

ارائه یک فیلتر باند وسیع مایکروویو با استفاده از مکمل رینگ‌های رزونانسی شکاف‌دار و رینگ مایکرواستریپ

مصطفی دانائیان^۱، مسعود موحدی^۲، عبدالعلی عبدی پور^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد- بخش مهندسی برق- دانشگاه شهید باهنر کرمان

^۲ استادیار- بخش مهندسی برق- دانشگاه شهید باهنر کرمان

^۳ استاد - دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

movahhedi@ieee.org

چکیده: در این مقاله، یک فیلتر جدید باند وسیع^۱ فشرده با لبه‌های بسیار تیز با استفاده از مکمل رینگ‌های رزونانسی شکاف‌دار^۲ و رینگ مایکرواستریپ ارائه می‌شود. روش طراحی بدین صورت است که با قرار دادن یک رینگ مایکرواستریپ مستطیل شکل میان دو گپ تزویج موازی^۳ چهار قطب انتقال تولید می‌شود. همچنین با ترکیب مکمل رینگ‌های رزونانسی با ابعاد متفاوت و خازن سری، دو قطب دیگر در نزدیکی لبه‌های بالایی و پایینی فیلتر اضافه می‌گردد که منجر به تیز شدن لبه‌ها خواهد شد. این فیلتر دارای پهنای باندی است که محدوده‌ی 2.85 GHz تا 11.4 GHz را پوشش می‌دهد، به عبارت دیگر دارای پهنای باند کسری^۴ 120% می‌باشد.

واژگان کلیدی: فیلترهای میان‌گذر باند وسیع، مکمل رینگ‌های رزونانسی شکاف‌دار (CSRRs)، رینگ مایکرواستریپ، گپ تزویج موازی.

۱- مقدمه

امروزه، متامتریال یا فراماده یکی از مباحث جدید در زمینه مهندسی مخابرات در جهان به شمار می‌رود. لذا در سال‌های اخیر علاقه زیادی به تحقیق در زمینه فراماده ایجاد شده است. فراماده یک ساختار الکترومغناطیسی مصنوعی و همگن با خواص فیزیکی غیر عادی است که به صورت طبیعی در محیط موجود نمی‌باشند [1]. به دلیل خواص منحصر به فردی که خطوط فراماده از خود نشان می‌دهند، در طراحی فیلترهای مایکروویو استفاده از این خطوط محاسنی از قبیل: تیز بودن لبه‌های فیلتر، کوچک شدن ابعاد و ... را به دنبال خواهند داشت. از بین روش‌های مختلف پیاده‌سازی خطوط فراماده، خطوط انتقال فراماده مبتنی بر رینگ‌های رزونانسی شکاف‌دار (SRR) و مکمل رینگ‌های رزونانسی شکاف‌دار (CSRR) عملکرد بهتری در زمینه طراحی فیلترها از خود نشان می‌دهند. به همین دلیل در این زمینه، کاربرد فراوانی پیدا کرده‌اند [1]. فیلترهای میانگذر مبتنی بر ساختارهای رزونانسی SRRها و CSRRها در مقایسه با فیلترهای متعارف دیگر می‌توانند دارای ابعاد کوچکتری باشند. از طرفی میزان تضعیف آنها در خارج از باند زیاد بوده و با هر دو تکنولوژی مایکرواستریپ و CPW سازگار می‌باشند [1]. ذکر این نکته لازم است که خطوط انتقال فراماده مبتنی بر CSRR اگر به تنهایی استفاده شوند در فرکانس رزونانس خود یک صفر انتقال از خود نشان می‌دهند. اما در صورتی که این نوع رینگ‌ها

¹ Ultra Wide Band (UWB)

² Complementary Split Rings Resonators (CSRRs)

³ Spur-line

⁴ Fractional Bandwidth (FBW)

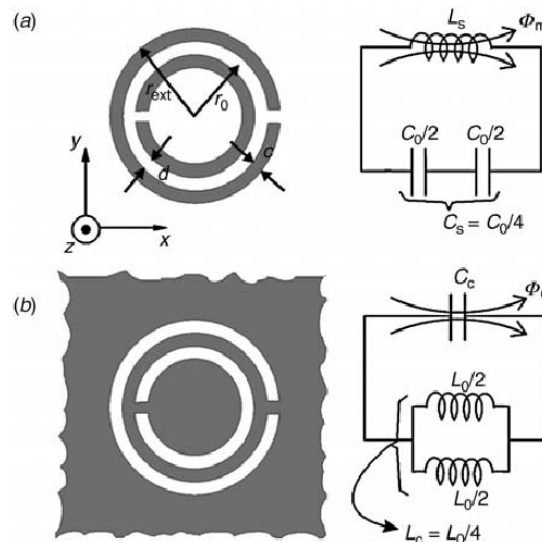
با خازن‌های سری همراه شوند آنگاه در فرکانس رزونانس به جای صفر یک قطب انتقال از خود نشان خواهند داد [1,3]. از طرف دیگر در مخابرات بی‌سیم سرعت بالا، سیستم‌های باند وسیع توجه زیادی را در سال‌های اخیر به خود جلب نموده‌اند. لذا طراحی و ساخت سیستم‌های مختلف مخابراتی و بلوک‌های آنها از جمله فیلترهای میانگذر که در این باند مورد استفاده قرار می‌گیرند، به منظور بالا بردن توانایی این نوع ساختارها از قبیل تیز بودن لبه‌ها، تلفات کم و مهمتر از همه ساختاری با ابعاد کوچک و هزینه‌ی ساخت کم، مورد توجه زیاد محققان قرار گرفته است.

۲- مکمل و دوگان حلقه‌های تشدید (SRRs) (CSRRs)

مکمل رینگ‌های رزونانسی شکاف دار (CSRRs) می‌توانند یک عضو جایگزین رینگ‌های رزونانسی شکاف دار (SRRs) در طراحی خطوط انتقال فراماده بر اساس المان‌های رزونانسی باشند که قادر خواهند بود ϵ منفی تولید نمایند (به جای ϵ منفی). با توجه به مفهوم دوگانی و مکملی، CSRR می‌تواند از ساختار SRR به طور مستقیم مشتق شود. این جزء که در فناوری صفحه‌ای به عنوان تصویر منفی SRR تعریف می‌شود می‌تواند رفتار الکترومغناطیسی از خود نشان دهد که تقریباً دوگان رفتار SRR می‌باشد. به طور مشخص، از هر محیط تشکیل شده از CSRRها، ϵ موثر منفی انتظار می‌رود در حالی که رفتار μ منفی از یک محیط معادل بر اساس SRRها ناشی می‌شود.

۲-۱- خواص الکترومغناطیسی CSRRs

همانطور که می‌دانیم، ساختار SRR مانند یک رزوناتور LC که می‌تواند با یک شار مغناطیسی خارجی تحریک شده و خاصیت دیامغناطیسی شدیدی بالای اولین فرکانس رزونانس خود نشان دهد رفتار می‌کند. از طرفی، مکمل یک ساختار فلزی صفحه‌ای، با جایگزینی قسمت‌های فلزی ساختار اصلی با جاهای خالی (شکاف‌ها) و شکاف‌های آن با صفحه‌های فلزی بدست می‌آید. شکل (۱) ساختار SRR و دوگان آن یعنی CSRR را به همراه مدار معادل آن‌ها نشان می‌دهد. با وجود فرض تقارن، ثابت می‌شود که اگر ضخامت صفحه‌ی فلزی تقریباً صفر بوده و هدایت آن نیز بی‌نهایت باشد، شکاف‌ها هم مانند هادی‌های مغناطیسی کامل عمل خواهند کرد. در این حالت، ساختار مکمل و اصلی به طور موثر و عملی



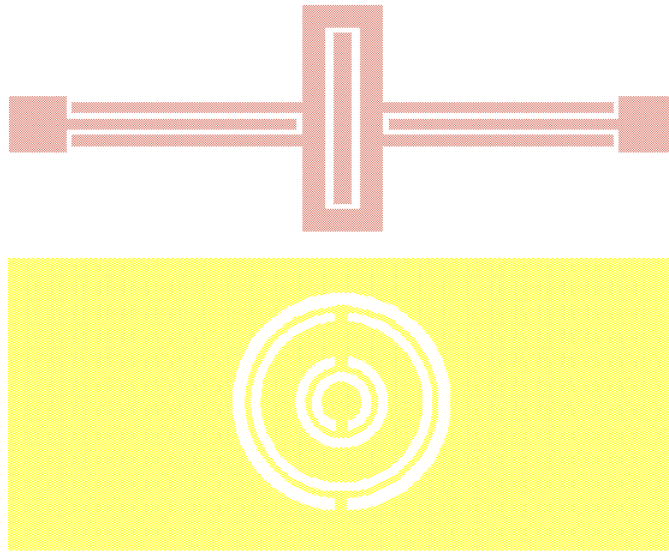
شکل (۱): ساختار (a) SRR و (b) CSRR و همچنین مدار معادل آن‌ها

دوگان یکدیگر خواهند بود. لذا تحت این شرایط ایده‌آل، یک رفتار کاملاً دوگان برای مکمل CSRRها یعنی CSRRها انتظار می‌رود. از آنجاییکه SRRها می‌توانند به عنوان یک دو قطبی مغناطیسی تشدید در نظر گرفته شوند که با یک میدان مغناطیسی خارجی و محوری تحریک می‌شوند، CSRRها اساساً مانند یک دو قطبی الکتریکی عمل خواهند کرد که همان فرکانس رزونانس را داشته و با یک میدان الکتریکی خارجی و محوری تحریک می‌گردند [1].

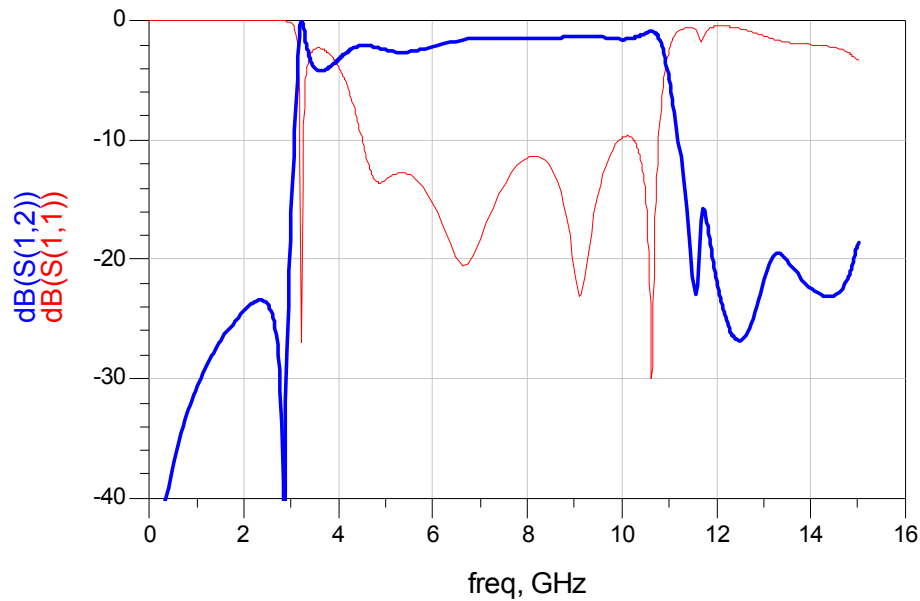
از آنجاییکه ساختارهای SRR در مجاورت فرکانس رزونانس یا تشدید خود μ منفی از خود نشان می‌دهند، با توجه به خاصیت دوگانی مشاهده می‌شود که CSRRها نیز در مجاورت فرکانس تشدید دارای ϵ منفی خواهند بود. لذا با توجه به این خصوصیت، از انتشار سیگنال در یک باند باریک در این ساختارها جلوگیری می‌شود. حال برای ساخت یک محیط دست چپی (LH) و انتشار سیگنال به صورت عقبگرد، المان‌های دیگری که قادر به فراهم کردن μ منفی هستند نیز باید به ساختار اضافه شوند. μ منفی نیز با استفاده از گپ‌های سری که در خط میزبان حک می‌شوند بدست خواهد آمد. این گپ‌ها باعث می‌شوند که ساختار مانند یک پلاسمای مغناطیسی عمل کرده و تا فرکانس تشدید، μ از خود نشان دهند. این فرکانس تشدید بستگی به مدار تشدید تشکیل شده از خازن گپ و اندوکتانس خط انتقال در هر سلول دارد. از این رو برای آنکه محیطی داشته باشیم که به طور همزمان μ و ϵ ایجاد نماید باید در طراحی خط LH از CSRRها و گپ‌های سری، استفاده نماییم.

۳ - طراحی فیلتر

با توجه به مستندات مرجع [2]، با اضافه شدن رینگ میکرواستریپ میان دو گپ تزویج موازی، دو قطب انتقال داخل باند عبور تولید خواهد شد. بر این اساس، ساختار فیلتر پیشنهادی شکل (۲) از یک رینگ مستطیلی میکرواستریپ تشکیل شده که در مقایسه با ساختار فیلتر ارائه شده در [2] به جای یک گپ تزویج موازی از دو گپ تزویج موازی در هر طرف رینگ میکرواستریپ استفاده گردیده است. در این حالت، با ایجاد این تزویج در سطح مقطع عرضی میان خطوط تغذیه‌ی ورودی و خروجی، دو قطب تضعیف در هر طرف باند عبور، علاوه بر دو قطبی که رینگ میکرواستریپ ایجاد می‌کند، به ساختار اضافه می‌شود. لذا استفاده از این تکنیک به پهن‌تر شدن پهنای باند منجر شده و ساختار، دارای مشخصه‌ی باند وسیع می‌گردد. از طرف دیگر از دو مکمل رینگ‌های رزونانسی با ابعاد مختلف در پشت ساختار استفاده گردیده که بدون خازن سری دو صفر در فرکانس‌های 3.1 GHz و 10.6 GHz به ساختار اضافه می‌کنند. به منظور ایجاد خازن سری در ساختار و تبدیل دو صفر بوجود آمده از مکمل رینگ‌های رزونانسی به دو قطب انتقال [3]، یک استریپ به صورت موازی داخل رینگ میکرواستریپ (همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده) تعبیه گردیده است. بنابراین دو صفر در فرکانس‌های 3.1 GHz و 10.6 GHz به دو قطب تبدیل می‌شوند که علاوه بر افزایش پهنای باند، به دلیل قرار گرفتن این دو قطب دقیقاً در فرکانس لبه‌های فیلتر، بسیار تیز شدن این لبه‌ها را به دنبال خواهد داشت. این ساختار علاوه بر پاسخ فرکانسی بسیار مناسب، ابعاد بسیار کوچکی به اندازه $9.8 * 4.4 \text{ mm}^2$ اشغال می‌کند. در این ساختار از زیر لایه‌ی RT/Duroid6010 با ثابت دی الکتریک 10.2 و ضخامت 1.27 mm استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی این فیلتر در شکل (۳) با استفاده از نرم افزار شبیه ساز الکترومغناطیسی ADS ارائه گردیده است. همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود میزان S_{11} در باند عبور کمتر از -1.6 dB است که بیان‌کننده‌ی توانایی بالای این فیلتر در عبور سیگنال و انتقال توان با حداقل تلفات می‌باشد. همچنین میزان S_{11} در باند عبور زیر -10 dB است که این پارامتر نیز بیانگر میزان کم توان برگشتی به ده‌ها نهمی ورودی و تلفات کم این فیلتر است.



شکل ۲: ساختار فیلتر پیشنهاد شده (لایه‌های بالایی و پایینی)



شکل ۲: نتایج شبیه سازی پارامترهای S فیلتر پیشنهادی

نهایتاً در جدول (۱) فیلتر پیشنهادی با پنج فیلتر باند وسیع دیگر از جنبه های مختلف مثل پهنای باند کسری، تیز بودن لبه های فیلتر، میزان انتقال توان به دهانه‌ی خروجی، میزان تضعیف داخل باند و ابعاد فیلتر مقایسه شده است. با توجه به جدول زیر مشاهده می شود که عملکرد فیلتر پیشنهادی در مقایسه با سایر فیلترهای باند وسیع اشاره شده از تمامی جهات بهتر می باشد.

| Reference number | [2] | [3] | [4] No stop band | [6] | [10] | This Work |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------|---------------------|-----------------|----------------|-----------------|
| Fractional bandwidth | 63.7% | 103.5% | 108% | ~100% | 99% | 120% |
| Sharpness | medium | high | high | high | high | very high |
| Insertion loss | min> -1.2 dB | min> -1.4 dB | min> -3 dB | min> -2.4 dB | min> -1 dB | min> -1.6 dB |
| Return loss | max< -13 dB | max< -13 dB | max< -7 dB | max< -10 dB | max< -15 dB | max< -10 dB |
| Size ($\lambda \times \lambda$) | 0.56 * 0.19 | 1.57 * 0.26 | 0.78 * 0.26 | 1.49 * 0.5 | 0.5 * 0.28 | 0.6 * 0.27 |

جدول (۱): مقایسه عملکرد فیلتر پیشنهادی با سایر فیلترها

۴ - نتیجه گیری

در این مقاله، فیلتر جدید باند وسیع فشرده‌ای با استفاده از خطوط انتقال فراماده پیشنهاد شده است. به طور خلاصه می‌توان بیان داشت که ساختار پیشنهادی دارای شش قطب انتقال است که نسبت به ساختار ارائه شده در [2] چهار قطب انتقال به ساختار اضافه شده و در نتیجه یک فیلتر باند وسیع بسیار کوچک با لبه‌های بسیار تیز فراهم شده است. همچنین فیلتر پیشنهادی در مقایسه با دیگر فیلترهای پهن باند، دارای فرونشانی خارج از باند (میزان تضعیف خارج از باند) زیاد، نرخ تغییرات تلفات از باند عبور به باند قطع زیاد (به معنی تیز بودن لبه‌های فیلتر)، تلفات کم، پهنای باند کسری زیاد و ابعاد بسیار کوچک است.

تقدیر و تشکر

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از مرکز تحقیقات مخابرات ایران که این پروژه را مورد حمایت قرار داده است تقدیر و تشکر نمایند.

مراجع

- [1] R. Marque's, F. Martin and M. Sorolla, *Metamaterials With Negative Parameters*, First Edition, John Wiley Co., 2006.
- [2] D. Jung, J. Lee, and K. Chang, "Wideband Bandpass Filter Using Microstrip Ring", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 53, no. 1, Jan. 2011.
- [3] Z. Ma, W. He, C. Chen, Y. Kobayashi, and T. Anada, "A novel compact ultra-wideband bandpass filter using microstrip stub-loaded dual-mode resonator doublets," *in International Microwave Symposium Digest (IMS) Proc.*, pp. 435-438, Sep. 2008.
- [4] M. Gil, J. Bonache, J. Garcí'a-Garcí'a, J. Martel, and F. Martí'n "Composite right/left handed (CRLH) metamaterial transmission lines based on complementary split rings resonators (CSRRs) and their applications to very wide band and compact filter design," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 55, pp. 1296-1304, Jun. 2007.
- [5] J. Bonache, F. Martí'n, J. Garcí'a-Garcí'a, I. Gil, R. Marque's, and M. Sorolla "Ultra

- wide band pass filters (UWBPF) based on complementary split rings resonators.” *Microwave And Optical Technology Letters*, vol. 46, pp. 283–286, Aug. 2005.
- [6] J. Bonache, I. Gil, J. Garcí'a-Garcí'a, and F. Martí'n “Complementary split rings resonators (CSRRs): towards the miniaturization of microwave device design,” *Comput. Electron*, vol. 5, pp. 193–197, May 2006.
- [7] H.H.Hu , Z.Y.Xiao, W.Q.He and S.Gao “Sharp-Rejection Broadband Microstrip Bandpass Filter Using Penta-Mode Resonator,” *Electronics Letters*, vol. 46, no. 11, May 2010.
- [8] P. Mondal, M. Mandal, A.Chakrabarty, “Compact Ultra-Wideband Bandpass Filter With Improved Upper Stopband,” *IEEE Microwave And Wireless Components Letter*, vol. 17, no. 9, Sep. 2007.
- [9] D. Chen, X. D. Huang, and C. H. Cheng, “A Novel compact ultra wideband (UWB) Bandpass filter using multiple-mode resonator,” *Microwave And Optical Technology Letters* ,vol. 51, no. 7, Jul. 2009.
- [10] H. H. Hu, Z. Y. Xiao, W. Q. He and S. Gao “Novel compact ultra wideband filter with wide stop band,” *Microwave And Optical Technology Letters*, vol. 51, no. 1, Jan. 2009.
- [11] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 3rd Edition, John Wiley, 2003.