

طراحی و ساخت فیلتر پایین‌گذر میکرواستریپ با محدوده توقف عریض و انتخاب پذیری بالا

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، شبیه‌سازی و ساخت یک فیلتر پایین‌گذر با استفاده از خطوط میکرواستریپ و عملکرد مناسب پرداخته شده است. برای طراحی فیلتر، از قوانین طراحی فیلترهای چپی‌شف مرتبه پنجم استفاده شده است. برای بهبود عملکرد شاخص‌های فیلتر پایین‌گذر طراحی شده، از سلول‌های سرکوب‌گر شعاعی و استاب‌های باز استفاده شده است که باعث افزایش باند توقف و باند گذار باریک می‌شود. طرح فیلتر پیشنهادی پس از طراحی، با استفاده از نرم‌افزار ADS مورد شبیه‌سازی قرار گرفته و در نهایت بر روی زیرلایه Rogers-RO4003c با ضخامت ۰/۵۰۸ میلی‌متر (۲۰ میل) و ثابت دی‌الکتریک ۳/۳۸ ساخته شده است. فرکانس قطع فیلتر پیشنهادی برابر ۱/۱ گیگاهرتز و پهنای باند توقف آن نزدیک به ۲۸/۵ گیگاهرتز می‌باشد. نرخ تغییر وضعیت فیلتر مناسب و برابر ۷۹ دسی‌بل بر گیگاهرتز می‌باشد. اندازه فیلتر پیشنهادی نسبتاً کوچک و ضریب شایستگی فیلتر بالا و برابر با ۲۶۶۶۳ می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی و نتایج مربوط به اندازه‌گیری نمونه ساخته شده باهم مطابق و رفتار نسبتاً یکسانی دارند. از فیلتر پیشنهادی به دلیل عملکرد مناسب می‌توان در سیستم‌های مخابراتی استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: فیلتر پایین‌گذر، باند توقف عریض، باند گذار باریک، ضریب شایستگی بالا.

Design and fabrication of a microstrip low-pass filter with wide stopband and high selectivity

G. Moloudian^{1,2}, Ph.D; S. Bahrami², Assistant Professor; H. Ghouhestani³, M.Sc.

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 low-pass filter with usage microstrip lines and suitable performance for operation in telecommunication systems is designed, simulated and fabricated. The design of the filter is based on the fifth order chebyshev filter design rules. In order to improve the performance of the low-pass filter parameters, radial suppressor cells and open stubs are used which increase the stopband and narrow transition band (sharp roll-off-rate). The proposed low-pass filter after designed, using simulated ADS software and finally fabricated on the Rogers-RO4003c substrate with a thickness of 0.508 mm (20 mil) and a dielectric constant of 3.38. The -3 dB cutoff frequency for the proposed filter is 1.1 GHz and bandwidth of the stopband is close to 28.5 GHz. The change rate for the filter is appropriate and equal to 79 dB/GHz. The size of filter is relatively small and figure of merit is 26663. The simulation results and the results of the measurement of the fabricated sample are consistent and fairly similar. The proposed filter can be used in telecommunication systems due to good performance.

Keywords: Low-pass filter, wide stopband, narrow transition band, high figure of merit.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۸/۱۲

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۱۲ و ۱۳۹۶/۱۲/۲۶ و ۱۳۹۷/۵/۲۱ و ۱۳۹۷/۸/۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۱۲

نام نویسنده مسئول: سیروس بهرامی

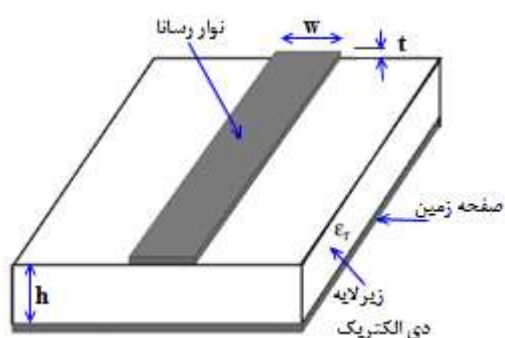
نشانی نویسنده مسئول: ایران - استان فارس - شهرستان کازرون - خیابان طالقانی - دانشگاه سلمان فارسی - دانشکده فنی و مهندسی - گروه مهندسی برق

۱- مقدمه

نمود. فیلتر پیشنهادی پس از طراحی و شبیه‌سازی بر روی زیرلایه Rogers-RO4003c ساخته شده است. شبیه‌سازی با نتایج اندازه‌گیری شده مربوط به نمونه ساخته شده باهم رفتار یکسانی دارند. ساختار مقاله ارائه شده به صورت زیر سامان‌دهی شده است. در قسمت اول به ارائه مقدمه، مرور بر کارهای گذشته و ادبیات تحقیق پرداخته شده است. در قسمت دوم نظریه خطوط مایکرواستریپ و روابط مربوط به آن بررسی شده است. در قسمت سوم به طراحی و ساخت فیلتر پایین‌گذر پیشنهادی، در قسمت چهارم به بحث در مورد نتایج به‌دست آمده و نهایتاً در قسمت پنجم به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات پرداخته شده است.

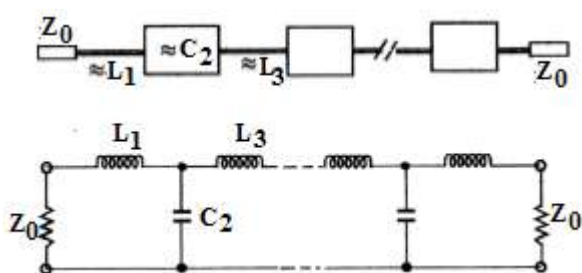
۲- نظریه خطوط امپدانس پله‌ای

ساختار یک خط انتقال مایکرواستریپ در شکل ۱ آورده شده است. این ساختار شامل یک نوار رسانا معمولاً از جنس مس با پهنای w و ضخامت t بر روی یک زیرلایه با ثابت دی‌الکتریک مشخص می‌باشد. پایین زیرلایه را معمولاً صفحه زمین می‌نامند که شامل یک صفحه کاملاً رسانا از جنس ماده مس می‌باشد [۱].



شکل ۱: ساختار یک خط انتقال مایکرواستریپ [۱]

با ورود به الکترونیک فرکانس بالا، قطعاتی مانند سلف و خازن به دلیل تلفات بالا دیگر استفاده نمی‌شوند و از خطوط مایکرواستریپ برای طراحی ادوات فرکانس بالا استفاده می‌شود. برای طراحی یک فیلتر پایین‌گذر می‌توان از خطوط مایکرواستریپ در حالت امپدانس پله‌ای استفاده نمود. در شکل ۲ یک ساختار امپدانس پله‌ای نشان داده شده است.



امروزه با پیشرفت در سیستم‌های ارتباطی و مخابراتی نیاز به آنتن‌ها و فیلترهایی با عملکرد مناسب رو به افزایش است. از مهم‌ترین فیلترها می‌توان به فیلتر پایین‌گذر اشاره نمود که اکثراً در قسمت گیرنده یک سیستم مخابراتی استفاده می‌شود. با افزایش فرکانس کاری سیستم‌های مخابراتی، به دلیل افزایش تلفات قطعاتی مانند سلف و خازن، از خطوط مایکرواستریپ جهت طراحی ادوات در محدوده میکروویو استفاده می‌شود [۱]. از مهم‌ترین شاخص‌های یک فیلتر پایین‌گذر می‌توان به باند توقف عریض، باند گذار باریک^۱، اندازه کوچک و قابلیت تنظیم اشاره نمود [۲]. در ادامه به مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه فیلتر پایین‌گذر می‌پردازیم. در [۳] یک فیلتر پایین‌گذر با استفاده از خطوط تزویج موازی و باند توقف عریض ارائه شده است. برای طراحی فیلتر پایین‌گذر می‌توان از ساختار زمین تخریب شده^۲ استفاده نمود [۴-۹]. یک فیلتر پایین‌گذر با باند توقف عریض و اندازه کوچک با استفاده از خطوط امپدانس پله‌ای^۳ و تشدیدکننده سنجاقی^۴ در [۱۰] ارائه شده است. در [۱۱] یک فیلتر پایین‌گذر با باند توقف عریض با استفاده از تشدیدکننده‌های چندحالتی^۵ ارائه شده است. در مراجع [۱۱-۱۳] علی‌رغم عملکرد مناسب از لحاظ تلفات عبوری و محدوده توقف، باند گذار فیلتر پهن می‌باشد. در [۱۴] یک فیلتر پایین‌گذر با استفاده از چندین استاب^۶ ارائه شده که نتایج نسبتاً مناسبی ارائه کرده است. در [۱۵] از فیلتر پایین‌گذر برای طراحی تقسیم‌کننده توان^۷ با تضعیف هارمونیک‌های ناخواسته و اندازه کوچک ارائه شده است. طبق [۱۶] فیلتر پایین‌گذر را، همچنین، می‌توان با ایجاد شکاف‌هایی^۸ بر خط مایکرواستریپ طراحی کرد. از تشدیدکننده با شکل دمبل^۹ [۱۶] و شکل آسیاب بادی^{۱۰} [۱۷] می‌توان برای طراحی یک فیلتر پایین‌گذر استفاده نمود. یکی از روش‌های طراحی فیلترهای پایین‌گذر استفاده از خطوط مایکرواستریپ مصنوعی^{۱۱} می‌باشد که می‌تواند نتایج نسبتاً مناسبی را ارائه کند [۱۸-۱۹]. در [۲۰] یک فیلتر پایین‌گذر با استفاده از تغییر در ساختار باندگاف^{۱۲} صفحه زمین ارائه شده است. در [۲۱-۲۲] یک فیلتر پایین‌گذر با باند توقف عریض، تلفات عبوری^{۱۳} کم و تلفات بازگشتی^{۱۴} مناسب ارائه شده است. از خطوط مایکرواستریپ می‌توان در طراحی و ساخت قطعاتی مانند فیلترها [۲-۲۲]، آنتن‌ها [۲۳-۲۴] و دی‌پلکسرها [۲ و ۲۵] استفاده نمود. با بررسی مقالات فوق می‌توان به این نکته اشاره کرد که فیلتری با مقادیر مناسب برای همه شاخص‌ها را نمی‌توان یافت. اکثراً یک یا چند شاخص مربوط به فیلترهای ارائه شده مناسب می‌باشد. در این‌جا هدف، طراحی و ساخت یک فیلتر پایین‌گذر با عملکرد مناسب و مقادیر مطلوب برای همه شاخص‌ها می‌باشد.

در این مقاله، به طراحی، شبیه‌سازی و ساخت یک فیلتر پایین‌گذر با عملکرد مناسب پرداخته شده است. از ویژگی‌های مطلوب فیلتر پیشنهادی می‌توان به باند توقف عریض، ضریب شایستگی بالا، باند گذار باریک، میزان تضعیف مناسب در باند توقف و اندازه کوچک اشاره

سلفها و خازن‌ها برابر با $L_1 = 1/34$, $L_2 = 0/98$, $L_3 = 13/4$, $L_4 = 6/91$, $L_5 = 2/95$, $C_2 = 2/19$, $C_4 = 3/19$ می‌باشد (مقادیر سلفها بر (۲) وهانری و مقادیر خازن‌ها برحسب پیکوفاراد است).

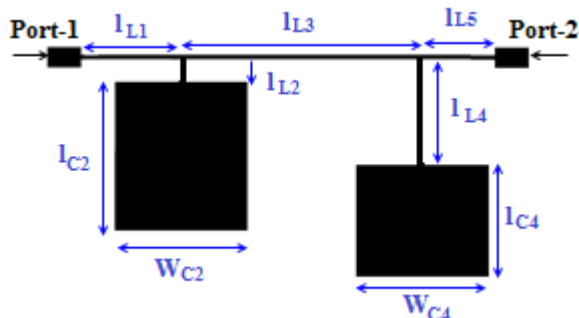
$$L_i = \frac{1}{2\pi f_c} Z_0 g_{Li} \quad (3)$$

حال می‌بایست مدار سلفی-خازنی فوق را به معادل میکرواستریپی آن تبدیل نمود. برای محاسبه طول و عرض خطوط میکرواستریپ می‌بایست از روابط زیر استفاده کنیم [۱].

$$l_L = \frac{\lambda_{gL}}{2\pi} \sin^{-1} \left(\frac{\omega_c L}{Z_{0L}} \right) \quad (4)$$

$$l_C = \frac{\lambda_{gC}}{2\pi} \sin^{-1} (\omega_c C Z_{0C}) \quad (5)$$

در روابط بالا f_c و ω_c فرکانس قطع و λ_{gL} و λ_{gC} طول موج هدایت شده^{۱۵} برای خطوط سلفی و خازنی می‌باشد. با استفاده از روابط فوق، مقادیر مربوط به طول سلفها و خازن‌ها برابر است با $d_{L1} = 14/4$, $d_{L2} = 1/6$, $d_{L3} = 24/9$, $d_{L4} = 4/7$, $d_{L5} = 11/8$, $d_{C2} = 6/3$, $d_{C4} = 1/4$ و مقادیر مربوط به عرض خطوط سلفی برابر $0/2$ و برای خطوط خازنی 8 می‌باشد (کلیه مقادیر طولها و عرضهای خطوط میکرواستریپ در هر دو حالت سلفی و خازنی در واحد میلی‌متر می‌باشد). طرح میکرواستریپ^{۱۶} معادل (طرح جانمایی) برای فیلتر چپی شف مرتبه پنجم در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴: طرح جانمایی برای ساختار فیلتر پایین گذر چپی شف مرتبه پنجم

شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار ADS انجام شده است. می‌توان نتایج شبیه‌سازی (شاخص‌های پراکندگی^{۱۷}) به‌دست آمده برای مدار چپی شف مرتبه پنجم و طرح جانمایی آن را در شکل ۵ مشاهده نمود. با توجه به نتایج به‌دست آمده در شکل ۵ می‌توان گفت که عملکرد مدار فیلتر پایین گذر چپی شف مرتبه پنجم با عملکرد طرح جانمایی رفتار نسبتاً یکسانی دارند. اندازه تلفات عبوری در باند عبور تقریباً برابر با $0/3$ دسی‌بل و اندازه تلفات بازگشتی برابر 20 دسی‌بل است. همان‌طور که انتظار می‌رفت به دلیل این‌که از فیلتر مرتبه پنجم استفاده کرده‌ایم دو صفر انتقال را خواهیم داشت که برای طرح

شکل ۲: ساختار خط انتقال امپدانس پله‌ای، ساختار عمومی یک فیلتر پایین گذر و ساختار نردبانی LC یک پایین گذر [۱]

ساختار خط انتقال امپدانس پله‌ای به‌شدت وابسته به طول، عرض و امپدانس مشخصه خط انتقال می‌باشد. به‌طور کلی برای طراحی خطوط امپدانس پله‌ای از رابطه زیر استفاده می‌شود [۱].

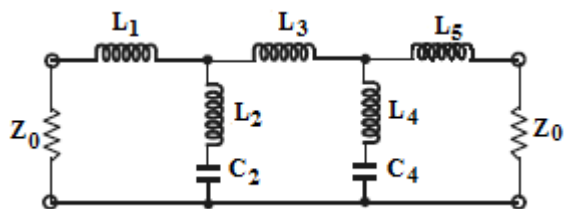
$$C_i = \frac{1}{2\pi f_c} \frac{1}{Z_0} g_{Ci} \quad (1)$$

$$Z_{0C} < Z_0 < Z_{0L}$$

در رابطه فوق، Z_0 امپدانس مشخصه خط انتقال برابر 50 اهم، Z_{0L} امپدانس خط سلفی و Z_{0C} امپدانس خط خازنی می‌باشد.

۳- طراحی فیلتر پایین گذر پیشنهادی

یکی از روش‌های طراحی انواع فیلترها، روش چپی شف است که نسبتاً نتایج مناسبی را ارائه می‌دهد. در این‌جا برای طراحی فیلتر پایین گذر پیشنهادی از یک فیلتر پایین گذر چپی شف مرتبه پنجم که در شکل ۳ نشان داده شده، استفاده شده است. فیلتر چپی شف مرتبه ۵ دارای دو صفر انتقال می‌باشد که مطابق شکل ۵ این موضوع واضح می‌باشد (با Tz نشان داده شده است). برای طراحی این فیلتر از ضرایب جدول چپی شف مرتبه پنجم با ضریب ریپل $0/3$ دسی‌بل (در باند عبور) با فرکانس قطع 1 گیگاهرتز استفاده شده است که این ضرایب از جدول مرجع [۱] گرفته شده است. مطابق شکل ۵ نیز می‌توان به این قضیه پی برد که ضریب ریپل در باند عبور که همان تغییرات تلفات عبوری در باند عبور است کاملاً صاف است و تغییرات آن زیر $0/3$ دسی‌بل است و فرکانس قطع نیز 1 گیگاهرتز است که در طراحی مدنظر بوده است. همچنین یکی از دلایل دیگر که از فیلتر مرتبه پنجم به‌جای فیلتر مرتبه سوم یا چهارم استفاده شده این است که دارای دو صفر انتقال است و این امر باند گذار را باریک‌تر می‌کند که باعث افزایش نرخ تغییر وضعیت از باند عبور به باند توقف می‌شود. در ضمن فیلتر مرتبه پنجم علاوه بر دستیابی به نتایج مناسب دارای اندازه کوچک نسبت به فیلترهای مرتبه ششم و بالاتر است. به‌طور کلی در اکثر طراحی‌ها از این فیلتر استفاده می‌شود.

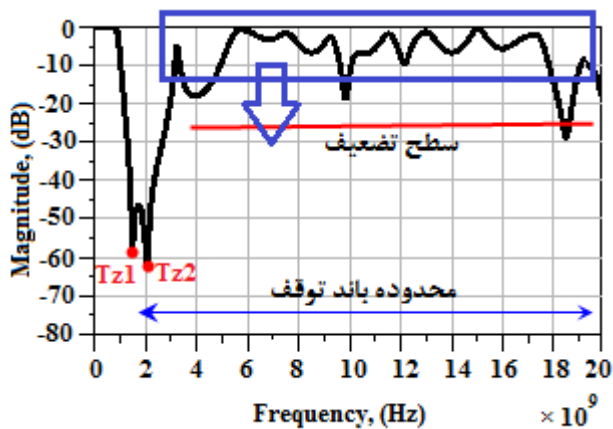


شکل ۳: ساختار فیلتر پایین گذر چپی شف مرتبه پنجم

مقادیر سلفها و خازن‌های مربوط به فیلتر پایین گذر چپی شف مرتبه پنجم از روابط زیر محاسبه می‌شود [۱]. مقادیر مربوط به

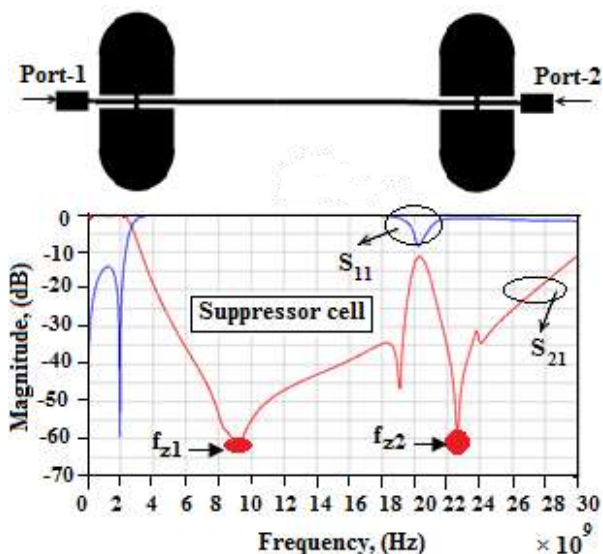
پایین انتقال دهیم تا بتواند مقدار مطلوبی در حد ۲۰- دسی‌بل به‌خود بگیرد.

در این‌جا برای بهبود عملکرد سیستم از سلول‌های سرکوب‌گر شعاعی استفاده می‌کنیم. وظیفه این سلول‌های سرکوب‌گر این است که تلفات عبوری طرح جانمایی را از فرکانس ۳ گیگاهرتز به بعد (محدوده مشخص شده در شکل ۷) زیر خط ۲۰- دسی‌بل قرار دهند. شکل ۸ سلول‌های سرکوب‌گر را همراه با نتایج شبیه‌سازی آن نشان می‌دهد.

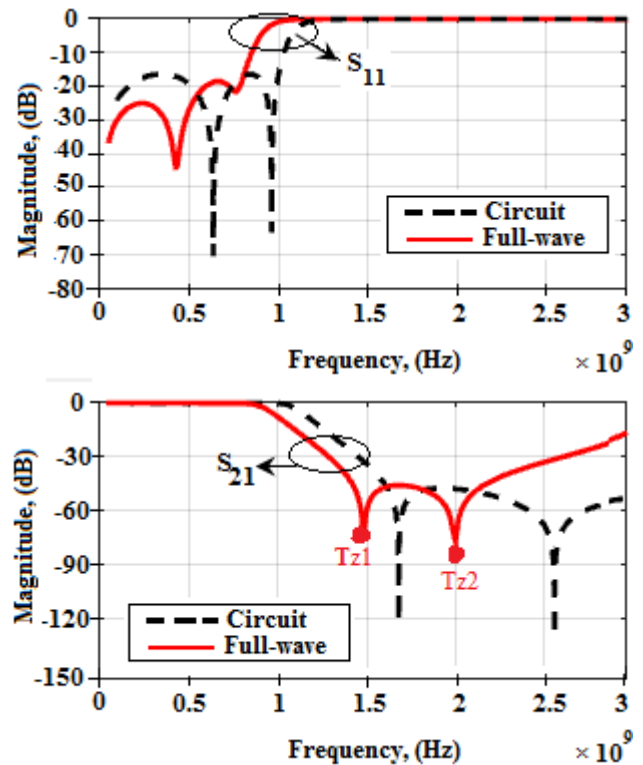


شکل ۷: نتایج طرح جانمایی تا فرکانس ۲۰ گیگاهرتز

با توجه به شکل ۸، می‌توان گفت که سلول‌های سرکوب‌گر پیشنهادی دو صفر را در فرکانس‌های ۹ گیگاهرتز و ۲۳ گیگاهرتز ایجاد می‌کنند. این صفرها باعث پایین کشیدن تلفات عبوری در نتایج طرح جانمایی فیلتر مرتبه پنجم خواهند شد. با افزودن این سلول‌ها به طرح جانمایی عملکرد تلفات عبوری در باند توقف بهتر خواهد شد که این امر موجب افزایش باند توقف فیلتر پایین‌گذر می‌شود. برای افزایش سرعت تغییر وضعیت (باند گذار باریک) فیلتر از باند عبور به باند توقف از دو استاب در ابتدا و انتهای طرح میکرواستریپ فیلتر مرتبه پنجم استفاده می‌کنیم. طرح جانمایی نهایی فیلتر پایین‌گذر پیشنهادی در شکل ۹ نشان داده شده است.



پیشنهادی مطابق شکل ۵ در فرکانس‌های ۱/۵ و ۲ گیگاهرتز ($Tz2$, $Tz1$) رخ داده است. برای این‌که در این مقاله علاوه بر شبیه‌سازی، مراحل ساخت نیز موردنظر می‌باشد بنابراین از این به بعد بر روی طرح جانمایی که برای ساخت استفاده می‌شود بحث خواهیم کرد.



شکل ۵: نتایج طرح جانمایی و فیلتر پایین‌گذر چپی شف مرتبه پنجم

برای کاهش طول و عرض کل طرح می‌توان از خطوط پیچ‌دار استفاده نمود که این امر تأثیر چندانی بر روی عملکرد سیستم ندارد و فقط باعث کاهش ابعاد و به عبارتی باعث جمع‌وجور شدن طرح جانمایی می‌شود [۱۸]. طرح جانمایی با استفاده از خطوط پیچ‌دار در شکل ۶ نشان داده شده است.

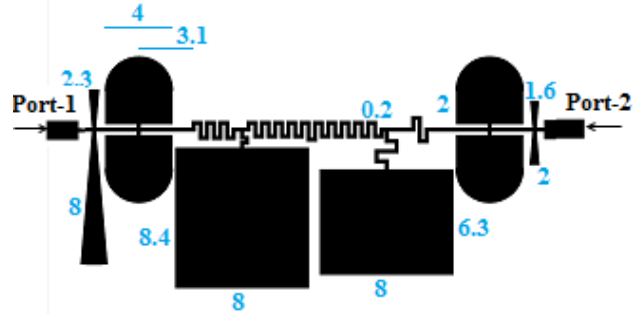


شکل ۶: طرح جانمایی با استفاده از خطوط پیچ‌دار

نتایج شبیه‌سازی مربوط به طرح جانمایی برای فیلتر پیشنهادی تا فرکانس حدود ۲۰ گیگاهرتز در شکل ۷ نشان داده شده است. برای بهبود تلفات عبوری طرح پیشنهادی و افزایش باند توقف می‌بایست از سلول‌های سرکوب‌گر^{۱۸} استفاده کنیم. در این‌جا مطابق با شکل ۷ می‌بایست تلفات عبوری را از محدوده ۳ گیگاهرتز به بعد به سمت

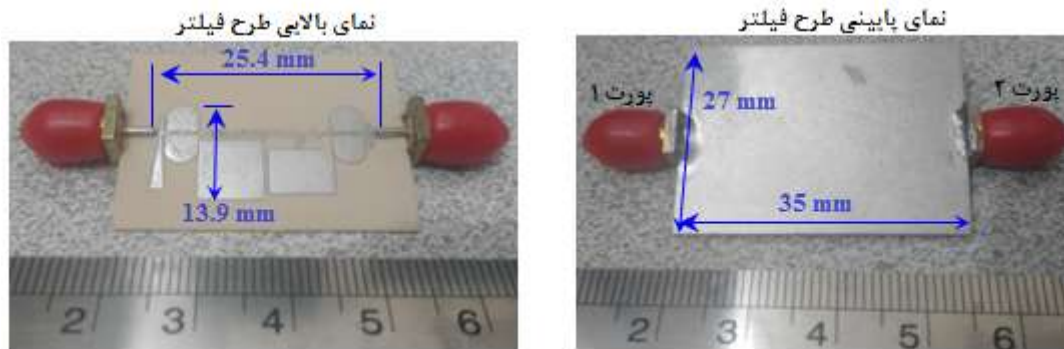
فیلتر ساخته شده را نشان می‌دهد. فیلتر ساخته شده را می‌بایست با دستگاه تحلیل‌گر شبکه اندازه‌گیری کنیم. نتایج اندازه‌گیری برای نمونه ساخته شده همراه با نتایج شبیه‌سازی از طرح فیلتر پایین‌گذر پیشنهادی در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

شکل ۸: طرح جانمایی سلول‌های سرکوب‌گر شعاعی و شبیه‌سازی آن

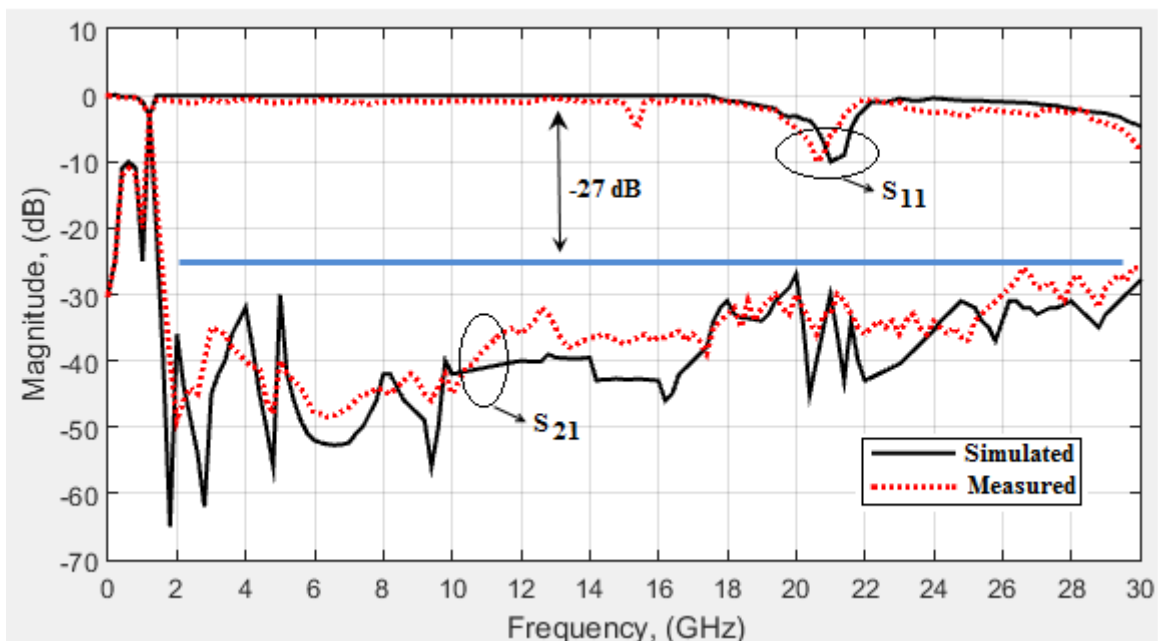


شکل ۹: طرح نهایی فیلتر پایین‌گذر پیشنهادی

طرح نهایی فیلتر پایین‌گذر پیشنهادی بر روی زیرلایه Rogers-RO4003c با ضخامت ۰/۵۰۸ میلی‌متر (۲۰ میل)، ثابت دی‌الکتریک ۳/۳۸ و تانژانت تلفات ۰/۰۰۲۲ ساخته شده است. شکل ۱۰، نمونه



شکل ۱۰: نمونه ساخته شده فیلتر پایین‌گذر پیشنهادی



شکل ۱۱: نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده فیلتر پایین‌گذر پیشنهادی

جدول ۱: مقایسه بین نتایج به‌دست آمده برای فیلتر پایین‌گذر پیشنهادی با مقالات دیگر

مراجع	فرکانس قطع (گیگاهرتز)	پهنای باند توقف (گیگاهرتز)	میزان تضعیف (دسی‌بل)	باند توقف نسبی	نرخ تغییر وضعیت (دسی‌بل بر گیگاهرتز)	اندازه (طول موج هدایت‌شده) ^۲	ضریب شایستگی
[۳]	۲/۱۸	۱۶/۱	۱/۵	۱/۶۰	۴۰/۲	۰/۰۱۱۷	۸۲۴۶
[۷]	۱	۹/۷۹	۳	۱/۴۷	۳۵/۶	۰/۰۲۳۰	۶۸۲۶
[۸]	۲/۴	۷/۵	۲	۱/۰۴	۱۵/۹	۰/۱۰۵۶	۳۱۴
[۹]	۱	۱۸/۷۹	۲	۱/۷۷	۷۸	۰/۰۱۶۰	۱۷۲۵۸
[۱۰]	۱/۶	۱۴/۲	۲	۱/۵۳	۵۲/۸	۰/۰۰۹۱	۱۷۶۵۲
[۱۱]	۱/۸	۲۱/۲	۱/۵	۱/۵۸	۱۱/۶۵	۰/۰۰۹۹	۲۷۸۹
[۱۲]	۱/۷۴	۲۰/۶	۲	۱/۵۹	۲۰/۵	۰/۰۲۰۴	۳۱۹۶
[۱۳]	۱/۲	۸/۴۴	۱/۵	۱/۳۸	۱۶/۹	۰/۰۰۹۵	۳۶۸۳
[۱۴]	۱	۱۸/۶۳	۲/۴	۱/۷۴	۷۴	۰/۰۱۲۲	۲۵۲۷۴
[۱۶]	۲/۲	۲۵/۷۱	۲	۱/۷۳	۵۸/۶	۰/۰۵۵۵	۳۶۵۴
[۱۷]	۱/۷۶	۱۰/۲۷	۲	۱/۵۶	۵۱/۵	۰/۰۴۷۵	۳۳۸۳
[۲۱]	۱/۱۱	۷/۵	۲	۱/۵۴	۵۸/۶	۰/۰۰۸۸	۲۰۴۹۵
فیلتر پیشنهادی	۱/۱	۲۸/۴۴	۲/۷	۱/۸	۷۹	۰/۰۱۴۴	۲۶۶۶۳

۴- بحث در نتایج

با توجه به شکل ۱۱ می‌توان گفت که نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده با هم رفتار یکسانی دارند. برای محاسبه شاخص‌های جدول ۱ می‌توان از روابط موجود در مرجع [۳] استفاده نمود. فرکانس قطع فیلتر پایین‌گذر پیشنهادی برابر با ۱/۱ گیگاهرتز می‌باشد. باند توقف فیلتر از فرکانس ۲ گیگاهرتز تا ۳۰ گیگاهرتز ادامه پیدا می‌کند که این به آن معناست که باند توقف فیلتر پایین‌گذر پیشنهادی برابر با ۲۸/۴۴ گیگاهرتز است. میزان تضعیف در باند توقف برابر با ۲۷ دسی‌بل می‌باشد. نرخ تغییر وضعیت از باند عبور به باند توقف برابر با ۷۹ دسی‌بل بر گیگاهرتز می‌باشد که عدد نسبتاً مناسبی می‌باشد. هرچه این نرخ بزرگ‌تر باشد به این معناست که باند گذار باریک‌تر است. مقایسه نتایج به‌دست آمده بین فیلتر پایین‌گذر پیشنهادی با نتایج مقالات دیگر در جدول ۱ آورده شده است. ضریب شایستگی فیلتر پیشنهادی بسیار بالا و برابر با ۲۶۶۶۳ است. اندازه فیلتر پیشنهادی نیز در مقایسه با کارهای دیگر نسبتاً کوچک و برابر با ۰/۰۱۴۴ می‌باشد. با مقایسه نتایج می‌توان گفت که فیلتر پیشنهادی دارای عملکرد مناسبی می‌باشد و می‌توان از آن در قسمت گیرنده سیستم‌های مخابراتی استفاده نمود.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به طراحی یک فیلتر پایین‌گذر با باند توقف عریض و ضریب شایستگی بالا پرداخته شده است. فیلتر پیشنهادی پس از طراحی و شبیه‌سازی، بر روی زیرلایه موردنظر ساخته شده و با دستگاه تحلیل‌گر شبکه مورد اندازه‌گیری قرار گرفته است. فرکانس قطع فیلتر پایین‌گذر پیشنهادی برابر با ۱/۱ گیگاهرتز می‌باشد. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان گفت که نرخ تغییر وضعیت فیلتر برابر ۷۹ دسی‌بل بر گیگاهرتز است که نشان‌دهنده باند گذار باریک می‌باشد. از مزایای فیلتر پیشنهادی می‌توان به باند توقف عریض با مقدار بیش از ۲۸ گیگاهرتز، میزان تضعیف مناسب در باند توقف با میزان ۲۷ دسی‌بل، باند گذار باریک، ضریب شایستگی بالا با عدد ۲۶۶۶۳ و اندازه کوچک اشاره نمود. نتایج شبیه‌سازی با نتایج اندازه‌گیری شده (مربوط به نمونه فیلتر ساخته شده) رفتار نسبتاً یکسانی دارند. از فیلتر پایین‌گذر پیشنهادی می‌توان در ارتباطات بی‌سیم و مخابرات مایکروویو مدرن استفاده نمود.

مراجع

- [1] J.-S. Hong and M. J. Lancaster. Microstrip filters for RF/microwave applications, Wiley, New York, 2001.
- [2] G. Moloudian, M. Dousti and 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.

- suppression,” *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 27, no. 6, pp.726–735, 2013.
- [16] H.L. Cao , W.B. Ying , H. Li, and S.Z. Yang, “Compact lowpass filter with ultra-wide stopband rejection using meandered-slot dumbbell Resonator,” *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Vol. 26, Nos. 17–18, pp. 2203–2210, 2012.
- [17] H. Cao, W. Ying, H. Li and S. Yang, “Compact lowpass filter with wide stopband using novel windmill resonator,” *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol.26, no.17-18, pp. 2234-2241, 2012.
- [18] Y. He, X. Wu and C-j. Liu, “Novel miniaturized low-pass filters from artificial transmission line structures,” *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 28, no. 10, pp. 1269-1274, 2014.
- [19] C-J. Chen, “Design of Artificial Transmission Line and Low-Pass Filter Based on Aperiodic Stubs on a Microstrip Line,” *IEEE Trans. Compon. Pack. Manuf. Technol.*, vol.4, no.5, pp. 922-928, 2014.
- [20] A. K. Tiwary and N. Gupta, “Performance of Microstrip Low-Pass Filter on Electromagnetic Band Gap Ground Plane,” *IETE Journal of Research*, vol. 56, no. 5, pp. 230-234, 2010.
- [21] M. Hayati , F. Shama and H. Abbasi, “Compact microstrip lowpass filter with wide stopband and sharp roll-off using tapered resonator,” *International Journal of Electronics*, vol. 100, no. 12, pp. 1751-1759, 2013.
- [22] G. Moloudian, M. Dousti and 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.
- [۲۳] 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.
- [۲۴] 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 and M. Dousti, “Design and fabrication of a compact microstrip lowpass-bandpass diplexer with high isolation for telecommunication applications,” *Int. J. of RF and Microw. Computer-aided Eng.*, vol. 28, no. 5, pp. e21248, 2018.
- [3] Y. Jiang, B. Wei, Y. Heng, X. Guo, B. Cao and L. Jiang, “Compact superconducting lowpass filter with wide stopband,” *Electronics Letters*, vol. 53 no. 14, pp. 931–933, 2017.
- [4] P. Zhang and M. Li, “A novel sharp roll-off microstrip lowpass filter with improved stopband and compact size using dual-plane structure,” *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 58, no. 5, pp. 1085-1088, 2016.
- [5] A. Faraghi, M. Ojaroudi and N. Ghadimi, “Compact microstrip low-pass filter with sharp selection characteristics using triple novel defected structures for UWB applications,” *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 56, no. 4, pp. 1007-1010, 2014.
- [6] M. Tamasi, D. Santanu and P. Susanta, “Design and validation of low-pass filter using microstrip stub and defected ground structure,” *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 55, no. 3, pp.571-573, 2013.
- [7] X. Feng, Y. Zhang, G. Zhu, Y. Fan, W. T. Joines and Q. H. Liu, “Design of LPF using suspended substrate microstrip lines as high-Z sections for stopband extension,” *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 58, no. 5, pp. 1204-1207, 2016.
- [8] A. Boutejdar, A. Omar and E. Burte, “High-performance wide stop band low-pass filter using a vertically coupled DGS-DMS-resonators and interdigital capacitor,” *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 56, no. 1, pp. 87-91, 2014.
- [9] F-C. Chen, H-T. Hu, J-M. Qiu and Q-X. Chu, “High-Selectivity Low-Pass Filters With Ultrawide Stopband Based on Defected Ground Structures,” *IEEE Trans. Compon. Pack. Manuf. Technol.*, Vol. 5, no. 9, pp.1313-1319, 2015.
- [10] S. Liu, J. Xu and Z. Xu, “Compact lowpass filter with wide stopband using stepped impedance hairpin units,” *Electronics Letters*, vol. 51, no. 1 pp. 67–69, 2015.
- [11] Q. Li, Y. Zhang and Y. Fan, “Compact ultra-wide stopband low pass filter using multimode resonators,” *Electronics Letters*, vol. 51, no. 14 pp. 1084–1085, 2015.
- [12] S-W. Lan, M-H. Weng, S-J. Chang and C-Y. Hung, “A compact low-pass filter with ultrabroad stopband characteristics,” *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 57, no. 12, pp. 2800-2803, 2015.
- [13] X. Chen, L. Zhang, Y. Peng, Y. Leng, H. Lu and Z. Zheng, “Compact lowpass filter with wide stopband bandwidth,” *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 57, no. 2, pp. 367-371, 2015.
- [14] C-J. Chen, C-H. Sung and Y-D. Su, “A Multi-Stub Lowpass Filter,” *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 25, no. 8, pp. 532-534, 2015.
- [15] M. Hayati, S. Roshani, S. Roshani and F. Shama, “A novel miniaturized Wilkinson power divider with nth harmonic

زیر نویس‌ها

⁸ Slots⁹ Dumbbell¹⁰ Windmill¹¹ artificial transmission line¹² Band Gap¹³ Insertion loss¹⁴ Return loss¹⁵ Guided wavelength¹⁶ Layout¹⁷ Scattering Parameters¹⁸ Suppression Cells¹ Transition Band² Defected Ground Structure (DGS)³ Stepped Impedance Lines (SIL)⁴ Hairpin Resonator⁵ Multi-mode Resonator⁶ Stubs⁷ Power Divider