

## Nghiên cứu giải pháp mở rộng dải thông của bộ lọc thông dải ống dẫn sóng băng X ứng dụng trong ra đa thụ động

Lưu Đức Thọ\*, Lương Văn Trình, Nguyễn Công Oai

Viện Ra đa, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự, 17 Hoàng Sâm, Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam.

\*Tác giả liên hệ: luuductho1991@gmail.com

Nhận bài: 30/8/2024; Hoàn thiện: 05/11/2024; Chấp nhận đăng: 15/11/2024; Xuất bản: 06/12/2024.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.FEE.2024.113-119>

### TÓM TẮT

Hiện nay, các bộ lọc siêu cao tần được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực khác nhau. Trong các hệ thống ra đa, bộ lọc đóng vai trò quan trọng trong tuyến thu-phát, tuy nhiên để đảm bảo bộ lọc làm việc trong dải tần số rộng và tổn hao thấp là một vấn đề phức tạp. Trong bài báo này, nhóm tác giả trình bày các kết quả nghiên cứu, thiết kế bộ lọc thông dải ống dẫn sóng làm việc ở dải tần số 8 đến 12 GHz (băng tần X). Kết quả phân tích nguyên lý hoạt động, tính toán và mô phỏng trên phần mềm CST 2019 cho thấy bộ lọc thông dải hoạt động trên dải tần số rộng, đáp ứng yêu cầu trong các đài ra đa thụ động.

Từ khóa: Ra đa thụ động; Bộ lọc thông dải; Băng tần X.

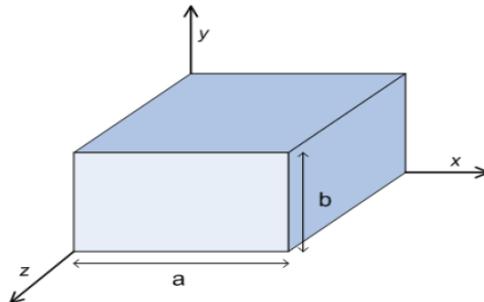
### 1. MỞ ĐẦU

Hiện nay, các bộ lọc siêu cao tần được thiết kế rất đa dạng, với nhiều cấu trúc và phương pháp khác nhau [1, 2]. Các bộ lọc có thể được chia ra làm các loại khác nhau tùy thuộc vào mục đích sử dụng như: bộ lọc thông thấp, bộ lọc thông cao, bộ lọc dải thông. Trong các hệ thống ra đa thường sử dụng các thiết kế bộ lọc vi dải, bộ lọc ống dẫn sóng, bộ lọc dạng cài răng lược,... Bộ lọc interdigital có hệ số suy hao trong dải thấp, tuy nhiên rất khó hiệu chỉnh các tham số, đặc biệt tại tần số cao [3]. Sử dụng mạch vi dải, kích thước nhỏ gọn, tuy nhiên hệ số suy hao trong dải lớn [4]. Bộ lọc ống dẫn sóng thể chịu đựng được mức công suất lớn với tổn thất thấp. Tuy nhiên, băng thông của bộ lọc ống dẫn sóng hẹp khi so sánh với một số loại đường truyền khác và cấu trúc vật lý lớn, đặc biệt ở tần số thấp. Từ đó có thể thấy rằng, để đáp ứng các yêu cầu trong các đài ra đa thụ động, là dải thông siêu rộng, thì các thiết kế bộ lọc dải thông ống dẫn sóng thông thường rất khó đáp ứng. Chính vì vậy, trong bài báo, nhóm tác giả đề xuất phương pháp tích hợp bộ lọc thông thấp với bộ lọc thông cao, để mở rộng dải thông siêu rộng và vẫn đáp ứng được hệ số tổn hao thấp.

### 2. NỘI DUNG CẦN GIẢI QUYẾT

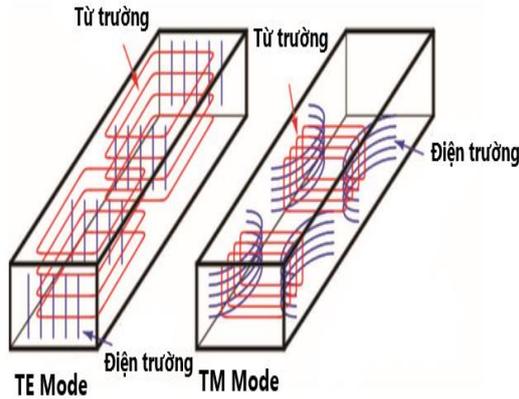
#### 2.1. Nguyên lý tổng quan về bộ lọc ống dẫn sóng hình chữ nhật

Bộ lọc ống dẫn sóng là bộ lọc điện từ được chế tạo bằng công nghệ ống dẫn sóng. Ống dẫn sóng là ống dẫn kim loại rỗng bên trong đó sóng điện từ có thể được truyền đi. Ống dẫn sóng hình chữ nhật có chiều rộng  $a$  và chiều cao  $b$  như hình 1.

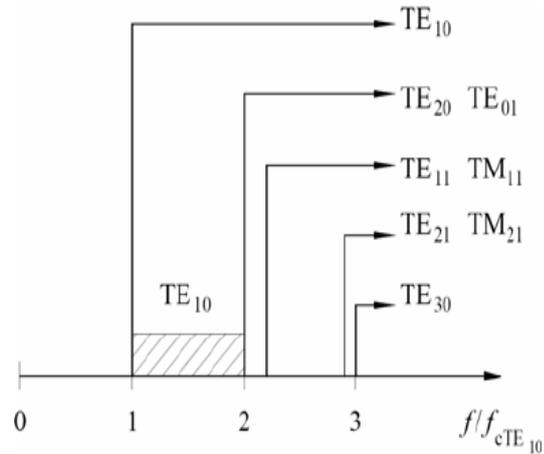


Hình 1. Cấu trúc ống dẫn sóng hình chữ nhật.

Các chế độ truyền qua ống dẫn sóng tương ứng với nghiệm của phương trình Maxwell khi áp dụng các điều kiện biên phù hợp. Nói một cách khác, ba phương thức truyền sóng có thể tồn tại trong một đường truyền, theo mô hình điện trường và từ trường khi giải các phương trình Maxwell: TEM, TE và TM. Chế độ TE tương ứng với trường hợp không có trường E theo hướng truyền và chế độ TM tương ứng với trường hợp không có trường H theo hướng truyền. Tuy nhiên, đối với ống dẫn sóng hình chữ nhật rỗng bên trong thì chế độ sóng chính là TE<sub>10</sub>.



**Hình 2.** Các dạng chế độ của ống dẫn sóng hình chữ nhật.



**Hình 3.** Trình tự các chế độ lan truyền sóng trong ống dẫn sóng hình chữ nhật.

Các thành phần trường H trong chế độ TE ( $E_z=0$ ) được biểu diễn dưới các công thức sau:

$$\begin{aligned} H_x &= A_{mn} \frac{m\pi k_z}{a\omega\mu\epsilon} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-jk_z z}, \\ H_y &= A_{mn} \frac{n\pi k_z}{b\omega\mu\epsilon} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-jk_z z}, \\ H_z &= -jA_{mn} \frac{k^2 - k_z^2}{\omega\mu\epsilon} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-jk_z z}, \end{aligned} \quad (1)$$

Các thành phần trường E trong chế độ TM ( $H_z=0$ ) được biểu diễn dưới các công thức sau:

$$\begin{aligned} E_x &= -B_{mn} \frac{k_x k_y}{\omega\mu\epsilon} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-jk_z z}, \\ E_y &= -B_{mn} \frac{k_y k_z}{\omega\mu\epsilon} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-jk_z z}, \\ E_z &= -jB_{mn} \frac{k^2 - k_z^2}{\omega\mu\epsilon} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-jk_z z}, \end{aligned} \quad (2)$$

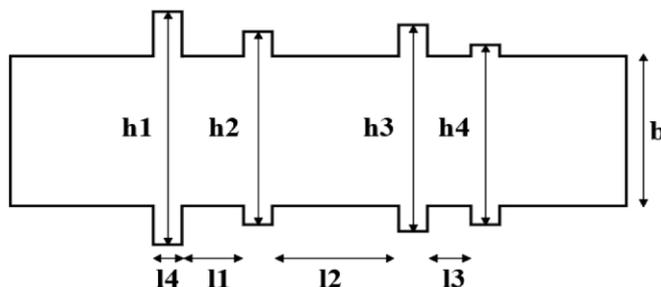
Trong đó,  $A_{mn}$ ,  $B_{mn}$  – Biên độ sóng truyền;  $m$ ,  $n$  – số biến thiên;  $\epsilon$ ,  $\mu$  – hằng số điện môi và độ từ thẩm của vật liệu lấp đầy trong ống dẫn sóng.

Điều kiện tồn tại sóng trong ống dẫn sóng hình chữ nhật là tần số làm việc phải lớn hơn tần số cắt, trong đó, tần số cắt được xác định bằng công thức:

$$f_c = \frac{c_0}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m}{2a}\right)^2 + \left(\frac{n}{2b}\right)^2}, \quad (3)$$

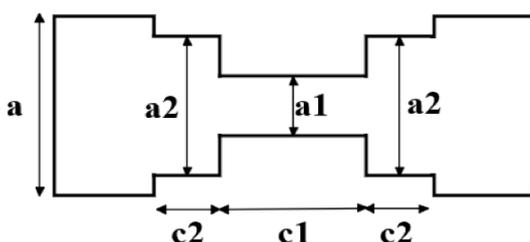
## 2.2. Thiết kế bộ lọc thông dải ống dẫn sóng

Cấu trúc bộ lọc thông thấp được thể hiện trên hình 4. Hai yếu tố quyết định dải thông của bộ lọc thông thấp đó là số lượng hốc cộng hưởng (phần cao hơn của bộ lọc) và chiều cao của bộ lọc (phần thấp hơn). Suy hao của cấu trúc ống dẫn sóng tỷ lệ nghịch với chiều cao của nó, do đó, điều quan trọng là phải duy trì bộ lọc thông thấp càng cao càng tốt, tuy nhiên nó hàm ý một cấu trúc hình học phức tạp và lớn hơn, kèm theo tổn thất nhiều hơn. Từ đó, kích thước duy nhất ảnh hưởng đến tần số cắt là chiều cao, còn chiều rộng sẽ được giữ không thay đổi trong toàn bộ cấu trúc.



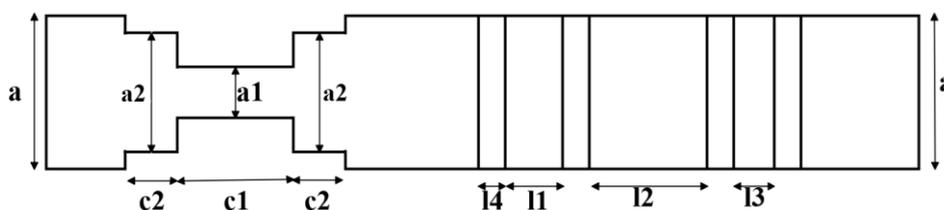
Hình 4. Bộ lọc thông thấp ống dẫn sóng.

Cấu trúc bộ lọc thông cao được thể hiện trên hình 5. Ý tưởng cơ bản là sử dụng một phần ống dẫn sóng có kích thước phù hợp để cho phép chế độ cơ bản truyền trên tần số mong muốn. Như đã đề cập, khi làm việc TE<sub>10</sub> làm chế độ chủ yếu, chiều duy nhất ảnh hưởng đến tần số cắt là chiều rộng, do đó nó sẽ là tham số chính trong khi chiều cao sẽ được giữ không thay đổi trong toàn bộ cấu trúc. Ngoài ra, sẽ cần phải có độ dốc theo từng bậc để phù hợp với các cổng đầu vào và đầu ra.



Hình 5. Bộ lọc thông cao ống dẫn sóng.

Bài toán đặt ra là thiết kế bộ lọc thông dải ống dẫn sóng hoạt động trên dải tần số rộng mà vẫn đảm bảo được hệ số suy hao và tổn hao phản hồi, đáp ứng các yêu cầu của hệ thống ra đa thụ động. Chính vì vậy, nhóm tác giả đề xuất cấu trúc bộ lọc tích hợp giữa bộ lọc thông thấp và bộ lọc thông cao, nhằm mục đích mở rộng dải thông. Cấu trúc bộ lọc thông dải ống dẫn sóng sau khi tích hợp như trên hình 6.



Hình 6. Cấu trúc bộ lọc thông dải được đề xuất.

## 3. MÔ PHỎNG, TÍNH TOÁN, THẢO LUẬN

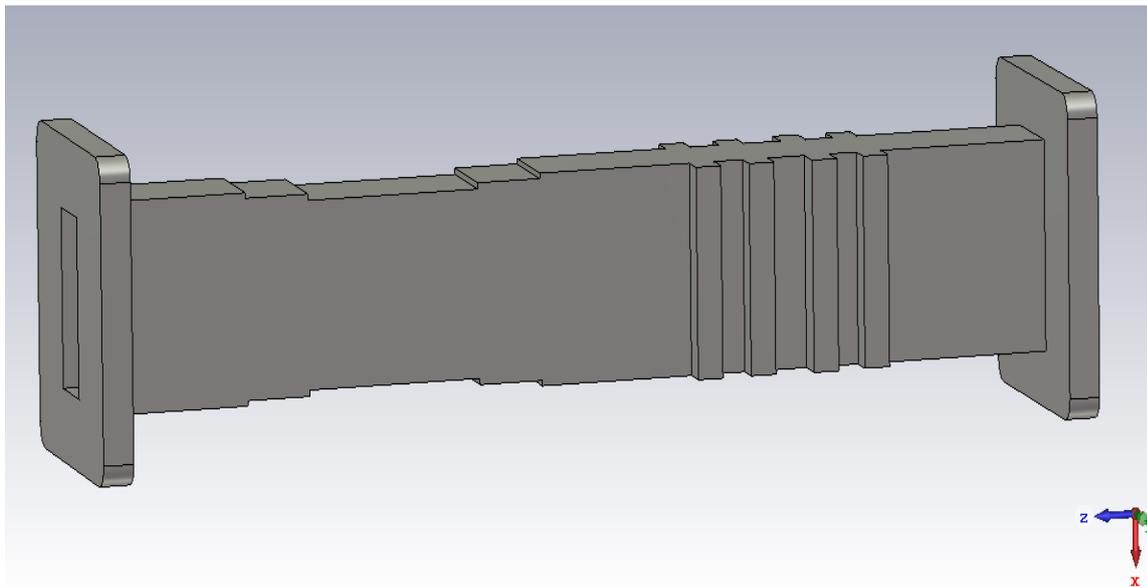
### 3.1. Số liệu đầu vào

Việc xây dựng các tham số bộ lọc thông dải được dựa trên cơ sở tính toán, thiết kế hệ thống của đài ra đa thụ động băng tần X. Bài toán thiết kế bộ lọc thông dải ống dẫn sóng được thực hiện

với các tham số kỹ thuật theo bảng 1.

**Bảng 1.** Tham số kỹ thuật bộ lọc thông dải ống dẫn sóng.

TT	Tên tham số kỹ thuật	Đơn vị đo	Giá trị yêu cầu
1	Dải tần số làm việc	GHz	$8 \div 12$
2	Suy hao trong dải	dB	$\leq 0.3$
3	Tổn hao phản hồi	dB	$\geq 10$



**Hình 7.** Mô hình 3D của bộ lọc thông dải ống dẫn sóng trên phần mềm CST.

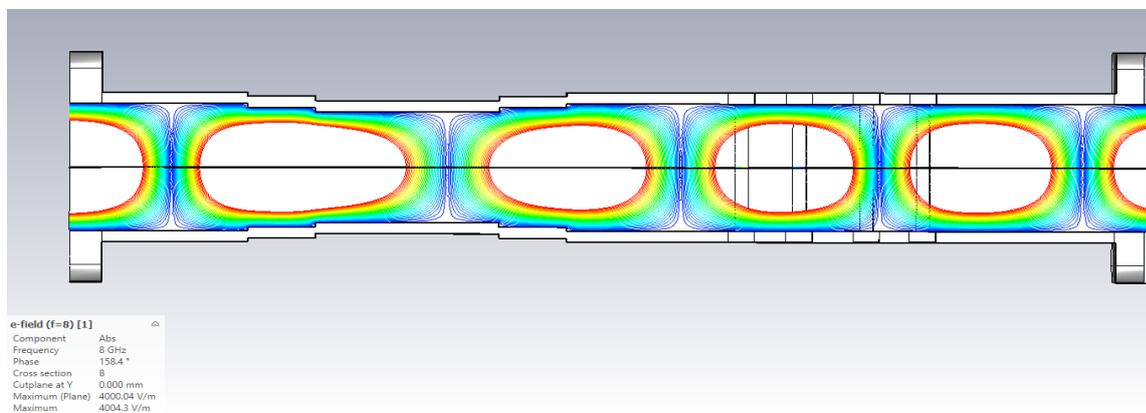
Xây dựng mô hình 3D của bộ lọc thông dải ống dẫn sóng với các tham số kích thước cơ bản sau khi tối ưu như sau:

**Bảng 2.** Tham số kích thước cơ bản của bộ lọc thông dải.

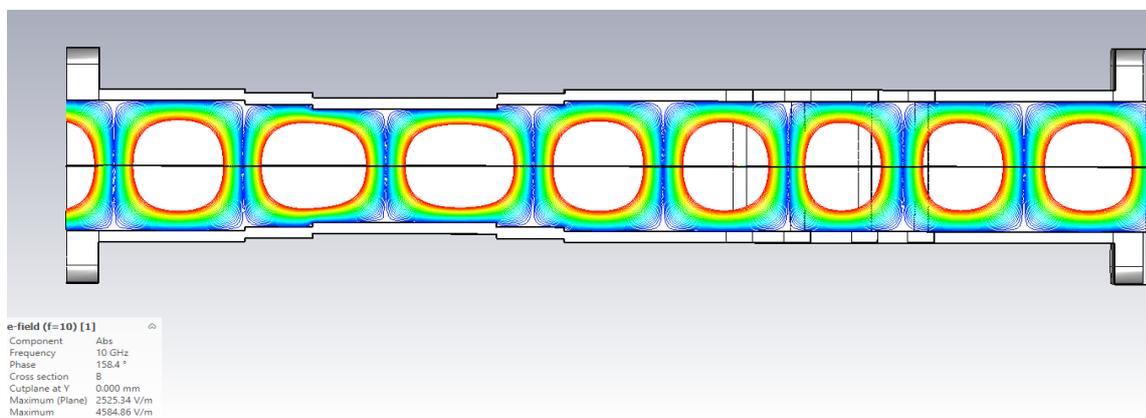
TT	Kích thước	Giá trị (mm)	TT	Kích thước	Giá trị (mm)
1	a	22.86	8	l2	8.2
2	b	10.16	9	l3	6.57
3	h1	18.25	10	L4	2.15
4	h2	17.84	11	c1	28.33
5	h3	19.3	12	c2	10.38
6	h4	18.14	13	a1	19.9
7	l1	6.8	14	a2	21.5

### 3.2. Kết quả tính toán

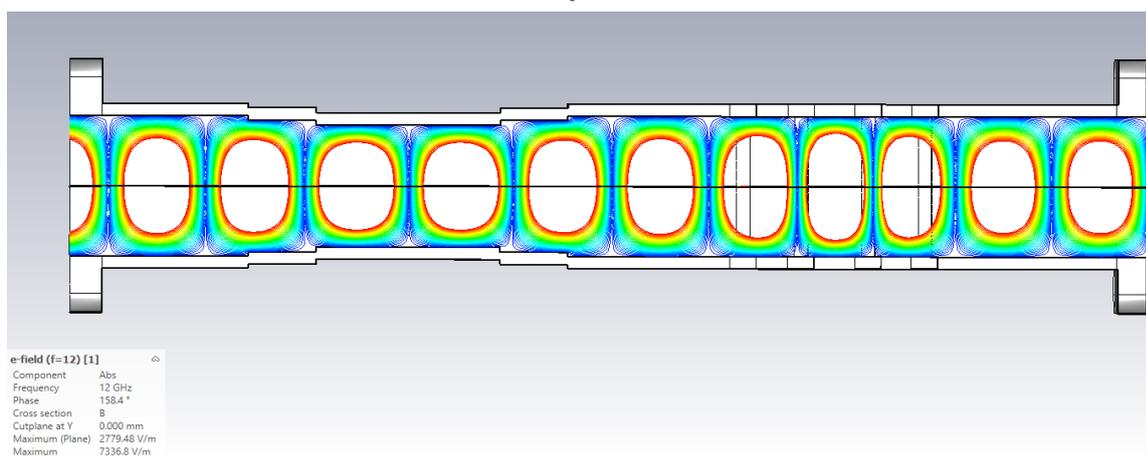
Sau khi thiết kế và tối ưu các tham số trên phần mềm mô phỏng CST, kết quả tính toán được thể hiện trên hình 8 và 9. Trên hình 8 thể hiện sự phân bố điện trường trong ống dẫn sóng tại tần số 8 GHz, 10 GHz và 12 GHz.



a) Tần số  $f = 8 \text{ GHz}$



b) Tần số  $f = 10 \text{ GHz}$

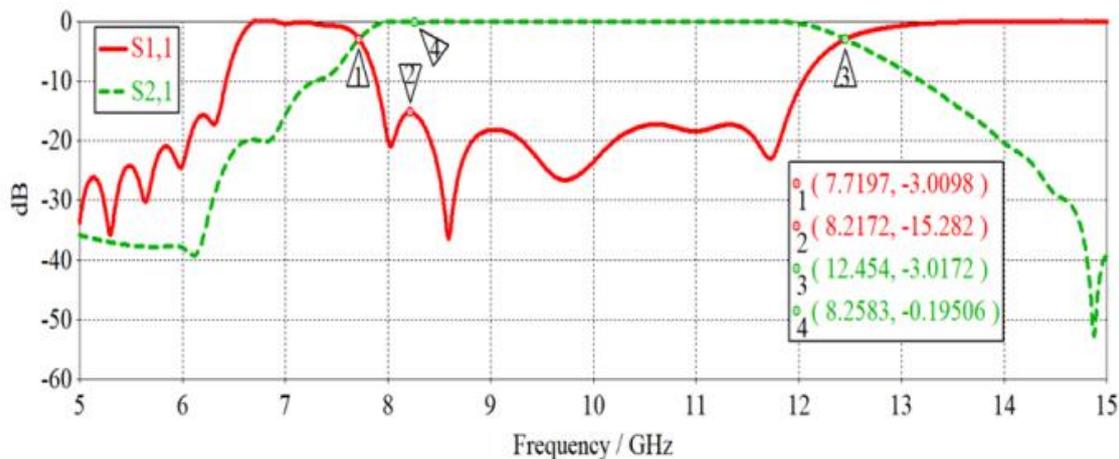


c) Tần số  $f = 12 \text{ GHz}$

**Hình 8.** Sự phân bố điện từ trường trong ống dẫn sóng tại tần số  $f = 12 \text{ GHz}$ .

Từ hình 8, có thể thấy khả năng lan truyền sóng rất tốt trong dải tần làm việc và chế độ sóng lan truyền là sóng  $TE_{10}$ , phù hợp với lý thuyết đã đưa ra.

Trên hình 9 thể hiện kết quả tính toán đặc tuyến tham số S của bộ lọc thông dải.



**Hình 9.** Đặc tuyến tham số  $S$  của bộ lọc thông dải.

Từ hình 9, có thể thấy rằng tổn hao trong dải nhỏ hơn 0.2 dB và tổn hao phản hồi lớn hơn 11.8 dB.

Trong bảng 3 và bảng 4 trình bày kết quả tính toán bộ lọc thông dải và so sánh kết quả với một số bài báo đã được công bố trên các tạp chí uy tín.

**Bảng 3.** Kết quả tính toán bộ lọc thông dải ống dẫn sóng.

TT	Tên tham số kỹ thuật	Đơn vị đo	Giá trị yêu cầu	Kết quả mô phỏng
1	Dải tần số làm việc	GHz	$8 \div 12$	$8 \div 12$
2	Suy hao trong dải	dB	$\leq 0.3$	$\leq 0.2$
3	Tổn hao phản hồi	dB	$\geq 10$	$\geq 11.8$

**Bảng 4.** So sánh kết quả bộ lọc thông dải đề xuất với một số bài báo đã công bố.

TT	Tần số trung tâm, GHz	Dải thông, %	Suy hao trong dải, dB	Tổn hao phản hồi, dB
[4]	9.5 (Băng tần X)	10.5	$\leq 3$	$\geq 15$
[5]	10.24 (Băng tần X)	6.8	$\leq 1.05$	-
[6]	10 (Băng tần X)	12.2	-	-
[7]	9.25 (Băng tần X)	7.57	$\leq 0.15$	$\geq 26$
[8]	12 (Băng tần X)	1.67	-	$\geq 20$
<b>Bài báo</b>	<b>10 (Băng tần X)</b>	<b>40</b>	<b><math>\leq 0.2</math></b>	<b><math>\geq 11.8</math></b>

### 3.3. Phân tích kết quả tính toán

Kết quả tính toán cho thấy, các tham số kỹ thuật đáp ứng được các yêu cầu đã đề ra. Để đánh giá một cách khách quan, nhóm tác giả đã so sánh kết quả tính toán của bộ lọc thông dải đã được đề xuất với một số kết quả đã công bố. Từ kết quả so sánh có thể thấy rằng, bộ lọc thông dải được đề xuất đã mở rộng dải thông một cách đáng kể so với các kết quả đã công bố, mà vẫn đáp ứng được hệ số suy hao và tổn hao phản hồi trong dải tốt.

#### 4. KẾT LUẬN

Trên đây, nhóm tác giả đã trình bày một cách tổng quan về tính toán, thiết kế bộ lọc thông dải ống dẫn sóng với cấu trúc tích hợp giữa bộ lọc thông thấp với bộ lọc thông cao, nhằm mục đích mở rộng dải thông. Bằng việc phân tích cơ sở lý thuyết các dạng bộ lọc và thực hiện trên phần mềm mô phỏng CST, nhằm đánh giá khả năng làm việc của bộ lọc thông dải so với các thiết kế đã công bố. Kết quả tính toán cho thấy, bộ lọc thông dải được đề xuất đáp ứng tốt các yêu cầu về tham số kỹ thuật trong các dải ra đa thụ động. Những kết quả này là tiền đề cho việc nghiên cứu và thiết kế các loại bộ lọc thông dải ống dẫn sóng ứng dụng trong ra đa thụ động, đảm bảo hoạt động ở dải tần số rộng mà vẫn đáp ứng được hệ số suy hao và tổn hao phản hồi trong dải tốt.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Pozar, D.M, "Microwave Engineering," Wiley, Hoboken, NJ, USA. (2012).
- [2]. George L.Matthael, "Microwave Filter, Impedance Matching network and coupling Structure," Artech House. (1985).
- [3]. Dian Widi Astuti, Widie Sella Fahmi, "Interdigital Bandpass filter for Metsat," Seminar Nasional Microwave Antena dan. (2016).
- [4]. Jijesh J.J, "Design and Development of Band Pass Filter for X-Band Radar Receiver System," (2017).
- [5]. Reena Dahle, Paul Laforge, Jonh Kuhling, "3-D Printed Customizable Inserts for Waveguide Filter Design at X-Band," IEEE Microwave and wireless components letters. (2017).
- [6]. Mahmoud Abuhussain, Ugu C.Hasar, "Design of X-Bandpass Waveguide Chebyshev Filter Based on CSRR Metamaterial for Telecommunication Systems," MDPI, Basel, Switzerland. (2019).
- [7]. Trịnh Xuân Thọ, "Thiết kế bộ lọc thông dải ống dẫn sóng ứng dụng cho hệ thống thu/phát ra đa băng X," Tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ quân sự. (2021).
- [8]. Trinh Xuan Tho, Nguyen Ngoc Phuong, Nguyen Thi Thu Trang, Vu Chi Thanh, "A designing solution for bandpass filter using TE dual-mode resonator in waveguide," Tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ quân sự. (2022).

#### ABSTRACT

##### **Research on solution to expand the bandwidth of X-band waveguide bandpass filter applied in passive radar**

*Currently, ultra-high frequency filters are widely used in many different fields. In radar systems, filters play an important role in the transmit-receive line, but ensuring that the filter works in a wide frequency range and has low loss is a complex problem. In this paper, the authors present the results of research and design of a waveguide bandpass filter working in the frequency range of 8 to 12 GHz (X-band). The results of the analysis of the operating principle, calculation and simulation on CST 2019 software show that the bandpass filter operates in a wide frequency range, meeting the requirements of passive radar stations.*

**Keywords:** Passive radar; Bandpass filter; X-band.