

طراحی و ساخت فیلتر میان‌گذر چهار بانده با استفاده از حلقه‌های تشدیدی شکاف‌دار

زینب پورآزاد^۱، عباسعلی حیدری^۲، مسعود موحدی^۳

^۱ کارشناسی ارشد برق مخابرات، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه یزد

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه یزد، aheidari@yazd.ac.ir

^۳ دانشیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه یزد

چکیده

در این مقاله طراحی، شبیه‌سازی و ساخت فیلترهای میان‌گذر چهار بانده کوچک با استفاده از تشدیدگرهای حلقه‌ای شکاف‌دار ارائه شده است. این نوع فیلترها به طور ذاتی پهنای باند کمی دارند. در این پژوهش، پهنای باند فرکانسی باندهای عبور فیلتر، با ایجاد خازن بین انگشتی بین دو سلول مجاور فیلتر و همچنین افزایش ضخامت زیرلایه، افزایش داده شده است. فیلتر نهایی برای باندهای عبور با فرکانس‌های مرکزی ۱/۵، ۲/۲۴، ۳/۰۷ و ۴/۴۳ گیگاهرتز طراحی شده و شبیه‌سازی فیلتر، پهنای باند هر کدام از این باندها را به ترتیب ۱۲۰، ۲۱۹، ۴۹۲ و ۲۸۰ نشان می‌دهد. با انجام شبیه‌سازی‌های لازم، چگونگی کنترل فرکانس مرکزی و پهنای باند هر یک از باندها بوسیله تغییر پارامترهای فیزیکی فیلتر بیان شده است. ساختار پیشنهادی دارای قابلیت انتخاب فرکانسی بالا، قابلیت کنترل فاصله بین باندها، تلفات بازگشتی و تلفات عبور قابل قبول برای هر یک از باندها است. فیلترهای نهایی (دو ساختار) بر روی زیرلایه Rogers5870 ساخته شده و نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری ارائه و مقایسه شده‌اند. اندازه دومین فیلتر ساخته شده $0.23\lambda_g \times 0.1\lambda_g$ است که مقایسه آن با سه نمونه از فیلترهای چهار بانده دیگر مقالات، کوچک‌سازی ۱۸٪، ۶۹٪ و ۴۳٪ را نشان می‌دهد.

کلیدواژه

فیلتر میان‌گذر، چهار بانده، تشدیدگرهای حلقه‌ای شکاف‌دار، خازن بین انگشتی.

مقدمه

این روش‌ها اجازه کنترل کامل باندهای عبور را به طور مستقل نمی‌دهند و اندازه ساختارها نسبتاً بزرگ است.

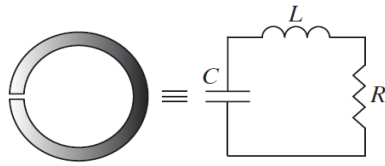
یکی از ساختارهایی که به منظور کاهش ابعاد فیلترهای میان‌گذر ریزنواری مورد استفاده قرار گرفته‌اند، ساختارهای حلقه‌ای شکاف‌دار (SSR)^۲ هستند [۷، ۸]. کوچک‌سازی فیلتر با تکیه بر این واقعیت است که این تشدیدگرها با ابعاد بسیار کوچکتر از طول موج در فرکانس تشدید طراحی می‌شوند. با استفاده از این تشدیدگرها فیلترهای تک بانده [۹]، دو بانده [۱۰، ۱۱] و سه بانده [۱۲، ۱۳] طراحی شده است. در [۱۲، ۱۳] یک تشدیدگر سه بانده ریزنواری که از سه SRR هم مرکز تشکیل شده، مورد بررسی قرار گرفته است و دارای سه فرکانس تشدید متمایز بوده و فرکانس مرکزی هر یک از باندهای عبور، قابل کنترل است.

در این مقاله برای طراحی یک فیلتر میان‌گذر چهاربانده، از چهار تشدیدگر حلقه‌ای شکاف‌دار (تحقیقی از فرامواد) استفاده شده است. ساختارهای SRR به طور کلی دارای پهنای باند باریک هستند. در این مقاله برای افزایش پهنای باند فیلتر، از

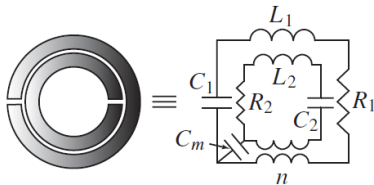
اغلب شبکه‌های محلی (WLAN)، WIMAX، Hiper LAN و GSM در بازه فرکانسی ۱/۶-۲ GHz کار می‌کنند. در سال ۲۰۰۲ میلادی کمیسیون ارتباطات فدرال (FCC) باند UWB (۱/۶-۳/۱ GHz) را به عنوان باند آزاد اعلام کرد. بنابراین جهت جلوگیری از تداخل سیگنال‌های UWB با این شبکه‌ها، نیاز به طراحی و به کارگیری فیلترهای چند بانده است. در سال‌های اخیر، به دلیل استفاده از وسایل ارتباطی قابل حمل، طراحی ساختارهایی با اندازه کوچک مورد توجه بوده است. فیلترهای اولیه دو بانده از اتصال دو فیلتر با دو باند عبور مجزا، به سادگی ساخته شده‌اند [۱] که دارای تلفات باند عبور بالا و ابعاد نسبتاً بزرگ هستند. فیلترهای چند بانده را می‌توان با استفاده از تشدیدگرهای امپدانس پله‌ای [۲]، ساختارهای مارپیچی بارگذاری شده با خازن [۳]، ساختارهای چندلایه سرمیکی [۴]، ساختارهای موجبری مجتمع شده در زیرلایه [۵] و ساختارهای بین انگشتی^۱ [۶] طراحی کرد. به طور کلی

^۲ Split ring resonator

^۱ Interdigital



(الف)



(ب)

شکل ۲. الف) حلقه تشدید شکاف دار تکی و مدار معادل آن، ب) ساختار حلقه تشدید دو تایی همراه با مدار معادل آن [۱۴].

سلول واحد تشدیدگر پیشنهادی

یک تشدیدگر با N تشدید اصلی، به N عنصر تشدید نیاز دارد که فرکانسهای تشدید و پهنای باند آنها توسط اندازه و فاصله بین عناصر کنترل می‌شود. در این مقاله با استفاده از چهار تشدیدگر این کار انجام شده است. تشدیدگر مربعی نشان داده شده در شکل ۳ با چهار عنصر تشدید، پایه و اساس طراحی فیلتر پیشنهادی در این مقاله است. هر کدام از حلقه‌های مربعی را می‌توان با یک تشدیدگر نصف طول موج مدل کرد. حلقه بیرونی (شماره ۱)، باند اول و حلقه‌های بعدی به ترتیب باندهای دوم تا چهارم را ایجاد می‌کنند. طول هر یک از تشدیدگرها، فرکانس تشدید خودی را تعیین می‌کند. فاصله‌های s_1 ، s_2 و s_3 میزان تزویج بین تشدیدگرها را کنترل می‌کنند. عرض خطوط تشدیدگرها w_1 ، w_2 ، w_3 و w_4 مساوی انتخاب شده است. پارامترهای هندسی سلول واحد در شکل ۳ نشان داده شده است.

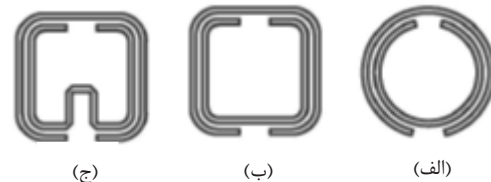
برای سلول واحد به کار رفته می‌توان مدل تزویجی بین حلقه‌ها و مدار معادل آن مشابه آنچه در مرجع [۱۳] آمده در نظر گرفت که در اینجا به دلیل محدودیت از ذکر آن خودداری می‌شود. اگر f_n فرکانس تشدید n ام باشد k_{mn} یعنی ضریب تزویج بین حلقه‌های m و n از رابطه ۲ بدست می‌آید [۱۳]:

$$k_{mn} = \pm \frac{f_m^2 - f_n^2}{f_m^2 + f_n^2} \quad (2)$$

خازن بین انگشتی استفاده شده و همچنین ضخامت زیر لایه نیز افزایش یافته است. در ادامه به معرفی ساختار و بررسی این فیلتر پرداخته و نتایج شبیه سازی و ساخت نیز ارائه می‌شود.

تجزیه و تحلیل سلول واحد تشدیدگر

اولین گام در طراحی یک فیلتر چهار بانده با استفاده از تشدیدگرهای حلقه‌ای شکاف‌دار، طراحی یک سلول واحد با چهار فرکانس تشدید است. در شکل ۱ تشدیدگرهای حلقه‌ای شکاف‌دار با تزویج لبه‌ای نشان داده شده است که به عنوان یکی از اجزاء اصلی در طراحی ساختارهای فراماده به کار رفته و دارای دو فرکانس تشدید هستند. با این حال تزویج بین حلقه‌های دایروی مجاور (سلول‌های کنار هم) به سادگی قابل کنترل نیست و به همین دلیل اغلب از حلقه‌های مربعی استفاده می‌شود که نه تنها تزویج داخلی مناسب، بلکه بین اجزای مجاور نیز تزویج ایجاد می‌کنند. شکل ۱ (ج) ساختار اصلاح شده شکل ۱ (ب) است که طول هادی داخلی با استفاده از یک خم افزایش داده شده به گونه‌ای که می‌توان مقدار دومین فرکانس تشدید ساختار و نیز ضریب کیفیت متناظر با آن را کنترل نمود [۱۱].

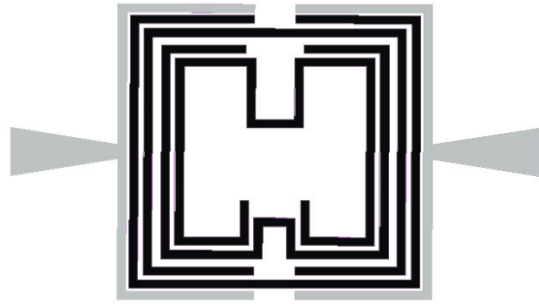


شکل ۱. حلقه‌های تشدید شکاف‌دار. الف) SRR دایروی، ب) SRR مربعی، ج) SRR با اصلاح طول [۱۱].

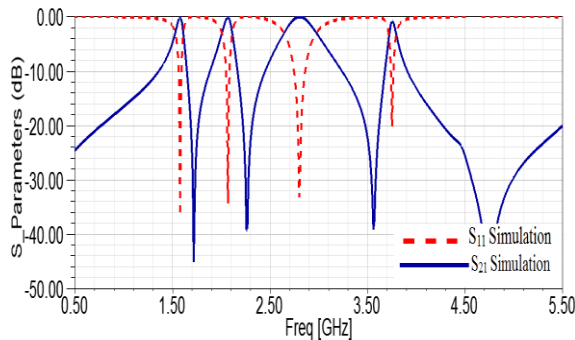
در شکل ۲ (الف) یک حلقه تشدید شکاف‌دار تکی و مدار معادل آن نشان داده شده است. بر اساس مدار معادل، فرکانس تشدید این حلقه برابر با $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ است. در شکل ۲ (ب) ساختار حلقه تشدید شکاف‌دار با دو حلقه، همراه با مدار معادل آن نمایش داده شده است. در این ساختار تزویج بین دو حلقه با خازن C_m و یک ترانسفورماتور با ضریب n نشان داده شده است [۱۴]. با افزایش طول حلقه داخلی می‌توان فاصله بین فرکانس‌های تشدید را افزایش داد. نسبت فرکانس حلقه اول به فرکانس حلقه دوم به طور تقریبی برابر است با:

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{l_2}{l_1} \quad (1)$$

که در آن l_1 و l_2 به ترتیب طول حلقه اول و دوم است.

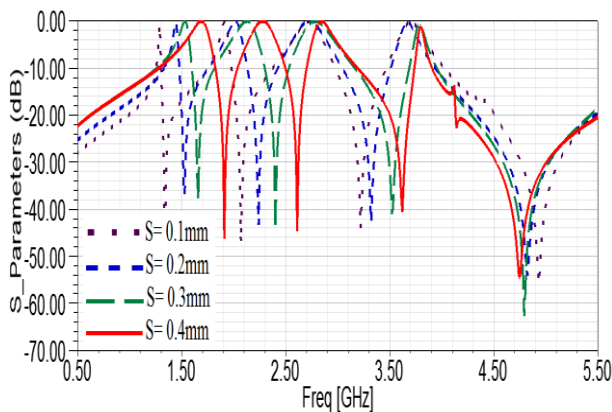


شکل ۴. سلول واحد تشدیدگر به همراه خط تغذیه (با رنگ خاکستری).

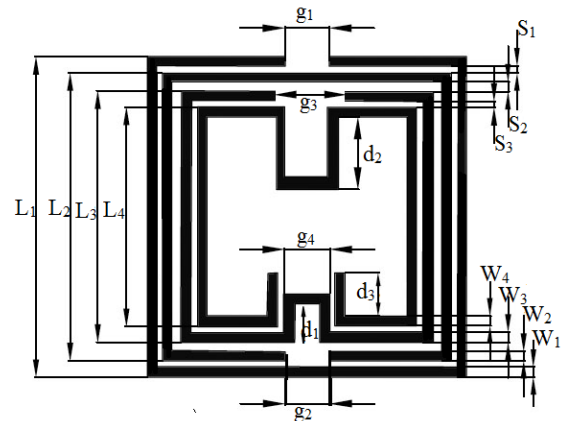


شکل ۵. پاسخ فرکانسی ضریب انتقال و انعکاس سلول واحد.

فاصله بین مدها علاوه بر طول حلقه‌ها، توسط توزیع بین حلقه‌ها نیز قابل کنترل است. این توزیع به وسیله فاصله، عرض حلقه‌ها و ضخامت زیر لایه قابل کنترل است. با استفاده از این پارامترها می‌توان موقعیت باندهای عبور را کنترل کرد. f_1 ، f_2 ، f_3 و f_4 مدهایی هستند که توسط فاصله بین تشدیدگرها (S_i) تنظیم می‌شوند. چنانچه فاصله بین حلقه‌ها مساوی و برابر S باشد، اثر تغییر فاصله حلقه‌ها برای مقادیر $0/1$ ، $0/2$ ، $0/3$ و $0/4$ میلی‌متر در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به این شکل و جدول ۲، واضح است که شکاف‌های کوچکتر، توزیع بیشتری را بین حلقه‌ها ایجاد می‌کنند و در نتیجه فاصله بین باندها بیشتر خواهد شد.



شکل ۶. کنترل فاصله بین باندها با تغییر فاصله (توزیع) بین حلقه‌ها.



شکل ۳. ساختار هندسی سلول واحد پیشنهادی.

نتایج شبیه‌سازی سلول واحد

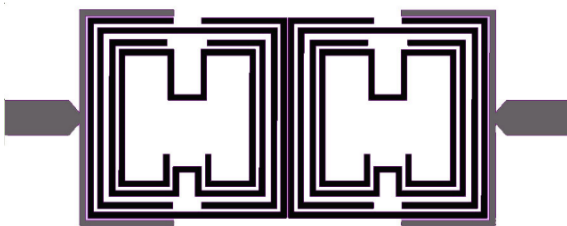
سلول واحد اولیه بر روی زیرلایه Rogers5870 با ضخامت زیرلایه $h=0.787\text{mm}$ و ثابت دی‌الکتریک $2/33$ طراحی شده است. این سلول برای چهار فرکانس $1/59$ ، 2 ، $2/8$ و $3/8$ گیگاهرتز طراحی شده است (این فرکانس‌ها در ساختار نهایی تغییر می‌یابند). ابعاد اولیه ساختار بر اساس مدل تشدیدگرهای نصف طول موج بدست آمده است، سپس با استفاده از بهینه‌سازی به کمک نرم‌افزار HFSS ابعاد نهایی بدست آمده که در جدول ۱ ارائه شده است. عرض تمام حلقه‌ها (w_i) یکسان در نظر گرفته شده است.

جدول ۱. مقادیر پارامترهای سلول واحد برحسب میلی‌متر.

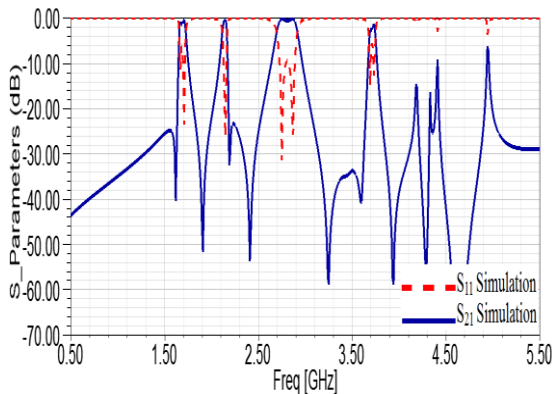
L_1	L_2	L_3	L_4	S_1	S_2
۱۳/۴	۱۲/۱	۱۰/۵	۹/۲	۰/۲۵	۰/۴
S_3	d_1	d_2	d_3	g_i	w_i
۰/۲۵	۱/۶	۲/۶	۲/۲	۱/۹	۰/۴

موقعیت صفرهای انتقال به فرکانس و ضریب توزیع وابسته است. موقعیت صفرهای انتقال توسط تشدیدگرهای ۲، ۳، ۴ و کنترل می‌شود، بنابراین به f_2 ، f_3 ، f_4 ، k_{23} و k_{34} وابسته و توسط این پارامترها قابل کنترل است. برای تغذیه این ساختار از حلقه مربعی شکافدار با خطوط ریزنواری استفاده شده است که به صورت توزیع الکترومغناطیسی، تشدیدگر را تغذیه می‌کند. برای ایجاد تطبیق بین خط تغذیه ۵۰ اهم ورودی و حلقه شکافدار از خطوط تغذیه مثلی استفاده شده است. ساختار هندسی سلول واحد به همراه خط تغذیه در شکل ۴ و پاسخ فرکانسی شبیه سازی شده آن در شکل ۵ نمایش داده شده است.

که قابلیت انتخاب فرکانس^۳ را افزایش می‌دهد و همچنین تاخیر گروهی یکسانی در باند عبور ایجاد می‌شود [۱۵]. برای افزایش قابلیت انتخاب فرکانس، دو تشدیدگر به صورت متوالی و به فاصله ۰/۱ mm از هم قرار گرفته‌اند. ساختار هندسی فیلتر میان‌گذر چهار بانده مرتبه هشت ایجاد شده، در شکل ۸ نشان داده شده است. ابعاد هندسی فیلتر، همان ابعاد سلول واحد در جدول ۱ است. هشت تشدیدکننده داخلی فیلتر، ایجاد کننده صفرهای انتقال هستند که در باند توقف ایجاد شده و باعث افزایش قابلیت انتخاب فرکانس و افزایش تضعیف بین باندهای عبور می‌شوند. پاسخ فرکانسی شبیه سازی شده این فیلتر در شکل ۹ نمایش داده شده است.



شکل ۸. ساختار هندسی فیلتر میان‌گذر چهار بانده مرتبه ۸، با اتصال متوالی دو سلول واحد.



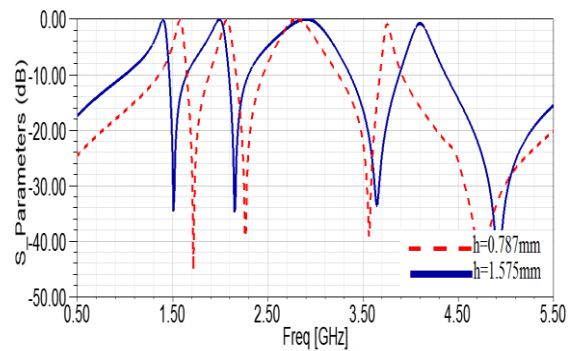
شکل ۹. پاسخ فرکانسی ضریب انتقال و انعکاس فیلتر میان‌گذر مرتبه ۸.

برای مشاهده بهتر افزایش قابلیت انتخاب فرکانس به هنگام متوالی نمودن دو سلول واحد، پاسخ فرکانسی فیلتر با دو سلول واحد (ساختار ترکیبی) و یک سلول به تنهایی، در شکل ۱۰ مقایسه شده است. برای بدست آوردن قابلیت انتخاب فرکانس می‌توان از رابطه ۳ استفاده نمود. که در آن ξ قابلیت انتخاب بر حسب α_{\min} dB/GHz نقطه تضعیف ۲۰ dB و f_s فرکانس متناظر با تضعیف ۲۰ dB، α_{\max} نقطه تضعیف ۳ dB و f_c

جدول ۲. تأثیر پارامتر s بر روی فاصله بین باندها.

s	۰/۱ mm	۰/۲ mm	۰/۳ mm	۰/۴ mm
f_2/f_1	۱/۴۸	۱/۴۱	۱/۳۸	۱/۳۴
f_3/f_2	۱/۴۲	۱/۳۴	۱/۳	۱/۲۶
f_4/f_3	۱/۳۶	۱/۳۴	۱/۳۲	۱/۳

اثر ضخامت زیرلایه بر روی فاصله بین باندها با ثابت نگه داشتن سایر پارامترهای سلول واحد، برای ضخامت‌های $h_1=0.787\text{mm}$ و $h_2=1.574\text{mm}$ مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی برای این دو ضخامت زیرلایه در شکل ۷ نمایش داده شده است. نسبت فاصله بین باندها در این دو حالت در جدول ۳ مشاهده می‌شود. همان طور که در شکل ۷ و جدول ۳ قابل مشاهده است، فاصله بین باندها با افزایش ضخامت زیرلایه افزایش می‌یابد. همچنین باتوجه به شکل ۷ پهنای باند نیز با افزایش ضخامت زیرلایه افزایش می‌یابد.



شکل ۷. مقایسه پاسخ فرکانسی سلول واحد به ازای دو مقدار ضخامت زیرلایه و تأثیر آن بر روی فاصله بین باندها.

جدول ۳. تأثیر ضخامت زیرلایه بر روی فاصله بین باندها.

h	۰/۷۸۷ mm	۱/۵۷۴ mm
f_2/f_1	۱/۳	۱/۴۶
f_4/f_2	۱/۷	۲/۰۷
f_4/f_1	۲/۲۹	۳/۰۸

ساختار فیلتر با دو سلول واحد

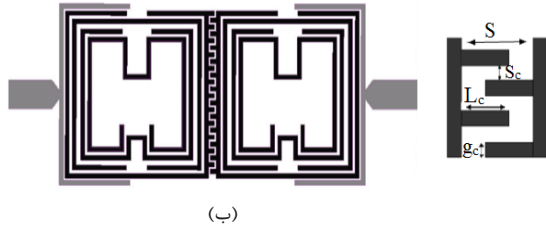
با طراحی درست، یک تشدیدگر می‌تواند به عنوان یک فیلتر مورد استفاده قرار بگیرد. تزویجی که بین سلول‌های تشدیدی ایجاد می‌شود باعث ایجاد صفرهای انتقال در باند توقف می‌شود

³ Selectivity

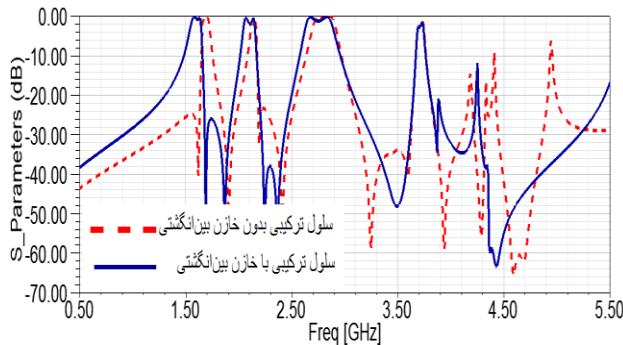
بین‌انگشتی استفاده شده را می‌توان با یک مدار RLC سری مدل کرد. در مدار RLC سری با توجه به رابطه $Q = 1/\omega_0 RC$ با افزایش ظرفیت خازنی، ضریب کیفیت کاهش یافته و بنابراین این پهنای باند افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش ظرفیت خازنی، ضریب تزویج نیز افزایش یافته و در نتیجه پهنای باند فیلتر افزایش می‌یابد.

$$C = \frac{\epsilon_r + 1}{W} L [((n-3) * 0.089) + 0.1] \quad (4)$$

ساختار هندسی فیلتر پیشنهادی به همراه خازن بین‌انگشتی برای افزایش پهنای باند در شکل ۱۱ و پاسخ فرکانسی شبیه‌سازی شده آن در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. برای راحتی در ادامه بحث، این فیلتر را فیلتر شماره یک (#1) می‌نامیم. در شکل ۱۲ پاسخ فرکانسی فیلتر بدون خازن نیز برای مقایسه نشان داده شده است. مشاهده می‌شود پهنای باندهای گذر بویژه برای باندهای اول و دوم افزایش یافته است.



شکل ۱۱. الف) پارامترهای فیزیکی خازن بین‌انگشتی (ب) ساختار نهایی فیلتر شماره یک پیشنهادی.

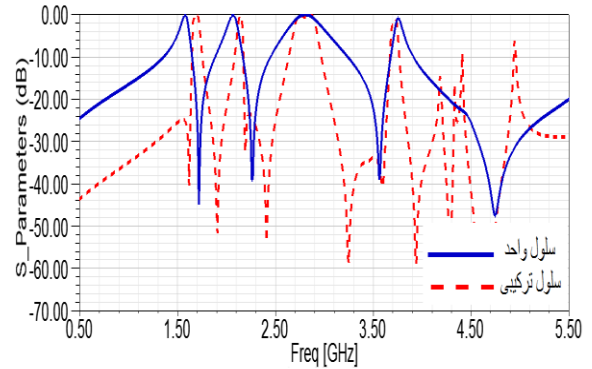


شکل ۱۲. پاسخ فرکانسی شبیه‌سازی شده فیلتر با خازن بین‌انگشتی و مقایسه آن با پاسخ فیلتر بدون خازن.

یکی دیگر از راه‌های افزایش پهنای باند فیلتر، افزایش ضخامت زیرلایه است که پاسخ فرکانسی آن برای ضخامت زیر لایه ۱/۵۷۵ میلی‌متر در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در واقع با افزایش ضخامت زیر لایه، ضریب کیفیت کاهش یافته و بنابراین پهنای باند افزایش می‌یابد. باید به این نکته توجه کرد که با افزایش ضخامت زیر لایه فرکانس مرکزی نیز تغییر می‌کند و باید تنظیم و بهینه‌سازی لازم را انجام داد.

فرکانس متناظر با تضعیف ۳dB است [۱۶]. در جدول ۴ قابلیت انتخاب فرکانس در لبه‌های بالا و پایین رونده هر باند محاسبه شده است.

$$\xi = \frac{\alpha_{\min} - \alpha_{\max}}{f_s - f_c} \quad (3)$$



شکل ۱۰. مقایسه پاسخ فرکانسی سلول واحد و ساختار ترکیبی.

جدول ۴. مقایسه قابلیت انتخاب فرکانس سلول واحد و ساختار ترکیبی.

		قابلیت انتخاب (dB/GHz)	
		سلول واحد	سلول ترکیبی
باند اول	لبه پایینی	۲۲	۸۵۰
	لبه بالایی	۱۸۰	۱۹۷
باند دوم	لبه پایینی	۶۹	۱۶۶
	لبه بالایی	۱۵۱	۹۴۴
باند سوم	لبه پایینی	۵۱	۱۱۳
	لبه بالایی	۳۳	۱۲۱
باند چهارم	لبه پایینی	۱۴۱	۴۰۴
	لبه بالایی	۳۸	۲۴۲

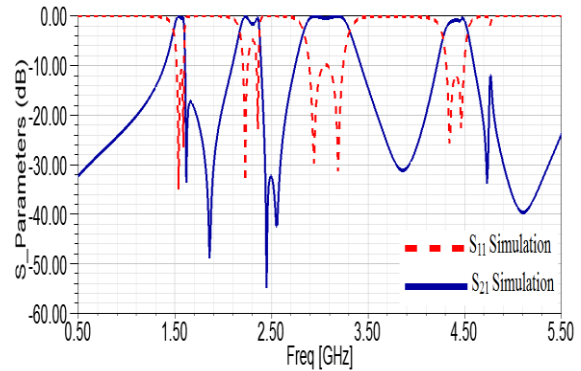
افزایش پهنای باند

اساساً ساختارهای SRR دارای پهنای باند کمی هستند. کنترل پهنای باند، توسط تزویج بین دو سلول (k_{12}) و ضریب کیفیت بار (Q_L) صورت می‌گیرد. ضریب تزویج بین دو سلول واحد، با کاهش فاصله بین دو سلول افزایش می‌یابد. افزایش ضریب تزویج با کاهش فاصله بین دو سلول، به دلیل محدودیت‌های عملی در ساخت، دارای محدودیت است. از این رو سطح تزویج را با استفاده از خازن بین‌انگشتی افزایش می‌دهیم. ظرفیت خازن بین‌انگشتی، به طول L ، عرض W ، تعداد انگشت‌های n و به فاصله میان انگشت‌ها وابسته است و می‌توان مقدار آن را به طور تقریبی از رابطه ۴ بدست آورد [۱۷]. ساختارهای

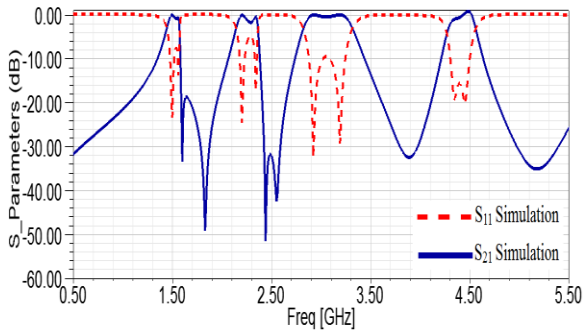


(ب)

شکل ۱۵. الف) نمای بالایی فیلتر نهایی (ب) ایجاد CSRR در صفحه زمین.



شکل ۱۳. پاسخ فرکانسی فیلتر با خازن بین انگشتی و ضخامت زیر لایه ۱/۵۷۵ میلی‌متر.

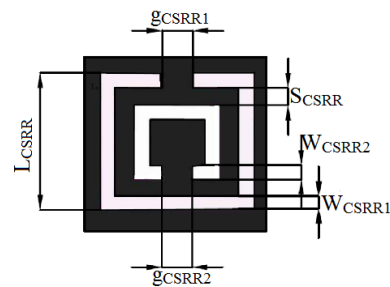


شکل ۱۶. پاسخ فرکانسی فیلتر نهایی به همراه CSRR در صفحه زمین.

همان طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود باند توقف بعد از باند چهارم چندان مناسب نیست (ضریب انتقال دارای یک افزایش ناخواسته است). برای افزایش تضعیف خارج از باند و بهبود باند توقف، از ساختار $CSRR^*$ استفاده شده است. ساختارهای CSRR، دوگان ساختارهای SRR بوده و بر روی لایه زمین حک شده و بدون آنکه ابعاد ساختار را تغییر دهند عملکرد فیلتر را بهبود می‌بخشند. این ساختار در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

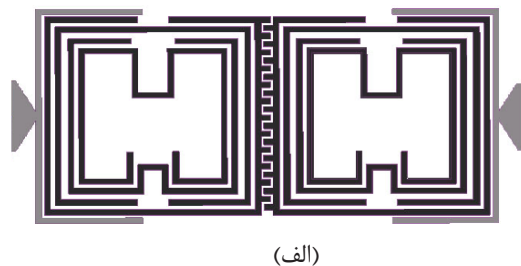
جدول ۵. مقایسه پهنای باند فیلتر قبل و بعد از ایجاد خازن بین انگشتی و نیز با افزایش ضخامت زیر لایه (نتایج شبیه‌سازی).

	ساختار بدون خازن	فیلتر #۱	فیلتر #۲
		فرکانس مرکزی (GHz)	پهنای باند (MHz)
باند اول	فرکانس مرکزی (GHz)	۱/۷	۱/۵
	پهنای باند (MHz)	۶۲	۱۲۰
	پهنای باند نسبی	۳/۶	۶/۴
باند دوم	فرکانس مرکزی (GHz)	۲/۱۵	۲/۲۵
	پهنای باند (MHz)	۴۹	۲۱۹
	پهنای باند نسبی	۲/۲	۵/۱
باند سوم	فرکانس مرکزی (GHz)	۲/۷	۳/۰۷
	پهنای باند (MHz)	۲۲۴	۴۹۲
	پهنای باند نسبی	۸/۲	۹/۵
باند چهارم	فرکانس مرکزی (GHz)	۳/۷	۴/۴۳
	پهنای باند (MHz)	۶۰	۲۸۰
	پهنای باند نسبی	۱/۶	۶/۳



شکل ۱۴. ساختار CSRR حک شده در صفحه زمین با ابعاد (بر حسب mm): $L_{CSRR}=4, W_{CSRR1}=W_{CSRR2}=0.4, g_{CSRR1}=g_{CSRR2}=0.8, S_{CSRR}=0.5$

فیلتر نهایی با خازن‌های بین انگشتی با ضخامت زیر لایه ۱/۵۷۵ میلی‌متر که در لایه زمین آن از ساختارهای CSRR استفاده شده در شکل ۱۵ و پاسخ فرکانسی آن در شکل ۱۶ نشان داده شده است. این فیلتر را فیلتر شماره دو (#2) می‌نامیم.

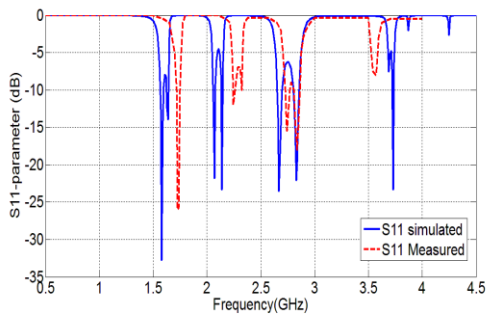


(الف)

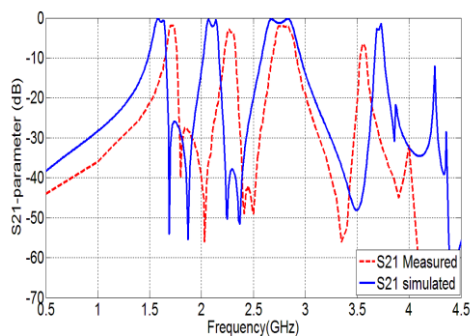
⁴ Complementary split ring resonator

نتایج اندازه‌گیری

پس از طراحی و شبیه‌سازی فیلتر شماره یک در بخش قبل (نمایش داده شده در شکل ۱۱ و با ضخامت زیرلایه ۰/۷۸۷mm) این فیلتر ساخته شد و تصویر آن در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود. پاسخ فرکانسی این فیلتر با استفاده از تحلیل‌گر شبکه اندازه‌گیری شده و شکل ۱۸ تصویری از آن را نشان می‌دهد. پاسخ فرکانسی اندازه‌گیری شده فیلتر و نتایج شبیه‌سازی در شکل ۱۹ مقایسه شده‌اند. بین نتایج اندازه‌گیری و نتایج شبیه‌سازی تطابق کلی خوبی وجود دارد اما فرکانس مرکزی باندهای عبور نسبت به مقادیر بدست آمده از شبیه‌سازی دارای مقداری شیفت فرکانسی هستند که معمولاً به دلایل مختلف در ساخت اولین نمونه فیلتر وجود دارد. تلفات باندهای عبور نیز در عمل نسبت به نتایج شبیه‌سازی افزایش یافته است که می‌تواند به دلیل خطای ساخت و نیز کیفیت پایین کانکتورهای ورودی و خروجی باشد.



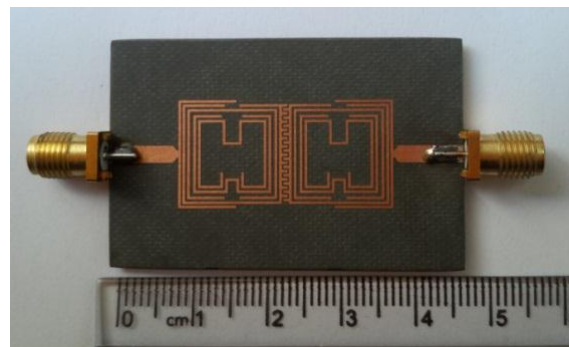
(الف)



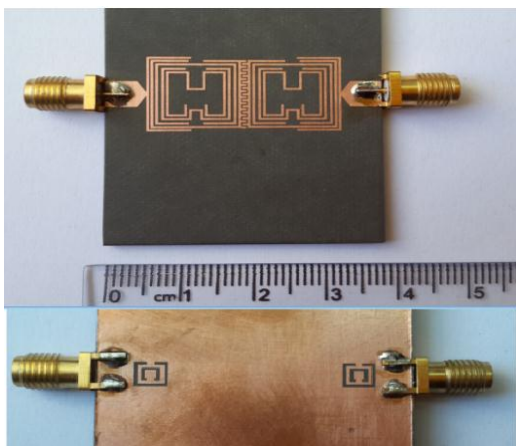
(ب)

شکل ۱۹. مقایسه پاسخ فرکانسی حاصل از شبیه‌سازی با نتایج ساخت برای فیلتر #۱، (الف ضریب انعکاس، ب ضریب انتقال).

در ادامه، فیلتر شماره ۲ بخش قبل نیز بر روی زیرلایه با ضخامت ۱/۵۷۵mm ساخته شده و تصویر آن در شکل ۲۰ نشان داده شده است. پاسخ فرکانسی این فیلتر نیز اندازه‌گیری شده و با نتایج شبیه‌سازی در شکل ۲۱ مقایسه شده‌است. مجدداً بین نتایج اندازه‌گیری و نتایج شبیه‌سازی تطابق کلی خوبی وجود دارد. ابعاد این فیلتر (بدون خط تغذیه و کانکتورها، به منظور مقایسه با مقالات دیگر)، $۱۳\text{mm} \times ۳۰\text{mm}$ و یا بر



شکل ۱۷. تصویر فیلتر شماره یک (#۱) ساخته شده روی زیرلایه با ضخامت 0.787mm .



شکل ۲۰. تصویر نمای بالا و پشتی فیلتر دوم ساخته شده.

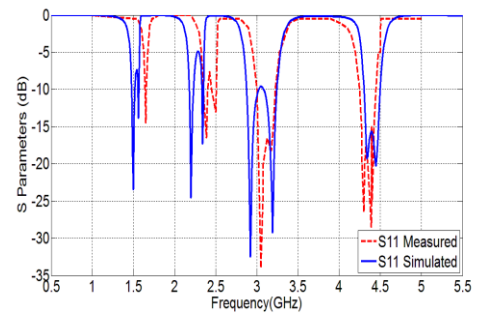


شکل ۱۸. ضریب انتقال اندازه‌گیری شده فیلتر شماره یک با استفاده از تحلیل‌گر شبکه.

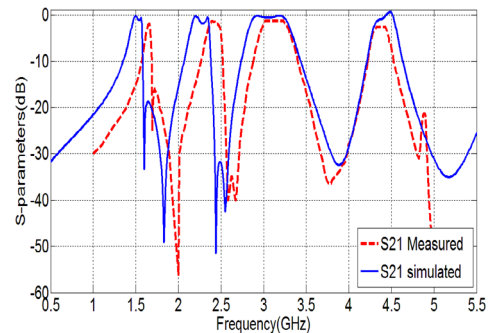
استفاده شد و همچنین برای افزایش پهنای باند، از زیر لایه با ضخامت بیشتر استفاده شد. فرکانس مرکزی باندهای گذر فیلتر نهایی، در شبیه سازی به ترتیب ۱/۵، ۲/۲۵، ۳/۰۷ و ۴/۴۳ و در اندازه گیری نمونه ساخته شده به ترتیب ۱/۶۵، ۲/۱۴، ۳/۱۴ و ۴/۳۸ گیگاهرتز بدست آمد. فیلتر نهایی ساخته شده دارای تلفات باند عبور نسبتا کم، تلفات بازگشتی قابل قبول و پهنای باند نسبی ۳/۶٪، ۷/۴٪، ۱۲/۴٪ و ۴/۹٪ است. اندازه فیلتر ساخته شده $0.23\lambda_g \times 0.1\lambda_g$ است که نسبت به فیلترهای ارائه شده در مراجع [۱۸]، [۱۹] و [۲۰] به ترتیب ۱۸٪، ۶۹٪ و ۴۳٪ کوچک تر شده است.

جدول ۶. مقایسه ساختار پیشنهادی این مقاله (نتایج اندازه گیری) با سه مقاله دیگر.

فیلتر #2 این مقاله	مرجع ۲۰	مرجع ۱۹	مرجع ۱۸	پارامتر	
				فرکانس مرکزی (GHz)	پهنای باند نسبی
باند اول	۱/۶۵	۲/۴	۱/۶	۱/۹۱	فرکانس مرکزی (GHz)
	۳/۶	۶/۷	۷/۶	۱۶/۵	پهنای باند نسبی
	۲	۲	۱/۱	۰/۶	تلفات باند عبور (dB)
باند دوم	۲/۴	۳/۵	۱/۸	۳/۵۵	فرکانس مرکزی (GHz)
	۷/۴	۷/۲	۸/۳	۶/۹	پهنای باند نسبی
	۱/۳	۱/۹	۱/۳	۱/۶۵	تلفات باند عبور (dB)
باند سوم	۳/۱۴	۵/۲	۲/۴۵	۵/۳۶	فرکانس مرکزی (GHz)
	۱۲/۴	۶/۹	۵/۷	۷/۴	پهنای باند نسبی
	۱/۲	۱/۹	۱	۱/۰۵	تلفات باند عبور (dB)
باند چهارم	۴/۳۸	۵/۸	۲/۷	۶/۹۲	فرکانس مرکزی (GHz)
	۴/۹	۵/۳	۳/۷	۵/۴	پهنای باند نسبی
	۲/۴	۱/۹۶	۱/۲	۱/۸۵	تلفات باند عبور (dB)
زیر لایه	۱/۵۷۵	۱/۵۰۸	۱	۰/۵۰۸	ضخامت (mm)
	۲/۳۳	۳/۶۶	۲/۴۵	۲/۲	ضریب گذردهی
ابعاد نهایی	۰/۲۳ × ۰/۱	۰/۲۵ × ۰/۱۶	۰/۳ × ۰/۲۵	۰/۲۳۲ × ۰/۱۲۱	ابعاد بر حسب طول موج ($\lambda_g \times \lambda_g$)
	۰/۰۲۳	۰/۰۴	۰/۰۷۵	۰/۰۲۸	بر حسب λ_g^2



(الف)



(ب)

شکل ۲۱. مقایسه پاسخ فرکانسی حاصل از شبیه سازی با نتایج ساخت فیلتر دوم، (الف) ضریب انعکاس، (ب) ضریب انتقال.

حسب طول موج، $0.23\lambda_g \times 0.1\lambda_g$ است که λ_g طول موج خط ریزنواری ۵۰ اهم روی زیرلایه به کار رفته، در فرکانس مرکزی اولین باند عبور است.

نتایج اندازه گیری فیلتر پیشنهاد شده در این مقاله با فیلتر چهار بانده ساخته شده با تشدیدگرهای چند مدی [۱۸]، فیلتر چهار بانده طراحی شده با استفاده از تشدیدگرهای دو تایی حلقه باز [۱۹] و فیلتر چهار بانده طراحی شده با تشدیدگرهای E شکل [۲۰] مقایسه شده است. نتایج این مقایسه در جدول ۶ مشاهده می شود. در این جدول پارامترهای مختلفی با هم مقایسه شده اند و لذا به طور مطلق نمی توان برتری یکی از این فیلترها را نتیجه گیری نمود، اما می توان مشاهده نمود اندازه فیلتر پیشنهادی این مقاله نسبت به فیلترهای ارائه شده در مراجع [۱۸]، [۱۹] و [۲۰] به ترتیب ۱۸٪، ۶۹٪ و ۴۳٪ کوچک تر شده است.

نتیجه گیری

در این مقاله یک فیلتر میان گذر چهار بانده با استفاده از تشدیدگرهای حلقه ای شکاف دار طراحی و ساخته شد. به منظور افزایش تفکیک پذیری فیلتر، از دو سلول واحد به طور متوالی استفاده شده است. برای افزایش پهنای باند فرکانسی باندهای مختلف فیلتر، از خازن بین انگشتی بین دو سلول واحد

- [11] A. Garcia-Lamperez and M. Salazar-Palma, "Dual band filter with split-ring resonators," in *Microwave Symposium Digest, 2006. IEEE MTT-S International*, 2006, pp. 519-522.
- [12] R. Geschke, B. Jokanovic, and P. Meyer, "Compact triple-band resonators using multiple split-ring resonators," in *Microwave Conference, 2009. EuMC 2009. European*, 2009, pp. 366-369.
- [13] R. H. Geschke, B. Jokanovic, and P. Meyer, "Filter parameter extraction for triple-band composite split-ring resonators and filters," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 59, pp. 1500-1508, 2011.
- [14] C. Caloz and T. Itoh, *Electromagnetic metamaterials: transmission line theory and microwave applications*: John Wiley & Sons, 2005.
- [15] M. Hagensen, "Narrowband Microwave Bandpass Filter Design by Coupling Matrix Synthesis-Demonstration of practical filter design using coupling matrix synthesis and three-dimensional electromagnetic simulation techniques," *Microwave Journal; International ed*, vol. 53, p. 218, 2010.
- [16] A. Ali and Z. Hu, "Negative permittivity meta-material microstrip binomial low-pass filter with sharper cut-off and reduced size," *Microwaves, Antennas & Propagation, IET*, vol. 2, pp. 15-18, 2008.
- [17] I. J. Bahl, *Lumped elements for RF and microwave circuits*: Artech house, 2003.
- [18] J. Xu, W. Wu, and G. Wei, "Compact multi-band bandpass filters with mixed electric and magnetic coupling using multiple-mode resonator," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 63, pp. 3909-3919, 2015.
- [19] B. Wu, F. Qiu, and L. Lin, "Quad-band filter with high skirt selectivity using stub-loaded nested dual-open loop resonators," *Electron. Lett.*, vol. 51, no. 2, pp. 166-168, Jan. 2015
- [20] T. Yan, X.-H. Tang, and J. Wang, "A novel quad-band bandpass filter using short stub loaded E-shaped resonators," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 25, pp. 508-510, 2015.
- [1] H. Miyake, S. Kitazawa, T. Ishizaki, T. Yamada, and Y. Nagatomi, "A miniaturized monolithic dual band filter using ceramic lamination technique for dual mode portable telephones," in *Microwave Symposium Digest, 1997., IEEE MTT-S International*, 1997, pp. 789-792.
- [2] H.-W. Wu and R.-Y. Yang, "A new quad-band bandpass filter using asymmetric stepped impedance resonators," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 21, pp. 203-205, 2011.
- [3] A. M. Abu-Hudrouss, A. B. Jayyousi, and M. J. Lancaster, "Triple-band HTS filter using dual spiral resonators with capacitive-loading," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 18, pp. 1728-1732, 2008.
- [4] K. Huang, T. Chiu, and H.-B. Wu, "Compact LTCC tri-band filter design," in *2007 Asia-Pacific Microwave Conference*, 2007, pp. 1-4.
- [5] X.-P. Chen, K. Wu, and Z.-L. Li, "Dual-band and triple-band substrate integrated waveguide filters with Chebyshev and quasi-elliptic responses," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 55, pp. 2569-2578, 2007.
- [6] C.-W. Tang, L.-P. Lu, C.-W. Shen, and J.-W. Wu, "Design of dual-and triple-passband bandpass filters with interdigital resonators," in *Microwave Symposium Digest, 2008 IEEE MTT-S International*, 2008, pp. 539-542.
- [7] J. García-García, J. Bonache, I. Gil, F. Martín, M. Velázquez-Ahumada, and J. Martel, "Efficient area reduction in microstrip cross-coupled resonator filters by using split rings resonators and spiral resonators," in *Microwave Conference, 2005 European*, 2005, pp. 1-4.
- [8] S. H. Jang and J. C. Lee, "Design of novel cross-coupling elliptic function filters with the miniaturized edge-coupled split ring resonators," *Microwave and optical technology letters*, vol. 45, pp. 495-499, 2005.
- [9] M. Gil, J. Bonache, and F. Martin, "Metamaterial filters: A review," *Metamaterials*, vol. 2, pp. 186-197, 2008.
- [10] J.-W. Fan, C.-H. Liang, and D. Li, "Design of cross-coupled dual-band filter with equal-length split-ring resonators," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 75, pp. 285-293, 2007.

