

طراحی و ساخت فیلتر میان‌گذر مایکرواستریپ دو باند با استفاده از رزوناتور پچ مربعی دو مدی و شکاف‌های دایروی شکل

غلامحسین مولودیان^۱، دانش‌آموخته دکتری؛ سیروس بهرامی^۲، استادیار؛ حمیدرضا قوهستانی^۳، مربی

۱- گروه مهندسی برق- واحد اراک - دانشگاه آزاد اسلامی - اراک - ایران - gh-moloudian92@iau-arak.ac.ir

۲- گروه مهندسی برق- دانشگاه سلمان فارسی کازرون- فارس - ایران - bahramis@iust.ac.ir

۳- گروه مهندسی برق- دانشگاه سلمان فارسی کازرون- فارس - ایران - ghouhestani@kazerunsfu.ac.ir

چکیده: در این مقاله، به طراحی و ساخت یک فیلتر میان‌گذر با عملکرد مناسب برای استفاده در کاربردهای مخابرات بی‌سیم پرداخته شده است. برای طراحی فیلتر پیشنهادی، ابعاد رزوناتور پچ مربعی دو مدی به‌اندازه ربع طول موج در نظر گرفته شده است. برای عملکرد بهتر فیلتر پیشنهادی از اختلالات دایروی (شکاف‌های دایروی) شکل استفاده شده است. فیلتر دو کاناله پیشنهادی بر روی زیرلایه FR4 طراحی و ساخته شده است. فرکانس مرکزی فیلتر پیشنهادی برای کانال اول برابر ۲/۳۵ گیگاهرتز و برای کانال دوم ۳/۳۷۵ گیگاهرتز با پهنای باند نسبی ۱۲/۷۵ و ۱۰/۳ درصد است. میزان تلفات عبوری برای باند عبور اول برابر ۰/۸ دسی‌بل و برای باند عبور دوم ۱/۴۵ دسی‌بل است. اندازه فیلتر پیشنهادی کوچک و برابر با ۲۰ × ۲۰ میلی‌متر مربع می‌باشد. تأخیر گروه فیلتر پیشنهادی برای باندهای عبور اول و دوم تقریباً ثابت است که این امر نشان دهنده این است که فاز تلفات عبوری در باند عبور خطی است. فیلتر پیشنهادی، پس از طراحی و شبیه‌سازی، بر روی زیرلایه مورد نظر ساخته شده و در نهایت مورد تست و اندازه‌گیری قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی با نتایج اندازه‌گیری شده دارای تطابق بسیار خوبی می‌باشد. از فیلتر پیشنهادی می‌توان در ارتباطات بی‌سیم و مخابرات مایکروویو مدرن استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: فیلتر میان‌گذر، مایکرواستریپ، پچ مربعی دو مدی، شکاف دایروی شکل

Design and fabrication of a dual-band band-pass filter using dual-mode square patch resonator and ring-shaped slot

G. Moloudian¹, Ph.D; S. Bahrami², Assistant professor; H. Ghouhestani³, MSc

1- Department of Electrical Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran, Email: gh-moloudian92@iau-arak.ac.ir

2- Department of Electrical Engineering, Salman Farsi University of Kazerun, Kazerun, Iran, Email: bahramis@iust.ac.ir

3- Department of Electrical Engineering, Salman Farsi University of Kazerun, Kazerun, Iran, Email: ghouhestani@kazerunsfu.ac.ir

Abstract: In this paper, a band-pass filter with suitable performance for wireless telecommunication applications is designed and fabricated. For designing the proposed filter, the dimensions of dual-mode square patch resonator are chosen to be within a quarter of the wavelength. Circular perturbations (circular slots) are used for better performance of the proposed filter. A dual channel filter is designed and fabricated on an FR4 substrate. The center frequency of the proposed filter for the first channel is equal to 2.35 GHz and for the second channel is equal to 3.375 GHz; the 3-dB fractional bandwidths (FBWs) of 12.75 and 10.3 %, respectively. The measured insertion losses are 0.8 and 1.45 dB, respectively. The proposed filter has a small size of 20 mm × 20mm. The group delay of the proposed filter for the first and second pass bands is almost constant, which indicates phase of the insertion loss in the pass bands is linear. The proposed filter is fabricated and tested. The results of simulation are fairly consistent with that of the measurement. The proposed filter can be used in wireless communications and modern microwave telecommunication.

Keywords: Band-pass filter, microstrip, dual-mode patch square, circular slot.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۳۰

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۱۲/۲۶ و ۱۳۹۷/۰۱/۱۴ و ۱۳۹۷/۰۵/۰۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۱۷

نام نویسنده مسئول: سیروس بهرامی

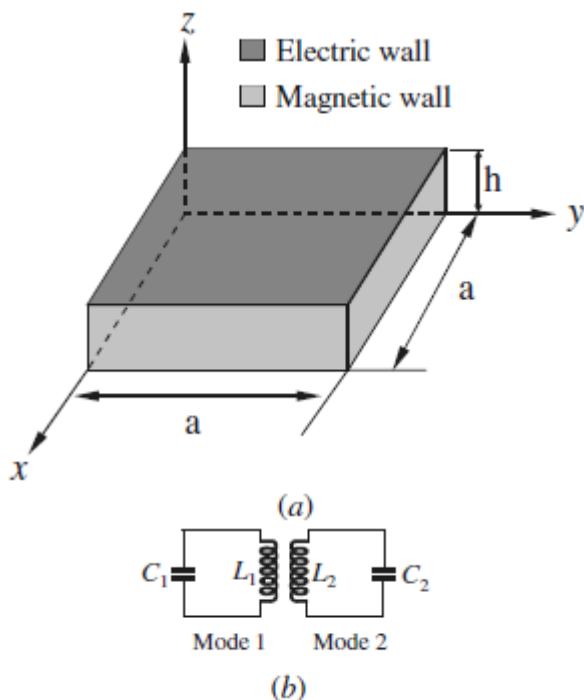
نشانی نویسنده مسئول: ایران - استان فارس - شهرستان کازرون - خیابان طالقانی - دانشگاه سلمان فارسی - دانشکده فنی و مهندسی - گروه مهندسی برق

۱- مقدمه

پایه‌سازی می‌شود و با دستگاه نتورک آنالایزر مورد تست و اندازه‌گیری قرار می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی و نتایج نمونه ساخت که مورد تست و اندازه‌گیری قرار گرفته است، باهم تطابق خوبی دارند. ساختار مقاله به صورت زیر طبقه بندی شده است. پس از ارائه مقدمه و مرور بر کارهای گذشته، در قسمت دوم به تئوری و نحوه عملکرد رزوناتورهای دو مدی خواهیم پرداخت. در قسمت سوم، به طراحی و شبیه‌سازی فیلتر میان‌گذر پیشنهادی می‌پردازیم. در قسمت چهارم، به بحث در مورد نتایج به دست آمده و نهایتاً در قسمت پنجم، به نتیجه‌گیری مقاله خواهیم پرداخت.

۲- رزوناتورهای دو مدی

برای بیان تئوری رزوناتورهای دو مدی، ما می‌توانیم رزوناتور پیچ مربعی دو مدی را با استفاده از مدل کاواک ویلر^۷ بررسی کنیم [۲۱]. مدل ویلر و مدار معادل رزوناتور پیچ میکرواستریپ دو مدی در شکل ۱ آورده شده است [۲۱].



شکل ۱: الف. مدل ویلر برای رزوناتور دو مدی ب. مدار معادل رزوناتور پیچ دو مدی

در این مدل، سطوح بالا و پایین کاواک، دیواره الکتریکی کامل و دیواره‌های کناری کاواک، دیواره مغناطیسی است. میدان‌های الکترومغناطیسی^۸ داخل کاواک از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۱].

$$E_z = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} A_{mn} \cos\left(\frac{m\pi}{a}y\right) \cos\left(\frac{n\pi}{a}y\right) \quad (1)$$

امروزه با پیشرفت در ارتباطات بی‌سیم و مخابرات میکروویو نیاز به فیلترهای میان‌گذر با عملکرد مناسب افزایش پیدا کرده است. در اکثر سیستم‌های مخابراتی از فیلتر میان‌گذر برای عبور سیگنال‌های مطلوب استفاده می‌شود. برای طراحی فیلتر میان‌گذر می‌توان از رزوناتورهای پیچ دو مدی به دلیل اندازه کوچک، تلفات کم، طرح ساده و البته طراحی برای فرکانس‌های کاربردی استفاده نمود [۱-۵]. در [۱]، یک فیلتر میان‌گذر دو مدی تک کاناله با فرکانس مرکزی ۱/۶۵ گیگاهرتز با استفاده از رزوناتور صلیب هندسی با شکل یونانی ارائه شده است. در [۲]، یک فیلتر میان‌گذر تک کاناله با استفاده از رزوناتور پیچ مثلثی شکل ارائه شده است. به طور کلی، عملکرد یک رزوناتور دو مدی به این صورت است که دارای دو مد الکتریکی و مغناطیسی می‌باشد که توسط برخی عناصر تحریک کننده مانند خطوط تغذیه نامتقارن^۱ اختلال‌گرا^۲، اضافه کردن یک قسمت میکرواستریپ به طرح و خطوط شکاف‌دار^۳ [۳-۵] ایجاد می‌شوند. اخیراً برای طراحی فیلتر میان‌گذر از قوانین و خطوط انتقال دست راستی و دست چپی^۴ (ماتریال) استفاده می‌کنند [۶-۸]. برای طراحی فیلتر میان‌گذر، می‌توان از رزوناتورهای با اشکال مختلف مانند رزوناتور مثلثی^۵ [۹ و ۲] و رزوناتور با حلقه‌های پرپیچ و خم^۶ [۱۰-۱۲] استفاده نمود. یکی از ویژگی‌های مهم یک فیلتر میان‌گذر، باند توقف عریض می‌باشد که نمونه‌ای از طراحی این نوع فیلترها در [۱۳-۱۶] آورده شده است. امروزه با پیشرفت در ارتباطات میکروویو مدرن، نیاز به فیلترهایی با چند باند عبور یا به اصطلاح چندکاناله افزایش پیدا کرده است. می‌توان فیلتر میان‌گذر را به گونه‌ای طراحی نمود که دارای دو باند عبور باشد که نمونه‌ای از این طراحی‌ها در [۱۰-۱۲] و [۱۵-۲۰] آورده شده است. در [۱۵] یک فیلتر میان‌گذر با باند توقف عریض و دو باند عبور با استفاده از زیرلایه پلیمر کریستال مایع به صورت چندلایه ارائه شده است. در [۱۶] یک فیلتر میان‌گذر دوکاناله با استفاده از ابررسانا با درجه حرارت بالا ارائه شده است. یک فیلتر میان‌گذر دوکاناله با استفاده از خطوط تزویج شده موازی با عملکرد مناسب در [۱۸] ارائه شده است. در [۱۹] یک فیلتر میان‌گذر دوکاناله با استفاده از رزوناتورهای دو مدی با چند صفر انتقال و در [۲۰] یک فیلتر میان‌گذر دوکاناله با استفاده از رزوناتورهای دو مدی با شکل صلیب ارائه شده است. از خطوط میکرواستریپ می‌توان در طراحی قطعات الکترونیک فرکانس بالا مانند فیلترها [۱-۲۰]، دی‌مالتی‌پلکسرها [۲۲] و آنتن‌ها [۲۳-۲۴] برای کاربرد در سیستم‌های مخابراتی استفاده نمود. در [۱۰] و [۲۵] روش‌هایی برای دستیابی به مدار معادل خطوط میکرواستریپ بیان شده است.

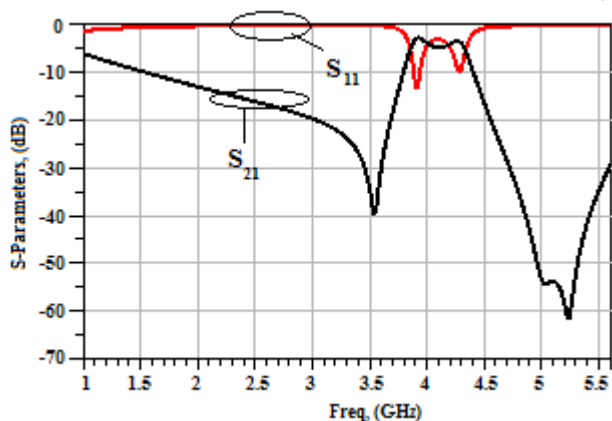
در این مقاله، به طراحی یک فیلتر میان‌گذر دوکاناله با استفاده از رزوناتور پیچ مربعی دو مدی پرداخته می‌شود. برای عملکرد بهتر فیلتر میان‌گذر پیشنهادی، از شکاف‌های دایروی شکل استفاده می‌کنیم. فیلتر پیشنهادی پس از طراحی و شبیه‌سازی، بر روی زیرلایه مورد نظر

شکل ۲: طرح جانمایی رزوناتور پیچ مربعی دو مدی

ابعاد رزوناتور مربعی پیشنهادی را به اندازه ربع طول موج در نظر گرفته‌ایم. طول موج هدایت شده را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود [۲۱].

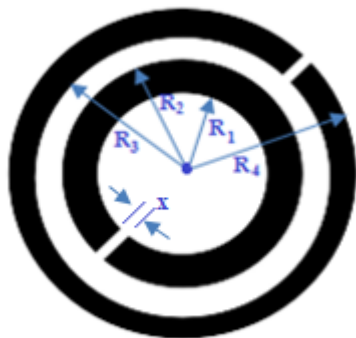
$$\lambda_g = \frac{c}{f(\text{GHz}) \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (mm), \quad c = 300 \quad (7)$$

برای شبیه‌سازی طرح رزوناتور پیشنهادی از نرم‌افزار ADS استفاده می‌کنیم. پارامترهای پراکندگی برای رزوناتور پیشنهادی به صورت زیر می‌باشد.



شکل ۳: پارامترهای پراکندگی برای رزوناتور پیشنهادی

با توجه به نتایج به دست آمده برای رزوناتور پیشنهادی می‌توان گفت تلفات عبوری S_{21} برای باند عبور حدود ۴ dB- قرار دارد و میزان تلفات بازگشتی S_{11} در این باند مناسب نیست. باند عبور برای این حالت در محدوده ۳/۸ تا ۴/۴ گیگاهرتز قرار دارد. برای بهتر کردن پاسخ فرکانسی رزوناتور پیشنهادی، از شکاف‌هایی دایروی شکل مانند شکل ۴ استفاده می‌کنیم.



شکل ۴: شماتیک شکاف‌های دایروی شکل

شعاع دایره‌های فوق را به گونه‌ای انتخاب و تنظیم می‌کنیم که پاسخ فرکانسی مربوط به طرح جانمایی رزوناتور مربعی را بهبود بخشیده و هم‌چنین یک باند عبور دیگر در فرکانس ۴/۲ گیگاهرتز برای ما ایجاد

$$H_x = \left(\frac{j\omega \epsilon_{eff}}{K_c^2} \right) \left(\frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$$H_y = - \left(\frac{j\omega \epsilon_{eff}}{K_c^2} \right) \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \quad (3)$$

$$K_c^2 = \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{a} \right)^2 \quad (4)$$

در روابط فوق، دامنه مود رزوناتورهای m, n ام در کاواک، فرکانس زاویه‌ای، E_z مؤلفه میدان الکتریکی در جهت z ، K_c عدد موج، a عرض مؤثر، ϵ_{eff} ثابت دی‌الکتریک مؤثر (مربوط به زیرلایه) و m, n اعداد صحیحی هستند که مدهای رزونانس را مشخص می‌کنند. فرکانس رزونانس کاواک را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود [۲۱].

$$f_{mn} = \frac{1}{2\pi \sqrt{\mu \epsilon_{eff}}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{a} \right)^2} \quad (5)$$

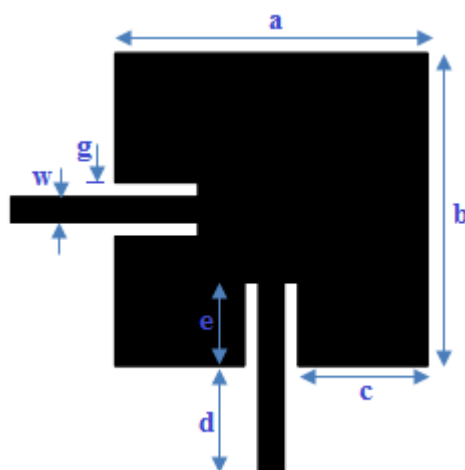
که در رابطه فوق، ϵ_{eff} ثابت دی‌الکتریک مؤثر، مربوط به زیرلایه است و می‌توان آن را از رابطه زیر محاسبه نمود [۲۱].

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{-1 + \epsilon_r}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{10h}{a}}} \right) \quad (6)$$

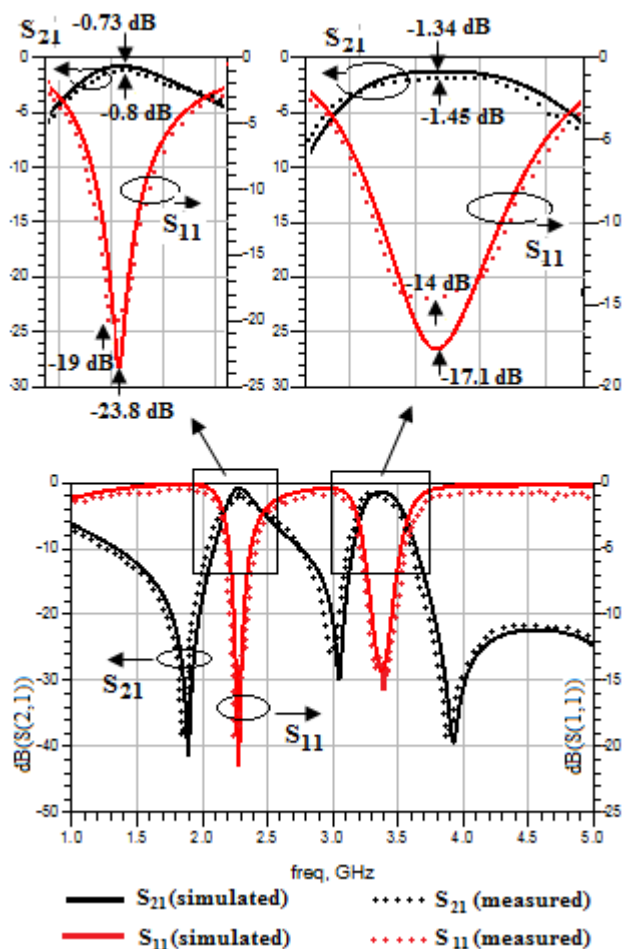
در رابطه فوق، ϵ_r ثابت دی‌الکتریک مربوط به زیرلایه و h ضخامت زیرلایه است. تعداد نامحدودی فرکانس رزونانس با مدهای مختلف وجود دارد که به مدهایی که دارای فرکانس رزونانس یکسان هستند، مدهای دیژنه^۹ گفته می‌شود.

۳- طراحی فیلتر میان‌گذر پیشنهادی

در این‌جا برای طراحی فیلتر میان‌گذر پیشنهادی، از رزوناتور پیچ مربعی دو مدی استفاده می‌کنیم. شکل ۲ طرح جانمایی^{۱۰} رزوناتور پیشنهادی را نشان می‌دهد.



حالت‌های شبیه‌سازی با نتایج تست و اندازه‌گیری نمونه ساخته شده باهم تطابق بسیار خوبی دارند. نتایج به‌دست‌آمده برای فیلتر میان‌گذر پیشنهادی در شکل ۶ نشان داده شده است.



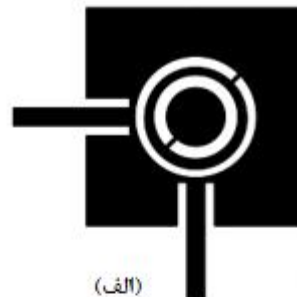
شکل ۶: پاسخ فرکانسی فیلتر میان‌گذر پیشنهادی

جدول ۱: ابعاد فیلتر میان‌گذر پیشنهادی (کلیه مقادیر داخل جدول برحسب میلی‌متر می‌باشد)

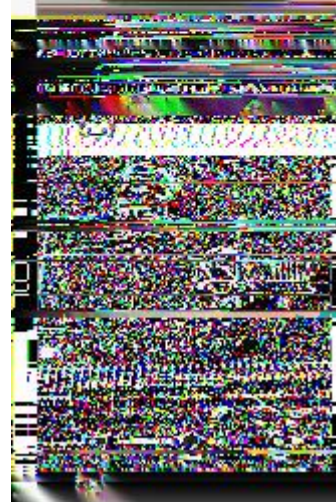
پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
a	15	b	15	c	6.2
d	5.1	e	3	g	0.7
w	1.2	R1	2	R2	3
R3	3.5	R4	4.3	x	0.1

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده برای فیلتر میان‌گذر پیشنهادی می‌توان گفت که این فیلتر دارای دو باند عبور می‌باشد. برای مشاهده بهتر مشخصات فیلتر، هر باند عبور را جداگانه رسم شده است. مشاهده می‌شود که نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده (مربوط به نمونه ساخت) باهم رفتار نسبتاً یکسانی دارند. در قسمت بعد، به بحث در مورد نتایج به‌دست‌آمده برای فیلتر میان‌گذر پیشنهادی می‌پردازیم.

شکل فیلتر میان‌گذر دوکاناله پیشنهادی با استفاده از رزوناتور پیج مربعی و شکاف‌های دایروی شکل، در شکل ۵ نشان داده شده است.



(الف)



شکل ۵: فیلتر میان‌گذر پیشنهادی الف. طرح جانمایی، ب. نمونه ساخته شده (روی طرح)، ج. نمونه ساخته شده (زیر طرح)

برای طراحی و شبیه‌سازی فیلتر میان‌گذر پیشنهادی از نرم‌افزار ADS و برای طرح سه‌بعدی و تهیه نسخه مناسب برای تولید فیلم لازم برای ساخت از نرم‌افزار Altium Designer استفاده می‌کنیم. ابعاد فیلتر پیشنهادی در جدول ۱ آورده شده است.

این طرح، بر روی زیرلایه FR4 با ثابت دی‌الکتریک ۴/۴ و ضخامت ۰/۸ میلی‌متر پیاده‌سازی شده است. برای پورت‌های فیلتر از کانکتور SMA استفاده شده است. از ماده مس با ضخامت ۱۷/۵ میکرون و رسانایی $5.8 \times 10^7 \left(\frac{s}{m}\right)$ به‌عنوان هادی یا نوار مایکرواستریپ استفاده شده است. این فیلتر پس از طراحی و ساخت با دستگاه نت‌ورک آنالایزر مورد تست و اندازه‌گیری قرار گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده در

۴- بحث در نتایج

۱/۴۵ dB می‌باشد که در مقایسه با کارهای دیگر محققین مقدار نسبتاً مناسبی می‌باشد. میزان تلفات بازگشتی برای باند عبور اول ۱۹ dB و برای باند عبور دوم ۱۴ dB به‌دست آمده است. یکی دیگر از پارامترهای مهم یک فیلتر میان‌گذر، میزان ولتاژ نسبت موج ایستا^{۱۳} (VSWR) می‌باشد که رابطه مستقیمی با تلفات بازگشتی دارد. این پارامتر در بهترین حالت دارای مقدار یک و در بدترین حالت دارای مقدار بی‌نهایت است. برای باند عبور اول، میزان این پارامتر برابر با ۱/۲۹ و برای باند عبور دوم برابر با ۱/۵ می‌باشد که در مقایسه با نتایج محققین دیگر، دارای مقدار مناسبی است.

جدول ۳: پارامترهای پراکندگی و برخی از نتایج دیگر مربوط به فیلتر پیشنهادی و مقایسه با کارهای محققین دیگر

Schedule	[۱۵]	[۱۶]	[۱۷]	[۱۹]	فیلتر پیشنهادی
First band					
Insertion loss1 (dB)	۶/۷	۰/۲۵	۰/۴۳	۱/۲۲	۰/۸
Return loss1 (dB)	۱۱	۱۳/۵	۱۳/۴	۲۰	۱۹
FBW ₁ (%)	۲۰	۲	---	۶/۷۲	۱۲/۷۵
VSWR ₁	۱/۷۸	۱/۵۴	۱/۵۵	۱/۲۲	۱/۲۹
Second band					
Insertion loss2 (dB)	۶/۵	۰/۰۸	۰/۶۵	۲/۱۳	۱/۴۵
Return loss2 (dB)	۱۲	۱۲/۵	۱۵/۵	۲۰	۱۴
FBW ₂ (%)	۱۸	۲	---	۵/۴۵	۱۰/۳
VSWR ₂	۱/۶۷	۱/۶۲	۱/۴	۱/۲۲	۱/۵

علاوه بر پارامترهای فوق، پارامتر مهم دیگری تحت عنوان تأخیر گروه^{۱۴} برای یک فیلتر مشخص تعریف می‌شود که می‌توان آن را از رابطه ۸ محاسبه نمود.

$$Group\ delay = -\frac{1}{360} \left(\frac{\partial(Phase(S_{21}))}{\partial f} \right) \quad (۸)$$

با توجه به رابطه بالا، تأخیر گروه همان مشتق فاز تابع تبدیل نسبت به فرکانس است. بهترین حالت زمانی است که فاز تابع تبدیل یا فاز تلفات عبوری به‌صورت خطی باشد. در این حالت تأخیر گروه دارای مقدار ثابتی خواهد شد. شکل زیر فاز تابع تلفات عبوری و تأخیر گروه فیلتر میان‌گذر پیشنهادی را در باندهای عبور نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۷، می‌توان گفت که فاز تلفات عبوری برای باند عبور اول و باند عبور دوم نسبتاً خطی است. میزان تأخیر گروه برای باند عبور اول در محدوده ۰/۶ تا ۱/۴۵ نانوثانیه و برای باند عبور دوم در

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان گفت که فیلتر پیشنهادی دارای دو باند عبور می‌باشد. باند عبور برای کانال اول در محدوده ۲/۲ تا ۲/۵ گیگاهرتز با پهنای باند ۰/۳ گیگاهرتز و پهنای باند نسبی ۱۲/۷۵٪ می‌باشد. باند عبور برای کانال دوم در محدوده ۳/۲ تا ۳/۵۵ گیگاهرتز با پهنای باند ۰/۳۵ گیگاهرتز و پهنای باند نسبی ۱۰/۳٪ می‌باشد. فرکانس مرکزی برای کانال اول برابر با ۲/۳۵ گیگاهرتز و برای کانال دوم ۳/۳۷۵ گیگاهرتز است. مقایسه بین نتایج به‌دست‌آمده برای فیلتر پیشنهادی با نتایج مقالات دیگر در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: مقایسه بین نتایج فیلتر پیشنهادی با مقالات محققین دیگر

مراجع	فرکانس مرکزی (گیگاهرتز)	پهنای باند (گیگاهرتز)	پهنای باند نسبی %	اندازه (میلی‌متر مربع)
[۱]	۱/۶۵	۰/۰۸۴	۵/۱	۲۰×۲۰
[۴]	۳/۶۴	۰/۲۷	۷/۸	---
[۶]	۲/۰۶	۰/۴۹	۲۴	۵/۸×۴/۸
[۱۴]	۲/۴۱	۰/۱	۴/۳۵	۲۲/۵×۱۴/۴
[۱۰]	۱/۸ ۲/۴	۰/۰۲۶ ۰/۰۳۷	۱/۴۴ ۳/۰۶	۱۸×۱۸
[۱۲]	۱/۸ ۲/۴	۰/۰۲۹ ۰/۰۸۵	۱/۶۶ ۳/۵۴	۲۰×۲۰
[۱۵]	۱/۷ ۴	۰/۳۴ ۰/۷۲	۲۰ ۱۸	۹/۸×۷/۰
[۱۶]	۰/۸ ۲	۰/۰۱۶ ۰/۰۴	۲ ۲	۳۰×۲۸/۲
[۱۹]	۲/۵۵ ۳/۶۵	۰/۱۷ ۰/۱۹۸	۶/۷۲ ۵/۴۵	۱۸/۴×۲۶/۱
فیلتر پیشنهادی	۲/۳۵ ۳/۳۷۵	۰/۳ ۰/۳۵	۱۲/۷۵ ۱۰/۳	۲۰×۲۰

با توجه به جدول ۲، می‌توان گفت که فیلتر میان‌گذر پیشنهادی دارای دو باند عبور کاربردی (برای ارتباطات بی‌سیم) با فرکانس‌های مرکزی ۲/۲۳۵ و ۳/۳۷۵ گیگاهرتز می‌باشد. پهنای باند (BW) و پهنای باند کسری (% FBW) در مقایسه با کارهای دیگر، نسبتاً بزرگ و مناسب می‌باشد. اندازه فیلتر پیشنهادی نیز کوچک و بسیار مناسب است. به‌طور کلی با توجه به مقایسه نتایج می‌توان به این نکته پی برد که عملکرد فیلتر مناسب است.

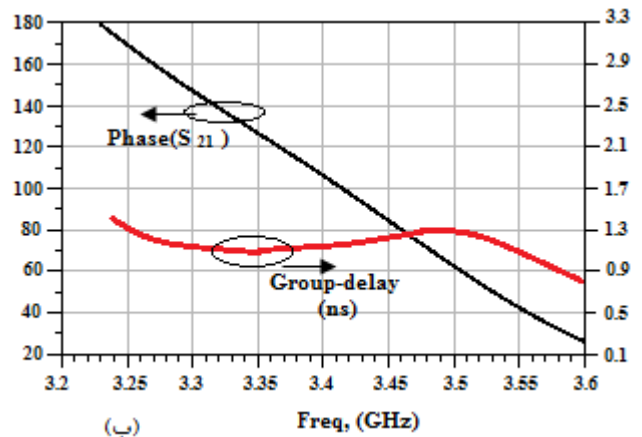
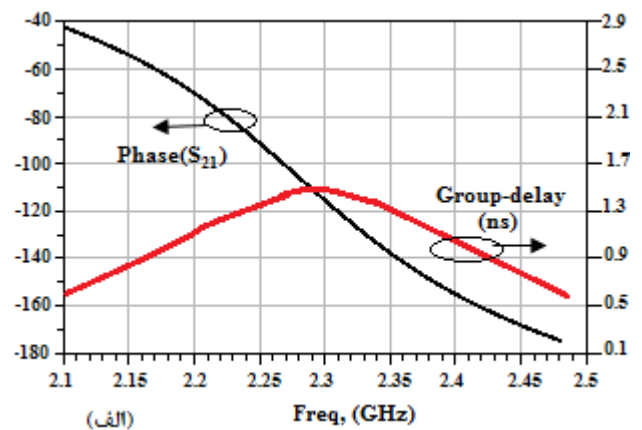
از پارامترهای مهم یک فیلتر میان‌گذر می‌توان به تلفات بازگشتی و تلفات جایگزینی اشاره نمود. مقایسه بین پارامترهای تلفات جایگزینی و بازگشتی برای فیلتر میان‌گذر پیشنهادی با مقالات دیگر در جدول ۳ آورده شده است. با توجه جدول ۳، می‌توان گفت که فیلتر پیشنهادی دارای عملکرد مناسب از نظر مقدار تلفات عبوری و بازگشتی می‌باشد. مقدار تلفات عبوری برای باند عبور اول ۰/۸ dB و برای باند عبور دوم

گروه نسبتاً ثابت اشاره نمود. نتایج شبیه‌سازی با نتایج تست و اندازه‌گیری شده (مربوط به نمونه ساخته شده) باهم تطابق دارند. از فیلتر میان‌گذر پیشنهادی می‌توان در ارتباطات بی‌سیم و مخابرات مایکروویو مدرن استفاده نمود.

مراجع

- [1] H. LU, W. WU, J. HUANG, X. ZHANG, N. YUAN, "Compact Dual-mode Microstrip Bandpass Filter Based on Greek-cross Fractal Resonator", *Radioengineering*, vol. 26, no. 1, pp. 275-284, 2017.
- [2] M. Zhou, C-m. Tong, S-h. Fu, Li-n. Wu, "Design of dual-mode bandpass filter using SRR structure", *Microwave Opt Technol Lett*, Vol. 52, No. 10, pp. 2372-2375, 2010.
- [3] S-H. Fu, C-M. Tong, X-M. Li, M. Zhou, "A novel CSRR-based defected ground structure with dual-bandgap characteristics", *Microwave Opt Technol Lett*, Vol. 53, No. 8, pp. 1703-1706, 2011.
- [4] X. Shi, Y. Liu, Q. He, L. Gu, H. Z. F. Liu, K. Liu, "Novel dual-mode circular patch bandpass filter using CSRR slot-type perturbation", *Microwave Opt Technol Lett*, Vol. 55, No. 3, pp. 666-670, 2013.
- [5] S. Sun, W. Menzel, "Novel Dual-Mode Balun Bandpass Filters Using Single Cross-Slotted Patch Resonator", *IEEE Microwave and Wireless Component Letters*, VOL. 21, NO. 8, pp. 415-417, 2011.
- [6] J. Ni, I. Vendik, D. Kholodnyak, J. Hong, A Compact Bandpass Filter Based on Right- and Left-Handed Transmission Line Sections", *IEEE Microwave and Wireless Component Letters*, VOL. 23, NO. 6, pp. 279-281, 2013.
- [7] X. Cao, Z. Tang, F. Wang, Y. Wu, W. Yao, B. Zhang, Y. Wang, "A novel tri-band band-pass filter using combined simplified CRLH and right-handed SIRs", *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Vol. 27, No. 8, pp. 999-1007, 2013.
- [8] C. Li, C. Tong, L. Qi, X. Zou, M. Ji, "Multimode Resonator Based on Composite Right-/Left-Handed Transmission Line for UWB Bandpass Filter Application", *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, Vol. 25, No. 9, pp. 815-824, 2015.
- [9] L.-P. Zhao, C.-H. Liang, G. Li, X.-W. Dai, "Novel Design of Dual-Mode Bandpass Filter with Triangular Structure", *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Vol. 22, 923-932, 2008.
- [10] M. Babajanzadeh, and M. Dousti, "Design of a Compact Dual-Mode Dual-Band Bandpass Filter Using Stacked-Loop Resonators Structure", *Journal of Circuits, Systems, and Computers*, Vol. 26, No. 10, pp. 1750163 (1-10), 2017.
- [11] X.-W. Dai, C.-H. Liang, G. Li, Z.-X. Chen, "Novel Dual-Mode Dual-Band Bandpass Filter Using Microstrip Meander-Loop Resonators", *J. of Electromagn. Waves and Appl.*, Vol. 22, 573-580, 2008.
- [12] S. Jahani Maleki, M. Dousti, "A compact dual-band bandpass filter using microstrip meander loop and square loop resonators", *IEICE Electronics Express*, Vol. 9, No. 16, pp. 1342-1348, 2012.
- [13] J. Mo, X. Liu, H. Yang, S. Liu, "High-selectivity microstrip bandpass filters using stub-loaded resonators" *Optik*, vol. 126, no. 21, pp. 2844-2847, 2015.

محدوده ۰/۸ تا ۱/۳ نانوثانیه قرار دارد. میزان تغییرات تأخیر گروه بسیار ناچیز است و می‌توان گفت تقریباً ثابت است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده برای فیلتر میان‌گذر پیشنهادی، می‌توان گفت که فیلتر دارای دو باند عبور کاربردی (برای ارتباطات بی‌سیم) و عملکرد بسیار مناسب می‌باشد.



شکل ۷: نمودار فاز تلفات عبوری و تأخیر گروه، الف. برای باند عبور اول، ب. برای باند عبور دوم

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به طراحی و ساخت یک فیلتر میان‌گذر دوکاناله با استفاده از رزوناتور پیچ مربعی دو مدی پرداخته شده و برای بهبود عملکرد فیلتر از خطوط شکافدار دایروی شکل استفاده شده است. فیلتر پیشنهادی پس از طراحی و شبیه‌سازی، بر روی زیرلایه FR4 ساخته شده و مورد تست و اندازه‌گیری قرار گرفته است. فیلتر میان‌گذر پیشنهادی دارای دو باند عبور با فرکانس‌های مرکزی ۲/۳۵ و ۳/۳۷۵ گیگاهرتز می‌باشد. پهنای باند کسری برای باند عبور اول ۱۲/۷۵٪ و برای باند عبور دوم ۱۰/۳٪ می‌باشد که در مقایسه با نتایج مقالات دیگر بزرگ بوده و برای ارتباطات مخابراتی مناسب می‌باشد. اندازه فیلتر، کوچک و برابر با ۲۰×۲۰ میلی‌متر مربع می‌باشد. میزان تلفات عبوری برای باند عبور اول ۰/۸ dB و برای باند عبور دوم ۰/۴۵ dB می‌باشد. از ویژگی‌های دیگر این فیلتر می‌توان به مقدار مناسب پارامتر VSWR یا همان تلفات بازگشتی مناسب، فاز خطی و تأخیر

- Microw. Theory and Tech.*, vol. 65, no. 4, pp. 1226 – 1234, 2017.
- [21] Jia-Sheng Hong, M. J. Lancaster, *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*. John Wiley & Sons, 2001.
- [22] G. Moloudian, M. Dousti, A. Ebrahimi, "Design and fabrication of a tunable microstrip lowpass-bandpass diplexer for telecommunication applications," *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 60, no. 3, pp. 754-759, 2018.
- [23] ایمان مجیدی، حسین همتی و سیدحسن صدیق، «طراحی آنتن چهارتابی شکافی فشرده با قطبش دایروی برای به کارگیری در گیرنده GPS»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۶، شماره ۴، صفحه ۲۹۹-۳۰۶، ۱۳۹۵.
- [24] داود بصائری، سیدمحمدجواد رضوی و سیدحسین محسنی ارمکی «تحلیل اثرات صفحه زمین دایروی محدود در آنتن‌های تک قطبی سیمی»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۷، شماره ۱، صفحه ۲۱-۲۸، ۱۳۹۶.
- [25] G. Moloudian, M. Dousti, A. Ebrahimi, "Design and Fabrication of a Compact Microstrip Low-Pass Filter with Ultra-Wide Stopband and Sharp Roll-off-Rate," *J. Electromagn. Waves Appl.*, vol. 32, no. 6, pp. 713-725, 2018.
- [14] G. Karimia, F. K. Hamedani, "Coupled-lines narrow-band band pass filter with ultra wide upper stopband", *Optik*, vol. 127, pp. 3795-3797, 2016.
- [15] H. H. Ta, A-V. Pham, "Dual Band Band-Pass Filter with Wide Stopband on Multilayer Organic Substrate", *IEEE Microwave and Wireless Component Letters*, VOL. 23, NO. 4, pp. 193-195, 2013.
- [16] N. Sekiya, "Design of compact HTS dual-band bandpass filters using dual-function feeding structure with wide stop-band response", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 27, no. 1, pp. 1-5, 2017.
- [17] S. Yang, L. Lin, J. Chen, K. Deng, C-H. Liang, "Design of compact dual-band bandpass filter using dual-mode stepped-impedance stub resonators", *IET Electronics Letters*, Vol. 50, No. 8 pp. 611-613, 2014.
- [18] Chih-Jung Chen, "Design of Parallel-Coupled Dual-Mode Resonator Bandpass Filters", *IEEE Trans. on Compon. Pack. and Manufact. Tech.*, vol. 10, no. 6, pp. 1542-1548, 2016.
- [19] W. Ieu, D. Zhang, D. Zhou, "High-selectivity dual-mode dual-band microstrip bandpass filter with multitransmission zeros", *IET Electronics Letters*, Vol. 53 No. 7 pp. 482-484, 2017.
- [20] J-X. Chen, J. Li, Y. Zhan, W. Qin, J. Shi, Z-H. Bao, "Design of Balanced and Balun Filters Using Dual-Mode Cross-Shaped Dielectric Resonators", *IEEE Trans. on*

زیر نویس‌ها

- ¹ Asymmetric feed lines
- ² Perturbation
- ³ Slotted lines
- ⁴ Right/left-hand transmission lines
- ⁵ Triangular resonator
- ⁶ Meander-loop
- ⁷ Wheeler's cavity model
- ⁸ Electromagnetic fields
- ⁹ Degenerate modes
- ¹⁰ Layout
- ¹¹ Insertion loss
- ¹² Return loss
- ¹³ Voltage standing wave ratio
- ¹⁴ Group delay