



Design of a Microstrip Bandpass Filter Using Metamaterials

Seyed Ali Hashemi Talkhouncheh^{1*}, Ahmad Basafa²

¹Assistant Professor, Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Mohajer, Isfahan Branch, Technical and Vocational University (TVU), Isfahan, Iran.

²M Sc., Department of Electrical Engineering, Majlesi Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 01.27.2020

Revised: 08.13.2020

Accepted: 01.18.2021

Keyword:

Microstrip Filter

Metamaterial

Split Ring Resonator (SRR)

Frequency Selection

Genetic Algorithm

***Corresponding Author:**

Seyed Ali Hashemi

Talkhouncheh

Email: ahashemi@tvu.ac.ir

ABSTRACT

Split ring resonators (SRR) are suitable for microwaves due to their unique properties. In this research, using metamaterials and SRR structures, a band-pass filter on the C band was designed. The main filter structure consisted of two SRRs connected with a microstrip line. The initial size of the structure, such as the radius of the rings, was estimated based on the central wavelength of the filter. In order to increase the bandwidth and the efficiency of the passage in the central frequency, genetic algorithm was used and the optimal dimensions of the filter were obtained. The change in the central frequency of the filter due to the change in the dielectric constant was investigated, and the filter stability was depicted in relation to the change in its dimensions. Compared to other existing filters, this filter, with its simplicity of structure and ease of construction, has better characteristics such as a high pass ratio at center frequency and wide bandwidth.





دانشگاه فنی و حرفه‌ای
اصفهان

کارافان

فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای

زمستان ۱۳۹۹، دوره ۱۷، شماره ۴، ۲۸۰-۲۷۱

آدرس نشریه: <https://karafan.tvu.ac.ir/>

doi:10.48301/KSSA.2021.128406

20.1001.1.23829796.1399.17.4.15.3



شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

طراحی فیلتر میان‌گذر میکرواستریپ با استفاده از فرامواد

سیدعلی هاشمی طالخونچه^{*۱}، احمد باصفا^۲

- ۱- استادیار، دپارتمان مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده مهاجر، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان اصفهان، ایران.
- ۲- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق، واحد شهر مجلسی، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

چکیده

ساختارهای تشدیدگر حلقوی شکافدار (SRR) به دلیل خواص منحصربه‌فردی که دارند، برای کاربردهای مایکروویو مناسب هستند. در این مقاله با استفاده از متامتریال‌ها و ساختارهای SRR، یک فیلتر میانگذر در باند فرکانسی C طراحی شده است. ساختار اصلی فیلتر از دو عدد SRR که با یک خط مایکرواستریپ به هم متصل شده‌اند، تشکیل شده است. ابعاد اولیه ساختار مانند شعاع رینگ‌ها برحسب طول موج مرکزی فیلتر تخمین زده شده‌اند. به منظور افزایش پهنای باند و ضریب عبور در فرکانس مرکزی، از الگوریتم ژنتیک استفاده شد و ابعاد بهینه فیلتر، به دست آمدند. نحوه تغییر فرکانس مرکزی فیلتر با تغییر ثابت دی‌الکتریک بررسی شد و همچنین پایداری فیلتر نسبت به تغییر ابعاد آن به تصویر کشیده شد. این فیلتر در عین سادگی ساختار و سهولت در فرایند ساخت، در مقایسه با سایر فیلترهای موجود، دارای مشخصات خوبی مانند ضریب عبور بالا در فرکانس مرکزی و پهنای باند وسیع می‌باشد.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۰۷

بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۰۵/۲۳

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۲۹

کلید واژگان:

فیلتر میکرواستریپ

فرامواد

تشدیدگر حلقوی شکافدار

فرکانس گزینی

الگوریتم ژنتیک

*نویسنده مسئول: سیدعلی هاشمی

طالخونچه

پست الکترونیکی:

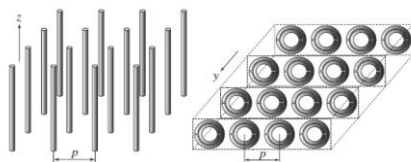
ahashemi@tvu.ac.ir



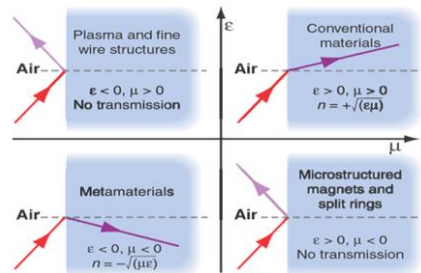
© 2021 Technical and Vocational University, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

مقدمه

فراماده یا متامتریال^۱، ماده مرکبی است که خواص نامتعارف الکترومغناطیسی می‌باشد. آنچه این مواد را غیرمعمول کرده، منفی بودن ضریب شکست نور در آنها است؛ به این معنا که این مواد، نور را در جهت مخالف مواد عادی، منکسر می‌کنند. این ویژگی، ناشی از منفی بودن گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی این مواد می‌باشد. اولین ساختارهای موفق فراماده‌ای را پندری^۲ در سال ۱۹۹۹ میلادی معرفی کرد [۱]. در شکل ۱ دسته‌بندی مواد از نظر مشخصات الکترومغناطیسی نشان داده شده است [۱]. مواد با ϵ منفی و μ مثبت از میله‌های فلزی نازک و مواد با ϵ مثبت و μ منفی از تشدیدگرهای حلقوی شکاف‌دار ساخته شدند. این ساختارها در شکل ۲ نمایش داده شده‌اند. در سال ۲۰۰۰ میلادی پروفسور اسمیت، این دو ساختار را با هم ترکیب کرد و اولین ساختار فراماده‌ای با ϵ منفی و μ منفی، همان‌گونه که در شکل ۳ دیده می‌شود، ساخته شد [۲]. با استفاده از ساختارهای فلز و دی‌الکتریک در فواصل بسیار نزدیک می‌توان به ضریب گذردهی دلخواه و حتی منفی در فرکانس موردنظر دست یافت. فیلترهای متامتریالی که از تکنولوژی میکرواستریپ و موج‌بر هم‌صفحه ایجاد می‌شوند، ابعاد کوچک و پاسخ فرکانسی خوبی دارند. با استفاده از ساختارهای تشدیدگر حلقوی شکاف‌دار^۳، به دلیل قابلیت انتخاب‌کنندگی فرکانس می‌توان علاوه بر پهنای باند دلخواه، صفر انتقال نیز در فرکانس موردنظر ایجاد کرد.



شکل ۲. اولین ساختارهای نامتعارف معرفی شده توسط پندری



(الف) $\epsilon < 0$ و $\mu > 0$ (ب) $\epsilon > 0$ و $\mu < 0$

شکل ۱. دسته‌بندی مواد براساس مشخصات الکترومغناطیسی آنها



شکل ۳. اولین ساختار فراماده‌ای با ϵ منفی و μ منفی [۲]

¹ Metamaterial

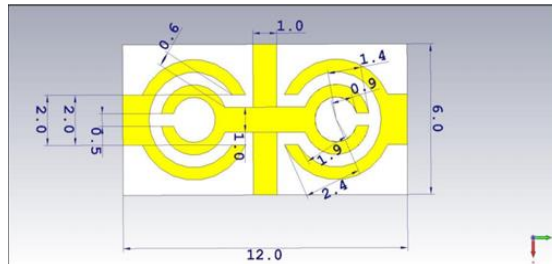
² Pendry

³ Split Ring Resonator (SRR)

در این مقاله، یک فیلتر میان‌گذر متامتریال در باند فرکانسی C با فرکانس مرکزی 5 GHz و پهنای باند 2 GHz طراحی شد. فیلتر پیشنهادی، نسبت به فیلترهای موجود، در عین سادگی ساخت، دارای پهنای باند بیشتری می‌باشد. به‌منظور تنظیم فرکانس مرکزی فیلتر روی 5 GHz و پهنای باند وسیع فیلتر از 4 تا 6 گیگاهرتز، از الگوریتم ژنتیک استفاده شد. شبیه‌سازی‌های تمام‌موج برای ساختارهای ارائه‌شده، با استفاده از نرم‌افزار CST انجام گرفت. پاسخ فرکانسی فیلتر طراحی‌شده با تغییر پارامترهای ابعاد فیلتر و خواص فیزیکی، در نمودارهایی جداگانه آورده شده است. بررسی نتایج ساختار پیشنهادی، برتری فیلتر پیشنهادی را هم از نظر پهنای باند نسبی و هم از نظر ضریب کیفیت، نسبت به فیلترهای دیگر نشان داده شده است. در ادامه، ابتدا فیلتر پیشنهادی در این تحقیق، معرفی و شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی مانند توان عبوری و توان بازگشتی در نمودارهای جداگانه نمایش داده شدند. پایداری این فیلتر، نسبت به تغییرات ابعاد فیلتر بررسی شد و در نهایت، پارامترهای فیلتر پیشنهادی با فیلترهای متامتریال طراحی‌شده در سایر مراجع مقایسه گردید و برتری فیلتر پیشنهادی نسبت به آنها تأیید شد.

روش طراحی

طرح اولیه فیلتر پیشنهادی، با مطالعه ساختارهای تشدیدگر حلقوی شکاف‌دار (SRR) به وجود آمد [۳؛ ۴]. یک SRR دارای مشخصه فرکانسی مناسبی برای کاربرد در فیلترها را دارد ولی تاکنون تنها از ساختارهای پیچیده SRR برای فیلتر بهره‌برده شده است. در این مقاله، نوآوری اصلی استفاده ساده از دو SRR سری‌شده برای فیلتر متامتریال مایکروویو است. فیلتر پیشنهادی این مقاله در شکل ۴ نشان داده شده است. در این فیلتر، موج الکترومغناطیس از یک خط میکرواستریپ وارد ساختار فیلتر می‌شود و پس از رزونانس با خازن و سلف ساختار SRR، توسط خط میکرواستریپ دیگری به ساختار رینگ رزوناتور مجزا شده سمت چپ، هدایت می‌گردد و در نهایت، به خروجی فیلتر که یک خط میکرواستریپ است، وارد می‌شود و در این فرایند، فرکانس‌های اطراف فرکانس مرکزی فیلتر حذف می‌شوند [۵-۹].



شکل ۴. ساختار و ابعاد فیلتر طراحی شده (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود از یک خط میکرواستریپ به صورت عمودی استفاده شده است که این خط میکرواستریپ، حالت پایداری فیلتر را بیشتر می‌کند. ایده استفاده از خط میکرواستریپ عمودی از اینجا به ذهن خطور کرد که در مدارات و فیلترهای فرکانس پایین که از عناصر فشرده استفاده می‌شود، معمولاً از یک سلف یا خازن موازی برای بهینه‌کردن مشخصات فیلتر استفاده می‌گردد. با توجه به اینکه خط میکرواستریپ عمودی، مانند یک خازن با صفحه زمین عمل می‌کند و همچنین با صفحه زمین تشکیل حلقه و در نهایت خاصیت سلفی می‌دهد، در شبیه‌سازی از آن استفاده شد و این نتیجه حاصل گردید که با تنظیم دقیق ابعاد خط میکرواستریپ عمودی بدون افزایش پیچیدگی ساختار، می‌توان خروجی‌های فیلتر را بهبود بخشید. جنس بخش

فلزی ساختار، به علت قابلیت دسترسی آسان، فلز مس انتخاب گردید. البته طلا و نقره، تلفات کمتری دارند ولی به علت قیمت بالا از آنها صرف نظر شد. برای برقراری روابط متامتریال بر ساختار فلز- عایق باید لایه فلزی، ضخامت کمتر از $\lambda/10$ میلی متر داشته باشد. در طراحی فیلتر پیشنهادی، ضخامت پچ فلزی حدود ۳۵ میکرومتر در نظر گرفته شد. شایان ذکر است که ضخامت پچ، رابطه مستقیم با فرکانس مرکزی دارد و برای مثال ۳۵ میکرومتر برای فرکانس مایکروویو مناسب است و در فرکانس‌های تراهرتز و نوری ضخامت باید در حد نانومتر باشد. ابعاد اولیه برای ساختار پیشنهادی فیلتر، از تناسب رابطه (۱) به دست می‌آید. این تناسب از آنجا آمده که برای ایجاد رزونانس در یک قطعه فلزی به طول L ، باید رابطه تقریبی (۱) بین طول قطعه و طول موج رزونانس برقرار باشد.

$$L \approx \frac{\lambda}{2} \Rightarrow L = \frac{C}{2f} \quad (1)$$

از آنجایی که در ساختار، صفحه هادی زمین شده وجود دارد، با استفاده از قضیه تصویر در هادی‌های زمین شده، باید ابعاد اصلی ساختار، نصف شود تا با خود تصویر به اندازه L واقعی دست یافت.

$$L = \frac{C}{2f} \Rightarrow L' = \frac{L}{2} = \frac{C}{4f} \quad (2)$$

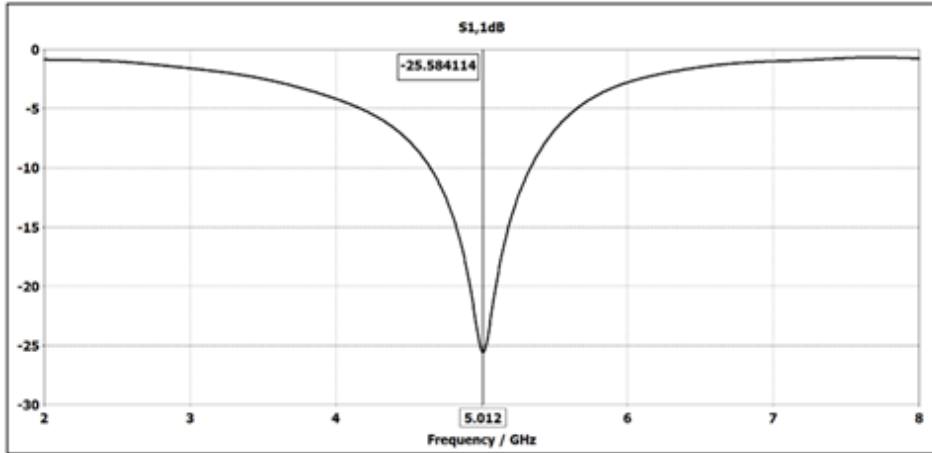
با توجه به اینکه مطلوب است که فیلتر مورد نظر در فرکانس ۵ گیگاهرتز رزونانس کند، می‌توان با استفاده از رابطه (۲) محیط تقریبی رینگ‌ها و از آنجا حدود شعاع اولیه را به دست آورد.

$$L = \frac{C}{4f} = \frac{3 \times 10^8}{4 \times 5 \times 10^9} = 1.5 \times 10^{-2} = 15 \text{ mm} = 2\pi r \Rightarrow r \cong 2.3 \text{ mm} \quad (3)$$

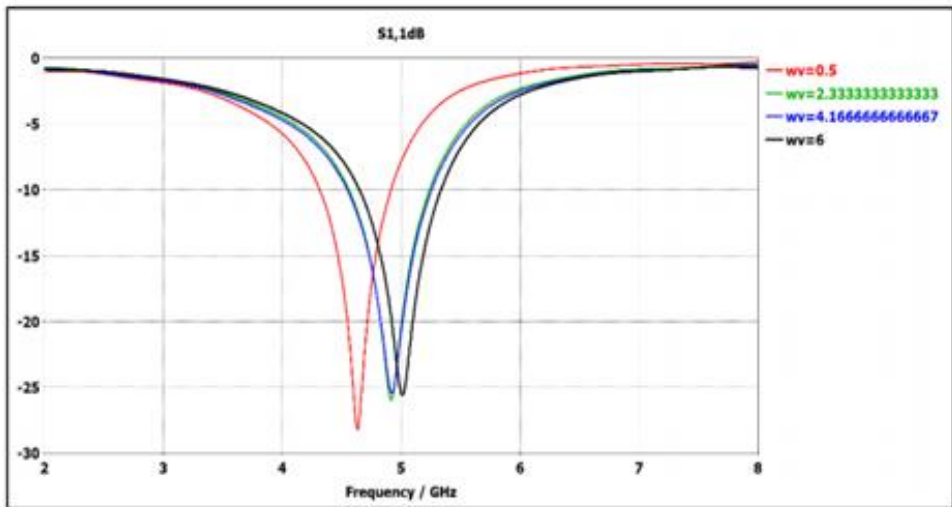
این شعاع تقریبی رینگ‌ها است. در ابتدا، ابعاد، با توجه به عدد به دست آمده تنظیم شد و سپس شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار CST انجام گرفت که نتایج به دست آمده بیانگر عدم کارکرد صحیح فیلتر بود. در این مرحله، با استفاده از نرم‌افزار CST و انتخاب الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌ساز و متغیر قرار دادن چند پارامتر مانند ضخامت زیرلایه و جنس زیرلایه، ابعاد نشان داده شده در شکل ۴ که مقادیر بهینه است به دست آمد [۱۰]. این الگوریتم با الگوبرداری از روش تکامل ژنتیکی موجودات زنده عمل می‌کند و پارامترهای مختلف فیلتر (ابعاد) را تغییر می‌دهد و با روش‌های خاصی آنها را در هم آمیخته تا به هدف نهایی نزدیک شود و بهترین نتایج را تحویل دهد.

شبیه‌سازی

با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تطبیق فرکانس مرکزی روی ۵ گیگاهرتز، عایق بین صفحه زمین و رزوناتورها از جنس آلومینا با خلوص ۹۶ درصد، ضریب گذردهی الکتریکی ۹.۴ و ضخامت بهینه ۲.۴ میلی‌متر استفاده شد. در ادامه، ساختار رینگ‌های رزوناتوری در باند فرکانس ۴ تا ۶ گیگاهرتز نمایش داده می‌شود. سپس وابستگی فرکانس مرکزی به ضریب شکست نمایش داده می‌شود و در پایان با توجه به اینکه ساختار قابلیت متامتریالی و تغییر ضریب گذردهی الکتریکی را دارد، نتیجه گرفته می‌شود که می‌توان به راحتی با تغییر ضریب گذردهی الکتریکی، فرکانس مرکزی فیلتر را جابه‌جا کرد. نرم‌افزار استفاده شده برای شبیه‌سازی CST می‌باشد که یک شبیه‌ساز تمام‌موج است. در شکل ۵ ضریب انعکاس موج (S_{11}) نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در محدوده فرکانسی ۴ تا ۶ گیگاهرتز، این ضریب کمتر از -3 دسی‌بل می‌باشد که نشان دهنده عملکرد مطلوب سیستم است. در شکل ۶ تغییرات فیلتر بهینه‌سازی شده نسبت به پهنای مایکرواستریپ عمودی ساختار نشان داده شده است.



شکل ۵. ضریب انعکاس فیلتر

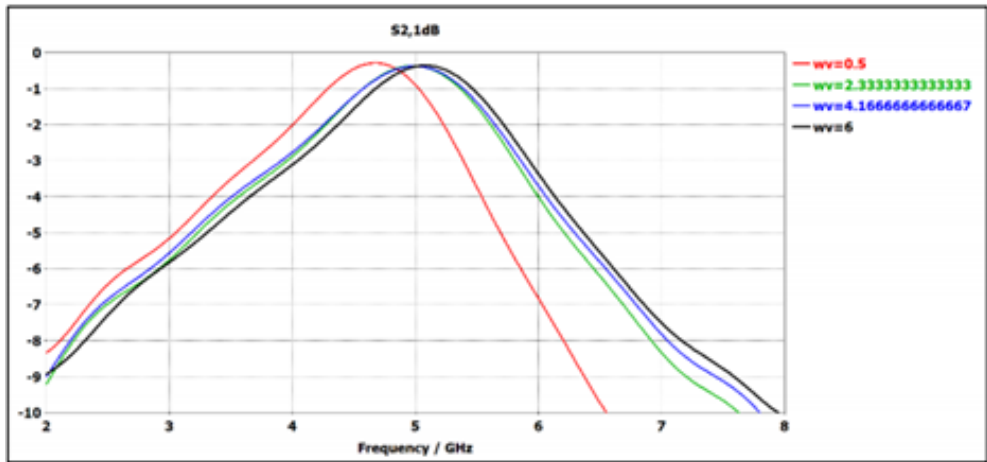


شکل ۶. ضریب انعکاس فیلتر نسبت به تغییرات پهنای میکرواستریپ

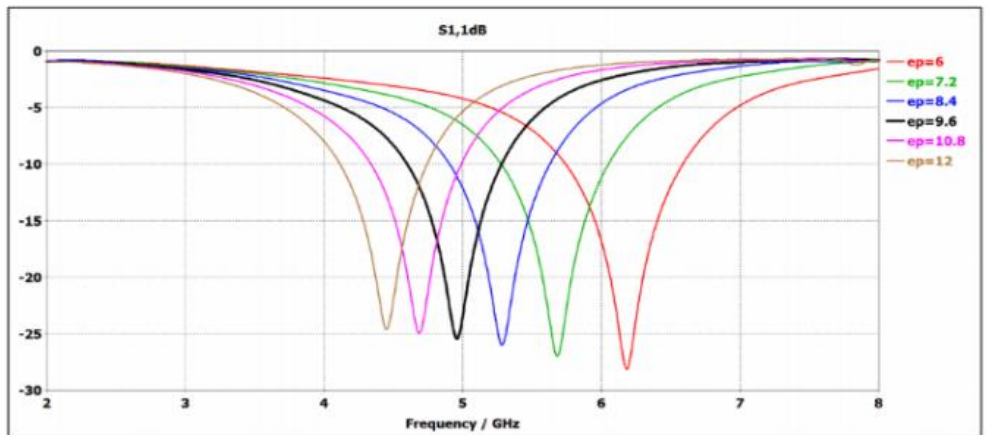
همان‌طور که در شکل ۶ پیداست در پهنای ۶ میلی‌متری ساختار، فرکانس مرکزی دقیقاً روی ۵ GHz قرار می‌گیرد. اهمیت میکرواستریپ عمودی، در پایدار کردن مشخصه یا تابع تبدیل فیلتر طراحی شده می‌باشد و در برخی باندهای فرکانسی می‌تواند حذف شود.

با توجه به شکل ۷ ضریب عبور فیلتر در بازه فرکانسی ۴ تا ۶ گیگاهرتز بالای ۳- دسی بل است که نشان‌دهنده کارایی خوب فیلتر می‌باشد. با تغییر پهنای میکرواستریپ عمودی، فقط فرکانس مرکزی جابه‌جا شده است و تغییر چندانی روی پهنای باند سیستم ندارد.

در شکل ۸ میزان حساسیت فرکانس مرکزی و پهنای باند سیستم، نسبت به تغییر ضریب گذردهی الکتریکی فیلتر نشان داده شده است. با افزایش ضریب گذردهی الکتریکی، مقدار فرکانس مرکزی، کاهش می‌یابد و با کاهش ضریب گذردهی، مقدار فرکانس مرکزی افزایش می‌یابد. از این خصوصیت فیلتر می‌توان در طراحی فیلتر متامتریال با فرکانس مرکزی متغیر، بهره برد؛ زیرا در بسیاری از مواد متامتریال که در ساختارشان از فریت‌ها استفاده شده است، می‌توان با تغییر بایاس الکتریکی، ضریب گذردهی الکتریکی زیرلایه را تغییر داد. همان‌گونه که می‌دانیم در ساختارهای عایق و فلز در فرکانس خاص و پهنای عایق موردنظر، ضریب گذردهی الکتریکی می‌تواند متغیر باشد. پس می‌توان با طراحی متامتریال و تغییر مشخصه آن، این ضریب را تحت کنترل درآورد و طبیعتاً فرکانس مرکزی فیلتر را کنترل کرد و به دلخواه تغییر داد.



شکل ۷. ضریب انتقال فیلتر نسبت به تغییرات پهنای میکرواستریپ



شکل ۸. تغییرات فرکانس مرکزی با تغییر ضریب گذردهی الکتریکی

مقایسه

برای مقایسه فیلترها، چون ممکن است فرکانس مرکزی متفاوت باشد، از پهنای باند نسبی یا ضریب کیفیت فیلتر به عنوان پارامتر قیاس استفاده می‌شود. تعاریف پهنای باند نسبی ($BW\%$) و ضریب کیفیت یک فیلتر (Q) عبارتند از:

$$Q = \frac{1}{\% BW} \quad \% BW = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_0} \times 100 \quad (4)$$

پهنای باند نسبی، در حقیقت، معکوس ضریب کیفیت است. با استفاده از این پارامتر می‌توان فیلترهایی که اندکی در فرکانس مرکزی متفاوت هستند را با هم مقایسه کرد. این مقایسه در جدول ۱ بین طرح پیشنهادی و مراجع معتبر آورده شده است [۱۵-۱۰]. در برخی از مراجع، ضریب کیفیت فیلتر داده شده که تبدیل به پهنای باند نسبی شده است. فرکانس مرکزی فیلترهای مراجع بین ۱/۵ تا ۵ گیگا هرتز متغیر است. همچنین مرجع [۱۲] یک فیلتر دوباندی است که جمع پهنای باندهای نسبی در دو فرکانس مرکزی در نظر گرفته شده‌اند. منظور از دقت ساخت در جدول ۱، حداقل ابعاد فیزیکی به کاررفته در ساخت تجهیز می‌باشد. برای مثال اگر ضخامت یک پیچ ۱/۰۰۱ میلی‌متر باشد، سختی فرایند ساخت، بیشتر از زمانی است که یک پیچ به ضخامت ۱/۰۱ میلی‌متر ساخته شود؛ زیرا هم به دقت بیشتر و هم به ابزار و تجهیزات دقیق‌تری نیاز است که این باعث افزایش هزینه فرایند ساخت نیز می‌شود. با توجه به مقایسه به عمل آمده در جدول ۱ مشخص است که فیلتر پیشنهادی در این مقاله، بالاترین پهنای باند و کمترین هزینه ساخت را دارد.

جدول ۱. مقایسه فیلترها

نوع فیلتر	پهنای باند نسبی	ضریب کیفیت	دقت ساخت (mm)
پیشنهادی فیلتر	۵۲٪	۱.۹۲۳	۰.۱
فیلتر مرجع [۱۵]	۲۶٪	۲.۷۷۸	۰.۰۰۱
فیلتر مرجع [۱۱]	۲۸٪	۳.۵۷۱	۰.۱
فیلتر مرجع [۱۴]	۳۴٪	۲.۹۴۱	۰.۰۱
فیلتر مرجع (فیلتر دو بانده) [۱۲]	۲۶٪	۳.۸۴۶	۰.۰۰۱
فیلتر مرجع [۱۳]	۱۰٪	۱۰	۰.۱

نتیجه‌گیری

از نتایج شبیه‌سازی و بررسی تغییرات پارامترهای مختلف ساختار پیشنهادی می‌توان به‌طور کلی نتیجه گرفت که مؤثرترین عامل در کارایی یک فیلتر مایکرواستریپ، زیرلایه آن می‌باشد. با انتخاب مناسب‌ترین ضریب گذردهی الکتریکی و ضخامت زیرلایه می‌توان به بهینه‌ترین فیلتر دست یافت. از خصوصیات مثبت فیلتر طراحی شده، نازکی و سبکی آن می‌باشد. با توجه به سادگی شکل‌های پیچ فلزی، پیچیدگی ساخت آن نیز کم است و می‌توان با کمترین هزینه آن را ساخت. با مقایسه فیلتر پیشنهادی با فیلترهای دیگر تحقیقات، برتری پارامترهای خروجی فیلتر پیشنهادی، واضح است. با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده شد که با تغییر ضریب گذردهی زیرلایه، فرکانس مرکزی جابه‌جا می‌شود؛ بنابراین با استفاده از ساختارهای ماتریال و به کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک می‌توان فیلترهای ماتریال با فرکانس مرکزی دلخواه، طراحی کرد. همچنین با کاربرد مواد مغناطیس فعال یعنی

موادی که با بایاس یک میدان الکتریکی یا مغناطیسی ساکن می‌توانند دارای ضرایب گذردهی متفاوتی باشند، می‌توان فیلترهای متامتریال فعال که قابلیت تنظیم فرکانس مرکزی را دارند، طراحی کرد. این نوع تجهیزات در ادوات فعال مایکروویو پرکاربرد می‌باشند.

References

- [1] Pendry, J. B., Holden, A. J., Robbins, D. J., & Stewart, W. J. (1999). Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 47(11), 2075-2084. <https://doi.org/10.1109/22.798002>
- [2] Smith, D. R., Padilla, W., Vier, D. C., Nemat-Nasser, S., & Schultz, S. (2000). Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity. *Physical Review Letters*, 84(18), 4184-4187. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.4184>
- [3] Berka, M., Hebali, M., Baghdad Bey, A., Bennaoum, M., & Mahdjoub, Z. (2019). Miniaturization of the Bandpass Microwave Filter Based on Spiral Metamaterial Resonator. *ICTACT Journal on Microelectronics*, 4(4), 693-696. <https://doi.org/10.21917/ijme.2019.01120>
- [4] Statsenko, L. G., Pugovkina, O. A., Galay, A. R., & Kuzin, D. A. (2019). Designing Microwave Filters Using Metamaterials. *Key Engineering Materials*, 806, 167-172. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.806.167>
- [5] Hong, J. S. G., & Lancaster, M. J. (2004). *Microstrip Filters for RF / Microwave Applications*. Wiley. <https://books.google.com/books?id=vj0hz1KUAXoC>
- [6] Kildishev, A., Prokopenva, L., & Narimanov, E. (2010). Cylinder light concentrator and absorber: Theoretical description. *Optics express*, 18(16), 16646-16662. <https://doi.org/10.1364/OE.18.016646>
- [7] Narimanov, E. E., & Kildishev, A. V. (2009). Optical black hole: Broadband omnidirectional light absorber. *Applied Physics Letters*, 95(4), 041106. <https://doi.org/10.1063/1.3184594>
- [8] Wen, D.-e., Helin, Y., Ye, Q., Li, M., Guo, L., & Zhang, J. (2013). Broadband metamaterial absorber based on a multi-layer structure. *Physica Scripta*, 88(1), 015402-015408. <https://doi.org/10.1088/0031-8949/88/01/015402>
- [9] Yu, Z., Liu, S., Fang, C., Huang, X., & Helin, Y. (2015). Design, simulation, and fabrication of single-/dual-/triple band metamaterial absorber Design, simulation, and fabrication of single-/dual-/triple band metamaterial absorber. *Physica Scripta*, 90(6), 065501-065506. <https://doi.org/10.1088/0031-8949/90/6/065501>
- [10] Basafa, A. (207). *Design and Feasibility of Fabrication of Metamaterial Filter in C-Band with a Central Frequency of 5 GHz*. [MSc. Thesis, Islamic Azad University University, Majlesi Branch]. Tehran, Iran.
- [11] BalaSenthilMurugan, L., Raja, S. A. A., Chakravarthy, S. D., & Kanniyappan, N. (2012). Design and Implementation of a Microstrip Band-Stop Filter for Microwave Applications. *International Conference on Modelling Optimization and Computing, Procedia Engineering*, 38(Special Issue), 1346-1351. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.06.166>
- [12] Cheng, Y. H., Peng, H. S., & Chiang, Y. C. (2015, September 7-10). *Design of tunable dual-band filter with multiple types of resonators* 2015 European Microwave Conference (EuMC), Paris, France. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7345788>

- [13] Ishizaki, T., Tamura, M., Allen, C. A., & Itoh, T. (2008, June 15-20). *Left-handed band pass filter realized by coupled negative order resonators* 2008 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Atlanta, GA, USA. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4633250>
- [14] Liu, Y., Tang, X., Zhang, Z., & Huang, X. (2013). Novel nested split-ring-resonator (SRR) for compact filter application. *Progress In Electromagnetics Research*, 136, 765-773. <https://doi.org/10.2528/PIER12121306>
- [15] Martel, J., Bonache, J., Marques, R., Martin, F., & Medina, F. (2007). Design of Wide-Band Semi-Lumped Bandpass Filters Using Open Split Ring Resonators. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 17(1), 28-30. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2006.887246>