

SỬ DỤNG THẤU KÍNH SIÊU VẬT LIỆU CHO ANTEN TẠI TRẠM GỐC TRONG THÔNG TIN DI ĐỘNG

Phan Thanh Minh, Võ Phương Lâm, Trịnh Văn Khích, Nguyễn Anh Đức

Trường Đại học Thông tin Liên lạc

Tóm tắt: Các mô hình bức xạ của anten tại trạm gốc hiện nay đã sử dụng mảng anten cấp nguồn tuyến tính để đạt được đặc tính cánh sóng bên thấp. Để đơn giản cấu trúc anten, một số tác giả đã thay thế mảng anten cấp nguồn bằng một anten lưỡng cực làm nguồn bức xạ cho anten thấu kính. Tuy nhiên, nghiên cứu lại gặp vấn đề là độ dày thấu kính lớn, dẫn tới kích thước anten cồng kềnh. Để giải quyết vấn đề này, nhóm tác giả đã nghiên cứu việc sử dụng thấu kính siêu vật liệu để thay thế cho thấu kính thông thường. Trong bài báo này, nhóm tác giả đã thiết kế cấu trúc anten và sử dụng phần mềm mô phỏng MATLAB để phân tích, tính toán và đánh giá kết quả đạt được của nghiên cứu.

Từ khóa: Anten thấu kính, nguồn bức xạ, mảng tuyến tính, thấu kính siêu vật liệu

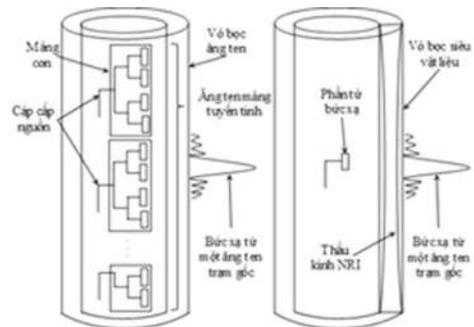
1. Mở đầu

Trong hệ thống anten cho trạm gốc trong thông tin di động hiện hành, các anten mảng tuyến tính để đạt được độ lợi theo yêu cầu, các phần tử của anten là các anten chấn từ đáp ứng được dải tần hoạt động rộng. Ngoài ra, các phần tử của mảng được chia thành các mảng nhỏ để giảm các cấp cấp nguồn. Trong những năm gần đây, anten cho trạm gốc trong thông tin di động sử dụng 2 hoặc nhiều tần số điều này dẫn tới cấu trúc mạng cấp nguồn lớn.

Trong những năm gần đây, một số loại siêu vật liệu có hệ số khúc xạ âm đang được nghiên cứu rộng rãi ở dải sóng siêu cao tần, sóng milimet và vùng ánh sáng nhìn thấy. Thấu kính có chiết suất âm đang được ứng dụng ngày càng nhiều trong truyền lan sóng điện từ [2] và các loại thiết bị sử dụng thấu kính lõm [3]. Ngoài ra, anten thấu kính đang được đề xuất là loại anten có góc quét bức xạ rộng [4], [5]. Bộ cộng hưởng băng diện môi dựa có cấu trúc siêu vật liệu được sử dụng để thiết kế và đo thử anten thấu kính [6]. Với việc sử dụng cấu trúc này, kích thước của anten thấu kính đã được giảm nhỏ do tiêu cự của thấu kính có chiết suất âm giảm lại.

Để giảm số lượng các phần tử bức xạ và kích thước cho anten tại trạm gốc, bài báo này đã đề xuất giải pháp sử dụng vỏ bọc siêu vật liệu và nguồn cấp là một anten chấn từ lưỡng cực cho anten. Hình dạng của thấu kính được thiết kế dựa phương pháp định hình thấu kính trong trường hợp sử dụng vật liệu là chất điện môi thông thường.

2. Vỏ bọc siêu vật liệu



Hình 1. Cấu hình của (a) anten trạm gốc thông thường và (b) được đề xuất.

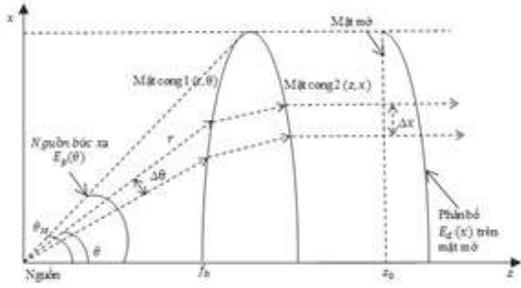
Hình 1 thể hiện cấu trúc cơ bản của anten tại trạm gốc thông thường và cấu trúc đề xuất. Trong anten trạm gốc thông thường, mảng anten tuyến tính được chia thành các mảng con. Mỗi mảng con bao gồm một số thành phần bức xạ. Ví dụ, một mảng có 16 phần tử được tạo thành từ 4 mảng con và mỗi mảng con có 4 phần tử bức xạ. Mạch cấp nguồn được kết nối tới từng mảng con. Do đó, đòi hỏi anten phải có kích thước lớn để dành không gian cho mạng cấp nguồn khi anten hoạt động đa tần số.

Hình dạng của thấu kính làm bằng vật liệu điện môi tự nhiên có dạng lõm. Khi sử dụng thấu kính này làm vỏ bọc cho anten thì đường kính của anten tại trạm gốc dày. Mặt khác, nếu sử dụng thấu kính có chiết suất âm sẽ giảm được độ dày của thấu kính do nó có khúc xạ âm. Vì vậy, sử dụng vỏ bọc siêu

vật liệu cho anten trạm gốc có kích thước nhỏ hơn trong khi vẫn đạt được các đặc tính bức xạ.

3. Phương pháp xác định hình dạng thấu kính

3.1. Phương trình xác định hình dạng thấu kính cơ bản



Hình 2. Cấu hình anten

Hình 2 thể hiện các tham số cơ bản của thấu kính. Thấu kính có cấu trúc tròn xoay quanh trục z. Năng lượng bức xạ của nguồn cấp là $E_p^2(\theta)$. Năng lượng phân bố trên mặt mờ là $E_d^2(x)$, x_m biểu thị bán kính của thấu kính. θ_M chỉ góc bức xạ tối đa tới thấu kính. Thấu kính được thiết kế dựa vào phương pháp tia dò. Các tia dò được thể hiện bằng các đường nét đứt. Các tia phát ra từ nguồn bức xạ bị khúc xạ khi qua thấu kính và trở thành các tia song song với nhau. Điều này có nghĩa là pha của anten tại mặt mờ là đồng pha.

Hình dạng của bề mặt thấu kính cơ bản tính toán dựa trên ba phương trình sau:

Điều kiện khúc xạ trên mặt trong của thấu kính (mặt đối diện với nguồn bức xạ) được xác định theo phương trình.

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

Trong đó, n là chiết suất của thấu kính, θ và θ' lần lượt là góc tới và góc khúc xạ trên mặt 1.

Điều kiện khúc xạ trên mặt ngoài của thấu kính (mặt đối diện với mặt mờ của anten) được trình bày theo phương trình sau.

$$\frac{dz}{d\theta} = \frac{n \sin(\theta')}{1 - n \cos(\theta')} \frac{dx}{d\theta} \quad (2)$$

Điều kiện thứ ba là điều kiện bảo toàn năng lượng trước và sau khi bức xạ qua thấu kính, được thể hiện theo phương trình sau.

$$\frac{dx}{d\theta} = \frac{E_p^2(\theta) \sin \theta \int_0^{x_m} E_d^2(x) x dx}{\int_0^{\theta_M} E_p^2(\theta) \sin \theta d\theta E_d^2(x) x} \quad (3)$$

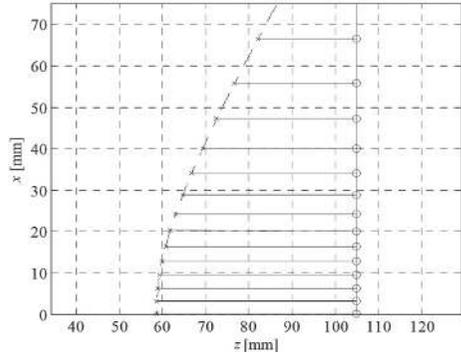
Sử dụng phần mềm MATLAB để tính toán đồng thời ba phương trình vi phân ở trên. Để đảm bảo tính chính xác khi giải phương trình này, mặt cong của thấu kính được thiết kế theo hình hyperpol.

Trong tài liệu [7], quan hệ giữa năng lượng của nguồn bức xạ và nguồn phân bố trên mặt mờ của anten được xác định lần lượt theo công thức (4) và (5).

$$E_p^2(\theta) = \frac{(n-1)^2(n-\cos(\theta))}{(n \cos(\theta) - 1)^3} \quad (4)$$

$$E_d^2(\theta) = 1 \quad (5)$$

Hình dạng của thấu kính thiết kế được thể hiện trong hình 3 là thấu kính dạng hyperpol điều này chứng tỏ việc sử dụng phần mềm mô phỏng là chính xác.

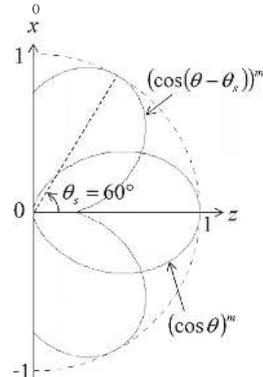


Hình 3. Cấu trúc của thấu kính dạng Hyperbolic có chiết suất n=2.

3.2. Phương trình xác định hình dạng vỏ bọc của anten

Trong trường hợp thiết kế vỏ bọc của anten, cấu trúc thấu kính trở thành trục đối xứng quanh trục x. Vì vậy, việc tính toán sự bảo toàn năng lượng được thay đổi như phương trình

$$\frac{dx}{d\theta} = \frac{E_p^2(\theta) \int_0^{x_m} E_d^2(x) x dx}{\int_0^{\theta_M} E_p^2(\theta) d\theta E_d^2(x) x} \quad (6)$$



Hình 4. Dạng diễn hình của $E_p^2(\theta)$.

Năng lượng của nguồn bức xạ được cho bởi phương trình (7). Trong đó, θ_s là góc chỉ hướng cực

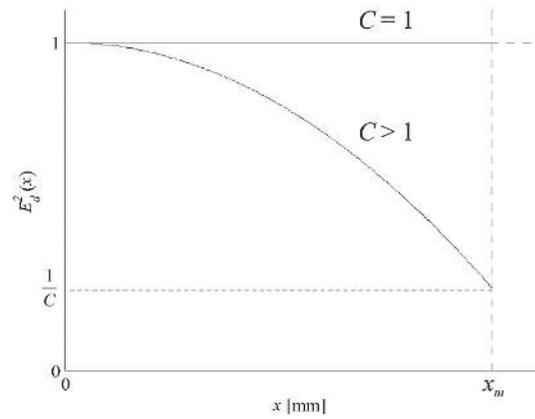
dại của nguồn bức xạ. m là hệ số định dạng chùm tia bức xạ. Đồ thị hình 4 thể hiện nguồn năng lượng bức xạ. Khi $\theta_s = 0^\circ$, hướng bức xạ cực đại dọc theo trục z . Khi $\theta_s = 60^\circ$, hướng bức xạ cực đại tại mép ngoài cùng của thấu kính. Nguồn bức xạ này được tạo ra bởi một ăng ten lưỡng cực có chiều dài xấp xỉ một bước sóng.

$$E_p^2(\theta) = (\cos(\theta - \theta_s))^m \quad (7)$$

Phân bố năng lượng trên mặt mở của anten được cho bởi công thức (8).

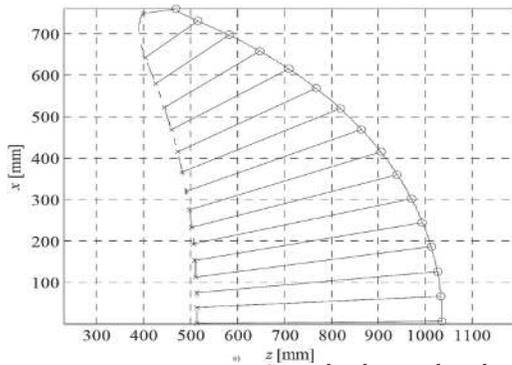
$$E_d^2(\theta) = 1 - \left(1 - \frac{1}{C}\right) \left(\frac{x}{x_m}\right)^2 \quad (8)$$

Ở đây, x_m là mép ngoài cùng của mặt mở. C là biên độ trường trên mặt mở. Tại mép ngoài cùng của mặt mở, mật độ năng lượng bức xạ là $\frac{1}{C}$. Khi $C = 1$, phân bố trường trên mặt mở là đồng dạng. Phân bố trường trên mặt mở của anten được thể hiện như hình 5.



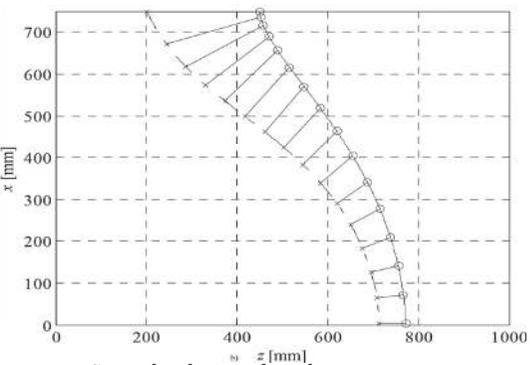
Hình 5. Dạng diễn hình của $E_d^2(x)$.

Một ví dụ được thiết kế mẫu như trong hình 6a với $n = 2$, $\theta_s = 0^\circ$, $m = 2$ và $C = 2$. Hình 6a thể hiện cấu trúc nửa trên của thấu kính làm vỏ bọc cho anten như trong hình 1b. Tổng chiều dài của vỏ bọc là 1500 mm. Độ dày của thấu kính là 500 mm. Điều này khó khăn cho việc thiết kế anten cho trạm gốc. Chính vì điều này, nhóm tác giả nghiên cứu sử dụng thấu kính siêu vật liệu làm vỏ bọc để giảm kích thước anten.



Hình 6. a) Mẫu thiết kế có chiết suất $n = 2$, b) Mẫu thiết kế có chiết suất $n = -2$.

Hình 6b thể hiện anten có thấu kính siêu vật liệu với các tham số. Ở đây $n = -2$, $\theta_M = 75^\circ$, $\theta_s = 0^\circ$ và $C = 2$ được chọn. Mặc dù độ dày của thấu kính được giảm tuy nhiên bán kính của thấu kính vẫn còn lớn.



4. Thiết kế thấu kính siêu vật liệu làm vỏ bọc cho anten trạm gốc

4.1. Các tham số để thiết kế vỏ bọc cho anten

Ý nghĩa và vai trò của các tham số trong việc thiết kế vỏ bọc anten được tổng hợp như trong bảng 1. Bằng cách điều chỉnh các tham số, chúng ta sẽ đạt được cấu trúc vỏ bọc cho anten mỏng và đường kính nhỏ.

Bảng 1. Vai trò của các tham số trong việc thiết kế vỏ bọc anten.

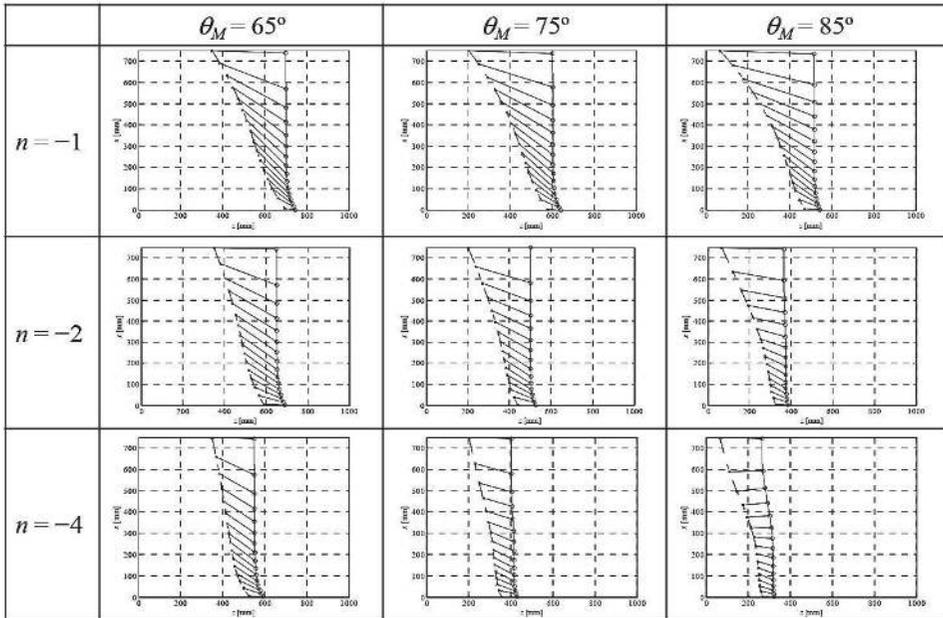
Tham số	Ý nghĩa	Vai trò
n	Giá trị âm thể hiện là siêu vật liệu	Ảnh hưởng tới độ mỏng và đường kính của thấu kính
θ_M	Góc tính từ điểm cấp nguồn tới mép ngoài cùng của thấu kính	Tác động tới đường kính của vỏ bọc anten
θ_s	Hướng bức xạ trực tiếp của nguồn cấp	Có thể ảnh hưởng đường kính vỏ bọc anten

m	Dạng bức sóng của nguồn cấp	Ảnh hưởng đến phân bố trường trên mặt mờ
C	Biên độ ở biên của phân bố trường tại mặt mờ	Xác định độ rộng của tia bức xạ từ vỏ bọc anten

4.2. Giảm đường kính vỏ bọc anten

Đối với anten của trạm gốc, đường kính vỏ bọc anten cần được giảm nhỏ để hạn chế sự ảnh hưởng của gió. Để giảm được đường kính của vỏ bọc chúng ta cần xem xét và tính toán các tham số được thể hiện trong bảng 1. Bằng cách thay đổi giá trị các tham số n ($n = -1, -2, -4$), $\theta_M = 65^\circ, 75^\circ, 85^\circ$, $\theta_s = 60^\circ$ và $C = 15$ ta đạt được kết quả như biểu

diễn trên hình 7. Từ hình 7 ta có thể thấy, khi ta tăng các giá trị n và θ_M thì đường kính của thấu kính làm vỏ bọc cho anten giảm. Khi $n = -4$, $\theta_M = 85^\circ$, bán kính của thấu kính được giảm xuống còn 300 mm. Điều này giúp cho việc thiết kế anten cho trạm gốc gọn nhẹ hơn nhưng vẫn đảm bảo được các đặc tính cơ bản của anten.



Hình 7. Mẫu thiết kế thấu kính siêu vật liệu.

5. Kết luận

Một trong số các tính chất quan trọng của siêu vật liệu là vật liệu nhân tạo có chiết suất âm (trong đó cả độ từ thẩm và độ điện thẩm đều có giá trị âm). Trong bài báo nhóm tác giả áp dụng đồng thời 3 phương trình vi phân (1), (2), (3) cho hai giá trị chiết suất dương ($n > 0$) và chiết suất âm ($n < 0$) sử dụng phần mềm Matlab để tính toán cho thấy vì $n < 0$ nên kích thước thấu kính được giảm rất nhiều so với trường hợp $n > 0$, và kết quả cho thấy sự hiệu quả của việc áp dụng thấu kính có chiết suất âm trong việc thiết kế anten tại trạm gốc.

Việc áp dụng anten thấu kính, cụ thể là thay thế thấu kính có chiết suất tự nhiên thông thường

bằng thấu kính có chiết suất âm đã được thực hiện và cho thấy sự hiệu quả. Cấu trúc cấp nguồn cho anten cũng được đơn giản hóa bằng việc thay thế mảng anten tuyến tính bằng một anten lưỡng cực. Kết quả đạt được, cho thấy việc nghiên cứu là chính xác và rõ ràng khi thiết kế được thấu kính chiết suất âm làm vỏ bọc cho anten có cấu trúc mỏng hơn và đường kính nhỏ hơn cấu trúc anten chiết suất thông thường.

Còn siêu vật liệu nhóm tác giả không đề cập trong bài báo này, nhóm tác giả chỉ tập trung vào những vật liệu có chiết suất âm nói chung. Hay nhấn mạnh vào tính chất chiết suất âm của siêu vật liệu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Grbic, and G.V. Eleftheriades, "Subwavelength focusing using a negative-refractive-index transmission line lens," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol.2, pp.186-189, 2003.
2. D.H. Kwon, and D.H. Werner, "Beam scanning using flat transformation electromagnetic focusing lenses," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol.8, pp.1115-1118, 2009.
3. M. Nerute, M. Navarro-Cia, I. Campillo and M. Sorolla, "Antenna applications of negative refraction parabolic lens of subwavelength hole arrays," IEEE Int. Workshop Antenna Tech., pp.1-4, Santa Monica, CA, March 2009.
4. S. Kamada, N. Michishita, and Y. Yamada, "Metamaterial lens antenna using dielectric resonators for wide angle beam scanning," IEEE AP-S Int. Symp., 228.3, pp.1-4, Toronto, Canada, July 2010.
5. N. Michishita, T. Mori, S. Kamada, and Y. Yamada, "Dielectric metamaterial lens antenna for wide angle beam scanning," IEEE Int. Conf. Wireless Information Tech. and Systems, 304.6, pp.1-4, Honolulu, HI, Aug. 2010
6. T. Ueda, A. Lai and T. Itoh, "Negative refraction in a cut-off parallelplate waveguide loaded with two-dimensional lattice of dielectric resonators," 36th Eur. Microw. Conf., pp.435-438, Manchester, U.K., Sept. 2006.
7. S. Silver, Microwave Antenna Theory and Design, Peter Peregrinus Ltd., Sec. 11-3, pp.390-391, 1986.

USING SUPER MATERIAL LENS FOR ANTENNA AT THE ORIGINAL STATIONIN MOBILE INFORMATION

Phan Thanh Minh, Vo Phương Lam, Tranh Văn Khich, Nguyen Anh Duc

Telecommunications University

Abstract: *Radiation patterns of present mobile base station antennas are designed to be low sidelobe characteristics. To achieve this radiation pattern, linear array feeds are employed. For simplicity of antenna configuration, authors considered to replace antenna radome by a lens antenna. The array feed also replaced by a single feed. However, it is considered that lens thickness will be main problem. This problem may be solved by employing metamaterial lens. In this paper, design method of lens antenna and developed MATLAB program are explained. And important antenna parameters to achieve practical radome shapes are studied. In order to achieve a slender radome shape, metamaterial is shown to be effective. And, adequate feed radiation pattern is also clarified.*

Keywords: *Shaped dielectric lens antenna, radiation pattern shaping, linear array feed, metamaterial lens antennag.*