

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

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

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Hà Nội - 2023

CÔNG TRÌNH ĐƯỢC HOÀN THÀNH TẠI
HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ - BỘ QUỐC PHÒNG

Người hướng dẫn khoa học: PGS. TS Nguyễn Quốc Định

Phản biện 1: GS. TS Bạch Gia Dương

Phản biện 2: PGS. TS Nguyễn Xuân Quyền

Phản biện 3: PGS. TS Lê Nhật Thăng

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án cấp Học viện theo Quyết định số ... ngày ... tháng ... năm ... của Giám đốc Học viện Kỹ thuật Quân sự, họp tại Học viện Kỹ thuật Quân sự vào hồi ... giờ ... ngày tháng ... năm ...

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Quốc gia Việt Nam
- Thư viện Học viện Kỹ thuật Quân sự.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH SỬ DỤNG TRONG
LUẬN ÁN

- J1. **P.V. Hung**, N. Q. Dinh, et al, "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 (**SCIE**).
- J2. **P. V. Hung**, N. Q. Dinh, et al. "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**)
- C1. **P. V. Hung**, et al. "Electromagnetic simulation method of a negative refractive index lens antenna." In *2019 International Conference on Advanced Technologies for Communications*, pp. 109-112. IEEE,2019.(**Scopus Index**)
- C2. **P. V. Hung**,et al. "Estimations of matching layers effects on lens antenna characteristics." In *International Conference on Industrial Networks and Intelligent Systems*, pp. 85-94. Springer, 2020.(**Scopus Index**)
- C3. **P.V. Hung**, et al. "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*, pp. 136-139. IEEE, 2020.(**Scopus Index**)
- C4. **Van Hung, Phan**, et al. "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**, et al. "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*.

Một số kết quả đạt được 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. Sự hiệu quả của việc sử dụng thấu kính có chỉ số khúc xạ âm cho phép anten thấu kính tiểu hình hóa được kích thước của thấu kính so với thấu kính có chỉ số khúc xạ dương, độ dày của thấu kính với điều kiện Abbe sin và 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 dBi, đặc tính bức xạ tốt hơn so với anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm với cấu trúc anten thấu kính truyền thống.
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. Thiết kế anten thấu kính NRI 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 xác định.

Hướng phát triển của luận án

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.

1. 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. 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. 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 [1-3]. Hệ thống thông tin di động (TTDD) thế hệ thứ 5 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 [6,7]. Trong thông tin di động, anten đóng vai trò rất quan trọng, không giống như các anten cho hệ thống thông tin di động thế hệ 4G trở về trước, 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 [8].

Với việc sử dụng dải sóng milimét có nhiều loại anten tiềm năng có thể được áp dụng cho trạm gốc trong thông tin di động 5G như anten mặt phản xạ, anten mảng pha, anten thấu kính (ATTK). Đối với anten mặt phản xạ, chúng có tính định hướng cao, biên độ cánh sóng bên thấp 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), có tính linh hoạt cao, có khả năng tạo được nhiều búp sóng [13-17], tuy nhiên, hệ thống điều khiển nguồn, điều khiển pha cho hệ anten khá phức tạp. Đối với ATTK 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 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 thông tin di động 5G [18-22].

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, 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. Đối với anten thấu kính điện môi có chỉ số khúc xạ dương có ưu điểm là có khả năng bức xạ cao, biên độ cánh sóng bên thấp. Tuy nhiên, thấu kính điện môi có kích thước 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.

Chính vì vậy, 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 (NRI) 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. Do đó, 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, giúp cho anten nhỏ gọn hơn, nhẹ hơn và giảm được sự ảnh hưởng từ môi trường bên ngoài 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.

2. Các 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.

3. Bố cục luận án:

Luận án được tổ chức như sau: mở đầu; 3 chương nội dung; kết luận và hướng nghiên cứu tiếp theo; danh mục các công trình công bố và tài liệu tham khảo.

Từ các kết quả nghiên cứu trong luận án kết hợp với việc so sánh với các công trình nghiên cứu đã công bố, chúng ta có thể thấy được sự hiệu quả của anten thấu kính NRI với điều kiện Straight line đề xuất trong việc tạo đa búp sóng và quét búp sóng góc rộng.

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]	θ_s [độ]	G_{max} [dBi]	SLL [dB]	θ_B [độ]	θ_s [độ]	G_{max} [dBi]	SLL [dB]	θ_B [độ]	θ_s [độ]
0°	26,93	-21,67	7,95	0	27,25	-23,18	8,03	0	27,48	-25,10	7,61	0
15°	26,62	-21,85	8,27	14,40	26,92	-23,90	8,27	14,50	27,01	-23,47	8,15	14,50
30°	25,25	-16,78	9,22	28,50	25,98	-14,8	9,32	29,60	25,78	-20,15	9,28	29,10
35°	24,57	-12,66	9,38	31,60	25,18	-12,59	9,88	34,30	25,12	-18,64	10,04	33,90
45°	23,12	-9,07	11,44	41,60	23,72	-8,59	10,77	43,90	23,72	-8,79	10,67	43,50

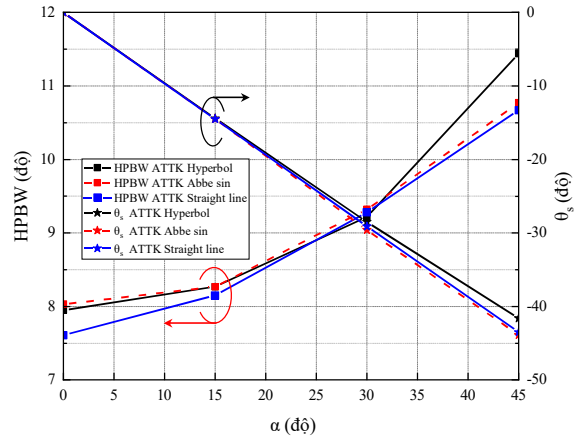
Bảng 3.3: Bảng tổng hợp so sánh các kết quả nghiên cứu.

TLTK	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		
	BTNL			27,55	-20,82	26,65	-18,06	0,90	17,00		
[49]	Luneburg+ATSL	28	$\sqrt{2,2}$	21,24	-18,59	20,99	-15,00	0,25	87,50	5	$\pm 30^\circ$
[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 NRI bằng phương pháp ray tracing. Đề xuất giải pháp thiết kế anten thấu kính NRI 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. Kết quả cho thấy anten thấu kính NRI 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 $\pm 48,84^\circ$.

60, 72], thì mức suy giảm hệ số tăng ích cực đại của cấu trúc ATTK đề xuất 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 anten thấu kính NRI với điều kiện Straight line đề xuất 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 đề xuất. Kết quả được trình bày cụ thể trong Bảng 3.3.



Hình 3.5: Sự thay đổi của HPBW và độ lệch góc bức xạ khi α thay đổi.

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

Từ Hình 3.5, ta thấy rằng, HPBW của anten thấu kính NRI luôn duy trì trong khoảng $7,61^\circ - 11,44^\circ$, 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) giữa tia sóng tới thấu kính và tia sóng bức xạ đi ra từ mặt mở của ATTK với điều kiện Straight line lệch nhiều hơn so với ATTK với điều kiện Abbe sin. Cụ thể, khi thiết lập nguồn phát xạ ở góc $\alpha = 30^\circ$ và $\alpha = 45^\circ$ thì anten thấu kính NRI với điều kiện đề xuất lệch $0,9^\circ$ và $1,5^\circ$. Trong khi đó, anten thấu kính NRI với điều kiện Abbe sin chỉ lệch $0,4^\circ$ và $1,1^\circ$.

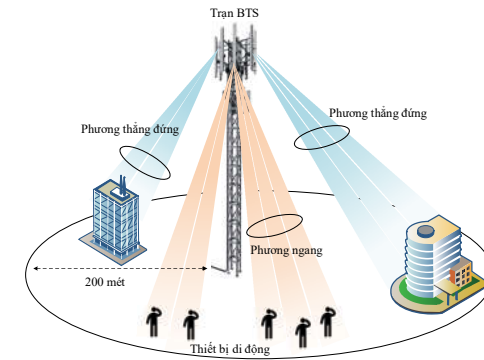
Ngoài ra, ATTK có chỉ số khúc xạ âm có độ lệch góc bức xạ nhỏ hơn so với ATTK có chỉ số khúc xạ dương. Cụ thể, ở góc $\alpha = 30^\circ$, độ lệch góc bức xạ của ATTK có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện Abbe sin và Straight line có sự sai lệch góc bức xạ lần lượt là $0,4^\circ$ và $0,9^\circ$, trong khi giá trị này của ATTK có chỉ số khúc xạ dương trong nghiên cứu [19] lần lượt là $3,3^\circ$ và $4,2^\circ$.

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 tại các trạm gốc 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: Mô hình về anten đa búp sóng cho trạm gốc trong TTDD 5G.

Trong những năm gần đây, với sự phát triển của công nghệ thông tin và truyền thông các thiết bị không dây tăng lên nhanh chóng, các ứng dụng 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 cải thiện tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu, 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 TTDD 5G được trình bày trong Hình 1.1. 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.

Hệ thống thông tin di động 5G được cho là đã tận dụng một cách tối ưu

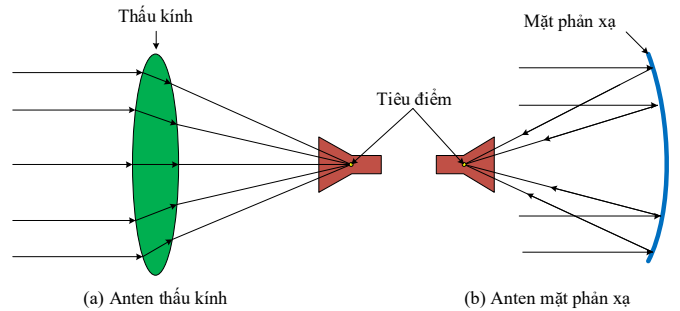
phổ tần khi sử dụng cả hai dải tần là dải tần số cao trên 24 GHz và dải tần số thấp dưới 6 GHz. Hiện nay, các quốc gia như Mỹ, Nhật Bản, Hàn Quốc... đã xác định băng tần 28 GHz (N257) và 39 GHz (N260) là băng tần trung tâm sẽ được sử dụng trong các nghiên cứu về thông tin di động 5G [24].

Hệ thống anten ở trạm gốc trong thông tin di động 5G sử dụng dải sóng milimét, điều này 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 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

Anten thấu kính được nghiên cứu đầu tiên bởi một nhà vật lý người Đức tên là Heinrich Hertz vào đầu những năm 1880. Cho đến nay, cấu tạo của anten thấu kính bao gồm hai thành phần chính đó là nguồn phát xạ và thấu kính.



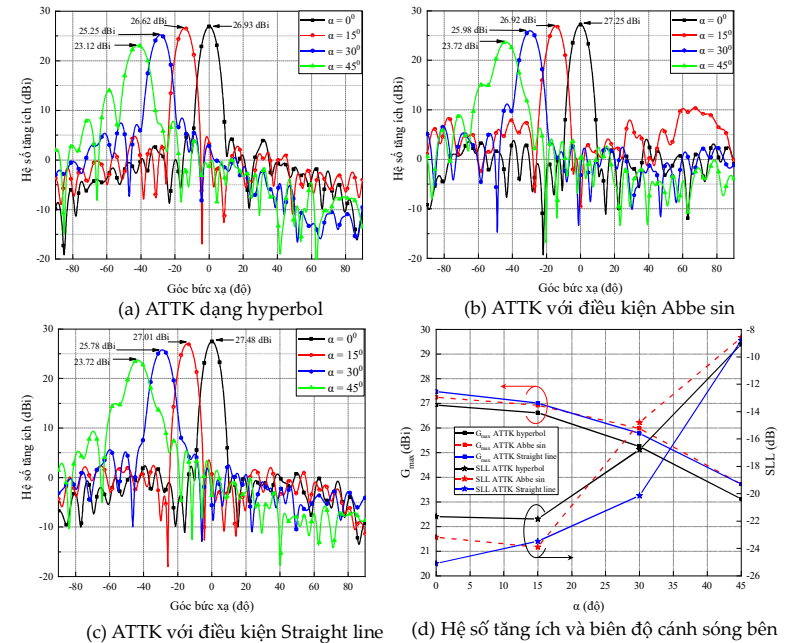
Hình 1.2: Cấu trúc anten thấu kính và anten mặt phản xạ.

Nguồn phát xạ sử dụng cho anten thấu kính rất đa dạng, chúng có thể là: anten loa, anten mạch dải, anten chấn tử, và có thể là mảng các phần tử anten. Trong thực tế, anten loa và anten mạch dải là hai loại anten được sử dụng phổ biến nhất, ngoài ra, chúng có thể kết hợp với nhau thành một mảng các phần tử cấp nguồn.

Thấu kính được sử dụng để hiệu chỉnh pha hoặc biên độ (hoặc cả hai) của nguồn phát xạ để biến nó thành dạng bức xạ đầu ra như mong muốn. Nguyên tắc hoạt động của thấu kính dựa trên sự khúc xạ của sóng điện từ tại bề mặt thấu kính, hoặc bên trong thấu kính trong trường hợp thấu kính với chỉ số khúc xạ không đồng nhất.

a) Giảm đồ bức xạ của các anten thấu kính NRI

Giản đồ bức xạ của ba dạng anten thấu kính NRI có các góc bức xạ thay đổi từ 0° đến 45° như trong Hình 3.4. Ta thấy rằng, các anten có hệ số tăng ích cực đại đạt giá trị lớn nhất khi thiết lập nguồn phát xạ tại tiêu điểm của thấu kính ($\alpha = 0^{\circ}$) và giảm dần khi góc α tăng dần. Cụ thể, khi $\alpha = 0^{\circ}$, ATTK với điều kiện đề xuất có hệ số tăng ích cực đại bằng 27,48 dBi, trong khi hai cấu trúc ATTK có điều kiện Abbe sin và dạng hyperbol chỉ đạt giá trị lần lượt là 27,25 dBi và 26,93 dBi. Các kết quả cụ thể được trình bày trong Bảng 3.2.

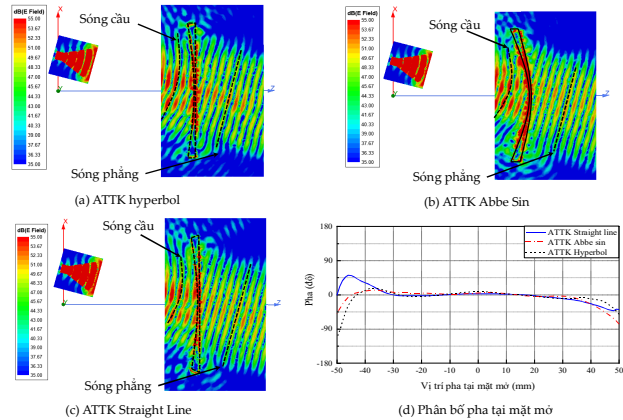


Hình 3.4: Giản đồ bức xạ và sự thay đổi hệ số tăng ích cực đại của ATTK.

Khi dịch chuyển nguồn phát xạ trên quỹ đạo xác định, ATTK với điều kiện đề xuất có hệ số tăng ích cực đại luôn duy trì ở mức cao hơn so với ATTK dạng hyperbol và tương đồng với ATTK theo điều kiện Abbe sin. 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 ATTK dạng hyperbol và điều kiện Abbe sin khi nguồn phát thiết lập tại các góc $\alpha = 0^{\circ}$ và $\alpha = 30^{\circ}$, lần lượt là: -25,10 dB và -20,15 dB.

Ngoài ra, khi so sánh mức suy giảm hệ số tăng ích cực đại (G_i) với các loại anten có góc quét búp sóng rộng được trình bày trong các nghiên cứu [22, 36,

Phân bố biên độ điện trường trong mặt phẳng xOz và pha tại mặt mở khi nguồn phát xạ thiết lập ở góc $\alpha = 15^\circ$ trên quỹ đạo R_4 được thể hiện như trong Hình 3.3. Ta thấy rằng, 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 có chỉ số khúc xạ âm đều chuyển thành dạng sóng phẳng.



Hình 3.3: Phân bố điện trường và pha của anten thấu kính NRI.

Phân bố pha trong khoảng bức xạ cực đại gần tâm của thấu kính là tương đối phẳng, như trong Hình 3.3d. 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, dẫn đến sự suy giảm hệ số tăng ích và biên độ cánh sóng bên tăng. Từ phân bố điện trường và pha ta thấy rằng, dạng sóng đầu ra của anten là sóng phẳng và đồng pha với nhau. Điều này khẳng định sự chính xác trong việc xác định vùng hội tụ bằng phương pháp ray tracing.

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 các vùng hội tụ, quỹ đạo đã được xác định và kết quả khảo sát khi dịch chuyển nguồn phát xạ trong vùng hội tụ, tác giả lựa chọn thiết lập nguồn phát xạ trên quỹ đạo R_4 , được thể hiện như trong Hình 3.2b. Các nguồn phát xạ được thiết kế với góc α thay đổi từ 0° đến 45° với bước nhảy $\alpha = 15^\circ$. Sử dụng phần mềm Ansys HFSS để mô hình hóa và mô phỏng các cấu trúc anten thấu kính NRI, các kết quả mô phỏng được phân tích và đánh giá như sau:

Hình 1.2a thể hiện cấu trúc cơ bản nhất của anten thấu kính, các tia sóng song song 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, 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 [27].

Với cấu trúc 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. 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 milimet.

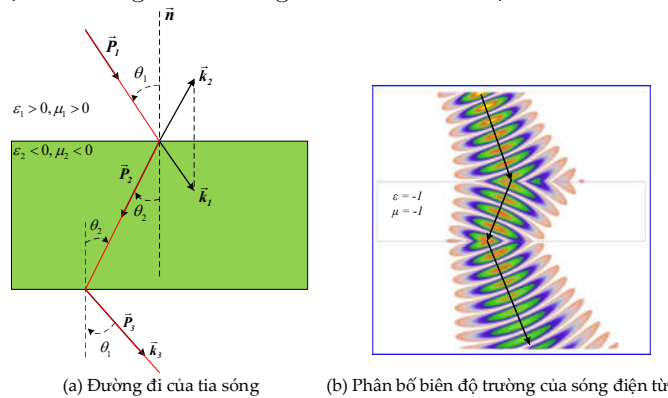
1.2.2 Vật liệu của thấu kính

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, Polyetylen, ... , thấu kính siêu vật liệu 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 [29].

Năm 1968, Veselago đã nghiên cứu 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 âm. Môi trường vật chất này cho phép sóng điện từ đi xuyên qua, nhưng tuân theo quy tắc bàn tay trái [29-32]. Sau này các nhà khoa học gọi với một số cái tên khác như: môi trường có khúc xạ âm (NR) [29]; môi trường khúc xạ ngược [33] và môi trường Veselago [35]...

Sự truyền lan của sóng điện từ trong môi trường có chỉ số khúc xạ âm được thể hiện như trong Hình 1.3. Theo nhà khoa học Veselago, khi tia sóng P_1 đi từ môi trường thứ nhất có $\epsilon_1 > 0$ và $\mu_1 > 0$ sang môi trường thứ hai có $\epsilon_2 < 0$ và $\mu_2 < 0$ thì tia sóng P_1 vẫn xảy ra hiện tượng khúc xạ tại mặt phân cách 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 1.3a. 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 sóng tới và tia sóng khúc xạ tại mặt phân cách được xác định dựa vào định luật Snell với điều kiện khúc xạ âm [29,30]. Trong nghiên cứu [31], các nhà khoa học đã mô phỏng thể

hiện 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 ($n = -1$), được thể hiện như trong Hình 1.3b. Từ đây ta có thể dễ dàng nhận thấy sự khúc xạ ngược của sóng điện từ trong môi trường có chỉ số khúc xạ âm.



Hình 1.3: Quá trình khúc xạ tại mặt phân cách giữa hai môi trường truyền dẫn có chỉ số khúc xạ âm và chỉ số khúc xạ dương.

Từ việc tính toán phương trình Maxwell với điều kiện $\epsilon < 0$ và $\mu < 0$, các nhà khoa học đã xác định được chỉ số khúc xạ của môi trường tuân theo quy tắc bàn tay trái mang giá trị âm và được thể hiện bởi phương trình.

$$n = -\sqrt{\epsilon\mu} < 0 \quad (1.1)$$

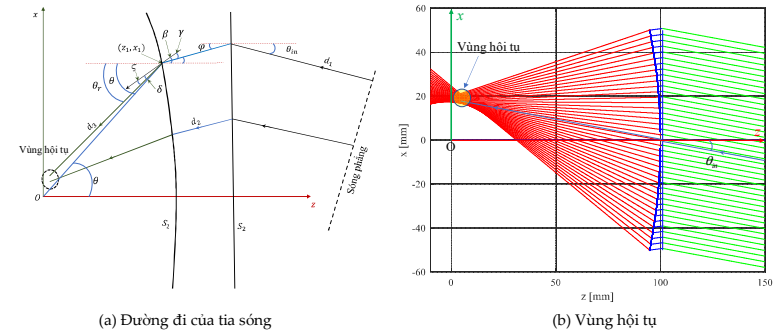
Đây là đặc điểm quyết định đến tính chất và đường đi của tia sóng trong môi trường vật liệu có chỉ số khúc xạ âm.

1.3 Kỹ thuật tạo đa búp sóng cho anten thấu kính

Anten đa búp sóng đóng vai trò quan trọng đối với cả trạm thu phát gốc và các thiết bị đầu cuối trong hệ thống thông tin di động. Để tạo được đa búp sóng cho anten thì có nhiều kỹ thuật khác nhau, 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]. 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.

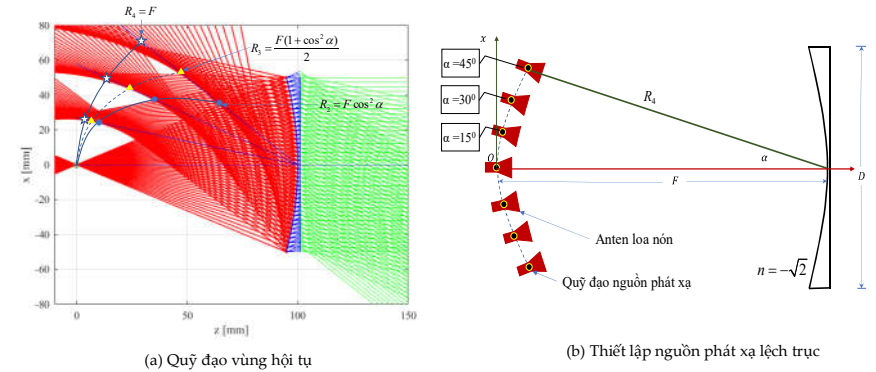
- Kỹ thuật tạo đa búp sóng cho anten thấu kính điện môi có chỉ số khúc xạ đồng nhất, phân bậc hoặc biến thiên liên tục xuyên tâm [27,45].

Từ các điểm hội tụ lệch trục này cho phép chúng ta thiết lập nhiều nguồn phát xạ tạo thành ATTK đa búp sóng theo điều kiện mong muốn.



Hình 3.1: Xác định vùng hội tụ của thấu kính NRI.

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 phương pháp tổng hợp các giao điểm của phương trình d_3 , tác giả nhận thấy rằng các 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 $R_4 = F$, như trong Hình 3.2a.



Hình 3.2: Vùng hội tụ và các vị trí nguồn phát xạ trên các quỹ đạo.

Bằng việc sử dụng phần mềm Ansys HFSS để mô hình hóa và mô phỏng ba cấu trúc anten thấu kính NRI dạng hyperbol, với điều kiện Abbe sin và cấu trúc với điều kiện Straight line đề xuất trong môi trường giả lập trường điện từ khi thiết lập nguồn phát xạ lệch trục trên quỹ đạo R_4 . Các kết quả tính toán và phân tích được trình bày như sau:

Chương 3

Nghiên cứu giải pháp tạo đa búp sóng cho anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm

Dựa trên cấu trúc anten thấu kính NRI với một nguồn phát xạ đặt tại tiêu điểm của thấu kính được đề xuất ở Chương 2. Trong Chương 3, luận án đề xuất giải pháp tạo đa búp sóng cho anten thấu kính NRI dựa trên việc xác định vị trí thiết lập nguồn phát xạ bằng phương pháp ray tracing. 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 NRI bằng phương pháp ray tracing

3.1.1 Phương pháp xác định vùng hội tụ

Mô hình cấu trúc thấu kính và đường đi của tia sóng để 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 dựa trên các phương pháp tính toán quang hình, quang lý, định luật khúc xạ Snell với điều kiện khúc xạ âm và được tính toán bằng phần mềm MATLAB. Từ việc thiết lập các tham số cấu trúc của thấu kính ta có thể xác định được các phương trình đường đi của tia sóng như sau.

Tọa độ các điểm nằm trên mặt cong phía trong của thấu kính, $P_\theta(z_1, x_1)$.

$$\begin{aligned} x_1 &= r \sin \theta = \frac{(n-1)F \sin \theta}{n \cos \theta - 1}, \\ z_1 &= r \cos \theta = \frac{(n-1)F \cos \theta}{n \cos \theta - 1}. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Các phương trình đường đi của tia sóng từ mặt phẳng sóng tới vùng hội tụ được cho bởi các phương trình sau:

$$d_1 = \tan \theta_m (z - z_2) + x_2 \quad (3.2)$$

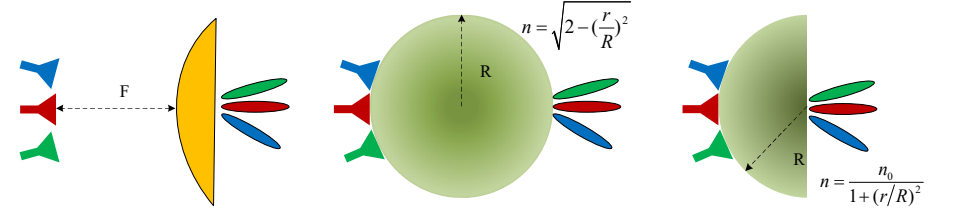
$$d_2 = \tan \varphi (z - z_1) + x_1 \quad (3.3)$$

$$d_3 = \tan \theta_r (z - z_1) + x_1 \quad (3.4)$$

Các tia sóng cho bởi phương trình (3.4) – tia sóng đi từ mặt cong S_1 sẽ giao nhau tại một điểm hoặc một vùng giao điểm, được thể hiện trong Hình 3.1b. Các điểm hội tụ này là điểm tốt nhất để thiết lập nguồn phát xạ cho ATTK.

- Kỹ thuật tạo đa búp sóng dựa trên nguyên lý hoạt động của thấu kính dạng Luneburg và dạng một nửa mắt cá Maxwell [46-49].

- Kỹ thuật tạo đa búp sóng cho anten thấu kính dựa trên các mặt mở rời rạc dạng mảng truyền dẫn [50] hoặc các bề mặt dịch pha [51].



(a) Anten thấu kính dạng Hyperbol (b) Anten thấu kính dạng Luneburg (c) Anten thấu kính dạng Maxwell

Hình 1.4: Cấu trúc anten thấu kính điện môi tạo đa búp sóng.

1.4 Các nghiên cứu có liên quan

Với sự phát triển của khoa học và công nghệ cho phép các nhà khoa học có thể nghiên cứu, chế tạo các loại anten thấu kính một cách dễ dàng hơn. Các nhà nghiên cứu hiện nay đang tập trung vào anten thấu kính tạo đa búp sóng theo bốn xu hướng 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 [55-59].

- Xu hướng thứ hai, thiết kế thấu kính dạng phẳng là sự kết hợp của các lớp điện môi và các phần tử cộng hưởng 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].

- 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. 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 [46-49, 69-71].

- Xu hướng nghiên cứu thứ tư, nghiên cứu về anten thấu kính dựa trên việc tính toán các cấu trúc bề mặt của thấu kính điện môi và quỹ đạo của các nguồn phát xạ để mở rộng góc quét của búp sóng từ đó nâng cao khả năng tạo được đa búp sóng cho anten thấu kính [18-21, 72,73].

Qua việc nghiên cứu các công trình đã công bố, tác giả nhận thấy rằng, nghiên cứu thiết kế thấu kính theo xu hướng thứ nhất, hai và ba phức tạp hơn

so với xu hướng nghiên cứu thứ tư dựa vào việc thiết kế cấu trúc bề mặt thấu kính. Đối với xu hướng thứ hai, 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 anten 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.

Bảng 1.1: Bảng thống kê các công trình nghiên cứu có liên quan.

TL	Dạng thấu kính	Tần số [GHz]	Chỉ số khúc xạ		Số Búp sóng	KTTK [mm]
			$n > 0$	$n < 0$		
[18]	Abbe sin	60	$\sqrt{2}$	X	7	T=49
[72]	Abbe sin	60	$\sqrt{2,74}$	X	4	T=39
[22]	Abbe sin	20	$\sqrt{2,2}$	X	2	T=39
[19]	Phân bố trường Abbe sin, SL	28	$\sqrt{4}$	X	6	T=14; 14,8 13,83
[49]	Luneburg	28	$\sqrt{2,2}$	X	5	T=87,5
[60]	Luneburg	26; 28	2,5; 2,35 1,95; 1,6	X	4	T=25
[69]	Rotman	28,5	X	X	7	T=10
[71]	Rotman	28	X	X	7	
[36]	Abbe sin	11	X	-1	3	T=39

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

Từ việc phân tích, đánh giá kết quả của các công trình đã công bố liên quan đến hướng nghiên cứu của luận án, như trong Bảng 1.1, tác giả đã tập trung vào nghiên cứu, so sánh và đánh giá sự hiệu quả của các dạng cấu trúc thấu kính, giải quyết các nội dung mà các nghiên cứu trước đó chưa thực hiện đặc biệt là nghiên cứu về cấu trúc ATTK có chỉ số khúc xạ âm ($n < 0$) tạo đa búp sóng định hướng ứng dụng cho trạm gốc hoạt động ở băng tần 28 GHz.

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. 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. Đồng thời thực hiện đánh giá tổng quan về các nghiên cứu trong nước và ngoài nước về anten thấu kính tạo đa búp sóng. Đây là cơ sở quan trọng để đề xuất các giải pháp thiết kế cấu trúc ATTK ở các chương tiếp theo.

Bằng việc sử dụng thấu kính NRI, độ dày của thấu kính trong các cấu trúc đề xuất chỉ là 6 mm trong khi đó thấu kính có chỉ số khúc xạ dương trong nghiên cứu [19] lần lượt là 14,80 mm và 13,83 mm. Ngoài ra, kích thước của thấu kính với điều kiện đề xuất còn nhỏ hơn nhiều so với các thấu kính với điều kiện Abbe sin, Luneburg và Rotman trong các nghiên cứu [49, 60, 69, 71]. Điều này cho thấy sự hiệu quả của việc sử dụng anten thấu kính NRI với điều kiện Straight line đề xuất không chỉ cải thiện khả năng bức xạ của anten mà còn có thể tạo được cấu trúc ATTK nhỏ hơn, gọn hơn so với một số cấu trúc ATTK thông thường.

Bảng 2.3: Bảng so sánh các kết quả nghiên cứu.

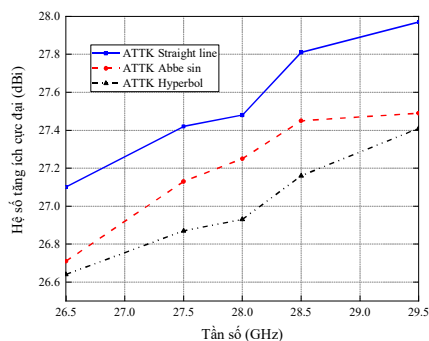
TL	Cấu trúc TK	n	Tần số [GHz]	G_{max} [dBi]	SLL [dB]	T [mm]
[19]	Abbe sin	$\sqrt{4}$	28	27,74	-23,50	14,80
	Straight line ($n > 0$)			27,69	-24,50	13,83
	BTNL			27,56	-21,50	17,00
[36]	Abbe sin	-1	11	7,60	-17,00	39,00
[49]	Luneburg+ATSL	$\sqrt{2,2}$	28	21,24	-18,59	87,50
[59]	Luneburg	2,5; 2,35	26	22,20	-20,50	25,00
		1,95; 1,6	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	

Từ cấu trúc thấu kính NRI với điều kiện Straight line được đề xuất, chúng ta có thể biến đổi thành các cấu trúc tương đương có bề mặt thấu kính liên tục hoặc phân bậc dưới dạng siêu vật liệu bằng cách kết hợp các phần tử cộng hưởng và lớp điện môi tự nhiên, cho phép chúng ta có thể chế tạo và ứng dụng cấu trúc đề xuất vào trong thực tế.

2.3 Kết luận chương 2

Trong Chương 2, luận án thực hiện nghiên cứu giải pháp phát triển cấu trúc anten thấu kính NRI với điều kiện Straight line. Kết quả cho thấy, cấu trúc anten thấu kính 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 NRI giúp cho kích thước của thấu kính mỏng hơn. 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 thông tin di động băng tần 28 GHz.

mặt mở trong khoảng bức xạ cực đại gần tâm của thấu kính là tương đối đồng đều. Sự mập mờ của giản đồ phân bố pha là do hiện tượng quang sai cầu, hiện tượng coma và sự phản xạ trên bề mặt của thấu kính. Đối với anten thấu kính NRI với cấu trúc đề xuất, sự sai pha tại mặt mở xảy ra ít hơn so với hai cấu trúc ATTK có chỉ số khúc xạ âm với điều kiện Abbe sin và Hyperbol. Do đó, hệ số tăng ích của anten thấu kính với điều kiện đề xuất cao hơn so với hai cấu trúc còn lại, như trong Hình 2.7b.



Hình 2.8: Hệ số tăng ích cực đại của ATTK NRI trong băng tần 28 GHz.

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

Khi xem xét khả năng hoạt động của anten thấu kính NRI trong băng tần 28 GHz, ta thấy rằng, cả ba cấu trúc anten thấu kính NRI đều có khả năng hoạt động tốt trên toàn bộ băng tần 28 GHz khi chúng duy trì được giá trị hệ số tăng ích cực đại ở mức cao hơn 26,64 dBi, như trong Hình 2.8. Hệ số tăng ích cực đại của ATTK với cấu trúc đề xuất luôn đạt ở mức cao hơn so với hai cấu trúc ATTK dạng hyperbol và điều kiện Abbe sin. Điều này khẳng định sự hiệu quả của cấu trúc anten thấu kính NRI với điều kiện Straight line đề xuất trên toàn bộ băng tần.

d) So sánh các kết quả nghiên cứu

So sánh với các kết quả đã được công bố như trong Bảng 2.3. Ta thấy rằng, anten thấu kính NRI với điều kiện 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 ATTK trong các nghiên cứu [49, 60, 69,71]. Giản đồ bức xạ của ATTK có cấu trúc đề xuất tương đồng với kết quả trong nghiên cứu [19] nhưng có biên độ cánh sóng bên thấp hơn. Hệ số tăng ích cực đại của anten thấu kính NRI với điều kiện SL gần đạt được giá trị theo lý thuyết ($G_T = 29,34$ dBi) của anten mặt mở [82].

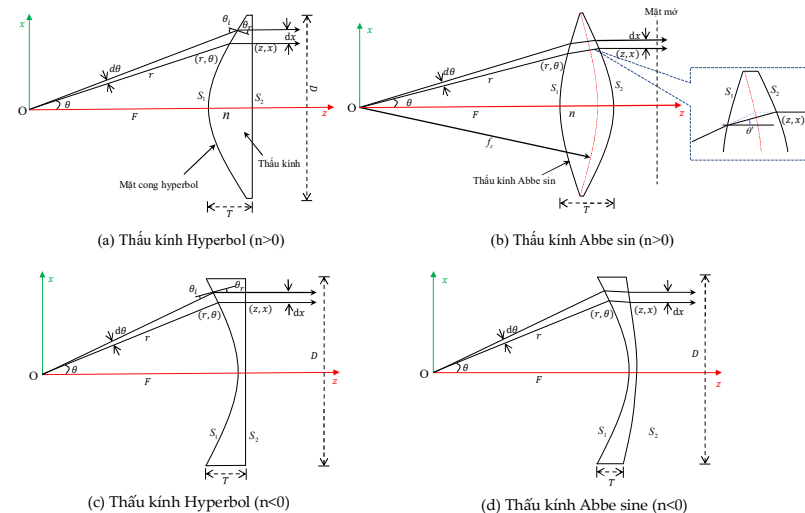
Chương 2

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

2.1 Phát triển cấu trúc anten thấu kính NRI

2.1.1 Mô hình cấu trúc ATTK có chỉ số khúc xạ dương và âm

Mô hình cấu trúc thấu kính có chỉ số khúc xạ dương và âm với dạng Hyperbol và điều kiện Abbe sin được thể hiện như trong Hình 2.1. Cấu trúc mặt cong của hai dạng thấu kính được xác định dựa trên các phương trình vi phân.



Hình 2.1: Cấu trúc thấu kính có chỉ số khúc xạ âm và chỉ số khúc xạ dương.

a) Các phương trình xác định mặt cong của thấu kính

Cấu trúc mặt cong của thấu kính dạng hyperbol được cho bởi [27,80]:

$$r = \frac{(n-1)F}{ncos\theta - 1} \quad (2.1)$$

$$\frac{dx}{d\theta} = \frac{(n-1)F(n-\cos\theta)}{(ncos\theta - 1)^2} \quad (2.2)$$

Cấu trúc mặt cong của thấu kính với điều kiện Abbe sin được tính toán dựa trên cụm các phương trình vi phân sau:

Cấu trúc mặt cong phía trong S_1 được cho bởi phương trình [73, 80]:

$$\frac{dr}{d\theta} = \frac{rn \sin(\theta - \theta')}{n \cos(\theta - \theta') - 1} \quad (2.3)$$

Trong đó, θ' là góc tạo bởi tia khúc xạ sau mặt cong S_1 và trục bức xạ Oz . Phương trình cấu trúc mặt ngoài S_2 của thấu kính được cho bởi [73, 80]:

$$\frac{dz}{d\theta} = \frac{n \sin \theta'}{1 - n \cos \theta'} \frac{dx}{d\theta} \quad (2.4)$$

Để thỏa mãn điều kiện Abbe sin, các tia sóng từ nguồn phát xạ và các tia sóng 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 2.1b. Cung tròn trong mặt phẳng xOz được xác định bởi phương trình:

$$\frac{dx}{d\theta} = f_c \cos \theta \quad (2.5)$$

Trong đó, x là khoảng cách từ giao điểm của các điểm trên cung tròn f_c so với trục bức xạ Oz . Bằng việc giải đồng thời ba phương trình vi phân (2.3), (2.4) và (2.5), ta có thể xác định được cấu trúc của mặt trong và mặt ngoài của thấu kính, thỏa mãn điều kiện Abbe sin.

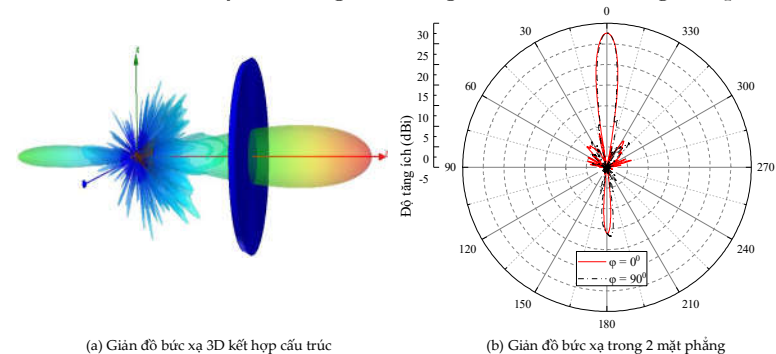
b) Giải pháp sử dụng thấu kính có chỉ số khúc xạ âm

Trong phần này của luận án, tác giả đề xuất sử dụng thấu kính có chỉ số khúc xạ âm áp dụng cho các cấu trúc truyền thống 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 ta có thể xác định được các cấu trúc thấu kính với cùng điều kiện, như trong Hình 2.1c,d. Thấu kính có chỉ số khúc xạ âm sử dụng trong luận án được giả định là vật liệu đồng nhất đẳng hướng với sóng điện từ. 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.

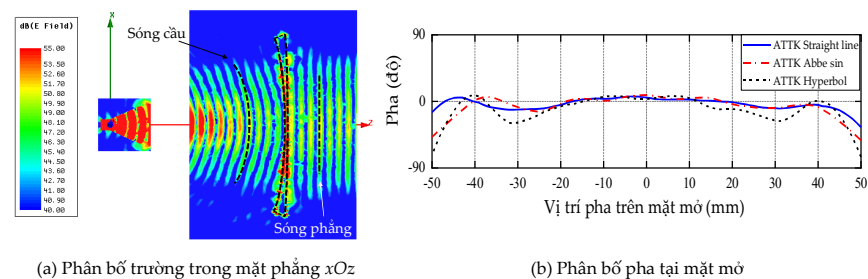
2.1.2 Mô phỏng và đánh giá kết quả

Bằng việc sử dụng phần mềm tính toán MATLAB để giải đồng thời các phương trình vi phân, nghiệm của phương trình là tọa độ các điểm trên bề mặt của thấu kính. Các tham số cấu trúc của thấu kính trong luận án được thể

hiện như trong Hình 2.6. Theo đó ta thấy rằng, anten thấu kính NRI với cấu trúc đề xuất có hệ số tăng ích cực đại đạt giá trị 27,48 dBi cao hơn so với các cấu trúc anten thấu kính NRI dạng hyperbol và điều kiện Abbe sin lần lượt là 26,93 dBi và 27,25 dBi. Bên cạnh đó, biên độ cánh sóng bên của ATTK 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 ATTK với điều kiện Abbe sin. Điều này cho thấy anten thấu kính NRI với điều kiện SL đề xuất có khả năng bức xạ tốt hơn so với hai loại anten thấu kính NRI truyền thống với cùng kích thước và nguồn phát xạ.



Hình 2.6: Giảm đồ bức xạ 3D và mặt cắt trong mặt phẳng $\varphi = 0^\circ$, $\varphi = 90^\circ$ của cấu trúc ATTK đề xuất.



Hình 2.7: Phân bố điện trường và phân bố pha của ATTK đề xuất.

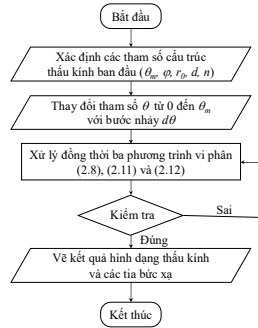
b) Phân bố biên độ điện trường và phân bố pha của anten thấu kính

Phân bố biên độ điện trường trong mặt phẳng xOz và phân bố pha tại mặt mở của ATTK có cấu trúc đề xuất được trình bày như trong Hình 2.7. Anten thấu kính NRI 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. Phân bố pha tại

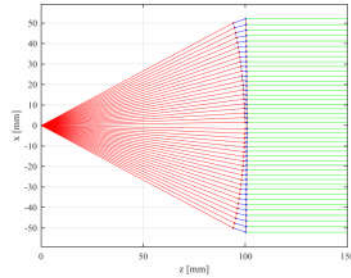
Để thỏa mãn điều kiện Straight line đề xuất, thì phương trình đường thẳng chứa các giao điểm của các tia sóng được xác định bởi phương trình sau:

$$\frac{dx}{d\theta} = \frac{f_T}{\cos^2\theta} \quad (2.10)$$

Nghiệm của ba phương trình vi phân (2.6), (2.9) và (2.10) 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.



(a) Lưu đồ thuật toán xác định cấu trúc của ATTK đề xuất



(b) Cấu trúc mặt cong và các tia sóng

Hình 2.5: Lưu đồ thuật toán và cấu trúc mặt cong của thấu kính 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 (2.6), (2.9) và (2.10) dựa trên lưu đồ thuật toán được trình bày như trong Hình 2.5a, và các điều kiện tham số đầu vào của thấu kính được xác định như trong Bảng 2.1, ta có thể xác định được cấu trúc thấu kính thỏa mãn điều kiện Straight line đề xuất, được thể hiện như trong Hình 2.5b.

Từ tọa độ các điểm trên hai mặt cong của thấu kính, tác giả sử dụng phần mềm tính toán trường điện từ Ansys HFSS để xây dựng mô hình và mô phỏng cấu trúc anten thấu kính có chỉ số khúc xạ âm thỏa mãn điều kiện SL đề xuất với nguồn phát xạ là anten loa nón đặt tại tiêu điểm của thấu kính. Kết quả đạt được cụ thể như sau:

2.2.3 Mô phỏng, đánh giá kết quả

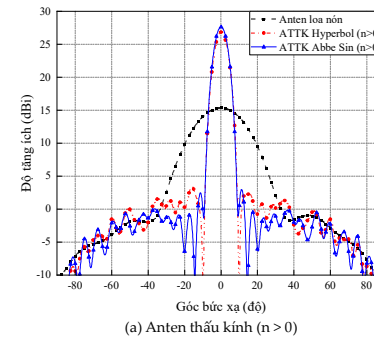
a) Giảm đồ bức xạ của cấu trúc anten thấu kính đề xuất

Giảm đồ bức xạ 3D và trong hai mặt phẳng với $\varphi = 0^0$, $\varphi = 90^0$ của anten

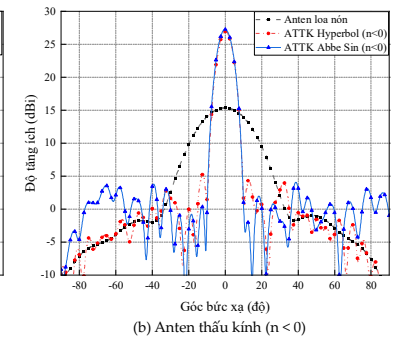
hiện như trong Bảng 2.1. Kết hợp sử dụng phần mềm mô phỏng trường điện từ Ansys HFSS, cho phép tác giả mô hình hóa các cấu trúc và tính toán các đặc tính bức xạ của anten thấu kính có chỉ số khúc xạ dương và chỉ số khúc xạ âm. Kết quả mô phỏng và các phân tích đánh giá được trình bày như sau:

Bảng 2.1: Các tham số điều kiện đầu vào của cấu trúc thấu kính.

Các tham số cấu trúc		Giá trị	Đơn vị
F	Khoảng cách từ tiêu điểm tới đỉnh thấu kính	100	mm
D	Đường kính của thấu kính	100	mm
μ_r	Độ từ thẩm tương đối	1 và -1	
ϵ_r	Độ điện thẩm tương đối	2 và -2	
$\tan\delta$	Tổn hao điện môi	0.001	
θ_m	Góc bức xạ cực đại tại 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) Anten thấu kính ($n > 0$)



(b) Anten thấu kính ($n < 0$)

Hình 2.2: Giảm đồ bức xạ của anten loa nón và ATTK trong mặt phẳng E.

a) Các đặc tính bức xạ của các cấu trúc anten thấu kính

Từ giảm đồ bức xạ của các loại anten được thể hiện như trong Hình 2.2, ta thấy rằng anten thấu kính có khả năng bức xạ hiệu quả hơn so với anten loa nón khi hệ số tăng ích cực đại cải thiện được hơn 11,5 dB. Hệ số tăng ích cực đại của anten thấu kính được duy trì ở mức cao hơn 26,85 dBi. Anten thấu kính NRI với điều kiện Abbe sin và Hyperbol có hệ số tăng ích cực đại và biên độ cánh sóng bên gần đạt được bằng giá trị của anten thấu kính có chỉ số khúc xạ dương. Độ rộng cánh sóng chính theo mức nửa công suất (HPBW) của anten thấu kính được thu nhỏ lại trong khoảng $7,22^0 - 8,03^0$ trong khi đó giá trị này của anten loa nón là $29,37^0$. Điều này cho thấy búp sóng chính của anten thấu kính hẹp, khả năng tập trung năng lượng tốt, tính định hướng cao.

b) Kích thước thấu kính

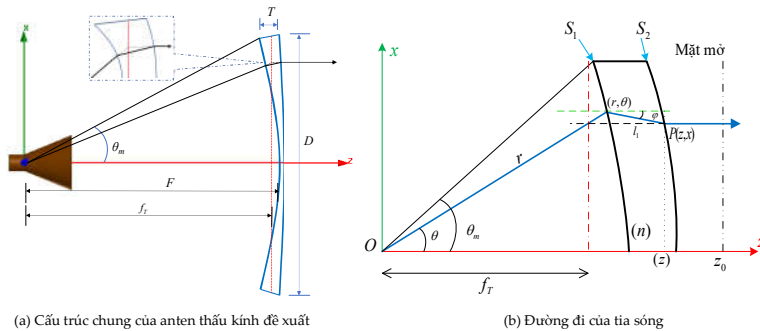
Khi sử dụng thấu kính có chỉ số khúc xạ âm, độ dày của thấu kính được giảm đi rõ rệt. Đối với thấu kính có chỉ số khúc xạ dương có dạng hyperbol và điều kiện Abbe sin, độ dày của thấu kính tại tâm lần lượt là 24,51 mm và 28,66 mm. Trong khi đó, độ dày của thấu kính có chỉ số khúc xạ âm tại mép của thấu kính chỉ là 6,1 mm và tại tâm là 1 mm. Điều này giúp cho kích thước tổng thể của ATTK 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.

Bảng 2.2: Bảng tổng hợp kết quả mô phỏng.

Tham số	AT loa	ATTK với $n > 0$		ATTK 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

2.2 Đề xuất giải pháp tính toán, xác định cấu trúc anten thấu kính NRI 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.



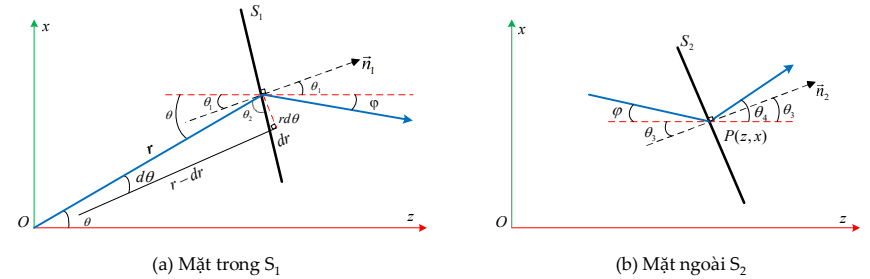
Hình 2.3: Cấu trúc anten thấu kính NRI với điều kiện Straight line.

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 (Straight line - SL), được thể hiện là đường nét đứt màu đỏ vuông góc với trục bức xạ Oz như trong Hình 2.3. 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

Để tính toán cấu trúc mặt cong của thấu kính, tác giả sử dụng phương pháp tính toán vi phân. Các tia sóng tới, tia khúc xạ và góc khúc xạ của tia sóng tại hai mặt của thấu kính thỏa mãn điều kiện khúc xạ Snell, như trong Hình 2.4.



Hình 2.4: Đường đi của tia sáng và góc khúc xạ tại mặt cong S_1 và S_2 .

Dựa vào đường đi của tia sáng, tác giả xác định được các phương trình mặt cong của thấu kính với điều kiện Straight line đề xuất như sau.

Phương trình mặt cong phía trong S_1 được xác định bởi:

$$\frac{dr}{d\theta} = \frac{n^2 r \sin \theta (z - r \cos \theta) + r n l_1 \cos \theta \sin \varphi}{n^2 r \cos \theta (z - r \cos \theta) - n l_1 \sin \theta \sin \varphi + l_1} \quad (2.6)$$

Trong đó, l_1 là chiều dài điện của tia sóng trong môi trường thấu kính được cho bởi phương trình sau:

$$l_1 = \frac{n(z - \cos \theta)}{\cos \varphi} = l_0 + z - z_0 - r \quad (2.7)$$

$$\varphi = \arccos\left(\frac{n(z - \cos \theta)}{l_1}\right) \quad (2.8)$$

Cấu trúc mặt cong phía ngoài S_2 được xác định bởi phương trình:

$$\frac{dz}{d\theta} = \frac{-n l_1 \sin \varphi}{l_1 + n^2(z - r \cos \theta)} \frac{dx}{d\theta} \quad (2.9)$$