

APPLICATION OF SIW TECHNOLOGY IN X-BAND BANDPASS FILTERS DESIGN

Pham Viet Anh*, Hoang Minh Thien, Nguyen Hoang Nguyen, Tran Viet Hung, Nguyen Van Bac
Le Quy Don Technical University

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 19/12/2022	At present, there are many technologies used to design RF bandpass filters such as rectangular waveguide, cavity resonant, microstrip technologies, etc. In this paper, we present the design of an X-band pass filter using SIW (Substrate Integrated Waveguide) technology. The filter is designed on a Roger 5880 substrate with a microstrip line - SIW converter, increasing on-board integration, reducing cost and equipment complexity. Using HFSS software to simulate the filter parameters: the central working frequency is 9.2 GHz, the bandwidth is 400 MHz, the attenuation factor is low -1.16 dB, the reflection coefficient is less than -20 dB. The simulation results in the paper are also compared and evaluated with the results published in recent years. The filter is designed, with the size of 18x76 mm ² , to be suitable for use in the receiver/transmitter modules of radar systems, communications, etc., working in the X band.
Revised: 14/02/2023	
Published: 14/02/2023	
KEYWORDS	
SIW	
Filter	
Bandpass	
Microstrip	
X-Band	

ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ SIW TRONG THIẾT KẾ BỘ LỌC THÔNG DẢI BĂNG TẦN X

Phạm Việt Anh*, Hoàng Minh Thiện, Nguyễn Hoàng Nguyên, Trần Việt Hùng, Nguyễn Văn Bắc
Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 19/12/2022	Hiện nay, có nhiều công nghệ được sử dụng để thiết kế bộ lọc thông dải cao tần như: công nghệ ống sóng hình chữ nhật, hốc cộng hưởng, công nghệ mạch dải v.v. Trong bài báo này, chúng tôi trình bày thiết kế một bộ lọc thông dải băng tần X sử dụng công nghệ ống sóng tích hợp chất nền SIW (Substrate Integrated Waveguide). Bộ lọc được thiết kế trên chất nền là Roger 5880 với bộ chuyển đổi giữa mạch dải và SIW, giúp tăng khả năng tích hợp trên một bo mạch, giảm chi phí và độ phức tạp của thiết bị. Sử dụng phần mềm HFSS mô phỏng các tham số của bộ lọc: tần số làm việc trung tâm là 9,2 GHz, băng thông 400 MHz, hệ số suy hao thấp -1,16 dB, hệ số phản xạ nhỏ hơn -20 dB. Kết quả mô phỏng trong bài báo cũng được so sánh, đánh giá với các kết quả đã được công bố những năm gần đây. Bộ lọc được thiết kế, với kích thước 18x76 mm ² , phù hợp sử dụng trong các mô đun thu/phát của các hệ thống ra đa, thông tin... làm việc ở băng tần X.
Ngày hoàn thiện: 14/02/2023	
Ngày đăng: 14/02/2023	
TỪ KHÓA	
SIW	
Bộ lọc	
Thông dải	
Mạch dải	
Băng tần X	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.7141>

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

1. Giới thiệu

Các bộ lọc thông dải cao tần trong các mô đun thu, phát của các hệ thống vô tuyến điện tử hiện đại (ra-đa, thông tin vệ tinh, truyền thông không dây, v.v.) đóng vai trò rất quan trọng và không thể thiếu. Chúng có nhiệm vụ phân tách, lọc lấy các tín hiệu có ích và loại bỏ các tín hiệu (hài, nhiễu, v.v.) không mong muốn ngoài dải thông [1]. Trong các thiết bị hiện đại yêu cầu về độ chính xác cao, các bộ lọc cần đảm bảo có băng thông hẹp, hệ số suy hao (S_{21}) thấp, hệ số phẩm chất (Q) cao, cấu trúc tối ưu, chi phí thấp và dễ tích hợp. Tuy nhiên, để hài hòa tất cả các yêu cầu đó là một thử thách không nhỏ đối với các nhà thiết kế bộ lọc thông dải cao tần [2].

Hiện nay, có nhiều công nghệ được sử dụng để thiết kế bộ lọc thông dải cao tần như: công nghệ ống sóng hình chữ nhật (rectangular waveguide filter), hốc cộng hưởng (cavity filter), công nghệ mạch dải (microstrip filter) v.v. Trong [2]–[5] cho thấy, các bộ lọc dạng ống sóng hay hốc cộng hưởng được đặc trưng bởi hệ số phẩm chất cao, suy hao nhỏ, tuy nhiên, việc chế tạo lại rất tốn kém và việc kết nối với mạch in tương đối khó khăn do cấu trúc phức tạp. Công nghệ mạch dải tuy đã khắc phục được nhược điểm trên, nhưng suy hao đường truyền khá lớn, khó đạt được băng thông hẹp. Trong những năm gần đây, các bộ lọc cao tần còn được thiết kế trên công nghệ ống sóng tích hợp chất nền (SIW - Substrate Integrated Waveguide). So với việc thực hiện trên công nghệ mạch dải, các bộ lọc SIW có nhiều ưu điểm như hệ số phẩm chất Q cao, tổn hao nhỏ v.v. Ngoài ra, bộ lọc SIW có kích thước nhỏ hơn, dễ tích hợp với các mạch cao tần khác trên cùng chất nền so với bộ lọc dạng ống sóng hình chữ nhật và hốc cộng hưởng [6]. Các bộ lọc SIW đã được công bố gần đây, được thiết kế cho các ứng dụng làm việc không chỉ ở dải tần siêu cao đến hàng chục GHz (dải sóng millimeter) [7], mà còn ở các dải tần thấp hơn [8], như băng C, băng S, băng X.

Trong lĩnh vực quân sự, băng tần X được sử dụng rộng rãi, vì vậy, vấn đề làm chủ công nghệ, tự thiết kế là rất cần thiết. Đối với các bộ lọc băng tần X, công nghệ được sử dụng phổ biến là mạch dải và hốc cộng hưởng. Tuy nhiên, với các hạn chế, khó khăn nêu ở trên, cần giải pháp thực thi mới.

Mục tiêu của bài báo này là trình bày thiết kế, mô phỏng một bộ lọc SIW làm việc ở băng tần X, sử dụng trong mô đun thu/phát cao tần của các hệ thống ra-đa, thông tin và các ứng dụng truyền thông không dây khác. Tần số làm việc trung tâm được lựa chọn ở nghiên cứu này là 9,2 GHz, băng thông khoảng 400 MHz. Thông thường, yêu cầu đối với hệ số phản xạ $|S_{11}|$ là không nhỏ hơn 10 dB, hệ số suy hao $|S_{21}|$ càng bé càng tốt (lý tưởng là bằng 0), nhưng không nên lớn hơn 5 dB.

2. Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp nghiên cứu dựa trên các lý thuyết cơ bản về bộ lọc và công nghệ SIW, kết hợp phân tích tài liệu, công bố về bộ lọc sử dụng công nghệ SIW những năm gần đây. Từ đó, lựa chọn cấu trúc bộ lọc thích hợp với yêu cầu bài toán đặt ra. Kết hợp sử dụng phần mềm mô phỏng trường điện từ HFSS để thiết kế, mô phỏng và khảo sát các tham số của bộ lọc đề xuất.

2.1. Lựa chọn cấu trúc đường truyền SIW

Qua phân tích, tổng hợp các tài liệu về các công nghệ thiết kế bộ lọc cao tần như đã trình bày ở trên, cho thấy công nghệ SIW hoàn toàn phù hợp yêu cầu đối với các tham số bộ lọc băng X (tần số, băng thông, hệ số phản xạ tốt, hệ số suy hao thấp).

Để thiết kế một đường truyền SIW, nhóm tác giả bài báo này lựa chọn cấu trúc cơ bản (Hình 1), với chất nền điện môi là Roger 5880 có hằng số điện môi $\epsilon_r = 2,2$, độ dày $h = 0,508$ mm, ở trên và dưới chất nền là lớp dẫn điện bằng đồng có độ dày $t = 0,035$ mm, hai dây lỗ via được bố trí ở hai cạnh bên dọc theo đường truyền (khoảng cách giữa hai via cạnh nhau được ký hiệu là p , khoảng cách giữa hai dây via là w). Các bước tính toán các kích thước của một đường truyền SIW được trình bày trong [9] – [11].

Kích thước đường kính của lỗ via được lựa chọn thỏa mãn điều kiện [9]:

$$d < \lambda_g/5 \text{ và } p \leq 2d \quad (1)$$

trong đó, λ_g – bước sóng trong đường truyền SIW, được tính theo công thức:

$$\lambda_g = \frac{c}{f_0 \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

trong đó: $c = 3 \cdot 10^8$ (m/s) – vận tốc ánh sáng; f_0 – tần số hoạt động của thiết kế.

Kích thước W_{SIW} , L_{SIW} được tính toán theo công thức [10]:

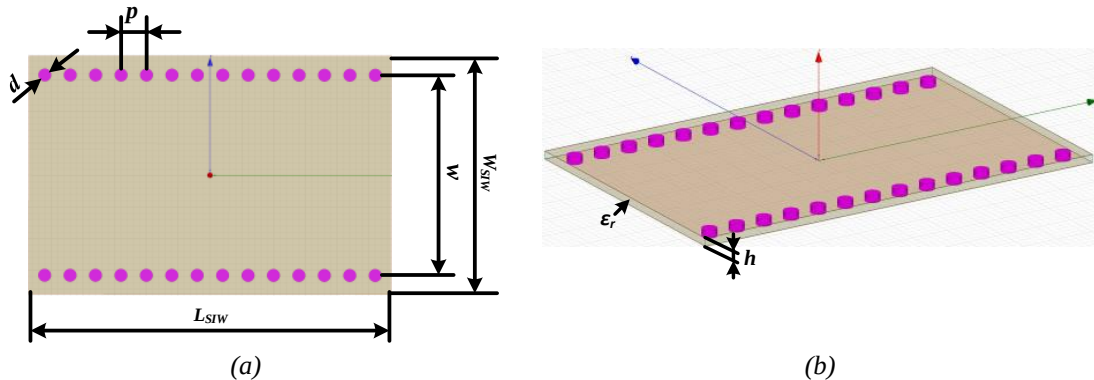
$$W_{SIW} = w - 1,08 \frac{d^2}{p} + 0,1 \frac{d^2}{w} \quad (3)$$

$$L_{SIW} = l - 1,08 \frac{d^2}{p} + 0,1 \frac{d^2}{l} \quad (4)$$

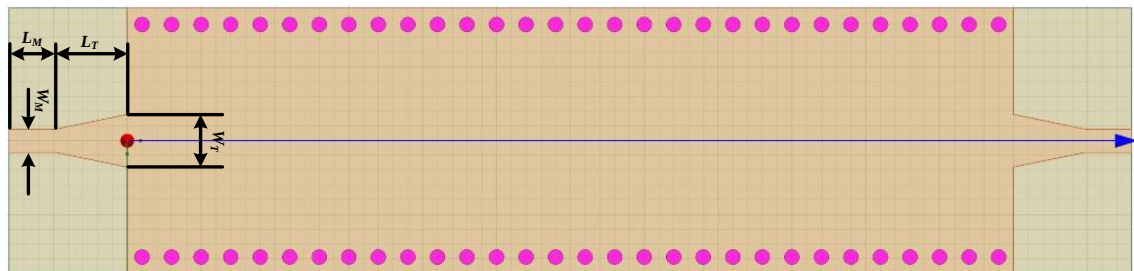
Để đường truyền SIW có thể tích hợp trên mạch in, nhóm tác giả sử dụng chuyển đổi dạng Taper (phần đường mạch dải có dạng hình thang) giữa đường truyền SIW và đường mạch dải 50Ω (độ rộng W_M) (Hình 2).

Kích thước chiều dài của phần chuyển đổi Taper L_T và của phần mạch dải L_M được lựa chọn là bội của một phần tư bước sóng. Kích thước chiều rộng Taper W_T được tính toán theo công thức [11]:

$$W_T = 0,4 \cdot (W_{SIW} - d) \quad (5)$$



Hình 1. Cấu trúc đường truyền SIW (a) hình chiếu đứng, (b) hình chiếu dạng 3D



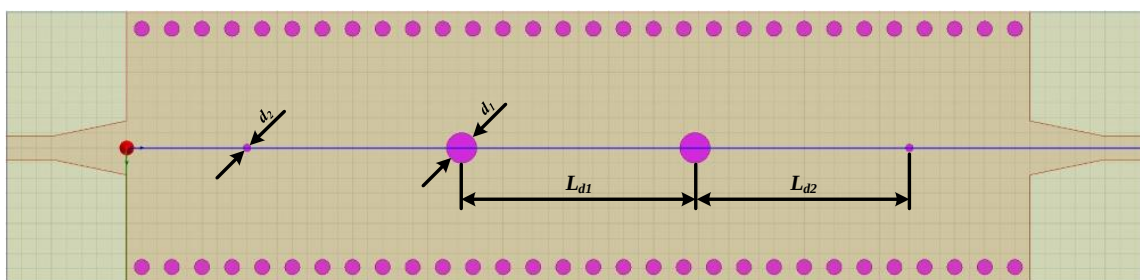
Hình 2. Cấu trúc chuyển đổi giữa đường truyền SIW và đường mạch dải

2.2. Đề xuất bộ lọc SIW băng X

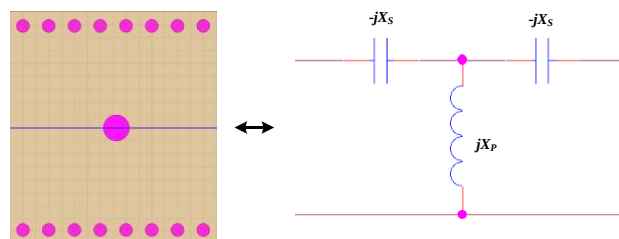
Để thiết kế bộ lọc băng X trên đường truyền SIW, có nhiều giải pháp đã được thực hiện, trong đó đa phần sử dụng các bộ cộng hưởng. Trong [11], [12], đề xuất kiểu cộng hưởng vòng chia cắt bổ sung (CSRR - Complementary Split Ring Resonator). Phổ biến hơn là các bộ cộng hưởng dạng mỏng mắt (Iris Resonator), như trong [13], [14] đã được sử dụng. Có thể kết hợp cả hai kiểu cộng hưởng trên như trong [15]. Ngoài ra, còn một số kiểu cộng hưởng khác như cấu trúc ghép

(Coupling Structure) [16], cấu trúc SIW-EBG [17]. Đối với các bộ lọc ở tần số siêu cao (sóng mm), người ta còn sử dụng các bộ cộng hưởng dạng lỗ trụ tròn (Circular-post) như trong [18].

Nhóm tác giả bài báo này lựa chọn giải pháp sử dụng các lỗ trụ tròn để thiết kế một bộ lọc thông dải băng X, tần số làm việc trung tâm là 9,2 GHz. Cấu trúc bộ lọc đề xuất được thể hiện trên Hình 3. Lỗ trụ tròn được đặt trên đường truyền SIW có mạch điện tương đương, gồm các thành phần dung kháng nối tiếp ($-jX_s$) và thành phần cảm kháng song song (jX_p) như mô tả trên Hình 4.



Hình 3. Cấu trúc bộ lọc thông dải băng X đề xuất



Hình 4. Mạch điện tương đương của một lỗ trụ tròn đặt trên đường truyền SIW

Bộ lọc SIW thông dải băng X, tần số trung tâm 9,2 GHz gồm 4 lỗ trụ tròn (tương ứng 4 mắt lọ) đặt một cách đối xứng, ở chính giữa dọc theo đường truyền SIW (theo trục Y). Do tính đối xứng của bộ lọc, nên kích thước của 2 lỗ trụ tròn gần nhau ở giữa là bằng nhau, ký hiệu là d_1 , cách nhau đoạn L_{d1} , 2 lỗ trụ tròn ở 2 đầu bộ lọc cũng bằng nhau, ký hiệu là d_2 , cách lỗ trụ gần nhất đoạn L_{d2} .

Giá trị các kích thước đường truyền SIW được tính toán theo các công thức (1-5). Giá trị của d_1 , d_2 , L_{d1} , L_{d2} nhận được thông qua phương pháp học kích thước và tinh chỉnh, thực hiện trên phần mềm thiết kế HFSS. Bảng 1 thể hiện giá trị các kích thước bộ lọc đề xuất sau khi tính toán và tinh chỉnh.

Bảng 1. Giá trị kích thước của bộ lọc đề xuất

(Đơn vị tính: mm)													
Kí hiệu	W_{SIW}	L_{SIW}	d	p	w	W_T	W_M	L_T	L_M	L_{d1}	L_{d2}	d_1	d_2
Giá trị	18,0	60,0	1,0	2,0	15,77	3,58	1,56	4,9	3,1	15,5	14,25	2,0	0,5

3. Kết quả mô phỏng và đánh giá

3.1. Kết quả mô phỏng

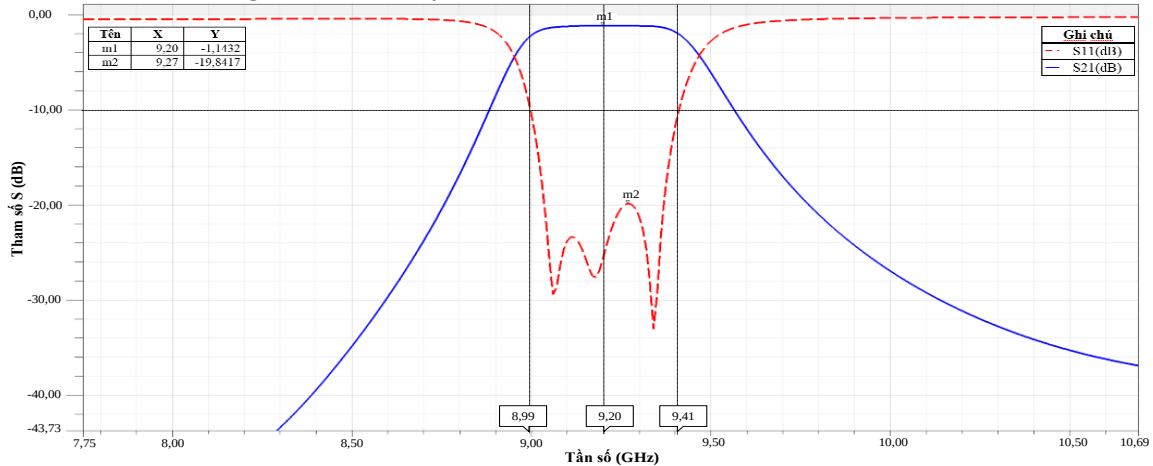
Sử dụng phần mềm HFSS, nhóm tác giả đã thực hiện mô phỏng khảo sát thông số-S, gồm hệ số phản xạ (S_{11}) và hệ số suy hao (S_{21}) của bộ lọc đề xuất. Kết quả mô phỏng được thể hiện trên Hình 5.

3.2. Đánh giá kết quả

Kết quả mô phỏng thông số - S (Hình 5) cho thấy:

- Tần số trung tâm của bộ lọc là 9,2 GHz;

- Băng thông bộ lọc (BW) đạt khoảng 400 MHz (từ 9,0 GHz đến 9,4 GHz);
- Hệ số phản xạ $|S_{11}|$ cao hơn 20 dB;
- Hệ số suy hao $|S_{21}|$ đạt khoảng 1,1 dB;
- Hệ số chất lượng bộ lọc là $Q = f_0/BW \approx 23$, thể hiện độ dốc tốt và tính chọn lọc tín hiệu cao.



Hình 5. Hệ số phản xạ S_{11} và hệ số suy hao S_{21} của bộ lọc đề xuất

Để có cái nhìn tương quan với một số thiết kế bộ lọc thông dải dựa trên công nghệ SIW đã được công bố trong những năm gần đây, nhóm tác giả bài báo đưa ra bảng so sánh các tham số bộ lọc (Bảng 2).

Từ bảng 2 cho thấy, so với các thiết kế đã công bố trong những năm gần đây, bộ lọc đề xuất trong bài báo này có dải thông hẹp hơn, hệ số chất lượng cao, hệ số phản xạ $|S_{11}|$ và suy hao $|S_{21}|$ đều tốt, thể hiện sự phối hợp trở kháng trên đường truyền được đảm bảo. Ngoài ra, kích thước bộ lọc đề xuất ở mức trung bình so với các thiết kế khác, có thể tích hợp trên mạch in hoặc dễ lắp đặt trong hệ thống.

Bảng 2. So sánh các tham số của các phương án ăng-ten khác nhau

Công bố	Kích thước (mm ²)	Vật liệu điện môi	Tần số trung tâm (GHz)	Băng thông (MHz)	Hệ số chất lượng Q	Hệ số phản xạ $ S_{11} $ (dB)	Hệ số suy hao $ S_{21} $ (dB)	Năm công bố
[2]	3 x 12	Roger 5870	10	1000	10	>15	<2	2014
[9]	22 x 22	-	10,5	2000	5,3	>20	0,1	2018
[12]	16 x 90	Roger 5880	8,17	>2000	4,4	>15	0,57	2014
[13]	30 x 75	Roger 5870	9,27	500	18,5	>20	0,84	2016
[14]	20 x 30	Roger 4003C	10,2	7000	1,5	>10	3,8	2018
[15]	30 x 50	Roger 5880	9,0	500	18	>12	2,1	2018
[16]	24 x 70	Roger 5880	10,06	400	25,2	>10	3,8	2010
Đề xuất trong bài báo này	18 x 76	Roger 5880	9,2	400	23	>20	1,1	2023

4. Kết luận

Trong khuôn khổ bài báo, các nội dung đã được thực hiện gồm: Nghiên cứu, phân tích tài liệu về bộ lọc thông dải dựa trên công nghệ SIW; Lựa chọn cấu trúc và đề xuất bộ lọc SIW thông dải băng X với các mắt lọc là các lỗ trụ tròn; Thực hiện mô phỏng, khảo sát tham số - S. Bộ lọc đề xuất có tần số trung tâm là 9,2 GHz, băng thông đạt khoảng 400 MHz, hệ số phẩm chất đạt 23, hệ số phản xạ $|S_{11}| > 20$ dB, hệ số suy hao $|S_{21}|$ đạt khoảng 1,1 dB. Kích thước bộ lọc là 18x76 mm².

Như vậy, cấu trúc bộ lọc SIW thông dải băng X có thể sử dụng trong các mô đun thu/phát cao tần của các hệ thống ra đa, thông tin và các hệ thống truyền thông không dây khác. Tuy nhiên, trong các nghiên cứu tiếp theo, nhóm tác giả bài báo cần tiếp tục tối ưu hóa cấu trúc, nâng cao hệ số phẩm chất, thu hẹp băng thông của bộ lọc, nhằm thay thế hoàn toàn các bộ lọc hóc cộng hưởng băng hẹp hiện nay vẫn đang cần sử dụng rất nhiều.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] J.-S. Hong and M. J. Lancaster, *Microstrip filters for RF/microwave applications*. New York: Wiley, 2001.
- [2] X.-P. Chen and K. Wu, "Substrate Integrated Waveguide Filter: Basic Design Rules and Fundamental Structure Features," *IEEE Microw. Mag.*, vol. 15, no. 5, pp. 108–116, 2014.
- [3] A. Rhbanou, S. Bri, and M. Sabbane, "Analysis of Substrate Integrated Waveguide (SIW) Resonator and Design of Miniaturized SIW Bandpass Filter," *Int. J. Electron. Telecommun.*, vol. 63, no. 3, pp. 255–260, 2017.
- [4] T. T. H. Tran, X. Q. Nguyen, and V. Y. Vu, "Modeling and Design of a Vacuum Resonator Filter for LTE-A Transceiver with Two Cross Couplings," *The University of Da Nang - Journal of Science and Technology*, vol. 4, no. 11(120), pp. 27–31, 2017.
- [5] R. Lahiri and R. Sadhu, "Design of Miniaturized X-Band Microstrip Hairpin Band Pass Filter," *International Symposium on Microwaves-2016 Conference (ISM-16)*, 2016, p. 5.
- [6] L. Xia, J. Xie, and G. Hua, "Design of a Novel Structure SIW Filter," *2012 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Millimeter Wave Wireless Technology and Applications*, 2012, p. 4.
- [7] X.-P. Chen and K. Wu, "Substrate Integrated Waveguide Filters: Design Techniques and Structure Innovations," *IEEE Microw. Mag.*, vol. 15, no. 6, pp. 121–133, 2014.
- [8] S. Hu, Y. Hu, H. Zheng, W. Zhu, Y. Gao, and X. Zhang, "A Compact 3.3–3.5 GHz Filter Based on Modified Composite Right-/Left-Handed Resonator Units," *Electronics*, vol. 9, no. 1, p. 1, 2019.
- [9] I. Badaoui, N. A. Touhami, M. Boussouiss, M. Lamsalli, and M. Moubadir, "Design of substrate integrated waveguide fifth order band pass filter," *Procedia Manuf.*, vol. 22, pp. 514–518, 2018.
- [10] A. O. Nwajana, A. Dainkeh, and K. S. K. Yeo, "Substrate Integrated Waveguide (SIW) Bandpass Filter with Novel Microstrip-CPW-SIW Input Coupling," *J. Microw. Optoelectron. Electromagn. Appl.*, vol. 16, no. 2, pp. 393–402, 2017.
- [11] K. Radhika and S. S. Rajan, "Design and Analysis of Substrate Integrated Waveguide Wideband Filter for X-Band Frequency Applications," *International Journal of Advanced Research in Biology Engineering Science and Technology (IJARBEST)*, vol. 2, no. 14, pp. 119–127, 2016.
- [12] A. Rhbanou, S. Bri, and M. Sabbane, "Design of Substrate Integrated Waveguide Bandpass Filter Based on Metamaterials CSRRs," *Electr. Electron. Eng.*, vol. 4, no. 4, pp. 63–72, 2014.
- [13] A. Rhbanou, M. Sabbane, and S. Bri, "Design of substrate integrated waveguide cavity bandpass filters," in *2016 5th International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS)*, 2016, pp. 410–415.
- [14] K. Guvenli, S. Yenikaya, and M. Secmen, "Design and Implementation of Substrate Integrated Waveguide Filter to Work on X-Band and Ku-Band," in *2018 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS)*, 2018, pp. 198–200.
- [15] P. Zhang and M. Li, "Cascaded trisection substrate-integrated waveguide filter with high selectivity," *Electron. Lett.*, vol. 50, no. 23, pp. 1717–1719, 2014.
- [16] F. T. Ladani, S. Jam, and R. Safian, "A novel X-band bandpass filter using substrate integrated waveguide resonators," in *2010 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE)*, 2010, pp. 1–5.
- [17] Z.-C. Hao, W. Hong, J.-X. Chen, X.-P. Chen, and K. Wu, "Compact super-wide bandpass substrate integrated waveguide (SIW) filters," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 53, no. 9, pp. 2968–2977, 2005.
- [18] B. S. Kim, J. W. Lee, K. S. Kim, and M. S. Song, "PCB substrate integrated waveguide-filter using via fences at millimeter-wave," in *2004 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (IEEE Cat. No.04CH37535)*, vol. 2, pp. 1095–1098, 2004.