

ANTEN MẢNG ĐỘ LỢI CAO VỚI MỨC BÚP PHỤ THẤP CHO HỆ THỐNG ĐỊNH VỊ **HIGH GAIN ARRAY ANTENNA WITH A LOW SIDELobe LEVEL FOR POSITIONING SYSTEMS**

Bùi Thị Duyên, Nguyễn Tiến Dũng, Nguyễn Ngọc Trung

Trường Đại Học Điện Lực

Ngày nhận bài: 04/06/2024, Ngày chấp nhận đăng: 25/07/2024, Phản biện: TS. Trần Đình Lâm

Tóm tắt:

Bài báo trình bày một anten mảng mới có độ lợi cao và búp sóng phụ thấp ở tần số 5GHz ứng dụng cho định vị vô tuyến. Anten mảng được đề xuất gồm 16 phần tử anten dẫn xạ được thiết kế trên Rogers 4003C, chiều dày $h = 0,8$ mm, hằng số điện môi $\epsilon_r = 3,55$ và hệ số tổn hao là 0,0027, kích thước tổng của mảng là $58,5 \times 27,4$ cm². Để có được búp sóng phụ thấp, các anten phần tử trong mảng có độ lợi khác nhau được sắp xếp tuân theo quy tắc phân phối Chebyshev, chúng sử dụng mạng tiếp điện nối tiếp dựa trên bộ chia nguồn hình chữ T. Anten được thiết kế dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn sử dụng phần mềm CST (Computer Simulation Technology). Kết quả mô phỏng cho thấy anten mảng đề xuất đạt độ lợi 18,5dBi; độ rộng búp sóng hẹp 9,9°; mức búp phụ -21,32 dB ở tần số 5GHz.

Từ khóa:

Anten mảng, Anten mạch in lưỡng cực dẫn xạ, Độ lợi cao, Búp sóng phụ thấp (SLL), Phân bố Chebyshev.

Abstract:

The paper presents a novel high-gain and low-sidelobe level array antenna at 5GHz for localization applications. The proposed antenna array consists of sixteen element Yagi antennas that have been designed on Rogers 4003C with a thickness of $h = 0.8$ mm, a dielectric constant of $\epsilon_r = 3.55$ and a loss tangent 0.0027, the overall size of array antenna is 58.5×27.4 cm². To obtain Low Sidelobe Levels (SLLs), the antenna elements are of non-uniform gain which rule Chebyshev distributes, and they are using equal split T-Junction in series feeding networks. The array antenna was designed using finite element method in Computer Simulation Technology (CST) application. Simulation results show that array antenna can provide high gain of 18.5dBi and a low SLL of -21.32 dB at 5GHz.

Keywords:

Antenna array, Printed Yagi antenna, High gain, Low Sidelobe Level, Chebyshev Distribution.

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Anten mạch in (vi dải) đang được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống viễn thông không dây trong nhà cũng như ngoài trời, các hệ thống định vị vô tuyến; do có nhiều ưu điểm như chi phí thấp, nhẹ và khả năng tích hợp dễ dàng với các thiết bị khác. Trong nhiều ứng dụng anten yêu cầu có độ lợi cao để

tăng khoảng cách truyền nhận. Điều này có thể đạt được bằng cách kết hợp các phần tử đơn lẻ thành anten mảng. Một số ứng dụng điển hình của anten mảng như: hệ thống ra-đa được sử dụng để phát hiện mục tiêu, hệ thống định vị dẫn đường hoặc hệ thống máy bay không người lái. Truyền thông di động ngày càng phát triển với công nghệ 5G đang

được nghiên cứu hiện nay để có tốc độ dữ liệu cao hơn, độ trễ thấp hơn. Ngoài ra anten có độ lợi cao còn được ứng dụng trong giao thông thông minh [1]. Hơn nữa việc sử dụng ra-đa trên ô tô có thể cung cấp cho người lái một số thông tin hỗ trợ giúp kiểm soát hành trình tự động, hỗ trợ đỗ xe, phát hiện điểm mù và cảnh báo va chạm bên hông [2]. Tuy nhiên, việc kết hợp các phần tử anten trong một mảng có thể dẫn đến kích thước lớn hơn và SLL sẽ cao hơn. Nhược điểm chính của anten mảng là tạo ra SLL cao, gây lãng phí năng lượng theo hướng không mong muốn, giảm độ chính xác khi định vị bằng sóng vô tuyến. Búp sóng phụ cao trong mảng có thể do: sự kết hợp với nhau giữa các phần tử bức xạ, sóng bề mặt và bức xạ ký sinh từ mạng tiếp điện [3], [4]. Vì vậy thách thức đối với các nhà thiết kế anten mảng là tìm cách giảm SLL cho mảng anten.

Một số kỹ thuật giảm SLL của mảng đã được nghiên cứu và đề xuất trong [5], trong đó đưa ra một số phương pháp giảm SLL trong mảng vi dải bằng việc điều chỉnh biên độ các nguồn kích thích cho các phần tử đơn lẻ trong mảng sao cho biên độ giảm dần từ tâm ra cuối hai bên của mảng. Các phân bố nhị thức Chebyshev và Taylor đã được áp dụng phổ biến trong việc phân bố biên độ nguồn kích thích của anten mảng để đạt được SLL thấp. Hiện nay có hai loại mạng cấp nguồn phổ biến: cấp nguồn song song và cấp nguồn nối tiếp. Ưu điểm của cấp nguồn nối tiếp là đường truyền ngắn, kích thước mạng cấp nguồn nhỏ suy hao thấp hơn so với cấp nguồn song song. Do vậy bài báo đề xuất mạng tiếp điện nối tiếp.

Gần đây có các nghiên cứu về giảm búp sóng phụ SLL trong anten mảng [4], [6], [7], [8], [9],[10]. Các công trình [4], [6] anten vi dải đã được nghiên cứu với SLL thấp và áp dụng thuyết biên độ kích thích Chebyshev, SLL là -26dB nhưng độ lợi là

17,5dBi tại tần số 5,5GHz. Các anten thông minh [11], [12], [13], [14] cũng được áp dụng trong hệ thống định vị trong nhà, tuy nhiên SLL còn lớn và có nhu cầu giảm SLL để định vị được chính xác hơn. Trong bài báo này, tác giả đề xuất anten mảng sử dụng nhiều phần tử có độ lợi khác nhau tuân theo phân bố Chebysev nhằm giảm SLL tăng độ lợi cho anten mảng ứng dụng trong hệ thống định vị vô tuyến.

Nội dung tiếp theo của bài báo gồm: Cơ sở lý thuyết, cấu trúc và kết quả mô phỏng của anten mảng đề xuất được trình bày trong mục 2; kết luận của bài báo được trình bày trong mục 3.

2. THIẾT KẾ ANTEN MẢNG

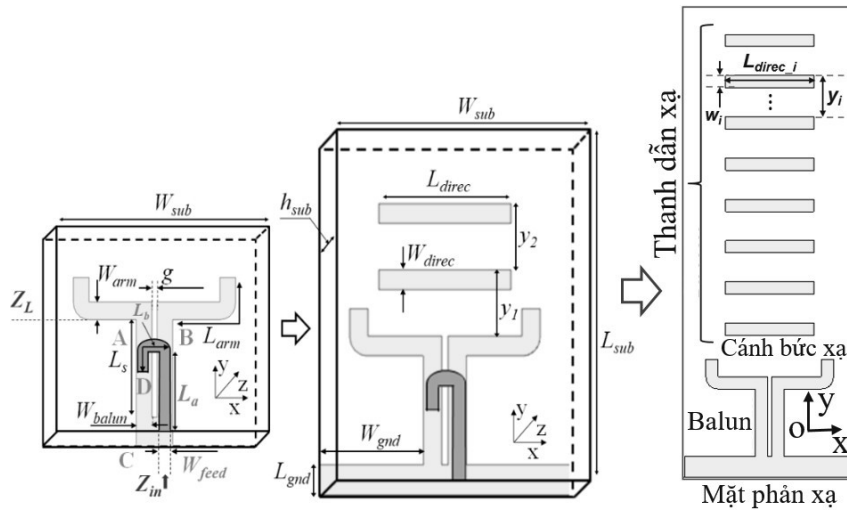
2.1. Anten lưỡng cực dẫn xạ phần tử

Anten lưỡng cực dẫn xạ đề xuất với cánh bức xạ đảm bảo tính chất nửa bước sóng, đồng thời giảm kích thước theo chiều ngang của anten, cánh bức xạ được thiết kế uốn cong. Bên cạnh đó còn giúp tăng độ định hướng theo phương trục giao với cánh bức xạ. Để tăng thêm độ định hướng, các chân tử dẫn xạ được thêm vào phía trước song song với cánh bức xạ như tạo thành anten lưỡng cực dẫn xạ mạch in (LC-DâX). Khoảng cách giữa chân tử dẫn xạ với nhau và với cánh bức xạ thường ($0,1 \div 0,35$) λ_0 [15]. Sau quá trình tối ưu dựa trên nguyên lý của anten LC-DâX và dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn của phần mềm mô phỏng CST, anten LC-DâX gồm 2 thanh dẫn xạ được tối ưu với các tham số trong Bảng 1 tại tần số 5GHz. Đặc điểm của LC- DâX vẫn duy trì các tính chất của anten Yagi thông thường khi tăng số chân tử dẫn xạ thì độ lợi cũng tăng theo. Việc tối ưu LC- DâX làm các tham số như L_{gnd} , L_{arm} , L_{feed} , g , W_{arm} , L_{direc} thay đổi không đáng kể khi tăng số chân tử dẫn xạ yi ($i = 1, 2, 3 \dots n$). Kết quả về băng thông và độ lợi được biểu diễn trong Bảng 2. Độ lợi bị đánh đổi bởi kích thước của anten, với LC- DâX có số

lượng chấn tử dẫn xạ tăng thì nhận được độ lợi càng lớn; 1 thanh dẫn xạ độ lợi là 7dBi, 2 thanh dẫn xạ có độ lợi là 7,64dBi và 23 thanh dẫn xạ độ lợi lên tới 12,3dBi tại 5GHz. Mục tiêu các phần tử đề xuất trong mảng có độ lợi tuân theo phân phối Chebyshev [5], do đó tác giả lần lượt khảo sát, mô phỏng và lựa chọn các anten phần tử với số lượng thanh dẫn xạ phù hợp để có độ lợi theo yêu cầu. Sau khi mô phỏng trên phần mềm CST, 16 phần tử anten dẫn xạ được lựa chọn để ghép mảng được trình bày cụ thể trong Bảng 2.

2.2. Mạng tiếp điện cho anten mảng

Bài báo đề xuất anten mảng gồm 16 phần tử LC-DâX được bố trí trên một đường thẳng theo trục ox là mảng tuyến tính. Mạng tiếp điện trong mảng là nối tiếp được trình bày trong Hình 2. Trong Hình 2, mặt trên là mạng tiếp điện của anten mảng, mặt dưới là các thanh bức xạ và các thanh dẫn xạ của các anten phần tử.



Hình 1. Hình ảnh nguyên lý và chế tạo của anten lưỡng cực dẫn xạ mạch in

Bảng 1. Các tham số của anten LC- DX gồm 2 thanh dẫn xạ tại 5GHz; đơn vị mm

Cánh bức xạ		Thành phần định hướng		Balun	
Tham số	Giá trị	Tham số	Giá trị	Tham số	Giá trị
L_{arm}	11,4	L_{direct}	15	W_{balun}	2,1
W_{arm}	2,1	W_{direct}	2,1	L_a	10,1
L_s	8	y_1	$7 (0,15\lambda_g)$	L_b	8
g	0,7	y_2	$7 (0,15\lambda_g)$	W_{feed}	2,1
h_{sub}	0,8	L_{gnd}	3,5		
L_{sub}	37	W_{gnd}	12		
W_{sub}	29				

Bảng 2. Các tham số của Anten phần tử với nhiều thanh dẫn xạ (n: số thanh dẫn xạ)

n	Băng thông [MHz]	Độ lợi [dBi]
0	770	6,03
1	592	7,00
4	820	8,43
10	617	10,16
15	700	10,93
17	756	11,40
20	762	11,85
23	783	12,30

Thứ tự của các anten được đặt từ cổng 2 đến cổng 17 như mô tả trong Hình 3. Trong đó, vị trí các anten được đặt được thể hiện trong Bảng 3.

Giản đồ bức xạ của mảng được hình thành dựa trên sự kết hợp các giản đồ bức xạ của anten phần tử và hệ số mảng thể hiện trong công thức (1) [1].

$$AF = \sum_{n=1}^N a_n \cdot e^{j(n-1)(kd \cdot \cos \theta + \beta)} \quad (1)$$

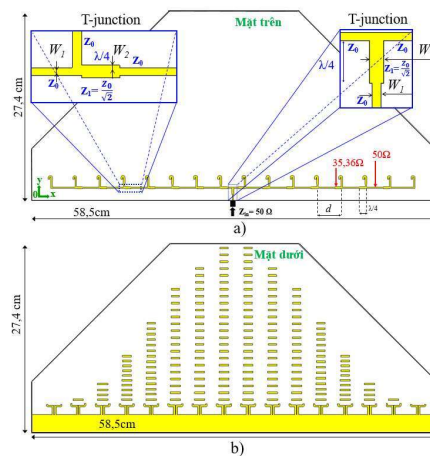
Trong đó, k là hệ số truyền sóng, $d \approx 0,583\lambda$ là khoảng cách giữa các phần tử và $\beta = 2\pi$ là độ lệch pha giữa các phần tử trong mảng, N là số phần tử trong mảng (N=16), a_n là hệ số độ lợi của các phần tử. Mảng có kích thước tổng là $27,4 \times 58,5 \text{ cm}^2$.

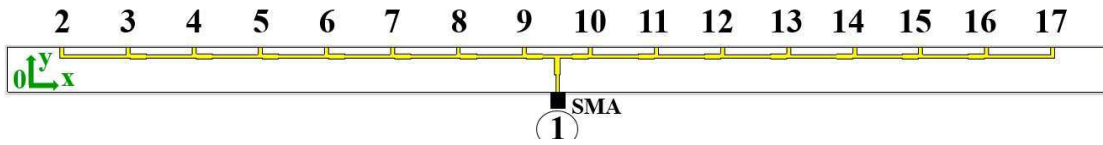
Bảng 3. Phân bố các anten phần tử trên anten mảng để xuất

Cổng	n	Độ lợi [dBi]
2 và 17	0	6,03
3 và 16	1	7,00
4 và 15	4	8,43
5 và 14	10	10,16
6 và 13	15	10,93
7 và 12	17	11,40
8 và 11	20	11,85
9 và 10	23	12,30

(a) Mặt trên là mạng tiếp điện

(b) Mặt dưới là các phần tử bức xạ và dẫn xạ của các anten phần tử

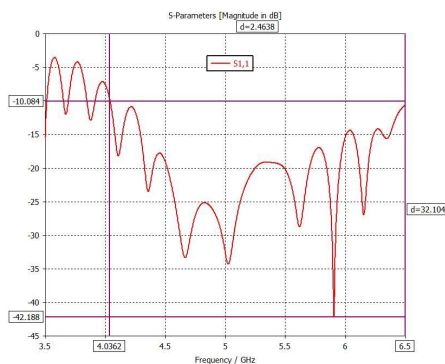
**Hình 2. Hình ảnh mảng anten để xuất;**



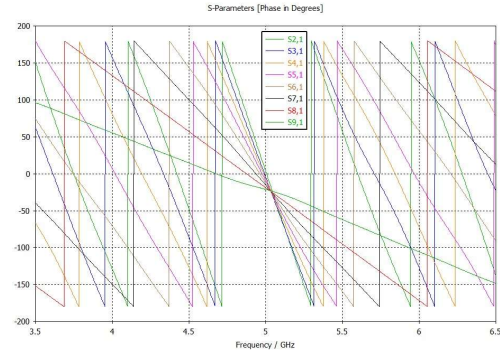
Hình 3. Mạng tiếp điện nối tiếp của mảng Anten đề xuất

Theo như Hình 3, đầu vào mạng tiếp điện cho mảng là $Z_{in} = Z_0 = 50 \Omega$, theo nguyên tắc của bộ chia nguồn hình chữ T [16] thì $Z_1 = Z_0 / \sqrt{2}$, vậy $Z_1 = 35,36 \Omega$, với đoạn chuyển đổi một phần tư bước sóng ($\lambda/4$). Qua quá trình mô phỏng, tối ưu đường truyền sóng cho mạng tiếp điện, các chiều rộng đường truyền sóng có giá trị như sau $W1 = 1,75 \text{ mm}$; $W2 = 2,9 \text{ mm}$; $d = 35 \text{ mm}$.

Sau khi mô phỏng mạng tiếp điện gồm 1 cổng vào và 16 cổng ra như Hình 3, tham số kết quả mô phỏng S11 tại cổng cấp nguồn được thể hiện trong Hình 4; Sau khi mô phỏng mạng tiếp điện gồm 1 cổng vào và 16 cổng ra như Hình 3, tham số kết quả mô phỏng S11 tại cổng cấp nguồn được thể hiện trong Hình 4; Từ đó nhận thấy chúng được phối hợp trở kháng tốt trong dải tần rộng 2,46GHz (từ 4,04GHz đến 6,5GHz) với tần số trung tâm 5GHz. Hình 5 cho thấy pha của các phần tử trong mảng gần như giống nhau, tức là mạng tiếp điện sẽ cung cấp cho 16 Anten phần tử cùng biên và cùng pha.



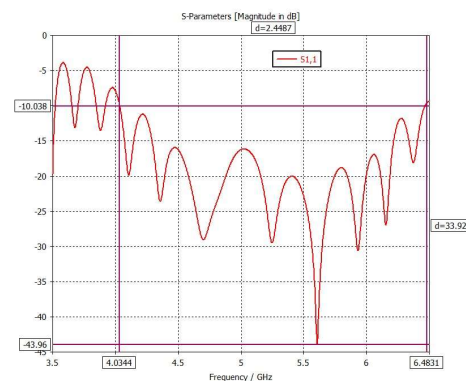
Hình 4. Hệ số S11 mạng tiếp điện của Anten mảng đề xuất



Hình 5. Độ lệch pha giữa các phần tử trong mạng tiếp điện

2.3. Kết quả mô phỏng Anten mảng đề xuất

Kết quả mô phỏng Anten mảng đề xuất được thể hiện trong Hình 6, Hình 7 và Hình 8. Trong đó, Hình 6 cho thấy băng thông của Anten mảng siêu rộng 2,45GHz tương ứng 49% độ rộng băng thông, từ 4,03GHz đến 6,48GHz xét mức dưới -10dB. Dải tần này phù hợp cho các chuẩn IEEE 802n/AC, mạng không dây diện rộng (WLAN), mạng kết nối các thiết bị trong phạm vi của một cá nhân (PAN), truyền thông phạm vi ngắn chuyên dụng (DSRC). Trong Hình 7, mô tả đồ thị bức xạ hai chiều của Anten mảng tại tần số 5GHz của ba mảng Anten khác nhau.



Hình 6. Hệ số S11 của Anten mảng đề xuất

(i) **Mảng 1:** mảng đề xuất gồm các anten phân tử có độ lợi khác nhau phân bố theo Chebyshev. Mảng đề xuất có độ rộng búp sóng hẹp $9,9^\circ$; độ lợi 18,5dBi; búp sóng phụ có giá trị thấp đạt -21,32dB.

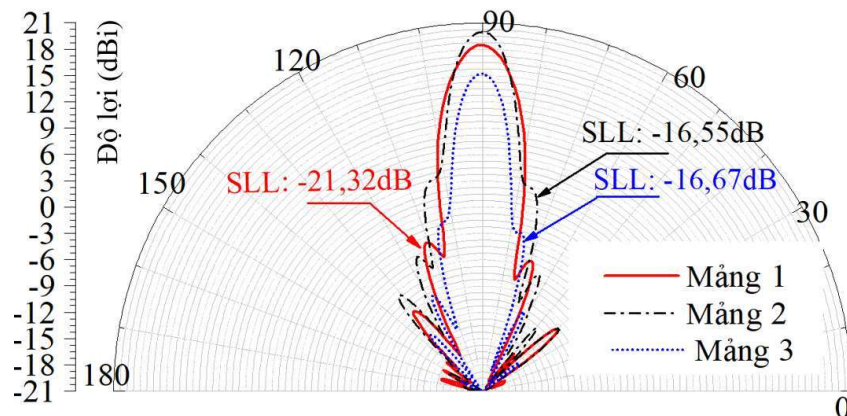
(ii) **Mảng 2:** mảng 16 phần tử lưỡng cực dẫn xạ với 23 thanh dẫn xạ. Mảng 2 với 16 phần tử anten dẫn xạ và 23 thanh dẫn xạ, anten kích thước lớn, tuy nhiên giúp mảng có độ lợi cao 20dBi, búp sóng phụ đạt -16,55dB.

(iii) **Mảng 3:** mảng 16 phần tử lưỡng cực dẫn xạ với 2 thanh dẫn xạ. Mảng 3 với 16 anten phân tử dẫn xạ, kích thước anten nhỏ nhưng đánh đổi là độ lợi thấp hơn 15,3dBi do chỉ sử dụng anten dẫn xạ với 2 thanh dẫn xạ định hướng và búp sóng phụ đạt -16,67dB.

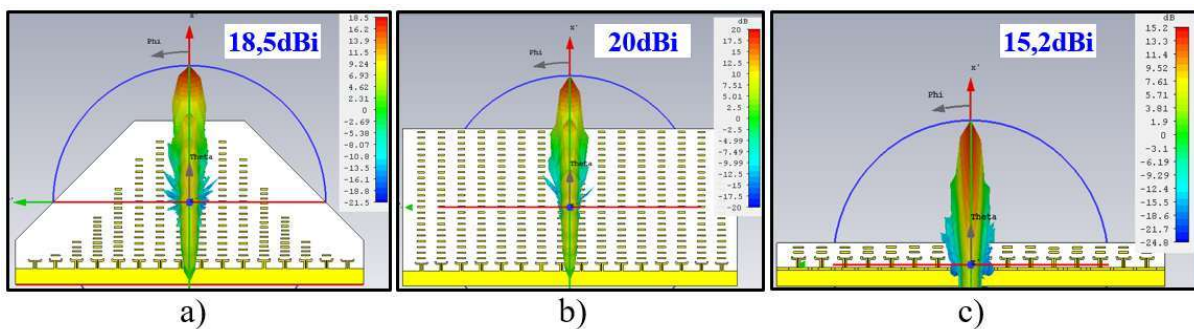
Chúng ta có thể thấy sự nổi bật của anten mảng đề xuất là búp sóng phụ của anten rất thấp -21,32dB so

với hai mảng còn lại; trong đó mảng 2 là -16,55dB và mảng 3 là -16,67dB. Đây chính là minh chứng cho việc sử dụng phân phối Chebyshev độ lợi của 16 phần tử anten trong mảng đề xuất. Anten mảng được thiết kế trên chất nền RO4003C với hằng số điện môi $\epsilon_r = 3,55$, hệ số tổn hao nhỏ 0,0027 và bề dày chất nền là 0,8 mm. Mảng gồm 16×1 phần tử mắc nối tiếp tạo đồ thị bức xạ có độ lợi là 18,5 dBi, búp sóng phụ đạt -21,32dB, độ rộng búp sóng nhỏ $9,9^\circ$. Độ rộng búp sóng hẹp sẽ là một tham số quan trọng trong việc hỗ trợ định vị đối tượng chính xác trong định vị vô tuyến.

Hình 8 mô tả đồ thị bức xạ ba chiều của mảng 1, mảng 2 và mảng 3; chúng ta thấy nếu anten phân tử có độ lợi cao thì độ lợi của anten mảng cũng cao đó là điều hiển nhiên của kỹ thuật anten



Hình 7. Giảm đồ bức xạ hai chiều của anten mảng



Hình 8. Giảm đồ bức xạ ba chiều của các mảng anten a) Mảng 1; b) Mảng 2; c) Mảng 3

mảng, và chúng phải trả giá bằng kích thước. Trong trường hợp yêu cầu anten có độ lợi cao và không cần xét đến chỉ tiêu búp sóng phụ, khuyến nghị có thể sử dụng thiết kế như mảng 3 (độ lợi đạt 20dBi).

3. KẾT LUẬN

Bài báo đã đề xuất anten mảng mới, có độ lợi cao, búp sóng chính nhỏ và búp sóng phụ thấp phù hợp cho hệ thống định vị vô tuyến. Độ lợi anten cao sẽ phủ được vùng xa, búp sóng chính hẹp giúp quét được các vùng hẹp làm tăng độ chính xác định vị theo phương quét; búp sóng phụ thấp làm giảm nhiễu làm cho hệ thống định vị vô tuyến được chính xác hơn.

Quy trình thiết kế từ phần tử đơn lẻ đến anten mảng hoàn chỉnh đã được trình bày chi tiết trong bài báo.

Để có được búp sóng phụ thấp, phân bố Chebyshev về độ lợi đã được sử dụng dựa trên các anten lưỡng cực dẫn xạ không đồng nhất.

Các anten phần tử lưỡng cực dẫn xạ được cấp nguồn đồng đều từ mạng tiếp điện sử dụng bộ chia nguồn hình chữ T được phối hợp trở kháng tốt. Kết quả mô phỏng đã chứng minh rằng anten mảng đề xuất có các đặc điểm nổi bật như có kích thước $27,4 \times 58,5 \text{ cm}^2$ có thể hoạt động ở dải tần số 5 GHz với độ lợi cao 18,5 dBi, búp sóng chính hẹp $9,9^\circ$ và đặc biệt là búp sóng phụ thấp -21,32 dB.

Bên cạnh đó, băng thông của anten mảng đề xuất có dải tần siêu rộng 2,46GHz (49%) có thể áp dụng cho các hệ thống truyền thông ở các chuẩn IEEE 802n/ac, mạng không dây diện rộng (WLAN), mạng kết nối các thiết bị trong phạm vi của một cá nhân (PAN), truyền thông phạm vi ngắn chuyên dụng (DSRC) hay các ứng dụng cho băng tần C.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. B. Thi Duyen, L. Minh Thuy, and N. Quoc Cuong, 'High gain antenna with wide angle radiation for modern wireless communication applications', in International Conference on Advanced Technologies for Communications, Quy Nhon: IEEE, Oct. 2017, pp. 39–42. doi: 10.1109/ATC.2017.8167638.
- [2]. D. Ehyae, 'Novel Approaches to the Design of Phased Array Antennas', Jan. 2011.
- [3]. D. M. Pozar and B. Kaufman, 'Design considerations for low sidelobe microstrip arrays', IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 38, no. 8, pp. 1176–1185, Aug. 1990, doi: 10.1109/8.56953.
- [4]. T. Toan, T. Nguyen, and T. Giang, A low sidelobe fan-beam series fed linear antenna array for IEEE 802.11ac outdoor applications. 2017. doi: 10.1109/ATC.2017.8167609.
- [5]. C. A. Balanis, Antenna theory: analysis and design, 3rd ed. Hoboken, NJ: John Wiley, 2005.
- [6]. Wenhui Shen, Jiahong Lin, and Kang Yang, 'Design of a V-band low sidelobe and wideband linear DRA array', IEEE, Aug. 2016, pp. 477–480. doi: 10.1109/PIERS.2016.7734372.
- [7]. M. F. A. Ahmed, O. M. Haraz, G. Kaddoum, S. A. Alshebili, and A.-R. Sebak, 'On using Gaussian excitation amplitudes to improve the antenna array radiation characteristics', IEEE, Dec. 2014, pp. 131–134. doi: 10.1109/APACE.2014.7043760.
- [8]. J. Yin, Q. Wu, C. Yu, H. Wang, and W. Hong, 'Low-Sidelobe-Level Series-Fed Microstrip Antenna Array of Unequal Interelement Spacing', IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 16, pp. 1695–1698, 2017, doi: 10.1109/LAWP.2017.2666427.

- [9]. M. Dürr, A. Trastoy, and F. Ares, 'Multiple-pattern linear antenna arrays with single prefixed amplitude distributions: modified Woodward-Lawson synthesis', *Electronics Letters*, vol. 36, no. 16, p. 1345, 2000, doi: 10.1049/el:20000980.
- [10]. J. Lin, W. Shen, and K. Yang, 'A Low-Sidelobe and Wideband Series-Fed Linear Dielectric Resonator Antenna Array', *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 513–516, 2017, doi: 10.1109/LAWP.2016.2586579.
- [11]. C. A. Balanis and P. I. Ioannides, 'Introduction to Smart Antennas', *Synthesis Lectures on Antennas*, vol. 2, no. 1, pp. 1–175, Tháng Một 2007, doi: 10.2200/S00079ED1V01Y200612ANT005.
- [12]. B. T. Duyen, H. T. Phuong Thao, L. Minh Thuy, and N. Quoc Cuong, 'Design of a beam steering antenna array using 8x8 butter matrix for indoor positioning system', *Electromagnetics*, vol. 40, no. 7, pp. 500–514, Oct. 2020, doi: 10.1080/02726343.2020.1824313.
- [13]. T. D. Bui, M. T. Le, and Q. C. Nguyen, 'Electronically steerable antenna array for indoor positioning system', *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 33, no. 7, pp. 838–852, May 2019, doi: 10.1080/09205071.2018.1555060.
- [14]. T. D. Bui, H. S. Vu, Q. C. Nguyen, and M. T. Le, 'Smart antenna with circular polarization for high accuracy indoor localization system', *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 36, no. 7, pp. 994–1007, May 2022, doi: 10.1080/09205071.2021.1997650.
- [15]. Phan Anh, *Lý thuyết và kỹ thuật anten*. nhà xuất bản khoa học kỹ thuật, 2007.
- [16]. D. M. Pozar, *Microwave engineering*, 4th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2012.
- [17]. T. D. Bui, Q. C. Nguyen, and M. T. Le, 'Novel wideband circularly polarized antenna for wireless applications', in *Microwave Conference (APMC), 2017 IEEE Asia Pacific, Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE*, Nov. 2017, pp. 430–433. doi: 10.1109/APMC.2017.8251472.
- [18]. T. D. Bui, M. T. Le, and Q. C. Nguyen, 'Electronically steerable antenna array for indoor positioning system', *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 33, no. 7, pp. 838–852, May 2019, doi: 10.1080/09205071.2018.1555060.
- [19]. T. D. Bui, H. S. Vu, Q. C. Nguyen, and M. T. Le, 'Smart antenna with circular polarization for high accuracy indoor localization system', *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 36, no. 7, pp. 994–1007, May 2022, doi: 10.1080/09205071.2021.1997650.
- [20]. Phan Anh, *Lý thuyết và kỹ thuật anten*. nhà xuất bản khoa học kỹ thuật, 2007.
- [21]. D. M. Pozar, *Microwave engineering*, 4th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2012.
- [22]. T. D. Bui, Q. C. Nguyen, and M. T. Le, 'Novel wideband circularly polarized antenna for wireless applications', in *Microwave Conference (APMC), 2017 IEEE Asia Pacific, Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE*, Nov. 2017, pp. 430–433. doi: 10.1109/APMC.2017.8251472.

Giới thiệu tác giả:



Tác giả Bùi Thị Duyên tốt nghiệp đại học ngành Kỹ thuật đo và Tin học công nghiệp năm 2004; nhận bằng Thạc sĩ ngành Tự động hóa năm 2007, nhận bằng Tiến sĩ ngành Kỹ thuật điều khiển và Tự động hóa năm 2020 tại Đại học Bách khoa Hà Nội. Hiện nay tác giả là giảng viên Khoa Điều khiển và Tự động hóa, Trường Đại học Điện lực.

Hướng nghiên cứu chính: Hệ thống đo lường điều khiển, thiết kế các hệ thống nhúng ứng dụng trong điều khiển và tự động hóa, mạng cảm biến không dây, anten và mạch cao tần.



Tác giả Nguyễn Tiến Dũng tốt nghiệp đại học ngành Tự động hóa năm 2008 tại Trường đại học Bách Khoa Hà Nội, nhận bằng Thạc sĩ ngành Kỹ thuật điều khiển và Tự động hóa năm 2014 tại Học viện kỹ thuật quân sự và nhận bằng Tiến sĩ ngành Kỹ thuật điều khiển và Tự động hóa năm 2024 tại Học viện kỹ thuật quân sự. Hiện nay tác giả là giảng viên Khoa Điều khiển và Tự động hóa, Trường Đại học Điện lực.

Hướng nghiên cứu chính: Điều khiển hệ thống bù để nâng cao chất lượng điện năng, tự động hóa trong các nhà máy, khu công nghiệp.



Tác giả Nguyễn Ngọc Trung tốt nghiệp đại học ngành Hệ thống điện, nhận bằng Thạc sĩ ngành Kỹ thuật điện tại Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội vào các năm 2003 và 2006; nhận bằng tiến sĩ Kỹ thuật điện năm 2014 tại Đại học Palermo, Cộng hòa Italia. Hiện nay tác giả là giảng viên, Trường Đại học điện lực

Hướng nghiên cứu chính: Lưới điện thông minh, giám sát đo lường điều khiển tự động hóa và bảo vệ trong hệ thống điện.