

DESIGN OF WIDEBAND OMNIDIRECTIONAL MICROSTRIP PATCH ANTENNA FOR WIRELESS APPLICATIONS

Pham Viet Anh*, Nguyen Hoang Nguyen, Pham Anh Ha, Nguyen Tran Duc

Le Quy Don Technical University

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	02/6/2021	This paper proposes a design of a wideband omnidirectional microstrip patch antenna, which can be used in wireless applications such as WLAN, WiMAX... The antenna is designed on FR4 substrate, rectangular microstrip patch, heterogeneous structured feed line. In addition, the solution of cutting an annular-slot on the microstrip patch can help to extend the bandwidth of antenna more than 4 GHz (from 1.91 GHz to 6.14 GHz). In this paper, the design and investigation of antenna parameters at 2.4 GHz WLAN and 3.5/5.5 GHz WiMAX frequencies are carried out on HFSS software. Accordingly, the proposed antenna has a omnidirectional radiation pattern at each above, the gain is 2.4 dBi (at 2.4 GHz), 3.89 dBi (at 3.5 GHz) and 3.2 dBi (at 5.5 GHz).
Revised:	15/7/2021	
Published:	21/7/2021	
KEYWORDS		
Antenna		
Omnidirectional		
Microstrip		
Bandwidth		
Wireless		

THIẾT KẾ ĂNG-TEN VÔ HƯỚNG MẠCH DẢI BĂNG RỘNG SỬ DỤNG TRONG CÁC ỨNG DỤNG KHÔNG DÂY

Phạm Việt Anh*, Nguyễn Hoàng Nguyễn, Phạm Anh Hà, Nguyễn Trần Đức

Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	02/6/2021	Bài báo đề xuất một thiết kế ăng-ten vô hướng mạch dải băng rộng, có thể sử dụng trong các ứng dụng không dây như WLAN, WiMAX... Ăng-ten được thiết kế trên chất nền FR4, với chân tử mạch dải hình chữ nhật, đường cấp nguồn với cấu trúc bất đồng nhất. Ngoài ra, giải pháp khoét một khe hình vành khuyên trên chân tử phát xạ mạch dải, có thể giúp mở rộng băng thông của ăng-ten, đạt hơn 4 GHz (từ 1,91 GHz đến 6,14 GHz). Trong bài báo này, việc thiết kế, khảo sát các tham số của ăng-ten đề xuất ở các tần số 2,4 GHz WLAN và 3,5/5,5 GHz WiMAX được thực hiện trên phần mềm HFSS. Theo đó, ăng-ten đề xuất có giản đồ bức xạ dạng vô hướng ở mỗi tần số trên, độ lợi đạt 2,4 dBi (ở 2,4 GHz), 3,89 dBi (ở 3,5 GHz) và 3,2 dBi (ở 5,5 GHz).
Ngày hoàn thiện:	15/7/2021	
Ngày đăng:	21/7/2021	
TỪ KHÓA		
Ăng-ten		
Vô hướng		
Mạch dải		
Băng thông		
Không dây		

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.4577>

* Corresponding author. Email: anhpv.isi@lqdtu.edu.vn

1. Giới thiệu

Ăng-ten mạch dải, như chúng ta đã biết, có ưu điểm là cấu hình đơn giản, khối lượng nhẹ, khả năng tương thích với các mạch tích hợp [1] và giá thành rẻ. Cùng với xu thế chế tạo các thiết bị điện tử, trong đó có các thiết bị truyền thông không dây ngày càng nhỏ gọn, độ tích hợp cao, vì vậy, ăng-ten mạch dải hiện nay được sử dụng khá phổ biến.

Ăng-ten mạch dải trong các ứng dụng truyền thông không dây (như WLAN, WiMAX, LTE, ITU-Region1, 5G, IoT, định vị và thông tin vệ tinh...) thường yêu cầu có giản đồ bức xạ vô hướng trong mặt phẳng phương vị, độ rộng chùm hẹp trong mặt phẳng tà [2] và được gọi là “ăng-ten vô hướng mạch dải”.

Như chúng ta đã biết, độ rộng băng thông hẹp chính là một nhược điểm của các ăng-ten mạch dải nói chung. Băng thông điển hình của ăng-ten mạch dải là dưới 10% so với tần số làm việc trung tâm. Đã có nhiều nghiên cứu về việc mở rộng băng thông, nâng cao chất lượng của ăng-ten vô hướng mạch dải ở nhiều dải tần khác nhau (cho các ứng dụng khác nhau) đã được công bố. Các ăng-ten được thiết kế có thể làm việc ở nhiều băng tần như [3]-[6] hoặc với một băng tần siêu rộng như [7]-[11]. Băng thông của ăng-ten vô hướng mạch dải hiện nay đã được mở rộng rất nhiều và thích hợp đồng thời với nhiều ứng dụng hơn.

Ăng-ten nhiều băng tần có tính chọn lọc tần số cao, nhưng chỉ hoạt động ở những tần số cố định. Ví dụ ở [3], [4], ăng-ten có hai băng tần thích hợp với các ứng dụng 3,5 GHz WiMAX và 5,8 GHz WLAN; còn ở [5], ăng-ten có ba băng tần tương ứng với 2,4 GHz WLAN và 3,5/5,5 GHz WiMAX, thậm chí có bốn băng tần như ở [6] tương ứng với 3,5 GHz WiMAX, 4,3 GHz ITU và 5,2/5,8 GHz WLAN. Loại ăng-ten có tính linh hoạt bị hạn chế và thường có cấu trúc rất phức tạp.

Hiện nay, ăng-ten một băng tần siêu rộng đang rất được quan tâm và phát triển, đóng vai trò quan trọng trong các hệ thống truyền thông không dây tốc độ dữ liệu cao [7], đáp ứng đồng thời với nhiều ứng dụng khác nhau. Tuy nhiên, việc thiết kế loại ăng-ten này có nhiều thách thức hơn so với ăng-ten băng hẹp. Việc thiết kế phải đảm bảo khả năng hoạt động của ăng-ten trên một băng thông rộng. Đồng thời, các đặc tính bức xạ cũng phải thỏa mãn yêu cầu nhất định trên toàn dải tần. Ví dụ: ở [8], một ăng-ten được đề xuất với băng thông siêu rộng đạt 16,3 GHz (2,9 – 19,2 GHz). Tuy nhiên, giản đồ bức xạ vô hướng chỉ được đảm bảo ở tần số 3,5 GHz WiMAX và 5,8 GHz WLAN; ở [9], băng thông ăng-ten được đề xuất đạt 1,6 GHz (2,15-3,72 GHz). Ăng-ten này chỉ được sử dụng cho 2,4 GHz WLAN và 3,5 GHz WiMAX; ở [10], ăng-ten được đề xuất có băng thông đạt 1,88 GHz (2,17 – 4,05 GHz), chỉ phù hợp cho 2,4 GHz WLAN, 2,6 GHz LTE và 3,5 GHz WiMAX; ở [11], ăng-ten có băng thông siêu rộng 7,5 GHz (3,1-10,6 GHz). Nhưng chỉ tại các tần số 4, 6, 8 và 10 GHz, giản đồ bức xạ là vô hướng.

Như vậy, bài toán đặt ra với nhóm tác giả của bài báo này là thiết kế một ăng-ten mạch dải có thể hoạt động trong một băng thông rộng, có giản đồ bức xạ đảm bảo tính vô hướng trong toàn dải tần, đáp ứng được hầu hết các ứng dụng truyền thông không dây có tần số làm việc dưới 6 GHz. Trong khuôn khổ của bài báo này, nhóm tác giả tập trung khảo sát các tham số của ăng-ten đề xuất ở các tần số 2,4 GHz WLAN, 3,5 GHz và 5,5 GHz WiMAX, để chứng minh khả năng làm việc cũng đảm bảo như tính vô hướng của ăng-ten đề xuất trong toàn dải tần.

2. Phương pháp nghiên cứu

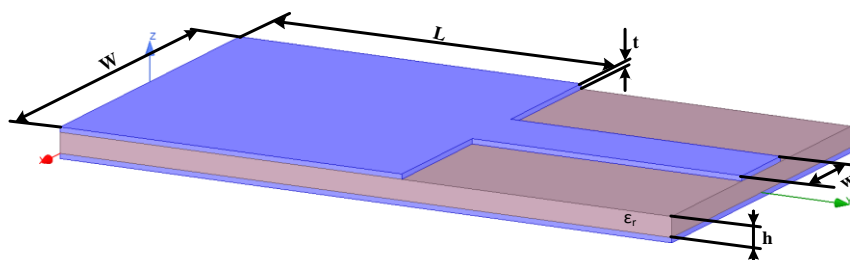
Phương pháp nghiên cứu dựa trên các lý thuyết cơ bản về ăng-ten, kết hợp phân tích tài liệu về ăng-ten vô hướng mạch dải. Từ đó, lựa chọn cấu trúc ăng-ten thích hợp với yêu cầu bài toán đặt ra, đề xuất giải pháp mở rộng băng thông của ăng-ten. Kết hợp sử dụng phần mềm mô phỏng trường điện từ HFSS để thiết kế, mô phỏng và khảo sát các tham số của ăng-ten đề xuất.

2.1. Lựa chọn cấu trúc ăng-ten

Ăng-ten vô hướng mạch dải sử dụng trong các ứng dụng không dây phần lớn có dạng chân từ hình chữ nhật, hình tròn, hình lục giác, hình tam giác v.v. và đường cấp nguồn mạch dải 50Ω.

Việc mở rộng băng thông và tạo tính vô hướng của ăng-ten mạch dải nhận được bằng cách biến đổi cấu trúc các mặt bức xạ hoặc đường cấp nguồn. Ví dụ, ở [1] người ta tạo đường chuyển tiếp có kiểu bậc thang ở vị trí tiếp giáp giữa mặt chắn từ phát xạ với đường cấp nguồn. Ngoài ra, cũng có thể khoét các mặt bức xạ thành các khe có hình dạng khác nhau như: ở [2]-[6] sử dụng các khe có hình dạng phức tạp, ở [7] sử dụng khe hình tròn, hoặc khe hình tam giác như ở [8], còn ở [9], [10] là khe hình chữ C v.v. Đặc biệt, ở [11] đề xuất sử dụng đường cấp nguồn không đồng nhất.

Để thực hiện bài toán thiết kế ăng-ten vô hướng mạch dải cho các ứng dụng không dây, hoạt động ở dải tần dưới 6 GHz, nhóm tác giả bài báo này lựa chọn cấu trúc chắn từ mạch dải hình chữ nhật, kích thước $W \times L$, đường cấp nguồn 50Ω . Chất điện môi (chất nền) được lựa chọn là FR4 với hằng số điện môi $\epsilon_r = 4,5$, có độ dày là $h = 1,6$ mm. Độ dày lớp dẫn điện (đồng) là $t = 0,035$ mm. Hình 1 thể hiện cấu trúc ăng-ten mạch dải.



Hình 1. Cấu trúc ăng-ten mạch dải

Kích thước chắn từ mạch dải $W \times L$ được tính toán theo công thức (1,2) [12] như sau:

$$W = \frac{c}{2f_0} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1)$$

$$L = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{reff}}} - 2\Delta L \quad (2)$$

Trong đó: $c = 3.10^8$ (m/s) – vận tốc ánh sáng; hằng số ϵ_{reff} và giá trị ΔL được tính theo công thức (3,4):

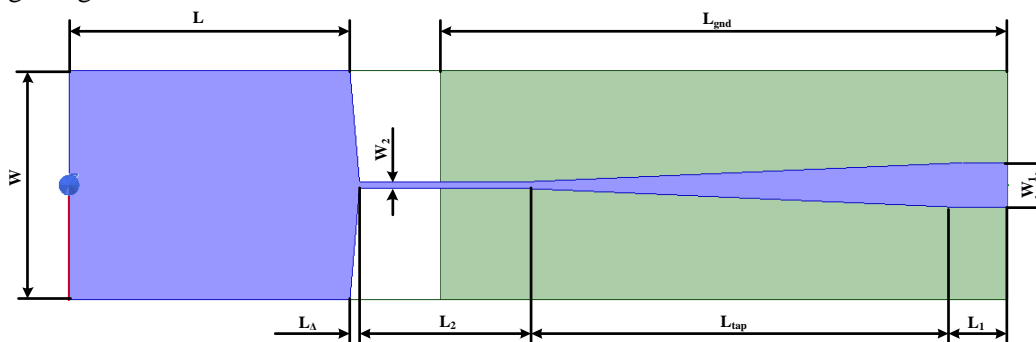
$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (3)$$

$$\frac{\Delta L}{h} = 0,412 \frac{\left(\epsilon_{reff} + 0,3 \right) \left(\frac{W}{h} + 0,264 \right)}{\left(\epsilon_{reff} - 0,258 \right) \left(\frac{W}{h} + 0,8 \right)} \quad (4)$$

Để tạo tính vô hướng cũng như mở rộng băng thông của ăng-ten mạch dải nêu trên, nhóm tác giả sử dụng giải pháp biến đổi cấu trúc các mặt phát xạ và đường cấp nguồn như đã được trình bày trong [11]. Trong đó trình bày giải pháp mở rộng băng thông ăng-ten vô hướng mạch dải (từ 3,1÷10 GHz). Theo đó, từ điểm đầu cấp nguồn đến điểm tiếp giáp với chắn từ phát xạ là đường truyền không đồng nhất. Cấu trúc ăng-ten sau biến đổi được mô tả trên Hình 2.

Cụ thể, đoạn chuyển tiếp từ đường cấp nguồn thành chắn từ phát xạ được tạo vát, có chiều dài là L_Δ . Đường cấp nguồn được chia thành các đoạn có độ rộng từ W_1 (chiều dài tương ứng là L_1) đến W_2 (chiều dài tương ứng là L_2), đoạn chuyển tiếp có chiều dài là L_{tap} . Ngoài ra, ở mặt dưới của ăng-ten mạch dải, lớp đất (hay còn gọi là lớp mát) được phủ từ điểm đầu cấp nguồn một đoạn

có chiều dài L_{gnd} . Giá trị các kích thước ăng-ten sau khi tính toán và tinh chỉnh được thể hiện trong Bảng 1.



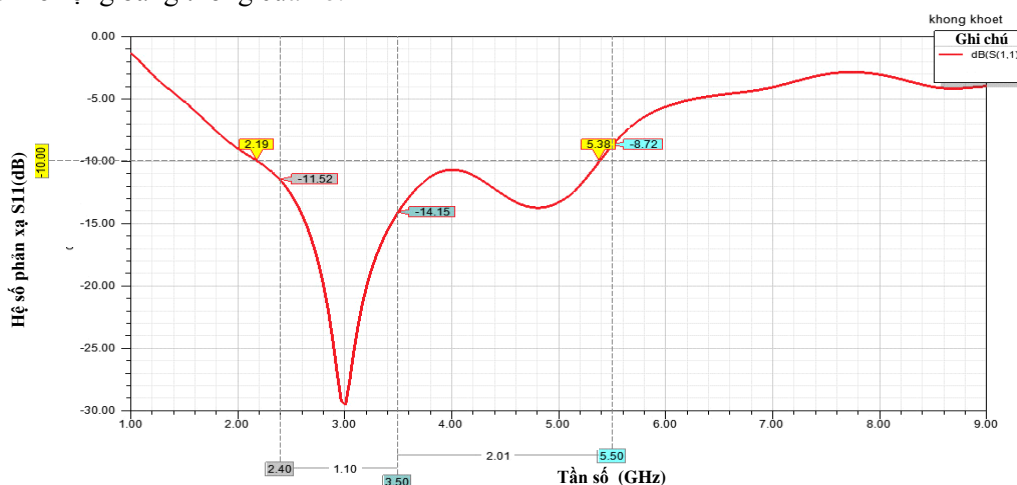
Hình 2. Cấu trúc ăng-ten vô hướng mạch dài

Bảng 1. Giá trị kích thước của ăng-ten đề xuất

(Đơn vị tính: mm)

Kí hiệu	W	L	L_{gnd}	W_1	W_2	L_1	L_2	L_{tap}	L_Δ
Giá trị	16,68	20,74	38,67	2,71	0,32	3,06	12,50	30,69	0,72

Sử dụng phần mềm HFSS, thực hiện khảo sát hệ số phản xạ (S_{11}) của ăng-ten và cho kết quả như ở Hình 3. Nhận thấy, băng thông của ăng-ten đạt từ 2,19 GHz đến 5,38 GHz (tức là đạt 84,28%). Tuy nhiên, để cấu trúc ăng-ten này có thể phù hợp cho một số ứng dụng khác (ví dụ, WiMAX ở 5,5 GHz, WLAN ở 5,8 GHz ...) cũng hoạt động ở tần số dưới 6 GHz, cần phải có giải pháp mở rộng băng thông của nó.



Hình 3. Hệ số phản xạ S_{11} của ăng-ten khi chưa mở rộng băng thông

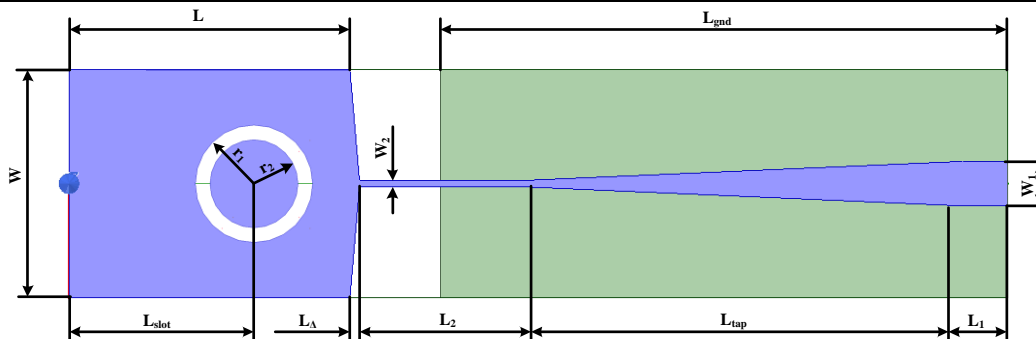
2.2. Đề xuất giải pháp mở rộng băng thông của ăng-ten

Để mở rộng băng thông ăng-ten, như đã biết, có nhiều giải pháp đã được thực hiện, trong đó việc thay đổi hình dạng của các mặt phát xạ là khá phổ biến. Đối với ăng-ten mạch dài đã được trình bày ở trên, nhóm tác giả bài báo này đề xuất giải pháp khoét một khe hình vành khuyên trên mặt chắn từ phát xạ (Hình 4).

Trong đó, vị trí tâm của hình vành khuyên cách mép trên của chắn từ phát xạ một đoạn là L_{slot} , bán kính hai đường tròn tạo nên hình vành khuyên lần lượt là r_1 và r_2 . Sau khi tính toán và tinh chỉnh, các giá trị kích thước được thể hiện trong Bảng 2.

Bảng 2. Giá trị kích thước của ăng-ten đề xuất với khe hình vành khuyên
(Đơn vị tính: mm)

Kí hiệu	W	L	L_{gnd}	W_1	W_2	L_1	L_2	L_{tap}	L_{Δ}	L_{slot}	r_1	r_2
Giá trị	15,47	19,10	38,57	3,02	0,48	3,06	11,63	29,39	0,65	12,50	3,0	4,0

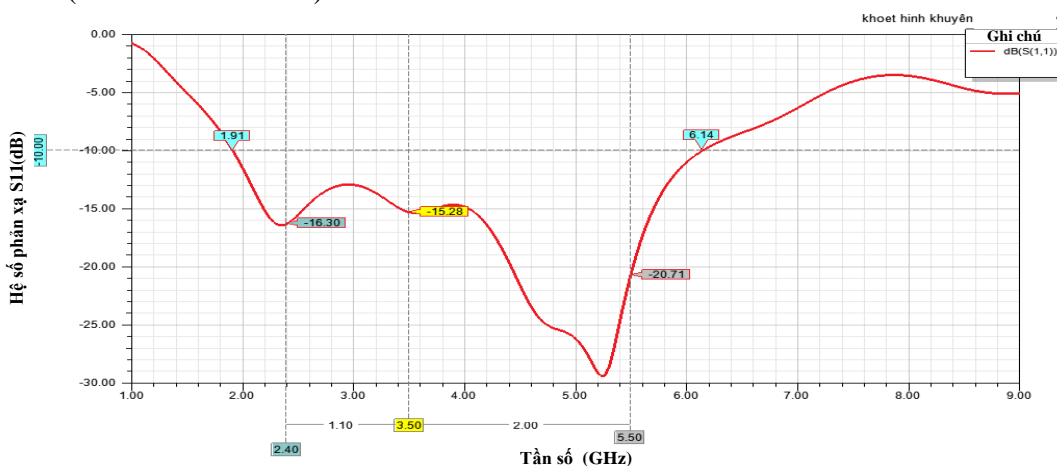


Hình 4. Cấu trúc ăng-ten vô hướng mạch dài với khe hình vành khuyên

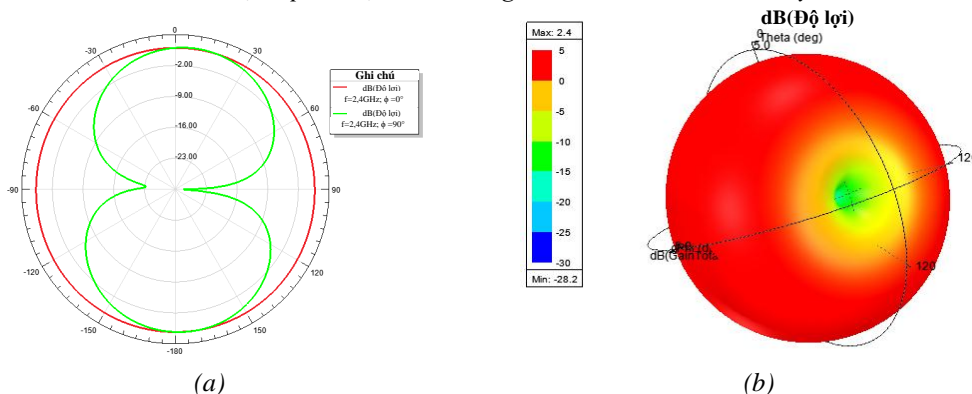
3. Kết quả mô phỏng và đánh giá

3.1. Kết quả mô phỏng

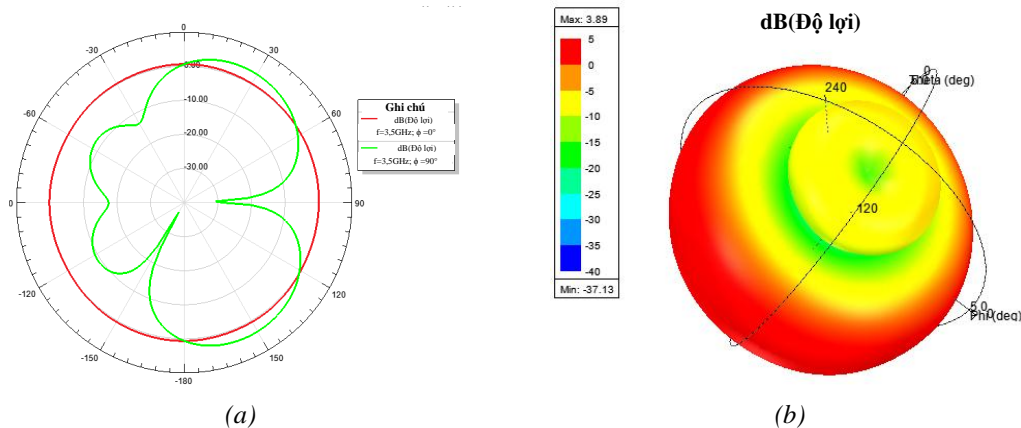
Sử dụng phần mềm HFSS, nhóm tác giả đã thực hiện mô phỏng khảo sát hệ số phản xạ, giản đồ bức xạ ở dạng 2D và 3D của ăng-ten vô hướng mạch dài với khe hình vành khuyên như đã đề xuất (Hình 4) ở 3 tần số là 2,4 GHz, 3,5 GHz và 5,5 GHz. Kết quả mô phỏng được thể hiện trên các hình (từ hình 5 đến hình 8).



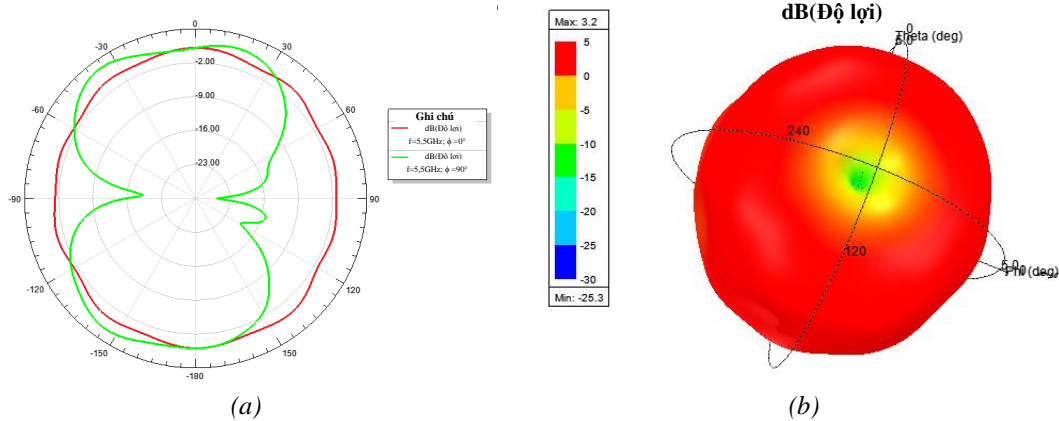
Hình 5. Hệ số phản xạ S11 của ăng-ten với khe hình vành khuyên



Hình 6. Giản đồ bức xạ của ăng-ten tại 2,4 GHz: (a) dạng 2D và (b) dạng 3D



Hình 7. Giản đồ bức xạ của ăng-ten tại 3,5 GHz: (a) dạng 2D và (b) dạng 3D



Hình 8. Giản đồ bức xạ của ăng-ten tại 5,5 GHz: (a) dạng 2D và (b) dạng 3D

3.2. Đánh giá kết quả

Kết quả của hệ số phản xạ S11 (Hình 5) cho thấy, băng thông của ăng-ten đã được mở rộng (từ 1,91 GHz đến 6,14 GHz), đạt khoảng 105%.

Từ hình 6 đến hình 8 thể hiện kết quả khảo sát giản đồ bức xạ dạng 2D và 3D của ăng-ten đề xuất lần lượt tại 3 tần số khác nhau:

- với $f = 2,4$ GHz (Hình 6), độ lợi của ăng-ten đạt 2,4 dBi, tính vô hướng của ăng-ten khá tốt, không có búp sóng bên.
- với $f = 3,5$ GHz (Hình 7), độ lợi của ăng-ten đạt 3,89 dBi, tính vô hướng của ăng-ten cũng khá tốt, tuy nhiên vẫn có búp sóng bên.
- với $f = 5,5$ GHz (Hình 8), độ lợi của ăng-ten đạt 3,2 dBi, tính vô hướng của ăng-ten là có thể chấp nhận được, búp sóng bên rất nhỏ.

Như vậy, ăng-ten mạch dải với cấu trúc đề xuất có thể hoạt động tốt và đảm bảo tính vô hướng cho các ứng dụng truyền thông không dây (làm việc ở dải tần dưới 6 GHz) như WLAN, WiMAX, LTE, ITU...

Để có cái nhìn tương quan với một số thiết kế kiểu ăng-ten vô hướng mạch dải đã được công bố trong những năm gần đây, nhóm tác giả bài báo đưa ra bảng so sánh các tham số ăng-ten (Bảng 3).

Từ bảng 3 cho thấy, so với các thiết kế đã công bố trong những năm gần đây, ăng-ten đề xuất trong bài báo này với một dải thông siêu rộng và độ lợi khá cao, có thể đáp ứng tốt ở nhiều tần số khác nhau. Ngoài ra, với kích thước ở mức trung bình so với các thiết kế khác, cùng với việc sử dụng vật liệu chất nền là FR4 sẽ làm cho sản phẩm có giá thành rẻ, dễ gia công và lắp đặt.

Bảng 3. So sánh các tham số của các phương án ăng-ten khác nhau

Công bố	Kích thước (mm ²)	Vật liệu điện môi	Ứng dụng	Băng thông (GHz)	Độ lợi (dBi)	Tính vô hướng	Năm công bố
[3]	17 x 18	FR4	WLAN 5,8GHz WiMAX 3,5GHz	(3,30-3,71), (5,70-5,94)	1,58, 0,94	có	2020
[4]	22 x 22	FR4	WLAN 5,5GHz WiMAX 3,5GHz	(3,12-3,82), (5,15-5,83)	1,58, 2,28	có	2016
[5]	18 x 28	FR4	WLAN 2,4/5,2/5,8GHz WiMAX 3,5/5,5GHz	(2,38-2,48), (3,37-3,79), (4,36-6,06)	1,18, 3,27, 3,47	có	2020
[6]	15 x 15	FR4	WLAN 5,2/5,8GHz WiMAX 3,5GHz ITU 4,3GHz	(3,0-3,90), (4,10-4,70), (4,90-5,40), (5,60-6,60)	-	có	2017
[8]	40 x 40	FR4	WLAN 5,2/5,8GHz WiMAX 5,5GHz	(3,10-10,6) (1 băng siêu rộng)	3,5-10	có	2016
[9]	34 x 40	FR4	WLAN 2,4GHz WiMAX 3,5GHz	(2,45-3,44) (1 băng siêu rộng)	1,0, 3,12	có	2016
[10]	30 x 40	FR4	WLAN 2,4GHz LTE 2,6GHz WiMAX 3,5GHz	(2,17-4,05) (1 băng siêu rộng)	2,45, 2,55, 4,24	có	2018
Đề xuất trong bài báo này	15 x 64	FR4	WLAN 2,4/5,2/5,8GHz WiMAX 2,5/3,5/5,5GHz LTE 2,1/2,6GHz ITU 4,3GHz	(1,91-6,14) (1 băng siêu rộng)	2,4, 3,89, 3,2	có	2021

4. Kết luận

Trong khuôn khổ bài báo, các nội dung đã được thực hiện:

- Nghiên cứu, phân tích tài liệu về ăng-ten vô hướng mạch dải;
- Lựa chọn cấu trúc và đề xuất giải pháp mở rộng băng thông của ăng-ten vô hướng mạch dải. Băng thông được mở rộng đạt khoảng 105% (từ 1,91 GHz đến 6,14 GHz).

- Thực hiện mô phỏng, khảo sát giản đồ bức xạ của ăng-ten đề xuất tại các tần số (2,4, 3,5 và 5,5 GHz). Kết quả cho thấy, tính vô hướng của ăng-ten đảm bảo tốt trên toàn dải tần hoạt động, độ lợi đạt 2,4 dBi (ở 2,4 GHz), 3,89 dBi (ở 3,5 GHz) và 3,2 dBi (ở 5,5 GHz).

Như vậy, cấu trúc ăng-ten vô hướng mạch dải băng rộng đề xuất có thể thích hợp cho các ứng dụng truyền thông không dây, hoạt động ở tần số dưới 6 GHz. Trong bối cảnh bùng nổ của cuộc cách mạng công nghiệp 4.0, các ứng dụng không dây, IoT đang được phát triển mạnh mẽ. Có thể nói rằng, hướng nghiên cứu về ăng-ten vô hướng mạch dải băng rộng cho các ứng dụng không dây hiện nay rất quan trọng và có tiềm năng. Yêu cầu tối ưu hóa cấu trúc, nâng cao chất lượng của ăng-ten là bài toán quan trọng đặt ra cho các nghiên cứu tiếp theo của nhóm tác giả.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] L. Mirchandani, L. Solanki, A. Karwa, and A. Mathur, "A Rectangular Micro Strip Patch Antenna for Ultra Wide Band Application Using HFSS Software," *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 12, pp. 10-13, 2017.
- [2] L. Brás, N. B. Carvalho, and P. Pinho, "Planar Omnidirectional Microstrip Antenna Array for 5 GHz ISM and UNII band," *AP-S 2013*, pp. 1590-1591, 2013.

-
- [3] D. K. Naji, "Miniature Slotted Semi-Circular Dual-Band Antenna for WIMAX and WLAN Applications," *Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 20, pp. 115-124, 2020.
- [4] D. K. Naji, "Compact Design of Dual-band Fractal Ring Antenna for WIMAX and WLAN Applications," *International Journal of Electromagnetics and Applications 2016*, vol. 6, no. 2, pp. 42-50, 2016.
- [5] S. Wang, K. Li, F. Kong, and L. Du, "A miniaturized triple-band planar antenna combining single-cell metamaterial structure and defected ground plane for WLAN/WIMAX applications," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 35, pp. 357-370, 2021.
- [6] M. Rezvani and Y. Zehforoosh, "Design of Multi-band Microstrip Antenna for Wireless Communications and ITU Applications," *The National Academy of Sciences Letters*, vol. 40, no. 5, pp. 331-334, 2017.
- [7] E. G. Lim, Z. Wang, C.-U. Lei, Y. Wang, and K. L. Man Ultra, "Wideband Antennas – Past and Present," *IAENG International Journal of Computer Science 2010*, vol. 37, no. 3, pp. 304-314, 2010.
- [8] A. Boutejdar and W. A. Ellatif, "A novel compact UWB monopole antenna with enhanced bandwidth using triangular defected microstrip structure and stepped cut technique," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 58, pp. 1514-1519, 2015.
- [9] Y. Zimu, Z. Hou, Z. Leiming, and W. An, "A U-shaped Slot Antenna for WLAN and WIMAX Applications," *7th Asia Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2016, pp. 152-154.
- [10] D. Ahmed, M. A. Salamin, S. al-Hani, and B. Larbi, "Miniature Tri-Band Microstrip Antenna for WLAN, LTE and WiMAX," *Microwave Electronics*, no. 1, pp. 19-23, 2018.
- [11] Y. Firdaus, M. Silvana, Rusfandi, R. Fernandez, and H. Adre, "Study on the Design of UWB Antenna for Omnidirectional Pattern," *2018 International Conference on Applied Science and Technology (ICAST)*, 2018, pp. 78-81.
- [12] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design 4th Edition*. John Wiley and Sons, 2016.