự do khi xuyên qua thấu kính. Một mặt của thấu kính được bức xạ bởi sóng điện từ phát ra từ các nguồn phát xạ, trong khi mặt còn lại của thấu kính như là mặt mở của anten bức xạ ra ngoài môi trường [45]. Với cấu trúc này, để tạo được đa búp sóng chúng ta cần thiết lập nhiều nguồn phát xạ phía sau thấu kính. Đối với các thấu kính điện môi đồng nhất, cần xác định được tiêu điểm và quỹ đạo các điểm lệch trục (off-focus) để thiết lập các nguồn phát xạ từ đó tạo được đa búp sóng với góc quét búp sóng mong muốn, được thể hiện như trong Hình 1.13a. Đối với các thấu kính có chiết suất phân bố đều, phân bố phân bậc Luneburg và thấu kính mắt cá Maxwell nửa bán cầu, được trình bày như trong Hình 1.13b và 1.13c tương ứng [27] thì tiêu điểm nằm ngay trên bề mặt thấu kính, do đó, nguồn phát xạ được gắn sát vào bề mặt thấu kính giúp anten tạo được nhiều búp sóng độc lập hơn.

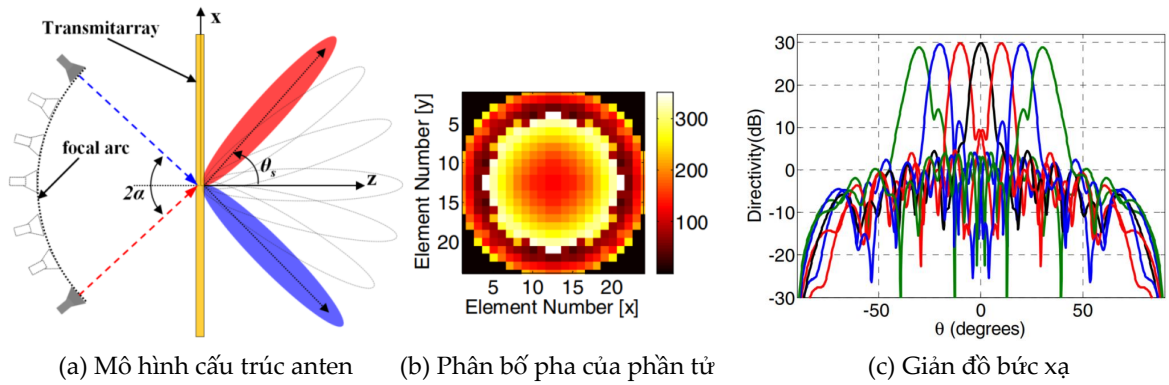
Kỹ thuật tạo đa búp sóng dựa trên nguyên lý hoạt động của thấu kính dạng Luneburg và dạng một nửa mắt cá Maxwell. Cấu trúc thấu kính này



Hình 1.14: Anten thấu kính điện môi hình trụ tạo đa búp sóng.

dựa trên kỹ thuật thiết kế anten mạch dải, mảng anten dạng tấm giúp cho anten có cấu trúc gọn hơn và có khả năng tạo ra đa búp sóng trong không gian [46]. Đối với dạng cấu trúc này, thay vì bức xạ trực tiếp từ mặt mở của thấu kính, mặt bức xạ của thấu kính được kết nối với các cổng, mỗi nguồn cấp là một phần tử anten hoặc mảng con. Một trong những ưu điểm quan trọng của thấu kính này là chúng có thể được tích hợp cùng với lớp chất nền và kết nối với đường truyền, cổng vào hoặc cổng ra của ống dẫn sóng. Được biết đến phổ biến nhất là thấu kính Ruze, thấu kính Rotman, và thấu kính R-KR. Trong trường hợp cụ thể, thấu kính R-2R có thể tạo ra một góc phủ lên tới 360^0 [47]. Từ các dạng của anten đa búp sóng thụ động, anten thấu kính đa búp sóng được ứng dụng chủ yếu vào trong thông tin vệ tinh và ra-đa cho các xe ô tô [48]. Để đạt được cấu hình nhỏ và suy hao thấp, các thấu kính định hình búp sóng phẳng tại các tần số sóng milimét, áp dụng công nghệ ống dẫn sóng được tích hợp với lớp chất nền (SIW: Substrate Intergate Waveguide). Cấu trúc này cho phép anten thấu kính tạo được đa búp sóng thụ động hiệu suất cao [49], được thể hiện như trong Hình 1.14.

Ngoài ra, anten thấu kính đa búp sóng cũng có thể được tạo bởi các mặt mở rời rạc, nó giống như dạng mảng truyền dẫn (transmitarrays) [50], được



Hình 1.15: Anten thấu kính dạng mảng truyền dẫn tạo đa búp sóng.

thể hiện như trong Hình 1.15 hoặc các bề mặt dịch pha [51]. Các anten thấu kính dạng này đang được các nhà khoa học quan tâm nghiên cứu với mục đích giảm kích thước và trọng lượng của anten. Thay vì dựa vào các đường quang học hội tụ để đạt được việc điều chỉnh pha theo yêu cầu mặt mở, thấu kính phẳng có thể được sử dụng để phân bố pha [52], hoặc điều chỉnh thời gian trễ của anten. Về cơ bản, thấu kính phẳng có thể được xem như việc thực hiện biến đổi Fourier rời rạc trên sóng tới, nó là sự kết hợp tuyến tính của các sóng phẳng từ các góc khác nhau. Việc dịch pha và trễ thời gian theo yêu cầu có thể thực hiện bằng cách phân tầng thành nhiều lớp của các bộ cộng hưởng kim loại dạng mạch in hoặc bằng cách thêm các đường trễ giữa hai mặt của thấu kính [53]. Để anten tạo được đa búp sóng hoạt động độc lập và có thể điều khiển bằng cách thiết lập các nguồn phát xạ phía sau thấu kính [54], với cấu trúc này cho phép anten thấu kính được áp dụng cho hệ thống thông tin MIMO.

Như vậy, tùy thuộc vào cấu trúc của dạng thấu kính và ứng dụng của nó trong thực tiễn mà các nhà nghiên cứu và thiết kế sử dụng các kỹ thuật riêng biệt hoặc kết hợp chúng với nhau để tạo ra anten thấu kính đa búp sóng.

1.4. Các công trình nghiên cứu có liên quan

Để đáp ứng được băng thông rộng, độ trễ thấp, đa kết nối. Hệ thống thông tin di động 5G đã được đề xuất sử dụng dải sóng milimét, với dải sóng này kích thước anten được giảm nhỏ một cách đáng kể, điều này cho phép các nhà nghiên cứu và chế tạo có thể áp các loại anten khác nhau như anten mảng pha, anten thấu kính hoặc anten mặt phản xạ cho hệ thống trạm gốc.

Anten mảng pha được sử dụng rộng rãi cho trạm gốc, có cấu trúc băng thông rộng, biên độ cánh sóng bên thấp, có khả năng quét búp sóng trong không gian nhờ mạng cấp nguồn (pha, biên độ). Tuy nhiên, trong dải sóng milimét việc thiết kế, chế tạo mạng cấp nguồn và bộ điều khiển pha có độ chính xác cao gặp rất nhiều khó khăn.

Các cấu trúc anten thấu kính đang được xem là các ứng viên tiềm năng cho anten trạm gốc trong thông tin di động dải sóng milimét nhờ tính đơn giản trong cấu trúc anten và mạng cấp nguồn, mỗi trạm gốc có thể được trang bị rất nhiều cấu trúc anten con, đặc điểm này tạo ra khả năng hoạt động trong dải tần số rộng, đa búp sóng và có thể đáp ứng được nhiều kết nối trong cùng một thời điểm.

Đã có nhiều công trình nghiên cứu trong và ngoài nước về thiết kế, ứng dụng anten thấu kính đa búp sóng. Các nghiên cứu đã đạt được một số kết quả nhất định, đồng thời cũng đặt ra các vấn đề liên quan, cần tiếp tục nghiên cứu và phát triển cũng như đưa ra hướng giải quyết mới.

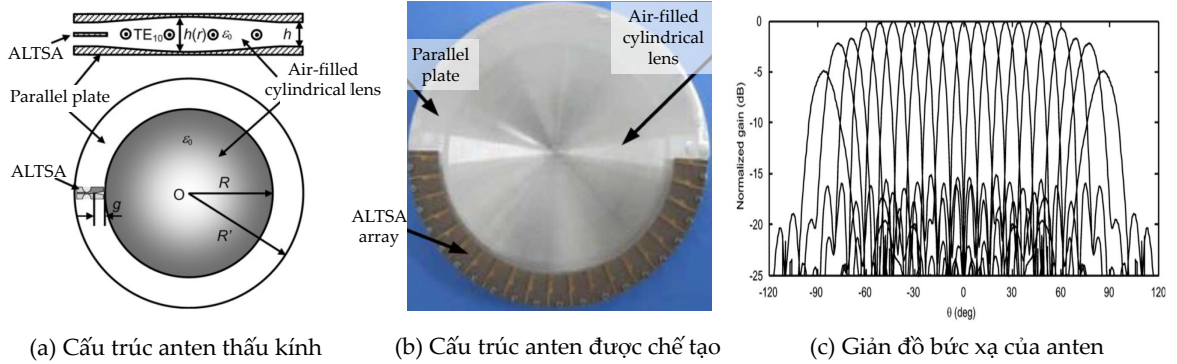
1.4.1. Các nghiên cứu ngoài nước

Trong những năm gần đây, với sự phát triển của khoa học công nghệ và chế tạo, cho phép các nhà khoa học có thể nghiên cứu, thiết kế các loại anten

thấu kính một cách dễ dàng hơn. Xu hướng nghiên cứu chủ yếu về anten thấu kính đa búp sóng của các nhà khoa học thường dựa theo các dạng cấu trúc thấu kính, các kỹ thuật tạo đa búp sóng và ứng dụng cụ thể. Các hướng nghiên cứu đó được thể hiện thông qua các công trình công bố được tổng hợp cụ thể như sau:

- Xu hướng thứ nhất, các nhà nghiên cứu kết hợp nguyên lý hoạt động của các dạng thấu kính cổ điển như Luneburg với ống dẫn sóng dạng tấm song song liên tục hoặc các anten cấp nguồn có cấu trúc đặc biệt để tạo ra anten đa búp sóng [49, 55–59]. Theo đó, năm 2012, Zhang cùng các cộng sự thuộc trường Đại học Đông Nam, Nam Kinh, Trung Quốc đã nghiên cứu và đề xuất thiết kế anten thấu kính đa búp sóng phẳng, băng thông rộng, tổn hao thấp. Cấu trúc anten bao gồm anten khe dạng nhọn tuyến tính đối cực (AL TSA: Antipodal Linearly Tapered Slot Antenna) được cấp nguồn bởi SIW [49] hoạt động ở tần số 28 GHz kết hợp với thấu kính là chất điện môi hình trụ đồng phẳng và được phủ ở cả hai mặt bởi lớp chất điện môi có độ điện thẩm cao hơn. Theo đó, nhóm tác giả thực hiện thiết lập 5 anten nguồn phát xạ tại tiêu điểm và xung quanh thấu kính điện môi hình trụ. Với cấu trúc như vậy, anten thấu kính tạo ra được 5 búp sóng với hệ số tăng ích khoảng 20 dB cao hơn khoảng 6,5 dB so với anten AL TSA có cấu trúc thông thường.

Một thiết kế khác của anten thấu kính dạng Luneburg hình trụ hoạt động ở dải tần số sóng milimét, trong đó không cần chất điện môi làm vật liệu thấu kính được nhóm các nhà khoa học thuộc trường Đại học Chiết Giang, Trung Quốc nghiên cứu và chế tạo, được thể hiện như trong Hình 1.16 [56]. Trong đó, thấu kính Luneburg hình trụ được thiết kế bao gồm hai tấm kim loại được đặt gần như song song chứa đầy không khí, có khoảng cách liên



Hình 1.16: Anten thấu kính Luneburg hình trụ tạo đa búp sóng.

tục thay đổi theo bán kính, dựa trên sự thay đổi về chiết suất của thấu kính Luneburg. Anten khe dạng nhọn tuyến tính đối cực phẳng (ALTSA) được sử dụng làm nguồn phát xạ và đặt giữa hai tấm kim loại tại vị trí tiêu điểm của thấu kính.

Kết quả mô phỏng và chế tạo, đo kiểm cho thấy, với đường kính thấu kính là 100 mm, ở tần số hoạt động 30 GHz, giảm đồ bức xạ của anten có độ rộng cánh sóng chính theo mức nửa công suất trong các mặt phẳng E và H lần lượt là $8,6^\circ$ và 68° . Biên độ cánh sóng bên đầu tiên trong mặt phẳng E là -20 dB. Hiệu suất mặt mở là 68% ở tần số 30 GHz và thay đổi trong khoảng 50% đến 71% trong dải tần được thử nghiệm là 29 – 32 GHz. Do thấu kính có tính đối xứng, nên có thể được sử dụng để tạo ra được đa búp sóng bằng cách triển khai một mảng các phần tử ALTSA phẳng ở ngoài thấu kính. Một mảng anten gồm 21 phần tử tạo ra được 21 búp sóng và góc quét là 180° . Phạm vi quét tổng thể trong khoảng $\pm 80^\circ$, giá trị hệ số tăng ích cực đại giảm khoảng -3 dB ở các búp sóng ngoài cùng so với búp sóng trung tâm.

Nhóm nghiên cứu của Herve Legay tại trường Đại học Rennes của Pháp đã nghiên cứu, phân tích và thiết kế anten thấu kính đa búp sóng dựa trên ống dẫn sóng dạng tấm song song liên tục hoạt động ở băng tần Ku [57, 58].

Từ vị trí của hai tiêu cự cố định của thấu kính, thực hiện xác định một quỹ đạo có thể có để thiết lập các nguồn phát xạ cho thấu kính. Trong nghiên cứu [58], nhóm tác giả đã thiết lập nguồn phát xạ là các anten loa trên quỹ đạo xác định kết hợp với ống dẫn sóng dạng tấm song song liên tục, thấu kính làm chậm và loa bức xạ, để tạo thành anten thấu kính đa búp sóng. Đặc trưng của cấu trúc này là đường gờ ngang ở trong ống dẫn sóng. Các gờ ngang này đóng vai trò quan trọng để tạo ra các mặt sóng mong muốn cho các ứng dụng đa búp sóng. Với sáu nguồn phát xạ được thiết lập trên quỹ đạo xác định với các góc bức xạ lần lượt là $\pm 30^\circ$, $\pm 18^\circ$, $\pm 6^\circ$, cho phép anten tạo được sáu búp sóng. Tuy nhiên, khi thiết lập nguồn phát xạ trên quỹ đạo xác định và càng xa trục của thấu kính thì biên độ cánh sóng bên tăng lên rất nhanh, góc bức xạ lệch nhiều so với góc tới từ nguồn phát xạ.

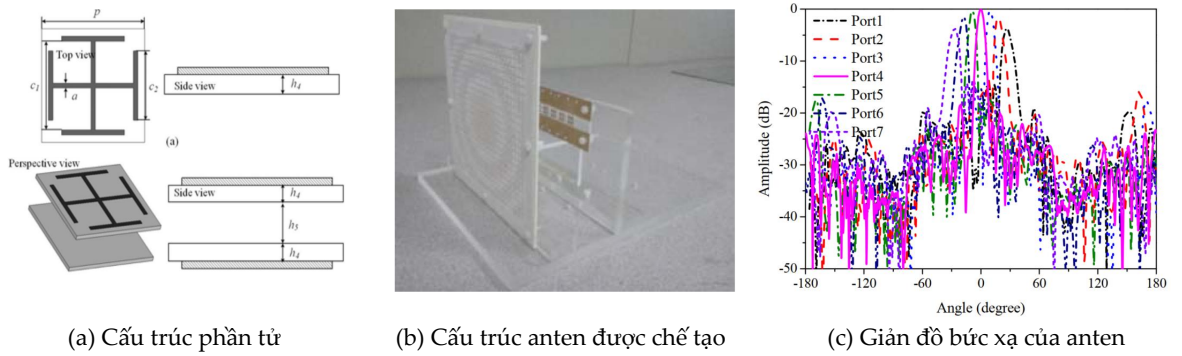
Năm 2018, nhóm nghiên cứu đến từ Đại học Illinois ở Chicago, Mỹ đã thực hiện thiết kế và chế tạo anten băng tần cực rộng hoạt động từ 8 GHz đến 18 GHz, với búp sóng dạng hình quạt, có hệ số sóng đứng điện áp (VSWR: Voltage Standing Wave Ratio) thấp, kích thước nhỏ và được ứng dụng trong hệ thống ra-đa ô tô [59]. Tất cả các anten được sử dụng trong hệ thống định hướng được hoạt động ở chế độ thu. Nhóm tác giả cũng áp dụng cấu trúc ống dẫn sóng dạng tấm song song kết hợp với thấu kính hình trụ "lấy cảm hứng từ thấu kính Luneburg", nhưng có điểm khác biệt chính là thay vì có chỉ số khúc xạ thay đổi theo khoảng cách xuyên tâm từ trục của thấu kính hình trụ, nhóm tác giả sử dụng vật liệu có độ điện thẩm đồng nhất có giá trị được tối ưu hóa để tối đa hóa hiệu suất thu được, đồng thời đơn giản hóa quy trình sản xuất. Giá trị tối ưu của độ điện thẩm tương đối là $\epsilon_r = 2,1$ và giá trị này phù hợp với các mô phỏng được trình bày trong tài liệu [59]. Với

bốn nguồn bức xạ đặt tại tiêu điểm của thấu kính, anten này có khả năng tạo được bốn búp sóng dạng quạt với góc bao phủ là 40^0 , độ rộng cánh sóng chính theo mức nửa công suất là 30^0 , hệ số tăng ích cực đại cao hơn 15 dBi.

Ngoài ra, dựa trên nguyên lý truyền lan của sóng điện từ trong môi trường chất điện môi của thấu kính Luneburg. Các nhà khoa học đã thiết kế thấu kính điện môi có chỉ số khúc xạ tương đối giảm dần về phía mép của thấu kính bằng cách khoan các lỗ có đường kính khác nhau [60] hoặc khoan các lỗ rồi bơm các chất điện môi có chiết xuất khác [61] vào trong thấu kính để tạo thành thấu kính dạng Luneburg. Sau đó thiết lập các nguồn phát xạ ở các vị trí phù hợp để anten có khả năng tạo được đa búp sóng theo các hướng mong muốn. Cụ thể, trong nghiên cứu [61], nhóm tác giả thiết lập 10 anten vi dải dạng chữ E xung quanh thấu kính và đạt được 10 búp sóng với góc bao phủ là 120^0 , với hệ số tăng ích cực đại là 14,5 dBi. Trong nghiên cứu [60], nhóm tác giả thiết lập nguồn bức xạ là anten vi dải hoạt động ở tần số 26 GHz, với bốn cổng tại mặt phẳng tiêu điểm song song với mặt thấu kính. Với cấu trúc này, anten thấu kính tạo được bốn búp sóng với góc quét 30^0 tính từ góc 0^0 .

- Xu hướng thứ hai, các nhà khoa học quan tâm đến việc thiết kế thấu kính dạng phẳng là sự kết hợp của các lớp điện môi và các phần tử cộng hưởng đơn vị được sắp xếp theo quy luật nhất định tạo ra một môi trường truyền dẫn sóng điện từ tương tự như thấu kính điện môi [51–54, 62–67].

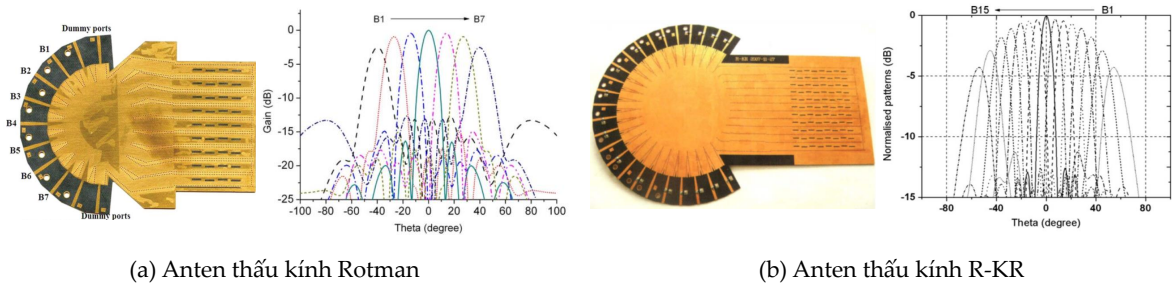
Theo đó, các nhà khoa học thuộc trường Đại học Oviedo, Gijon, Tây Ban Nha, do G. Plaza và các cộng sự đã nghiên cứu thiết kế anten thấu kính đa búp sóng dựa trên mảng truyền dẫn làm việc ở tần số 10 GHz [66]. Với cấu trúc 18×18 phần tử dạng tấm được ghép kết hợp với 4 lớp chất điện môi kích thước 162 mm và được cấp nguồn bởi anten có cấu trúc kiểu Yagi, các anten



Hình 1.17: Anten mảng truyền dẫn kiểu Jerusalem tạo đa búp sóng.

cấp nguồn này được thiết lập trên một quỹ đạo xác định và hợp với trục bức xạ ở các góc 0^0 và $\pm 12^0$. Với cấu trúc này, anten thấu kính tạo ra được 3 búp sóng, với hệ số tăng ích cực đại ở góc 0^0 bằng 25 dBi và 24,34 dBi ở góc $\pm 12^0$, biên độ cánh sóng bên thấp hơn -10,12 dB.

Một mảng truyền dẫn hai lớp của các phần tử cộng hưởng đơn vị giao nhau kiểu Jerusalem được Wei Hong cùng các cộng sự thiết kế và chế tạo cho ứng dụng Massive MIMO trong băng tần Ka [64]. Khi được bức xạ bởi 7 anten mảng xếp chồng được cấp nguồn SIW được sắp xếp thẳng hàng lần lượt đối diện nhau, anten tạo được 7 búp sóng độc lập nhau, vùng phủ sóng trong khoảng $\pm 27^0$ và hệ số tăng ích lớn nhất đạt 24,2 dBi, được thể hiện như trong Hình 1.17. Ngoài ra, các nhà khoa học thuộc trường Đại học Wisconsin–Madison, Madison, Hoa Kỳ đã nghiên cứu và chế tạo anten thấu kính đa búp sóng, có cấu trúc nhỏ và băng thông rộng, các nguồn phát xạ được đặt tại mặt phẳng tiêu điểm của thấu kính [67,68]. Thấu kính được cấu tạo bởi các phần tử đơn vị và nó cấu thành các bề mặt chọn lọc tần số của các phần tử thu nhỏ được thiết kế tích hợp (MEFSS: Miniaturized-Element Frequency Selective Surface) làm các phần tử trễ thời gian và không gian của thấu kính. Kỹ thuật này dựa trên việc coi mỗi phần tử như một điểm ảnh



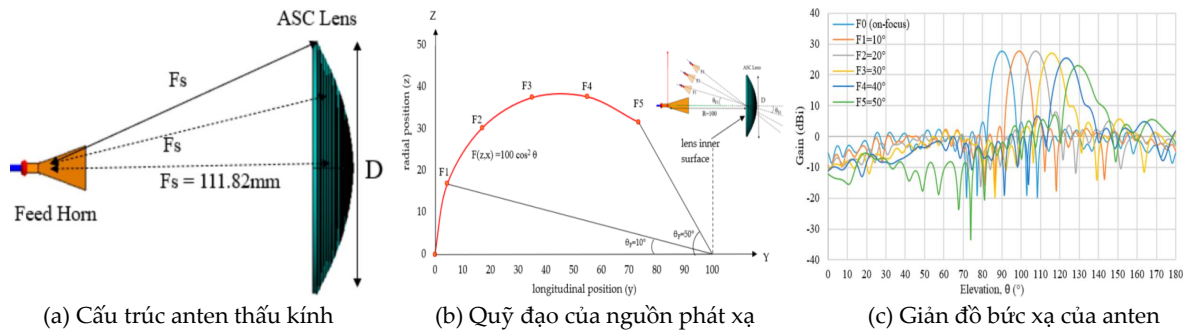
(a) Anten thấu kính Rotman

(b) Anten thấu kính R-KR

Hình 1.18: Anten thấu kính Rotman và R-KR tạo đa búp sóng.

trên thấu kính với môi trường có độ điện thẩm và độ từ thẩm tương đương bằng nhau. Nhóm nghiên cứu đã sử dụng nguồn phát là anten loa hoạt động ở tần số 9 GHz và được thiết lập ở các góc 0^0 , 15^0 , 30^0 và 45^0 . Với cấu trúc này anten thấu kính tạo ra được 4 búp sóng với hệ số tăng ích cực đại lớn hơn 18 dBi, biên độ cánh sóng bên tăng lên khi góc bức xạ của anten tăng.

- Xu hướng nghiên cứu thứ ba sử dụng cấu trúc thấu kính dựa trên kỹ thuật thiết kế anten mạch dải và mảng anten dạng tấm. Khác với các cấu trúc bức xạ ngay từ mặt mở của thấu kính, mặt bức xạ của thấu kính dạng mạch dải được kết nối với các cổng, mỗi nguồn phát xạ là một phần tử anten hoặc mảng con. Thấu kính có thể được tích hợp với lớp chất nền và kết nối với đường truyền, cổng vào hoặc cổng ra của ống dẫn sóng. Các dạng thấu kính Rotman và thấu kính R-KR được sử dụng khá phổ biến trong các thiết kế anten thấu kính tạo đa búp sóng [46–49, 69–71]. Trong nghiên cứu [69] và [70] các nhà khoa học đã thiết kế thấu kính Rotman SIW tạo được 7 búp sóng trong vùng phủ sóng khoảng $\pm 45^0$ với hệ số tăng ích cao hơn 13,8 dBi hoạt động ở băng tần Ka [69] và cấu trúc thấu kính R-KR SIW tạo ra 15 búp sóng bao phủ một vùng trong khoảng $\pm 54^0$ với hệ số tăng ích cao hơn là 17,44 dBi. Đối với hai loại anten này, ống dẫn sóng tích hợp để điện môi (SIW) được sử dụng làm các phần tử cấp nguồn. Cấu trúc và giản đồ bức xạ



Hình 1.19: Anten thấu kính với điều kiện Abbe sin tạo đa búp sóng.

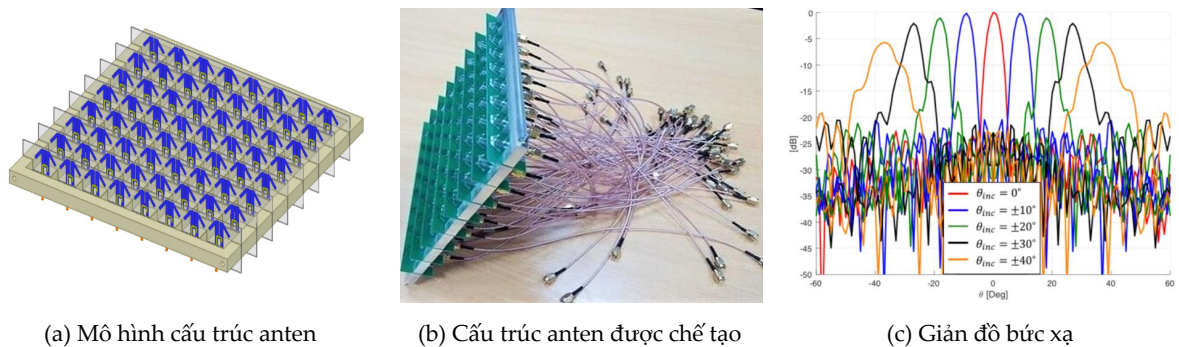
của hai loại anten Rotman SIW và R-KR SIW được thể hiện như trong Hình 1.18, [69] và [70] .

- Xu hướng nghiên cứu thứ tư, tương tự như hướng nghiên cứu thứ nhất, nghiên cứu về thấu kính điện môi, tuy nhiên thay vì nghiên cứu chỉ số khúc xạ biến đổi của vật liệu làm thấu kính thì các nhà khoa học theo hướng nghiên cứu thứ tư dựa trên việc tính toán nhằm xác định các cấu trúc bề mặt của thấu kính điện môi để có thể mở rộng góc quét của búp sóng từ đó nâng cao khả năng anten tạo được đa búp sóng góc rộng cho anten thấu kính [18–21, 72, 73]. Yamada thuộc trường Đại học Teknologi Malaysia cùng các cộng sự có nhiều nghiên cứu về anten đa búp sóng và quét búp sóng rộng dựa trên các điều kiện hình thành mặt cong của thấu kính như: định luật bảo toàn năng lượng, điều kiện phân bố trường trên mặt mở, điều kiện Abbe sin và điều kiện Straight line cho thấu kính có chỉ số khúc xạ dương. Đồng thời đã sử dụng phương pháp ray tracing để xác định các tiêu điểm và quỹ đạo các điểm cấp nguồn của anten thấu kính để tạo được anten đa búp sóng hiệu quả cao. Đối với trường hợp thấu kính có chỉ số khúc xạ dương đồng nhất, cấu trúc của thấu kính được thiết kế dựa trên điều kiện Abbe sin cho phép anten tạo ra nhiều búp sóng và có khả năng quét búp sóng góc rộng [18, 19, 72].

Bằng việc tính toán xây dựng cấu trúc, mô phỏng, so sánh và đánh giá các cấu trúc anten thấu kính với điều kiện Abbe sin, điều kiện bảo toàn năng lượng và điều kiện Straight line có chỉ số khúc xạ dương trong môi trường trường điện từ bằng phần mềm FEKO, được trình bày như trong Hình 1.19 [19]. Anten thấu kính có thể tạo được 6 búp sóng, với hệ số tăng ích cực đại cao hơn 21 dBi, góc quét rộng lên tới 50° tính từ búp sóng trung tâm. Tuy nhiên, anten thấu kính điện môi có chỉ số khúc xạ dương có độ dày lớn, làm cho cấu trúc tổng thể của anten cồng kềnh hơn gây khó khăn cho quá trình triển khai và lắp đặt hệ thống.

1.4.2. Các nghiên cứu trong nước

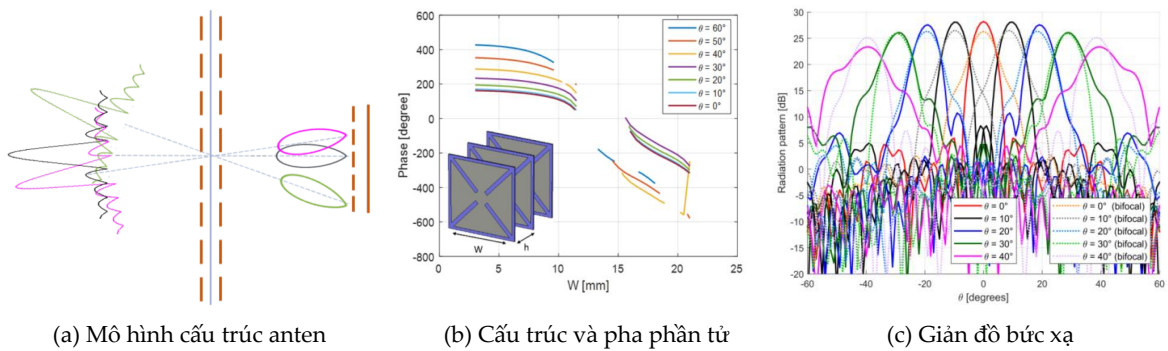
Trong những năm gần đây, các nhà khoa học trong nước đã dành nhiều hơn sự quan tâm đến nghiên cứu chế tạo anten tạo đa búp sóng. Trong đó phải kể đến những nhóm nghiên cứu tiêu biểu như:



Hình 1.20: Anten MIMO tạo đa búp sóng.

Tiến sĩ Nguyễn Khắc Kiểm và cộng sự tại Trường Điện-Điện tử, Đại học Bách Khoa Hà Nội đã nghiên cứu phát triển và chế tạo hệ thống anten MIMO đa búp sóng hỗ trợ người dùng kết nối mạng sau 4G, như trong Hình 1.20 [74–76]. Hệ thống này cho phép tăng tốc độ dữ liệu người dùng, giảm nhiễu của hệ thống đồng thời hỗ trợ số lượng kết nối vượt trội so với các hệ

thống trước đó. Hệ thống anten có tốc độ truyền dữ liệu mạng 5G đạt tối thiểu 100 Mb/giây. Bộ thiết bị có cấu tạo gồm phân hệ anten bức xạ, phân hệ xử lý số và tín hiệu, khối chương trình thuật toán điều khiển. Phần anten bức xạ gồm 64 phần tử thu phát tín hiệu, kích thước khoảng $10\lambda_0 \times 10\lambda_0$, được thiết kế hoạt động ở tần số 5,8 GHz. Các phần tử bức xạ được chế tạo sử dụng công nghệ mạch in vi dải. Bộ phận điều khiển búp sóng sử dụng kỹ thuật định dạng búp sóng số trên nền tảng FPGA (FPGA: Field Programmable Gate Arrays), kết hợp với các thuật toán được nghiên cứu và tối ưu, giúp việc định hướng búp sóng tới người sử dụng một cách linh hoạt.



Hình 1.21: Mảng truyền dẫn tạo đa búp sóng cho hệ thống anten 5G.

Tiến sĩ Hồ Mạnh Linh thuộc Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội và các cộng sự thuộc Trường Đại học Bách khoa Turin, Ý đã nghiên cứu phát triển anten dạng mảng truyền dẫn hoạt động ở tần số 5,8 GHz cho hệ thống thông tin di động 5G với kích thước $10\lambda_0 \times 10\lambda_0$, tỷ lệ giữa tiêu cự F và đường kính D của mảng truyền dẫn là 0,9, được thể hiện như trong Hình 1.21 [7, 77–79]. Mảng truyền dẫn được cấp nguồn bởi một anten mảng với khả năng tạo được 9 búp sóng có các hướng khác nhau nằm trong khoảng từ -40° tới $+40^\circ$. Với cấu trúc được thiết kế như vậy, anten có khả năng tạo được 9 búp sóng với hệ số tăng ích của búp sóng trung tâm khoảng 27,5 dBi, cao hơn khoảng 4 dB so với búp sóng của góc bức xạ $\pm 40^\circ$.

Ngoài ra, có một số nhà khoa học trong nước đang quan tâm tới nghiên cứu, thiết kế và chế tạo các loại anten dạng mảng truyền dẫn, mảng phản xạ, MIMO như là Tiến sĩ Nguyễn Bình Dương thuộc Trường Đại học Quốc tế - Đại học Quốc gia Thành Phố Hồ Chí Minh, Tiến sĩ Lê Minh Thùy; Tiến sĩ Tạ Sơn Xuất thuộc Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội, ...

1.4.3. *Đánh giá chung*

Qua việc tìm hiểu các nghiên cứu trong và ngoài nước, ta có thể thấy rằng các nhà khoa học đang có sự quan tâm ngày càng nhiều tới việc nghiên cứu và chế tạo các loại anten dạng thấu kính tạo đa búp sóng. Các nghiên cứu tập trung vào thiết kế cấu trúc để tối ưu hóa kích thước, tăng được khả năng bức xạ, giảm biên độ cánh sóng bên, tạo được đa búp sóng và đơn giản trong thiết kế chế tạo. Trong khi xu hướng thứ nhất tập trung vào việc vận dụng nguyên lý của thấu kính Luneburg để thiết kế thì xu hướng thứ hai lại nghiên cứu dựa vào cấu trúc của mảng truyền dẫn với các cấu trúc bao gồm phần tử cộng hưởng có hình dạng đặc biệt có thể làm thay đổi được các đặc tính của môi trường truyền dẫn. Đối với xu hướng thứ ba, thấu kính được thiết kế dưới dạng mảng anten dạng tấm có các cổng vào, cổng ra được kết nối với các phần tử cấp nguồn hoặc các mảng con bức xạ. Còn xu hướng thứ tư lại tập trung vào nghiên cứu cấu trúc bề mặt của thấu kính kết hợp với sử dụng các phương pháp như ray tracing để xác định được tiêu điểm và quỹ đạo của các điểm cấp nguồn phù hợp để tạo được đa búp sóng với hiệu suất cao.

Qua những nghiên cứu trên có thể thấy rằng, mỗi xu hướng nghiên cứu đều có những ưu điểm nổi trội, có tính ứng dụng cao. Tuy nhiên, các nghiên cứu này cũng có những nhược điểm cần được hoàn chỉnh, bổ sung và phát

triển. So với xu hướng nghiên cứu thứ tư dựa vào việc thiết kế cấu trúc bề mặt thấu kính thì các xu hướng thứ nhất, thứ hai và thứ ba có cấu trúc phức tạp hơn. Đặc biệt, với xu hướng thứ hai, mặc dù được hỗ trợ bởi sự phát triển của công nghệ mạch in hiện đại, tuy nhiên việc thiết kế các phần tử cộng hưởng ở tần số cao là rất khó khăn, xảy ra sai số lớn, sự sai pha trên các phần tử rất khó được điều chỉnh. Trong khi xu hướng thứ nhất và thứ ba thì cấu trúc cấp nguồn cho thấu kính khá phức tạp, nó phụ thuộc vào các bộ chia, bộ cấp nguồn và điều khiển pha cho anten. Do đó, nghiên cứu sinh lựa chọn xu hướng thứ tư làm mục tiêu nghiên cứu của mình. Anten thấu kính có chỉ số khúc xạ dương đang được các nhà nghiên cứu quan tâm, tuy nhiên, thấu kính có chỉ số khúc xạ dương có độ dày lớn dẫn đến kích thước tổng thể của anten thấu kính tăng lên và kích thước hệ thống anten tại trạm gốc trở nên cồng kềnh. Do đó, bên cạnh việc nghiên cứu những cấu trúc thấu kính có chỉ số khúc xạ dương thông thường, nghiên cứu sinh sẽ đi sâu vào nghiên cứu thấu kính với chỉ số khúc xạ âm với mục đích giảm được kích thước của anten, tăng khả năng bức xạ, tạo được nhiều búp sóng và mở rộng phạm vi phủ sóng của anten.

Bảng 1.3 trình bày các kết quả nghiên cứu gần với lĩnh vực liên quan đến hướng nghiên cứu của luận án. Từ những kết quả trong bảng tổng hợp ta có thể thấy rằng, trong các nghiên cứu [18, 19, 22, 72], các nhà khoa học đã thực hiện giải pháp mở rộng góc quét búp sóng cho anten thấu kính bằng cách sử dụng cấu trúc thấu kính dựa trên điều kiện Abbe sin, điều kiện phân bố trường trên mặt mở, điều kiện Straight line để từ đó thiết lập các nguồn phát xạ đặt trên quỹ đạo xác định để tạo ra đa búp sóng cho anten thấu kính. Tuy nhiên, các nghiên cứu này mới chỉ dừng lại ở việc sử dụng thấu kính có vật

Bảng 1.3: Bảng thống kê các nghiên cứu về anten thấu kính đa búp sóng.

Tài liệu tham khảo	Dạng thấu kính	Tần số [GHz]	Chỉ số khúc xạ		Số lượng búp sóng	Góc quét búp sóng	Mô hình hóa cấu trúc	Ứng dụng	Kích thước [mm]
			$n > 0$	$n < 0$					
[18]	Abbe sin	60	$\sqrt{2}$	X	7	30°	X	ra-đa ô tô	T=39; T=49
[72]	Abbe sin	60	$\sqrt{2,74}$	X	4	30°	X	ra-đa ô tô	T=39
[22]	Abbe sin	20	$\sqrt{2,2}$	X	2	$\pm 25^\circ$	Có	ra-đa ô tô	T=39
[19]	Phân bố trường trên mặt mở, Abbe sin, Straight line	28	$\sqrt{4}$	X	6	50°	Có	BTS 5G	T=14; T=14,80; T=13,83
[49]	Luneburg+ATSL	28	$\sqrt{2,2}$	X	5	$\pm 30^\circ$	Có		T=87,5
[60]	Luneburg	26; 28	2,5; 2,35; 1,95; 1,6	X	4	30°	Có	BTS 5G	T=25
[69]	Rotman	28,5	X	X	7	$\pm 45^\circ$	Có	Vệ tinh	T=10
[71]	Rotman	28	X	X	7	$\pm 45^\circ$	Có	BTS 5G	
[36]	Abbe sin	11	X	-1	3	30°	Có	ra-đa ô tô	T=39

Trong đó, X là các vấn đề mà các nghiên cứu này chưa thực hiện
T là độ dày của thấu kính (mm)

liệu với chỉ số khúc xạ dương ($n > 0$), chưa thực hiện nghiên cứu đối với thấu kính có chỉ số khúc xạ âm ($n < 0$). Trong các nghiên cứu [49, 60, 69, 71], các nhà nghiên cứu sử dụng các dạng thấu kính khác như Luneburg, Rotman để tạo anten thấu kính đa búp sóng. Tuy nhiên, kích thước thấu kính còn lớn, hiệu quả bức xạ còn chưa thực sự cao. Trong khi đó, trong nghiên cứu [36] đã thực hiện mô hình hóa cấu trúc anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm dựa trên điều kiện Abbe sin và chuyển đổi thành các dạng cấu trúc tương đương có thể tạo được đa búp sóng. Tuy nhiên, đây là dạng cấu trúc anten thấu kính hoạt động ở băng tần 10 GHz và ứng dụng trong ra-đa ô tô. Các tác giả chưa nghiên cứu các dạng cấu trúc khác như: điều kiện Straight line và giải pháp tạo ra đa búp sóng cho anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm. Từ việc phân tích, đánh giá kết quả của các công trình đã công bố được nêu ở trên, tác giả đã tập trung vào nghiên cứu, so sánh và đánh giá sự hiệu quả của các dạng cấu trúc thấu kính, đặc biệt là nghiên cứu về anten thấu kính dựa trên các dạng thấu kính khác nhau với chỉ số khúc xạ âm ($n < 0$) có khả năng tạo ra đa búp sóng định hướng ứng dụng cho trạm gốc trong thông tin di động 5G băng tần 28 GHz.

Từ việc nghiên cứu các dải tần số ứng dụng cho thông tin di động 5G, theo các khuyến nghị của Liên minh viễn thông Quốc tế ITU, FCC và mục đích định hướng ứng dụng cho trạm gốc trong thông tin di động. Do đó, tác giả lựa chọn băng tần 28 GHz là băng tần trung tâm, xuyên suốt trong các nghiên cứu, thiết kế cấu trúc và mô phỏng anten thấu kính của luận án này.

1.5. Kết luận chương 1

Chương 1 trình bày những vấn đề chung về anten cho trạm gốc trong thông tin di động, tổng quan về anten thấu kính: phân loại, ứng dụng, vật liệu làm thấu kính và nguồn phát xạ cho anten thấu kính. Ngoài ra, trong chương này còn trình bày những kỹ thuật tạo đa búp sóng cho anten thấu kính đã và đang được các nhà khoa học quan tâm nghiên cứu. Để có cơ sở nghiên cứu và đề xuất cấu trúc anten thấu kính có khả năng tạo đa búp sóng mới, luận án thực hiện đánh giá tổng quan về các nghiên cứu trong nước và ngoài nước về anten thấu kính, anten tạo đa búp sóng. Đây là cơ sở quan trọng để đề xuất các giải pháp thiết kế cấu trúc anten thấu kính ở các chương tiếp theo.

Chương 2

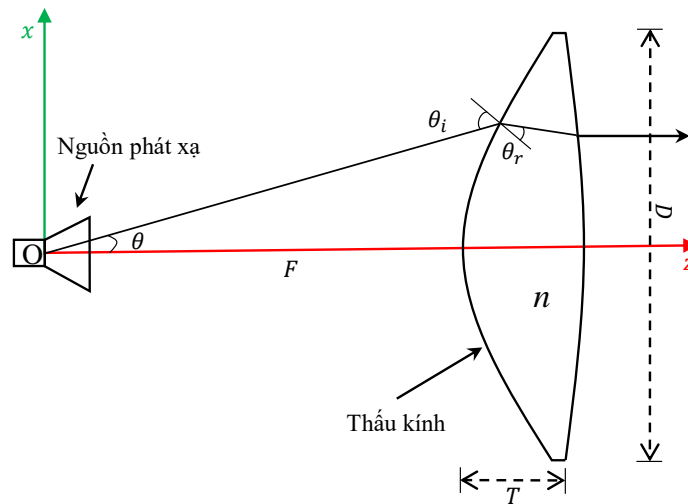
NGHIÊN CỨU PHÁT TRIỂN ANTEN THẤU KÍNH CÓ CHỈ SỐ KHÚC XẠ ÂM ĐỊNH HƯỚNG ỨNG DỤNG CHO TRẠM GỐC BĂNG TẦN 28 GHz

Như đã phân tích trong Chương 1, với việc sử dụng băng tần 28 GHz, kích thước của anten tại trạm gốc được giảm xuống bằng khoảng một phần mười kích thước của anten hiện hành. Điều này cho phép chúng ta có thể thiết lập nhiều phần tử anten hơn trên hệ thống trạm gốc. Đối với anten thấu kính điện môi có chỉ số khúc xạ dương với ưu điểm là có khả năng bức xạ cao, biên độ cánh sóng bên thấp. Tuy nhiên, anten thấu kính điện môi có chỉ số khúc xạ dương lại có kích thước thấu kính lớn, điều này làm cho cấu trúc chung của hệ thống anten tại trạm gốc trở nên cồng kềnh, nặng và dễ bị ảnh hưởng bởi các tác động từ môi trường. Vì vậy, giải pháp phát triển anten thấu kính với cấu trúc và vật liệu làm thấu kính đặc biệt nhằm cải thiện các đặc tính bức xạ và giảm được kích thước của anten tại trạm gốc, giúp cho anten nhỏ gọn hơn, nhẹ hơn và ít chịu ảnh hưởng từ những tác nhân ngoài môi trường là yêu cầu của thực tiễn, rất cần thiết, đồng thời cũng là giải pháp nghiên cứu có ý nghĩa khoa học.

Trong Chương 2, luận án thực hiện mô hình hóa các cấu trúc anten thấu kính với chỉ số khúc xạ dương dựa trên các phương trình toán học, đồng thời đề xuất giải pháp thiết kế cấu trúc anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với cùng điều kiện để so sánh đánh giá các đặc tính bức xạ của anten giữa các

mô hình tính toán; đề xuất giải pháp tính toán, xác định cấu trúc anten có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện quỹ đạo các giao điểm của tia sóng tới từ nguồn phát xạ và tia sóng khúc xạ đi ra từ mặt mở của thấu kính nằm trên một đường thẳng (SL: Straight line). Hiệu quả của giải pháp đề xuất trong việc cải thiện khả năng bức xạ và kích thước của anten thấu kính được đánh giá thông qua các kết quả mô phỏng.

2.1. Mô hình cấu trúc anten thấu kính



Hình 2.1: Cấu trúc chung của anten thấu kính.

Các mô hình cấu trúc anten thấu kính được sử dụng trong luận án là dạng cấu trúc anten thấu kính nguồn ngoài. Tức là, nguồn phát xạ không tiếp xúc trực tiếp với thấu kính và được đặt tại tiêu điểm, cách thấu kính một khoảng là F . Thấu kính có cấu trúc tròn xoay quanh trục bức xạ Oz (trục quang) và có đường kính là D , được thể hiện như trong Hình 2.1. Tỷ số giữa đường kính D và khoảng cách F của thấu kính được thiết lập bằng một ($F/D=1$). Độ dày của thấu kính (T) là kích thước lớn nhất của thấu kính theo phương bức xạ của anten, nó được tính từ mặt trong đến mặt ngoài bức xạ của thấu

kính. Vật liệu sử dụng làm thấu kính có chỉ số khúc xạ n đồng nhất, đẳng hướng với sóng điện từ, được cho bởi công thức:

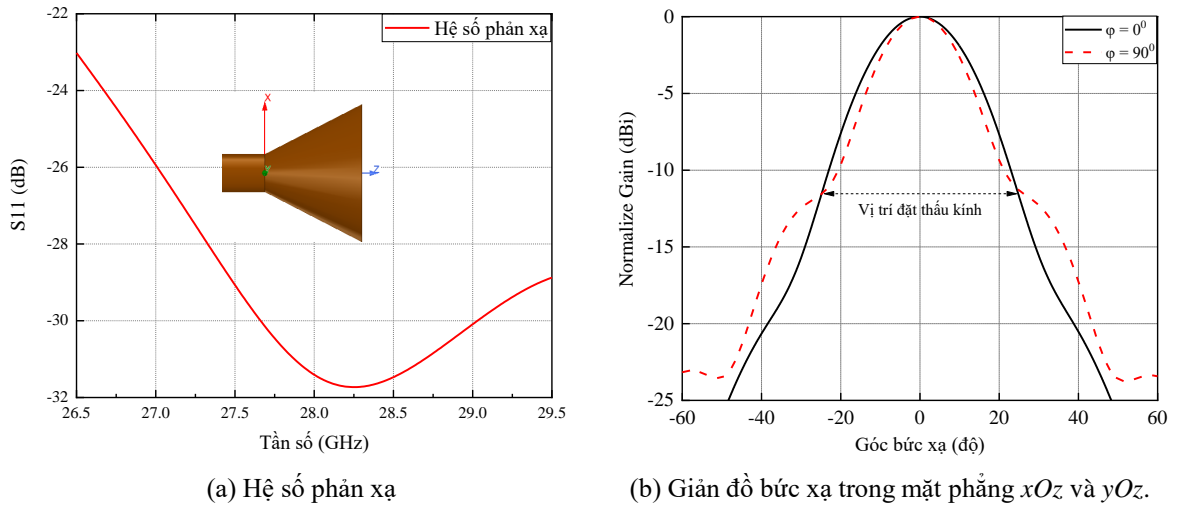
$$n = \sqrt{\varepsilon_r} \sqrt{\mu_r} \quad (2.1)$$

Trong đó, ε_r là độ điện thẩm tương đối và μ_r là độ từ thẩm tương đối của vật liệu làm thấu kính. Đường đi của các tia sóng được tính toán tuân theo nguyên lý về quang hình, quang lý và thỏa mãn định luật khúc xạ Snell, với θ_i là góc tới và θ_r là góc khúc xạ tại bề mặt thấu kính. Mối liên hệ giữa chỉ số khúc xạ và các góc tạo bởi đường đi của tia sóng khi đi qua mặt phân cách giữa hai môi trường, được thể hiện như sau:

$$n = \frac{\sin\theta_i}{\sin\theta_r} \quad (2.2)$$

2.1.1. Nguồn phát xạ của anten thấu kính

Các loại anten mặt mở như anten thấu kính, anten gương, anten mảng phản xạ,... thường sử dụng nguồn phát xạ là anten loa, vì chúng có thể hoạt động ở tần số cao, dải tần rộng và có khả năng tập trung năng lượng tốt. Đối với anten loa nón có mặt mở tự nhiên, mặt cắt ngang của búp sóng chính có dạng gần tròn, bức xạ trên hai mặt phẳng E và H là tương đương nhau, nó phù hợp với cấu trúc thấu kính tròn xoay. Do đó, trong luận án này, anten loa nón được lựa chọn làm nguồn phát xạ góc rộng cho các mô hình cấu trúc anten thấu kính. Giảm đồ bức xạ trong hai mặt phẳng xOz , yOz và đồ thị biểu diễn hệ số phản xạ S11 của anten loa nón được thể hiện như trong Hình 2.2. Theo đó, anten loa nón được thiết kế hoạt động ở băng tần N257, tức là 26,50 GHz - 29,50 GHz, tần số trung tâm là 28 GHz, đây là dải tần số được định hướng ứng dụng cho thông tin di động 5G. Anten loa nón có hệ số tăng



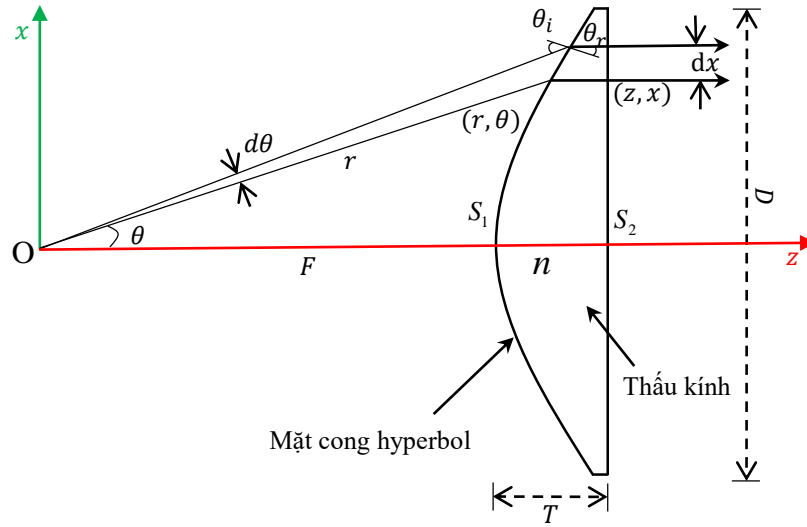
Hình 2.2: Tham số bức xạ của anten loa nón.

ích cực đại đạt giá trị 15,15 dBi và có khả năng tập trung được hơn 90% năng lượng bức xạ vào thấu kính khi tâm pha của anten loa đặt tại tiêu điểm của thấu kính. Như vậy, năng lượng bức xạ của anten loa nón tại góc bức xạ từ -28^0 đến $+28^0$, tương ứng với mép của thấu kính có bức xạ trường điện từ đạt giá trị -11 dB so với giá trị cực đại tại tâm của thấu kính.

2.1.2. Các mô hình cấu trúc thấu kính

a) Mô hình cấu trúc thấu kính dạng hyperbol

Hình 2.3 thể hiện cấu trúc cơ bản của anten thấu kính dạng hyperbol có chỉ số khúc xạ dương trong mặt phẳng xOz . Thấu kính có cấu trúc tròn xoay quanh trục Oz . Vật liệu của thấu kính được lựa chọn có độ điện thẩm tương đối $\epsilon_r = 2$ và độ từ thẩm tương đối $\mu_r = 1$, tương ứng với vật liệu Teflon có chỉ số khúc xạ $n = \sqrt{2}$. Thấu kính có cấu trúc một mặt khúc xạ, mặt trong thấu kính có dạng cong và mặt ngoài có dạng phẳng vuông góc với trục bức xạ Oz . Mặt cong phía trong của thấu kính có dạng hyperbol và được xác định bởi phương trình sau [27, 80].



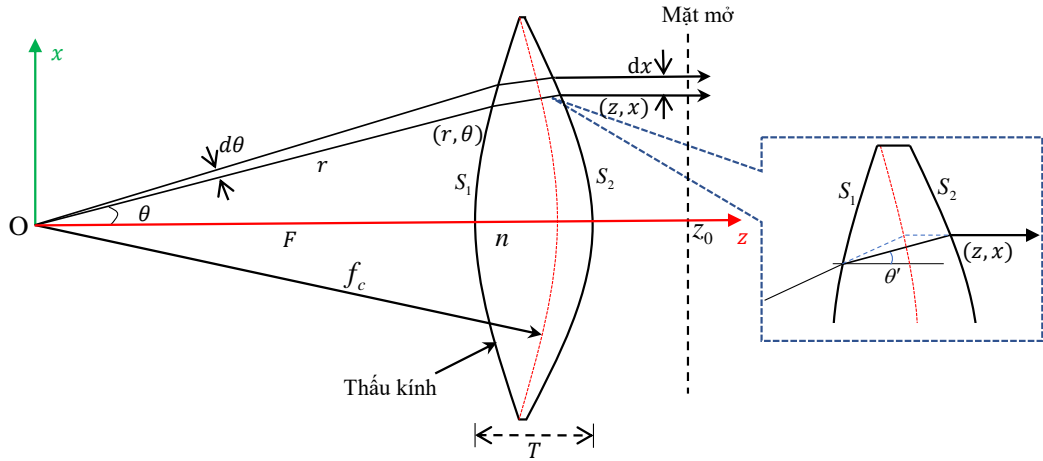
Hình 2.3: Cấu trúc thấu kính dạng hyperbol.

$$r = \frac{(n-1)F}{n \cos \theta - 1} \quad (2.3)$$

Độ dày của thấu kính tại tâm được cho bởi phương trình [80]:

$$T = \frac{1}{n+1} \left[\sqrt{F^2 + \frac{(n+1)D^2}{4(n-1)}} - F \right] \quad (2.4)$$

Trong đó, r là khoảng cách từ tiêu điểm đến mặt cong của thấu kính. Tiêu điểm của thấu kính được đặt tại tâm pha của anten loa. F là khoảng cách từ tiêu điểm đến đỉnh của thấu kính (đỉnh của thấu kính là giao điểm giữa đường cong phía trong của thấu kính và trục bức xạ Oz). θ là góc tạo bởi tia sóng từ tiêu điểm tới mặt cong của thấu kính và trục bức xạ Oz ; D là đường kính của thấu kính; x là khoảng cách từ một điểm bất kỳ trên mặt mở tới trục Oz và được xác định bởi phương trình $x = r \sin \theta$. Từ phương trình (2.3), ta có thể biểu diễn x dưới các dạng phương trình sau:



Hình 2.4: Mô hình cấu trúc thấu kính với điều kiện Abbe sin.

$$x = \frac{F(n-1)\sin\theta}{n\cos\theta - 1} \quad (2.5)$$

$$\frac{dx}{d\theta} = \frac{(n-1)F(n-\cos\theta)}{(n\cos\theta - 1)^2} \quad (2.6)$$

Bằng việc áp dụng các phương trình (2.3) và (2.5) ta có thể xác định được mặt cong phía trong và cấu trúc của thấu kính dạng hyperbol.

b) Mô hình cấu trúc thấu kính với điều kiện Abbe sin

Thấu kính với điều kiện Abbe sin là thấu kính hai mặt khúc xạ, có cấu trúc tròn xoay quanh trục Oz , được thể hiện như trong Hình 2.4. Hai mặt của thấu kính được xác định dựa trên phương pháp ray tracing, thông qua việc tính toán các điều kiện như góc khúc xạ, đường đi của tia sáng từ nguồn phát xạ tới mặt mờ của thấu kính. Tại mặt cong phía trong của thấu kính S_1 , cấu trúc mặt cong được cho bởi phương trình (2.7) [19, 73, 80]:

$$\frac{dr}{d\theta} = \frac{rn\sin(\theta - \theta')}{n\cos(\theta - \theta') - 1} \quad (2.7)$$

Trong đó, θ' là góc tạo bởi tia khúc xạ sau mặt cong S_1 và trục bức xạ Oz . Cấu trúc mặt ngoài của thấu kính được xác định dựa vào phương trình [73,80]:

$$\frac{dz}{dx} = \frac{n \sin \theta'}{1 - n \cos \theta'} \quad (2.8)$$

$$\frac{dz}{d\theta} = \frac{n \sin \theta'}{1 - n \cos \theta'} \frac{dx}{d\theta} \quad (2.9)$$

Để thỏa mãn điều kiện Abbe sin, các tia sáng từ nguồn phát xạ và các tia sáng đi ra từ mặt mở của thấu kính kéo dài có giao điểm nằm trên một cung tròn có tâm tại tiêu điểm của thấu kính và có bán kính f_c , được thể hiện là đường cong nét đứt màu đỏ trong Hình 2.4. Cung tròn trong mặt phẳng xOz được xác định bởi phương trình:

$$x = f_c \sin(\theta - d\theta) \quad (2.10)$$

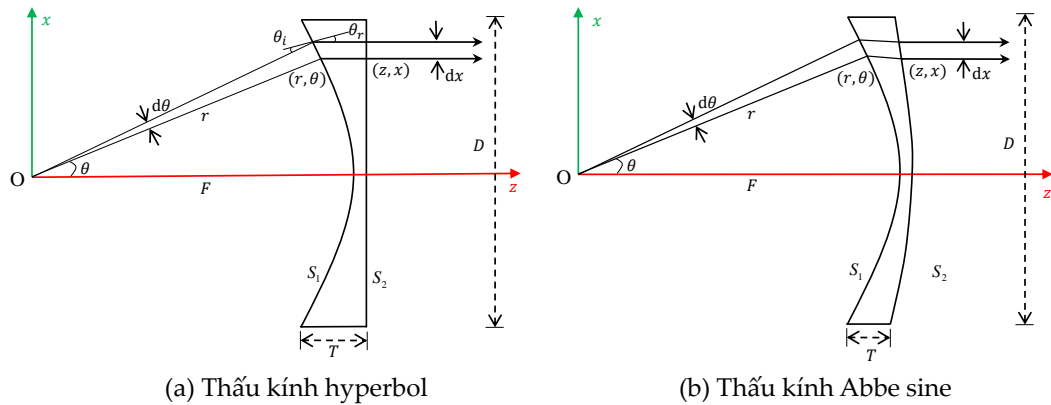
Trong đó, x là khoảng cách từ giao điểm của các điểm trên cung tròn f_c so với trục bức xạ Oz . Khi giá trị $d\theta$ rất nhỏ thì phương trình (2.10) được biến đổi thành [73]:

$$x = f_c \sin \theta \quad (2.11)$$

và ta có

$$\frac{dx}{d\theta} = f_c \cos \theta \quad (2.12)$$

Bằng việc giải đồng thời ba phương trình vi phân (2.7), (2.9) và (2.12), ta có thể xác định được tọa độ các điểm trên mặt cong của thấu kính, từ đó xác định được cấu trúc của mặt trong và mặt ngoài của thấu kính, thỏa mãn điều kiện Abbe sin.



(a) Thấu kính hyperbol

(b) Thấu kính Abbe sine

Hình 2.5: Cấu trúc thấu kính có chỉ số khúc xạ âm.

c) Đề xuất giải pháp sử dụng thấu kính có chỉ số khúc xạ âm

Như đã trình bày trong Mục 1.2.4, vật liệu làm thấu kính đang được sử dụng phổ biến hiện nay là vật liệu điện môi (chỉ số khúc xạ dương), có độ điện thẩm tương đối ϵ_r nằm trong khoảng giá trị từ 1,2 đến 12. Tuy nhiên, trong những năm gần đây, vật liệu có chỉ số khúc xạ âm đang được các nhà khoa học quan tâm nghiên cứu trong nhiều lĩnh vực khác nhau. Việc sử dụng vật liệu có chỉ số khúc xạ âm vào thiết kế thấu kính được xem là giải pháp tiềm năng nhằm đáp ứng được các yêu cầu trong việc nghiên cứu, chế tạo anten thấu kính cho trạm gốc. Thấu kính có chỉ số khúc xạ âm hoạt động theo quy tắc bàn tay trái, nó đảo ngược nguyên tắc hoạt động thông thường, nó biến thấu kính lõm thành thấu kính phân kỳ còn thấu kính lồi trở thành thấu kính hội tụ.

Trong luận án này, tác giả đề xuất sử dụng thấu kính có chỉ số khúc xạ âm áp dụng cho các cấu trúc thông thường là thấu kính dạng hyperbol và thấu kính với điều kiện Abbe sin. Bằng việc sử dụng định luật Snell với điều kiện khúc xạ âm và áp dụng các tham số cấu trúc đồng nhất với thấu kính dạng hyperbol và Abbe sin có chỉ số khúc xạ dương, ta có thể xác định được

cấu trúc thấu kính có chỉ số khúc xạ âm, được thể hiện như trong Hình 2.5. Trong luận án này, thấu kính có chỉ số khúc xạ âm được giả định là vật liệu đồng nhất, đẳng hướng với sóng điện từ. Từ Hình 2.3, 2.4 và 2.5 ta có thể thấy rằng khi thay đổi chỉ số khúc xạ từ giá trị dương sang giá trị âm, thấu kính chuyển từ hình dạng lõm sang dạng lồi, như đã được nghiên cứu trong tài liệu [29]. Kết hợp nguồn phát xạ là anten loa nón với các dạng cấu trúc thấu kính như đã trình bày ở trên ta có được cấu trúc hoàn chỉnh của một anten thấu kính.

2.1.3. Phương pháp và các tham số mô phỏng

a) Phần mềm và phương pháp mô phỏng

Trong nghiên cứu, để thiết kế, khảo sát và đánh giá một thiết bị, sản phẩm trước khi đưa vào sản xuất thực tế thì quy trình thử nghiệm là hết sức quan trọng. Tuy nhiên, nếu đưa vật mẫu vào thử nghiệm ngay thì phương pháp này rất tốn thời gian và yêu cầu chế tạo rất nhiều vật mẫu, chi phí tốn kém. Do đó, mô phỏng số trở thành một cách tiếp cận rất khoa học và hiện đại. Trong thiết kế, chế tạo anten, quy trình thiết kế, mô phỏng và đánh giá trong môi trường trường điện từ giả lập bằng các phần mềm mô phỏng 3D có ý nghĩa rất quan trọng. Nó cho phép các nhà nghiên cứu tính toán được các đặc tính bức xạ của anten, những tác động ảnh hưởng từ bên ngoài có thể có đối với anten trong quá trình hoạt động.

Ansys HFSS là phần mềm mô phỏng tính toán trường điện từ hiện đại. Nó cho phép mô hình hóa đầy đủ các cấu trúc như anten, các phần tử cao tần, bộ lọc,...và tự động tính toán trong môi trường trường điện từ giả lập. HFSS sử dụng các phương pháp tính toán như: phương pháp phần tử hữu

hạn (FEM: Finite Element Method); phương pháp mô-men (MoM: Method of Momen); phương pháp tích phân biên phần tử hữu hạn (FEBI: Finite Element Boundary Integral); kỹ thuật chia lưới thích ứng. Điều này cho phép chúng ta tính toán và thu được kết quả một cách nhanh chóng và chính xác.

Trong khi đó, MATLAB là phần mềm cung cấp môi trường tính toán số và lập trình. MATLAB cho phép tính toán số với ma trận, vẽ đồ thị hàm số hay biểu đồ thông tin, thực hiện giải quyết các thuật toán phức tạp.

Trong luận án này, tác giả sử dụng phần mềm MATLAB để giải đồng thời các phương trình vi phân. Nghiệm của các phương trình vi phân này là tọa độ các điểm trên các mặt cong của thấu kính. Đồng thời sử dụng phần mềm tính toán trường điện từ Ansys HFSS để mô hình hóa các cấu trúc anten thấu kính dựa trên các tọa độ mặt cong xác định, sau đó thực hiện mô phỏng và đánh giá dựa trên kết quả thu được. Phương pháp tính toán áp dụng trong luận án là sử dụng kỹ thuật tích phân biên phần tử hữu hạn (FEBI) kết hợp với thuật toán chia lưới thích ứng và phương pháp tính toán đa cực nhanh đa mức (MLFMM: Multi-Level Fast Multi-Pole Method), giúp cải thiện thời gian và độ chính xác của kết quả.

b) Các tham số kích thước của thấu kính

Các tham số cấu trúc của thấu kính và các phương pháp mô phỏng áp dụng để tính toán được thể hiện như trong Bảng 2.1. Các tham số kích thước của thấu kính cụ thể: $F = D = 100$ mm, tương ứng với kích thước thấu kính bằng 10λ , với λ là bước sóng hoạt động của anten thấu kính, tỉ số $F/D = 1$. Giá trị của các tham số mô phỏng như ε_r và μ_r được lựa chọn dựa trên loại vật liệu điện môi thường được sử dụng làm thấu kính đó là Teflon ($\varepsilon_r = 1,9 \div 2,1$). Do đó, tác giả lựa chọn thấu kính có chỉ số khúc xạ dương

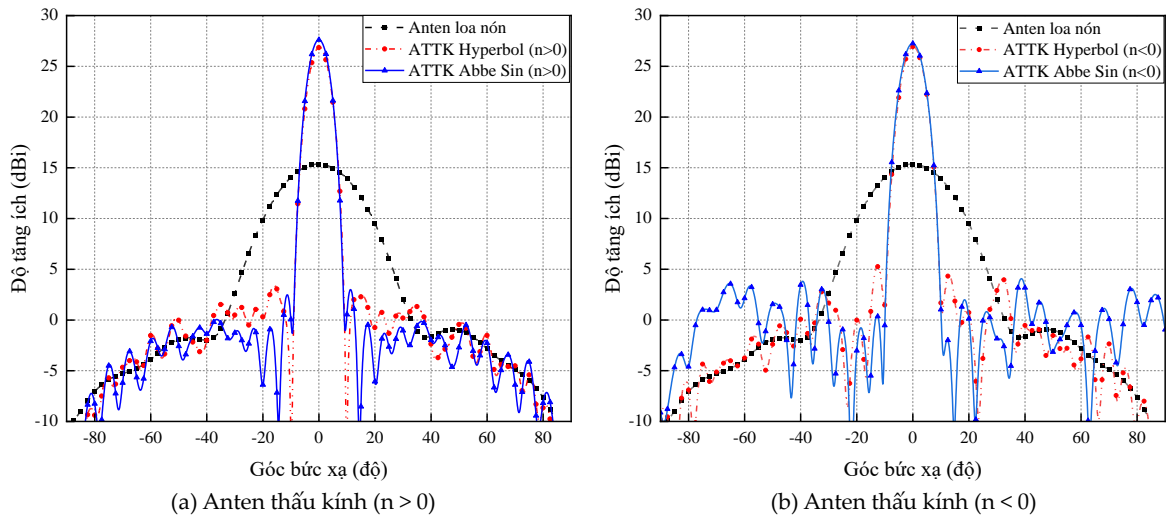
Bảng 2.1: Phương pháp và các tham số mô phỏng.

Cấu hình máy tính và phần mềm mô phỏng	CPU		Intel (R) 3,32 GHz	
	RAM		128 GB	
	Phần mềm		MATLAB, Ansys HFSS	
	Phương pháp mô phỏng		FEBI, MLFMM	
Các tham số cấu trúc của thấu kính	F	Khoảng cách từ tiêu điểm tới đỉnh của thấu kính [mm]	100	
	D	Đường kính của thấu kính [mm]	100	
	μ_r	Độ từ thẩm tương đối	1	-1
	ϵ_r	Độ điện thẩm tương đối	2	-2
	$\tan\delta$	Hệ số tổn hao điện môi	0,001	
	f	Tần số trung tâm [GHz]	28	
	θ_m	Góc bức xạ cực đại tại mép thấu kính [độ]	28	

được thiết lập với giá trị $n = \sqrt{2}$, tương đương với giá trị độ điện thẩm tương đối $\epsilon_r = 2$ và độ từ thẩm tương đối $\mu_r = 1$. Đối với anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm được giả định là vật liệu đồng nhất có giá trị $n = -\sqrt{2}$, tương đương với giá trị của độ điện thẩm tương đối $\epsilon_r = -2$ và độ từ thẩm tương đối $\mu_r = -1$. Hệ số tổn hao điện môi của vật liệu làm thấu kính được đồng nhất là $\tan\delta = 0,001$. Anten thấu kính được thiết kế hoạt động ở băng tần 26,50 GHz - 29,50 GHz, tần số trung tâm là 28 GHz.

2.1.4. Mô phỏng và đánh giá kết quả

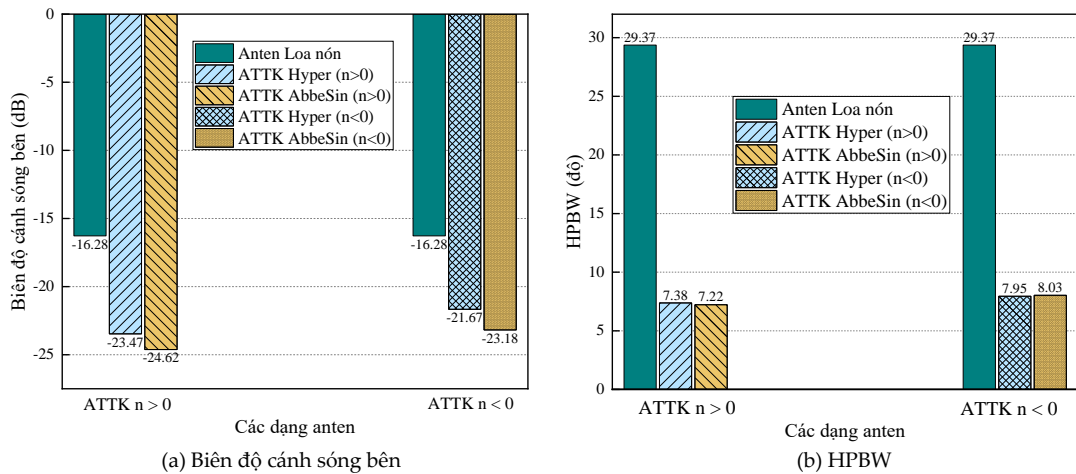
Bằng việc sử dụng phần mềm tính toán MATLAB để giải các phương trình vi phân và xác định tọa độ các điểm trên cấu trúc bề mặt của thấu kính. Đồng thời sử dụng phần mềm mô phỏng trường điện từ hiện đại Ansys HFSS, cho phép tác giả thực hiện mô hình hóa các cấu trúc và tính toán các đặc tính bức xạ của anten thấu kính có chỉ số khúc xạ dương và chỉ số khúc xạ âm. Kết quả mô phỏng và các phân tích được trình bày cụ thể như sau:



Hình 2.6: Giảm đồ bức xạ của anten loa nón và ATTK trong mặt phẳng E.

a) Giảm đồ bức xạ của các cấu trúc anten

Hình 2.6 trình bày giảm đồ bức xạ trong mặt phẳng E (xOz) thể hiện sự so sánh khả năng bức xạ của các loại anten loa nón, anten thấu kính có chỉ số khúc xạ dương và anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với thấu kính dạng hyperbol và Abbe sin. Từ hình vẽ ta có thể thấy rằng, anten loa nón khi hoạt động độc lập có hệ số tăng ích cực đại chỉ đạt 15,15 dBi. Tuy nhiên khi kết hợp anten loa nón với thấu kính có cấu trúc dạng hyperbol và điều kiện Abbe sin cho phép anten có thể cải thiện được đáng kể khả năng bức xạ lên hơn 11,5 dB. Cụ thể, anten thấu kính có chỉ số khúc xạ dương với điều kiện Abbe sin đạt hệ số tăng ích cực đại cao nhất là 27,61 dBi, đối với anten thấu kính có chỉ số khúc xạ dương có dạng hyperbol đạt giá trị 26,85 dBi. Trong khi đó, sử dụng anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện Abbe sin và dạng hyperbol thì giá trị hệ số tăng ích cực đại đạt các giá trị lần lượt là 27,28 dBi và 26,93 dBi. Điều này chứng tỏ khả năng bức xạ của anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm tương đương với việc sử dụng anten thấu kính có chỉ số khúc xạ dương.



Hình 2.7: Biên độ cánh sóng bên và HPBW trong mặt phẳng E.

b) So sánh biên độ cánh sóng bên và HPBW

Sự thay đổi giá trị của biên độ cánh sóng bên và độ rộng cánh sóng chính theo mức nửa công suất trong mặt phẳng E khi sử dụng anten thấu kính với chỉ số khúc xạ âm và chỉ số khúc xạ dương được trình bày như trong Hình 2.7. Theo đó, biên độ cánh sóng bên của anten thấu kính luôn đạt giá trị thấp hơn -23,47 dB đối với anten thấu kính dạng hyperbol và thấp nhất là -24,62 dB đối với anten thấu kính với điều kiện Abbe sin có chỉ số khúc xạ dương. Trong khi đó, biên độ cánh sóng bên của anten loa chỉ đạt giá trị -16,28 dB. Biên độ cánh sóng bên của anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm vẫn luôn duy trì ở mức thấp hơn -23,18 dB đối với anten thấu kính với điều kiện Abbe sin và -21,67 dB đối với anten thấu kính dạng hyperbol.

Độ rộng cánh sóng chính theo mức nửa công suất của anten thấu kính được thu nhỏ lại trong khoảng $7,22^{\circ}$ - $8,03^{\circ}$ trong khi đó giá trị này của anten loa nón là $29,37^{\circ}$. Điều này cho thấy búp sóng chính của anten thấu kính hẹp, khả năng tập trung năng lượng tốt, tính định hướng cao.

Bảng 2.2: Bảng tổng hợp kết quả mô phỏng.

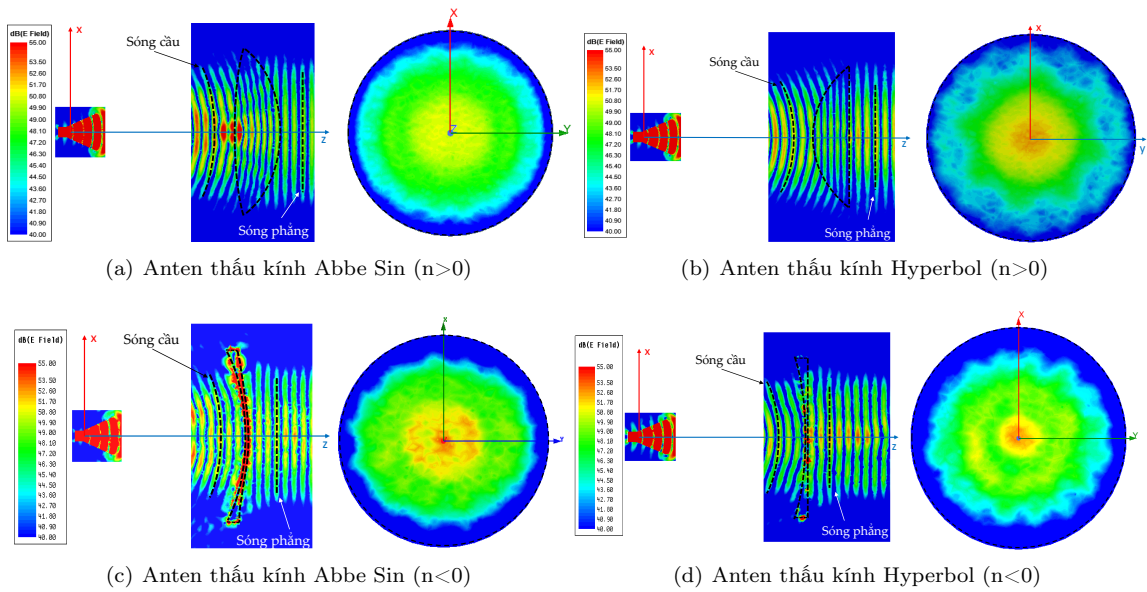
Tham số	Anten loa nón	Anten thấu kính với $n > 0$		Anten thấu kính với $n < 0$	
		Hyperbol	Abbe sin	Hyperbol	Abbe sin
G_{\max} [dBi]	15,35	26,85	27,61	26,93	27,28
SLL [dB]	-16,28	-23,47	-24,62	-21,67	-23,18
HPBW [độ]	29,37	7,38	7,22	7,95	8,03
T [mm]		24,51	28,66	6,1	6,1

c) Kích thước thấu kính

Khi sử dụng thấu kính có chỉ số khúc xạ âm, độ dày của thấu kính được giảm đi rõ rệt. Đối với thấu kính có chỉ số khúc xạ dương có dạng hyperbol và Abbe sin, độ dày của thấu kính tại tâm lần lượt là 24,51 mm và 28,66 mm. Trong khi đó, độ dày của thấu kính có chỉ số khúc xạ âm tại mép của thấu kính chỉ là 6,1 mm và tại tâm là 1 mm. Điều này giúp cho kích thước tổng thể của anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm được thu gọn lại, anten thấu kính nhỏ hơn, nhẹ hơn, dễ triển khai lắp đặt và hạn chế được sự tác động từ môi trường bên ngoài. Các kết quả mô phỏng được trình bày cụ thể như trong Bảng 2.2.

d) Phân bố biên độ điện trường của anten thấu kính trong các mặt phẳng

Hình 2.8 thể hiện phân bố biên độ điện trường trong mặt phẳng xOz và tại mặt mở của anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm và chỉ số khúc xạ dương. Đối với các phân bố trường trong mặt phẳng xOz , chúng ta có thể thấy rằng, sóng điện từ đi từ nguồn phát xạ tới mặt trong của thấu kính có dạng cầu, nhưng khi đi qua thấu kính sóng cầu chuyển thành sóng phẳng bức xạ ra ngoài môi trường. Các phân bố biên độ điện trường trên mặt mở của thấu kính cũng cho thấy sự đồng đều, năng lượng điện trường tập trung ở tâm và giảm đều về mép ngoài của thấu kính. Phân bố biên độ điện trường



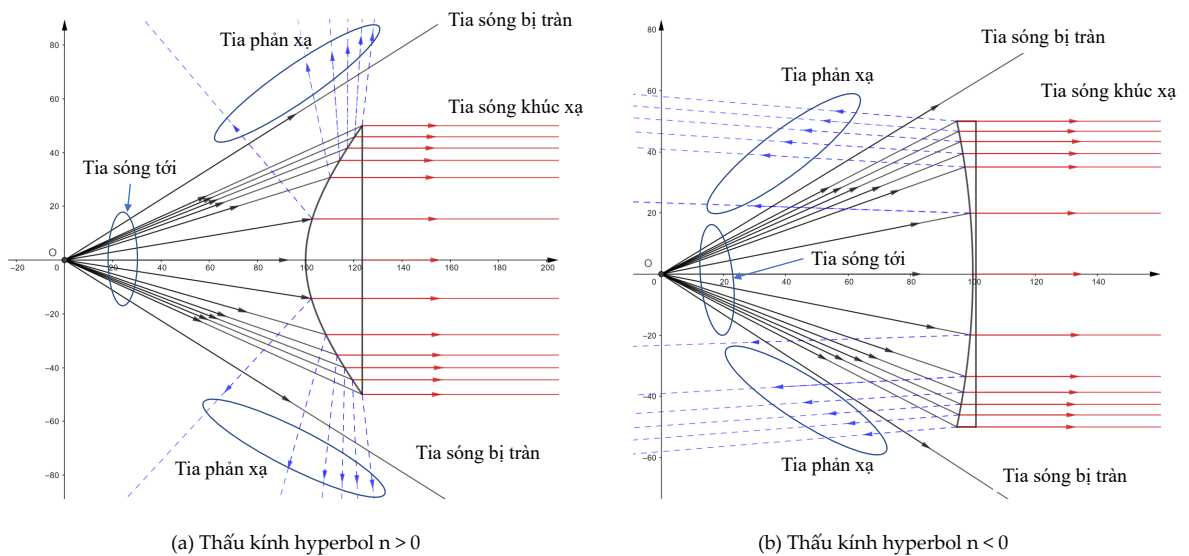
Hình 2.8: Phân bố trường trong mặt phẳng xOz và tại mặt mở của anten thấu kính.

trong mặt phẳng xOz và tại mặt mở của anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm là tương đồng với anten thấu kính có chỉ số khúc xạ dương. Điều này khẳng định khả năng sử dụng của thấu kính có chỉ số khúc xạ âm trong việc chuyển đổi sóng cầu thành dạng sóng phẳng có khả năng bức xạ đi tốt hơn so với các cấu trúc anten thông thường.

e) Đánh giá sự phản xạ và khúc xạ của tia sóng khi đi qua thấu kính

Khi sóng điện từ truyền qua bất kỳ vật thể nào, thì năng lượng của sóng điện từ đều được phân thành ba dạng cơ bản đó là năng lượng phản xạ, năng lượng truyền đi và năng lượng hấp thụ. Mức năng lượng của các loại này được xác định bởi các đặc tính điện môi của vật liệu. Độ điện thẩm phức của vật liệu được xác định bởi phương trình, $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$. Trong đó, phần thực ϵ' của độ điện thẩm phức được gọi là độ điện thẩm, nó thể hiện khả năng tích trữ năng lượng điện của vật liệu và phần ảo ϵ'' được gọi là hệ số tổn hao năng lượng trong vật liệu do điện trường. Suy hao do phản xạ được định nghĩa là phần năng lượng bị phản xạ trở lại nguồn phát xạ hoặc theo hướng không

mong muốn. Trong anten thấu kính, hiện tượng phản xạ xảy ra ở giao diện giữa hai môi trường thấu kính và không gian tự do, do sự thay đổi hay sự chênh lệch điện môi giữa vật liệu làm thấu kính và môi trường không gian tự do. Độ điện thẩm của vật liệu càng cao thì mức năng lượng phản xạ lại càng lớn. Ngoài ra, suy hao do phản xạ phụ thuộc vào góc tới của tia sóng ở giao diện của mặt phân cách giữa hai môi trường.



Hình 2.9: Sự khúc xạ và phản xạ của tia sóng trên bề mặt thấu kính.

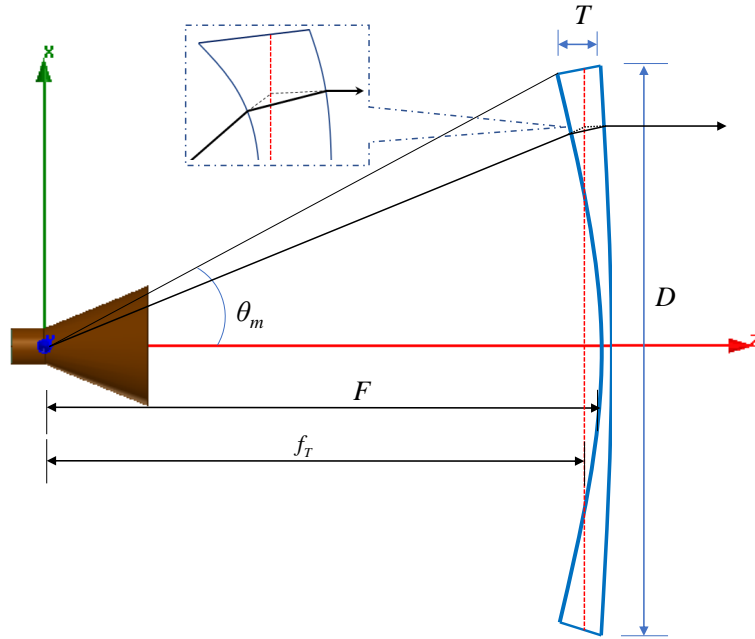
Để thể hiện sự phản xạ xảy ra trên bề mặt thấu kính, tác giả sử dụng phương pháp ray tracing để phân tích các đường đi của tia sóng khi qua mặt phân cách giữa hai môi trường, được trình bày như trong Hình 2.9. Theo đó, các đường nét liền màu đen thể hiện là các tia sóng tới từ nguồn phát xạ của anten; các đường nét đứt màu xanh là các tia phản xạ từ bề mặt thấu kính; các đường màu đỏ là các tia sóng khúc xạ, đi qua thấu kính và bức xạ ra bên ngoài môi trường. Từ hình vẽ ta có thể thấy rằng, đối với thấu kính có vật liệu điện môi thì hầu hết các tia sóng đi từ nguồn phát xạ đều được khúc xạ và đi xuyên qua thấu kính sau đó bức xạ ra ngoài môi trường. Tuy nhiên,

do có sự thay đổi về môi trường truyền dẫn (từ không gian tự do qua chất điện môi hoặc vật liệu có chỉ số khúc xạ âm), nên một phần năng lượng bị phản xạ ngược trở lại hoặc bị tràn ra bên ngoài mép thấu kính. Điều này có thể gây ảnh hưởng tới khả năng bức xạ, làm tăng biên độ cánh sóng bên của anten thấu kính. Để giảm thiểu sự suy hao do phản xạ xảy ra trên bề mặt thấu kính chúng ta có thể sử dụng lớp phối hợp phản xạ với độ dày bằng một phần tư bước sóng, gắn lên trên bề mặt thấu kính. Với cách tiếp cận này, anten thấu kính có độ điện thẩm cao kết hợp với lớp phối hợp phản xạ có thể được sử dụng để cải thiện được các đặc tính bức xạ của anten thấu kính. Nguyên lý hoạt động của lớp phối hợp phản xạ và hiệu quả của chúng trong việc cải thiện khả năng bức xạ của anten thấu kính được phân tích cụ thể trong phần Phụ lục.

2.2. Đề xuất giải pháp tính toán, xác định cấu trúc anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện Straight line

Việc thiết kế cấu trúc mặt cong của thấu kính để đảm bảo sóng từ nguồn phát xạ được bức xạ ra ngoài môi trường một cách hiệu quả nhất là một vấn đề rất quan trọng. Cấu trúc đó phải đáp ứng được điều kiện sóng bức xạ từ mặt mở phải là sóng phẳng, đồng pha. Dựa trên các nguyên lý về quang hình, quang lý và định luật khúc xạ Snell, cho phép chúng ta có thể tính toán và lựa chọn được các cấu trúc thấu kính hiệu quả.

Điều kiện Abbe sin được nghiên cứu và áp dụng cho anten thấu kính điện môi với yêu cầu chùm tia đi từ nguồn phát xạ và chùm tia bức xạ từ mặt mở của thấu kính ra ngoài môi trường kéo dài giao với nhau tại các điểm, các điểm này thỏa mãn điều kiện nằm trên một cung tròn với bán kính không



Hình 2.10: Cấu trúc anten thấu kính NRI với điều kiện Straight line.

đổi f_c . Điều này cho phép anten thấu kính điện môi với điều kiện Abbe sin có khả năng tạo được đa búp sóng hoặc quét búp sóng góc rộng [80].

Phát triển từ điều kiện Abbe sin, tác giả đề xuất sử dụng điều kiện mới cho việc xác định cấu trúc bề mặt thấu kính, với yêu cầu chùm tia đi từ nguồn phát xạ tới mặt trong S_1 và chùm tia bức xạ từ mặt ngoài S_2 của thấu kính ra ngoài môi trường kéo dài giao với nhau tại các điểm, và các điểm này thỏa mãn điều kiện nằm trên một đường thẳng (SL), được thể hiện là đường nét đứt màu đỏ vuông góc với trục bức xạ Oz như trong Hình 2.10. Khoảng cách từ tiêu điểm của thấu kính tới đường thẳng kể trên là f_T .

2.2.1. Phương pháp tính toán cấu trúc thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện Straight line

Mô hình thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện Straight line và các tia sóng bức xạ được thể hiện như trong Hình 2.11. Để tính toán cấu trúc mặt cong của thấu kính, tác giả sử dụng phương pháp tính toán vi phân.

$$\tan \theta_1 = \frac{-1}{\tan(\theta + \theta_2)} = \frac{\tan \theta \cdot \tan \theta_2 - 1}{\tan \theta + \tan \theta_2} \quad (2.14)$$

Áp dụng định luật Snell với điều kiện khúc xạ âm ta có

$$n = \frac{\sin(\theta - \theta_1)}{\sin(\theta_1 + \varphi)} = \frac{\sin \theta - \cos \theta \tan \theta_1}{\cos \varphi \tan \theta_1 + \sin \varphi} \quad (2.15)$$

$$\tan \theta_1 = \frac{\sin \theta - n \sin \varphi}{n \cos \varphi + \cos \theta} \quad (2.16)$$

Trong đó, φ là góc tạo bởi tia khúc xạ sau mặt cong S_1 và trục bức xạ Oz .

Kết hợp hai phương trình (2.14) và (2.16) ta được:

$$\frac{\sin \theta - n \sin \varphi}{n \cos \varphi + \cos \theta} = \frac{\tan \theta \cdot \tan \theta_2 - 1}{\tan \theta + \tan \theta_2} \quad (2.17)$$

$$\tan \theta_2 = \frac{n \cos(\theta + \varphi) + 1}{n \sin(\theta + \varphi)} \quad (2.18)$$

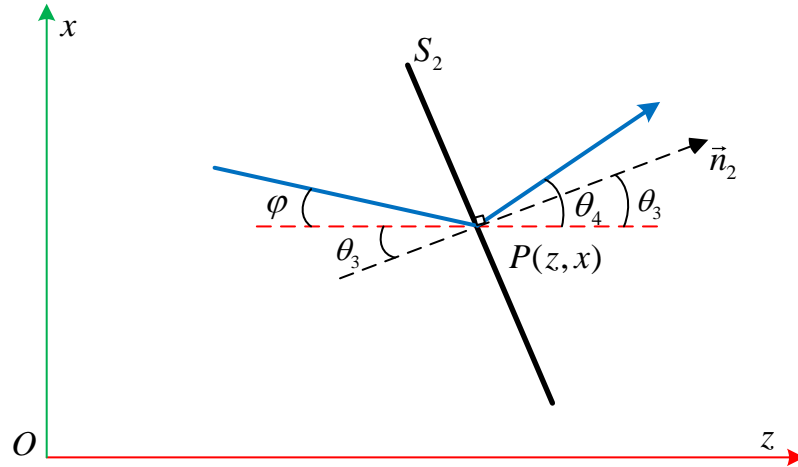
Từ phương trình (2.13) và (2.18) ta có

$$\frac{dr}{d\theta} = \frac{rn \sin(\theta + \varphi)}{n \cos(\theta + \varphi) + 1} \quad (2.19)$$

$$\frac{dr}{d\theta} = \frac{rn \sin \varphi \cos \theta + rn \cos \varphi \sin \theta}{1 + n \cos \theta \cos \varphi - n \sin \theta \sin \varphi} \quad (2.20)$$

Xem xét đường đi của các tia sáng trong Hình 2.11 ta có, chiều dài điện của tia sáng đi từ tiêu điểm của thấu kính đến mặt mở z_0 được cho bởi phương trình sau:

$$l_0 = r + l_1 + z_0 - z \quad (2.21)$$



Hình 2.13: Điểm bức xạ tại mặt cong phía ngoài S_2 của thấu kính.

Trong đó, l_0 là tổng chiều dài điện của tia sóng tính từ tiêu điểm tới mặt mở của thấu kính; l_1 là chiều dài điện của tia sóng trong môi trường thấu kính; r là chiều dài của tia sóng tính từ tiêu điểm tới mặt cong phía trong của thấu kính; z_0 là khoảng cách từ tiêu điểm của thấu kính tới mặt mở; z là khoảng cách từ điểm $P(x, z)$ trên mặt cong S_2 tới trục Ox . Chiều dài điện của tia sóng trong môi trường thấu kính (l_1) được cho bởi phương trình sau:

$$l_1 = \frac{n(z - \cos \theta)}{\cos \varphi} = l_0 + z - z_0 - r \quad (2.22)$$

$$\varphi = \arccos\left(\frac{n(z - \cos \theta)}{l_1}\right) \quad (2.23)$$

Từ phương trình (2.20), (2.22) và (2.23) ta có phương trình mặt cong phía trong S_1 của thấu kính được cho bởi phương trình:

$$\frac{dr}{d\theta} = \frac{n^2 r \sin \theta (z - r \cos \theta) + r n l_1 \cos \theta \sin \varphi}{n^2 r \cos \theta (z - r \cos \theta) - n l_1 \sin \theta \sin \varphi + l_1} \quad (2.24)$$

Tương tự như đối với mặt cong phía trong S_1 , chúng ta xem xét mặt cong phía ngoài S_2 trong phạm vi đủ nhỏ và được coi như là một mặt phẳng. Lúc

này ta có mặt ngoài của thấu kính được thể hiện như trong Hình 2.13. Tia sóng đi từ nguồn phát xạ sau khi đi qua mặt cong phía trong S_1 sẽ tiếp tục đi tới mặt cong phía ngoài S_2 và xảy ra khúc xạ lần thứ hai tại điểm $P(x, z)$ với góc tới $\varphi + \theta_3$. Trong đó, θ_3 là góc tạo bởi pháp tuyến \vec{n}_2 tại điểm $P(x, z)$ trên mặt cong S_2 với trục bức xạ Oz . Áp dụng định luật Snell với điều kiện khúc xạ âm cho tia sóng đi qua điểm $P(x, z)$ trên mặt cong S_2 ta có:

$$n = \frac{\sin(\theta_4 - \theta_3)}{\sin(\varphi + \theta_3)} \quad (2.25)$$

Để tia sóng bức xạ ra ngoài môi trường là sóng phẳng, đồng pha, thì các tia sóng bức xạ phải song song với nhau và song song với trục bức xạ Oz . Do đó, $\theta_4 = 0^0$, lúc này phương trình (2.25) trở thành

$$n = \frac{-\sin \theta_3}{\sin(\varphi + \theta_3)} \quad (2.26)$$

$$n = \frac{-\tan \theta_3}{\sin \varphi + \cos \varphi \tan \theta_3} \quad (2.27)$$

$$\tan \theta_3 = \frac{-n \sin \varphi}{1 + n \cos \varphi} \quad (2.28)$$

Với θ_3 là góc tạo bởi pháp tuyến \vec{n}_2 với trục bức xạ nên ta có

$$\tan \theta_3 = \frac{dz}{dx} = \frac{-n \sin \varphi}{1 + n \cos \varphi} \quad (2.29)$$

$$\frac{dz}{d\theta} = \frac{-n \sin \varphi}{1 + n \cos \varphi} \frac{dx}{d\theta} \quad (2.30)$$

Từ phương trình (2.22) và (2.30) ta có phương trình mặt cong phía ngoài S_2 của thấu kính được cho bởi

$$\frac{dz}{d\theta} = \frac{-nl_1 \sin \varphi}{l_1 + n^2(z - r \cos \theta)} \frac{dx}{d\theta} \quad (2.31)$$

Để thỏa mãn điều kiện tia sáng đi từ nguồn phát xạ đến mặt cong phía trong S_1 và tia sáng khúc xạ từ mặt ngoài S_2 kéo dài có giao điểm nằm trên một đường thẳng thì phương trình đường thẳng chứa các giao điểm ấy được xác định bởi phương trình sau:

$$f_T = \frac{x}{\tan \theta} \quad (2.32)$$

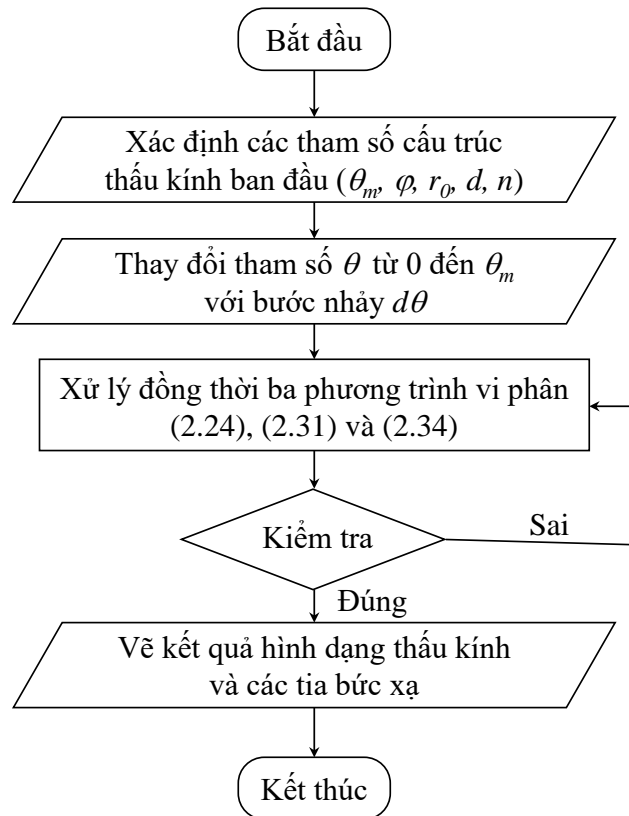
$$x = f_T \tan \theta \quad (2.33)$$

$$\frac{dx}{d\theta} = \frac{f_T}{\cos^2 \theta} \quad (2.34)$$

Nghiệm của ba phương trình vi phân (2.24), (2.31) và (2.34) là tọa độ các điểm trong không gian tạo nên hai mặt cong của thấu kính thỏa mãn điều kiện của cấu trúc đề xuất.

2.2.2. Mô hình cấu trúc anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện *Straight line*

Bằng việc sử dụng phần mềm tính toán MATLAB để giải đồng thời ba phương trình vi phân (2.24), (2.31) và (2.34) dựa trên lưu đồ thuật toán được trình bày như trong Hình 2.14, và các điều kiện tham số đầu vào của thấu kính được xác định như trong Bảng 2.3, ta có thể xác định được cấu trúc



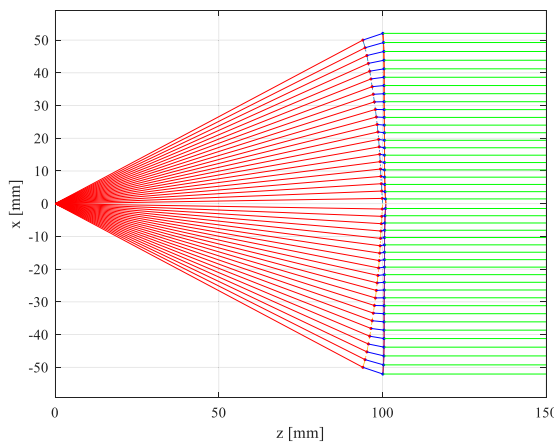
Hình 2.14: Lưu đồ thuật toán xác định cấu trúc mặt cong thấu kính.

thấu kính thỏa mãn điều kiện chùm tia sóng cầu đi từ nguồn phát xạ đặt tại tiêu điểm của thấu kính khi qua thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện đề xuất sẽ trở thành chùm tia sóng chuẩn trực, được thể hiện như trong Hình 2.15a. Theo đó, các đường màu đỏ là các tia sóng đi từ tiêu điểm (nguồn phát xạ) của thấu kính tới mặt cong phía trong S_1 . Các đường màu xanh nước biển thể hiện tia sóng bị khúc xạ trong môi trường thấu kính có chỉ số khúc xạ âm. Các đường màu xanh lá cây thể hiện các tia sóng bức xạ ra ngoài môi trường, các tia sóng này song song với nhau và song song với trục bức xạ Oz , thể hiện là sóng phẳng, đồng pha.

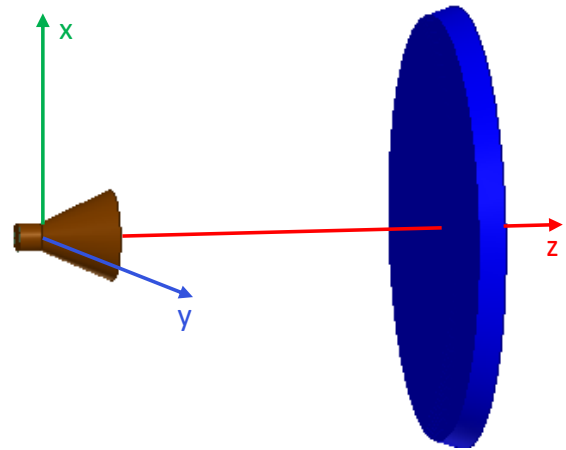
Với cấu trúc mặt cong được xác định từ ba phương trình vi phân và các điều kiện đầu vào, tác giả sử dụng phần mềm tính toán trường điện từ Ansys

Bảng 2.3: Các tham số điều kiện đầu vào của cấu trúc thấu kính SL.

Các tham số cấu trúc		Giá trị	Đơn vị
F	Khoảng cách từ tiêu điểm tới đỉnh của thấu kính	100	mm
D	Đường kính của thấu kính	100	mm
μ_r	Độ từ thẩm tương đối	-1	
ε_r	Độ điện thẩm tương đối	-2	
$\tan\delta$	Hệ số tổn hao điện môi	0,001	
θ_m	Góc bức xạ cực đại từ tiêu điểm đến mép thấu kính	28	Độ
φ	Góc lệch của tia khúc xạ so với trục bức xạ	-54	Độ
T	Độ dày thấu kính tại mép thấu kính	6,1	mm
f	Tần số trung tâm	28	GHz



(a) Cấu trúc mặt cong và các tia sóng



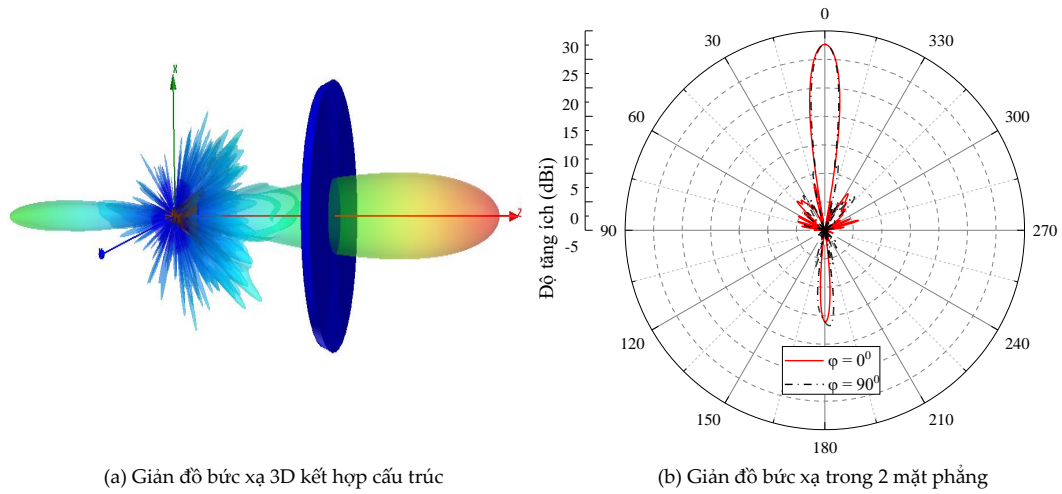
(b) Cấu trúc anten thấu kính 3D

Hình 2.15: Cấu trúc mặt cong của thấu kính với điều kiện SL.

HFSS để xây dựng mô hình cấu trúc anten thấu kính với nguồn phát xạ là anten loa nón và thấu kính có chỉ số khúc xạ âm thỏa mãn điều kiện SL đề xuất được thể hiện như trong Hình 2.15b.

2.2.3. Mô phỏng, đánh giá kết quả

Khi sử dụng nguồn phát xạ là anten loa nón có cấu trúc được trình bày như trong Mục 2.1.1, anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện Straight line đề xuất đạt được một số kết quả cụ thể như sau:



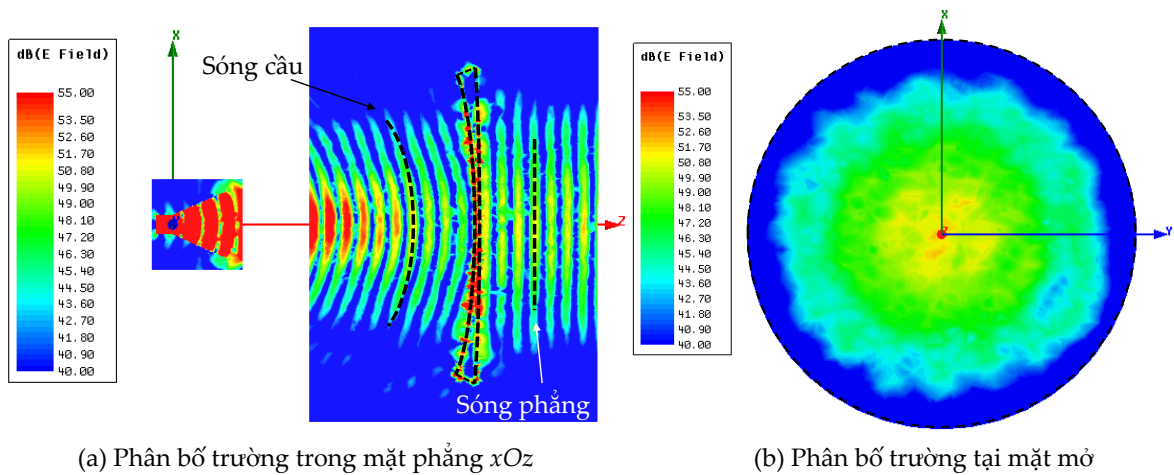
Hình 2.16: Giản đồ bức xạ 3D và mặt cắt trong mặt phẳng $\varphi = 0^0$, $\varphi = 90^0$ của cấu trúc ATTK đề xuất.

a) Giản đồ bức xạ của cấu trúc anten thấu kính đề xuất

Giản đồ bức xạ 3D và trong hai mặt phẳng với $\varphi = 0^0$, $\varphi = 90^0$ của anten thấu kính NRI với điều kiện SL được thể hiện như trong Hình 2.16. Theo đó, ta có thể thấy rằng, anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với cấu trúc đề xuất có hệ số tăng ích cực đại đạt giá trị 27,48 dBi cao hơn hệ số tăng ích cực đại của các cấu trúc anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm dạng hyperbol và Abbe sin lần lượt là 26,93 dBi và 27,25 dBi. Bên cạnh đó, biên độ cánh sóng bên của anten thấu kính có cấu trúc đề xuất cũng đạt giá trị thấp nhất là -25,10 dB, thấp hơn 3,43 dB so với anten thấu kính dạng hyperbol và 1,92 dB so với anten thấu kính với điều kiện Abbe sin. Điều này cho thấy anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện SL đề xuất có khả năng bức xạ tốt hơn so với hai loại anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm được trình bày trong Mục 2.1.4 với cùng kích thước và nguồn phát xạ.

b) Phân bố biên độ điện trường trong các mặt phẳng

Phân bố biên độ điện trường trong mặt phẳng xOz và tại mặt mở của anten thấu kính có cấu trúc đề xuất được trình bày như trong Hình 2.17. Từ

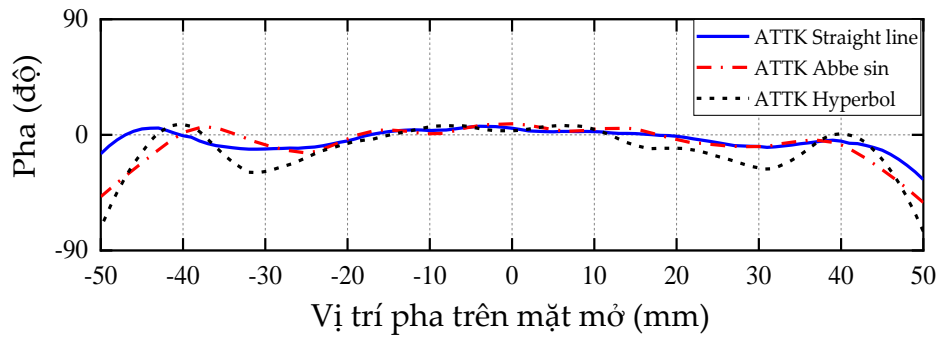


Hình 2.17: Phân bố trường trong mặt phẳng xOz và tại mặt mở của ATTK đề xuất.

phân bố biên độ trường trong mặt phẳng xOz trong Hình 2.17a ta có thể thấy rằng, thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện SL đề xuất cho phép sóng điện từ có dạng cầu của nguồn phát xạ đi xuyên qua và biến đổi thành sóng phẳng, đồng pha ở phía sau của mặt mở. Phân bố biên độ điện trường trên mặt mở của thấu kính cũng cho thấy sự phân bố đồng đều từ tâm ra đến ngoài mép của thấu kính, được thể hiện như trong Hình 2.17b. Kết quả này đồng nhất với phân bố trường của các loại anten thấu kính đã trình bày trong Mục 2.1.4. Điều này khẳng định sự chính xác của việc xác định cấu trúc mặt cong của thấu kính về khả năng hoạt động của anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện SL đề xuất.

c) Phân bố pha trên mặt mở của anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm

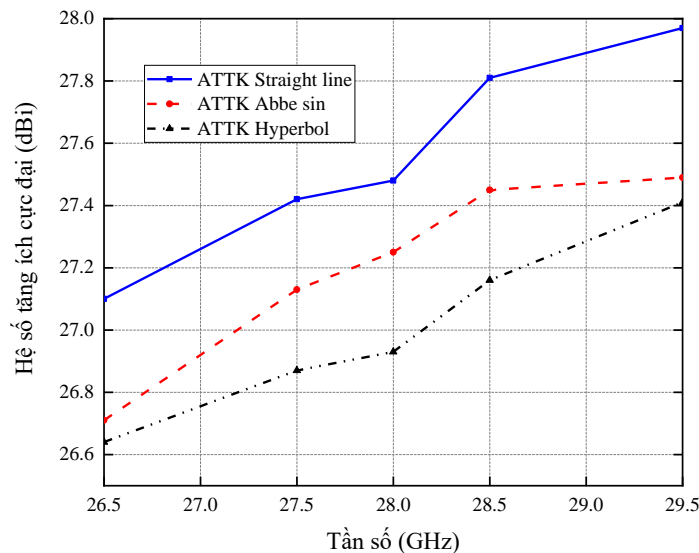
Khi xem xét sự phân bố pha trên mặt mở của anten thấu kính ta nhận thấy rằng, sự phân bố pha trên mặt mở là đồng đều nhau, sự sai pha trong khoảng bức xạ cực đại gần tâm của thấu kính là tương đối ít so với sự sai pha tại mép của thấu kính. Sự mập mờ của giản đồ phân bố pha trên mặt mở của anten thấu kính là do hiện tượng quang sai cầu, hiện tượng coma



Hình 2.18: Phân bố pha trên mặt mở của anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm.

và sự phản xạ trên bề mặt của thấu kính. Đối với anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với cấu trúc Straight line đề xuất, sự sai pha trên mặt mở xảy ra ít hơn so với hai cấu trúc anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện Abbe sin và dạng hyperbol. Do đó, hệ số tăng ích của anten thấu kính với điều kiện đề xuất cao hơn so với anten thấu kính với điều kiện Abbe sin và dạng hyperbol, được thể hiện như trong Hình 2.18.

d) Khả năng hoạt động của anten thấu kính NRI trong băng tần 28 GHz



Hình 2.19: Hệ số tăng ích cực đại của anten thấu kính NRI trong băng tần 28 GHz.

Sự thay đổi giá trị của hệ số tăng ích cực đại của anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện Abbe sin, dạng hyperbol và điều kiện Straight

line đề xuất được thể hiện như trong Hình 2.19. Ta có thể thấy rằng, cả ba cấu trúc anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm đều có khả năng hoạt động tốt trên toàn bộ dải tần công tác khi chúng duy trì được khả năng bức xạ với hệ số tăng ích cực đại của anten thấu kính ở mức cao hơn 26,64 dBi. Đường nét liền màu xanh thể hiện sự thay đổi hệ số tăng ích cực đại của anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với cấu trúc đề xuất. Có thể nhận ra rằng, khả năng bức xạ của anten thấu kính với điều kiện Straight line đề xuất luôn đạt ở mức cao hơn so với hai cấu trúc anten thấu kính dạng hyperbol và điều kiện Abbe sin trong dải tần làm việc từ 26,5 GHz - 29,5 GHz. Điều này khẳng định sự hiệu quả của cấu trúc anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện Straight line đề xuất trên toàn bộ dải tần.

e) So sánh các kết quả nghiên cứu

Thực hiện so sánh kết quả nghiên cứu đạt được của luận án với kết quả của các công trình nghiên cứu đã được công bố về anten thấu kính, được trình bày cụ thể trong Bảng 2.4. Tác giả nhận thấy rằng, anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện Straight line đề xuất, có hệ số tăng ích cực đại cao hơn, biên độ cánh sóng bên thấp hơn so với kết quả của các cấu trúc anten thấu kính được công bố trong các nghiên cứu [49, 60, 69, 71]. Giảm độ bức xạ của anten thấu kính có cấu trúc đề xuất tương đồng với kết quả trong nghiên cứu của Ansarudin [19] nhưng có biên độ cánh sóng bên thấp hơn. Giá trị hệ số tăng ích cực đại của anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện Straight line gần đạt được giá trị cực đại theo lý thuyết ($G_T = 29,34$ dBi) của anten mặt mở được cho bởi công thức (2.35), [81].

$$G_T = \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \quad (2.35)$$

Bảng 2.4: Bảng so sánh các kết quả nghiên cứu.

TLTK	Cấu trúc thấu kính	Chỉ số khúc xạ n	Tần số [GHz]	G_{max} [dBi]	SLL [dB]	T [mm]
[19]	Abbe sin	$\sqrt{4}$	28	27,74	-23,50	14,80
	Straight line (n>0)			27,69	-24,50	13,83
	BTNL			27,56	-21,50	17,00
[36]	Abbe sin	-1	11	7,60	-17,00	39,00
[49]	Luneburg+ATSL	$\sqrt{2}, \bar{2}$	28	21,24	-18,59	87,50
[60]	Luneburg	Phân bậc: 2,5; 2,35; 1,95; 1,6	26	22,20	-20,50	25,00
			28	21,60		
[69]	Rotman		28,5	18,50	-12,50	10,00
[71]	Rotman		28	16,60		
LA	Abbe sin	$-\sqrt{2}$	28	27,25	-23,18	6,10
	Hyperbol			26,93	-21,67	
	Straight line (n<0)			27,48	-25,10	

Bằng việc sử dụng thấu kính có chỉ số khúc xạ âm cho phép chúng ta có thể tối ưu hóa kích thước của thấu kính so với các cấu trúc thấu kính có chỉ số khúc xạ dương và các dạng thấu kính khác. Cụ thể, độ dày của thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với cấu trúc đề xuất giảm được 55,9% so với độ dày của thấu kính có chỉ số khúc xạ dương với cùng điều kiện Straight line, 58,78% so với thấu kính có điều kiện Abbe sin và 64,12% đối với thấu kính có điều kiện bảo toàn năng lượng trong nghiên cứu [19]. Kích thước của thấu kính với điều kiện đề xuất còn nhỏ hơn nhiều so với các thấu kính dạng Abbe sin, Luneburg và Rotman trong các nghiên cứu [36, 49, 60, 69]. Điều này cho thấy sự hiệu quả của việc sử dụng anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện Straight line đề xuất không chỉ trong việc cải thiện khả năng bức xạ của anten mà còn có thể tối ưu hóa được cấu trúc anten thấu kính nhỏ hơn, gọn hơn so với một số cấu trúc anten thấu kính thông thường.

Trong nghiên cứu [36], nhóm tác giả đã sử dụng cấu trúc tương đương để chuyển thấu kính với điều kiện Abbe sin có chỉ số khúc xạ âm ($n = -1$) đồng nhất, đẳng hướng với sóng điện từ thành dạng cấu trúc siêu vật liệu (metamaterial) với các phần tử cộng hưởng, thấu kính đã được chế tạo và đo kiểm cho kết quả tương đồng với cấu trúc Abbe sin. Do đó, cấu trúc thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện Straight line được đề xuất trong luận án này cũng có khả năng thiết kế, chế tạo và ứng dụng trong thực tế bằng cách chuyển đổi thành cấu trúc tương đương kiểu thấu kính siêu vật liệu dưới dạng kết hợp các phần tử cộng hưởng và lớp điện môi tự nhiên.

2.3. Kết luận chương 2

Trong Chương 2, luận án thực hiện nghiên cứu giải pháp phát triển cấu trúc anten thấu kính thông qua việc đề xuất sử dụng thấu kính có chỉ số khúc xạ âm; đề xuất giải pháp tính toán thiết kế anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện quỹ đạo các giao điểm của tia sóng tới từ nguồn phát xạ và tia sóng khúc xạ đi ra từ mặt mở của thấu kính nằm trên một đường thẳng. Kết quả cho thấy, cấu trúc anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện đề xuất có hệ số tăng ích cao, biên độ cánh sóng bên thấp. Ngoài ra, với việc sử dụng thấu kính có chỉ số khúc xạ âm giúp cho kích thước của thấu kính mỏng hơn so với thấu kính có chỉ số khúc xạ dương. Mô hình cấu trúc anten thấu kính có cấu trúc đề xuất phù hợp với cấu trúc anten tại trạm gốc định hướng ứng dụng cho hệ thống thông tin di động 5G băng tần 28 GHz. Kết quả nghiên cứu của chương này được thể hiện trong các công trình nghiên cứu **J1**, **J2**, **C1**, **C2** và **C4**.

Chương 3

NGHIÊN CỨU GIẢI PHÁP TẠO ĐA BÚP SÓNG CHO ANTEN THẤU KÍNH CÓ CHỈ SỐ KHÚC XẠ ÂM

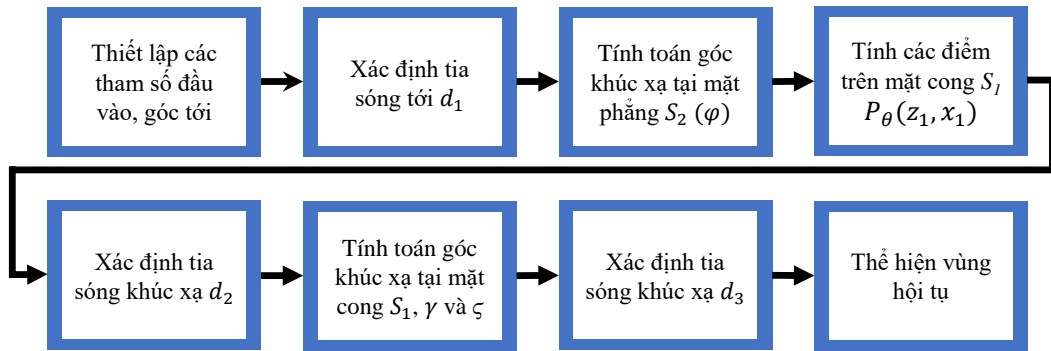
Anten đa búp sóng có khả năng tạo ra được đồng thời nhiều búp sóng độc lập nhau với hệ số tăng ích cao để phủ sóng được một vùng xác định, cung cấp một giải pháp để giải quyết những hạn chế của anten đơn búp sóng. Đối với anten thấu kính, để tạo được đa búp sóng chúng ta chỉ cần thiết lập nhiều nguồn phát xạ phía sau của thấu kính. Tuy nhiên, việc thiết lập này không phải là ngẫu nhiên mà các vị trí thiết lập nguồn phát xạ lệch trục, lệch tiêu điểm cần được tính toán, xác định một cách phức tạp. Việc tính toán, xác định chính xác vị trí đặt nguồn phát xạ sẽ giúp cho anten thấu kính có khả năng tạo được đa búp sóng một cách hiệu quả nhất. Để xác định các vị trí đó, các nhà nghiên cứu đã áp dụng các phương pháp khác nhau như: Phương pháp ray tracing, phương pháp mô-men Dựa trên cấu trúc anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với một nguồn phát xạ được đề xuất ở Chương 2. Trong Chương 3, luận án đề xuất giải pháp tính toán, xác định các vùng hội tụ và quỹ đạo của các vùng hội tụ sử dụng phương pháp ray tracing cho thấu kính có chỉ số khúc xạ âm. Từ những vùng hội tụ và quỹ đạo đã xác định, luận án đề xuất mô hình cấu trúc anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện Straight line có khả năng tạo được đa búp sóng và quét búp sóng góc rộng hoạt động trong băng tần 28 GHz. Hiệu quả của các đề xuất được đánh giá thông qua các kết quả mô phỏng.

3.1. Xác định vùng hội tụ của thấu kính có chỉ số khúc xạ âm bằng phương pháp ray tracing

3.1.1. Phương pháp xác định vùng hội tụ

Ray tracing là một phương pháp tìm đường đi của tia sóng điện từ khi đi qua các vùng có các chất điện môi khác nhau, có tính đến các đặc điểm hấp thụ và phản xạ. Sự hoạt động của trường điện từ phức tạp hơn nhiều so với tia quang học. Ở miền tần số cao, các phương pháp toàn sóng như phương pháp sai phân hữu hạn miền thời gian (FDTD: Finite Difference Time Domain); phương pháp mô-men (MoM) và phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) có độ chính xác rất cao nhưng phân tích các cấu trúc lớn về mặt điện rất chậm, yêu cầu khả năng xử lý và bộ nhớ của máy tính rất cao. Do đó, trong nghiên cứu mô phỏng đánh giá hiệu suất và thiết kế các cấu trúc điện lớn như anten thấu kính và anten mặt phản xạ thì phương pháp ray tracing được coi là giải pháp tính toán hiệu quả và được sử dụng khá phổ biến [18, 21, 81–84].

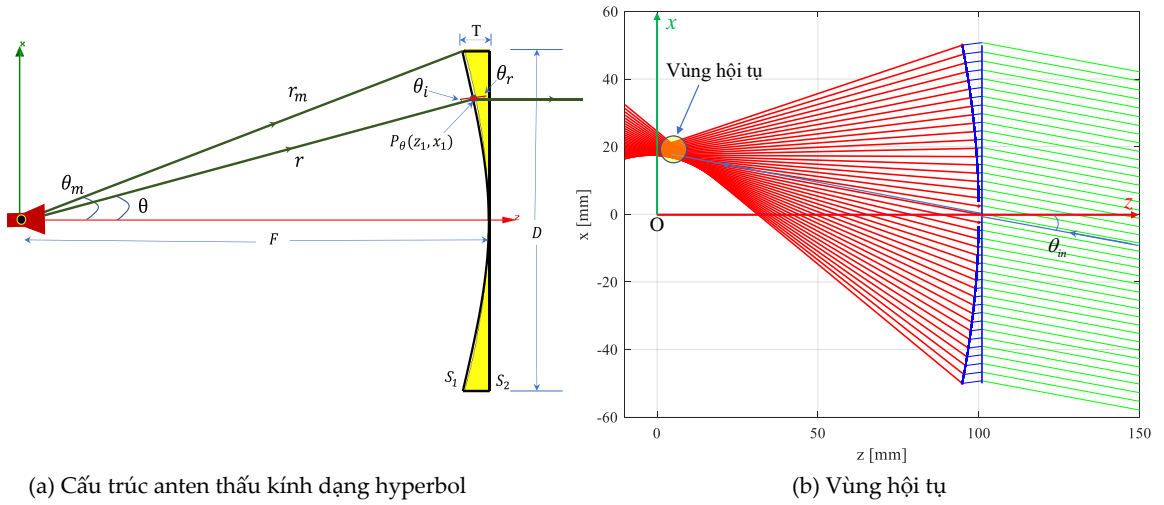
Anten thấu kính hoạt động hiệu quả nhất khi nguồn phát xạ được thiết lập tại tiêu điểm của thấu kính. Tuy nhiên, để tạo được đa búp sóng, các nguồn phát xạ phải được đặt lệch tiêu điểm, lệch trục. Bằng việc sử dụng phương pháp ray tracing ở chế độ thu cho phép chúng ta có thể xác định được các điểm hội tụ, vùng hội tụ lệch tiêu điểm, lệch trục. Việc tính toán các điểm hội tụ và vùng hội tụ dựa vào phương pháp ray tracing đã được nghiên cứu và áp dụng cho anten thấu kính có chỉ số khúc xạ dương [18, 21, 72, 83]. Tuy nhiên, việc thực hiện tính toán, xác định điểm hội tụ, vùng hội tụ và quỹ đạo của các điểm đó cho thấu kính có chỉ số khúc xạ âm bằng phương pháp ray tracing chưa được các nhà nghiên cứu thực hiện. Chính vì vậy, trong mục



Hình 3.1: Quy trình xác định vùng hội tụ của thấu kính NRI.

này của luận án, tác giả sử dụng phương pháp ray tracing để xác định các điểm hội tụ và quỹ đạo của chúng làm cơ sở để thiết lập nguồn phát xạ tạo ra anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm có khả năng tạo được đa búp sóng, có góc quét búp sóng rộng.

Quy trình thực hiện xác định điểm hội tụ bằng phương pháp ray tracing được thể hiện như trong Hình 3.1. Các phân tích đường đi của tia sóng được dựa trên các phương pháp tính toán quang hình, quang lý, định luật khúc xạ Snell đối với môi trường có chỉ số khúc xạ âm và xây dựng bằng phần mềm tính toán MATLAB. Từ việc thiết lập các tham số cấu trúc của anten như chỉ số khúc xạ n , khoảng cách từ tiêu điểm đến đỉnh của thấu kính F , góc bức xạ cực đại tới mép thấu kính θ_m và góc tới của tia ray tracing từ mặt phẳng sóng θ_{in} thì các phương trình đường đi của các tia sóng từ mặt phẳng sóng qua thấu kính sẽ được xác định. Điểm giao nhau giữa các tia sóng sau khi đi ra từ mặt cong phía trong của thấu kính sẽ hội tụ tại một điểm hoặc một vùng. Các điểm hội tụ này là điểm tốt nhất để thiết lập nguồn phát xạ cho anten thấu kính. Cũng từ các điểm hội tụ lệch trục này cho phép chúng ta thiết lập nhiều nguồn phát xạ tạo thành anten thấu kính đa búp sóng hoặc có khả năng điều khiển búp sóng theo điều kiện mong muốn.



(a) Cấu trúc anten thấu kính dạng hyperbol

(b) Vùng hội tụ

Hình 3.2: Cấu trúc và vùng hội tụ của anten thấu kính NRI.

Thấu kính dạng hyperbol có chỉ số khúc xạ âm là thấu kính mỏng có một mặt khúc xạ, có cấu trúc đơn giản với mặt cong phía trong dạng hyperbol và mặt ngoài phẳng, do đó được lựa chọn để tính toán, xác định các điểm hội tụ. Cấu trúc anten thấu kính với nguồn phát xạ được thiết lập tại tiêu điểm của thấu kính, được thể hiện như trong Hình 3.2. Thấu kính có cấu trúc tròn xoay quanh trục Oz .

Trong suốt quá trình hoạt động, tia sóng được bức xạ từ nguồn phát xạ sẽ tới mặt cong phía trong của thấu kính tại một điểm, được thể hiện bởi P_θ , có tọa độ là (z_1, x_1) . Mặt cong hyperbol của thấu kính được xác định bởi phương trình (3.1), trong mặt phẳng xOz . S_1 là mặt cong phía trong, S_2 là mặt phẳng phía sau của thấu kính. Cấu trúc anten thấu kính phù hợp với anten cho trạm gốc trong thông tin di động hoạt động ở tần số 28 GHz [80].

$$x = \sqrt{(n^2 - 1)(z - F)^2 + 2(n - 1)F(z - F)} \quad (3.1)$$

Khoảng cách từ tiêu điểm đến mặt cong phía trong của thấu kính được xác định bởi phương trình (3.2), theo hệ trục tọa độ cực [80].

$$r = \frac{(n-1)F}{n \cos \theta - 1} \quad (3.2)$$

Trong đó, n là chỉ số khúc xạ của môi trường thấu kính; θ là góc từ tiêu điểm tới mặt cong của thấu kính và trục Oz ; θ_m là góc bức xạ cực đại tính từ tiêu điểm đến mép ngoài cùng của thấu kính; r_m khoảng cách từ tiêu điểm tới mép ngoài cùng của thấu kính. Độ dày của thấu kính có chỉ số khúc xạ âm được tính là kích thước lớn nhất của thấu kính theo phương bức xạ và được xác định bởi phương trình (3.3).

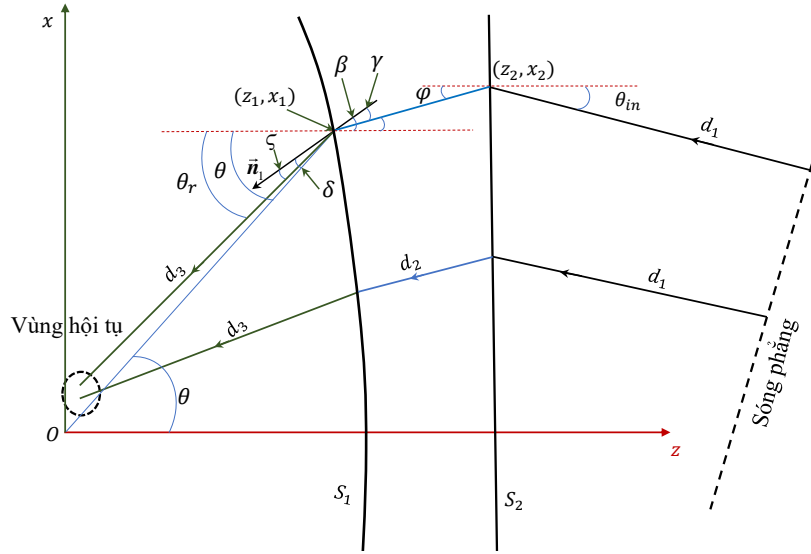
$$T = \left| \frac{1}{n+1} \left[\sqrt{F^2 + \frac{(n+1)D^2}{4(n-1)}} - F \right] \right| \quad (3.3)$$

$$n = \frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} \quad (3.4)$$

Các tia sóng khi đi qua giao diện giữa hai môi trường không gian tự do và môi trường vật liệu có chỉ số khúc xạ âm làm thấu kính đều thỏa mãn điều kiện khúc xạ Snell. Trong đó, θ_i là góc tới và θ_r là góc khúc xạ.

3.1.2. Các bước tính toán vùng hội tụ

Phương pháp ray tracing được tính toán dựa theo mô hình được thể hiện trong Hình 3.3. Theo đó các tia sóng song song từ mặt phẳng sóng sẽ khúc xạ khi qua thấu kính và hội tụ tại một điểm hoặc một vùng. Với cấu trúc thấu kính tròn xoay quanh trục Oz , để đơn giản ta xem xét chùm tia sóng tới song song (sóng phẳng) và nằm trong mặt phẳng xOz . Theo đó từ công thức (3.2), ta có thể xác định được các điểm nằm trên mặt cong phía trong của thấu kính, có tọa độ là $P_\theta(z_1, x_1)$.



Hình 3.3: Xác định vùng hội tụ của thấu kính NRI dạng hyperbol.

$$\begin{aligned} x_1 &= r \sin \theta = \frac{(n-1)F \sin \theta}{n \cos \theta - 1}, \\ z_1 &= r \cos \theta = \frac{(n-1)F \cos \theta}{n \cos \theta - 1}. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Trong đó, góc bức xạ θ từ tiêu điểm dịch chuyển trong khoảng $(-\theta_m; \theta_m)$. \vec{n}_1 là véc-tơ pháp tuyến tại điểm $P_\theta(z_1, x_1)$ trên mặt cong S_1 .

Phương trình đường thẳng của tia sáng tới (d_1) từ mặt phẳng sóng tới mặt phẳng S_2 của thấu kính với góc tới θ_{in} so với trục bức xạ Oz , được cho bởi công thức.

$$d_1 = \tan \theta_{in}(z - z_2) + x_2 \quad (3.6)$$

Áp dụng định luật khúc xạ Snell với môi trường vật liệu có chỉ số khúc xạ âm, các tia sáng tới từ mặt phẳng sóng khi tới mặt phẳng S_2 bị khúc xạ âm trở thành tia sáng d_2 , góc khúc xạ sau mặt phẳng S_2 được cho bởi công thức.

$$\frac{\sin \theta_{in}}{\sin \varphi} = n \quad (3.7)$$

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{\sin \theta_{in}}{n}\right) \quad (3.8)$$

Từ góc khúc xạ φ , ta có thể xác định được phương trình của tia khúc xạ d_2 từ mặt phẳng S_2 tới mặt cong S_1 như sau:

$$d_2 = \tan \varphi (z - z_1) + x_1 \quad (3.9)$$

Từ Hình 3.3 ta có thể thấy rằng, khi \vec{n}_1 là véc-tơ pháp tuyến tại điểm $P_\theta(z_1, x_1)$ trên mặt cong S_1 thì hai góc δ và β lần lượt là góc tới và góc khúc xạ của tia sóng đi từ nguồn phát xạ đặt tại tiêu điểm của thấu kính. Áp dụng định luật Snell có thể xác định được mối liên quan giữa hai góc đó được cho bởi công thức.

$$\frac{\sin \delta}{\sin \beta} = n \quad (3.10)$$

Trong đó, $\delta = \theta - \beta$ với θ là góc tạo bởi tia sóng từ nguồn phát xạ đặt tại tiêu điểm của thấu kính tới điểm $P_\theta(z_1, x_1)$ trên mặt cong S_1 . Từ phương trình (3.10) ta có:

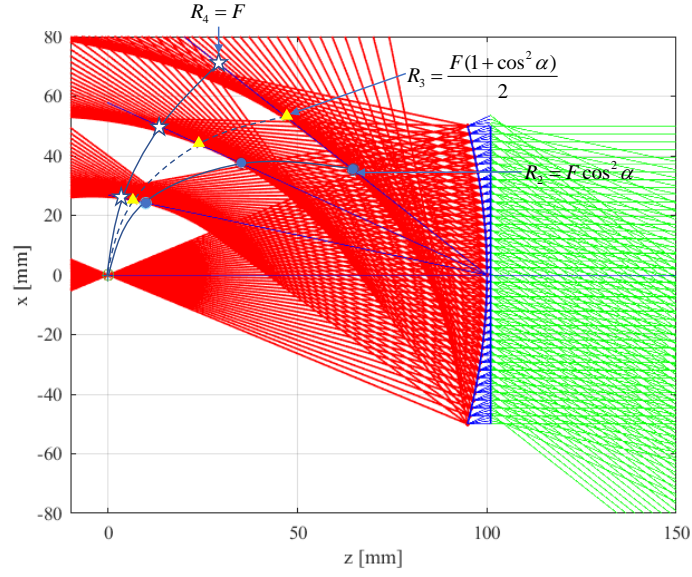
$$\sin(\theta - \beta) = \sin \theta \cos \beta - \cos \theta \sin \beta = n \sin \beta$$

$$\tan \beta = \frac{\sin \theta}{\cos \theta + n}$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{\sin \theta}{\cos \theta + n}\right) \quad (3.11)$$

Kết hợp phương trình (3.8) và phương trình (3.11) ta xác định được góc tới của tia sóng d_2 tại mặt cong S_1 tại điểm $P_\theta(z_1, x_1)$.

$$\gamma = \beta - \varphi \quad (3.12)$$



Hình 3.4: Vùng hội tụ và quỹ đạo được xác định bằng phương pháp ray tracing.

Áp dụng định luật khúc xạ Snell đối với vật liệu có chỉ số khúc xạ âm cho tia sóng d_2 , ta xác định được góc khúc xạ (ς) của tia sóng.

$$\frac{\sin \varsigma}{\sin \gamma} = n \quad (3.13)$$

$$\varsigma = \arcsin(n \sin \gamma) \quad (3.14)$$

Từ phương trình (3.14), góc lệch (θ_r) giữa tia sóng d_3 và trục bức xạ Oz được cho bởi công thức:

$$\theta_r = \theta - (\delta - \varsigma) \quad (3.15)$$

Kết hợp phương trình tọa độ điểm $P_\theta(z_1, x_1)$ và phương trình (3.15) ta xác định được phương trình đường đi của tia sóng d_3 .

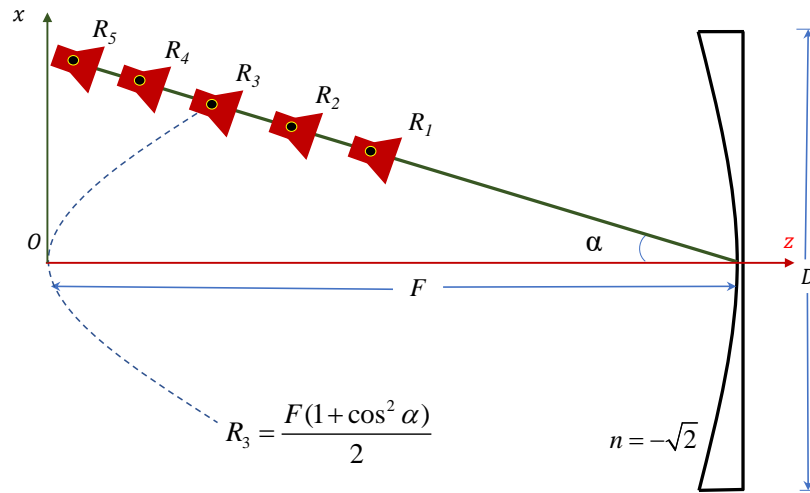
$$d_3 = \tan \theta_r (z - z_1) + x_1 \quad (3.16)$$

Các tia sóng cho bởi phương trình (3.16) – tia sóng đi từ mặt cong S_1 sẽ giao nhau tại một điểm hoặc một vùng giao điểm, được thể hiện trong Hình 3.4. Các điểm hoặc vùng hội tụ này chính là vị trí tốt nhất khi ta thiết lập

nguồn phát xạ để anten thấu kính khi hoạt động ở chế độ phát có thể tạo ra được chùm tia chuẩn trực – chùm tia song song đồng pha với nhau.

Khi thực hiện dịch chuyển góc bức xạ từ mặt phẳng sóng tới mặt ngoài của thấu kính ta sẽ thu được một dãy các điểm hội tụ hoặc các vùng hội tụ. Bằng việc tổng hợp vị trí các giao điểm của các tia sóng dựa vào phương trình đường đi của tia sóng từ mặt cong phía trong của thấu kính đến vùng hội tụ, ta nhận thấy rằng các điểm hội tụ và vùng hội tụ có xu hướng nằm trên một vùng được giới hạn bởi hai đường cong, được cho là hai đường quỹ đạo giới hạn $R_2 = F \cos^2 \alpha$ và $R_4 = F$. Trong đó, α là góc tạo bởi tia từ điểm hội tụ đến đỉnh của thấu kính và trục bức xạ Oz .

3.1.3. Đánh giá đặc tính bức xạ của anten thấu kính khi nguồn phát xạ dịch chuyển trên các quỹ đạo



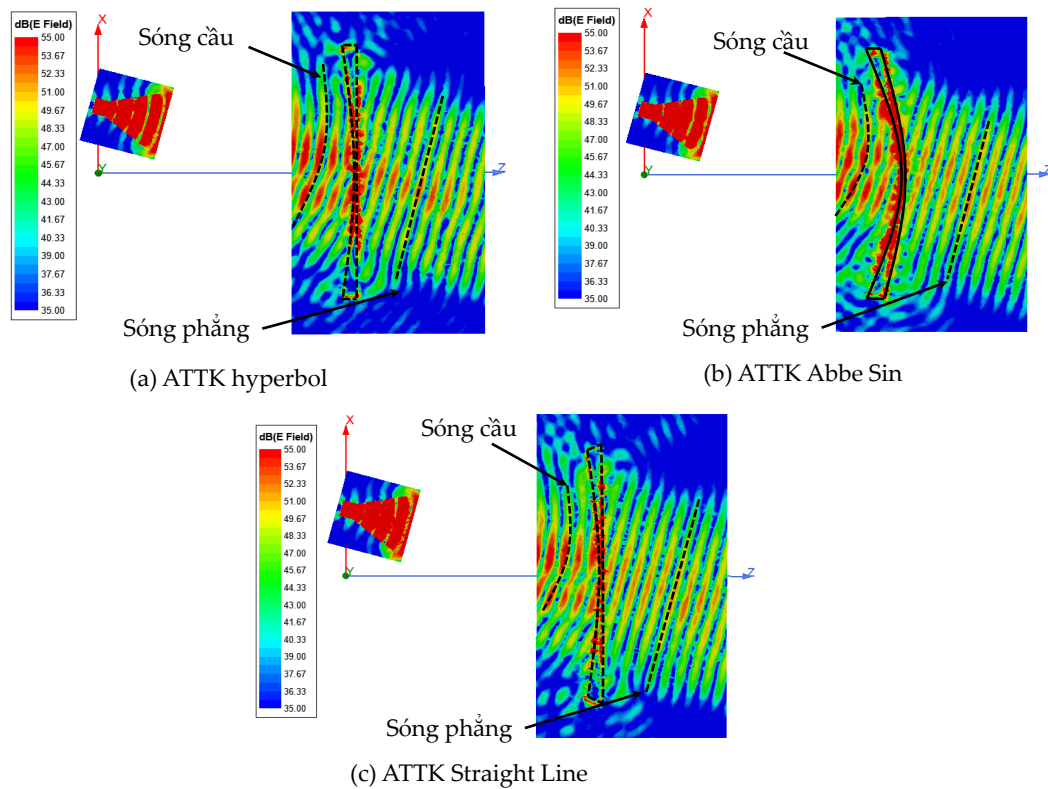
Hình 3.5: Vị trí nguồn phát xạ trên các quỹ đạo.

Từ kết quả của các vùng hội tụ và quỹ đạo của chúng được xác định trong Mục 3.1.2, trong phần này, tác giả thực hiện khảo sát sự ảnh hưởng của vị trí đặt nguồn phát xạ tới các đặc tính của anten thấu kính. Theo đó, nguồn phát xạ được thiết lập dịch chuyển trên các quỹ đạo từ R_1 đến R_5 với góc

bức xạ (α) không đổi, được thể hiện như trong Hình 3.5. Các quỹ đạo được cho bởi các công thức sau: $R_1 = F \cos^2 \alpha - \frac{\lambda}{2}$; $R_2 = F \cos^2 \alpha$; $R_3 = \frac{F(1+\cos^2 \alpha)}{2}$ là đường trung bình của quỹ đạo R_2 và R_4 ; $R_4 = F$ và $R_5 = F + \frac{\lambda}{2}$. Trong đó, α là góc tạo bởi tia bức xạ từ điểm hội tụ tới đỉnh của thấu kính và trục bức xạ Oz . F là khoảng cách từ tiêu điểm tới đỉnh của thấu kính. λ là bước sóng hoạt động của anten thấu kính trong môi trường không gian tự do.

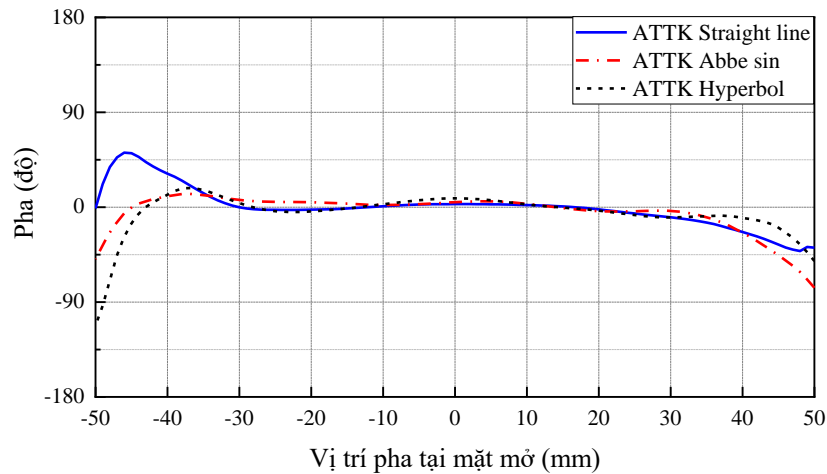
Bằng việc sử dụng phần mềm Ansys HFSS để mô hình hóa và mô phỏng ba cấu trúc anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm (NRI) dạng hyperbol, anten thấu kính NRI với điều kiện Abbe sin và cấu trúc anten thấu kính NRI với điều kiện Straight line đề xuất trong môi trường giả lập trường điện từ. Các kết quả tính toán và phân tích được trình bày cụ thể như sau:

a) Phân bố biên độ điện trường và pha của anten thấu kính



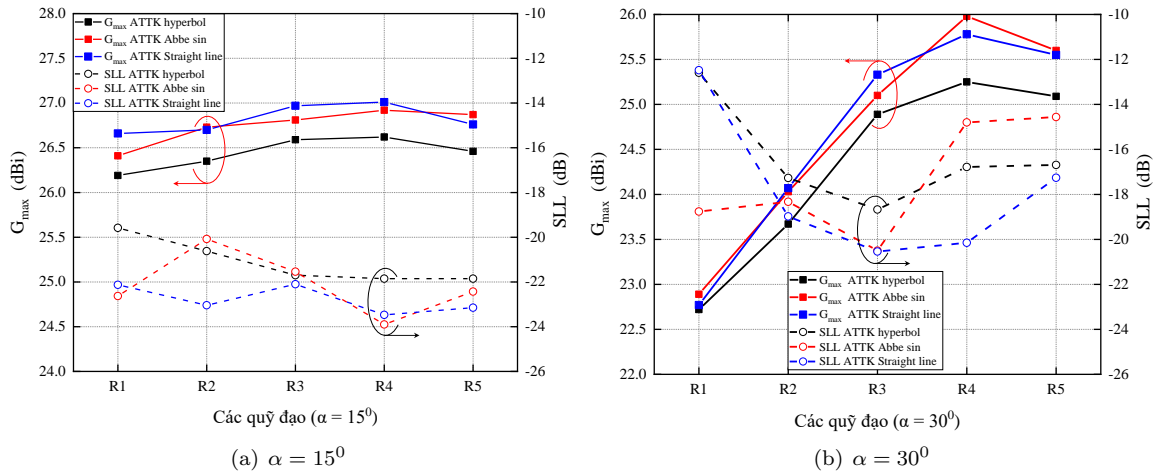
Hình 3.6: Phân bố trường trong mặt phẳng xOz tại góc $\alpha = 15^\circ$ trên quỹ đạo R_4 .

Phân bố biên độ trường điện từ trong mặt phẳng xOz khi nguồn phát xạ thiết lập ở góc $\alpha = 15^\circ$ trên quỹ đạo R_4 được thể hiện như trong Hình 3.6. Ta có thể thấy rằng đối với cả ba cấu trúc anten thấu kính, khi thiết lập nguồn phát xạ trên quỹ đạo xác định, sóng tới từ anten nguồn phát xạ có dạng sóng cầu khi đi qua thấu kính đều chuyển thành dạng sóng phẳng.



Hình 3.7: Phân bố pha tại mặt mở của anten thấu kính NRI tại góc $\alpha = 15^\circ$ trên quỹ đạo R_4 .

Xem xét sự phân bố pha trên mặt mở của anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với $\alpha = 15^\circ$ trên quỹ đạo R_4 , như trong Hình 3.7, ta nhận thấy rằng phân bố pha trong khoảng bức xạ cực đại gần tâm của thấu kính là tương đối phẳng. Điều này cho thấy rằng, khi thiết lập nguồn phát xạ trên vùng hội tụ và quỹ đạo được xác định bằng phương pháp ray tracing trong Mục 3.1.2 cho kết quả phân bố điện trường và pha chính xác. Sự sai pha xảy ra nhiều ở mép của thấu kính do khi thiết lập nguồn phát xạ lệch trục, góc bức xạ thay đổi, mức năng lượng của nguồn phát xạ không tập trung đồng đều vào bề mặt thấu kính đặc biệt tại mép của thấu kính. Ngoài ra, sự không đồng đều của phân bố pha còn do sự ảnh hưởng của hiện tượng phản xạ sóng xảy ra ở trên bề mặt của thấu kính.



Hình 3.8: Sự thay đổi của G_{max} và SLL khi dịch chuyển vị trí của nguồn phát xạ với $\alpha = 15^0$ và $\alpha = 30^0$.

b) Đánh giá khả năng bức xạ của Anten thấu kính NRI khi thiết lập nguồn phát xạ lệch trục

Hình 3.8 thể hiện sự thay đổi các giá trị hệ số tăng ích cực đại và biên độ cánh sóng bên khi thay đổi vị trí nguồn phát xạ theo các quỹ đạo từ R_1 đến R_5 , với góc $\alpha = 15^0$ hoặc $\alpha = 30^0$. Kết quả cho thấy rằng, khi $\alpha = 15^0$, như trong Hình 3.8a, hệ số tăng ích cực đại của Anten thấu kính với điều kiện Abbe sin và điều kiện Straight line đều xuất hiện luôn cao hơn so với cấu trúc Anten thấu kính dạng hyperbol. Hệ số tăng ích đạt giá trị lớn nhất bằng 27,01 dBi khi nguồn phát xạ được thiết lập tại quỹ đạo R_4 của Anten thấu kính NRI với điều kiện Straight line. Trong khi, giá trị này lần lượt chỉ là 26,62 dBi và 26,92 dBi với Anten thấu kính dạng hyperbol và điều kiện Abbe sin. Biên độ cánh sóng bên của Anten thấu kính với điều kiện Straight line luôn duy trì ở mức thấp hơn -22,10 dB khi dịch chuyển nguồn phát xạ dọc theo hướng bức xạ trên các quỹ đạo khác nhau. Ở trên quỹ đạo R_4 , Anten thấu kính với cấu trúc đề xuất có biên độ cánh sóng bên là -23,47 dB, giá trị này thấp hơn 1,62 dB so với Anten thấu kính dạng hyperbol.

Khi thiết lập nguồn phát xạ lệch so với trục bức xạ Oz một góc $\alpha = 30^0$ với các quỹ đạo thay đổi từ R_1 đến R_5 thì giá trị hệ số tăng ích cực đại và biên độ cánh sóng bên thay đổi, được thể hiện như trong Hình 3.8b. Theo đó, anten thấu kính NRI với điều kiện Abbe sin có hệ số tăng ích đạt giá trị cực đại bằng 25,98 dBi khi nguồn phát xạ nằm trên quỹ đạo R_4 . Tuy nhiên, biên độ cánh sóng bên khá cao là -14,80 dB. Trong khi đó, cùng trên quỹ đạo này, anten thấu kính NRI với cấu trúc đề xuất (Straight line) có hệ số tăng ích cực đại là 25,78 dBi nhưng có biên độ cánh sóng bên thấp hơn -20,15 dBi. Bên cạnh đó, khi thiết lập nguồn phát xạ trên quỹ đạo R_3 , anten thấu kính NRI với điều kiện Straight line có hệ số tăng ích cực đại cao hơn và biên độ cánh sóng bên thấp hơn so với hai loại anten thấu kính NRI còn lại. Các kết quả cụ thể được trình bày trong Bảng 3.1.

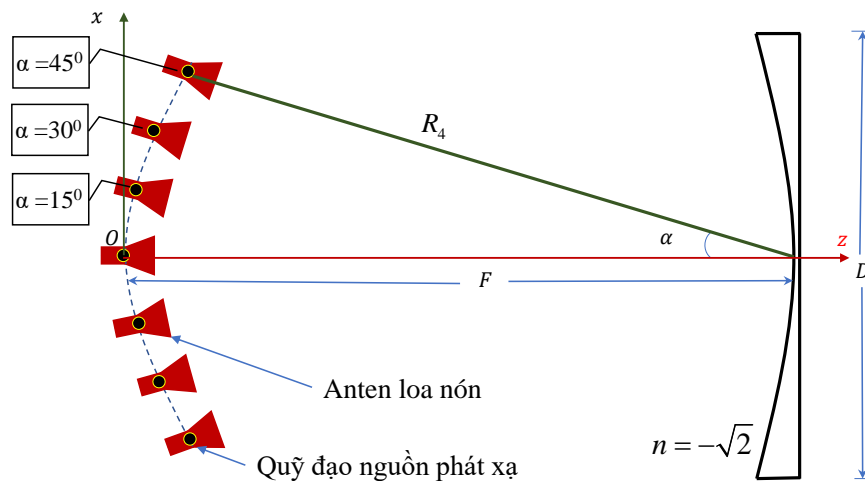
Từ kết quả tính toán và khảo sát khi dịch chuyển nguồn phát xạ trên các quỹ đạo từ R_1 đến R_5 ta có thể xem xét, lựa chọn được vị trí thiết lập của nguồn phát xạ và quỹ đạo của chúng sao cho phù hợp để anten thấu kính có thể đạt được các đặc tính bức xạ tối ưu.

3.2. Nghiên cứu thiết kế anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm tạo đa búp sóng

3.2.1. Cấu trúc anten thấu kính NRI tạo đa búp sóng

Từ việc sử dụng phương pháp ray tracing để xác định vùng hội tụ và việc đánh giá các kết quả mô phỏng khi thiết lập nguồn phát xạ trên các vùng hội tụ và quỹ đạo của chúng. Ta nhận thấy rằng, khi thiết lập nguồn phát xạ trên quỹ đạo R_4 anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm đạt được giá trị hệ số tăng ích cực đại cao, biên độ cánh sóng bên thấp hơn so với khi thiết lập nguồn

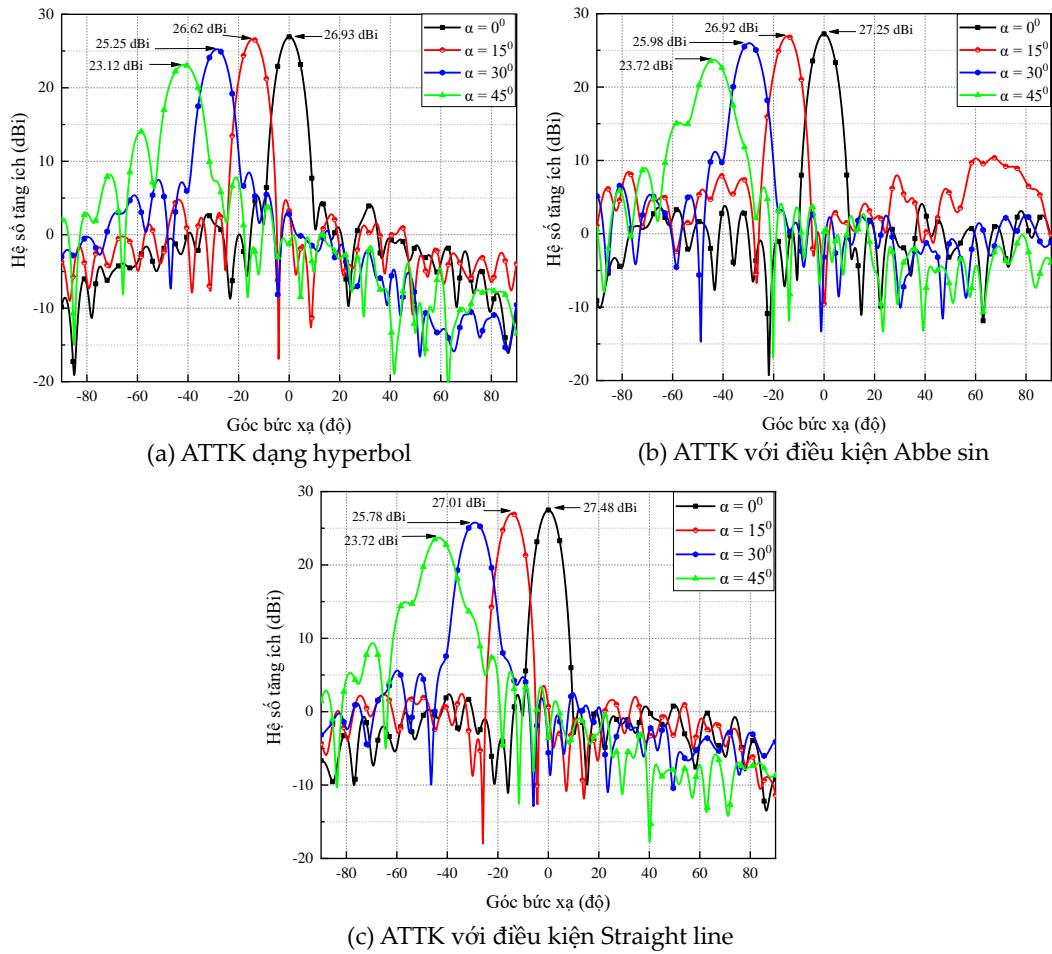
phát xạ trên các quỹ đạo khác. Bên cạnh đó, quỹ đạo R_4 là một cung tròn với bán kính $R = F$ không đổi, cho nên việc thiết lập nguồn phát xạ trên quỹ đạo này đơn giản hơn. Do đó, trong phần này của luận án, tác giả lựa chọn thiết lập nguồn phát xạ trên quỹ đạo R_4 để khảo sát. Các nguồn phát xạ được thiết kế với góc α thay đổi từ 0° đến 45° với bước nhảy $\alpha = 15^\circ$, được thể hiện như trong Hình 3.9. Với việc thiết lập nguồn phát xạ như trên, cho phép các nguồn phát xạ không bị chồng chéo lên nhau, đồng thời có thể đánh giá được khả năng tạo được đa búp sóng hoặc quét búp sóng góc rộng của anten thấu kính dễ dàng hơn.



Hình 3.9: Cấu trúc anten thấu kính tạo đa búp sóng với nguồn phát xạ được thiết lập trên quỹ đạo R_4 .

3.2.2. Mô phỏng đánh giá kết quả

Ba mô hình cấu trúc anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm dạng hyperbol, điều kiện Abbe sin và cấu trúc anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện Straight line đề xuất được mô hình hóa và mô phỏng dựa trên phần mềm tính toán trường điện từ Ansys HFSS, với các nguồn phát xạ được thiết lập trên quỹ đạo R_4 . Các kết quả mô phỏng được phân tích và đánh giá cụ thể như sau:



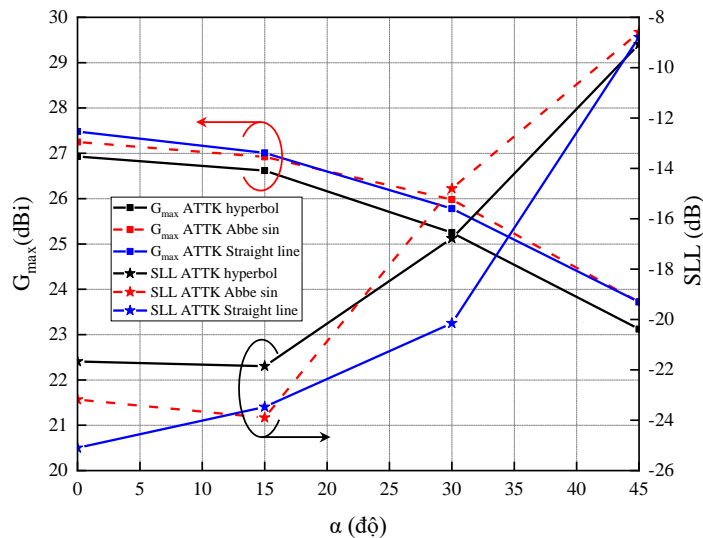
Hình 3.10: Cấu trúc anten thấu kính tạo đa búp sóng với nguồn phát xạ được thiết lập trên quỹ đạo R_4 .

a) Giảm độ bức xạ của các anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm

Giảm độ bức xạ của ba dạng anten thấu kính NRI có các góc bức xạ thay đổi từ 0^0 đến 45^0 được trình bày như trong Hình 3.10. Chúng ta có thể dễ dàng nhận thấy rằng, khi thiết lập nguồn phát xạ trên cùng một quỹ đạo nhất định (R_4) với các góc bức xạ thay đổi khác nhau, thì hệ số tăng ích cực đại của anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện Straight line đề xuất luôn cao hơn so với cấu trúc anten thấu kính dạng hyperbol và tương đồng với giá trị hệ số tăng ích cực đại của anten thấu kính với điều kiện Abbe sin, giá trị này giảm dần khi góc bức xạ (α) tăng dần. Cụ thể, khi thiết lập

nguồn phát xạ tại tiêu điểm của thấu kính, anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện đề xuất đạt giá trị hệ số tăng ích cực đại bằng 27,48 dBi, trong khi hai cấu trúc anten thấu kính NRI với điều kiện Abbe sin và dạng hyperbol chỉ đạt giá trị lần lượt là 27,25 dBi và 26,93 dBi.

Khi thiết lập nguồn phát xạ ở góc 45^0 so với trục bức xạ Oz , anten thấu kính NRI với điều kiện Straight line có hệ số tăng ích cực đại cao hơn cấu trúc anten thấu kính dạng hyperbol là 0,6 dB và bằng với giá trị của anten thấu kính với điều kiện Abbe sin và góc quét búp sóng lên tới $48,84^0$. Điều này khẳng định khả năng bức xạ của anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện đề xuất khi nguồn phát xạ đặt lệch trục, lệch tiêu điểm trên quỹ một quỹ đạo xác định. Kết quả được trình bày cụ thể trong Bảng 3.2.



Hình 3.11: Hệ số tăng ích cực đại và biên độ cánh sóng bên khi α thay đổi.

b) So sánh hệ số tăng ích cực đại và biên độ cánh sóng bên

Sự thay đổi giá trị của biên độ cánh sóng bên và hệ số tăng ích cực đại được thể hiện như trong Hình 3.11. Theo đó, biên độ cánh sóng bên của anten thấu kính NRI với điều kiện đề xuất duy trì ở mức thấp hơn so với hai loại anten thấu kính NRI dạng hyperbol và điều kiện Abbe sin khi nguồn phát

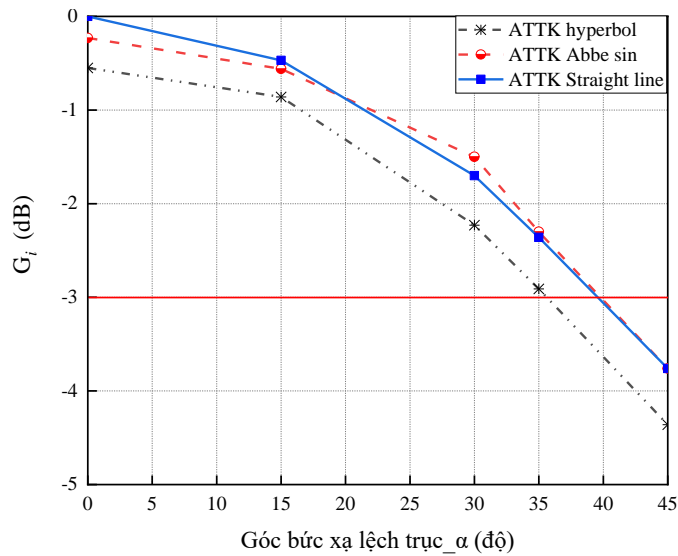
xạ thiết lập tại các góc $\alpha = 0^0$ và $\alpha = 30^0$, lần lượt là: -25,10 dB và -20,15 dB. Tuy nhiên, ở góc $\alpha = 15^0$, biên độ cánh sóng bên của anten thấu kính với điều kiện Abbe sin đạt giá trị -23,90 dB thấp hơn so với anten thấu kính dạng NRI với điều kiện Straight line đề xuất là -23,47 dB.

Sự suy giảm hệ số tăng ích cực đại và sự tăng lên của biên độ cánh sóng bên khi góc bức xạ α tăng lên (tức là nguồn phát xạ lệch so với tiêu điểm và trục bức xạ nhiều hơn). Điều này là do khi thiết lập nguồn phát xạ lệch trục, năng lượng của nguồn phát xạ không còn được tập trung nhiều và đồng đều vào thấu kính do đó một phần năng lượng của nguồn phát xạ bị tràn ra bên ngoài mép của thấu kính dẫn tới hệ số tăng ích của anten thấu kính giảm và biên độ cánh sóng bên tăng. Ngoài ra, sự khác nhau về hệ số tăng ích cực đại và biên độ cánh sóng bên của các loại anten thấu kính NRI ở các góc bức xạ có sự khác nhau là do sự khác biệt về cấu trúc bề mặt cong của mỗi loại thấu kính, dẫn tới sự phản xạ sóng tại bề mặt của thấu kính làm ảnh hưởng tới khả năng bức xạ của nguồn phát xạ và anten thấu kính.

c) Mức suy giảm hệ số tăng ích cực đại

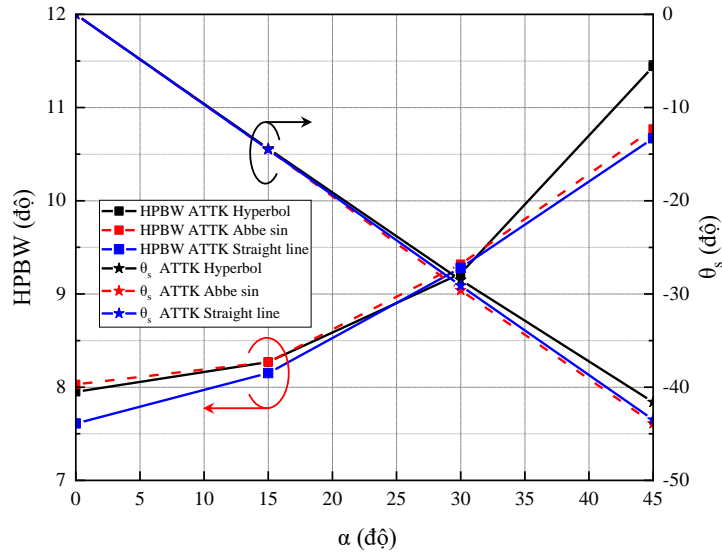
Để đánh giá anten có khả năng tạo đa búp sóng hoặc quét búp sóng góc rộng, ngoài tham số số lượng búp sóng được tạo ra thì mức suy giảm hệ số tăng ích cực đại (G_i) của các búp sóng khi thiết lập nguồn phát xạ lệch trục cũng là một tiêu chí đánh giá quan trọng. Mức suy giảm hệ số tăng ích cực đại được xác định dựa vào sự thay đổi hệ số tăng ích cực đại của anten thấu kính khi thiết lập nguồn phát xạ tại điểm hội tụ lệch trục, lệch tiêu điểm ($\alpha \neq 0^0$) so với hệ số tăng ích cực đại khi thiết lập nguồn tại tiêu điểm của thấu kính ($\alpha = 0^0$). Điều này có nghĩa là, khi nguồn phát xạ dịch chuyển càng xa tiêu điểm và trục bức xạ (α càng lớn) thì mức suy giảm này càng

tăng. Anten đa búp sóng và quét búp sóng góc rộng là anten tạo được nhiều búp sóng trong một vùng, một góc nhất định mà vẫn duy trì được mức suy giảm hệ số tăng ích cực đại $G_i < 3$ dB. Theo đó, anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm được đề xuất trong luận án có góc quét búp sóng rộng hơn 30° . Cụ thể là, ở góc $\alpha = 35^\circ$, anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện đề xuất đạt hệ số tăng ích cực đại bằng 25,12 dBi, giá trị này cao hơn so với anten thấu kính dạng hyperbol là 0,55 dB và xấp xỉ bằng giá trị hệ số tăng ích cực đại của anten thấu kính NRI với điều kiện Abbe sin là 25,18 dBi mà vẫn giữ được mức suy giảm hệ số tăng ích cực đại nhỏ hơn 3 dB, (2,36 dB), được thể hiện như trong Hình 3.12.



Hình 3.12: Mức suy giảm hệ số tăng ích cực đại (G_i).

Khi so sánh với các loại anten có góc quét búp sóng rộng được trình bày trong các nghiên cứu [22, 36, 60, 72], thì mức suy giảm hệ số tăng ích cực đại của cấu trúc anten thấu kính đề xuất luôn nhỏ hơn. Cụ thể, ở các góc 25° trong nghiên cứu [22] có mức suy giảm hệ số tăng ích cực đại là 2,4 dB và ở góc bức xạ 30° trong các nghiên cứu [36, 60, 72] mức suy giảm này của các anten thấu kính lần lượt là 2,5 dB, 4,2 dB và 4,1 dB. Trong khi đó, đối với



Hình 3.13: Độ lệch góc bức xạ và HPBW khi α thay đổi.

anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện Straight line đề xuất thì mức suy giảm này chỉ là 1,7 dB. Điều này khẳng định khả năng quét búp sóng góc rộng và tạo đa búp sóng của cấu trúc anten thấu kính với điều kiện Straight line đề xuất. Kết quả được trình bày cụ thể trong Bảng 3.3.

d) Sự thay đổi HPBW và độ lệch góc bức xạ

Hình 3.13 thể hiện sự thay đổi về giá trị của độ rộng cánh sóng chính theo mức nửa công suất và độ lệch góc tới so với góc bức xạ của tia sóng đi ra từ mặt mở của ba loại anten thấu kính trên quỹ đạo R_4 . Chúng ta có thể thấy rằng, độ rộng cánh sóng chính theo mức nửa công suất của anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm luôn duy trì trong khoảng từ $7,61^0 - 11,44^0$, điều này thể hiện rằng anten thấu kính NRI có búp sóng hẹp ngay cả khi nguồn phát xạ lệch trục. Tuy nhiên, độ lệch góc bức xạ (θ_s) của anten thấu kính với điều kiện Straight line lệch nhiều hơn so với anten thấu kính với điều kiện Abbe sin. Cụ thể, khi thiết lập nguồn phát xạ ở các góc $\alpha = 30^0$ và $\alpha = 45^0$ thì anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện đề xuất có góc bức xạ lệch lần lượt là $0,9^0$ và $1,5^0$. Trong khi đó, anten thấu kính có chỉ số khúc

xạ âm với điều kiện Abbe sin chỉ lệch lần lượt là $0,4^0$ và $1,1^0$.

Bảng 3.3 trình bày tổng hợp các kết quả nghiên cứu của các công trình đã công bố và so sánh với kết quả nghiên cứu được đề xuất mới trong luận án. Từ các kết quả trong bảng tổng hợp ta nhận thấy rằng, anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện Straight line đề xuất có độ dày thấu kính chỉ đạt 6.1 mm ở mép và 1mm ở tâm thấu kính, mỏng hơn so với các dạng thấu kính khác trong các công trình đã được công bố. Biên độ cánh sóng bên của anten thấu kính có cấu trúc đề xuất khi thiết lập nguồn phát xạ tại tiêu điểm ($\alpha = 0^0$) và lệch trục ($\alpha = 30^0$) thấp hơn so với anten thấu kính có chỉ số khúc xạ dương theo điều kiện Straight line trong nghiên cứu [19]. Tuy nhiên, hệ số tăng ích cực đại và độ suy giảm hệ số tăng ích cực đại của anten thấu kính trong nghiên cứu [19] cao hơn so với cấu trúc đề xuất.

Ngoài ra, khi so sánh về độ lệch góc bức xạ bằng việc sử dụng thấu kính có chỉ số khúc xạ âm, khi thiết lập nguồn phát xạ lệch trục thì độ lệch góc bức xạ xảy ra ít hơn so với anten thấu kính có chỉ số khúc xạ dương. Cụ thể, ở góc bức xạ $\alpha = 30^0$, độ lệch góc bức xạ của anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện Abbe sin và anten thấu kính với điều kiện đề xuất lần lượt là $0,4^0$ và $0,9^0$. Trong khi đó, các anten thấu kính có chỉ số khúc xạ dương với điều kiện Abbe sin và Straight line trong nghiên cứu [19], có sự sai lệch góc bức xạ lớn hơn, với giá trị lần lượt là $3,3^0$ và $4,2^0$.

Từ các kết quả được nghiên cứu trong luận án kết hợp với việc so sánh với các công trình nghiên cứu đã được công bố, chúng ta có thể thấy sự hiệu quả của anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện Straight line đề xuất trong việc tạo đa búp sóng và quét búp sóng góc rộng định hướng ứng dụng cho anten tại trạm gốc trong hệ thống thông tin di động băng tần 28 GHz.

Bảng 3.1: Tổng hợp kết quả khi dịch chuyển nguồn phát xạ từ R_1 đến R_5 .

Dạng Anten và tham số bức xạ	$\alpha = 15^0$					$\alpha = 30^0$				
	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5
ATTK Hyperbol	G_{\max} [dBi]	26,19	26,35	26,59	26,62	26,46	22,72	23,67	24,89	25,09
	SLL [dB]	-19,58	-20,62	-21,70	-21,85	-21,85	-12,59	-17,27	-18,67	-16,69
ATTK Abbe sin	G_{\max} [dBi]	26,41	26,73	26,81	26,92	26,87	22,89	24,03	25,10	25,60
	SLL [dB]	-22,63	-20,08	-21,54	-23,90	-22,43	-18,76	-18,33	-20,50	-14,56
ATTK Straight line	G_{\max} [dBi]	26,66	26,70	26,97	27,01	26,76	22,77	24,07	25,33	25,55
	SLL [dB]	-22,13	-23,04	-22,10	-23,47	-23,15	-12,48	-18,98	-20,54	-17,26

Bảng 3.2: Bảng tổng hợp kết quả của anten thấu kính khi góc bức xạ (α) thay đổi trên quỹ đạo R_4 .

Góc bức xạ α	ATTK Hyperbol			ATTK Abbe Sin			ATTK Straight line		
	G_{\max} [dBi]	SLL [dB]	θ_B [độ]	G_{\max} [dBi]	SLL [dB]	θ_B [độ]	G_{\max} [dBi]	SLL [dB]	θ_B [độ]
0^0	26,93	-21,67	7,95	27,25	-23,18	8,03	27,48	-25,10	7,61
15^0	26,62	-21,85	8,27	26,92	-23,90	8,27	27,01	-23,47	8,15
30^0	25,25	-16,78	9,22	25,98	-14,8	9,32	25,78	-20,15	9,28
35^0	24,57	-12,66	9,38	25,18	-12,59	9,88	25,12	-18,64	10,04
45^0	23,12	-9,07	11,44	23,72	-8,59	10,77	23,72	-8,79	10,67

Bảng 3.3: Bảng tổng hợp so sánh các kết quả nghiên cứu.

TLLK	Cấu trúc thấu kính	Tần số [GHz]	Chỉ số khúc xạ (n)	$\alpha = 0^\circ$		$\alpha = 30^\circ$		G_i [dB]	T [mm]	Số búp sóng	Góc quét búp sóng
				G_{max} [dBi]	SLL [dB]	G_{max} [dBi]	SLL [dB]				
[72]	Abbe sin	60	$\sqrt{2,74}$	35,70	-21,56	31,60	-18,83	4,10	39	4	30°
[19]	Abbe sin	28	$\sqrt{4}$	27,77	-24,57	26,92	-18,86	0,85	14,8	5	50°
	Straight line			27,69	-24,5	26,41	-18,27	1,28	13,83		
[49]	BTNL	28	$\sqrt{2,2}$	27,55	-20,82	26,65	-18,06	0,90	17,00	5	$\pm 30^\circ$
	Luneburg+ATSL			21,24	-18,59	20,99	-15,00	0,25	87,50		
[60]	Luneburg	26	2,5; 2,35;	22,20	-14,77	18,00	-8,00	4,20	25,00	4	30°
		28	1,95; 1,6	21,60							
[69]	Rotman	28,5		18,50	-11,84	17,00	-11,32	1,50	10,00	7	$\pm 45^\circ$
[71]	Rotman	28		16,60		17,20		-0,60		7	$\pm 45^\circ$
[36]	Abbe sin	11	-1	7,60	-17,5	5,10	-5,20	2,50	39,00	3	30°
LA	Abbe sin	28	$-\sqrt{2}$	27,25	-23,18	25,98	-14,80	1,27	6,10	4	45°
	Hyperbol			26,93	-21,67	25,25	-16,78	1,68			
	Straight line			27,48	-25,10	25,78	-20,15	1,70			

3.3. Kết luận chương 3

Chương 3 của luận án thực hiện nghiên cứu giải pháp tính toán, xác định vùng hội tụ và quỹ đạo các vùng hội tụ của thấu kính có chỉ số khúc xạ âm bằng phương pháp ray tracing. Đề xuất giải pháp thiết kế anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện Straight line có khả năng tạo được đa búp sóng dựa trên việc thiết lập các nguồn phát xạ trên các vùng hội tụ và quỹ đạo đã xác định. Kết quả cho thấy anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với cấu trúc đề xuất có hệ số tăng ích cao, biên độ cánh sóng bên thấp và có khả năng tạo đa búp sóng và quét búp sóng góc rộng trong khoảng $\pm 48,84^\circ$. Các kết quả nghiên cứu của chương này được thể hiện trong các công trình nghiên cứu **J2**, **C3** và **C5**.

KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG NGHIÊN CỨU

Luận án đã trình bày kết quả nghiên cứu, tìm hiểu tổng quan về anten cho trạm gốc trong thông tin di động 5G, vị trí, vai trò của anten tạo đa búp sóng và quét búp sóng góc rộng. Trên cơ sở phân tích, đánh giá các nghiên cứu về anten cho trạm gốc nói chung và anten thấu kính cho thông tin di động 5G băng tần 28 GHz nói riêng, luận án đã đề xuất một số giải pháp tính toán, phát triển anten thấu kính mới cho trạm gốc. Các đề xuất mới đó là: Đề xuất giải pháp tính toán, xác định cấu trúc anten thấu kính theo điều kiện Straight line có chỉ số khúc xạ âm hoạt động ở băng tần 28 GHz. Đề xuất giải pháp thiết kế anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm tạo đa búp sóng dựa trên phương pháp ray tracing, định hướng ứng dụng cho trạm gốc trong thông tin di động băng tần 28 GHz. Các đề xuất được tính toán dựa trên phần mềm MATLAB và được mô hình hóa, mô phỏng bằng phần mềm tính toán trường điện từ Ansys HFSS. Tóm tắt những đóng góp của luận án được trình bày cụ thể dưới đây.

A. NHỮNG ĐÓNG GÓP CỦA LUẬN ÁN

Việc nghiên cứu, đề xuất các giải pháp thiết kế anten luôn là vấn đề được nhiều nhà khoa học quan tâm. Trong luận án này, tác giả đã nghiên cứu đề xuất các giải pháp phát triển anten thấu kính định hướng ứng dụng cho trạm gốc trong thông tin di động 5G băng tần 28 GHz và có một số đóng góp quan trọng như sau:

1. Đề xuất giải pháp tính toán, xác định cấu trúc anten thấu kính theo điều kiện Straight line có chỉ số khúc xạ âm hoạt động ở băng tần 28 GHz. Sự hiệu quả của việc sử dụng thấu kính có chỉ số khúc xạ âm cho phép

anten thấu kính tiêu hình hóa được kích thước của thấu kính có chỉ số khúc xạ âm so với thấu kính có chỉ số khúc xạ dương, độ dày của thấu kính với điều kiện Abbe sin và dạng hyperbol giảm từ 28,66 mm và 24,51 mm xuống chỉ còn 6,1 mm tại mép và 1 mm tại tâm đối với thấu kính có chỉ số khúc xạ âm. Tính toán, xác định cấu trúc anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện Straight line giúp cho anten thấu kính có hệ số tăng ích cực đại đạt giá trị 27,48 dBi; biên độ cánh sóng bên thấp ở mức -25,10 dB, đặc tính bức xạ tốt hơn so với anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với cấu trúc thông thường. Các giải pháp đề xuất đã được kiểm chứng thông qua tính toán trên phần mềm MATLAB và mô hình hóa, mô phỏng bằng phần mềm Ansys HFSS. Đóng góp này được công bố trong các công trình khoa học: 05 bài báo đăng trên tạp chí, hội nghị khoa học uy tín: **J1**, **J2**, **C1**, **C2** và **C4** (trong đó có hai bài đăng trên tạp chí quốc tế thuộc danh mục SCIE và ba bài báo trong kỷ yếu hội nghị quốc tế có phản biện).

2. Đề xuất giải pháp thiết kế anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm tạo đa búp sóng dựa trên phương pháp ray tracing, định hướng ứng dụng cho trạm gốc trong thông tin di động băng tần 28 GHz. Bằng việc sử dụng phương pháp ray tracing, tác giả đã thực hiện nghiên cứu, tính toán và xác định được các vùng hội tụ và quỹ đạo của chúng cho anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm. Đề xuất giải pháp thiết kế anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện Straight line tạo được đa búp sóng, với góc quét búp sóng rộng dựa trên việc thiết lập nguồn phát xạ trên các vùng hội tụ và quỹ đạo đã xác định. Kết quả cho thấy, anten thấu kính với

cấu trúc đề xuất có khả năng tạo được nhiều búp sóng với góc quét góc rộng trong khoảng $\pm 48,84^{\circ}$ mà vẫn duy trì được độ tăng ích cực đại cao hơn 23,72 dBi và mức suy giảm khả năng bức xạ của anten thấu kính với cấu trúc đề xuất xảy ra ít hơn so với các cấu trúc khác khi thiết lập nguồn phát xạ lệch trục. Giải pháp đề xuất này được kiểm chứng thông qua tính toán trên phần mềm MATLAB và mô phỏng bằng phần mềm Ansys HFSS. Đóng góp này được công bố trong các công trình khoa học, **J2**, **C3** và **C5**: Một bài đăng trên tạp chí quốc tế thuộc danh mục SCIE, một bài báo đăng trong kỷ yếu hội nghị quốc tế có phản biện và một bài báo đăng trong kỷ yếu hội nghị khoa học quốc gia có phản biện.

B. HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

Trên cơ sở các công trình nghiên cứu, để hoàn thiện hơn nữa hướng nghiên cứu này cần phải tiếp tục nghiên cứu các vấn đề có liên quan và phát triển một số đề xuất mới. Nội dung cụ thể cần tiếp tục mở rộng nghiên cứu gồm:

1. Nghiên cứu, đề xuất giải pháp thiết kế anten thấu kính NRI có tỷ số F/D nhỏ và có nguồn phát xạ tích hợp, nhằm cải thiện được kích thước của anten thấu kính cho trạm gốc trong thông tin di động.
2. Nghiên cứu, đề xuất giải pháp thiết kế cấu trúc thấu kính có dạng đặc biệt, kích thước nhỏ ứng dụng cho các trạm gốc trong không gian hẹp.
3. Nghiên cứu, đề xuất phương pháp thiết kế thấu kính siêu vật liệu dạng mảng truyền dẫn cong với các phần tử đơn vị cùng kích thước.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

A. Các công trình sử dụng trong luận án

- J1. P.V. Hung, Q. D. Nguyen, Y. Yamada, N. Michishita, M. Islam,** "Parametric Analysis of Negative and Positive Refractive Index Lens Antenna by ANSYS HFSS," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2020, pp. 1–11, Nov. 2020, doi: 10.1155/2020/9128921. (**SCIE, Q3**)
- J2. Hung, Phan Van,** Nguyen Quoc Dinh, and Yoshihide Yamada. "Negative refractive index-shaped lens antenna with straight line condition for wide angle beam scanning." *Journal of Electromagnetic Waves and Applications* 36, no. 6 (2022): 856-874. (**SCIE, Q3**)
- C1. H. P. Van,** Quoc, Dinh Nguyen, Nguyen Tran Viet Duc, Yoshihide Yamada, Naobumi Michishita, and Mohammad Tariqul Islam. "Electromagnetic simulation method of a negative refractive index lens antenna." In *2019 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*, pp. 109-112. IEEE, 2019. (**Scopus Index**)
- C2. Hung, Phan Van,** Nguyen Quoc Dinh, Hoang Dinh Thuyen, Nguyen Tuan Hung, Le Minh Thuy, Le Trong Trung, and Yoshihide Yamada. "Estimations of matching layers effects on lens antenna characteristics." In *International Conference on Industrial Networks and Intelligent Systems*, pp. 85-94. Springer, Cham, 2020. (**Scopus Index**)
- C3. Van Hung, Phan,** Nguyen Quoc Dinh, Dang Tien Dung, and Yoshihide

Yamada. "Caustics and beam steering calculations of negative refractive index lens antenna by the ray tracing method." In *2020 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*, pp. 136-139. IEEE, 2020. **(Scopus Index)**

C4. Van Hung, Phan, and Nguyen Quoc Dinh. "Investigation on Radiation Characteristics of Dielectric Lens Antennas at Millimeter-Wave." In *2021 8th NAFOSTED Conference on Information and Computer Science (NICS)*, pp. 317-322. IEEE, 2021. **(Scopus Index)**

C5. Phan Văn Hưng, Lê Văn Ngọc, Nguyễn Kiếm Minh Trung, Nguyễn Quốc Định, Hoàng Đình Thuyên. "Đánh giá khả năng quét búp sóng góc rộng của anten thấu kính dạng Hyperbol". *Kỷ yếu Hội nghị quốc gia lần thứ 23 về điện tử, truyền thông và công nghệ thông tin, REV-ECIT 2020*.

B. Các công trình liên quan đến luận án

J3. Hamid, Salbiah Ab, Nurul Huda Abd Rahman, Yoshihide Yamada, **Phan Van Hung,** and Dinh Nguyen Quoc. "Multibeam characteristics of a negative refractive index shaped lens." *Sensors 20, (Basel, Switzerland)*, no. 19 (2020): 5703. **(SCIE, Q1)**

PHỤ LỤC

P1. Sự ảnh hưởng của lớp phối hợp phản xạ tới đặc tính bức xạ của anten thấu kính

P1.1. Sự phản xạ của thấu kính

Trong các ứng dụng anten thấu kính điện môi, việc lựa chọn vật liệu làm thấu kính là rất quan trọng, vì nó có ảnh hưởng đặc biệt đến đặc tính bức xạ của anten. Các đặc tính của thấu kính phụ thuộc rất nhiều vào tính chất điện môi của vật liệu được sử dụng. Khi sóng điện từ truyền qua bất kỳ vật thể nào, thì năng lượng đều được phân thành ba dạng cơ bản đó là năng lượng phản xạ, năng lượng truyền đi và năng lượng hấp thụ.

Anten thấu kính điện môi được chế tạo bằng vật liệu điện môi có độ điện thẩm cao như Mica, Alumina, Silicon làm tăng hiệu quả truyền năng lượng qua thấu kính và cải thiện tỷ lệ bức xạ trước và sau của anten. Tuy nhiên, sử dụng vật liệu điện môi có độ điện thẩm cao trong chế tạo anten thấu kính gây ra sự phản xạ trên bề mặt thấu kính, giữa lớp không khí và lớp điện môi của thấu kính. Điều này có thể ảnh hưởng đáng kể đến không chỉ trở kháng đầu vào của nguồn cấp [85], mà còn ảnh hưởng đến các đặc tính của anten thấu kính như: giảm hệ số tăng ích; biến dạng chùm tia; và tăng biên độ cánh sóng bên. Những hiệu ứng không mong muốn này có thể được giảm đáng kể bằng cách sử dụng lớp phối hợp phản xạ (ML: Matching Layer) từ đó nâng cao được hiệu quả sử dụng anten thấu kính trong hệ thống thông tin [86]. Có nhiều phương pháp để tạo nên lớp phối hợp phản xạ, tuy nhiên có hai phương pháp cơ bản là sử dụng lớp phối hợp phản xạ một phần tư bước sóng

và tường phản xạ được Morita và S.B. Cohn nghiên cứu trong tài liệu [87].

Hiệu quả tương đối của kỹ thuật sử dụng lớp ML có thể được đánh giá dễ dàng thông qua hệ số phản xạ năng lượng tại giao diện giữa không khí và lớp chất điện môi. Hình P1.c thể hiện sự sắp xếp các lớp điện môi của thấu kính. Theo đó, lớp phối hợp phản xạ được gắn ở giữa hai vùng không khí và chất điện môi, vùng 1 là không khí, vùng 2 là lớp phối hợp phản xạ, vùng 3 là chất điện môi, và vùng 4 là lớp phối hợp phản xạ. Hệ số phản xạ năng lượng tại vị trí tiếp giáp giữa vùng i và vùng j được cho bởi giá trị r_{ij} . Theo đó, r_{12} là hệ số phản xạ tại mặt giao diện giữa vùng 1 và vùng 2 ; r_{23} là hệ số phản xạ tại mặt giao diện giữa vùng 2 và vùng 3. Hệ số phản xạ năng lượng được xác định theo phương trình sau [88].

$$r_{ij} = \left| \frac{\sqrt{\varepsilon_i} - \sqrt{\varepsilon_j}}{\sqrt{\varepsilon_i} + \sqrt{\varepsilon_j}} \right|$$

$$R = \frac{(r_{12} + r_{23})^2 - 4r_{12}r_{23}\sin^2\alpha_k d}{(1 + r_{12}r_{23})^2 - 4r_{12}r_{23}\sin^2\alpha_k d}$$

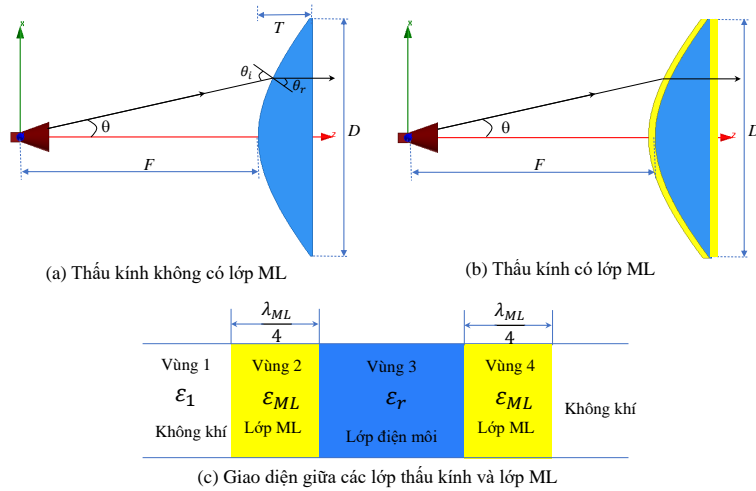
Trong đó, $\alpha_k = 2\pi/\lambda_{ML}$, λ_{ML} là bước sóng trong môi trường lớp phối hợp phản xạ. Nếu tồn tại một giá trị ε_{ML} nằm giữa giá trị ε_1 và ε_r thì $r_{12}r_{23}$ có giá trị dương, lúc này R biến đổi như một hàm của độ dày lớp phối hợp phản xạ (d). Vì vậy, từ phương trình tính tổng mức năng lượng phản xạ ta thấy rằng, R đạt giá trị nhỏ nhất khi $d = \lambda_{ML}/4$ và bằng 0 khi $r_{12} = r_{23}$, khi đó ε_{ML} là giá trị trung bình nhân của giá trị ε_1 và ε_r hay $\varepsilon_{ML} = \sqrt{\varepsilon_1\varepsilon_r}$.

Độ dày của lớp ML được xác định bởi phương trình sau:

$$d = \frac{\lambda_{ML}}{4} = \frac{\lambda}{4n_{ML}}$$

Trong đó, λ là bước sóng trong không gian tự do, n_{ML} là chỉ số khúc xạ

của lớp phối hợp phản xạ. Trong điều kiện giao diện của thấu kính là phẳng và sử dụng lớp phối hợp phản xạ có độ dày bằng một phần tư bước sóng trong môi trường đó thì tất cả năng lượng được truyền từ môi trường (1) vào môi trường (2), không có năng lượng nào bị phản xạ ở bề mặt.



Hình P1: Mô hình cấu trúc anten thấu kính có và không có lớp phối hợp phản xạ.

P1.2. Mô hình cấu trúc anten thấu kính có lớp phối hợp phản xạ

Mô hình cấu trúc anten thấu kính có lớp phối hợp phản xạ và không có lớp phối hợp phản xạ được thể hiện như trong Hình P1. Cấu trúc anten thấu kính bao gồm 1 anten loa nón làm nguồn phát xạ góc rộng và 1 thấu kính có cấu trúc đơn giản gồm một mặt cong và một mặt phẳng, tròn xoay quanh trục Oz , mặt cong của thấu kính có dạng hyperbol. Thấu kính điện môi được lựa chọn có độ điện thẩm cao với độ điện thẩm lần lượt là $\epsilon_r = 2$ (Teflon), $\epsilon_r = 5,7$ (Mica), $\epsilon_r = 9,2$ (Alumina) và $\epsilon_r = 11,9$ (Silicon). Đây là những vật liệu được dùng phổ biến trong thiết kế và chế tạo anten thấu kính. Thấu kính có mặt cong hướng về phía nguồn phát xạ. Tiêu điểm của thấu kính được đặt tại tâm pha của anten loa nón. Các tham số cấu trúc và mô phỏng được trình bày như trong Bảng P1.

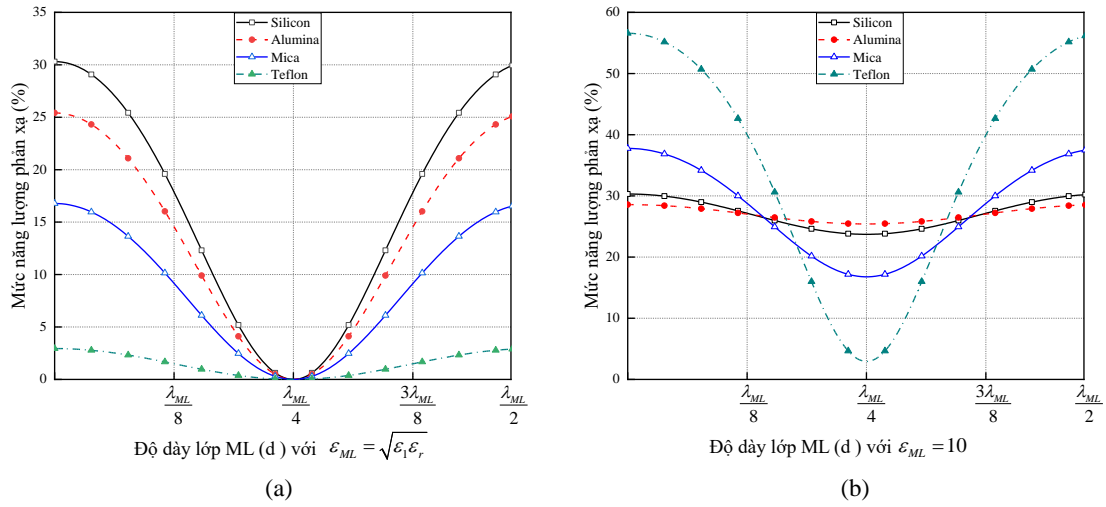
Bảng P1: Các tham số mô phỏng.

Cấu hình máy tính	CPU		Intel (R) 3,20 GHz
	RAM		128 GB
	Phần mềm		Ansys HFSS
	Phương pháp mô phỏng		MLFMM, FEBI
Các tham số của thấu kính điện môi	Đường kính của thấu kính [mm]	D	100
	Khoảng cách từ tiêu điểm đến đỉnh của thấu kính [mm]	F	100
	Độ điện thẩm của Teflon	ϵ_r	2,0
	Độ điện thẩm của Mica		5,7
	Độ điện thẩm của Alumina		9,2
	Độ điện thẩm của Silicon		11,9
	Độ điện thẩm của không khí	ϵ_1	1
	Độ điện thẩm của lớp phối hợp phản xạ	ϵ_{ML}	$\sqrt{\epsilon_1 \epsilon_r}$
	Độ dày của lớp phối hợp phản xạ [mm]	d_{ML}	$\lambda_{ML}/4$
Tần số khảo sát			28GHz

P2. Đánh giá các kết quả mô phỏng

P2.1. Hệ số phản xạ năng lượng

Hình P2 thể hiện sự ảnh hưởng của độ dày và độ điện thẩm của lớp phối hợp phản xạ tới hệ số phản xạ năng lượng của anten thấu kính. Ta có thể thấy rằng, khi lựa chọn độ điện thẩm của lớp ML bằng trung bình nhân của hai môi trường không khí và chất điện môi của thấu kính thì hệ số phản xạ năng lượng đạt giá trị thấp nhất khi độ dày của lớp ML bằng một phần tư bước sóng trong môi trường lớp ML và bằng không khí bề mặt thấu kính là phẳng, như trong Hình P2.a. Khi độ dày của lớp phối hợp phản xạ thay đổi thì mức độ phản xạ tại giao diện của lớp không khí và chất điện môi của thấu kính điện môi Silicon luôn cao hơn so với các chất điện môi khác, thậm chí năng lượng còn bị phản xạ ngược trở lại cao hơn 30% khi độ dày của lớp ML bằng 0 (khi không sử dụng lớp phối hợp phản xạ) hoặc bằng một nửa bước

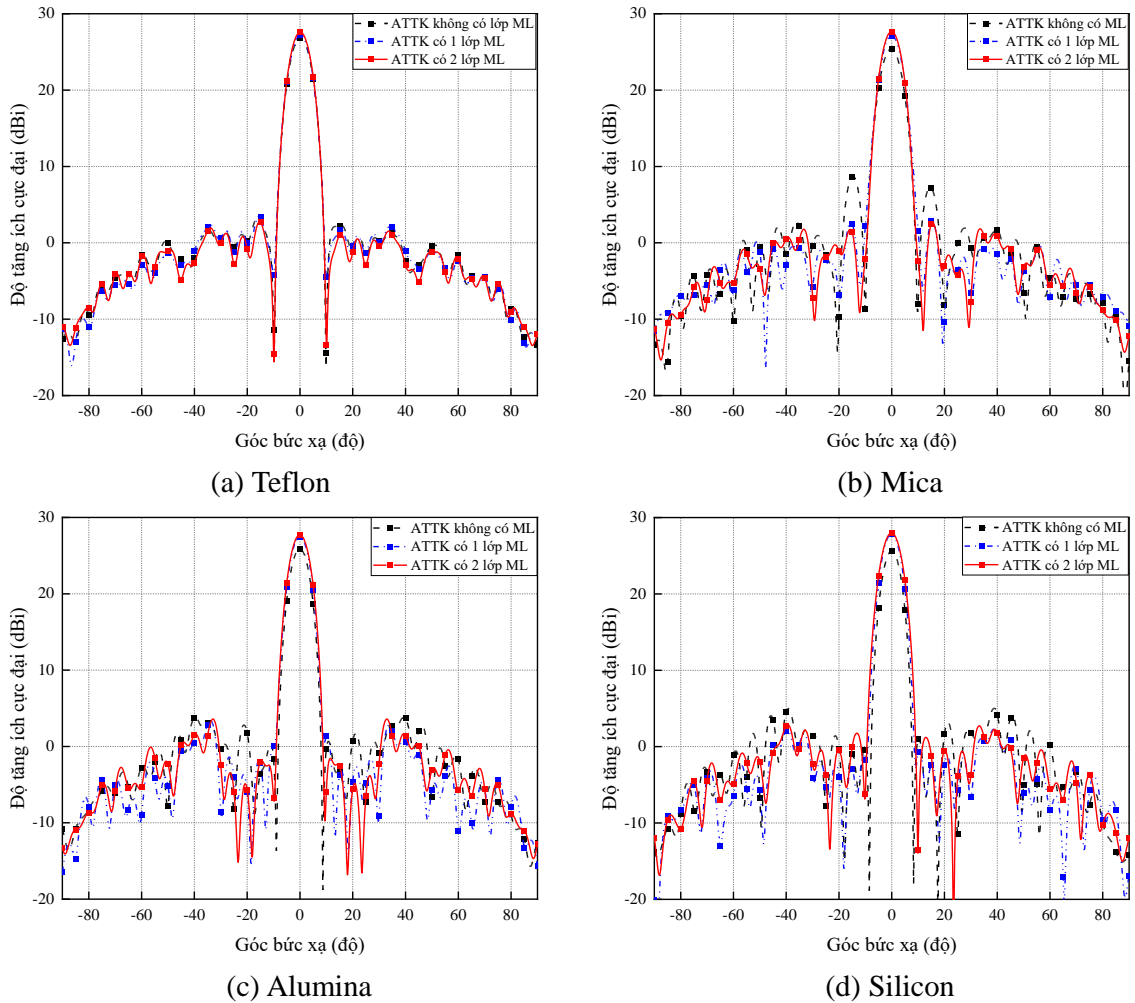


Hình P2. Mức phản xạ năng lượng.

sóng trong môi trường lớp phối hợp phản xạ. Khi lựa chọn ngẫu nhiên một giá trị độ điện thẩm của lớp ML ($\epsilon_{ML} = 10$). Kết quả cho thấy rằng, hệ số phản xạ năng lượng đạt cực tiểu khi $d = \lambda_{ML}/4$ và không thể triệt tiêu được hoàn toàn năng lượng phản xạ khi $\epsilon_{ML} \neq \sqrt{\epsilon_1 \epsilon_r}$ được thể hiện như trong Hình P2.b. Điều này thể hiện sự chính xác của kết quả mô phỏng so với tính toán lý thuyết.

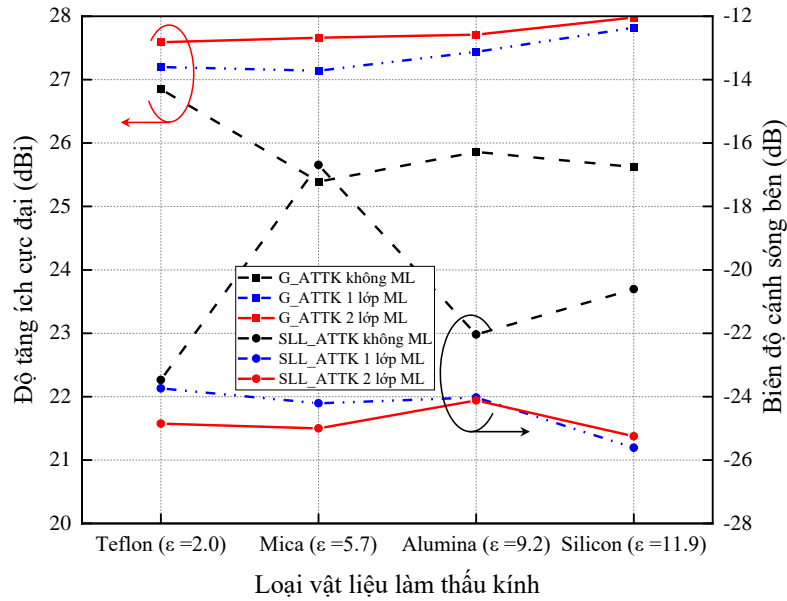
P2.2. Giảm đồ bức xạ của các anten thấu kính

Hình P3 thể hiện sự khác biệt trong giảm đồ bức xạ của anten thấu kính với các vật liệu khác nhau trong các trường hợp thấu kính được gắn hai lớp phối hợp phản xạ (ở mặt trong và mặt ngoài của thấu kính), gắn một lớp ML ở mặt trong của thấu kính và không được gắn lớp ML. Có thể dễ dàng nhận ra rằng, đồ thị bức xạ của anten thấu kính có lớp ML tốt hơn so với anten không được gắn lớp ML. Cụ thể, trong trường hợp không gắn lớp ML, anten thấu kính với vật liệu là Teflon có hệ số tăng ích cực đại đạt 26,85 dBi, trong khi đó, giá trị này lần lượt là 25,39 dBi; 25,86 dBi và 25,62 dBi đối với anten thấu kính có vật liệu điện môi là Mica; Alumina và Silicon. Trong



Hình P3: Giảm đồ bức xạ của anten thấu kính khi có và không có lớp ML.

trường hợp, thấu kính được gắn hai lớp phối hợp phản xạ, anten thấu kính đạt hệ số tăng ích cao nhất là 27,98 dBi với thấu kính điện môi Silicon và đạt giá trị 27,66 dBi khi dùng thấu kính có chất điện môi là Mica. Sự chênh lệch về hệ số tăng ích giữa anten thấu kính không được gắn lớp phối hợp phản xạ và được gắn hai lớp ML lớn nhất là 2,36 dB đối với thấu kính Silicon, trong khi thấu kính Teflon chỉ là 0,74 dB. Như vậy, kết quả cho thấy vật liệu điện môi có độ điện thẩm càng cao khi được gắn lớp phối hợp phản xạ thì đặc tính bức xạ càng được cải thiện tốt hơn.



Hình P4: So sánh hệ số tăng ích cực đại và biên độ cánh sóng bên.

P2.3. Biên độ cánh sóng bên

Sự thay đổi của hệ số tăng ích cực đại (G_{max}) và biên độ cánh sóng bên (SLL : Sidelobe Level) khi sử dụng lớp ML và không sử dụng lớp ML trong các môi trường điện môi khác nhau được thể hiện như trong Hình P4. Từ đồ thị ta có thể thấy rằng, khi gắn lớp phối hợp phản xạ cho thấu kính thì biên độ cánh sóng bên của anten thấu kính đều giảm, sự giảm rõ rệt nhất là đối với chất điện môi Mica là 8,31 dB, từ -16,69 dB xuống còn -25,00 dB, tiếp theo đến các chất điện môi Silicon và Alumina lần lượt là 4,64 dB và 2,08 dB. Trong khi đối với chất điện môi Teflon thì thấy ít có sự thay đổi chỉ là 1,38 dB, từ -23,47 dB thành -24,85 dB. Điều này cho thấy sự hiệu quả của việc sử dụng lớp phối hợp phản xạ đối với các vật liệu có độ điện thẩm cao trong việc làm giảm biên độ cánh sóng bên của anten thấu kính điện môi.

P2.4. Độ dày thấu kính

Các kết quả mô phỏng và tính toán được thể hiện trong Bảng P2. Bằng việc áp dụng phương trình (2.4) và các tham số mô phỏng được thiết lập.

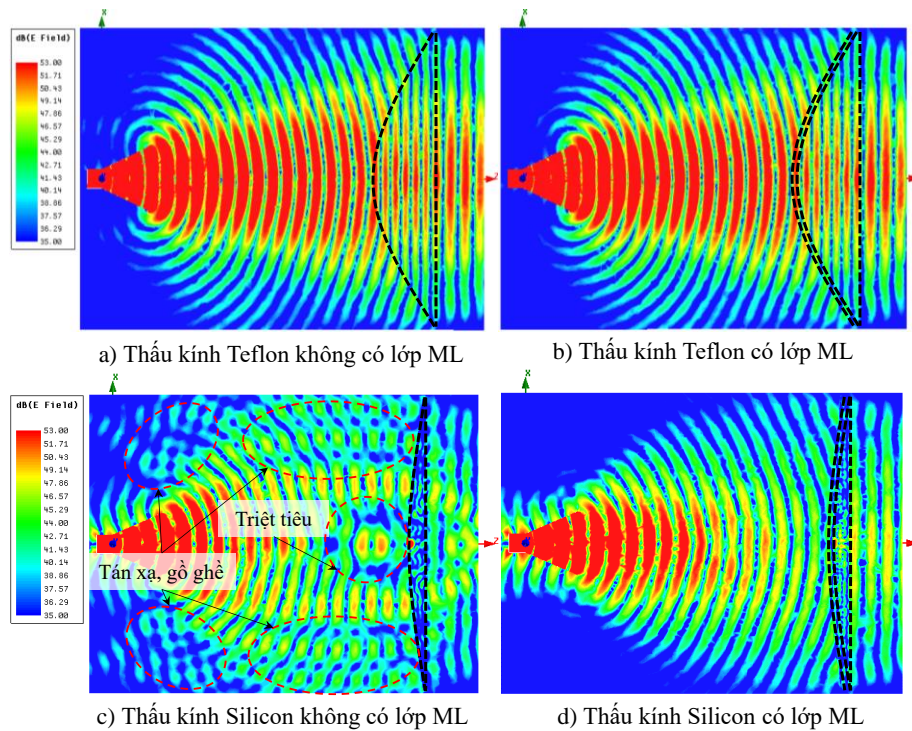
Bảng P2: So sánh kết quả mô phỏng.

Loại vật liệu	Thấu kính không có lớp ML				Thấu kính có 1 lớp ML				Thấu kính có 2 lớp ML			
	G_{\max} [dBi]	SLL [dB]	HPBW [độ]	T [mm]	G_{\max} [dBi]	SLL [dB]	HPBW [độ]	T [mm]	G_{\max} [dBi]	SLL [dB]	HPBW [độ]	T [mm]
Teflon ($\epsilon_r = 2, 0$)	26,85	-23,47	7,38	24,51	27,20	-23,74	7,25	26,76	27,59	-24,85	7,15	29,01
Mica ($\epsilon_r = 5, 7$)	25,39	-16,69	7,39	8,94	27,14	-24,21	7,16	10,67	27,66	-25,00	6,96	12,4
Alumina ($\epsilon_r = 9, 2$)	25,86	-22,04	6,77	6,53	27,44	-24,03	6,84	8,07	27,71	-24,12	6,98	9,61
Silicon ($\epsilon_r = 11, 9$)	25,62	-20,61	6,54	5,63	27,83	-25,45	6,84	7,07	27,98	-25,25	7,24	8,51

Chúng ta có thể tính toán được độ dày của thấu kính phụ thuộc vào độ điện thẩm của vật liệu làm thấu kính. Theo đó, thấu kính có chất điện môi Teflon là dày nhất với kích thước là 29,01 mm trong khi thấu kính có chất điện môi Silicon là mỏng nhất với độ dày chỉ là 8,51 mm. Giá trị độ dày của thấu kính có chất điện môi là Alumina và Mica lần lượt là 9,61 mm và 12,4 mm. Từ việc xem xét độ dày của thấu kính ta có thể thấy rằng, thấu kính có độ điện thẩm càng cao thì độ dày thấu kính càng mỏng. Như vậy, khi muốn tiểu hình hóa cấu trúc của anten thấu kính ta có thể sử dụng thấu kính có độ điện thẩm cao kết hợp với lớp phối hợp phản xạ, điều này làm cho kích thước của anten thấu kính được thu gọn lại, dễ triển khai lắp đặt và hạn chế được sự ảnh hưởng từ các tác nhân ngoài môi trường.

P2.5. Phân bố biên độ điện trường trong mặt phẳng xOz

Hình P5 thể hiện sự phân bố trường điện từ của anten thấu kính với chất điện môi là Teflon và Silicon trên mặt phẳng xOz . Từ Hình P5.c và P5.d ta có thể thấy sự khác biệt về phân bố trường giữa anten thấu kính điện môi Silicon không được gắn lớp phối hợp phản xạ (P5.c) và được gắn lớp phối hợp phản xạ (P5.d). Kết quả cho thấy, phân bố trường điện từ của anten thấu kính nằm giữa khoảng thấu kính và nguồn phát xạ bị gò ghề, thậm chí còn bị triệt tiêu ngay trước khi đến thấu kính không được gắn lớp ML, dạng sóng cầu của nguồn phát xạ và dạng sóng phẳng phía sau thấu kính không được thể hiện rõ ràng. Trong khi đó, đối với thấu kính Silicon có gắn lớp phối hợp phản xạ thì phân bố trường điện từ mịn hơn, đồng đều hơn, sóng cầu phía trước và sóng phẳng phía sau thấu kính được thể hiện rõ ràng hơn. Đối với phân bố trường trên mặt phẳng xOz của anten thấu kính điện môi Teflon có rất ít sự thay đổi, phân bố trường phía trước và sau thấu kính là tương đối



Hình P5: Phân bố cường độ điện trường trên mặt phẳng xOz của anten thấu kính điện môi Teflon và Silicon khi có và không có lớp ML.

rõ ràng, được thể hiện như trong Hình P5.a,b.

Điều này có thể lý giải bởi hai lý do sau đây, thứ nhất là thấu kính Silicon có độ điện thẩm cao nên các tia sóng từ anten loa nón tới bề mặt bị phản xạ ngược trở lại nhiều hơn. Thứ hai là do độ cong của mặt trong thấu kính ít hơn so với Teflon. Do đó các tia sóng phản xạ ngược trở lại phía nguồn phát nhiều hơn làm tác động tới sự phát xạ của anten loa nón, gây nên hiện tượng giao thoa sóng và làm triệt tiêu năng lượng ngay phía trước thấu kính. Khi thấu kính Silicon được gắn lớp phối hợp phản xạ, sự phản xạ trên bề mặt thấu kính được giảm xuống do đó, phân bố cường độ trường điện từ ở trước và sau thấu kính được thể hiện rõ ràng hơn, như trong Hình P5.d. Đối với thấu kính điện môi Teflon có độ điện thẩm thấp hơn và độ cong của mặt trong thấu kính cao hơn, do đó các tia sóng phản xạ trên bề mặt ít hơn và

có xu hướng phản xạ ra ngoài mép của thấu kính thay vì phản xạ ngược trở lại nguồn phát xạ dẫn tới ít ảnh hưởng tới khả năng phát xạ của anten loa.

Từ những kết quả trên cho thấy sự hiệu quả của lớp phối hợp phản xạ trong việc cải thiện được khả năng bức xạ của anten thấu kính, đồng thời giảm được đáng kể biên độ cánh sóng bên, và phân bố trường điện từ đồng đều hơn. Ngoài ra, kết quả cũng cho thấy kích thước tương ứng của các thấu kính có độ điện thẩm cao thì kích thước mỏng hơn. Làm cơ sở để các nhà nghiên cứu, thiết kế, chế tạo lựa chọn được cấu trúc anten thấu kính phù hợp, vừa có thể giảm nhỏ được kích thước mà còn cải thiện được các đặc tính quan trọng của anten thấu kính.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] W. Hong, Z. H. Jiang, C. Yu, J. Zhou, P. Chen, Z. Yu, H. Zhang, B. Yang, X. Pang, M. Jiang, Y. Cheng, M. K. T. Al-Nuaimi, Y. Zhang, J. Chen, and S. He, “Multibeam Antenna Technologies for 5G Wireless Communications,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 12, pp. 6231–6249, 2017.
- [2] G. Liu and D. Jiang, “5G: Vision and Requirements for Mobile Communication System Towards Year 2020,” *Chinese Journal of Engineering*, vol. 2016, pp. 1–8, Jan 2016.
- [3] Y. Wang, J. Li, L. Huang, Y. Jing, A. Georgakopoulos, and P. Demestichas, “5G Mobile: Spectrum Broadening to Higher-Frequency Bands to Support High Data Rates,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 9, no. 3, pp. 39–46, 2014.
- [4] S. Kumar, A. S. Dixit, R. R. Malekar, H. D. Raut, and L. K. Shevada, “Fifth Generation Antennas: A Comprehensive Review Of Design and Performance Enhancement Techniques,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 163 568–163 593, 2020.
- [5] O. Quevedo-Teruel, M. Ebrahimpouri, and F. Ghasemifard, “Lens Antennas for 5G Communications Systems,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 7, pp. 36–41, 2018.
- [6] J. G. Andrews, S. Buzzi, W. Choi, S. V. Hanly, A. Lozano, A. C. K. Soong, and J. C. Zhang, “What will 5G be?” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 6, pp. 1065–1082, 2014.

- [7] M. Beccaria, A. Massaccesi, P. Pirinoli, and L. H. Manh, “Multibeam transmitarrays for 5G antenna systems,” in *2018 IEEE Seventh International Conference on Communications and Electronics (ICCE)*, 2018, pp. 217–221.
- [8] Z. Sipus and T. Komljenovic, “Multi-shell radially symmetrical lens antennas,” in *Aperture Antennas for Millimeter and Sub-Millimeter Wave Applications*. Springer International Publishing, Sep 2017, pp. 37–73.
- [9] A. V. Boriskin, R. Sauleau, J. R. Costa, and C. Fernandes, *Integrated Lens Antennas*. Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 3–36. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-319-62773-1_1
- [10] K. Quzwain, A. A. Arjunaidi, Y. Yamada, K. Kamardin, N. H. A. Rahman, A. Ismail, and N. Q. Dinh, “Caustic analysis of reflected rays from a spherical reflector antenna,” in *2020 IEEE International RF and Microwave Conference (RFM)*, 2020, pp. 1–4.
- [11] K. Quzwain, Y. Yamada, K. Kamardin, N. H. Abd Rahman, and N. Q. Dinh, “Reflector surface shaping method for a cassegrain antenna,” in *2019 6th International Conference on Space Science and Communication (Icon-Space)*, 2019, pp. 207–211.
- [12] Y. Chen, H. Meng, Y. Gan, and W. Dou, “Millimeter wave multi-beam reflector antenna,” in *2018 International Workshop on Antenna Technology (iWAT)*, 2018, pp. 1–3.
- [13] G. A. Egorov and G. V. Eleftheriades, “Theory and simulation of metasurface lenses for extending the angular scan range of phased arrays,” *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, vol. 68 (5), pp. 3705–3717, 2020.

- [14] C. Xue, Q. Lou, and Z. N. Chen, “Broadband double-layered Huygens’ metasurface lens antenna for 5G millimeter-wave systems,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 3, pp. 1468–1476, 2020.
- [15] O. Yesilyurt and G. Turhan-Sayan, “Metasurface lens for ultra-wideband planar antenna,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 2, pp. 719–726, 2020.
- [16] Y.-H. Lv, X. Ding, B.-Z. Wang, and D. E. Anagnostou, “Scanning range expansion of planar phased arrays using metasurfaces,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 3, pp. 1402–1410, 2020.
- [17] Q. D. Nguyen, N. Binh, Y. Yamada, and N. Michishita, “Proof of the density tapering concept of an unequally spaced array by electric field distributions of electromagnetic simulations,” *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 34, pp. 1–14, 2020.
- [18] Y. Tajima and Y. Yamada, “Design of shaped dielectric lens antenna for wide angle beam steering,” *Electronics and Communications in Japan (Part III: Fundamental Electronic Science)*, vol. 89, pp. 1 – 12, Feb 2006.
- [19] F. Ansarudin, T. Abd Rahman, Y. Yamada, N. Rahman, and K. Kamardin, “Multi beam dielectric lens antenna for 5G base station,” *Sensors*, vol. 20, p. 5849, Oct 2020.
- [20] H. Giddens and Y. Hao, “Multibeam graded dielectric lens antenna from multimaterial 3-D printing,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 9, pp. 6832–6837, 2020.
- [21] T. Maruyama, K. Yamamori, and Y. Kuwahara, “Design of multibeam dielectric lens antennas by multi-objective optimization,” in *2008 38th European Microwave Conference*, 2008, pp. 527–530.

- [22] Y. Tajima and Y. Yamada, “Simulations of a shaped dielectric lens antenna by FEKO,” *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, vol. 24, pp. 419–426, 08 2009.
- [23] A. I. Sulyman, A. T. Nassar, M. K. Samimi, G. R. Maccartney, T. S. Rappaport, and A. Alsanie, “Radio propagation path loss models for 5G cellular networks in the 28 GHz and 38 GHz millimeter-wave bands,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 9, pp. 78–86, Sep 2014.
- [24] Z. Wu, B. Wu, Z. Su, and X. Zhang, “Development challenges for 5G base station antennas,” in *2018 International Workshop on Antenna Technology (iWAT)*. IEEE, 2018, pp. 1–3.
- [25] C.-X. Wang, F. Haider, X. Gao, X.-H. You, Y. Yang, D. Yuan, H. M. Aggoune, H. Haas, S. Fletcher, and E. Hepsaydir, “Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks,” *IEEE communications magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 122–130, 2014.
- [26] O. J. Lodge and J. L. Howard, “On electric radiation and its concentration by lenses,” *Proceedings of the Physical Society of London (1874-1925)*, vol. 10, no. 1, p. 143, 1888.
- [27] C. A. Fernandes, E. B. Lima, and J. R. Costa, “Dielectric lens antennas,” *Handbook of antenna technologies*, pp. 1001–1064, 2016.
- [28] J. Thornton and K.-C. Huang, Eds., *Modern Lens Antennas for Communications Engineering*. John Wiley & Sons, Inc., Mar 2013.
- [29] V. G. Veselago, “The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ε and μ ,” *Physics Uspekhi*, vol. 10, pp. 509–514, 1968.
- [30] R. Marqus, F. Martn, and M. Sorolla, *Metamaterials with Negative Parameters*. John Wiley & Sons, Inc., Dec 2007.

- [31] R. W. Ziolkowski, "Pulsed and CW gaussian beam interactions with double negative metamaterial slabs," *Optics Express*, vol. 11 (7), p. 662, Apr 2003.
- [32] D. R. Smith, W. J. Padilla, D. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz, "Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity," *Physical review letters*, vol. 84, no. 18, p. 4184, 2000.
- [33] I. V. Lindell, S. Tretyakov, K. Nikoskinen, and S. Ilvonen, "BW media-media with negative parameters, capable of supporting backward waves," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 31, no. 2, pp. 129–133, 2001.
- [34] R. W. Ziolkowski and E. Heyman, "Wave propagation in media having negative permittivity and permeability," *Physical review E*, vol. 64, no. 5, p. 056625, 2001.
- [35] A. Sihvola, *Electromagnetic Emergence in Metamaterials*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2002, pp. 3–17. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-94-007-1067-2_1
- [36] N. Michishita, T. Mori, S. Kamada, and Y. Yamada, "Dielectric metamaterial lens antenna for wide angle beam scanning," in *2010 IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems*. IEEE, 2010.
- [37] S. Kamada, N. Michishita, and Y. Yamada, "Metamaterial lens antenna using dielectric resonators for wide angle beam scanning," in *2010 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*. IEEE, 2010.
- [38] M. S. Anwar, H. Abufanas, and A. Bangert, "3D printed dielectric lens for the gain enhancement of a broadband antenna," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 30, no. 4, Jan 2020.

- [39] M. T. Le, Q. C. Nguyen, and T. P. Vuong, “Design of high-gain and beam steering antennas using a new planar folded-line metamaterial structure,” *International Journal of Antennas & Propagation*, vol. 2014, pp. 1–16, 2014.
- [40] W. J. Krzysztolik and T. N. Cao, “Metamaterials in application to improve antenna parameters,” in *Metamaterials & Metasurfaces*. IntechOpen, 2019.
- [41] C. A. Balanis, *Antenna theory: Analysis and design*. 4th ed, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2015.
- [42] A. Love, *Electromagnetic horn antennas*. New York: IEEE, Press, 1976.
- [43] A. Roederer, E. Farr, L. Foged, M. Francis, R. Hansen, R. Haupt, and K. Warnick, “IEEE standard for definitions of terms for antennas,” *IEEE Std*, pp. 145–2013, 2014.
- [44] Y. M. Cheng, P. Chen, W. Hong, T. Djerafi, and K. Wu, “Substrate-integrated-waveguide beamforming networks and multibeam antenna arrays for low-cost satellite and mobile systems,” *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 53, no. 6, pp. 18–30, Dec 2011.
- [45] R. C. Johnson and H. Jasik, *Antenna engineering handbook*. McGraw-Hill Inc.,US, 1984.
- [46] C. Pfeiffer and A. Grbic, “A printed, broadband luneburg lens antenna,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 58, no. 9, pp. 3055–3059, 2010.
- [47] R. Clapp, “Extending the R-2R lens to 360°,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 32, no. 7, pp. 661–671, 1984.

- [48] J. Boyns, C. Gorham, A. Munger, J. Provencher, J. Reindel, and B. Small, “Step-scanned circular-array antenna,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 18, no. 5, pp. 590–595, 1970.
- [49] Y. S. Zhang and W. Hong, “A millimeter-wave gain enhanced multi-beam antenna based on a coplanar cylindrical dielectric lens,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 7, pp. 3485–3488, 2012.
- [50] P. Nayeri, F. Yang, and A. Z. Elsherbeni, “Design of multifocal transmitarray antennas for beamforming applications,” in *2013 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*. IEEE, 2013.
- [51] N. Gagnon, A. Petosa, and D. A. McNamara, “Research and development on phase-shifting surfaces (PSSs),” *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 55, no. 2, pp. 29–48, 2013.
- [52] N. Gagnon, A. Petosa, and D. McNamara, “Thin Microwave Quasi-Transparent Phase-Shifting Surface (PSS),” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 58, no. 4, pp. 1193–1201, Apr 2010.
- [53] C.-C. Cheng and A. Abbaspour-Tamijani, “Study of 2-bit antenna-filter-antenna elements for reconfigurable millimeter-wave lens arrays,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 54, no. 12, pp. 4498–4506, 2006.
- [54] D. Popovic and Z. Popovic, “Multibeam antennas with polarization and angle diversity,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 50, no. 5, pp. 651–657, 2002.
- [55] Z. C. Hao, W. Hong, J. X. Chen, X. P. Chen, and K. Wu, “A novel feeding technique for antipodal linearly tapered slot antenna array,” in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2005.*, 2005, pp. 1641–1643.

- [56] C. Hua, X. Wu, N. Yang, and W. Wu, "Air-filled parallel-plate cylindrical modified luneberg lens antenna for multiple-beam scanning at millimeter-wave frequencies," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 61, no. 1, pp. 436–443, 2013.
- [57] F. Doucet, N. J. G. Fonseca, E. Girard, H. Legay, and R. Sauleau, "Analysis and design of a continuous parallel plate waveguide multiple beam lens antenna at Ku-band," in *2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, 2017, pp. 3631–3635.
- [58] H. Legay, S. Tubau, E. Girard, J.-P. Fraysse, R. Chiniard, C. Diallo, R. Sauleau, M. Ettorre, and N. Fonseca, "Multiple beam antenna based on a parallel plate waveguide continuous delay lens beamformer," in *2016 International Symposium on Antennas and Propagation*, 2016, pp. 118–119.
- [59] O. Manoochehri, A. Darvazehban, M. A. Salari, A. Emadeddin, and D. Erri-
colo, "A parallel plate ultrawideband multibeam microwave lens antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 9, pp. 4878–4883, 2018.
- [60] E. Garcia-Marin, D. Filipovic, J. Masa-Campos, and P. Sanchez-Olivares, "Low-cost lens antenna for 5G multi-beam communication," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 62, Nov 2020.
- [61] Q. Jiang, S. Yang, H. Zhang, and Z. Nie, "A multi-beam cylindrical lens antenna composed of dielectric mixtures," in *2015 IEEE International Conference on Communication Problem-Solving (ICCP)*, 2015, pp. 90–92.
- [62] D. McGrath, "Planar three-dimensional constrained lenses," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 34, no. 1, pp. 46–50, 1986.

- [63] H. Kaouach, L. Dussopt, T. Koleck, and R. Sauleau, “Wideband low-loss linear and circular polarization transmit-arrays in V-band,” *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, vol. 59, no. 7, pp. 2513–2523, 2011.
- [64] M. Jiang, Z. N. Chen, Y. Zhang, W. Hong, and X. Xuan, “Metamaterial-based thin planar lens antenna for spatial beamforming and multibeam massive MIMO,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 2, pp. 464–472, 2017.
- [65] M. Li and N. Behdad, “Wideband true-time-delay microwave lenses based on metallo-dielectric and all-dielectric lowpass frequency selective surfaces,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 8, pp. 4109–4119, 2013.
- [66] E. G. Plaza, J. R. Costa, C. A. Fernandes, G. León, S. Loredó, and F. Las-Heras, “A multibeam antenna for imaging based on planar lenses,” in *2015 9th European Conference on Antennas and Propagation*, 2015, pp. 1–5.
- [67] S. M. A. M. H. Abadi and N. Behdad, “Design of wideband, FSS-based multibeam antennas using the effective medium approach,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 11, pp. 5557–5564, 2014.
- [68] S. Mohamad, A. Momeni, H. Abadi, and N. Behdad, “Wideband multi-beam antenna apertures using metamaterial-based superstrates,” in *2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*, 2014, pp. 926–927.
- [69] Y. J. Cheng, W. Hong, K. Wu, Z. Q. Kuai, C. Yu, J. X. Chen, J. Y. Zhou, and H. J. Tang, “Substrate integrated waveguide (SIW) rotman lens and its Ka-band multibeam array antenna applications,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 56, no. 8, pp. 2504–2513, 2008.

- [70] Y. Cheng, W. Hong, and K. Wu, "Design of a substrate integrated waveguide modified R-KR lens for millimetre-wave application," *Microwaves, Antennas & Propagation, IET*, vol. 4, pp. 484 – 491, May 2010.
- [71] A. Rahimian, Y. Alfadhl, and X. Chen, "Modelling and simulation of an integrated 28-GHz rotman lens beamformer for 5G subsystems," in *2019 12th UK-Europe-China Workshop on Millimeter Waves and Terahertz Technologies (UCMMT)*, 2019, pp. 1–2.
- [72] Y. Tajima and Y. Yamada, "Improvement of beam scanning characteristics of a dielectric lens antenna by array feeds," *IEICE Transactions*, vol. 91-A, pp. 1616–1624, Jul 2008.
- [73] S. Hamid, N. Rahman, Y. Yamada, P. Hung, and Q. D. Nguyen, "Multibeam characteristics of a negative refractive index shaped lens," *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 20, Otc 2020.
- [74] M. Beccaria, A. Massaccesi, P. Pirinoli, N. K. Kiem, N. H. Trung, and L. H. Manh, "Innovative mimo antennas for 5G communication systems," in *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I CPS Europe)*, 2018, pp. 1–4.
- [75] S. X. Ta, M. Nguyen, T. Nguyen, T. K. Nguyen, K. Nguyen Khac, and C. Dao-Ngoc, "A low-profile $\pm 45^\circ$ dual-polarized antenna based on metasurface and its arrays for base station applications," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, pp. 1–20, May 2018.
- [76] M. Beccaria, L. H. Manh, A. Massaccesi, N. H. Trung, N. Khac Kiem, and P. Pirinoli, "5G communication system antenna design," in *2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and*

- 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEEIC / I CPS Europe)*, 2019, pp. 1–4.
- [77] H. M. Linh, M. Mussetta, F. Grimaccia, R. E. Zich, P. Pirinoli, and C. N. Dao, “Multi-layer antenna design with evolutionary optimization,” in *2013 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*. IEEE, Sep 2013.
- [78] M. Beccaria, A. Massaccesi, L. H. Manh, and P. Pirinoli, “Optimization strategies for multibeam transmitarray antennas for 5G systems,” in *2018 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium - China (ACES)*, 2018, pp. 1–2.
- [79] A. Massaccesi, M. Beccaria, H. M. Linh, N. H. Trung, N. K. Kiem, and P. Pirinoli, “Innovative antennas for next generation of communication systems in Vietnam,” in *Innovations in Land, Water and Energy for Vietnam’s Sustainable Development*. Springer, Nov 2020, pp. 249–265.
- [80] S. Lee and Y. Lo, *Antenna Handbook: theory, applications, and design*. Van Nostrand Reinhold, 1988, ch. Lens Antenna, pp. 1–57.
- [81] W. L. Stutzman and G. A. Thiele, *Antenna theory and design*. John Wiley & Sons, 2012.
- [82] F. Ansarudin, T. A. Rahman, and Y. Yamada, “MATLAB program for dielectric lens antenna shaping,” in *2018 2nd International Conference on Telematics and Future Generation Networks*. IEEE, Jul 2018.
- [83] Y. Tajima, Y. Yamada, S. Sasaki, and A. Kezuka, “Calculation of wide angle radiation patterns and caustics of a dielectric lens antenna by a ray tracing method,” *IEICE Transactions on Electronics*, vol. E87-C, pp. 1432–1440, Step 2004.

- [84] N. H. A. Rahman, M. T. Islam, N. Misran, Y. Yamada, and N. Michishita, “Design of a satellite antenna for Malaysia beams by ray tracing method,” in *2012 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, 2012, pp. 1385–1388.
- [85] G. Godi, R. Sauleau, and D. Thouroude, “Performance of reduced size substrate lens antennas for millimeter-wave communications,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 53, no. 4, pp. 1278–1286, Apr 2005.
- [86] F. Tokan, “Matching layer design procedure for a novel broadband dielectric lens antenna,” pp. 149–198, 2013.
- [87] T. Morita and S. B. Cohn, “Microwave lens matching by simulated quarter-wave transformers,” *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 4, no. 1, pp. 33–39, 1956.
- [88] E. Jones and S. Cohn, “Surface matching of dielectric lenses,” in *1958 IRE International Convention Record*, vol. 2, 1954, pp. 46–53.