

THIẾT KẾ ĂNG-TEN VI DẢI PHÂN CỰC TRÒN BẰNG RỘNG SỬ DỤNG CẤU TRÚC SIÊU BỀ MẶT

Nguyễn Mạnh Hùng^{1*}, Phạm Duy Phong², Kiều Văn Lưu³,
Hoàng Đình Thuyên¹, Phạm Văn Hải¹

*Tác giả liên hệ, email: manhhung@hou.edu.vn. ORCID: 0009-0009-9582-0485

Ngày tòa soạn nhận được bài báo: 15/01/2026

Ngày phản biện đánh giá: 17/03/2026

Ngày bài báo được duyệt đăng: 14/04/2026

DOI: 10.59266/houjs.2026.1155

Tóm tắt: Bài báo này trình bày thiết kế và đánh giá hiệu năng của một ăng-ten vi dải phân cực tròn dải rộng sử dụng cấu trúc siêu bề mặt (metasurface). Ăng-ten được cấu trúc trên hai lớp vật liệu điện môi FR-4 với độ dày 1,6 mm. Nhằm khắc phục hạn chế về băng thông của ăng-ten vi dải truyền thống, nghiên cứu đề xuất phương pháp cấp nguồn bằng phần tử kim loại hình chữ Y ở lớp dưới để kích thích phân cực tròn, kết hợp với một mảng siêu bề mặt 2x2 ở lớp trên đóng vai trò là mặt bức xạ chính. Quá trình thiết kế và tối ưu hóa tham số được thực hiện thông qua phần mềm mô phỏng trường điện từ HFSS. Kết quả cho thấy ăng-ten đạt được dải thông phối hợp trở kháng ($|S_{11}| \leq -10$ dB) rộng 17,2%. Đồng thời, dải thông phân cực tròn (AR ≤ 3 dB) đạt 4,3%. Bên cạnh đó, thiết kế duy trì độ lợi ổn định với giá trị lớn nhất đạt 5,43 dBi và cung cấp đặc tính bức xạ phân cực tròn trái (LHCP) tốt. Các kết quả này khẳng định cấu trúc đề xuất là một giải pháp hiệu quả để nâng cao đồng thời băng thông và độ tăng ích, mở ra tiềm năng ứng dụng trong các hệ thống truyền thông không dây băng rộng hiện đại.

Từ khóa: ăng-ten vi dải, phân cực tròn, độ lợi cao, băng rộng, siêu bề mặt

I. Đặt vấn đề

Sự phát triển của các hệ thống truyền thông 5G đòi hỏi các thiết bị thu phát vô tuyến phải có khả năng truyền tải dữ liệu dung lượng lớn và hoạt động ổn định trong môi trường truyền dẫn phức tạp (Hong và cộng sự, 2017). Để đáp ứng điều này, ăng-

ten phân cực tròn (CP) dải rộng kết hợp với độ lợi cao trở thành một yêu cầu thiết yếu (Gao và cộng sự, 2014). Phân cực tròn giúp khắc phục hiệu quả hiện tượng suy giảm đa đường và sự sai lệch phân cực, từ đó duy trì chất lượng liên kết tín hiệu tối ưu cho hệ thống (Buzanov, 2022; Nurhayati và cộng sự, 2020).

¹ Trường Đại học Mở Hà Nội, Hà Nội, Việt Nam

² Trường Đại học Điện lực, Hà Nội, Việt Nam

³ Cục viễn thông và cơ yếu, Hà Nội, Việt Nam

Mặc dù ăng-ten vi dải có nhiều ưu điểm, nhược điểm cốt lõi của chúng là băng thông rất hẹp (thường $<5\%$) (Garg và cộng sự, 2001; Marnel, 2025). Để khắc phục điều này, nhiều giải pháp đã được giới thiệu trong các nghiên cứu gần đây, điển hình như sử dụng cấu trúc bức xạ xếp chồng (stacked patches) (Cao và cộng sự, 2021), khoét khe (slotted patches) (Todi, 2024) hoặc dùng mạng cấp nguồn lệch pha tuần tự (sequential rotation networks) (Xiao, 2025). Tuy nhiên, các giải pháp hiện tại vẫn bộc lộ nhiều hạn chế đáng kể: cấu trúc xếp chồng làm tăng độ dày và công kênh, trong khi mạng cấp nguồn phức tạp lại gây ra suy hao bức xạ lớn và làm giảm hiệu suất tổng thể. Hơn nữa, việc đạt được đồng thời cả dải thông phân cực tròn rộng và độ lợi cao vẫn là một thách thức kỹ thuật rất lớn (Lee & Chen, 2019).

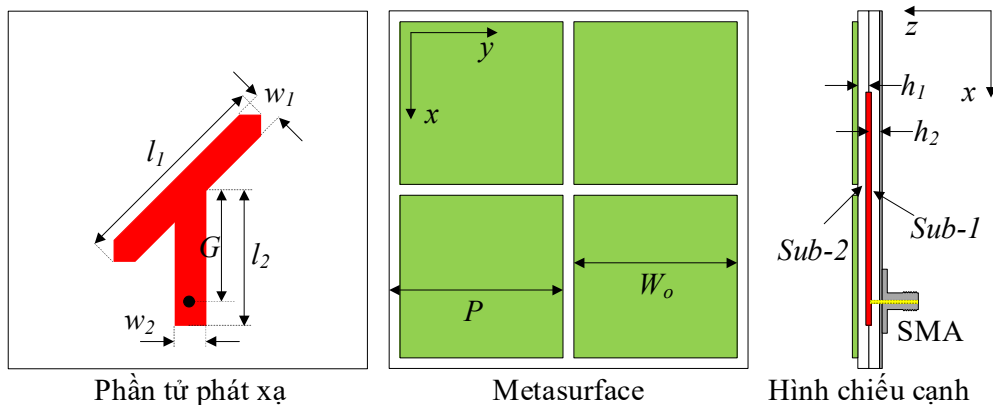
Để giải quyết triệt để sự đánh đổi giữa hiệu suất và độ phức tạp của các phương pháp hiện có, bài báo này đề xuất một thiết kế ăng-ten cấu hình thấp hoàn toàn mới: sử dụng siêu bề mặt (Metasurface) làm mặt bức xạ (Jiang và cộng sự, 2019), kết hợp cùng kỹ thuật cấp nguồn hình chữ Y. Cấu trúc siêu bề mặt khi được kích thích bởi mạng tiếp điện chữ Y đơn giản sẽ tạo ra các chế độ cộng hưởng gần nhau, giúp

mở rộng đáng kể băng thông phân cực tròn và cải thiện mạnh mẽ độ lợi mà không làm phức tạp hóa cấu trúc. Bài báo sẽ đi sâu vào phân tích thiết kế, đánh giá kết quả mô phỏng và làm rõ cơ chế hoạt động của mô hình ăng-ten đề xuất.

II. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Đề xuất cấu trúc ăng-ten và phương pháp thiết kế

Cấu trúc ăng-ten phân cực tròn sử dụng siêu bề mặt (Metasurface) được đề xuất và minh họa chi tiết trong Hình 1. Thiết kế này được triển khai trên một cấu trúc đa lớp, sử dụng hai tấm vật liệu nền FR-4 có cùng độ dày 1,6 mm, hằng số điện môi 4,4 và hệ số suy hao là 0,02. Tấm nền thứ nhất nằm ở lớp dưới, chứa một phần tử kim loại hình chữ Y đóng vai trò là bộ phận cấp nguồn chính, phía dưới là mặt phẳng đất, nơi tín hiệu cao tần từ cổng SMA được đưa trực tiếp vào. Phía trên là tấm nền thứ hai chứa cấu trúc siêu bề mặt hoạt động như mặt bức xạ chính của ăng-ten. Siêu bề mặt này được hình thành từ một mảng 2×2 các phiến kim loại hình vuông. Trong cấu trúc này, năng lượng từ phần tử cấp nguồn chữ Y ở lớp dưới sẽ không truyền dẫn trực tiếp mà được ghép trường điện từ lên lớp siêu bề mặt ở trên để bức xạ ra không gian.



Hình 1 Cấu trúc ăng-ten đề xuất. (a) Mặt trên; (b) mặt ngang.

Thiết kế đề xuất áp dụng đồng thời hai nguyên lý bức xạ nhằm tối ưu hóa hiệu năng của ăng-ten. Thứ nhất, thay vì tạo sự bất đối xứng trên phần tử bức xạ như các phương pháp truyền thống, thiết kế này chủ động tạo ra phân cực tròn ngay từ vị trí cấp nguồn. Cấu trúc chữ Y với hai nhánh xiên góc được tính toán cẩn thận để khi bị kích thích, nó sẽ tạo ra hai véc-tơ trường điện từ trực giao và lệch pha nhau 90° , qua đó hình thành nên sóng phân cực

Bảng 1 Các tham số kích thước của ăng-ten đề xuất.

Thông số	Giá trị (mm)	Thông số	Giá trị (mm)
W	28,5	w_1	2,0
l_1	11,0	w_2	3,0
l_2	11,7	W_0	13,3
G	10,5	P	14,0

Để đạt được các đặc tính bức xạ tốt nhất, toàn bộ các kích thước hình học của cấu trúc ăng-ten đã được khảo sát, tinh chỉnh và tối ưu hóa thông qua phần mềm mô phỏng điện từ trường HFSS. Các giá trị kích thước của ăng-ten đề xuất được trình bày chi tiết trong Bảng 1.

2.2. Nguyên lý hoạt động

Nguyên lý bức xạ của ăng-ten dựa trên sự kết hợp chặt chẽ giữa cơ chế tạo phân cực từ mạng cấp nguồn và hiệu ứng cộng hưởng của siêu bề mặt. Khi tín hiệu cao tần đi qua phần tử chữ Y ở lớp dưới, cấu trúc hình học của hai nhánh xiên sẽ chia tách dòng điện thành hai véc-tơ trực giao có biên độ xấp xỉ nhau và lệch pha 90° . Quá trình này trực tiếp sinh ra một trường điện từ quay, tạo thành nguồn kích thích phân cực tròn (CP) cơ bản. Năng lượng điện từ này sau đó không bức xạ trực tiếp ra không gian mà được ghép cặp (coupling) mạnh mẽ lên mảng siêu bề mặt 2×2 nằm ở lớp nền phía trên. Tại đây, các phiên kim loại hoạt động như những bộ cộng hưởng ký sinh. Sự tương tác điện

tròn. Thứ hai, việc sử dụng siêu bề mặt làm mặt bức xạ chính thay cho một phiên kim loại đơn lẻ giúp mở rộng đáng kể băng thông và tăng ích. Sự tương tác điện từ giữa phần tử cấp nguồn và mạng các phần tử cộng hưởng của siêu bề mặt tạo ra hiệu ứng cộng hưởng chồng lấn, làm tăng dải thông phối hợp trở kháng. Đồng thời, phần tử bức xạ hiệu dụng lớn hơn của cấu trúc 2×2 cũng giúp tăng cường độ định hướng cho hệ thống.

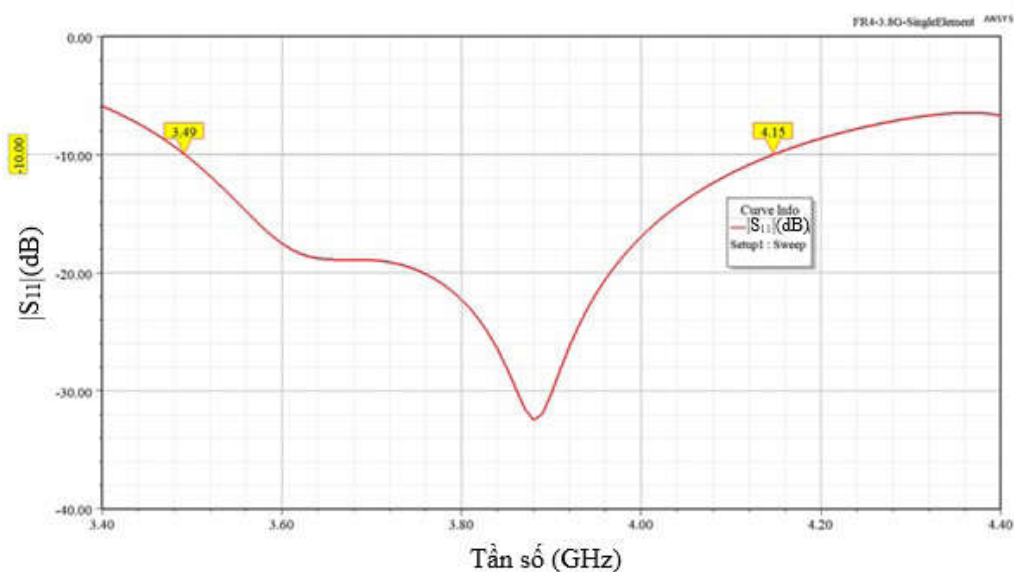
từ giữa phần tử cấp nguồn và hiện tượng ghép tương hỗ (mutual coupling) giữa các phần tử liền kề trong mảng đã kích thích nhiều chế độ cộng hưởng (resonance modes) lân cận. Việc các dải cộng hưởng này chồng lấn lên nhau chính là cơ chế cốt lõi giúp ăng-ten mở rộng đột phá cả băng thông trở kháng lẫn băng thông tỷ lệ trực (AR). Đồng thời, cấu trúc mảng 2×2 cung cấp một khẩu độ bức xạ hiệu dụng lớn hơn nhiều so với phiên đơn lẻ. Điều này giúp tập trung năng lượng bức xạ theo hướng thiên đỉnh, hạn chế rò rỉ sóng bề mặt, từ đó gia tăng mạnh mẽ hệ số định hướng và độ lợi (gain) tổng thể. Bản chất của bức xạ phân cực tròn này sẽ được minh chứng rõ nét thông qua sự phân bố hướng quay của các véc-tơ dòng điện bề mặt theo các chu kỳ pha (0° , 90° , 180° , 270°) trong kết quả mô phỏng.

III. Kết quả và thảo luận

Để đánh giá toàn diện hiệu năng của cấu trúc ăng-ten đề xuất, các tham số đặc trưng bao gồm hệ số phản xạ (S_{11}), tỷ lệ trực (AR), độ lợi thực (Realized Gain) và

giản đồ bức xạ đã được mô phỏng và phân tích chi tiết. Trước tiên, Hình 2 biểu diễn đồ thị tham số suy hao phản xạ, đây là tiêu chí quan trọng nhất để xác định khả năng phối hợp trở kháng và dải tần hoạt động của hệ thống. Kết quả cho thấy giải pháp thiết kế sử dụng mạng cấp nguồn chữ Y kết hợp siêu bề mặt đã tạo ra sự phối hợp trở kháng cực kỳ ấn tượng trên một dải tần rất rộng. Cụ thể, xét theo tiêu chuẩn $|S_{11}| < -10$ dB, dải thông của ăng-ten trải dài từ 3,49 GHz đến 4,15 GHz, tương đương dải

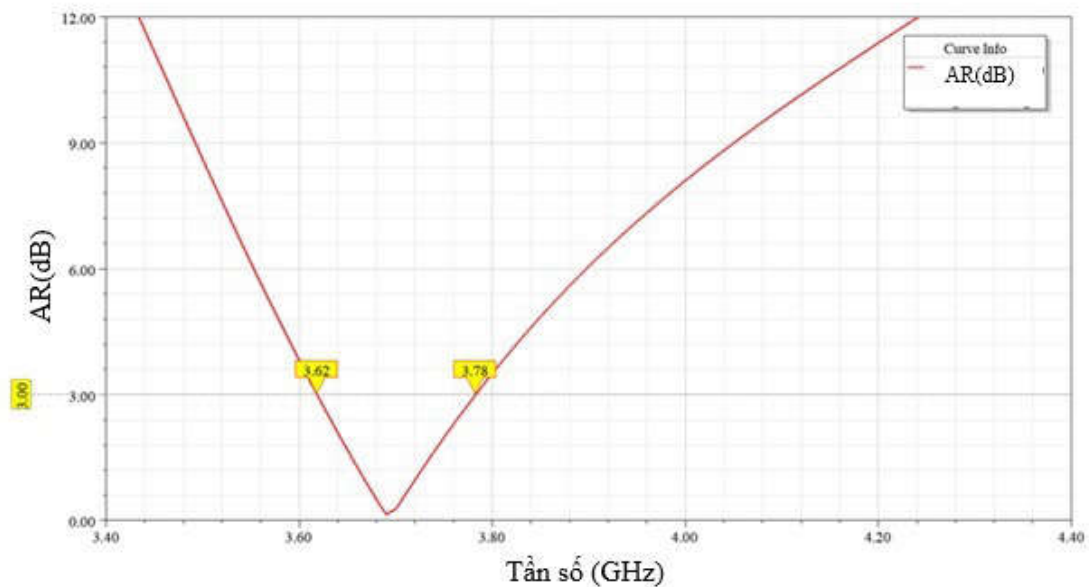
thông tuyệt đối lên tới 660 MHz (chiếm 17,2% so với tần số cộng hưởng trung tâm 3,82 GHz). Điểm đặc biệt của thiết kế này là sự xuất hiện rõ nét của hai điểm cộng hưởng mạnh trong dải hoạt động, với đáy cộng hưởng sâu nhất đạt xấp xỉ -32 dB. Đây là minh chứng rõ ràng cho hiệu ứng cộng hưởng của siêu bề mặt, mang lại một sự cải thiện vượt bậc và cải thiện đáng kể về giới hạn băng thông hẹp (thường nhỏ hơn 5%) của các dòng ăng-ten vi dải truyền thống.



Hình 2. Kết quả mô phỏng suy hao phản xạ ($|S_{11}|$) của ăng-ten đề xuất

Bên cạnh khả năng phối hợp trở kháng, chất lượng của bức xạ phân cực tròn được đánh giá thông qua tham số tỷ lệ trục (Axial Ratio - AR) minh họa trong Hình 3. ăng-ten đề xuất duy trì dải thông hoạt động ở chế độ phân cực tròn ($AR < 3$ dB) trong khoảng 160 MHz, trải dài từ 3,62 GHz đến 3,78 GHz, tương ứng với băng thông tương đối khoảng 4,3% tại tần số trung tâm 3,7 GHz. Đáng chú ý, ngay tại mốc tần số 3,7 GHz, giá trị AR

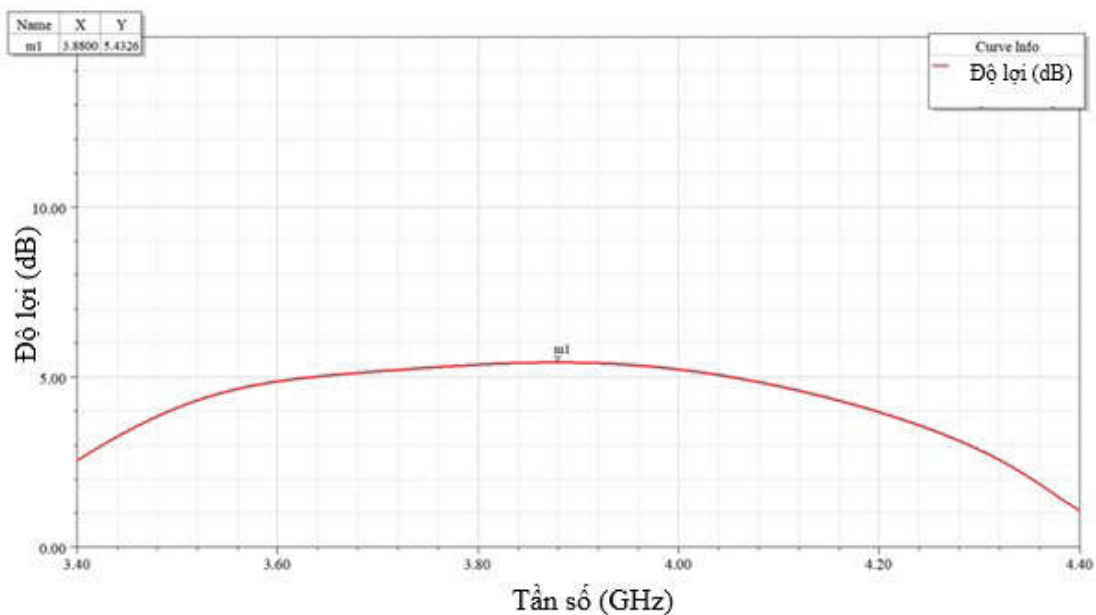
hạ xuống mức tiệm cận 0 dB, khẳng định ăng-ten đạt được trạng thái phân cực tròn khá tốt. Mặc dù dải thông phân cực tròn (160 MHz) hẹp hơn so với dải thông phối hợp trở kháng (660 MHz) nhưng kết quả này vẫn khẳng định thiết kế bao phủ hoàn toàn dải tần mục tiêu, đảm bảo hệ thống hoạt động cực kỳ hiệu quả như một nguồn phát phân cực tròn chất lượng cao trong dải tần từ 3,62 GHz đến 3,78 GHz.



Hình 3. Kết quả mô phỏng tỷ lệ trực (AR) của ăng-ten đề xuất

Sự ưu việt của giải pháp thiết kế sử dụng siêu bề mặt càng được khẳng định hơn nữa qua đặc tính bức xạ, cụ thể là

thông số độ lợi thực (Realized Gain) được trình bày trong Hình 4.



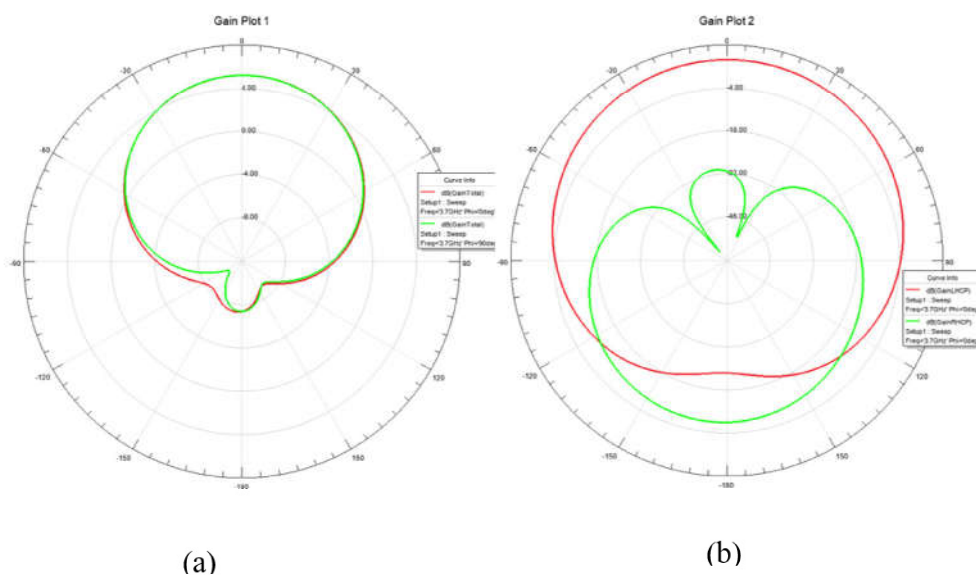
Hình 4. Kết quả mô phỏng độ lợi thực (Realized Gain) của ăng-ten đề xuất.

Kết quả mô phỏng chỉ ra rằng ăng-ten đạt được độ lợi đỉnh lên tới 5,43 dBi tại tần số 3,88 GHz. Tính trên toàn bộ dải thông phối hợp trở kháng (3,49 GHz - 4,15 GHz), mức độ lợi luôn được duy trì ổn định trên 4 dBi. Đặc biệt, khi xét riêng trong dải

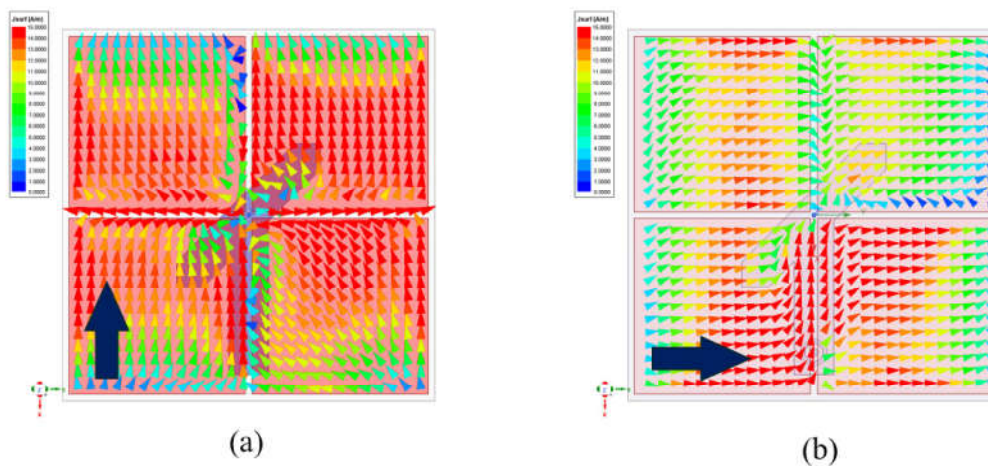
thông phân cực tròn (3,62 GHz - 3,78 GHz) - nơi hệ thống hoạt động với hiệu suất tối ưu nhất - độ lợi giữ ở mức rất cao và phẳng, dao động trong khoảng từ 5,0 dBi đến 5,4 dBi. Sự cải thiện đáng kể về độ lợi này so với các ăng-ten vi dải hình chữ nhật thông

thường xuất phát trực tiếp từ việc triển khai siêu bề mặt làm mặt bức xạ. Khẩu độ hiệu dụng lớn của mảng cộng hưởng giúp tập

trung năng lượng điện từ vào một búp sóng hẹp hơn, qua đó nâng cao rõ rệt độ định hướng và độ lợi tổng thể.



Hình 5. Giản đồ bức xạ của ăng-ten tại 3,7 GHz: (a) giản đồ bức xạ trên hướng bức xạ chính và (b) giản đồ bức xạ phân cực tròn



Hình 6. Giản đồ véc-tơ phân bố dòng điện bề mặt trên cấu trúc siêu bề mặt tại tần số 3,7 GHz với các góc pha khác nhau: (a) 0° và (b) 90°

Cuối cùng, đặc tính định hướng và cơ chế vật lý của phân cực tròn được phân tích thông qua giản đồ bức xạ và sự phân bố dòng điện bề mặt tại tần số trung tâm 3,7 GHz. Hình 5(a) cho thấy giản đồ bức xạ tổng trong hai mặt phẳng chính ($\Phi = 0^\circ$ và $\Phi = 90^\circ$) có dạng hướng thiên đỉnh (broadside) với búp sóng chính rộng,

đối xứng và hướng thẳng về phía trước ($\theta = 0^\circ$). Sự trùng khớp gần như hoàn toàn của giản đồ trong hai mặt phẳng minh chứng cho tính đối xứng không gian rất tốt của trường bức xạ. Chi tiết hơn ở Hình 5(b), thành phần phân cực chiếm ưu thế tuyệt đối trên hướng phát xạ chính, chính là phân cực tròn quay trái (LHCP). Bản

chất của cơ chế bức xạ LHCP này được giải thích một cách trực quan thông qua sự phân bố các véc-tơ dòng điện trên siêu bề mặt ở Hình 6. Khi quan sát tại tần số 3,7 GHz với các góc pha của tín hiệu kích thích lần lượt là 0° và 90° , các véc-tơ dòng điện bề mặt thể hiện sự dịch chuyển và xoay liên tục theo chiều kim đồng hồ. Phản ứng điện từ này một lần nữa khẳng định độ chính xác của cơ chế tạo pha từ mạng chữ Y và chứng minh dạng phân cực mà ăng-ten đề xuất phát xạ hoàn toàn là phân cực tròn quay trái (LHCP).

IV. Kết luận

Bài báo đã trình bày một thiết kế ăng-ten phân cực tròn cấu hình thấp sử dụng siêu bề mặt (metasurface), trong đó phần tử cấp nguồn dạng chữ Y được khai thác để tạo hai thành phần trường trực giao lệch pha xấp xỉ 90° , kết hợp với mảng bức xạ 2×2 nhằm hình thành cộng hưởng ghép và mở rộng dải thông. Cách tiếp cận này cho phép cải thiện đồng thời băng thông và hệ số tăng ích, khắc phục hạn chế băng thông hẹp vốn gặp ở các ăng-ten vi dải truyền thống.

Kết quả mô phỏng cho thấy ăng-ten đạt băng thông phối hợp trở kháng ($|S_{11}| < -10$ dB) từ 3,49 GHz đến 4,15 GHz, tương ứng 17,2%, bao phủ hoàn toàn dải phân cực tròn (AR < 3 dB) từ 3,62 GHz đến 3,78 GHz (4,3%). Hệ số tăng ích thực đạt cực đại 5,43 dBi tại 3,88 GHz, với giản đồ bức xạ hướng chuẩn và đặc tính LHCP rõ rệt trên hướng bức xạ chính. Các kết quả này khẳng định vai trò của cấu trúc siêu bề mặt trong việc mở rộng khẩu độ hiệu dụng, cải thiện phối hợp trở kháng và nâng cao độ định hướng.

Với cấu trúc hai lớp gọn nhẹ, sử dụng vật liệu FR-4 phổ biến và quy trình chế tạo đơn giản, mô hình đề xuất cho

thấy tính khả thi cao trong triển khai thực tế. Thiết kế có tiềm năng ứng dụng trong các hệ thống thông tin vô tuyến dải C yêu cầu băng thông rộng, phân cực tròn ổn định và độ lợi tương đối cao, đồng thời mở ra hướng phát triển tiếp theo theo dạng mảng nhiều phần tử để tiếp tục nâng cao hiệu năng.

Tài liệu tham khảo

- Buzanov, R. A., Shirokikh, S. A., & Shishakov, K. V. (2022). Development of microstrip decimeter antennas with circular polarization. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 25(3), 47-61.
- Cao, X., Zhang, J., Yang, H., & Li, H. (2021). The dual-polarized staggered stacked patches antenna. *China Communications*, 18(12), 208-218.
- Gao, S., Luo, Q., & Zhu, F. (2014). *Circularly polarized antennas*. John Wiley & Sons.
- Garg, R., Bhartia, P., Bahl, I., & Ittipiboon, A. (2001). *Microstrip antenna design handbook*. Artech House.
- Hong, W., Jiang, Z. H., Yu, C., Zhou, J., Chen, P., & Yu, Z. (2017). Multibeam antenna technologies for 5G wireless communications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65(12), 6231-6249.
- Jiang, T., et al. (2019). A low-profile wideband circularly polarized metasurface antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 18(6), 1144-1148.
- Lee, H. M., & Chen, W. S. (2019). Recent advances in circularly polarized printed antennas. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*.
- Marnel, S. P., Astuti, D. W., Alaydrus, M., & Majid, H. A. (2025). Bandwidth enhancement on microstrip antenna with dual feed line and truncated for 5G applications. *Jurnal Rekayasa ElektriKa*, 21(3).

- Nurhayati, N., Lutfia, P. A., Sobrinho, R. E. F., & Fukusako, T. (2020). Circular polarization of the square, circular, triangle, and hexagonal microstrip antenna. *INAJEEE Indonesian Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 3(1), 5-9.
- Todi, S., & Agarwal, P. (2024). Sensitivity analysis of microstrip patch antenna genres: Slotted and through-hole microstrip patch antenna. *Biomedical Engineering Letters*, 15(9).
- Xiao, J., Wu, J., Ding, T., Han, C.-Z., & Ye, Q. (2025). An LTCC-based antenna array with densified self-sequential rotation feeding configuration for circularly polarized terahertz communications. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 15(5), 934-939.

DESIGN OF A BROADBAND CIRCULARLY POLARIZED MICROSTRIP ANTENNA USING A METASURFACE STRUCTURE

Nguyen Manh Hung¹, Pham Duy Phong², Kieu Van Luu³,
Hoang Dinh Thuyen¹, Pham Van Hai¹

Abstract: *This paper presents the design and performance evaluation of a broadband circularly polarized (CP) microstrip antenna utilizing a metasurface structure. The antenna is constructed on two layers of FR-4 dielectric substrate, each with a thickness of 1.6 mm. To overcome the inherent bandwidth limitations of traditional microstrip antennas, this study proposes a feeding mechanism using a Y-shaped metallic element at the bottom layer to excite circular polarization, coupled with a 2×2 metasurface array at the top layer functioning as the primary radiating aperture. The design and parameter optimization processes were conducted using the ANSYS HFSS electromagnetic simulation software. The simulated results demonstrate that the proposed antenna achieves an impedance bandwidth ($|S_{11}| \leq -10$ dB) of 17.2% and a 3-dB axial ratio (AR) bandwidth of 4.3%. Furthermore, the design maintains a stable gain profile across the operating band, reaching a peak gain of 5.43 dBi, while exhibiting excellent left-hand circularly polarized (LHCP) radiation characteristics. These findings confirm that the proposed metasurface-based structure is an effective solution for simultaneously enhancing both bandwidth and gain, demonstrating significant potential for integration into modern broadband wireless communication systems.*

Keywords: *Microstrip antenna, circular polarization, high gain, broadband, metasurface*

¹ Hanoi Open University, Hanoi, Vietnam

² Electric Power University, Hanoi, Vietnam

³ Department of Telecommunications and Cryptography, Hanoi, Vietnam