

# ANTEN BA BĂNG SỬ DỤNG CẤU TRÚC KẾT HỢP DGS-SIW CHO CÁC THIẾT BỊ WIFI-6E/ WIFI-7 VÀ V2X TRONG CÁC ỨNG DỤNG IoE

## TRIPLE-BAND ANTENNA USING COMBINING DGS-SIW STRUCTURE FOR WIFI-6E/ WIFI-7 AND V2X TERMINALS IN IoE APPLICATIONS

Dương Thị Thanh Tú\*, Nguyễn Văn Hòa

Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông, Hà Nội, Việt Nam<sup>1</sup>

\*Tác giả liên hệ / Corresponding author: tudtt@ptit.edu.vn

(Nhận bài / Received: 13/6/2023; Sửa bài / Revised: 14/9/2023; Chấp nhận đăng / Accepted: 19/9/2023)

**Tóm tắt** - IoE (Internet of Everything) là xu hướng kết nối mọi thứ vào mạng internet, điều này đòi hỏi các chuẩn công nghệ mới với các yêu cầu cao về độ rộng băng thông, độ linh hoạt trong sử dụng băng tần. Trong bài báo này, một anten ba băng được đề xuất dựa trên cấu trúc anten phẳng nhằm đơn giản về chế tạo và dễ dàng tích hợp trong các mạch thu phát. Anten sử dụng cấu trúc mặt phẳng đất khuyết DGS (Defected Ground Structure) để chủ động tối ưu từng tần số cộng hưởng. Kết hợp với cấu trúc ống dẫn sóng tích hợp trên chất nền SIW (Substrate Integrated Waveguide), anten đề xuất có đặc tính ngăn chặn rò rỉ bức xạ của điện trường, mang lại sự cải thiện về hiệu suất, hệ số khuếch đại cũng như độ cộng hưởng cực đại trên từng băng tần hoạt động. Cộng hưởng tại ba băng tần 2,4GHz, 5GHz và 5,9 GHz với độ lợi cao, băng thông rộng, anten ba băng DGS-SIW có thể sử dụng cho các thiết bị đầu cuối theo các chuẩn không dây tiên tiến như 802.11ax, be, bd, ...

**Từ khóa** - SIW (Substrate Integrated Waveguide); DGS (Defected Ground Structure); anten ba băng; 802.11.

### 1. Đặt vấn đề

IoE (Internet of Everything) là thuật ngữ được Cisco đưa ra lần đầu tiên vào năm 2013 cho giai đoạn phát triển công nghệ internet trong một thập kỷ 2013-2022 và giờ đang là xu thế tất yếu trong kỷ nguyên số hóa hiện nay. Không chỉ là các thiết bị mạng, các bộ cảm biến trong đời sống hàng ngày (IoT – Internet of Thing) mà cả các thiết bị, máy móc trong các ngành công nghiệp (IIoT – Industry IoT) đến các phương tiện giao thông (IoV- Internet of Vehicle) đều sử dụng mạng internet làm nền tảng kết nối giữa các thiết bị đầu cuối với nhau [1]. Trong bối cảnh số lượng phương tiện giao thông gia tăng đáng kể, vấn đề tắc đường và tình hình giao thông ngày càng trở nên phức tạp, công nghệ V2X (Vehicle-to-Everything) hướng tới IoV, hoạt động trên băng tần 5,9 GHz với khả năng trao đổi thông tin liên quan đến tình huống giao thông, tình trạng đường và lưu lượng xe cộ đã và đang trở thành vấn đề thu hút sự quan tâm rất lớn [2]. Đây là một công nghệ mang lại tiềm năng để giải quyết các thách thức giao thông hiện đại, tạo ra một hệ thống giao thông thông minh và hiệu quả hơn, phục vụ cộng đồng. Bên cạnh đó sự phát triển không ngừng của mạng không dây thế hệ mới WLAN (Wireless Local Area Network) như WiFi 6/ 6E/ WiFi 7 cũng như mạng 5G đã mang lại những bước đột phá cho IoT nói chung cũng như IIoT nói riêng [3]. Với 3 băng tần 2,4GHz, 5GHz, 6GHz cùng băng thông rộng, WiFi 6E/ WiFi 7 đóng vai trò quan trọng trong các công nghệ không dây hỗ trợ cho IoT/

**Abstract** - IoT (Internet of Everything) is a trend that demands a lot of technological development for achieving bandwidth enlarge or/ and flexible frequency spectrum. In this paper, a triple-band antenna using the planar structure for easy fabricating in circuit is proposed. Combining structure of DGS (Defected Ground Structure) and SIW (Substrate Integrated Waveguide), the proposed antenna can both optimize desired resonant frequencies and prevent leakage radiation. Thus, the antenna performance parameters that are gain, radiation efficiency, and return loss are improved. Operating at three bands that are 2.4GHz, 5GHz, and 5.9GHz with high gain and wide bandwidth, the DGS-SIW antenna can be applied to terminals in modern communication systems such as 802.11ax, be, bd.

**Key words** - SIW (Substrate Integrated Waveguide); DGS (Defected Ground Structure); triple-band antenna; 802.11.

IIoT, cung cấp tốc độ dữ liệu cao cùng khả năng linh hoạt trong việc sử dụng băng thông [4], [5].

Anten vi dải là loại anten phẳng, kích thước nhỏ, dễ dàng thiết kế, chế tạo cũng như tích hợp trên mạch thu phát vô tuyến, vẫn luôn là một trong các ứng viên đầy triển vọng cho thiết kế anten trong thiết bị đầu cuối, các bộ cảm biến [6]. Khá nhiều thiết kế anten vi dải đa băng cho các hệ thống truyền thông vô tuyến tiên tiến được công bố trong thời gian gần đây [7]-[13]. Các anten này thường sử dụng thêm các kỹ thuật, cấu trúc tiên tiến như DGS (cấu trúc mặt đất khuyết), EBG (cấu trúc dải chắn điện từ), cấu trúc hình học fractal hay cấu trúc SIW (ống dẫn sóng trong chất nền),... để tạo đa băng hay cải thiện hiệu năng của anten. Caixia Feng và cộng sự [8] sử dụng cấu trúc kết hợp CSRR và SIW cho thiết kế anten hai băng cho ứng dụng 2,4/5,2/5,8 GHz WLAN tuy nhiên anten có kích thước khá lớn so với băng tần hoạt động. Suresh Akkole và các cộng sự [9] kết hợp hình học fractal với 26 khe DGS hình chữ nhật để tạo năm băng tần nhưng anten lại có độ lợi không cao và hiệu suất bức xạ khá thấp. Hiệu suất bức xạ thấp cũng là nhược điểm của khá nhiều thiết kế anten vi dải như Shengnan Zhao và các cộng sự [7] với cấu trúc SIW hình chữ U viền quanh bức xạ hay anten vi dải kết hợp DGS với via kép trong thiết kế của Ahmad A. Salih và các cộng sự đề xuất [11].

Trong bài báo này, anten DGS-SIW đề xuất sử dụng ba khe DGS hình chữ nhật cho việc tối ưu hóa ba băng tần cộng hưởng tại 2,4 / 5/ 5,9 GHz bao phủ băng tần của các

<sup>1</sup> Posts and Telecommunications Institute of Technology, Hanoi, Vietnam (Duong Thi Thanh Tu, Nguyen Van Hoa)

công nghệ 802.11ax, be và bd [4], [5], [14]. Bên cạnh đó, cấu trúc SIW gồm hai hàng via song song được tối ưu với kích thước khác nhau giúp cải thiện hơn 13% độ lợi và 6,3% hiệu suất bức xạ, đạt hiệu suất bức xạ cao nhất lên đến 95% tại băng tần 5GHz. Hệ số khuếch đại cao nhất đạt 6,1 dB tại băng tần 5,9/ 6GHz, có thể ứng dụng cho các thiết bị đầu cuối không dây tiên tiến WiFi 6E/ WiFi 7 và V2X trong hệ thống IoE.

## 2. Đề xuất thiết kế anten DGS ba băng

### 2.1. Thiết kế chi tiết

Anten được thiết kế trên chất nền Rogers 4350, có hằng số điện môi  $\epsilon_r=3,66$  và độ dày  $h_s=1,52$  mm như chỉ ra trong Hình 1. Kích thước chiều rộng của mặt bức xạ của anten ( $w_p$ ) được tính toán cộng hưởng tại tần số 2,4GHz theo Công thức 1 [15]:

$$w_p = \frac{c}{2 * f \sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

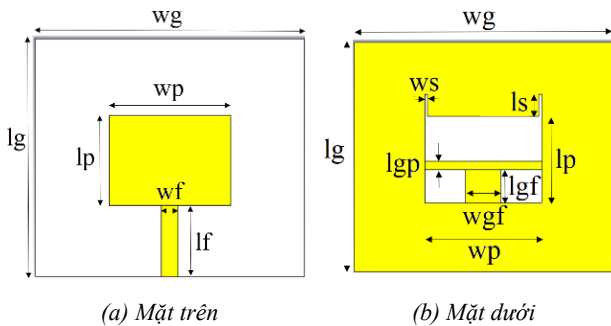
trong đó,  $w_p$  là độ rộng của mặt patch,  $c$  là vận tốc ánh sáng,  $f$  là tần số cộng hưởng,  $\epsilon_r$  là hằng số điện môi của vật liệu.

Sau đó, chiều dài  $L_p$  của miếng bức xạ tiếp tục được xác định theo Công thức 2 [6]:

$$l_p = \frac{1}{2 * f \sqrt{\epsilon_r} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L \quad (2)$$

trong đó,  $\mu_0$  và  $\epsilon_0$  là độ từ thẩm và hằng số điện môi trong chân không.  $\Delta L$  là chiều dài mở rộng.

Ba khe DGS hình chữ nhật với thông số cụ thể được thể hiện trên Bảng 1, được tối ưu dựa trên phần mềm đã được thương mại hóa CST, nhằm tạo ra hai tần số cộng hưởng còn lại.

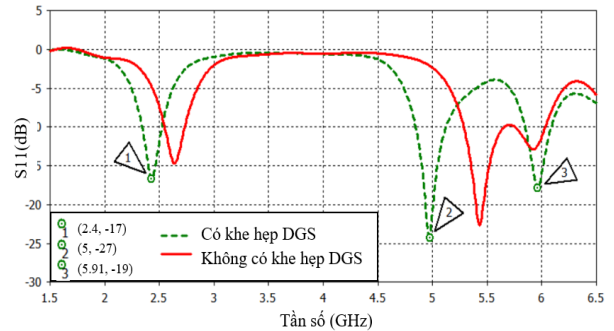


Hình 1. Bản vẽ chi tiết anten DGS đề xuất

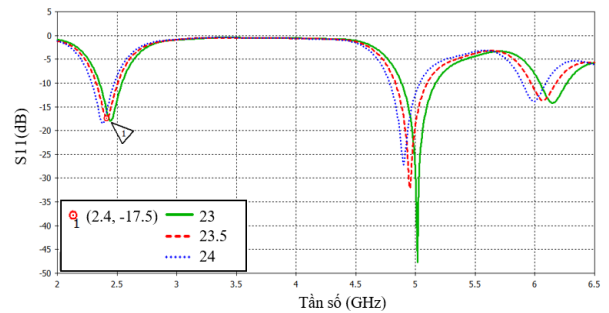
### 2.2. Tối ưu hóa kích thước anten

Như chỉ ra trong Hình 1, cấu trúc DGS trong anten đề xuất gồm có 3 khe hình chữ nhật với 2 thông số kích thước nhằm tạo thêm hai băng tần cao 5GHz và 5,9/6GHz cho anten ba băng. Bên cạnh đó, một cặp khe hẹp có kích thước ( $l_s, w_s$ ) được sử dụng nhằm điều chỉnh tần số cộng hưởng cũng như độ cộng hưởng cực đại trên cả ba băng tần. Các tham số kích thước của cấu trúc DGS được tối ưu sử dụng phần mềm mô phỏng đã được thương mại hóa CST. Kết quả tối ưu được chỉ ra trong Hình 2. Có thể thấy, khi có thêm cặp khe hẹp DGS, tần số cộng hưởng tại băng thấp giảm dần còn băng giữa và băng cao dịch sang hai bên về đúng tần số yêu cầu thiết kế. Đồng thời, giá trị của tham số S11 tại tần số cộng hưởng cũng được giảm xuống đáng kể tại hai băng này.

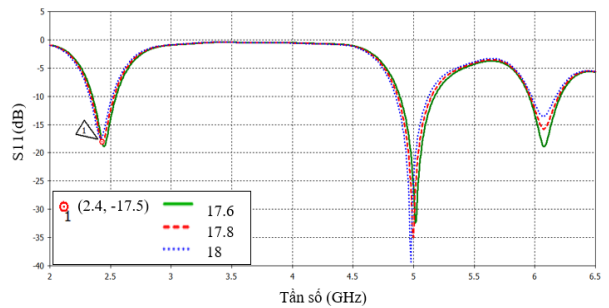
Bên cạnh đó, kích thước  $l_s$  và  $w_s$  của cặp khe hẹp này có ảnh hưởng khá giống nhau trên các băng tần. Từ Hình 2(b) và 2(c) ta có thể thấy, đối với băng thấp và băng giữa, khi tăng dần giá trị chiều rộng và chiều dài của cặp khe hẹp DGS, độ cộng hưởng bị dịch sang trái. Độ cộng hưởng càng sâu khi độ rộng của cặp khe DGS càng hẹp lại.



(a) Có và không có cấu trúc DGS khe hẹp



(b) Chiều dài cặp khe hẹp DGS ( $l_s$ )



(c) Chiều rộng cặp khe hẹp DGS ( $w_s$ )

Hình 2. Ảnh hưởng của cặp khe hẹp DGS lên anten

### 2.3. Kết quả và phân tích

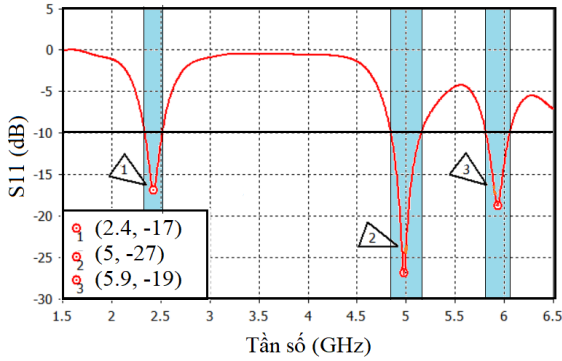
Sau khi thực hiện tối ưu hóa bằng phần mềm CST trên chất nền Rogers 4350, độ dày 1,52mm, kích thước tổng của anten đạt được là 53mm x 48mm. Kích thước chi tiết của cấu trúc anten DGS đề xuất sau khi tối ưu được thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. Các kích thước của anten đề xuất

Tham số	$l_g$	$w_g$	$l_p$	$w_p$	$l_f$	$w_f$	$l_s$	$w_s$	$l_{gf}$	$w_{gf}$	$l_{gp}$
Giá trị (mm)	48	53	17,8	24	10,7	3,35	4,5	0,6	6,8	7,2	1,7

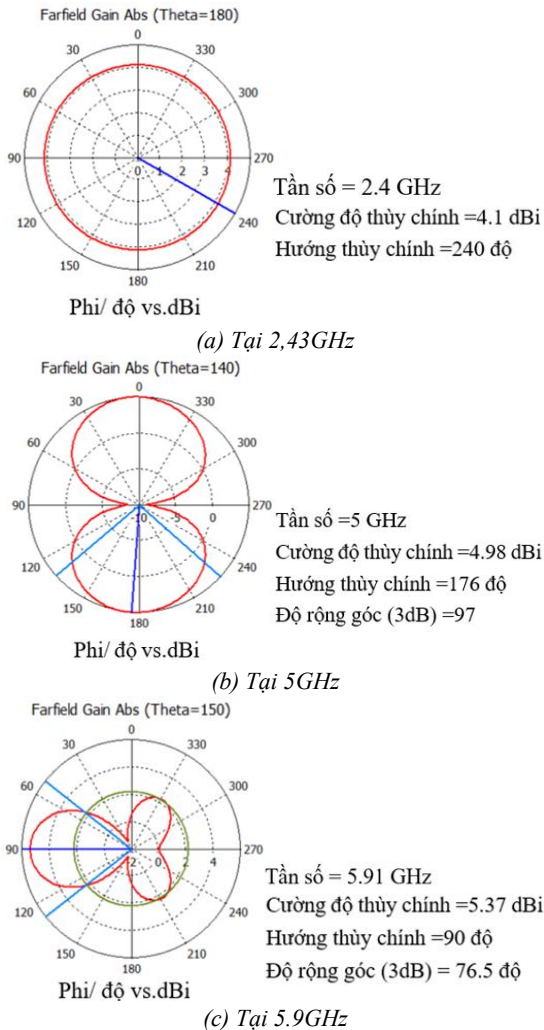
Tham số S11 của anten DGS được thể hiện trên Hình 3. Có thể thấy rõ, anten vi dải DGS có thể hoạt động tại ba băng tần được khuyến nghị cho WiFi 6E/ WiFi 7 theo chuẩn 802.11ax và be: 2,4/ 5/ 6 GHz với băng thông tương ứng là 182 MHz, 296 MHz, 238 MHz. Độ sâu của tham số S11 lần lượt là -17 dB, -27 dB, -19 dB. Anten DGS cũng có thể hoạt

động tại băng 5,9GHz theo khuyến nghị 802.11bd cho ứng dụng V2X/ IoV với băng thông 238MHz.



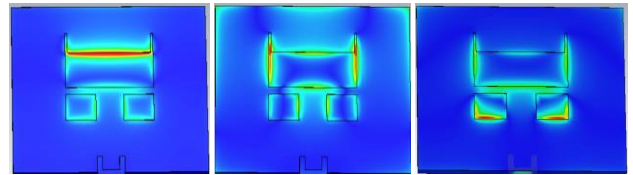
Hình 3. Tham số S11 trên Anten DGS ba băng

Hình 4 mô tả bức xạ 2D của anten tại các tần số cộng hưởng. Có thể thấy, anten đạt hệ số khuếch đại khá tốt. Tại tần số 2,4GHz, cho dù bức xạ hướng nhưng hệ số khuếch đại vẫn lên đến 4,1dB. Kết quả tương tự cho băng tần 5GHz khi có bức xạ song hướng, độ lợi của anten vẫn đạt tới 4,98 dB. Tại băng tần 5,9GHz, với bức xạ có định hướng, anten thu được hệ số khuếch đại 5,37 dB. Bên cạnh đó anten cũng thu được hiệu suất bức xạ khá tốt, đạt 94,8% tại băng tần 5GHz và tương đối ổn, đạt 89% và 75,7% tương ứng tại tần số 2,43 GHz và 5,95 GHz.



Hình 4. Đồ thị bức xạ 2D của anten DGS ba băng

Hình 5 biểu diễn phân bố mật độ dòng trên anten DGS tại ba tần số cộng hưởng. Quan sát thấy, tại băng thấp, phân bố dòng điện chủ yếu tập trung tại cạnh trên khe DGS hình chữ nhật lớn với kích thước bằng đúng kích thước của chiều rộng tấm bức xạ (wp). Điều này có nghĩa, thông số chiều rộng tấm bức xạ (wp), như tính toán lý thuyết ban đầu, có ảnh hưởng lớn nhất lên tần số cộng hưởng của băng thấp nhất. Đối với băng giữa, dòng điện phân bố có điểm khá khác biệt. Trong trường hợp này, dòng điện tập trung chủ yếu tại hai cạnh của miếng bức xạ và thứ yếu trên khe DGS hình chữ nhật. Đây cũng chính là nguyên nhân tạo thêm băng tần thứ hai với tần số cộng hưởng lớn hơn. Tại tần số cộng hưởng 5,9GHz, phân bố dòng điện tập trung chủ yếu tại cạnh dưới của cấu trúc DGS hình chữ nhật nhỏ như phân tích thiết kế ban đầu. Chính vì thế, việc tối ưu tần số cộng hưởng của băng cao sẽ được thực hiện thông qua kích thước của cấu trúc DGS hình chữ nhật nhỏ. Như vậy, với cấu trúc DGS đề xuất, thiết kế anten vi dải có thể điều chỉnh tần số cộng hưởng mong muốn của từng băng tần cho anten ba băng.

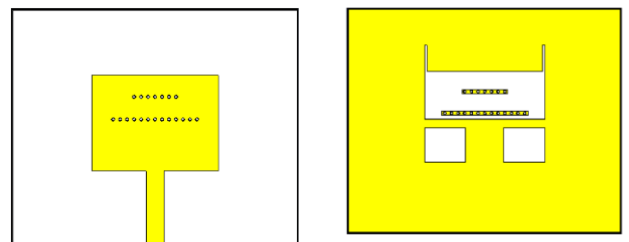


Hình 5. Phân bố mật độ dòng trên anten DGS

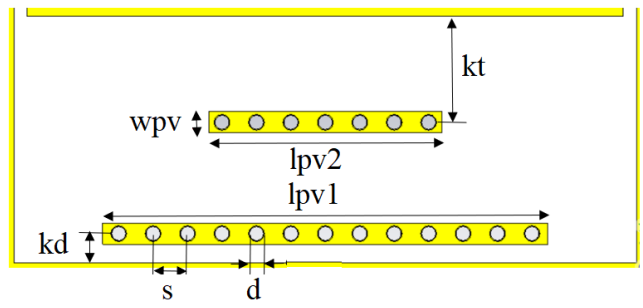
3. Sử dụng cấu trúc SIW cho cải thiện hiệu năng anten

3.1. Thiết kế anten DGS-SIW

Cấu trúc SIW là cấu trúc ống dẫn sóng trong chất nền nhưng với vị trí và cách thức thiết kế hợp lý, cấu trúc SIW cũng có thể giúp ngăn chặn sự rò rỉ bức xạ [7], [16]. Lợi dụng đặc tính này, anten DGS-SIW trong nghiên cứu của chúng tôi sử dụng hai hàng via song song với kích thước khác nhau như được minh họa trong Hình 6 và Bảng 2.



(a) Mặt trên (b) Mặt dưới



(c) Cấu trúc SIW

Hình 6. Thiết kế trên anten DGS-SIW ba băng

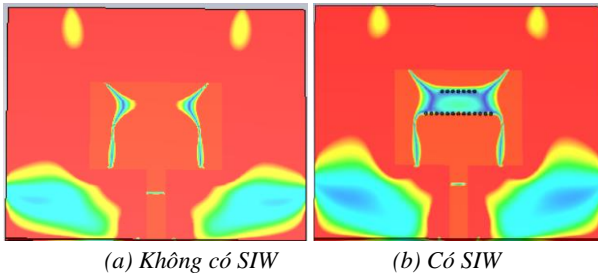
**Bảng 2.** Thông số thiết kế SIW trên anten ba băng

Tham số	lpv1	lpv2	wpv	d	s	kd	kt
<b>Giá trị (mm)</b>	18,6	8,8	0,8	0,6	1	1,1	4

Cấu trúc này có vai trò tách biệt phần điện trường giữa hai cạnh của cấu trúc DGS hình chữ nhật lớn, tránh ảnh hưởng tương hỗ giữa các phần bức xạ gần nhau. Trong thiết kế này, để đạt được giá trị khả ưu vượt về hiệu suất bức xạ và độ lợi, tham số s/d được lựa chọn để tính toán ban đầu trong khoảng từ 2 đến 2,5 [17]. Sau đó tối ưu hóa tiếp bằng phần mềm CST, giá trị thu được s = 1mm, d = 0,6mm, s/d = 1,67.

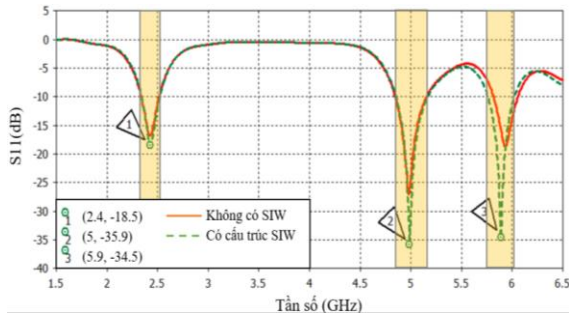
**3.2. Kết quả và phân tích**

Hình 7 biểu diễn phân bố trường điện từ trên anten có và không có cấu trúc SIW. Có thể thấy, khi không có SIW, điện trường ở viền trên và dưới của cấu trúc DGS hình chữ nhật lớn bị kết hợp lại với nhau (Hình 8(a)) gây suy giảm một số thông số hiệu năng của anten. Hai hàng via có kích thước khác nhau trong cấu trúc SIW đề xuất đã tách biệt phần điện trường của cạnh trên và cạnh dưới như thể hiện trong Hình 8(b). Điều này đã cải thiện hệ số khuếch đại của anten cũng như hiệu suất như được chỉ ra trong Bảng 3.



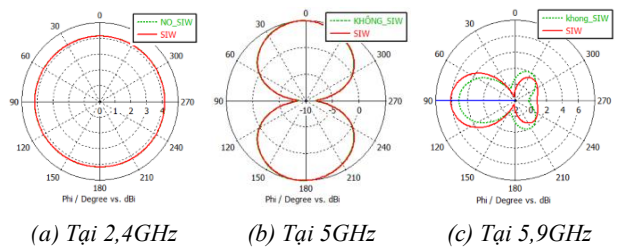
**Hình 7.** Phân bố trường điện từ trên anten ba băng

Tham số S11 trên anten DGS-SIW được thể hiện trên Hình 8. Có thể thấy, cấu trúc SIW đề xuất gần như không làm ảnh hưởng đến băng tần hoạt động cũng như băng thông của anten. Tuy nhiên, cấu trúc này lại cải thiện đáng kể suy hao do tán xạ ngược. Tại tần số cộng hưởng 2,4GHz, tham số S11 giảm nhẹ 1,5dB từ -17dB xuống -18,5dB. Giảm gần 9dB tại tần số cộng hưởng 5GHz, từ -27dB xuống -35,9dB và giảm mạnh, lên đến 15,5dB tại tần số cộng hưởng 5,9GHz, từ -19dB xuống -34,5dB.



**Hình 8.** Tham số S11 trên anten DGS-SIW ba băng

Kết quả tương tự cũng nhận được trên bức xạ 2D. Cấu trúc SIW không những không làm ảnh hưởng đến băng tần hoạt động và băng thông mà còn không làm méo đồ thị bức xạ. Như thể hiện trên Hình 9, bức xạ 2D của anten vẫn giữ nguyên hình dáng vô hướng tại băng tần 2,4GHz, song hướng tại băng tần 5GHz và có định hướng tại băng tần 5,9GHz nhưng lại cải thiện có ý nghĩa độ lợi của anten trên cả ba băng.

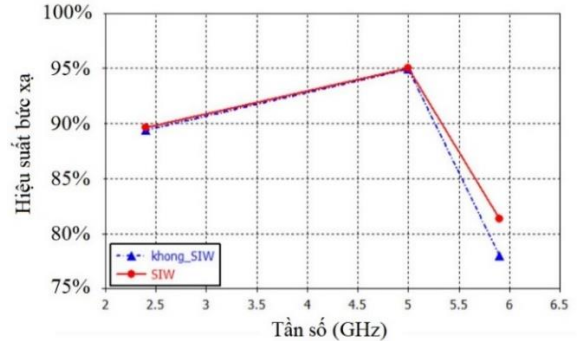


**Hình 9.** Đồ thị bức xạ 2D của anten ba băng

**Bảng 3.** So sánh thông số của anten khi có và không có SIW

Tần số (GHz)	Độ lợi (dB)			Hiệu suất (%)		
	Không SIW	SIW	Cải thiện	Không SIW	SIW	Cải thiện
2,43	4,1	4,2	0,1	89	90	1
5	4,89	5	0,11	94,8	95	0,2
5,9	5,37	6,1	0,73	75,7	82	6,3

Như thể hiện trong Bảng 3 và Hình 10, hiệu suất bức xạ của anten cũng được cải thiện một cách có ý nghĩa. Hiệu suất bức xạ tổng của anten trên cả ba băng tần đều trên 82%. Đặc biệt, hiệu suất bức xạ đạt tới 95% tại băng tần 5GHz.



**Hình 10.** Hiệu suất bức xạ của anten ba băng

**Bảng 4.** So sánh anten DGS ba băng đề xuất với một số anten băng 2,4GHz gần đây

Ref	Số băng tần	Tần số (GHz)	Kích thước (mm <sup>3</sup> )	Công nghệ	Độ lợi (dB)	Băng thông (MHz)	Hiệu suất (%)
[7]	1	2,44	88 x 80 x 3	DGS/ SIW/ đa lớp	2,4	320	48
[8]	2	2,4 5,2/5,8	81,6 x 55,2 x 0,504	CSRR/ SIW	7 7,7	384 1000	82
[9]	3	2,4 3,8 4,6	39,7 x 47 x 1,6	DGS	1,59 1,34 1,32	71 89 80	48,4%
[10]	2	3,76 6,1	34 x 20 x 1	DGS	2,18 2,75	1000 900	96 95,5
[11]	2	2,43 5,2	20 x 18,8 x 0,762	DGS	-1,7 2,4	40 120	30 81
[12]	2	2,45 5,85	56 x 57 x 1,4	EBG/ DGS	3,37 6,47	113 947	37,15 77,13
[13]	2	2,4 5	60 x 60 x 1,6	Slot/ DGS	2,21 -	740 2920	78 -
<b>Đề Xuất</b>	3	2,4	53 x 48 x 1,5		4,2	185	90
		5			5	335	95
		6,1			261	82	

Bảng 4 chỉ ra kết quả so sánh giữa anten DGS/SIW đề xuất với các công bố gần đây khi cùng băng tần hoạt động thấp nhất là băng 2,4GHz. Có thể thấy, ở cùng một băng tần thấp nhất, anten DGS/SIW có kích thước tương đối nhỏ so với một số công bố gần đây nhưng lại thu được hệ số khuếch đại lớn và hiệu suất bức xạ cao trên cả ba băng tần. Bên cạnh đó, băng thông thu được trên mỗi băng tần của anten đủ rộng để đáp ứng yêu cầu của công nghệ băng rộng tiên tiến WIFI 6E/ WiFi7/ X2X trong IoE nhưng không quá rộng để gây nhiễu sang băng tần dưới 6GHz trên thiết bị cũng như các thiết bị khác.

#### 4. Kết luận

Trong bài báo này, nhóm nghiên cứu đã đề xuất một anten vi dải DGS/SIW ba băng trên chất nền Rogers 4350. Nhờ sử dụng bộ cấu trúc DGS hình chữ nhật, anten đề xuất được tối ưu theo đúng 3 tần số cộng hưởng mong muốn. Bên cạnh đó, cấu trúc SIW bao gồm hai đường song song không đều nhau của anten đã ngăn chặn dòng bức xạ trên bề mặt vật liệu, cải thiện một cách có ý nghĩa các tham số hiệu năng cơ bản của anten như suy hao do tán xạ ngược, độ lợi, hiệu suất bức xạ mà không làm ảnh hưởng đến tần số cộng hưởng cũng như đặc tính bức xạ của anten. Với độ lợi lần lượt là 4,2dB, 5dB, 6,1dB; hiệu suất bức xạ 90% 95%, 82%, và băng thông 185 MHz, 335 MHz, 261 MHz tương ứng với ba băng tần 2,4 GHz, 5GHz, 5,9 GHz, anten đề xuất có thể được ứng dụng trong các thiết bị đầu cuối, các bộ cảm biến, ... trong thiết bị thu phát tiên tiến theo chuẩn IEEE 802.11ax, be và bd.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] O. B. Akan, E. Dinc, M. Kuscu, O. Cetinkaya, and B. A. Bilgin, "Internet of Everything (IoE) Molecules to the Universe", *IEEE Communications Magazine (Early Access)*, 8 May, 2023, pp.1-7.
- [2] A. S. Ibrahim, A. M. Yacub, and D. N. Aloï, "A 3-Dimensional Multiband Antenna for Vehicular 5G Sub-6 GHz/GNSS/V2X Applications", *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2022, p. 13, 2022.
- [3] W. Z. Khan, M. H. Rehman, H. M. Zangot, M. K. Africa, N. Armi, and K. Salah, "Industrial internet of things: Recent advances, enabling technologies and open challenges", *Computers and Electrical Engineering*, vol. 81, no. 2, pp. 01-17, 2019.
- [4] IEEE 802.11ax-2021, "IEEE Draft Standard for Information Technology – Telecommunications and Information exchange between systems Local and Metropolitan area network", *IEEE Standard Association*, 19 May, 2021.
- [5] IEEE P802.11be, "IEEE Draft Standard for Information Technology – Telecommunications and Information exchange between systems Local and Metropolitan area network", *IEEE Standard Association*, 21 March, 2019.
- [6] C. A. Balanis, "Antenna Theory: Analysis and Design", Edition 4th, Wiley, 2016.
- [7] S. Zhao, Z. Wang, and Y. Dong, "Circularly Polarized Slot Antenna Based on Half-Mode SIW Cavity", *2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, 19470770, December 2019, pp. 10-13.
- [8] C. Feng, Y. Kang, L. Dong, and L. Wang, "High-Gain SIR Dual-Band Antenna Based on CSRR-Enhanced SIW for 2.4/5.2/5.8 GHz WLAN", *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2020, p. 10, 2020.
- [9] S. Akkole and N. Vasudevan, "Microstrip Fractal MultiBand Antenna Design and Optimization by using DGS Technique for Wireless Communication", *2021 6<sup>th</sup> International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT)*, 20-22 January 2021, pp. 72-77.
- [10] M. F. Nakmouche, A.M.M.A. Allam, D. E. Fawzy, D. B. Lin, and M. F. A. Sree, "Development of H-Slotted DGS Based Dual Band Antenna Using ANN for 5G Applications", *2021 15<sup>th</sup> European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 20674210. 22-26 March 2021. DOI: 10.23919/EuCAP51087.2021.9411213.
- [11] A. A. Salih and M. S. Sharawi, "A Dual-Band Highly Miniaturized Patch Antenna", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol.15, pp. 1783-1786, 2016.
- [12] S. Mallavarapu and A. Lokam, "Dual-Band, EBG-DGS Wearable Antenna for Emergency Services and Responses in WBAN", *Electrical, Control and Communication Engineering*, vol 18, no 1, pp. 1-10, 2023.
- [13] S. Khade, A. Chinchole, P. Pandey, and S. Umredkar, V. Magare, M. Sonkusale, "Circularly Polarized Cylindrical Slot Antenna With and Without DGS", *2020 the Fourth International Conference on Trends in Electronics and Informatics*, 19807435, 17 July 2020, DOI: 10.1109/ICOEI48184.2020.9142893.
- [14] IEEE 802.11bd-2022, "IEEE Draft Standard for Information Technology – Telecommunications and Information exchange between systems Local and Metropolitan area network", *IEEE Standard Association*, 10 March, 2023.
- [15] R. Grag, P. Bhartia, I. Bahl, and A. Ittipiboon, "Microstrip Antenna Design Handbook", Artech House, Antennas and Propagation Library, 2001.
- [16] M. Bozzi, A. Georgiadis, and K. Wu, "Review of substrate-integrated waveguide circuits and antennas", *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 5, no. 8, pp. 909-920, 2011.