

# رزوناتور دوبانده CSRR با ضریب کیفیت بالا و کاربردهای آن در طراحی فیلترها و دیپلکسرهای کوچک چند بانده

مهدی حمیدخانی<sup>۱</sup> و فرزاد مهاجری<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>گروه مهندسی برق، دانشجوی دکتری دانشگاه شیراز، Mehdi.hamidkhani@gmail.com

<sup>۲</sup>گروه مهندسی برق، استادیار دانشگاه شیراز، Mohajeri@shirazu.ac.ir

چکیده - در سیستم‌های مدرن مخابراتی میکروویوی، رزوناتورهای کم تلف با ضریب کیفیت بالا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله یک رزوناتور CSRR نوین دوبانده با ضریب کیفیت بالا معرفی و بررسی می‌شود که با استفاده از تکنولوژی SIW روی یک سطح موجبر پیاده‌سازی شده است. ساختار پیشنهادی شرایط انتشار موج در دو باند عبور (حدود ۴/۷ و ۵/۳ گیگاهرتز) زیر فرکانس قطع موجبر (حدود ۹ گیگاهرتز) را فراهم می‌کند. ویژگی و مزیت این ساختار نسبت به سایر رزوناتورهای مسطح مشابه پیشنهادی در مراجع مختلف، ضریب کیفیت و در صد کوچک‌سازی بالاتر آن است. تلفات رزوناتور پیشنهادی کمتر از ۲ دسیبل و ضریب کیفیت بدون بار آن حدود ۱۸۰۰ است. در انتهای این مقاله دو کاربرد این رزوناتور در طراحی فیلترهای میان گذر کوچک چند بانده با ضریب کیفیت بالا و دیپلکسرهای کوچک چند بانده با پهنای باند عبور پایین مورد بررسی قرار گرفته است. ضمن اینکه یکی از کاربردهای مهم دیگر رزوناتور پیشنهادی، طراحی اسیلاتورهای مسطح با نویز فاز پایین است.

کلید واژه- دیپلکسر، رزوناتور CSRR، ضریب کیفیت بالا، فیلتر چند بانده.

## ۱- مقدمه

ضریب گذردهی منفی زیر فرکانس قطع مد اصلی TE خود هستند [۳-۶]. از آنجایی که رزوناتورهای CSRR هم ضریب گذردهی منفی از خود نشان می‌دهند، استفاده از این رزوناتور در موجبرها منجر به مثبت شدن ضریب گذردهی زیر فرکانس قطع مد اصلی خواهد شد. بر این اساس، یک باند عبور پیش‌رو زیر فرکانس قطع در موجبرها خواهیم داشت.

از آنجایی که ترکیب رزوناتورهای CSRR با یک موجبر مشکل است، ما از تکنولوژی SIW<sup>۵</sup> استفاده کردیم که نوع بسیار مناسبی از ساختارهای موج هدایتی مسطح است. این تکنولوژی روی یک زیر لایه مسطح با آرایه‌های پرئودیک خطی از پین‌های فلزی روی برد مدار چاپی تولید می‌شود. یک نمونه ساختاری که در آن از تکنولوژی SIW استفاده شده به همراه روابط مورد نیاز در شکل ۱ نشان داده شده است.

یکی از ویژگی‌های مهم هر سیستم و دستگاه الکتریکی و مخابراتی، تاخیر گروه<sup>۶</sup> آن است. تاخیر گروه در واقع اعوجاج

متامتریال‌ها یک نمونه پرکاربرد در علم الکترومغناطیس هستند. آنها منجر به کاربردهای بی‌نظیر مایکروویوی می‌شوند [۱]. استفاده از متامتریال‌ها در طراحی رزوناتورهای یکی از این کاربردهای مهم است. رزوناتورهای SRR<sup>۱</sup> و دوگان آنها رزوناتورهای CSRR<sup>۲</sup>، جهت پشتیبانی از باندهای عبور پیش‌رو<sup>۳</sup> و عقب‌رو<sup>۴</sup> با خطوط مایکرواستریپی متامتریالی دارای ضریب گذردهی منفی ترکیب می‌شوند [۲ و ۳].

ما در این مقاله ساختارهای موجبری را به منظور استفاده از متامتریال‌ها انتخاب نمودیم. دلیل اول این است که موجبرها از خود ضریب کیفیت بالایی نشان می‌دهند که می‌تواند در طراحی اجزاء کم نویز و کم تلف با امکان دسترسی به توان خوب استفاده شود. دلیل دوم هم این است که موجبرها قادر به فراهم نمودن

<sup>۱</sup> - Split-ring resonator

<sup>۲</sup> - Complementary split-ring resonator

<sup>۳</sup> - forward

<sup>۴</sup> - backward

<sup>۵</sup> - Substrate integrated waveguide

<sup>۶</sup> - group delay

## ۲- ساختار رزوناتور CSRR پیشنهادی

شکل ۲، نمای بالایی ساختار رزوناتور CSRR پیشنهادی پیاده‌سازی شده با تکنولوژی SIW را نشان می‌دهد، که شامل دو ردیف آرایه پین‌های فلزی در زیرلایه Rogers RT/Duroid 5880 و دو حلقه شکافی غیر یکسان واقع شده روی پوشش فلزی موجبر است. شکل و ابعاد حلقه‌های شکافی به گونه‌ای تنظیم شده است که به ازای هر حلقه شکافی یک باند عبور زیر فرکانس قطع موجبر خواهیم داشت و هر باند عبور شامل یک قطب و صفر انتقال نزدیک به هم می‌باشد. نزدیکی قطب و صفر انتقال منجر به یک تغییرات ناگهانی در فاز انتقالی با تغییرات کوچک در فرکانس می‌شود که به معنای داشتن تاخیر گروه بالا در هر باند عبور است.

علاوه بر این ابعاد حلقه‌های شکافی به گونه‌ای بهینه شده است که دو باند عبور تقریباً نزدیک به هم قرار بگیرند، تا در این صورت باند عبور دوم میان دو قطب واقع شود. و بنابراین در باند عبور دوم با یک افزایش شگرف در میزان تاخیر گروه روبرو خواهیم شد. در نتیجه از آنجایی که تاخیر گروه و ضریب کیفیت رابطه مستقیم با یکدیگر دارند، امکان حصول به یک رزوناتور دو بانده با ضریب کیفیت بالا در هر دو باند به خصوص باند دوم میسر می‌شود.

اگرچه در این رزوناتور امکان دستیابی به تاخیر گروه بیشتر هم وجود دارد، اما اثرات مخرب تلفات داخلی مانع می‌شود. در واقع یک مصالحه میان افزایش تاخیر گروه و کاهش تلفات داخلی در باند عبور وجود دارد. در اینجا طراحی به گونه‌ای انجام شده است که بتوان در این ساختار به بیشترین تاخیر گروه ممکن (که معادل بیشترین ضریب کیفیت ممکن است) با داشتن تلفات داخلی کمتر از ۲ دسیبل دست یافت.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی و مدل مداری برای پاسخ‌های انتقالی و تاخیر گروه این رزوناتور به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده است. همان‌طور که مشخص است، این رزوناتور دارای دو باند عبور در فرکانس‌های حدود ۴/۷ و ۵/۳ گیگاهرتز می‌باشد. تاخیر گروه در این دو باند فرکانسی به ترتیب حدود ۴ و ۲۳ نانو ثانیه و تلفات داخلی به ترتیب حدود ۰/۵ و ۲ دسیبل می‌باشد. همچنین نتایج حاکی از ماکزیمم ضریب کیفیت بدون بار حدود ۱۸۰۰ برای باند دوم می‌باشد. بنابراین این رزوناتور، بسیار مناسب جهت طراحی یک فیلتر چند بانده باند باریک یا یک اسلاتور با نویز فاز پایین است. ضمن اینکه اگر بخواهیم یک مقایسه‌ای با ساختار پیشنهاد شده در مرجع [۳] داشته باشیم،

فازی دستگاه، زمان گذر یک سیگنال از طریق یک دستگاه بر حسب فرکانس و مشتق مشخصات فازی دستگاه بر حسب فرکانس است. بنابراین تاخیر گروه به صورت منفی مشتق مشخصه فاز دستگاه تحت تست بر حسب فرکانس تعریف می‌شود:

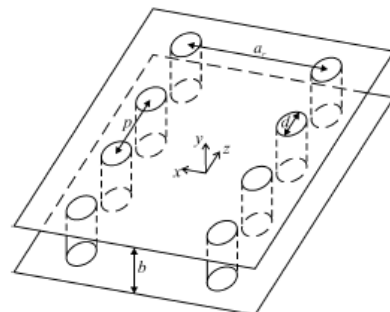
$$\tau_d = -\frac{1}{360} \cdot \frac{d\varphi}{df} \quad (۱)$$

که در این رابطه  $\tau_d$  همان تاخیر گروه،  $f$  فرکانس و  $\varphi$  فاز  $S_{11}$  یا  $S_{21}$  بر حسب درجه می‌باشد. تاخیر گروه می‌تواند با ضریب انعکاس مرتبط باشد که تاخیر گروه دستگاه نامیده می‌شود. یا اینکه می‌تواند با ضریب انتقال مرتبط باشد که تاخیر گروه انتقالی (داخلی) نامیده می‌شود. ضریب کیفیت خارجی مرتبط با تاخیر گروه دستگاه و انتقالی به ترتیب از رابطه‌های (۲) و (۳) قابل محاسبه است.

$$Q_e = \frac{\omega_0 \cdot \tau_{s11}(\omega_0)}{4} \quad (۲)$$

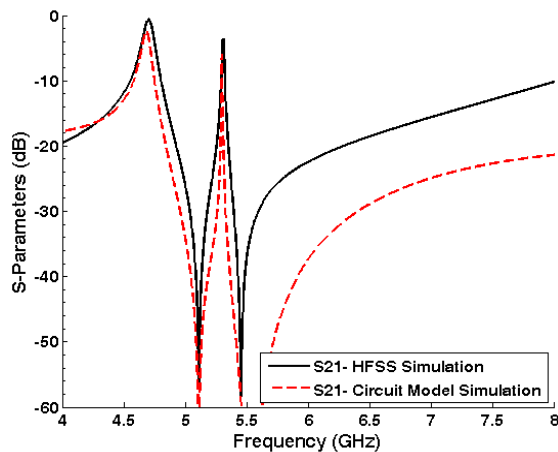
$$Q_e = \frac{\omega_0 \cdot \tau_{s21}(\omega_0)}{2} \quad (۳)$$

که  $\omega_0$  فرکانس زاویه‌ای است. در ادامه جزئیات طراحی یک رزوناتور CSRR نوین دوبانده با ضریب کیفیت بالا مطرح می‌شود. این رزوناتور زیر فرکانس قطع اولیه موجبر کار می‌کند که منجر به یک درجه بالای کوچک‌سازی می‌شود. ویژگی‌های مهم ساختار پیشنهادی شامل تلفات داخلی کم، در صد کوچک‌سازی بالا و تاخیر گروه بالا در باند عبور است که منجر به ضریب کیفیت بالا در باند عبور می‌شود. در انتهای این مقاله دو کاربرد این رزوناتور در طراحی فیلترهای میان گذر کوچک چند بانده با ضریب کیفیت بالا و دیپلکسرهای کوچک چند بانده با پهنای باند عبور نسبتاً پایین مورد بررسی قرار گرفته است. ضمن اینکه یکی از کاربردهای مهم دیگر رزوناتور پیشنهادی، طراحی اسلاتورهای مسطح با نویز فاز پایین است.

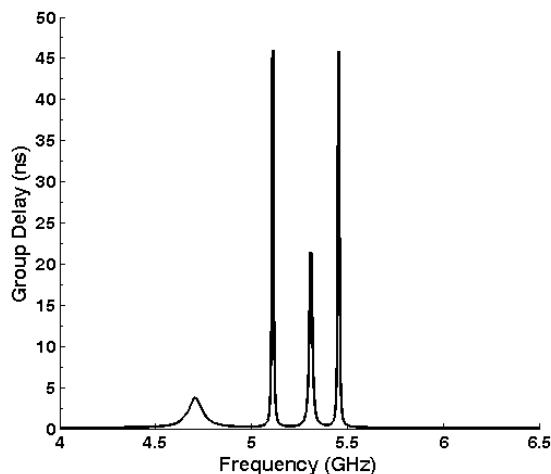


$$\begin{aligned} p &> d & \frac{\alpha_l}{k_0} &< 1 \times 10^{-4} \\ \frac{p}{\lambda_c} &< 0.25 & \frac{p}{\lambda_c} &> 0.05. \end{aligned}$$

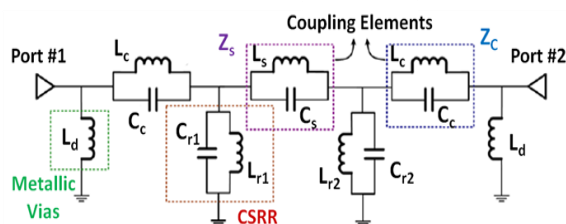
شکل ۱: تکنولوژی SIW



(ب)  
ادامه شکل ۳



شکل ۴: تاخیر گروه مرتبط با رزوناتور پیشنهادی.



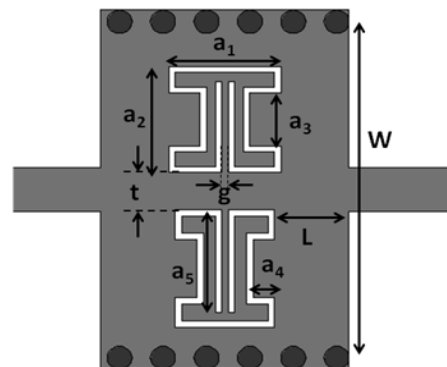
شکل ۵: مدار معادل رزوناتور پیشنهادی؛ پارامترهای الکتریکی مدل مدار معادل عبارتند از:  $L_d=4\text{nH}$ ,  $L_c=1\text{nH}$ ,  $C_c=0.97\text{PF}$ ,  $L_s=0.9\text{nH}$ ,  $C_s=0.9\text{PF}$ ,  $L_{r1}=1.35\text{nH}$ ,  $C_{r1}=1.21\text{PF}$ ,  $L_{r2}=0.65\text{nH}$ ,  $C_{r2}=1.52\text{PF}$ .

### ۳- فیلتر چند بانده

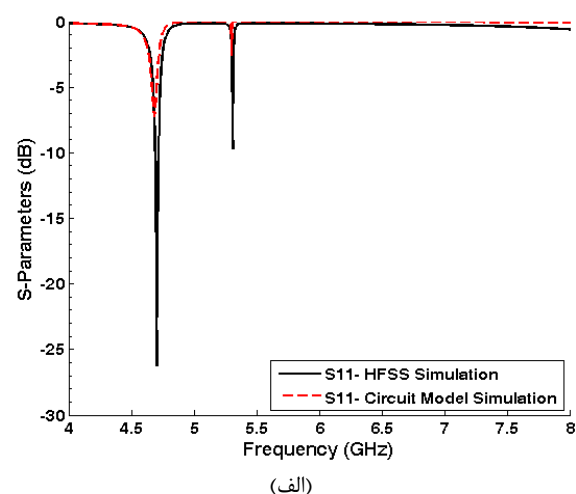
ساختار رزوناتور پیشنهادی در قسمت قبل، می‌تواند به عنوان یک فیلتر میان گذر دو بانده عمل کند. حال می‌توان با قرار دادن دو سلول از رزوناتور پیشنهادی پشت سر هم با ابعاد متفاوت (مطابق شکل ۶) به یک فیلتر میان گذر چهار بانده با ضریب کیفیت بالا در باندهای عبور (باند باریک) رسید. زیرلایه از

اولا ساختار پایه‌ای پیشنهاد شده توسط Itoh و همکارانش تک باند است و ثانيا در آن ساختار نهایتاً می‌توان به تاخیر گروه حدود ۴ نانو ثانیه رسید.

مدل مدار معادل متناظر با این فیلتر، که در شکل ۵ قابل مشاهده است، با هدف طراحی بهتر ارائه شده است. در این مدل ساده از تلفات ماده صرف نظر شده است. پهن‌های تکنولوژی SIW می‌تواند به صورت یک استاب اتصال کوتاه در نظر گرفته شود و با یک سلف ( $L_d$ ) مدل شود. حلقه‌های شکافی را می‌توان با یک منبع رزونانس مدل کرد که از سلف و خازن ( $L_r$ ,  $C_r$ ) با اتصال موازی تشکیل شده است. اتصال سلفی شکاف میان خط انتقال موجبری و حلقه‌های شکافی به صورت  $L_c$  و اتصال خازنی میان آنها به صورت  $C_c$  در نظر گرفته شده است. کوپلینگ میان حلقه‌های شکافی به صورت یک منبع رزونانسی با  $L_s$  و  $C_s$  مدل شده است.



شکل ۶: ساختار رزوناتور CSRR پیشنهادی؛ مقادیر پارامترهای حلقه شکافی بالایی عبارتند از:  $L=2.2\text{mm}$ ,  $g=0.2\text{mm}$ ,  $a_1=3.6\text{mm}$ ,  $a_2=3.6\text{mm}$ ,  $a_3=1.8\text{mm}$ ,  $a_4=1.2\text{mm}$ ,  $a_5=3.1\text{mm}$  و برای حلقه شکافی پایینی عبارتند از:  $L=2.4\text{mm}$ ,  $g=0.2\text{mm}$ ,  $a_1=3.2\text{mm}$ ,  $a_2=4\text{mm}$ ,  $a_3=2\text{mm}$ ,  $a_4=0.9\text{mm}$ ,  $a_5=3.5\text{mm}$  و مقادیر  $t=1.3\text{mm}$ ,  $W=11.5\text{mm}$  می‌باشد.



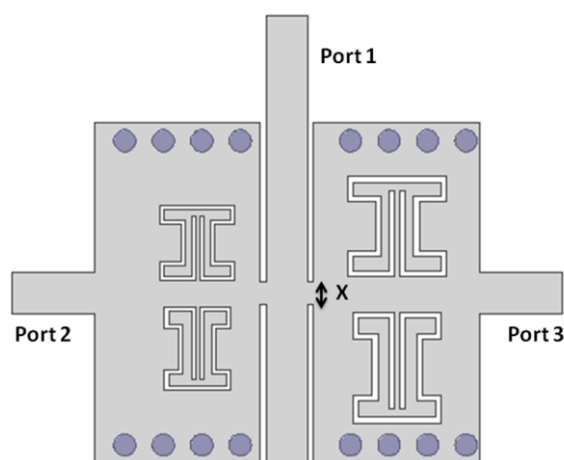
شکل ۷: پاسخ‌های انتقالی رزوناتور پیشنهادی؛ (الف) پارامتر  $S_{11}$  و (ب) پارامتر

$S_{21}$

خوبی از خود نشان می‌دهد. این دیپلکسر شامل سه پورت و دو فیلتر پشت سر هم است که زیر فرکانس قطع موجر پیاده‌سازی شده با تکنولوژی SIW عمل خواهد کرد. زیرلایه از جنس Rogers RT/Duroid 5880 با ضخامت  $0.8/5$  میلی‌متر و ثابت دی‌الکتریک  $2.2$  است. ساختار این دیپلکسر در شکل ۸ مشاهده می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی این دیپلکسر در شکل ۹ قابل مشاهده است. نتایج حاکی از این است که، در فرکانس‌های حدود  $4.66/5$  و  $5.31/5$  سیگنال ورودی از پورت ۱ به پورت ۳ به ترتیب با تلفات داخلی حدود  $2.5/2$  و  $8/2$  دسیبل و تلفات بازگشتی حدود  $19$  و  $15$  دسیبل می‌رسد. در فرکانس‌های حدود  $6.36/6$  و  $7.17/7$  سیگنال ورودی از پورت ۱ به پورت ۲ به ترتیب با تلفات داخلی حدود  $1.8/1$  و  $3/3$  دسیبل و تلفات بازگشتی حدود  $25$  و  $23.5/23$  دسیبل می‌رسد. ضمن اینکه ایزولاسیون در کلیه باندهای عبور بهتر از  $25$  دسیبل است. بدین ترتیب دیپلکسر پیشنهادی دارای ویژگی‌هایی از قبیل درصد کوچک‌سازی بالا، ایزولاسیون بالا، تلفات کم و امکان ارسال سیگنال در دو باند فرکانسی در هر یک از دو مسیر می‌باشد.

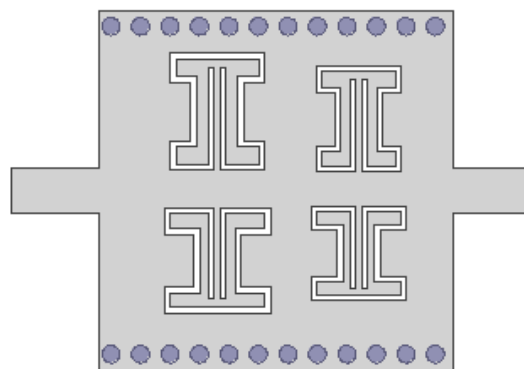
#### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک رزوناتور CSRR نوین دوبانده با ضریب کیفیت بالا در هر دو باند به خصوص یکی از باندهای معرفی و بررسی شد. سپس با استفاده از این رزوناتور، یک فیلتر چهار بانده کوچک کم تلف و یک دیپلکسر کوچک کم تلف با ایزولاسیون بهتر از  $25$  دسیبل و امکان ارسال سیگنال در دو باند فرکانسی در هر یک از دو مسیر معرفی شد.

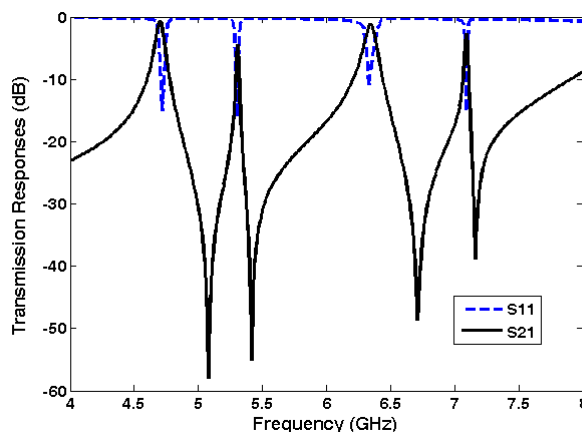


شکل ۸: ساختار دیپلکسر CSRR پیشنهادی. ابعاد دو حلقه شکافی سمت راستی، همان ابعاد داده شده در شکل ۲ می‌باشد؛ و ابعاد دو حلقه شکافی سمت چپی همان اعداد در مقیاس  $0.75/0$  است ( $X=0.75\lambda_{mm}$ ).

جنس Rogers RT/Duroid 5880 با ضخامت  $0.8/5$  میلی‌متر و ثابت دی‌الکتریک  $2.2$  است. موقعیت هر باند فرکانسی با تغییر در ابعاد حلقه شکافی مربوطه می‌تواند کنترل شود. در واقع در ساختار فیلتر چهار بانده شکل ۶، هر حلقه شکافی منجر به یک باند عبور زیر فرکانس قطع موجر می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی این فیلتر در نرم‌افزار HFSS در شکل ۷ قابل مشاهده است. نتایج حاکی از این است که، باندهای عبور در فرکانس‌های حدود  $4.7/5$ ،  $5.3/5$ ،  $6.3/6$  و  $7.1/7$  گیگاهرتز به ترتیب دارای پهنای باندهای حدود  $40$ ،  $80$ ،  $50$  و  $10$  مگاهرتز و تلفات داخلی حدود  $0.6/0$ ،  $3.6/1$  و  $2.5/2$  دسیبل هستند.



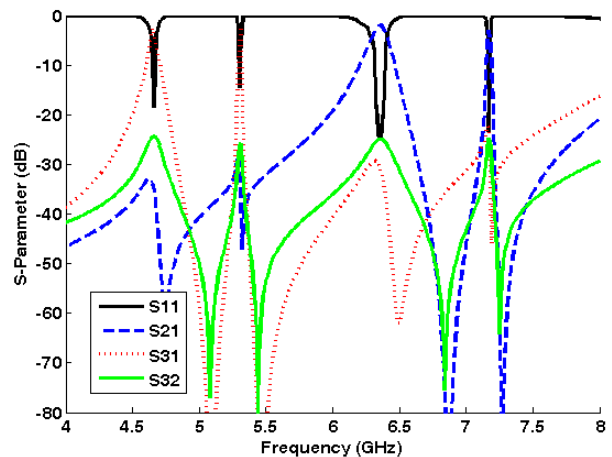
شکل ۶: ساختار فیلتر CSRR چهار بانده پیشنهادی. ابعاد دو حلقه شکافی سمت چپی، همان ابعاد داده شده در شکل ۲ می‌باشد؛ و ابعاد دو حلقه شکافی سمت راستی همان اعداد در مقیاس  $0.75/0$  است.



شکل ۷: پاسخ‌های انتقالی شبیه‌سازی شده فیلتر پیشنهادی.

#### ۴- دیپلکسر چند بانده

دیپلکسر، یکی از اجزاء کلیدی فرستنده‌ها و گیرنده‌های مخابراتی است که به شدت روی عملکرد سیستم تأثیر گذار است [۷]. در این قسمت یک دیپلکسر مسطح با استفاده از رزوناتور CSRR پیشنهادی مورد بررسی قرار خواهد گرفت که عملکرد



شکل ۹: پاسخ‌های انتقالی و ایزولاسیون شبیه‌سازی شده برای دیپلکسر پیشنهادی.

## مراجع

- [1] Caloz, C.; Rennings, A., "Overview of resonant metamaterial antennas," Antennas and Propagation, 2009. EuCAP 2009. 3rd European Conference on , vol., no., pp.615,619, 23-27 March 2009.
- [2] Baena, J.D.; Bonache, J.; Martin, F.; Sillero, R.M.; Falcone, F.; Lopetegi, T.; Laso, M.A.G.; Garcia-Garcia, J.; Gil, I.; Portillo, M.F.; Sorolla, M., "Equivalent-circuit models for split-ring resonators and complementary split-ring resonators coupled to planar transmission lines," Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on , vol.53, no.4, pp.1451,1461, April 2005.
- [3] Yuan Dan Dong; Tao Yang; Itoh, T., "Substrate Integrated Waveguide Loaded by Complementary Split-Ring Resonators and Its Applications to Miniaturized Waveguide Filters," Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on , vol.57, no.9, pp.2211,2223, Sept. 2009.
- [4] X.-C. Zhang, Z.-Y. Yu, and J. Xu, "Novel Band-Pass Substrate Integrated Waveguide (SIW) Filter Based on Complementary Split Ring Resonators (Csrrs)," Progress In Electromagnetics Research, PIER 72, 39-46, 2007.
- [5] Dong, Y.; Itoh, T., "Miniaturized dual-band substrate integrated waveguide filters using complementary split-ring resonators," Microwave Symposium Digest (MTT), 2011 IEEE MTT-S International , vol., no., pp.1,1, 5-10 June 2011.
- [6] Q.-L. Zhang, W.-Y. Yin, S. He, and L.-S. Wu, "Evanescent-Mode Substrate Integrated Waveguide (SIW) Filters Implemented with Complementary Split Ring Resonators," Progress In Electromagnetics Research, Vol. 111, 419{432, 2011.
- [7] Yuandan Dong; Itoh, T., "Substrate Integrated Waveguide Loaded by Complementary Split-Ring Resonators for Miniaturized Diplexer Design," in Microwave and Wireless Components Letters, IEEE, vol.21, no.1, pp.10-12, jan. 2011.