

A SIW COMPACT AND LOW-LOSS BANDPASS FILTER USING COMPLEMENTARY SPLIT-RING RESONATORS FOR KU-BAND VSAT APPLICATIONS

Phan Trong Viet, Nguyen Hoang Chuong, Luong Duy Manh, Mai Van Ta*
Military Technical Academy

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 18/8/2025 Revised: 03/02/2026 Published: 05/02/2026	Substrate Integrated Waveguide filters have been a subject of extensive research. Substrate Integrated Waveguide filters utilizing Complementary Split Ring Resonators achieve compact size and low loss by operating below the cutoff frequency of the transmission line. This paper presents the research and design of a bandpass filter operating in the Ku-band. The chosen resonant ring configuration allows for miniaturization by exploiting the propagation mode of evanescent waves. Additionally, a slotted transition structure is employed to further reduce the filter's size. The fabricated filter boasts a compact size equivalent to $0.78\lambda_0^2$. The Complementary Split Ring Resonators were also optimized for high quality factor to achieve low insertion loss. Measured results of the fabricated filter show an insertion loss better than -1.62 dB and a return loss better than -25 dB at the center frequency of 14.13 GHz. With these specifications and the advantage of being fabricated on low-cost materials, the designed could be a replacement for the output filter of the block upconverter used in Ku-band satellite communication applications.
KEYWORDS	
Substrate integrated waveguide	
Complementary split ring resonator	
Bandpass filter in Ku-band	
Satellite communications	
Insertion loss	

MẠCH LỌC THÔNG DÀI KÍCH THƯỚC NHỎ, TỒN HAO THẤP CÔNG NGHỆ SIW CẤU TRÚC CSRR CHO ỨNG DỤNG THÔNG TIN VỆ TINH BĂNG KU

Phan Trọng Việt, Nguyễn Hoàng Chương, Lương Duy Mạnh, Mai Văn Tá*
Học viện Kỹ thuật quân sự

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 18/8/2025 Ngày hoàn thiện: 03/02/2026 Ngày đăng: 05/02/2026	Bộ lọc công nghệ ống dẫn sóng tích hợp chất nền đã và đang được nghiên cứu rộng rãi. Bộ lọc công nghệ ống dẫn sóng tích hợp chất nền sử dụng các vòng chia cộng hưởng bổ sung cho phép đạt được kích thước nhỏ gọn cùng tổn hao thấp nhờ hoạt động dưới vùng tần số cắt. Bài báo trình bày nghiên cứu, thiết kế mạch lọc thông dải làm việc trên băng tần Ku. Lựa chọn cấu trúc vòng chia cộng hưởng bổ sung cho phép thu nhỏ kích thước do tận dụng chế độ truyền lan của sóng suy biến. Bên cạnh đó, cấu trúc chuyển đổi xẻ khe được sử dụng giúp thu gọn kích thước bộ lọc hơn nữa. Bộ lọc có kích thước nhỏ gọn tương đương với $0.78\lambda_0^2$. Các vòng chia cộng hưởng bổ sung cũng đã được tối ưu về hệ số phẩm chất nhằm đạt được tổn hao thấp. Kết quả đo kiểm bộ lọc đã chế tạo cho tiêu hao chèn tốt hơn -1,62 dB và tiêu hao phản xạ tốt hơn -25 dB tại tần số trung tâm 14,13 GHz. Với các chỉ tiêu trên cũng như ưu điểm chế tạo trên nền vật liệu giá thành thấp, bộ lọc đã thiết kế có thể hướng đến thay thế cho bộ lọc đầu ra của khối biến đổi đường lên trong hệ thống thông tin vệ tinh băng tần Ku.
TỪ KHÓA	
Ống dẫn sóng tích hợp chất nền	
Vòng chia cộng hưởng bổ sung	
Mạch lọc thông dải băng Ku	
Thông tin vệ tinh	
Tiêu hao chèn	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.13431>

* Corresponding author. Email: tamv@lqdtu.edu.vn

1. Giới thiệu

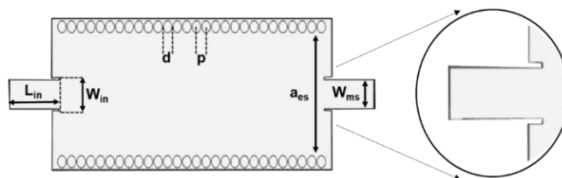
Thông tin vệ tinh hiện tại đang được phát triển mạnh mẽ, băng tần làm việc dần được chuyển đổi sang băng Ku nhằm đáp ứng được yêu cầu thực tế. Trong đó, bộ lọc cơ khí được sử dụng rất rộng rãi và phổ biến trong các hệ thống thông tin vệ tinh băng Ku do có độ chọn lọc cao, tiêu hao chèn thấp và công suất chịu được lớn. Tuy nhiên, nhược điểm khó khắc phục của các bộ lọc cơ khí đó là có kích thước cồng kềnh, khó tích hợp với cấu trúc mạch dải, chi phí sản xuất cao và điều chỉnh phức tạp. Gần đây, công nghệ ống dẫn sóng tích hợp chất nền (Substrate Integrated Waveguide - SIW) ra đời và được nghiên cứu rộng rãi nhờ các ưu điểm nổi bật như: dễ dàng tích hợp với các cấu trúc mạch dải, dễ dàng chế tạo bằng công nghệ mạch in thông thường, đảm bảo công suất chịu được tốt.

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả thiết kế các bộ lọc thông dải SIW sử dụng vòng chia cộng hưởng bổ sung (Complementary Split-Ring Resonator – CSRR) với chỉ tiêu nhằm thay thế bộ lọc đầu ra khỏi biến đổi đường lên (BUC) cho thông tin vệ tinh. Nền tảng lý thuyết về các bộ lọc SIW đã được trình bày [1] - [4]. Một số bộ lọc được công bố làm việc trên băng C [5] và băng X [6]. Để đạt được đặc tính lọc theo yêu cầu, các cấu hình khác nhau của cấu trúc CSRR được khảo sát kỹ lưỡng, kết hợp với thực hiện điều chỉnh các kích thước quan trọng liên quan đến tần số cộng hưởng và hệ số phẩm chất của chúng để đảm bảo dải tần làm việc cũng như tổn hao chèn nhỏ. Kết quả đạt được cho thấy bộ lọc của nhóm tác giả hoàn toàn có tiềm năng trong ứng dụng thông tin vệ tinh băng Ku qua các khảo sát so sánh với các công bố khoa học cùng băng tần được thể hiện trong [7] - [9].

2. Ống dẫn sóng tích hợp chất nền và khung cộng hưởng vòng chia bổ sung

2.1. Ống dẫn sóng tích hợp chất nền

Cấu trúc SIW mang đến nhiều ưu điểm: giá thành thấp, hệ số phẩm chất cao và dễ tích hợp với các mạch cao tần khác. Một cấu trúc đường truyền SIW được thể hiện trên Hình 1. Các tham số chính của cấu trúc ống dẫn sóng tích hợp chất nền có thể được xác định chi tiết tại [5] nhằm đảm bảo chỉ tiêu đặt ra ban đầu.



Hình 1. Đoạn đường truyền SIW cơ bản và cấu trúc đường truyền xẻ khe

Độ dài bước sóng cao tần được xác định bằng công thức:

$$\lambda_c = \frac{c}{f_c} \quad (1)$$

Trong đó c là vận tốc của ánh sáng trong không gian tự do, f_c là tần số cắt. Bước sóng của đoạn đường truyền SIW có quan hệ với hằng số điện môi ϵ_r thông qua công thức:

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

Khoảng cách giữa hai hàng vi được xác định:

$$a_s = \frac{c}{2 \cdot \sqrt{\epsilon_r} \cdot f_c} \quad (3)$$

Độ rộng của đoạn đường truyền SIW:

$$a = a_s + \frac{d^2}{0,95 \cdot p} \quad (4)$$

Bán kính của lỗ vi d được giới hạn bởi điều kiện:

$$d < \frac{\lambda_g}{5} \quad (5)$$

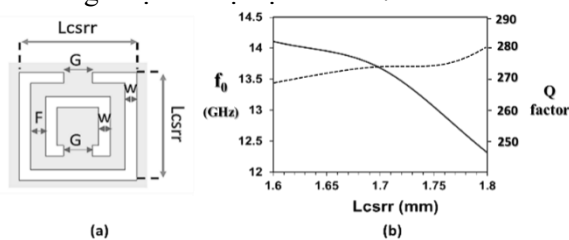
Khoảng cách giữa hai lỗ vi p là:

$$p < 2 \cdot d \quad (6)$$

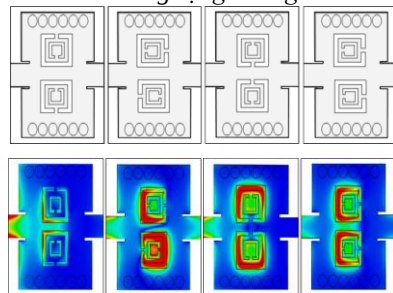
2.2. Khung cộng hưởng vòng chia bổ sung

Các khung cộng hưởng vòng phân chia bổ sung CSRR dễ dàng khắc vào các mạch SIW nhờ công nghệ mạch in PCB. Các tham số hình học của CSRR được chỉ ra trên Hình 1. Mỗi khung CSRR bao gồm hai vòng kim loại hình chiếc nhẫn đặt song song với nhau và cách nhau một khoảng cách nhỏ. Sơ đồ tương đương của một khung CSRR được mô tả bằng một mạch cộng hưởng LC [5]. Hình 2a thể hiện cho các tham số kích thước của một phần tử vòng cộng hưởng CSRR. Trong đó L_{csrr} là chiều dài khung cộng hưởng, W là độ rộng đường điện môi, F là độ rộng đường kim loại và G là khoảng cách giữa các vòng trong khung cộng hưởng.

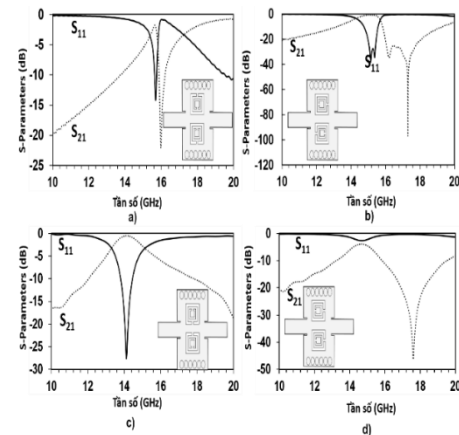
Tần số cộng hưởng của khung có thể thay đổi bằng cách thay đổi thông qua thay đổi kích thước hình học của khung CSRR, điều này được minh chứng thông qua khảo sát mô phỏng Hình 2b. Từ kết quả khảo sát trên, ta xác định được chiều dài khung cộng hưởng cần thiết kể nằm ở giá trị khoảng 1,8 mm để có giá trị làm việc tại 14 GHz.



Hình 2. a) Cấu trúc một khung cộng hưởng CSRR
b) Quan hệ giữa tần số cộng tác, hệ số phẩm chất Q và độ dài khung cộng hưởng



Hình 3. Các cấu hình của cặp khung CSRR và phân bố điện trường: (a) cấu hình quay lưng, (b) cấu hình cạnh - cạnh ngược, (c) cấu hình mặt - mặt, (d) cấu hình cạnh - cạnh thuận



Hình 4. Đặc trưng tham số S_{11} và S_{21} của các cấu hình: (a) cấu hình quay lưng, (b) cấu hình cạnh - cạnh ngược, (c) cấu hình mặt - mặt, (d) cấu hình cạnh - cạnh thuận

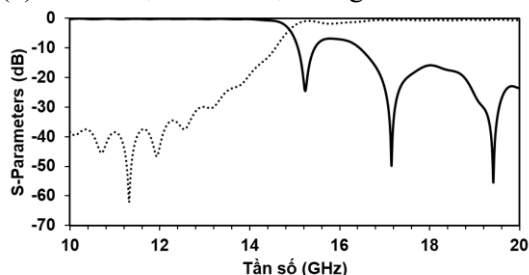
Ngoài ra, nhờ các công cụ mô phỏng hiện nay, ta còn có thể xác định được tương đối giá trị hệ số phẩm chất Q của cấu trúc đang thiết kế, điều này có mối quan hệ chặt chẽ với chỉ tiêu tổn hao của bộ lọc. Như ta thấy trên Hình 2b, hệ số phẩm chất Q của cấu trúc khoảng 280, thể hiện cho chỉ tiêu tổn hao của bộ lọc tương đối tốt, đây là kết quả khảo sát trên công cụ khảo sát E -solver của phần mềm CST. Hình 3 thể hiện các cấu hình của cặp khung CSRR và các đặc trưng tham số ma trận tán xạ S_{11} và S_{21} của các cấu hình được thể hiện trên Hình 4. Trong các cấu hình trên, cấu hình mặt - mặt có ưu điểm tiêu hao chèn nhỏ trong dải thông, thích hợp để thiết kế các bộ lọc thông dải có tổn hao thấp.

3. Thiết kế bộ lọc thông dải băng Ku với khung cộng hưởng vòng chia bổ sung CSRR

3.1. Quá trình thiết kế

Bộ lọc băng Ku trong nghiên cứu này sử dụng tấm nền PTFE ZYF255DA có hằng số điện môi 2,55, độ dày đế điện môi là 0,508 mm, tổn hao điện môi 0,0018, độ dày lớp đồng 1-oz. Vật liệu được sử dụng cho cấu trúc có giá thành tương đối thấp tuy nhiên các kết quả nghiên cứu và mô phỏng hoàn toàn đáp ứng tốt các chỉ tiêu so với các kết quả bộ lọc sử dụng các vật liệu có giá thành cao. Đường truyền SIW cơ bản hoạt động giống như một bộ lọc thông cao với đặc tuyến

được chỉ ra trên Hình 5. Các tham số kích thước này được tính toán theo các công thức từ (1) đến (6) và thể hiện chi tiết tại Bảng 1.



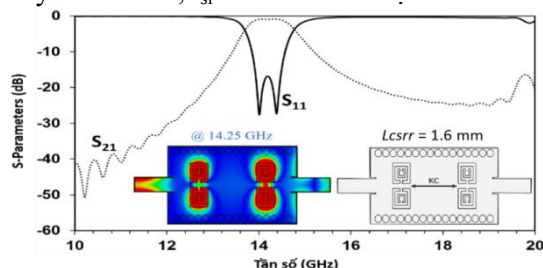
Bảng 1. Tham số kích thước cơ bản của đoạn đường truyền xẻ khe

Tham số	p	a_{es}	d	w_{ms}
Kích thước (mm)	0,68	6,8	0,6	1,65

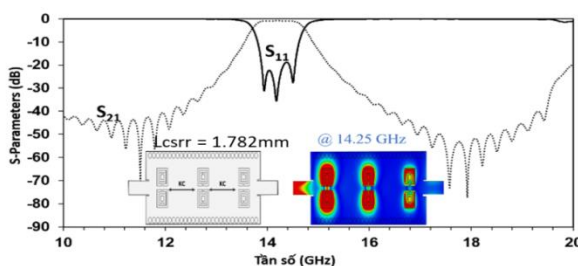
Hình 5. Đặc tuyến đoạn đường truyền SIW cơ bản

Các bộ lọc thông dải được hình thành bằng cách sắp xếp các mắt lọc đơn vị cách nhau khoảng cách KC trên đường truyền SIW cơ bản. Dải thông của bộ lọc có thể điều chỉnh bằng cách thay đổi khoảng cách giữa hai cặp khung CSRR. Trong khi đó tần số trung tâm của bộ lọc được điều chỉnh dựa vào chiều dài L_{csrr} của khung CSRR, điều này đã được trình bày dựa trên kết quả khảo sát phần 2. Ngoài ra, đối với cấu trúc chuyển đổi từ đường truyền 50 Ohm sang đường truyền SIW, nhóm tác giả sử dụng cấu trúc xẻ khe (Slot Transition) thay cho cấu trúc dạng côn (Taper Transition) đã được sử dụng ở các công bố trước [5], [6], cho phép thu gọn đáng kể kích thước bộ lọc mà hầu như không làm thay đổi các chỉ tiêu của bộ lọc. Bảng 1 thể hiện các tham số kích thước của cấu trúc đoạn đường truyền xẻ khe slot đã được chi tiết tại Hình 1. Trong đó p là khoảng cách các lỗ via, a_{es} là độ rộng khoang SIW, d là đường kính via và w_{ms} là độ rộng đường truyền đầu vào.

Trong phần tiếp theo trình bày các cấu trúc bộ lọc SIW với số lượng cặp phần tử cộng hưởng CSRR khác nhau và hệ số khoảng cách KC được điều chỉnh nhằm đạt được tiêu hao phản xạ thấp, băng thông rộng và chất lượng chọn lọc tần số cao. Bảng 2 là kết quả của quá trình tinh chỉnh qua các công thức có liên quan cùng việc sử dụng kết hợp công cụ tinh chỉnh tự động *Sparameter Sweep* và *Optimizer* (hàm *Trust Region Framework*) trên phần mềm CST đối với hai tham số kích thước trên nhằm đạt được băng thông yêu cầu và tiêu hao phản xạ đạt được tốt nhất có thể mà vẫn giữ được các chỉ tiêu kỹ thuật đã đạt còn lại. Trong đó L_{in} là chiều dài đoạn đường truyền đầu vào, L_{sl} là chiều sâu đoạn xẻ khe.



Hình 6. Đặc tuyến tần số và phân bố điện trường bộ lọc SIW sử dụng hai cặp phần tử CSRR



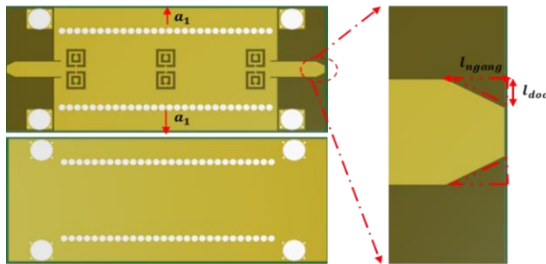
Hình 7. Đặc tuyến tần số và phân bố điện trường bộ lọc SIW sử dụng ba cặp phần tử CSRR

Bảng 2. Các tham số kích thước tinh chỉnh chính tại các cấu trúc bộ lọc

Cấu trúc		Tham số			
		L_{in}	w_{ms}	L_{sl}	KC
Bộ lọc bậc 2	Bộ lọc bậc 2	3,4	1,65	0,55	6,425
	Bộ lọc bậc 3	3,6	1,64	0,65	7,892

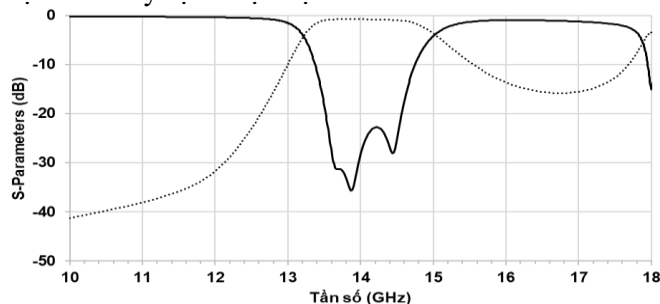
Kết quả mô phỏng của cấu trúc bộ lọc thông dải SIW bậc 3 thể hiện rõ ưu điểm của bộ lọc sử dụng cấu hình cặp phần tử CSRR mặt – mặt kết hợp với các bước điều chỉnh tham số kích thước. Với tần số trung tâm đạt được là 14,2 GHz, tổn hao chèn và tổn hao phản xạ lần lượt là 0,87 dB và 19dB. Từ đây nhóm tác giả quyết định lựa chọn cấu trúc này để chế tạo đo kiểm.

Để thuận tiện cho quá trình đo kiểm, chúng tôi sử dụng loại connector không hàn để kết nối với các đường 50 Ohm của bộ lọc. Loại connector này có ưu điểm giảm các ảnh hưởng ký sinh trong quá trình đo kiểm, phù hợp cho đo kiểm các cấu trúc siêu cao tần ở băng Ku, chi tiết thông tin về loại Connector này có thể tìm thấy tại trang chủ của hãng “Southwest Microwave”. Các điều chỉnh của cấu trúc cho việc kết nối Connector thể hiện trên Hình 8. Phần đầu của các đường 50 Ohm cũng được cắt vát nhằm ngăn các đường tín hiệu không tiếp xúc với mặt đất của Connector, các tham số kích thước bổ sung của thiết kế điều chỉnh trên Hình 8 được thể hiện tại Bảng 3.

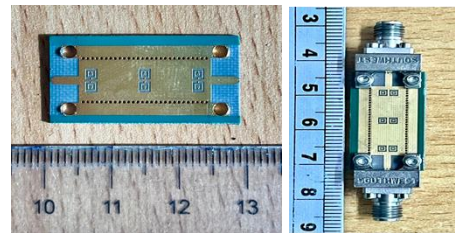


Hình 8. Thay đổi tại Layout mặt trước và mặt sau của bộ lọc trên phần mềm Altium

Việc điều chỉnh thiết kế sẽ làm thay đổi các điều kiện truyền trên mạch, hình thành nên sự thay đổi ở đặc tuyến bộ lọc, điều này được thể hiện chi tiết trên kết quả mô phỏng của bộ lọc Hình 8 được chỉ ra trên Hình 9. Như có thể thấy, độ chọn lọc ở sườn bên phải có kém đi khi điều chỉnh thiết kế. Tuy nhiên các chỉ tiêu khác vẫn cơ bản bảo đảm, kết quả đo kiểm bộ lọc thực tế được trình bày cụ thể tại mục 4.



Hình 9. Đặc tuyến bộ lọc thông dải SIW bậc 3 sau khi thiết kế các chi tiết kết nối



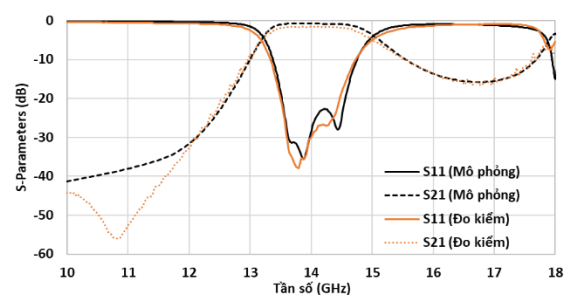
Hình 10. Hình ảnh bộ lọc thực tế

3.2. Kết quả

Bộ lọc thiết kế trên Hình 8 đã được chế tạo sử dụng vật liệu có giá thành thấp PTFE ZYF255DA. Hình ảnh của bộ lọc đã chế tạo được thể hiện trên Hình 10, bộ lọc thực tế khi chưa lắp connector có kích thước khá nhỏ gọn 28 x 13 mm² tương đương với $0,78\lambda_0^2$, trong đó λ_0 là bước sóng trong chân không.



Hình 11. Triển khai đo kiểm mạch qua hệ thống máy phân tích mạng Vector – N5242A



Hình 12. So sánh kết quả mô phỏng và đo kiểm của bộ lọc SIW bậc 3

Bộ lọc được chế tạo đã được tiến hành đo kiểm hoạt động sử dụng máy phân tích mạng Vector N5242A của hãng Keysight, hệ thống đo kiểm được bố trí như Hình 11. Kết quả đo kiểm tham số ma trận tán xạ của bộ lọc được thể hiện trên Hình 12. Hình 12 cho thấy có sự tương đồng tốt giữa kết quả đo kiểm so với kết quả mô phỏng. Từ đây ta có thể nhận thấy rằng kết quả mô phỏng có độ tin cậy tốt, minh chứng cho các thiết kế mạch lọc thông dải SIW sử dụng vòng cộng hưởng CSRR đã đề cập ở các phần trên của bài báo.

Kết quả đo kiểm chỉ ra tiêu hao chèn tại tần số trung tâm là -1,62 dB, sai lệch nhỏ so với -0,87 dB của kết quả mô phỏng. Nguyên nhân của sai khác này có thể do suy hao trên connector và dây cáp. Tiêu hao chèn tại tần số trung tâm cũng cho kết quả tốt ở mức -25 dB. Băng thông 3 dB ở mức 700 MHz ứng với băng thông tương đối 11,7%. Bảng 3 dưới đây so sánh chi tiết các chỉ tiêu kỹ thuật của bộ lọc đã chế tạo với một số bộ lọc SIW được công bố trước đây làm việc trên cùng băng tần.

Qua Bảng 4, có thể thấy tuy sử dụng vật liệu chất nền giá thành thấp, bộ lọc đã chế tạo có kích thước nhỏ gọn, tiêu hao chèn và tổn hao phản xạ tốt hơn hoặc tương đương các cấu trúc đã công bố. Độ chọn lọc của bộ lọc đã thiết kế chưa thực sự tốt, chỉ tiêu xấu đi do ảnh hưởng của connector và có thể cải thiện khi sử dụng thiết kế trên Hình 7. Ngoài ra, bằng cách tăng số lượng cặp CSRR hoặc sử dụng một số kỹ thuật nâng cao như kỹ thuật tạo điểm truyền không có thể giúp nâng cao độ chọn lọc. Chúng tôi sẽ tập trung cải thiện các chỉ tiêu này ở các nghiên cứu tiếp theo.

Bảng 4. Tổng hợp chỉ tiêu bộ lọc

	f_0 (GHz)	Băng thông tương đối tại 3dB (%)	Tổn hao chèn (dB)	Tổn hao phản xạ (dB)	Mức loại bỏ tín hiệu		Kích thước	Chất nền
					Dưới dải thông (f_0 - Δf_0 %)	Trên dải thông (f_0 + Δf_0 %)		
Cấu trúc bộ lọc bậc 3	14,13	11,7	1,62	>25	14,1	-	0,78	PTFE
Cấu trúc [7]	12,5	9	1,3	>15	-	-	0,72	ROGER 5880
Cấu trúc [8]	13,34	5,8	1,8	>19,4	7,9	5,9	1,76	PTFE
Cấu trúc [9]	14,87	1,5	3,6	>14,3	2,3	2	2,1	ROGER 5880

4. Kết luận

Bài báo đề xuất thiết kế bộ lọc thông dải SIW băng Ku sử dụng các cặp khung cộng hưởng CSRR với cấu hình mặt – mặt. Bộ lọc thông dải bậc 3 cho dải thông rộng 700 MHz, tiêu hao chèn và tổn hao ngược tại tần số trung tâm lần lượt là -1,62 dB và nhỏ hơn -25 dB. Các chỉ tiêu này tốt hơn hoặc tương đương một số bộ lọc SIW đã công bố ở cùng băng tần. Bộ lọc có kích thước nhỏ gọn tương đương với $0,78\lambda_0^2$. Bộ lọc có kích thước nhỏ gọn là do kết hợp giữa cấu trúc CSRR và cấu trúc chuyển đổi dạng sê khe. Ngoài ra, trong bài báo này, các hốc cộng hưởng CSRR đã được tối ưu nhằm đạt được hệ số phẩm chất lớn từ đó cho phép đạt được tổn hao nhỏ. Bộ lọc đã chế tạo còn nhược điểm về độ chọn lọc do ảnh hưởng của connector sử dụng, chỉ tiêu này có thể cải thiện ở các nghiên cứu tiếp theo. Các kết quả đạt được của bộ lọc cho thấy tiềm năng hoàn toàn có thể thay thế cho bộ lọc đầu ra khỏi biến đổi đường lên trong hệ thống thông tin vệ tinh băng Ku.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ NAFOSTED theo đề tài mã số 102.04-2025.42.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] V. Arya and T. Garg, "Design and Analysis of Substrate Integrated Waveguide," *1st International Conference on Substrate Materials, Manufacturing & Energy Technologies*, Jun. 2022, pp. 835-839.
- [2] A. O. Nwajana, D. Amadu, and Y. Kenneth, "Substrate Integrated Waveguide (SIW) Bandpass Filter with Novel Microstrip-CPW-SIW Input Coupling," *Journal of Microwaves Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, vol. 16, pp. 393-402, Jun. 2017.

-
- [3] D. Garg and N. Yadav, "Design a Substrate Integrated Waveguide IRIS Band Pass Filter in CST Software," *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 5, no. 8, pp. 324-327, Aug. 2018.
 - [4] K. Choudhary and R. K. Chaudhary, "A Compact SIW Based Filtering Power Divider with Improved Selectivity Using CSRR," in *The 2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - FALL)*, Singapore, pp. 1334-1337, Nov. 2017.
 - [5] Y. D. Dong, T. Yang, and T. Itoh, "Substrate Integrated Waveguide Loaded by Complementary Split Ring Resonators and Its Applications to Miniaturized Waveguide Filters," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, no. 9, pp. 2211-2223, Sep. 2009.
 - [6] T. L. Nguyen, D. M. Luong, and H. S. Nguyen, "A Low Loss X - Band Bandpass Substrate Integrated Waveguide Filter Using Complementary Split-Ring Resonators," in *The 2023 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*, Danang, Vietnam, pp. 345-349, Oct. 2023.
 - [7] N. Muchhal, A. Chakraborty, M. Vishwakarma, and S. Srivastava, "Slotted Folded Substrate Integrated Waveguide Band Pass Filter with Enhanced Bandwidth for Ku/K Band Applications," *Progress in Electromagnetics Research*, vol. 70, pp. 51-60, Jul. 2018.
 - [8] V. T. Mai, K. P. Kieu, D. T. Nguyen, T. L. Nguyen, T. T. H. Tran, and D. M. Luong, "A Novel Design of a Low-loss and Low-cost Ku-Band Bandpass Filter for VSAT Applications," *Radioengineering*, vol. 34, no. 3, pp. 445-451, Sep. 2025.
 - [9] R. Li, X. Tang, and F. Xiao, "Design of substrate integrated waveguide transversal filter with high selectivity," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 20, no. 6, pp. 328-330, 2010, doi: 0.1109/LMWC.2010.2047518.