

ANTEN THẤU KÍNH PHẪNG ỨNG DỤNG TẠI BĂNG TẦN X

TRANSMITARRAY ANTENNA DESIGN FOR X-BAND APPLICATIONS

Nguyễn Minh Thiện, Nguyễn Bình Dương

Trường Đại học quốc tế - Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh;
nbduong@hcmiu.edu.vn, minhthien6895@gmail.com

Tóm tắt - Bài báo trình bày một loại anten thấu kính phẳng hoạt động ở băng tần X, cho các ứng dụng thông tin vệ tinh. Phần tử anten thấu kính phẳng được thiết kế dựa trên cấu trúc đa lớp với phần tử bức xạ hình chữ C cảm ứng thông qua khe hở hình vành khuyên. Các phần tử anten thấu kính được thiết kế chỉ với 2 bản mạch và không yêu cầu gia công phức tạp nhưng có khoảng bù pha rộng và ít hao tổn. Trong bài báo này, kết quả mô phỏng cho thấy khoảng pha truyền dẫn đạt tới 270° với băng thông -3dB đạt $0,8\text{ GHz}$. Phần tử thấu kính phẳng được tối ưu để có các bước pha 45° . Một mẫu anten thấu kính phẳng đã được chế tạo và đo đạc tại tần số 12 GHz nhằm mục đích đánh giá khả năng hoạt động của các phần tử bức xạ. Kết quả mô phỏng lần đo đạc cho thấy mô hình anten có đặc tính bức xạ và độ lợi rất tốt.

Từ khóa - anten thấu kính; anten mảng phản xạ; anten có độ lợi cao; anten điều khiển hướng bức xạ; anten cho vệ tinh

Abstract - The paper presents a transmitarray antenna working at X-band frequency for satellite information applications. The transmitarray element is designed based on the multi-layer structure with C-patches coupled through ring slots. Only two substrates are required to obtain a wide phase range without severe loss. In this paper, seven unit cells are designed. Simulated results show that the cells can provide a 0.8 GHz common -3dB bandwidth, cover 270° phase range with step of 45° . A transmitarray antenna is designed and measured at 12 GHz to verify the performance of the unit cells. The simulated and measured results show that the antenna has a sufficient phase range, low loss as well as good radiation pattern.

Key words - transmitarray antenna; flat lens antenna; high gain antenna; antenna for controlling radiation direction; antenna for satellites

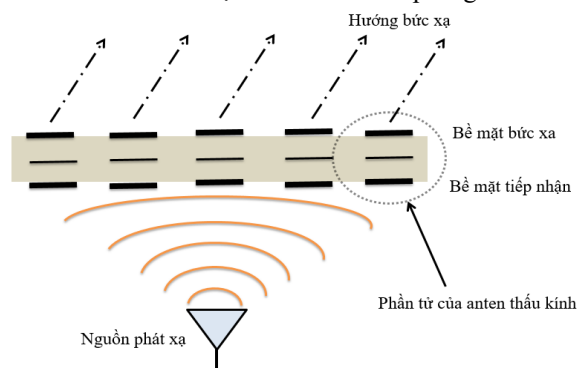
1. Đặt vấn đề

Trong các hệ thống truyền thông vệ tinh hay hệ thống radar, một bộ phận không thể thiếu đó là anten độ lợi cao (high gain antenna) nhằm tập trung năng lượng bức xạ vào hướng mong muốn. Hiện nay, các anten có độ lợi cao sử dụng công nghệ vi dải có thể kể đến như: anten mảng định pha (phased array antenna), anten mảng phản xạ (reflectarray antenna) hay anten thấu kính phẳng (transmitarray antenna). Trong 3 loại anten này, anten mảng định pha có ưu điểm về kích thước nhỏ gọn. Mặc dù vậy, hệ thống cấp năng lượng cho các anten phần tử bằng dây vi dải gây nên tổn hao trong việc truyền tín hiệu và ảnh hưởng đến độ thị bức xạ. Anten mảng phản xạ loại bỏ được hệ thống cấp năng lượng bằng dây vi dải đến từng anten phần tử, do đó có sự cải thiện về tổn hao và cải thiện về chất lượng độ thị bức xạ. Tuy nhiên, một nhược điểm đối với loại anten này là một phần năng lượng bức xạ từ anten bị chặn bởi chính nguồn phát do nguồn phát đặt cùng không gian với hướng bức xạ.

Tương tự như anten mảng phản xạ, anten thấu kính phẳng hoạt động dựa trên nguyên lý bù pha tại từng phần tử, mặt khác loại bỏ được hiện tượng che chắn bởi nguồn phát như anten mảng phản xạ. Với các lý do trên, cộng với các ưu điểm về kích thước, khối lượng, giá thành chế tạo, anten thấu kính phẳng hiện nay đang nhận được nhiều sự quan tâm của các nghiên cứu cho những ứng dụng yêu cầu có anten độ lợi cao.

Cấu tạo của anten thấu kính phẳng bao gồm một mảng các phần tử thấu kính được cấp năng lượng bởi một anten cấp năng lượng đặt tại tiêu cự. Mảng các phần tử thấu kính bao gồm mảng các phần tử Rx tiếp nhận năng lượng từ nguồn bức xạ và các phần tử Tx có nhiệm vụ bức xạ năng lượng nhận từ các phần tử Rx ra không gian. Để năng lượng bức xạ có thể tập trung vào một hướng mong muốn, từng

phần tử thấu kính phải có khả năng điều chỉnh pha. Chính vì vậy, điểm mấu chốt trong thiết kế anten thấu kính phẳng là phải tìm được cấu trúc của phần tử thấu kính đáp ứng hai khả năng cùng một lúc: Khả năng truyền tín hiệu giữa các phần tử mảng Rx và Tx, và khả năng thay đổi pha truyền dẫn trong quá trình truyền tín hiệu giữa phần tử Rx-Tx. Hình 1 miêu tả mô hình cơ bản của một anten thấu kính phẳng.



Hình 1. Mô hình chung của một anten thấu kính phẳng

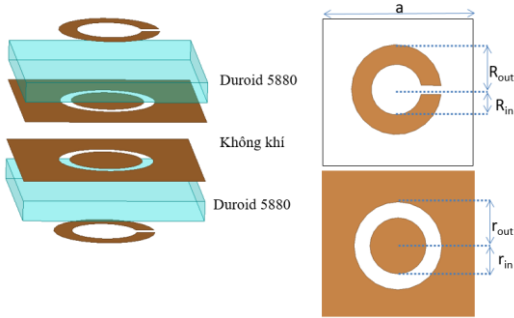
Một số nghiên cứu đề xuất cấu trúc phần tử anten thấu kính cho phép thay đổi pha truyền dẫn với việc thay đổi độ dài dây vi dải kết nối giữa phần tử Rx và Tx như đề xuất trong [1,2] hoặc thay đổi pha truyền dẫn bằng cách thay đổi hướng của phần tử thấu kính [3,4] hoặc sử dụng vật liệu metamaterial [5]. Một thiết kế khác dựa trên cấu trúc đa lớp và sử dụng phần tử FSS (Frequency selective surface) [6]. Phương pháp này cho phép đơn giản hóa cấu tạo của anten, giảm suy hao, đồng thời có khả năng phát triển ở các ứng dụng dải tần millimet. Tuy nhiên, thiết kế này yêu cầu bản mạch xếp cách nhau một khoảng cách bằng $\frac{1}{4}$ bước sóng làm gia tăng kích thước cũng như chi phí thi công.

Trong bài báo này, nhóm tác giả đề xuất một thiết kế cho phần tử thấu kính dựa trên cấu trúc đa lớp. Phần tử thấu

kính bao gồm chỉ 2 bản mạch với sự kết hợp của phần tử anten hình chữ C và khe hở hình vành khuyên. Phần tử được thiết kế để làm việc tại băng tần X với tần số trung tâm là 12 GHz. Pha truyền dẫn của phần tử thấu kính được thay đổi với việc điều chỉnh kích thước phần tử C và khe hở hình vành khuyên. Trong nghiên cứu này, một tập hợp gồm 7 phần tử có bước pha cách nhau khoảng 45° đã được thiết kế. Một anten thấu kính phẳng cũng được chế tạo và đo đạc để đánh giá đặc tính bức xạ của các phần tử cũng như của một anten thấu kính phẳng.

2. Thiết kế phần tử anten thấu kính phẳng

2.1. Thiết kế



Hình 2. Cấu trúc phần tử cho anten thấu kính phẳng

Cấu trúc của một phần tử anten thấu kính phẳng được thể hiện chi tiết ở Hình 2. Cấu trúc này chỉ yêu cầu hai bản vật liệu xếp thẳng lên nhau với khoảng cách giữa hai bản là 3,5 mm. Vật liệu được sử dụng là Duroid 5880 với độ dày 3,175 mm và độ điện môi $\epsilon_r = 2,2$. Một anten vi dải hình chữ C được in lên mặt trên của hai bản vật liệu, một khe hở hình vành khuyên được đặt ở mặt dưới. Việc sử dụng vật liệu có độ dày nhằm gia tăng băng thông cho từng phần tử của anten.

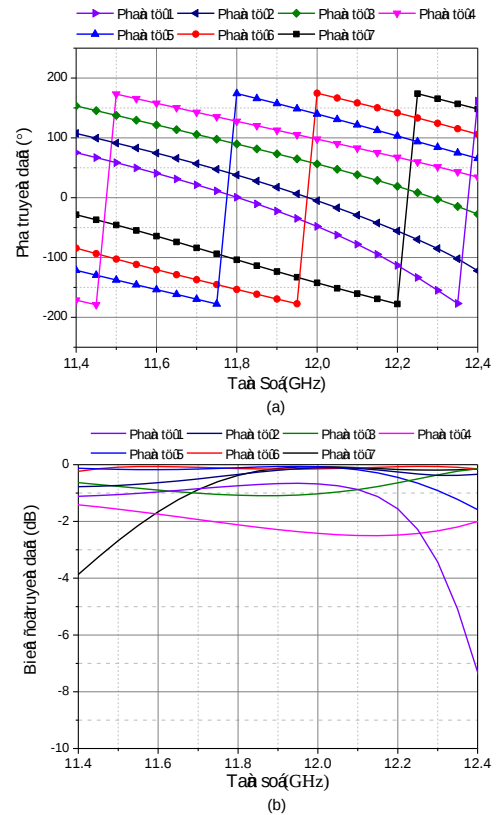
Nguyên tắc hoạt động của một phần tử anten thấu kính phẳng được giải thích như sau: sóng tới từ nguồn bức xạ đặt tại tiêu cự được tiếp nhận bởi phần tử chữ C và tiếp tục được cảm ứng qua phần tử chữ C bên mặt đối diện thông qua 2 khe hở hình vành khuyên nằm ở giữa. Thực chất, việc thay đổi kích thước của phần tử hình chữ C và khe hở hình vành khuyên kéo theo sự thay đổi tần số cộng hưởng của cả phần tử anten dẫn đến sự thay đổi về pha truyền dẫn. Chính vì thế, pha truyền dẫn đạt được thông qua việc thay đổi kích thước phần tử chữ C và kích thước rãnh hình vành khuyên đạt được cộng hưởng ở cùng một tần số. Tuy nhiên, hai bộ phận này sẽ được tinh chỉnh sao cho tần số cộng hưởng là gần nhau, do đó ta sẽ tăng được băng thông truyền dẫn. Phần tử được thiết kế để hoạt động ở tần số trung tâm 12 GHz và phân cực thẳng với chiều của trường điện E vuông góc với rãnh cắt ở bề mặt anten hình chữ C. Việc sử dụng anten hình chữ C kết hợp với khe hở hình vành khuyên nhằm khai thác khả năng cung cấp băng thông rộng như được chỉ ra trong nghiên cứu [7]. Với cấu trúc phần tử như đề xuất, dải pha truyền dẫn đạt được 270° với băng thông -3dB từ 11,6 GHz đến 12,4 GHz. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả tối ưu kích thước của phần tử chữ C và khe hở hình vành khuyên để đạt được 7 phần tử cung cấp 7 trạng thái pha với bước pha khoảng 45° . Ngoài yêu cầu về pha, các phần tử cần đạt được yêu cầu về độ suy hao thấp.

Bảng 1. Thông số kích thước của phần tử cho anten thấu kính phẳng

Phần tử	Vi dải hình chữ C (mm)		Rãnh hình vành khuyên (mm)		Pha truyền dẫn được chuẩn hóa về 0°
	R_{out}	R_{in}	R'_{out}	R'_{in}	
1	5	3,2	4,7	4,2	0°
2	4,9	3,5	4,4	3,9	45°
3	4,6	3,8	4,1	3,6	90°
4	4,1	3,1	3,95	3,45	135°
5	3,7	2,5	3,8	3,3	180°
6	3,5	2,5	3,8	3,1	225°
7	3,2	2,2	3,7	2,9	270°
$a = 18 \text{ mm}$					

2.2. Kết quả mô phỏng đáp ứng tần số của phần tử

Các phần tử thấu kính phẳng được phân tích và tối ưu với phần mềm mô phỏng HFSS của ANSYS. Một mô hình đã được thiết lập trong HFSS để mô phỏng nhằm tìm ra biên độ truyền dẫn cũng như pha truyền dẫn của phần tử cho anten thấu kính. Trong thực tế, mỗi phần tử sẽ đặt gần các phần tử khác khi thiết kế anten thấu kính, do đó mô hình của phần tử thấu kính phải được mô phỏng trong môi trường có các phần tử khác xung quanh. Kết quả mô phỏng pha và biên độ truyền dẫn được thể hiện trong Hình 3.



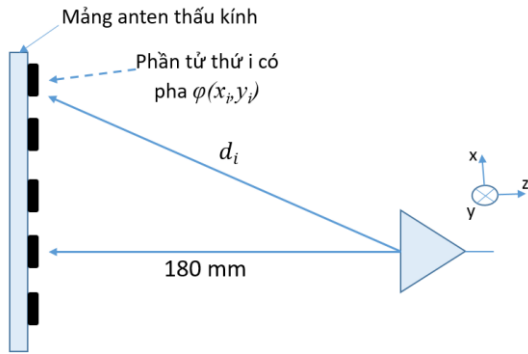
Hình 3. Kết quả mô phỏng pha (a) và biên độ truyền dẫn (b) của các phần tử

Kết quả mô phỏng đáp ứng tần số của các phần tử với kích thước khác nhau cho thấy -3dB băng thông chung cho toàn bộ bảy loại phần tử đạt được 0,8 GHz từ khoảng 11,5 GHz đến 12,3 GHz, tương ứng 6,6%. Kết quả trong Hình 3(a) cho thấy pha truyền dẫn của các phần tử khác nhau khoảng 45° tại 12 GHz và vẫn giữ xấp xỉ giá trị này trong khoảng tần số từ 11,4 GHz tới 12,3 GHz.

3. Thiết kế anten thấu kính phẳng

Sau khi được tối ưu để đạt được pha và biên độ truyền dẫn mong muốn, các phần tử được kết hợp với nhau để tạo thành anten thấu kính phẳng. Một anten thấu kính phẳng với 12x8 phần tử được chế tạo, đo đạc để khẳng định tính đúng đắn của thiết kế, thông qua đó đánh giá khả năng hoạt động của các phần tử thấu kính. Trong mảng anten, mỗi phần tử có khoảng cách là $a = 18 \text{ mm}$, tương đương $0,7\lambda$.

Anten thấu kính được cấp năng lượng từ một anten loa có tiết diện bề mặt $46 \text{ mm} \times 48 \text{ mm}$, độ lợi đo được vào khoảng 13,6 dBi. Khoảng cách từ mảng anten thấu kính đến anten loa được tính toán sao cho có hiệu suất bề mặt lớn nhất. Khoảng cách được xác định là 180 mm. Với khoảng cách này, góc chiếu từ anten loa đến các cạnh của mảng phần tử thấu kính tương ứng với góc mở -8 dB của đồ thị bức xạ của anten loa.



Hình 4. Cấu hình anten thấu kính phẳng

Nguyên lý hoạt động của anten thấu kính phẳng dựa trên cơ chế bù pha. Để năng lượng bức xạ từ anten có thể tập trung vào một hướng mong muốn (θ, ϕ) , độ lệch pha của các phần tử phải thỏa mãn công thức (1).

$$\varphi(x_i, y_i) = k_0(d_i - \sin\theta(x_i * \cos\phi + y_i * \sin\phi)) \quad (1)$$

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_f)^2 + (y_i - y_f)^2 + (z_i - z_f)^2} \quad (2)$$

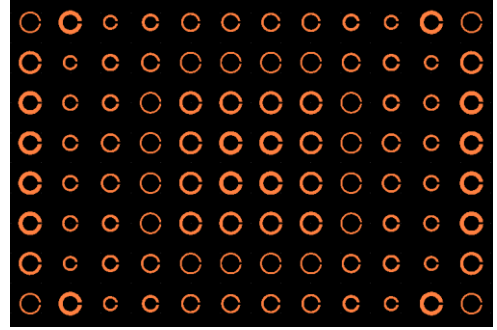
Trong đó: x_i, y_i là tọa độ của phần tử thứ i , x_f, y_f, z_f là tọa độ của nguồn bức xạ, $\varphi(x_i, y_i)$ là pha truyền dẫn tại phần tử i có tọa độ x_i, y_i .

Như đã trình bày ở trên, các phần tử cho anten thấu kính của nhóm tác giả gồm 7 phần tử truyền dẫn cung cấp được 7 giá trị pha truyền dẫn với $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ$. Chính vì vậy, pha bù ψ của phần tử thứ i tính từ công thức (1) sẽ được lượng tử hóa như sau:

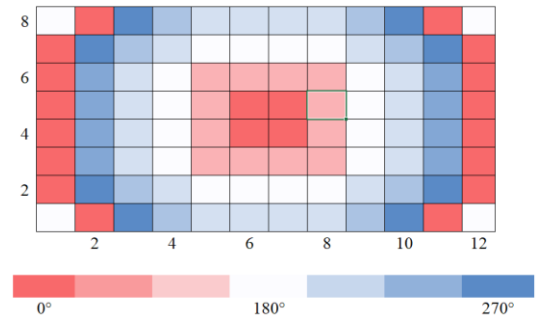
- $\Psi_i = 0^\circ$ nếu $-22,5^\circ < \varphi(x_i, y_i)$ tính bởi (1) $\leq 22,5^\circ$.
- $\Psi_i = 45^\circ$ nếu $22,5^\circ < \varphi(x_i, y_i)$ tính bởi (1) $\leq 67,5^\circ$.
- $\Psi_i = 90^\circ$ nếu $67,5^\circ < \varphi(x_i, y_i)$ tính bởi (1) $\leq 112,5^\circ$.
- $\Psi_i = 135^\circ$ nếu $112,5^\circ < \varphi(x_i, y_i)$ tính bởi (1) $\leq 157,5^\circ$.
- $\Psi_i = 180^\circ$ nếu $157,5^\circ < \varphi(x_i, y_i)$ tính bởi (1) $\leq 202,5^\circ$.
- $\Psi_i = 225^\circ$ nếu $202,5^\circ < \varphi(x_i, y_i)$ tính bởi (1) $\leq 247,5^\circ$.
- $\Psi_i = 270^\circ$ nếu $247,5^\circ < \varphi(x_i, y_i)$ tính bởi (1) $\leq 337,5^\circ$.

Mẫu thử nghiệm anten thấu kính 12x8 phần tử được thiết kế. Các phần tử này được sắp xếp sao cho năng lượng được tập trung vào hướng vuông góc với anten $(\theta=0, \phi=0)$. Để tập trung năng lượng vào hướng mong muốn, pha truyền dẫn $\varphi(x_i, y_i)$ của các phần tử anten thấu kính sẽ được

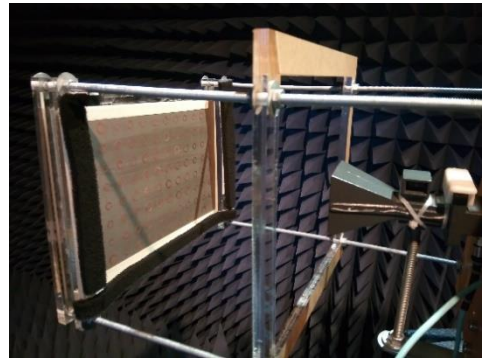
tính theo công thức (1). Như trình bày bên trên, trong công trình này, nhóm tác giả tối ưu kích thước phần tử anten thấu kính để cung cấp 7 giá trị của pha truyền dẫn, tương ứng với 7 phần tử anten với kích thước khác nhau như trình bày trong Bảng 1. Pha truyền dẫn $\varphi(x_i, y_i)$ của phần tử thứ i sau khi tính bằng công thức (1) sẽ được lượng tử hóa để chọn ra phần tử tương ứng. Ví dụ, nếu pha truyền dẫn $\varphi(x_i, y_i)$ của phần tử thứ i là 80° , nhóm tác giả sẽ chọn phần tử cung cấp pha truyền dẫn là 90° tương ứng với phần tử thứ 2 trong Bảng 1. Sắp xếp các phần tử được thể hiện trong Hình 5, pha truyền dẫn tương ứng với các phần tử thấu kính được thể hiện trong Hình 6.



Hình 5. Ảnh trực diện bề mặt mảng anten thấu kính phẳng



Hình 6. Sắp xếp về pha của các phần tử thấu kính



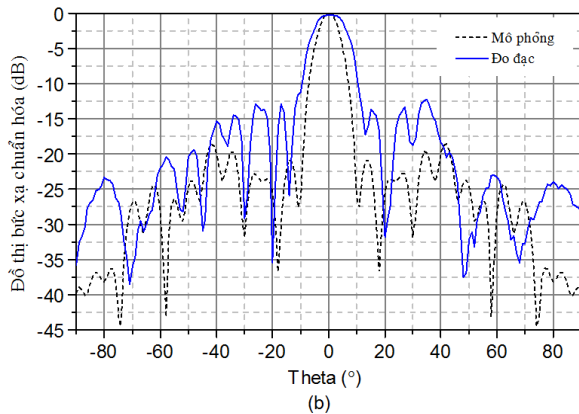
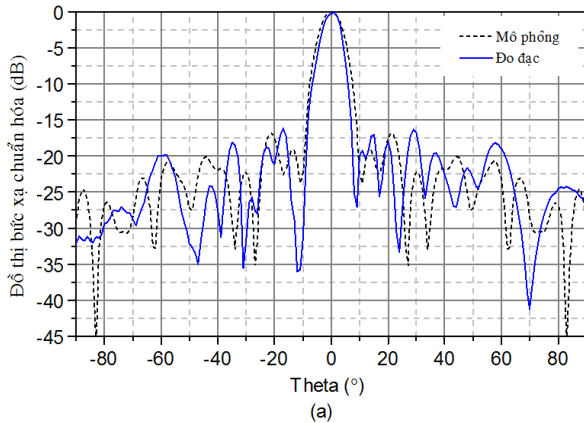
Hình 7. Anten thấu kính phẳng được đo đạc trong phòng hấp thụ

4. Đặc tính bức xạ của anten thấu kính phẳng

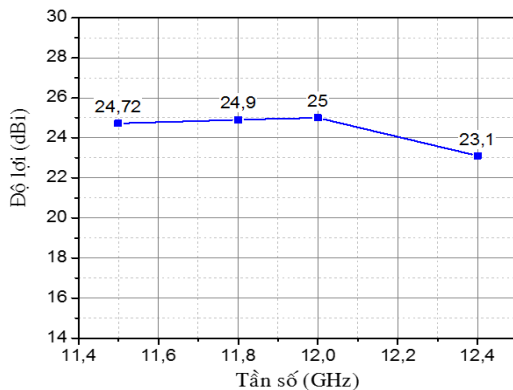
Kết quả mô phỏng và đo đạc đặc tính bức xạ của anten thấu kính phẳng được thể hiện trong Hình 7 cho cả 2 mặt phẳng E và mặt phẳng H tại tần số 12 GHz. Theo kết quả này, đặc tính bức xạ của anten trong mô phỏng và đo đạc không quá khác biệt. Tuy nhiên, độ lợi đo được tại tần số 12 GHz bị suy giảm khoảng 1,5 dBi so với độ lợi mô phỏng, còn 23,5 dBi, tương ứng với hệ số khẩu độ 35%.

Các búp sóng bên (side lobes) ở kết quả đo đạc có phần

cao hơn so với kết quả mô phỏng. Điều này là do có sự xuất hiện của hệ thống giá đỡ cho mảng antenna tạo thêm những bức xạ phụ không mong muốn khi đo đạc, trong khi đó môi trường của mảng antenna trong mô phỏng là lý tưởng, không có giá đỡ. Tuy có khác biệt nhưng đều thấp hơn -15 dB so với biên độ bức xạ cao nhất.



Hình 7. Đồ thị bức xạ ở mặt phẳng E (a) và mặt phẳng H (b) đo đạc tại tần số 12 GHz

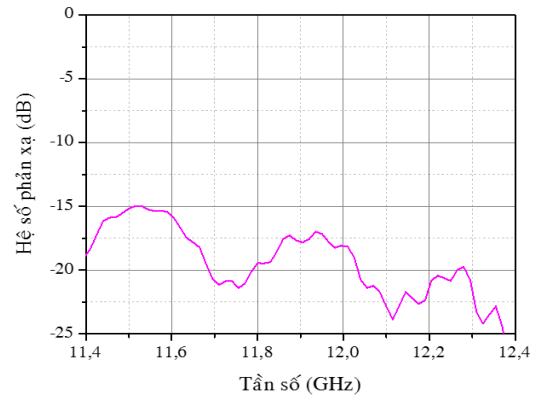


Hình 8. Độ lợi mô phỏng của antenna thấu kính theo tần số

Hình 8 thể hiện độ lợi mô phỏng được của antenna thấu kính phẳng ở các tần số khác nhau. Đặc tính bức xạ tốt nhất đạt được ở tần số 12 GHz, trong đó độ lợi cao nhất là 25,0 dBi, tương ứng hệ số khẩu độ lên tới 45%. Ở các tần số xung quanh, chúng ta thấy được sự sụt giảm về độ lợi, ví dụ tại độ lợi ở 11,5 GHz giảm gần 0,5 dB, ở 12,4 GHz giảm gần 2 dB. Điều này có thể được giải thích là vì sự sụt giảm biên độ truyền dẫn cũng như sự lệch về pha của các phần

từ truyền dẫn ở các tần số xa tần số trung tâm 12 GHz.

Hệ số phản xạ (S_{11}) cũng được đo đạc và thể hiện trong Hình 9. Kết quả cho thấy, trên dải tần từ 11,4 GHz tới 12,4 GHz, hệ số phản xạ luôn thấp hơn -15 dB. Mức độ phản xạ của antenna thấp nhất đo đạc được tại tần số 12,1 GHz với hệ số phản xạ là -23,3 dB. Tại tần số trung tâm 12 GHz, hệ số phản xạ đạt -17,5 dB.



Hình 9. Hệ số phản xạ đo đạc của antenna thấu kính

5. Kết luận

Trong bài báo này, nhóm tác giả trình bày thiết kế của một antenna thấu kính phẳng. Kết quả mô phỏng và đo đạc mẫu thử khẳng định tính đúng đắn của lý thuyết cũng như ưu điểm của các loại phản tử được đề xuất. Phản tử thấu kính có cấu trúc đơn giản, dễ chế tạo, có độ suy hao thấp, khoảng pha thay đổi là 270° trong dải tần từ -3 dB lên đến 0,8 GHz. Các kết quả cũng là cơ sở quan trọng khẳng định thấu kính phẳng do nhóm tác giả đề xuất hoàn toàn ứng dụng được trong các ứng dụng vệ tinh, hoặc radar nơi cần antenna có độ lợi cao, nhằm tập trung năng lượng vào một hướng.

Ghi nhận: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 102.01-2016.35.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] D. M. Pozar, "Flat lens antenna concept using aperture coupled microstrip patches", *IEEE Electronics Letters*, Vol. 32, No. 23, November 1996, pp. 2109-2111.
- [2] P. Padilla de la Torre and M. Sierra Castaner, *Transmitarray for Ku Band*, in The Second European Conference on Antennas and Propagation, Edinburgh, UK, 2007.
- [3] R. H. Phillion and M. Okoniewski, "Lenses for circular polarization using planar arrays of rotated passive elements", *IEEE Trans. Antenna Propag.*, Vol. 59, No. 4, April 2011, pp. 1217-1227.
- [4] L. Dussopt, J. Lanteri, T. Koleck, and R. Sauleau H. Kaouach, "Wideband low-loss linear and circular polarization transmit-arrays in V-band", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 59, No. 7, July 2011, pp. 2513-2523.
- [5] C. Pfeiffer and A. Grbic, "Metamaterial Huygens surfaces: Tailoring wave fronts with reflectionless sheets", *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 110, Iss. 19, 2013.
- [6] Colan G. M. Ryan, "A wideband transmitarray using dual-resonant double square rings", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 58, No. 5, May 2010, pp. 1486-1493.
- [7] B. D. Nguyen, K. T. Pham, V.-S. Tran, L. Mai and N. Yonemoto, "Reflectarray element using cut-ring patch coupled to delay line", *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, Vol. 14, No. 2, Feb. 2015, pp. 571-574.