

ارائه یک فیلتر باند وسیع میکروویو کوچک با استفاده از خطوط انتقال فراماده با لبه‌های تیز و یک باند قطع باریک

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 فشرده^۱ با لبه‌های تیز و یک باند قطع باریک^۲ در باند فرکانسی WLAN با استفاده از خطوط انتقال فراماده^۳ آرایه می‌شود. روش طراحی بدین صورت است که با استفاده از دو گپ تزویج موازی در اطراف یک استاب که در داخل و میان این دو گپ قرار گرفته است چهار قطب انتقال ایجاد می‌شود که یک فیلتر باند وسیع فشرده به ما خواهد داد. در ادامه به منظور تیز شدن لبه‌ی بالایی و همچنین ایجاد یک باند قطع باریک در باند عبور فیلتر، از رینگ‌های رزونانسی شکاف دار^۴ اسپیرال و معمولی استفاده می‌شود که به ترتیب یک صفر در فرکانس مربوط به باند WLAN در باند عبور فیلتر (در فرکانس 5.2 GHz) و یک صفر در نزدیکی لبه‌ی بالایی فیلتر که منجر به تیز شدن آن خواهد شد اضافه می‌گردد. این فیلتر دارای پهنای باندی است که محدوده‌ی 3 GHz تا 10.1 GHz را پوشش می‌دهد، به عبارت دیگر دارای پهنای باند کسری^۵ 108.4% می‌باشد.

۱- مقدمه

امروزه، تکنولوژی مخابرات بی‌سیم باند وسیع توجه زیادی را هم از دید آکادمیک و هم از منظر صنعتی به خود جلب نموده است به طوری که در سال ۲۰۰۲ FCC^۶ باند فرکانسی 3.1 تا 10.6 GHz را برای کاربردهای مخابرات تجاری تعیین نمود. لذا طراحی و ساخت سیستم‌های مختلف مخابراتی و بلوک‌های آنها از جمله فیلترهای میانگزر که در این باند مورد استفاده قرار می‌گیرند مورد توجه زیاد محققان قرار گرفته است. به همین منظور تحقیقات زیادی در زمینه طراحی و ساخت فیلترهای باند وسیع با تکنیک‌های مختلف به انجام رسیده است که این موضوع اهمیت این نوع فیلترها را بیشتر نمایان می‌سازد.

در سال‌های اخیر، علاقه زیادی به تحقیق در زمینه متامتریال یا 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 میکروویو 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 [1] عملکرد بهتری در

¹ Ultra Wide Band (UWB)

² Single Sharp Notch Band

³ Metamaterial (MTM)

⁴ Split Ring Resonator (SRR)

⁵ Fractional Bandwidth

⁶ Federal Communications Commission (FCC)

زمینه طراحی فیلترها از خود نشان می‌دهند. به همین دلیل در این زمینه، کاربرد فراوانی پیدا کرده‌اند. در زمینه‌ی طراحی فیلتر، علاوه بر داشتن ابعاد کوچک، پاسخ فرکانسی متقارن، تیز بودن لبه‌ها، بهبود فرونشانی خارج از باند عبور فیلتر و تلفات انتقال کم هم اهمیت زیادی دارند. خطوط انتقال فراماده مبتنی بر رینگ‌های رزونانسی در فرکانس قطع پائین و یا بالای باند عبور یک صفر انتقال از خود نشان می‌دهند که نتیجه‌ی آن تیز شدن لبه‌های باند عبور خواهد بود [1]. از طرفی، میزان تضعیف آنها در خارج از باند عبور زیاد بوده و با هر دو تکنولوژی میکرواستریپ و CPW سازگار می‌باشند [1].

۲- فراماده

فراماده یکی از مباحث روز در زمینه مخابرات میدان در جهان می‌باشد. فراماده یک ساختار الکترومغناطیسی مصنوعی و همگن است که دارای خواص فیزیکی غیر عادی می‌باشد. به ساختاری که ابعاد سلول‌های آن از طول موج خیلی کوچکتر باشد ساختار همگن گفته می‌شود [1-2]. از طرفی به ساختارهایی که دارای ϵ و μ منفی هستند مواد دست چپ^۷ (LH) گفته می‌شود (در مقابل مواد دست راستی^۸ که ϵ و μ مثبت دارند). از آنجایی که مواد دست چپ دارای ویژگی‌های فراماده هستند می‌توان این مواد را فراماده نیز به حساب آورد [1-2].

از دید مداری، مدل مداری خط انتقال LH شامل یک خازن در شاخه سری و یک سلف در شاخه موازی می‌باشد [2]. روش‌های متفاوتی برای پیاده سازی خطوط انتقال LH و یا حالت عملی‌تر آنها به نام CRLH^۹ پیشنهاد شده است که از آن جمله می‌توان به ساختارهای خازن اینتردیجیتال/استاب، استفاده از رینگ‌های رزونانسی دو تایی و مکمل آنها و همچنین استفاده از المان‌های فشرده SMT^{۱۰} اشاره کرد [1-2].

در روش پیاده‌سازی با استفاده از رینگ‌های رزونانسی (SRR)، رینگ‌ها روی صفحه زمین و یا استریپ خط انتقال میکرواستریپ قرار داده می‌شوند [1]. در پیاده سازی با استفاده از این نوع رینگ‌ها، SRR ها در یک بازه فرکانسی کوچک بالای فرکانس تشدید خود μ منفی از خود نشان می‌دهند. این ضریب منفی در باند بیان شده، باعث عدم تطبیق بین دهانه تغذیه و خط می‌شود و در نتیجه در فرکانس تشدید، یک صفر انتقال در خط انتقال ایجاد شده توسط آنها تولید می‌گردد. در شکل (۱) ساختار یک رینگ رزونانسی مستطیل شکل و مدار معادل آن هنگامی که در کنار استریپ یک خط انتقال میکرواستریپ قرار داشته باشد، نشان داده شده است. فرکانس تشدید رینگ‌ها از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه هستند.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}} \quad (1)$$

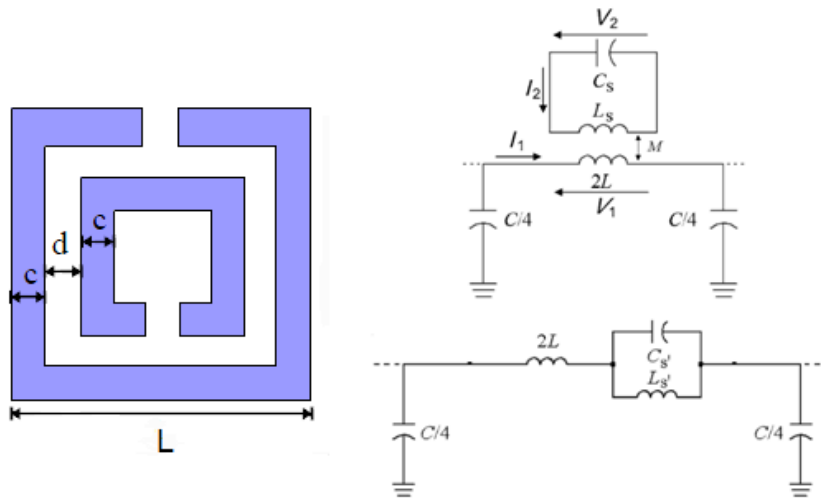
که L_s اندوکتانس خودی با طول میانگین ابعاد دو رینگ و C_s خازن ناشی از قرار گرفتن رینگ کوچکتر داخل رینگ بزرگتر است. با تغییر L ، C و d می‌توان فرکانس رزونانس رینگ‌ها را تغییر داد. در این مقاله، به منظور ایجاد یک باند قطع باریک داخل باند عبور فیلتر طراحی شده، از رینگ‌های اسپیرال به جای رینگ‌های معمولی نشان داده شده در شکل (۱) استفاده شده است. زیرا فرکانس رزونانس این نوع رینگ‌ها نصف فرکانس رزونانس رینگ‌های معمولی با همان

⁷ Left Handed (LH)

⁸ Right Handed (RH)

⁹ Composite Righth/Left-Handed

¹⁰ Surface Mountain Tecnology



شکل (۱): ساختار رینگ رزونانسی مستطیل شکل و مدار معادل آن

ابعاد می باشد که استفاده از آن‌ها کاهش بیشتر سایز فیلتر را بدنبال خواهد داشت. روابط دقیق مربوط به محاسبه‌ی سلف و خازن رینگ‌های رزونانسی در پیوست فصل ۲ مرجع [1] ارائه شده است.

۳- طراحی فیلتر

ساختار فیلتر پیشنهادی شکل (۲) از دو خط انتقال فراماده که بر خلاف ساختار ارائه شده در [3] رینگ‌هایی به آن اضافه شده و استاب‌های آن به صورت موازی و در یک جهت قرار گرفته و در وسط ساختار به یکدیگر متصل شده‌اند، تشکیل شده است. این نحوه‌ی قرار دادن استاب‌ها باعث می‌شود که ساختار دارای مشخصه‌ی پهنای باند وسیع باشد. فرکانس قطب‌های ساختار از تحلیل مد زوج و فرد آن از روی مدارهایی که در شکل (۳) نشان داده شده است قابل محاسبه می‌باشند. در هر دو تحلیل مد زوج و فرد، علاوه بر فرکانس رزونانس مربوط به همان مد، فرکانس رزونانس مربوط به رینگ‌های رزونانسی که مولد صفر هستند نیز باید در نظر گرفته شوند. ادمیتانس ورودی برای مد فرد از روی شکل (۳-ب) و از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید.

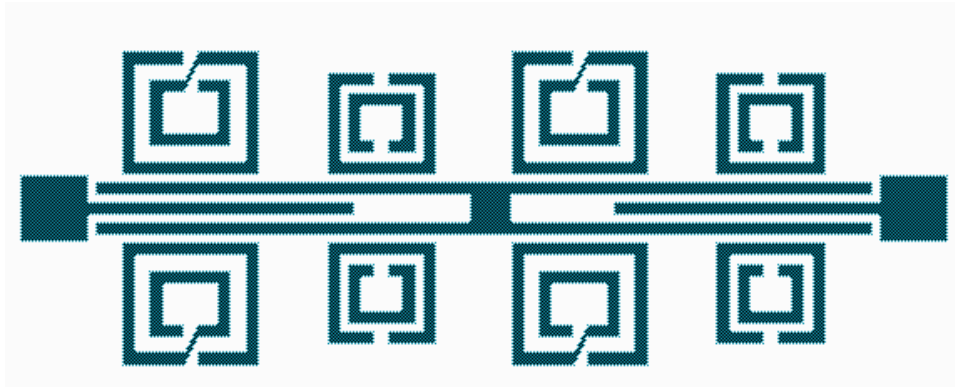
$$Y_{in,odd} = \frac{Y_1}{j \tan(\theta_1 / 2)} \quad (2)$$

که $\theta_1 = \beta L_1$ طول الکتریکی خط میکرواستریپ است. شرط رزونانس برای شکل (۳-ب) این است که $Y_{in,odd} = 0$ ، بنابراین فرکانس رزونانس برای مد فرد از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

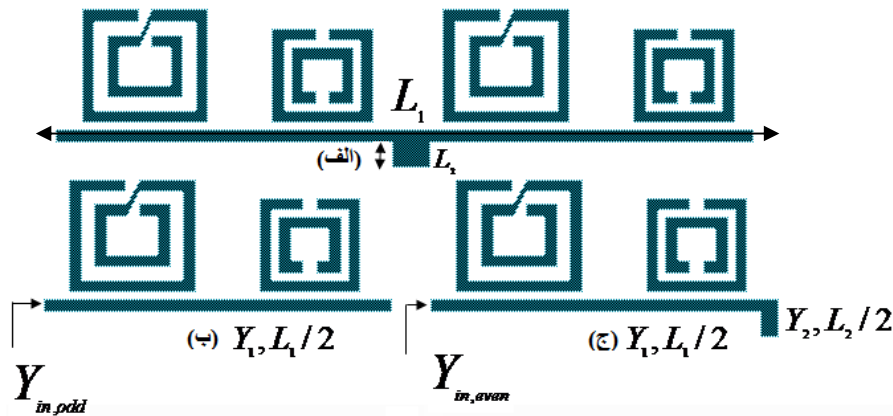
$$f_{odd} = \frac{(2n-1)c}{2L_1 \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3)$$

همچنین امپدانس ورودی برای مد زوج از روی شکل (۳-ج) و از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید.

$$Y_{in,even} = jY_1 \frac{2Y_1 \tan(\theta_1 / 2) + Y_2 \tan(\theta_2)}{2Y_1 - Y_2 \tan(\theta_1 / 2) \tan(\theta_2)} \quad (4)$$



شکل ۲: ساختار فیلتر پیشنهاد شده



شکل ۳: الف) نصف ساختار پیشنهادی ب) مدل مداری مد فرد ج) مدل مداری مد زوج

که $\theta_2 = \beta L_2$ طول الکتریکی استاب می باشد. شرط رزونانس برای شکل (۳-ج) این است که $Y_{in,even} = 0$ ، بنابراین فرکانس رزونانس برای مد زوج از رابطه ی زیر قابل محاسبه می باشد.

$$f_{even} = \frac{nc}{(L_1 + 2L_2)\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (5)$$

به دلیل اینکه طول استاب در مقایسه با طول خط میکرواستریپ خیلی کوچک انتخاب شده یعنی $L_2 \ll L_1$ بنابراین با توجه به روابط (۳) و (۵) خواهیم داشت:

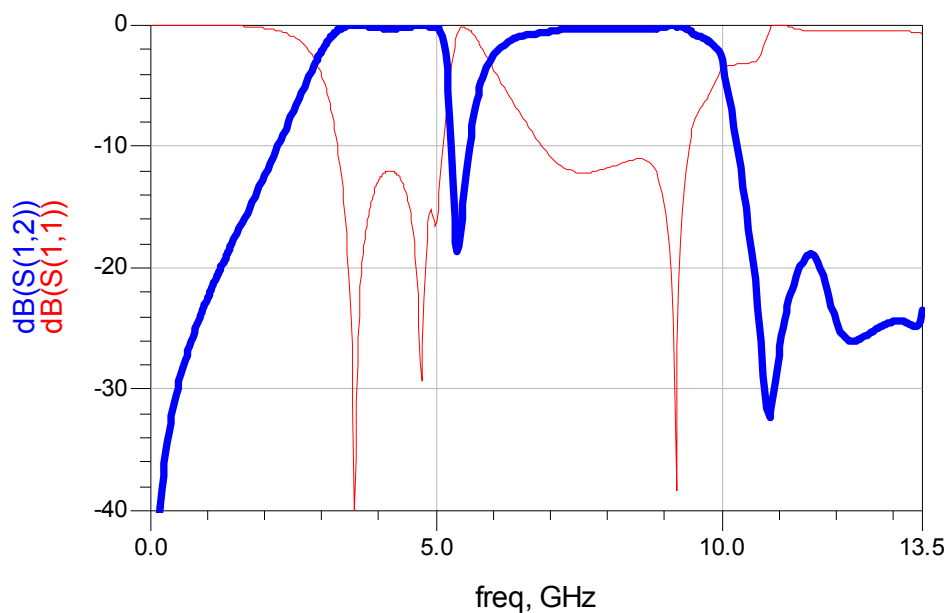
$$f_{even} / f_{odd} \approx 2 \quad (6)$$

لذا با توجه به رابطه ی (۶) دیده می شود که در ساختار پیشنهادی فرکانس مد زوج دو برابر فرکانس مد فرد بدست آمده که در نتیجه، این نسبت داشتن مشخصه ی باند وسیع در این ساختار را تایید می نماید. همچنین با دوبر کردن ساختار شکل (۳-الف)، دو قطب تضعیف در هر طرف باند عبور به ساختار اضافه می گردد که این تکنیک نیز به پهن تر شدن پهنای باند کمک می کند. علاوه بر این در ساختار پیشنهادی شکل (۲)، به منظور تیزتر شدن لبه ی بالایی باند عبور از رینگ های رزونانسی معمولی که صفر انتقالی در نزدیکی لبه ی بالایی فیلتر اضافه می کنند استفاده شده است. این امر

افزایش تعداد طبقات فیلتر مانند آنچه در [3] به منظور تیز شدن لبه ی بالایی فیلتر پیشنهاد شده است را مرتفع می- نماید. به این نکته نیز باید اشاره کرد که اضافه کردن رینگها علاوه بر اینکه کوچک شدن اندازه را باعث می شوند نتیجه بهتری را نسبت به افزایش تعداد طبقات از نظر تیز شدن لبه ی بالایی پاسخ فرکانسی بدنبال خواهند داشت. همچنین در ساختار پیشنهادی با استفاده از رینگ های اسپرال یک صفر در باند عبور فیلتر و در فرکانس مربوط به WLAN اضافه شده است. فرکانس رخداد صفرها از روی روابط استخراج شده مربوط به رینگها که در بالا ذکر شده اند قابل محاسبه می باشند [1]. در نتیجه ساختار پیشنهادی دارای چهار قطب و دو صفر انتقال بوده که به صورت یک فیلتر باند وسیع با لبه های تیز به همراه یک باند قطع باریک عمل می کند. این ساختار نسبت به فیلتر ارائه شده در [3] دو صفر انتقال بیشتر داشته که یک صفر برای تیزتر کردن لبه ی بالایی و یک صفر دیگر به منظور ایجاد باند قطع تیز و به منظور جلوگیری از عبور سیگنال در محدوده ی تعیین شده توسط FCC برای WLAN در نظر گرفته شده است. این ساختار علاوه بر پاسخ فرکانسی بسیار مناسب، ابعاد بسیار کوچکی به اندازه $11.2 * 4.6 \text{ mm}^2$ اشغال می کند. در طراحی این ساختار از زیر لایه ی RT/Duroid6010 با ثابت دی الکتریک 10.2 و ضخامت 1.27 mm استفاده شده است.

نتایج شبیه سازی این فیلتر در شکل (۴) با استفاده از نرم افزار شبیه ساز الکترومغناطیسی ADS ارائه گردیده است. همانطور که در شکل زیر مشاهده میشود میزان S_{12} در باند عبور به جز در فرکانسی که مربوط به باند قطع است بسیار نزدیک به صفر و کمتر از -0.1 dB است که بیان کننده ی توانایی بالای این فیلتر در عبور سیگنال و انتقال توان با حداقل تلفات در باند عبور می باشد. همچنین میزان S_{11} در باند عبور به جز در فرکانسی که مربوط به باند قطع است کمتر از -13 dB می باشد که این پارامتر نیز کم بودن میزان توان برگشتی به دهانه ی ورودی و تلفات کم این فیلتر را تایید مینماید.

نهایتاً در جدول (۱)، فیلتر پیشنهادی با پنج فیلتر باند وسیع دیگر از جنبه های مهم ذکر شده در بالا مقایسه شده است. همانطور که دیده می شود عملکرد فیلتر پیشنهادی در مقایسه با سایر فیلترهای باند وسیع ذکر شده از جمیع جهات بهتر می باشد. علاوه بر این، فیلتر پیشنهادی نسبت به فیلترهای ذکر شده در جدول دارای یک باند قطع باریک در باند عبور نیز می باشد.



شکل ۴: نتایج شبیه سازی پارامترهای S فیلتر پیشنهادی

Reference number	[3]	[5]	[6]	[7] No stop band	[10]	This Work
Fractional bandwidth	103.5%	87%	~100%	108%	99%	108.4%
Sharpness	high	medium	high	high	high	Very high
Insertion loss	min> -1.4 dB	min> -0.3 dB	min> -2.4 dB	min> -3 dB	min> -1 dB	min> -0.1 dB
Return loss	max< -13 dB	max< -10 dB	max< -10 dB	max< -7 dB	max< -15 dB	max< -13 dB
Size ($\lambda \times \lambda$)	1.57*0.26	0.8* 0.25	1.49* 0.5	0.78*0.26	0.5*0.28	0.69 * 0.28

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. ساختار فیلتر پیشنهادی در مقایسه با بسیاری دیگر از فیلترهای با پهنای باند وسیع، 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 لبه‌ی بالایی فیلتر بدون افزودن تعداد طبقات جدید)، یک باند قطع باریک در فرکانس‌های مربوط به WLAN، تلفات کم، پهنای باند کسری زیاد که تمام محدوده‌ی تعیین شده توسط FCC را پوشش می‌دهد 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] C. Caloz, and T. Itoh, *Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications*, John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [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] X. Y. Zhang, J.-X. Chen, Q. Xue, and S.-M. Li, "Dual-Band Bandpass Filters Using Stub-Loaded Resonators" *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 17, no.8, pp:583- 585 Aug. 2007.
- [5] J. Bonache, F. Marti'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. Marti'n "Complementary split rings resonators (CSRRs): towards the miniaturization of microwave device design."

- Comput. Electron.*, vol. 5, pp. 193–197, May 2006.
- [7] 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 (CSRRLs) and their applications to very wide band and compact filter design." *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 55, pp. 1296–1304, Jun. 2007.
- [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, July 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, January 2009.
- [11] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 3rd Edition, John Wiley, 2003.