

GIẢI PHÁP THIẾT KẾ BỘ LỌC ĐA DẢI TẦN VỚI CƠ CẤU TÁCH GHÉP TÍN HIỆU TỰ ĐỘNG**MULTI-BAND FILTER DESIGN SOLUTION WITH AUTOMATIC SIGNAL DECOMPAIRING****Nguyễn Tuấn Minh, Cao Văn Toàn**

Viện Điện tử - Viện KH-CN quân sự

Ngày nhận bài: 09/12/2024, Ngày chấp nhận đăng: 25/12/2024, Phản biện: TS. Lê Trọng Hiếu

Tóm tắt:

Các bộ lọc băng tần sóng mét và sóng đề xi mét có vai trò quan trọng trong các hệ thống radar và liên lạc quân sự, nơi mà việc truyền và nhận thông tin phải diễn ra trong các điều kiện khắt khe với độ chính xác cao. Mặt khác đối với nhiều thiết bị cụ thể không sử dụng toàn bộ băng tần mà chỉ sử dụng những dải tần cụ thể trong băng tần. Do vậy việc thiết kế các bộ lọc thông dải giúp tối ưu hóa khả năng nhận và truyền dữ liệu trong những dải tần cụ thể, loại bỏ tín hiệu nhiễu và ngăn chặn thông tin giả mạo, từ đó đảm bảo an ninh và hiệu quả trong các hoạt động quân sự và quốc phòng là hết sức cần thiết và cấp bách, phù hợp với tình hình hiện nay. Ngoài ra, để đáp ứng nhiều yêu cầu chọn lọc tần số chính xác trong các dải tần khác nhau mà vẫn đảm bảo kết cấu thiết bị gọn nhẹ, nhóm nghiên cứu còn thiết kế cơ cấu chuyển mạch điện tử tự động để có thể sử dụng nhiều bộ lọc ở các băng tần khác nhau với một đầu vào tín hiệu duy nhất. Trong nghiên cứu này nhóm tác giả thiết kế các bộ lọc thông dải Elliptic cho các dải tần (100 ÷ 150) MHz và (220 ÷ 400) MHz. Đồng thời thiết kế cơ cấu chuyển mạch điện tử tự động đáp ứng được đúng các chỉ tiêu mong muốn về tần số cắt của mỗi nhánh, hệ số tổn hao chèn và hệ số tổn hao phản hồi tại các cổng để có thể sử dụng hai bộ lọc ở các băng tần khác nhau với một đầu vào tín hiệu duy nhất.

Từ khóa:

Bộ lọc thông dải, bộ tách/ghép tín hiệu, băng tần sóng mét, sóng đề xi mét

Abstract:

The bandpass filters for metric and decimetric wavelengths play a crucial role in radar and military communication systems, where information transmission and reception must occur under stringent conditions with high accuracy. On the other hand, many specific devices do not utilize the entire frequency band but instead operate within specific frequency ranges within the band. Therefore, the design of bandpass filters to optimize the ability to receive and transmit data within these specific frequency ranges, eliminate noise signals, and prevent counterfeit information is essential and urgent. This ensures security and efficiency in military and defense operations, aligning with current requirements. Additionally, to meet the diverse requirements for precise frequency selection across different frequency ranges while maintaining compact device structures, the research team has designed an automatic electronic switching mechanism. This mechanism enables the use of multiple filters in different frequency bands with a single signal input. In this study, the authors designed Elliptic bandpass filters for the frequency ranges of (100 ÷ 150) MHz and (220 ÷ 400) MHz. Simultaneously, an automatic electronic switching mechanism was developed to meet the desired criteria for the cutoff frequency of each branch, insertion loss, and return loss at the ports. This allows the use of two filters in different frequency bands with a single signal input.

Keywords:

Bandpass filter, signal splitter/multiplexer, meter wave band, decimeter wave.

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Bộ lọc thông dải (band-pass filter) là mạch điện tử cho phép tín hiệu trong một dải tần số cụ thể đi qua, đồng thời ngăn chặn các tín hiệu ngoài dải tần đó. Bộ lọc giúp tối ưu hóa khả năng nhận và truyền dữ liệu, loại bỏ tín hiệu nhiễu và ngăn chặn thông tin giả mạo, từ đó đảm bảo an ninh và hiệu quả trong các hoạt động quân sự và quốc phòng. Với sự phát triển nhanh chóng của các hệ thống viễn thông hiện đại, việc nghiên cứu và phát triển các bộ lọc băng tần nhằm cải thiện chất lượng và hiệu suất truyền thông là một yêu cầu thiết yếu. Các hệ thống này đòi hỏi bộ lọc tần số có khả năng xử lý chính xác các tín hiệu trong các băng tần tương ứng, loại bỏ nhiễu và đảm bảo hiệu suất truyền tải cao.

Để tận dụng tối đa tài nguyên phổ tần trong các mạng truyền thông, các hệ thống sẽ không sử dụng cả băng tần mà chỉ sử dụng những dải tần cụ thể trong băng tần. Do vậy để đảm bảo yêu cầu kỹ thuật, bao gồm khả năng chọn lọc tần số chính xác, duy trì chất lượng tín hiệu trong dải thông, và loại bỏ hiệu quả nhiễu ngoài dải thì trong các hệ thống thường sử dụng nhiều bộ lọc khác nhau cho các dải tần số tương ứng. Đối với nhiều thiết bị vẫn sử dụng các đầu vào khác nhau cho từng bộ lọc với dải tần tương ứng, việc sử dụng nhiều đầu vào làm cho hệ thống trở nên phức tạp và cồng kềnh. Để tối ưu hóa, một số hệ thống sử dụng bộ chuyển mạch cơ khí thủ công khi lựa chọn tín hiệu. Mặc dù vậy, các bộ chuyển mạch cơ khí thủ công có tốc độ chuyển mạch chậm và yêu cầu độ chính xác thiết kế cao. Để

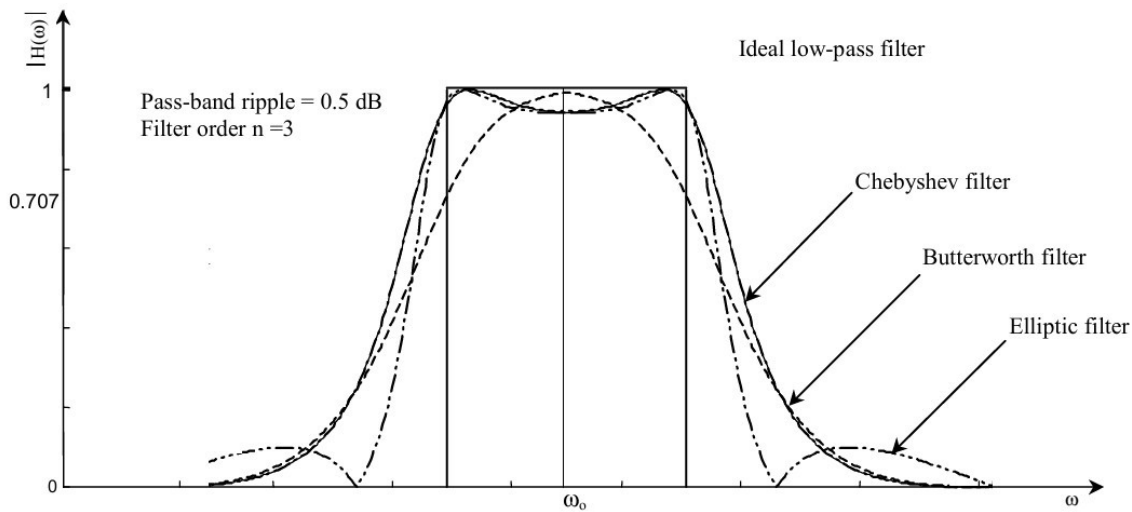
khắc phục các nhược điểm đó, các bộ chuyển mạch cơ khí đã được thay thế bằng bộ chuyển mạch điện tử tự động để lựa chọn tín hiệu đưa đến các bộ lọc với băng tần tương ứng [1, 2]. Các bộ chuyển mạch điện tử có kích thước nhỏ gọn và tốc độ chuyển mạch nhanh, tuy nhiên đối với các hệ thống công suất lớn các bộ chuyển mạch điện tử không còn phù hợp.

Bài báo này đề xuất giải pháp thiết kế bộ lọc cho các dải tần (100 ÷ 150) MHz và dải tần (220 ÷ 400) MHz sử dụng bộ chuyển mạch tự động LC để tách tín hiệu cho các dải tần tương ứng. Bài báo cũng đưa ra sơ đồ nguyên lý và kết quả mô phỏng đặc tính của các bộ lọc và bộ chuyển mạch trên phần mềm mô phỏng ADS (Advanced Design System) 2019. Đây là phần mềm chuyên dụng trong lĩnh vực thiết kế và mô phỏng mạch viễn thông, đặc biệt là các mạch RF, mạch lọc, và hệ thống không dây được phát triển bởi Keysight Technologies.

2. BỘ LỌC THÔNG DẢI

Bộ lọc thông dải là một mạch lọc điện tử cho phép tín hiệu trong một dải tần số nhất định đi qua, trong khi chặn các tín hiệu có tần số nằm ngoài dải tần đó. Nó kết hợp chức năng của cả bộ lọc thông thấp và bộ lọc thông cao, chỉ giữ lại tín hiệu trong dải tần số giữa một tần số cắt dưới và một tần số cắt trên. Các tham số chính của nó bao gồm băng thông, tần số trung tâm, độ chặn ngoài dải và hệ số suy hao của nó.

Thiết kế bộ lọc thông dải chủ yếu tập trung vào phản hồi biên độ của bộ lọc và coi phản hồi pha là thứ yếu. Có nhiều loại bộ lọc thông dải tương tự, chẳng hạn như bộ lọc Butterworth,



Hình 1. Đáp ứng tần số điển hình của các bộ lọc thông dải

Chebyshev và Elliptic. Các loại này khác nhau về bản chất phản hồi biên độ và pha [3].

Bộ lọc Butterworth là loại bộ lọc có đáp ứng phẳng nhất trong dải thông, không có độ nhấp nhô, và suy giảm tín hiệu một cách từ từ trong vùng chuyển tiếp. Ưu điểm của nó là giúp tín hiệu qua bộ lọc không bị biến dạng, dễ dàng tính toán và thực hiện trong thực tế với số lượng linh kiện tương đối ít, đồng thời độ ổn định cao do không có độ nhấp nhô trong biên độ. Tuy nhiên, nó có nhược điểm là độ dốc suy giảm giữa dải thông và dải dừng không cao, nghĩa là tín hiệu không mong muốn ở vùng biên tần số vẫn có thể ảnh hưởng đến kết quả. Ngoài ra, bộ lọc Butterworth cần bậc rất cao để đạt được vùng chuyển tiếp hẹp, dẫn đến số lượng linh kiện tăng và mạch phức tạp hơn.

Bộ lọc Chebyshev có đặc điểm là có độ nhấp nhô trong dải thông nhưng có độ dốc suy giảm tín hiệu nhanh hơn Butterworth, giúp loại bỏ tín hiệu không mong muốn nhanh chóng sau tần số cắt. Tuy nhiên, sự dao động trong dải

thông có thể gây biến dạng tín hiệu, điều này không thích hợp cho các ứng dụng đòi hỏi đáp ứng phẳng trong dải thông và trong thiết kế yêu cầu tính toán phức tạp, cần nhiều linh kiện chính xác.

Bộ lọc thông dải Elliptic có cả độ nhấp nhô trong dải thông và dải dừng, nhưng bù lại có độ dốc suy giảm cao nhất so với các bộ lọc khác giúp loại bỏ tín hiệu ngoài dải thông một cách nhanh chóng. Hơn nữa bộ lọc Elliptic cần bậc rất thấp để đạt được suy giảm tín hiệu mong muốn, giúp giảm số lượng linh kiện và chi phí sản xuất. Tuy nhiên, sự dao động trong cả hai dải có thể gây ra biến dạng tín hiệu, điều này không phù hợp cho các ứng dụng cần tín hiệu mượt mà. So sánh cụ thể các tham số của ba bộ lọc này được thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. Tham số các bộ lọc

Tham số	Bộ lọc Butterworth	Bộ lọc Chebyshev	Bộ lọc Elliptic
Độ nhấp nhô trong dải thông	Không	Có (đồng đều)	Có (đồng đều)
Độ nhấp nhô trong dải dừng	Không	Không	Có (đồng đều)
Độ dốc suy giảm	Trung bình	Cao	Rất cao
Đáp ứng pha	Không tuyến tính	Không tuyến tính	Không tuyến tính
Vùng chuyển tiếp	Rộng	Hẹp	Rất hẹp
Bậc bộ lọc	Cao	Trung bình	Thấp

Mỗi loại bộ lọc thông dải tương tự có những ưu nhược điểm riêng phù hợp với các ứng dụng khác nhau. Bộ lọc Butterworth được ưa chuộng vì đáp ứng phẳng trong dải thông, nhưng không phù hợp với các ứng dụng yêu cầu suy giảm nhanh. Chebyshev tối ưu cho ứng dụng cần suy giảm nhanh nhưng không quan trọng độ tuyến tính của tín hiệu. Elliptic có suy giảm mạnh phù hợp ứng dụng cho các hệ thống viễn thông lọc tín hiệu tần số cao.

Trong phần tiếp theo nhóm tác giả xây dựng thiết kế bộ lọc thông dải Elliptic cho các dải tần của băng sóng mét và băng sóng đề xi mét. Đồng thời thiết kế cơ cấu chuyển mạch điện tử tự động để có thể sử dụng hai bộ lọc ở các băng tần khác nhau với một đầu vào tín hiệu duy nhất.

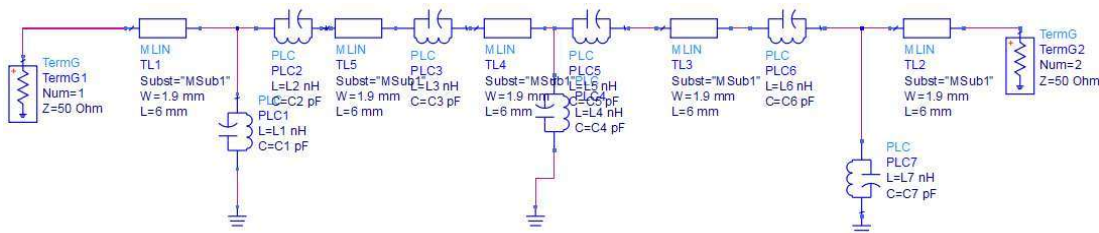
3. THIẾT KẾ BỘ LỌC THÔNG DẢI VÀ KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Về cơ bản, bộ lọc tương tự luôn có thể được mô tả bằng hàm truyền miền tần số có dạng tổng quát, được hiển thị trong phương trình 1 [4]:

$$H(s) = K \frac{(s - z_1)(s - z_2)(s - z_3)}{(s - p_1)(s - p_2)(s - p_3)} \quad (1)$$

Trong đó s là biến Laplace và K là hằng số, hoặc hệ số khuếch đại. Bộ lọc được đặc trưng bởi các cực $p_1, p_2, p_3...$, và các số không $z_1, z_2, z_3...$, có thể được vẽ trong mặt phẳng s phức tạp. Đáp ứng tần số của bộ lọc $H(\omega)$, có thể thu được bằng cách thay thế $s = j\omega$ vào phương trình 1. Phản ứng hoàn chỉnh của bộ lọc sau đó được tạo ra bằng cách thay đổi ω trong phương trình 2 giữa 0 và ∞ .

$$H(\omega) = K \frac{(j\omega - z_1)(j\omega - z_2)(j\omega - z_3)}{(j\omega - p_1)(j\omega - p_2)(j\omega - p_3)} \quad (2)$$



Hình 2. Sơ đồ nguyên lý bộ lọc thông dải (100 ÷ 400)MHz

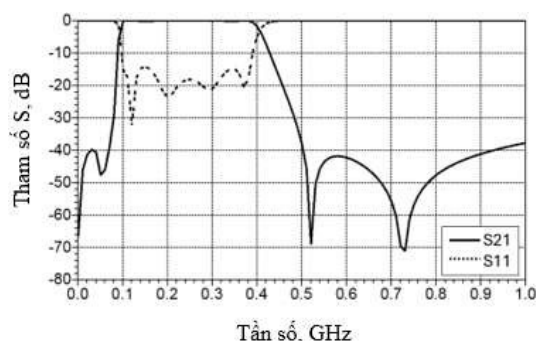
3.1. Thiết kế bộ lọc Elliptic dải rộng

Trong phần này nhóm tác giả sẽ thiết kế xây dựng bộ lọc thông dải dạng Elliptic và mô phỏng kết quả trên phần mềm ADS. Bộ lọc được thiết kế có các tham số cơ bản như sau:

- Độ dao động trong dải thông (passband độ nhấp nhô) 0,5dB;
- Độ chặn ngoài dải (stopband atten) 40dB;
- Trở kháng vào/ra 50Ohm;
- Tần số cắt dưới 100MHz;
- Tần số cắt trên 400MHz.

Để đạt được các thông số kỹ thuật đó, bộ lọc dạng Butterworth sẽ cần đến bậc tối thiểu là 11, Chebychev sẽ cần bậc tối thiểu là 6 trong khi Elliptic chỉ cần 5 [5]. Mặc dù bộ lọc Elliptic có điểm yếu là có đáp ứng pha phi tuyến tính nhất trên dải thông của chúng, nhưng nó cần bậc thấp nhất so với các bộ lọc khác. Do đó, cấu trúc bộ lọc dạng Elliptic trở thành lựa chọn đầu tiên của nhóm tác giả trong bài báo này. Bộ lọc dạng Elliptic bậc 5 với các tham số đã chọn được xây dựng trong phần mềm ADS có dạng như trên Hình 2.

Từ các tham số trên của bộ lọc nhóm tác giả sử dụng bảng tham số từ tài liệu [6] để tính toán các giá trị của các phần tử trong bộ lọc và lựa chọn các giá trị gần nhất tương ứng trong thực tế. Đặc tuyến của bộ lọc băng rộng (100 ÷ 400) MHz được thể hiện trên hình 3.

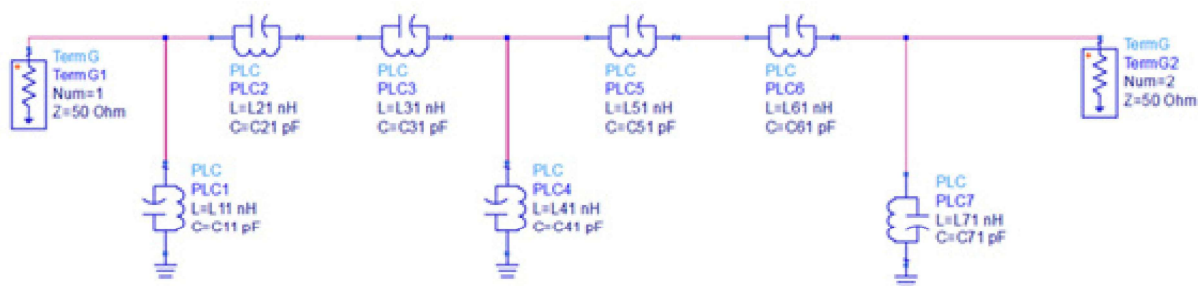


Hình 3. Đặc tuyến bộ lọc thông dải (100 ÷ 400)MHz

Từ hình 3 ta thấy hệ số tổn hao trong dải thông nhỏ hơn 0,5dB và độ chặn ngoài dải tần lớn hơn 40dB đáp ứng được các chỉ tiêu đặt ra.

3.2. Thiết kế bộ lọc Elliptic băng sóng mét và đề xi mét

Trong thực tế thiết bị nghiên cứu của nhóm tác giả không sử dụng cả dải tần từ (100÷400) MHz mà sử dụng hai dải tần khác nhau là (100÷150)MHz và (220÷400)MHz. Chính vì vậy để đảm bảo loại bỏ những tín hiệu không



Hình 4. Sơ đồ nguyên lý bộ lọc thông dải (100 ÷ 150)MHz

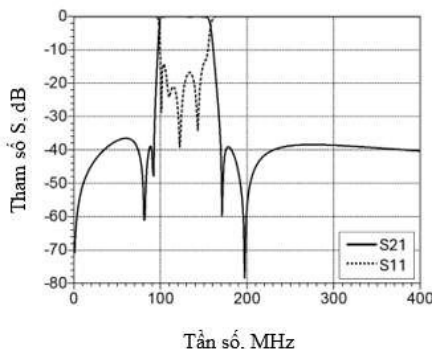
cần thiết trong dải tần nhóm tác giả thiết kế 2 bộ lọc khác nhau phục vụ cho hai dải tần nêu trên.

a) Thiết kế bộ lọc băng sóng mét với các tham số chính:

- Độ dao động trong dải thông (passband ripple) 0,5dB;
- Độ chặn cuối dải (stopband atten) 40dB;
- Trở kháng vào/ra 50Ohm;
- Tần số cắt dưới 100MHz;
- Tần số cắt trên 150MHz.

Bộ lọc băng sóng mét cũng được thiết kế theo kiểu bộ lọc dạng Elliptic bậc 5, sơ đồ nguyên lý của bộ lọc được thể hiện trên Hình 4.

Sử dụng bảng tham số cho bộ lọc Elliptic bậc 5 từ tài liệu [6] ta tính toán các giá trị của các phần tử trong bộ lọc và lựa chọn các giá trị gần nhất tương ứng trong thực tế như trong Bảng 2.



**Hình 5. Đặc tuyến bộ lọc thông dải
(100 ÷ 150)MHz**

Đặc tuyến của bộ lọc băng sóng mét được thể hiện trên Hình 5. Từ Hình 5 ta thấy đặc tuyến của bộ lọc đáp ứng được các chỉ tiêu đặt ra như dải tần làm việc (100 ÷ 150)MHz, độ chặn ngoài dải (> 38dB) và tổn hao trong dải thông (< 0,5dB).

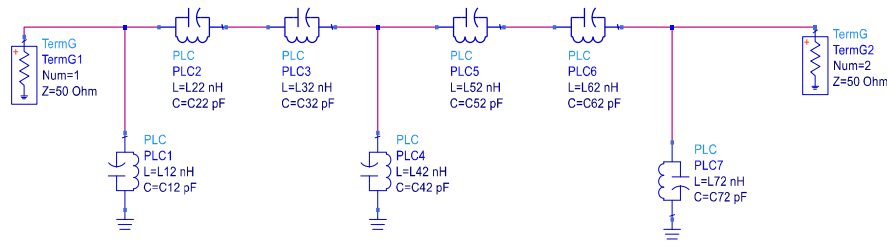
**Bảng 2. Giá trị các phần tử bộ lọc thông dải
(100 ÷ 150)MHz**

Ký hiệu	Giá trị tính toán (pF)	Giá trị thực tế (pF)	Ký hiệu	Giá trị tính toán (nH)	Giá trị thực tế (nH)
C11	55,3746	56	L11	30,9639	31
C21	13,7546	12	L21	47,3525	47
C31	38,3125	39	L31	99,595	100
C41	88,1911	82	L41	18,9717	19
C51	52,0189	56	L51	16,6101	17
C61	95,438	100	L61	31,607	32
C71	38,7278	39	L71	40,4182	40

b) Bộ lọc Elliptic băng sóng đềximét được thiết kế với các tham số chính như sau:

- Độ dao động trong dải thông (passband ripple) 0,5 dB;
- Độ chặn cuối dải (stopband atten) 50 dB;
- Trở kháng vào/ra 50 Ohm;
- Tần số cắt dưới 220 MHz;
- Tần số cắt trên 400 MHz.

Sơ đồ nguyên lý của bộ lọc được thể hiện trong hình 6.



Hình 6. Sơ đồ nguyên lý bộ lọc thông dải (220 ÷ 400) MHz

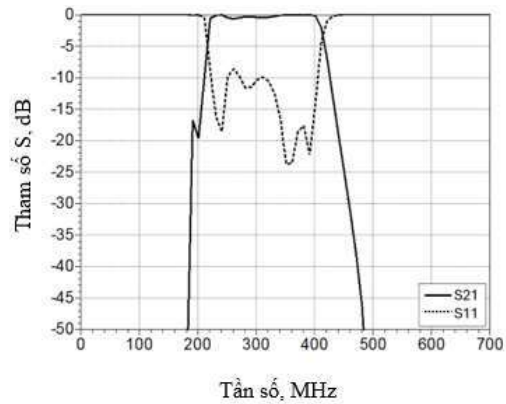
Tương tự sử dụng bảng tham số cho bộ lọc Elliptic bậc 5 từ tài liệu [6] ta tính toán các giá trị của các phần tử trong bộ lọc và lựa chọn các giá trị gần nhất tương ứng trong thực tế.

Bảng 3. Giá trị các phần tử bộ lọc thông dải (220 ÷ 400)MHz

Ký hiệu	Giá trị tính toán (pF)	Giá trị thực tế (pF)	Ký hiệu	Giá trị tính toán (nH)	Giá trị thực tế (nH)
C12	40,5453	40	L12	9,95696	10
C22	12,1885	12	L22	16,6076	16,8
C32	23,5134	22	L32	32,8266	33
C42	59,6057	60	L42	6,61626	6,8
C52	36,2127	36	L52	6,6629	6,8
C62	58,0863	58	L62	11,4945	12
C72	27,9752	27	L72	13,8898	14

Đặc tuyến của bộ lọc băng sóng decimét được thể hiện trên Hình 7.

Từ Hình 7 ta thấy bộ lọc có hệ số chặn ngoài dải tần rất tốt (>50 dB). Hệ số tổn hao trong dải thông nhỏ hơn 0,9dB.

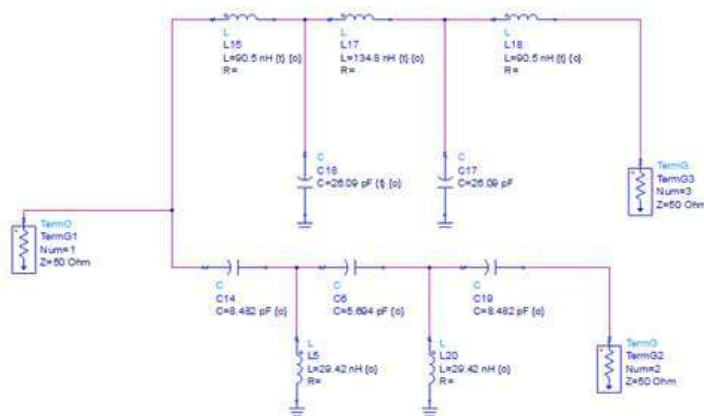


Hình 7. Đặc tuyến bộ lọc thông dải (220 ÷ 400)MHz

Đối với thiết bị truyền thông yêu cầu khả năng khả năng chọn lọc tốt giữa các tín hiệu mong muốn và không mong muốn trong khoảng tần số rất hẹp ở cả băng tần sóng mét và sóng đề xi mét như nhóm nghiên cứu đang hướng đến thì không thể sử dụng bộ lọc dải rộng như mục 3.1. Do vậy phương án tối ưu vẫn phải sử dụng 2 bộ lọc cho hai dải tần, việc này dẫn đến việc phải chọn lọc tín hiệu đầu vào phù hợp trước khi đưa qua các bộ lọc. Phần tiếp theo nhóm nghiên cứu sẽ thiết kế, xây dựng bộ tách ghép tín hiệu tự động để khắc phục vấn đề này.

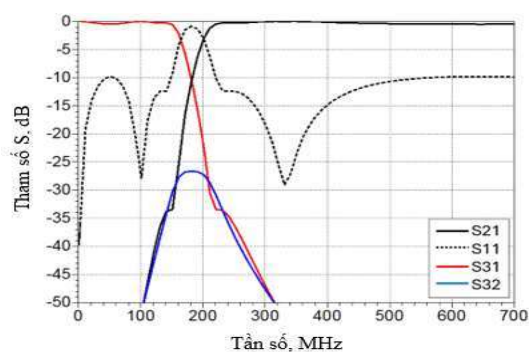
4. THIẾT KẾ BỘ TÁCH GHÉP TÍN HIỆU TỰ ĐỘNG

Để tối ưu cho quá trình lọc những tín hiệu cần thiết và loại bỏ các tín hiệu trong các dải tần



Hình 8. Sơ đồ nguyên lý bộ tách/ghép tín hiệu

thấp, dải cao và dải tần trong khoảng (150 ÷ 250) MHz chúng ta phải sử dụng 2 bộ lọc độc lập cho hai dải tần cần sử dụng. Để kết hợp hai bộ lọc dải với các băng tần khác nhau vào thiết bị, nhóm nghiên cứu đã thiết kế bộ tách ghép tín hiệu để chọn lọc tín hiệu phù hợp [7]. Bộ tách ghép tín hiệu với sơ đồ nguyên lý như trên Hình 8 được thiết kế và mô phỏng trên phần mềm ADS.



Hình 9. Đặc tuyến bộ tách ghép tín hiệu

Trong đó, các mạch cộng hưởng thông thấp (L15-C18 và C17-L17) được tính toán để có được tần số cắt khoảng 185MHz và cuộn L18 được điều chỉnh để tạo ra giá trị trở kháng kết hợp với bộ lọc thông dải (100÷150)MHz ở phần trước. Mạch cộng hưởng thông cao (C14-L5, C6-L20) được tính toán để có tần số cắt khoảng 205MHz và tụ C19 được điều chỉnh để tạo ra giá trị trở kháng kết hợp với bộ lọc thông dải (220÷400)MHz. Đặc tuyến của bộ tách ghép tín hiệu được thể hiện trên hình 9.

Kết quả trên hình 9 cho thấy, đặc tuyến của bộ tách/ghép tín hiệu đáp ứng được đúng các chỉ tiêu mong muốn về tần số cắt của mỗi nhánh, hệ số tổn hao chèn và hệ số tổn hao phản hồi tại các cổng.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày các phương án thiết kế bộ lọc thông dải dạng Elliptic cho các tín hiệu trong băng tần sóng mét và đêximét. Đồng thời đánh giá đưa ra phương án sử dụng kết hợp các bộ lọc dải hẹp cùng với bộ tách ghép tín hiệu tự động ứng dụng cho các thiết bị sử dụng nhiều băng tần hẹp xen kẽ và yêu cầu cao về sự tinh lọc tín hiệu. Các bộ lọc và bộ tách ghép tín hiệu tự động do nhóm tác giả thiết kế đã được mô phỏng, đánh giá qua phần mềm đáng tin cậy ADS 2019. Các kết quả mô phỏng hoàn toàn đáp ứng các tham số đặt ra các bộ lọc và bộ tách ghép tín hiệu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Kwak, J. W., Sim, M. S., Kang, I.-W., Park, J. and Chae, C.-B, Ed. by H. Alves, T. Riihonen and H. A. "Full-Duplex Communications for Future Wireless Networks", Suraweera. Singapore: Springer Singapore, pp. 39–60, 2020. ISBN: 978-981-15-2969-6. DOI: 10.1007/978-981-15-2969-6_2.
- [2]. https://www.leleivre.com/misc_uhf_duplexer.html.
- [3]. R. Schaumann, Haiqiao Xiao, M. E. Valkenburg, "Design of Analog Filters", Oxford University Press, 2001 - 737 p.
- [4]. Boaz Porat, "A Course in Digital Signal Processing", Wiley, 1997, ISBN: 0-471-14961-6.
- [5]. Genesys RF and Microwave Design Software, <http://www.agilent.com/find/eesof-genesys/>.
- [6]. A. Zverev, "Handbook of Filter Synthesis", John Wiley & Sons, Inc., New York, 1967.
- [7]. Miika Vuorenmaa, "High-Power Full-Duplex Radio Prototype at Lower UHF Band - RF Self Interference Canceller Design and Implementation", Master of Science Thesis, Electrical Engineering – Electronics, May 2022.

Giới thiệu tác giả:



Tác giả **Nguyễn Tuấn Minh** tốt nghiệp đại học (năm 2005) tại Học viện Kỹ thuật quân sự và nhận bằng Thạc sĩ (năm 2021) tại Trường ENS Cachan (Cộng hòa Pháp). Năm 2020 nhận bằng Tiến sĩ ngành Kỹ thuật Điện tử tại Viện Khoa học và công nghệ quân sự. Hiện nay tác giả công tác tại Viện Điện tử/Viện Khoa học và công nghệ quân sự.

Hướng nghiên cứu chính: Định vị vô tuyến và các hệ thống thông tin.



Tác giả **Cao Văn Toàn** tốt nghiệp đại học (năm 2012) tại Trường Đại học tổng hợp vô tuyến điện tử Ryazan, Liên Bang Nga. Năm 2015 nhận bằng Tiến sĩ ngành kỹ thuật điện tử tại Trường Đại học tổng hợp vô tuyến điện tử Ryazan. Hiện nay tác giả công tác tại Viện Điện tử/Viện Khoa học và Công nghệ quân sự.

Hướng nghiên cứu chính: Định vị vô tuyến và các hệ thống thông tin.