طراحی و ساخت فیلتر پایین گذر مایکرواستریپ فشرده با باند گذار تیز و فاکتور توقیف بالا

علیرضا نوری‌تبار[1] حسین شمسی[2] سید آرش احمدی[3]

۱- کارشناسی ارشد - دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی- تهران- ایران
ali.ntabar@gmail.com

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی- تهران- ایران
shamsi@eetd.kntu.ac.ir

۳- استادیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی- تهران- ایران
Aahmadi@eetd.kntu.ac.ir

چکیده: در این مقاله یک فیلتر پایین‌گذر مایکرواستریپ فشرده با فرکانس قطع ۱/۶۹GHz، با استفاده از رزوناتور سنجاقی پیچ خورده نامتقارن[1] بهبود یافته با شکاف عرضی طراحی، شبیه‌سازی و ساخته شده است. در ابتدا رزوناتور سنجاقی پیچ خورده نامتقارن پیشنهاد می‌شود و در ادامه به‌منظور بهبود عملکرد این رزوناتور، شکاف عرضی که یکی از عناصر مایکرواستریپ است، بر روی این رزوناتور اعمال می‌شود. با اتصال سری دو رزوناتور به‌دست آمده به‌صورت آینه ساختار فیلتر پایین‌گذر حاصل می‌شود. فیلتر طراحی شده دارای اندازه مداری $۰/۰۷۶\lambda_g \times ۰/۱۴\lambda_g$، تلفات تزریقی۰/۲dB، باند توقف ۸/۱۶GHz، فاکتور توقیف ۲ و همچنین باند گذار ۰/۱۲GHz است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، در بازه فرکانسی مورد نظر نتایج ساخت و اندازه‌گیری این فیلتر، انطباق خوبی با نتایج شبیه‌سازی از خود نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: فیلتر - مایکرواستریپ – پایین گذر- باند گذار- فاکتور توقیف- رزوناتور

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۰۶/۰۱
تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۵/۶/۲۹
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۰۲
نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر حسین شمسی
نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – تهران – خیابان شریعتی- پل سیدخندان – دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی – دانشکده‌ی برق

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.2.6.9]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol14 No.2 Summer 2017

۱- مقدمه

مهم‌ترین ویژگی فیلترهای پایین‌گذر که در سال‌های اخیر مورد توجه طراحان سیستم‌های مخابراتی در حوزه‌های مخابرات ماهواره‌ای و ماکروویو قرار گرفته است، وسیع بودن پهنای باند توقف[۲] ، تیزی[۳] پاسخ در باند گذار، اندازه فشرده[۴] و همچنین تلفات تزریقی[۵] پایین در باند عبور است [۱]. به‌منظور آشنایی با تحلیل میزان کارا بودن یک فیلتر پایین‌گذر فاکتورهای مهم و استاندارد را معرفی می‌کنیم [۲]. در شکل(۱) نمودار پارامترهای پراکندگی[۶] یک فیلتر نوعی[۷] و چگونگی به‌دست آوردن برخی از این فاکتورها نشان داده شده است.

فاکتور ξ[۸] مقدار تیزی پاسخ پارامتر S21 را در باند گذار نشان می‌دهد، که با استفاده از رابطه (۱-۱) به‌دست می‌آید [۲]:

$$\xi = \frac{a_{max} - a_{min}}{f_s - f_c} \quad (dB/GHz) \qquad (۱-۱)$$

که a_{max} نقطه میرایی ۴۰dB- و a_{min} نقطه ۳dB- است. f_s فرکانس در باند توقف ۴۰dB- و f_c فرکانس قطع ۳dB- هستند.

پهنای باند نسبی باند توقف[۹] (RSB) با استفاده از رابطه (۱-۲) تعریف می‌شود[2]:

$$RSB = \frac{\text{stop-band bandwidth}}{\text{stop-band center frequency}} \qquad (۱-۲)$$

فاکتور توقیف[۱۰] (SF) بر پایه‌ی تضعیف در باند توقف است. برای مثال اگر باند توقف پایین‌تر از ۲۰dB باشد، مقدار این فاکتور، یک‌دهم آن یعنی ۲ در نظر گرفته می‌شود [۲].

اندازه نرمالیزه شده مدار[۱۱](NCS) با استفاده از رابطه (۱-۳) به‌دست می‌آید [۲]:

$$NCS = \frac{\text{physical size}(\text{length} \times \text{width})}{\lambda_g^2} \qquad (۱-۳)$$

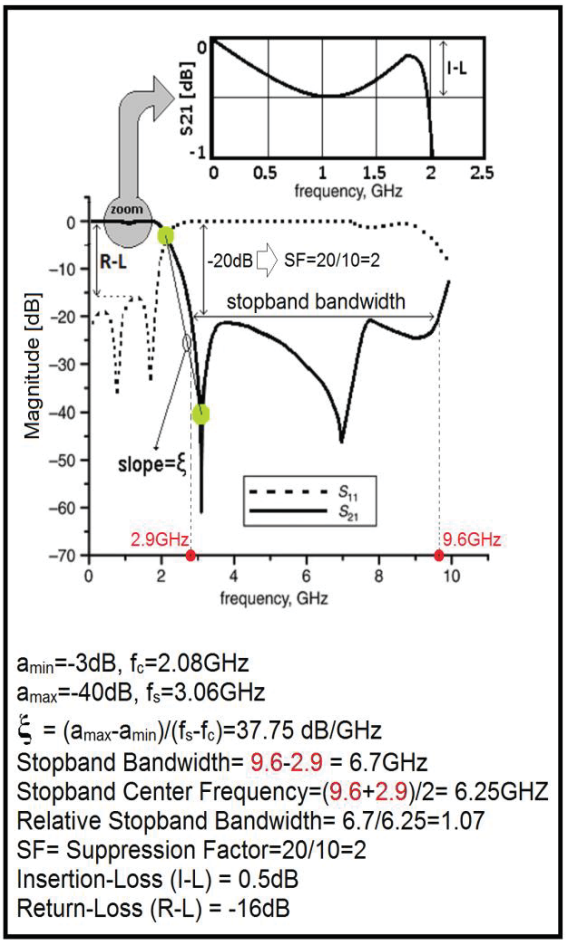
$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_e}} \qquad (۱-۴)$$

λ_g طول‌موج هدایت در فرکانس قطع ۳dB-، λ_0 طول‌موج در فضای آزاد در فرکانس کاری و ε_e ثابت مؤثر دی‌الکتریک مایکرواستریپ هستند [۲].

فاکتور معماری[۱۲](AF) به‌عنوان فاکتور پیچیدگی مدار شناخته می شود، هنگامی‌که طراحی مدار به‌صورت دوبعدی باشد مقدار ۱ و برای حالت سه‌بعدی مقدار ۲ لحاظ می‌شود [۲].

معیار دیگری بنام ضریب شایستگی[۱۳] برای مقایسه‌ی عملکرد کلی یک فیلتر از نظر اندازه، پهنای باند نسبی باند توقف، فاکتور توقیف، فاکتور معماری و نیز تیزی پاسخ، ارائه شده است که به‌صورت رابطه (۱-۵) قابل تعریف است [۲].

$$FOM = \frac{\xi \times RSB \times SF}{NCS \times AF} \qquad (۱-۵)$$



شکل(۱): پارامترهای پراکندگی یک فیلتر نوعی و نحوه به‌دست آوردن فاکتورهای (I-L, R-L, RSB, ξ ,SF)

معمول‌ترین حالت در سنتز فیلترهای ماکروویو با استفاده از خطوط انتقال مایکرواستریپ، استفاده از ساختارهایی به‌صورت پله‌های امپدانسی[۱۴] معادل با ساختارهای نردبانی[۱۵] L-C است [۳]. این ساختارها در ابتدا حالت خوبی از سنتز هستند اما به دلیل اینکه اتصال سری آن‌ها سبب افزایش اندازه مدار شده و اثرات تزویج متقابل مابین آن‌ها باعث افزایش تلفات تزریقی و همچنین کاهش تلفات بازگشتی می‌شود، در حالتی که فیلترهایی با مشخصات بهتر نظیر پهنای باند نسبی زیاد[۱۶] ، باند گذار تیز[۱۷] مورد نیاز باشد، کارایی لازم را نداشته و نمی‌تواند جوابگوی نیازهای مخابرات سیار و سایر کاربردهای حوزه ماکروویو باشند. در رابطه با فیلترهای پایین گذر مایکرواستریپ محققان زیادی اقدام به طراحی و ساخت انواع فیلتر با اندازه کوچک و پهنای باند مختلف با استفاده از رزوناتورهای مختلف نموده‌اند. در مرجع [۴] یک فیلتر پایین‌گذر با پهنای باند زیاد با استفاده از ساختار ساده اولیه پیشنهاد شده است. این فیلتر دارای پهنای باند عبور زیاد با یک شیب نسبتاً تیز در باند گذار است. اما پهنای باند توقف آن باریک و اندازه تلفات بازگشتی آن در باند عبور کم و همچنین اندازه ابعاد نرمالیزه شده آن نسبتاً زیاد است. در مطالعات دیگر نیز چندین فیلتر با

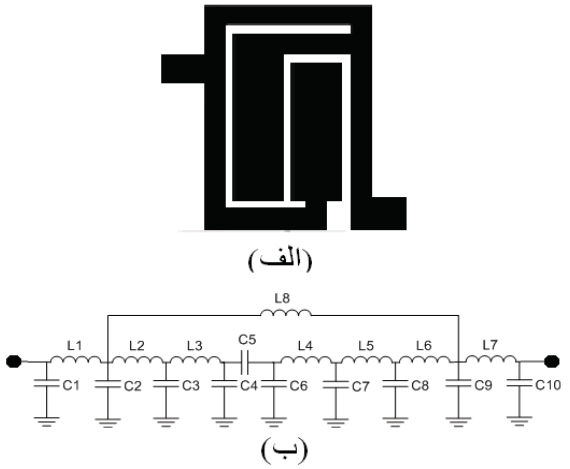
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.2.6.9]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.2 Summer 2017

اندازه‌های کوچک که با استفاده از امپدانس پله‌ای خطوط مایکرواستریپ و رزوناتورهای سنجاقی طراحی شده‌اند، معرفی شده است [۶ ، ۵]. در این مطالعات بر روی کاهش ابعاد فیزیکی فیلتر و افزایش پهنای باند توقف کار شده است اما نتوانسته است شیب پاسخ در باند گذار و هم‌چنین فاکتور تضعیف در باند توقف را بهبود ببخشد بنابراین دو ضعف اساسی رزوناتور سنجاقی شامل: ۱- تدریجی بودن پاسخ در باند گذار ۲- وجود هارمونیک در باند توقف، است، که این مشکلات استفاده از این ساختار را با محدودیت مواجه است.

در این مقاله یک فیلتر پایین گذر با استفاده از دو رزوناتور سنجاقی پیچ خورده نامتقارن بهبود یافته با شکاف عرضی که به‌صورت آینه، سری باهم قرار گرفته‌اند، طراحی شده است. این رزوناتور دو ضعف اساسی رزوناتور سنجاقی را به‌خوبی برطرف کرده است. فیلتر طراحی شده دارای پهنای باند نسبی وسیع، فاکتور توقیف بالا و اندازه نرمالیزه شده کم است. ضمن اینکه شیب پاسخ در باند گذار بالا بوده به‌صورتی که می‌توان گفت یکی از ویژگی‌های منحصربه‌فرد این فیلتر که آن را از سایر کارهای انجام شده متمایز می‌کند تیز بودن پاسخ در باند گذار است. در بخش دوم این مقاله مدار معادل رزوناتور پیشنهادی و چالش-های این رزوناتور مورد بررسی قرار می‌گیرد در ادامه به‌منظور بهبود عملکرد این رزوناتور ایده اعمال شکاف عرضی بر روی یکی از خطوط تزویجی مطرح می‌شود. در بخش سوم با استفاده از دو رزوناتور سنجاقی پیچ خورده نامتقارن بهبود یافته با شکاف عرضی که به‌صورت آینه سری شده‌اند یک فیلتر پایین‌گذر با باند گذار تیز و فاکتور توقیف بالا شبیه‌سازی و ساخته شده است. زیر لایه‌ای که در این شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است از نوع RT/duroid ۵۸۸۰ است که دارای ضخامت ۰/۲۵۴ میلی‌متر و ثابت دی‌الکتریک نسبی ۲/۲ است. برای شبیه‌سازی این پروژه از نرم‌افزار ADS استفاده شده است.

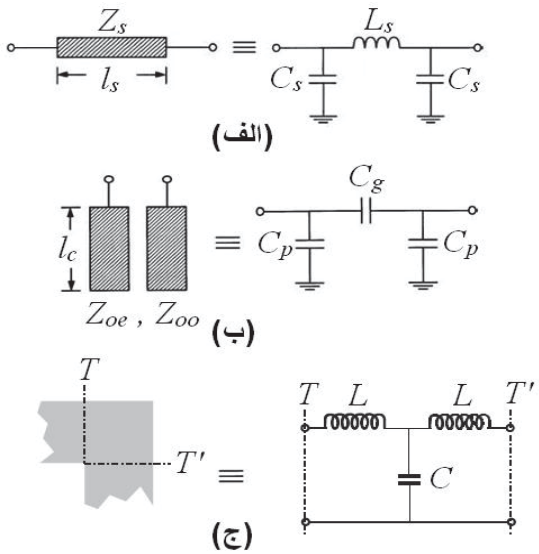
۲- ساختار و مدار معادل رزوناتور پیشنهادی

طرح‌واره رزوناتور سنجاقی پیچ خورده نامتقارن پیشنهادی و همچنین مدار معادل LC آن که با استفاده از مدار معادل هر کدام از قسمت-های مختلف این رزوناتور حاصل شده است [۷]، در شکل(۲) نشان داده شده است. این رزناتور به‌عنوان یک عنصر پایه‌ای در طراحی فیلتر پایین‌گذر، مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل: (۲-الف): طرح‌واره رزوناتور پیشنهادی ب) مدار معادل رزوناتور پیشنهادی

این رزوناتور درواقع از دو بازوی امپدانسی که با هم تزویج متقابل دارند، یک خط امپدانسی که آن‌ها را به هم متصل می‌کند و دو خط تغذیه ورودی که در جای مناسب قرار می‌گیرند، تشکیل شده است. این ساختار حالت بهینه‌ای از رزوناتور سنجاقی **[۸]** است که از فضای خالی آن استفاده شده و به مقدار قابل توجه‌ای عملکرد آن بهبود یافته است. دو بازوی امپدانسی این رزوناتور به‌سمت داخل خم شده‌اند، منجر به کاهش اندازه مدار و بهبود پاسخ فیلتر شده است. مدار معادل هر کدام از قسمت‌های مختلف رزوناتور پیشنهادی در شکل (۳) نشان داده شده است. هر آنچه که در این قسمت شرح داده می‌شود برای فرکانس‌های نزدیک فرکانس قطع فیلتر مورد نظر است.



شکل(۳): یرقطعات مایکرواستریپ همراه با مدار معادل (الف) خط انتقال مایکرواستریپی ساده [۸] (ب) خط مایکرواستریپی تزویج شده[۸] (ج) اتصال خمیده ۹۰ درجه مایکرواستریپ[۹]

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.2.6.9]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol14 No.2 Summer 2017

۲-۱- مدار معادل LC خط انتقال مایکرواستریپ:

در شکل ۳-(الف) شکل یک خط انتقال مایکرواستریپ ساده به همراه مدار معادل شبکه π آن آورده شده است [۸]. ماتریس ABCD خط انتقال مایکرواستریپ به طول l_s مطابق رابطه (۲-۱) می‌باشد:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\beta_s l_s) & jZ_s \sin(\beta_s l_s) \\ jY_s \sin(\beta_s l_s) & \cos(\beta_s l_s) \end{bmatrix} \quad (۲-۱)$$

که در رابطه فوق β_s ثابت انتشار و $Y_s = \frac{1}{Z_s}$ ادمیتانس مشخصه خط انتقال مایکرواستریپ می‌باشد. همچنین ماتریس ABCD معادل شبکه π مدار LC به‌صورت رابطه (۲-۲) می‌باشد[8].

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+Z_L Y_C & Z_L \\ Y_C(2+Z_L Y_C) & 1+Z_L Y_C \end{bmatrix} \quad (۲-۲)$$

که در آن $Y_C = j\omega C_S$ ، $Z_L = j\omega L_S$ ، ω فرکانس زاویه‌ای، C_S و L_S به ترتیب معادل خازن و سلف شبکه π مدار LC می‌باشند. از مقایسه (۲-۱) و (۲-۲) می‌توان معادل L_S و C_S را به‌صورت رابطه(۲-۳) و (۲-۴) به دست آورد[8].

$$L_s = \frac{Z_S \sin(\beta_S l_S)}{\omega} \quad (۲-۳)$$

$$C_S = \frac{1-\cos(\beta_S l_S)}{\omega Z_S \sin(\beta_S l_S)} \quad (۲-۴)$$

۲-۲- مدار معادل خط انتقال کوپل شده:

شکل یک خط انتقال مایکرواستریپ کوپل شده به همراه مدار معادل π آن در شکل(۳-ب) آورده شده است[8]. ماتریس ABCD این خطوط کوپل شده به‌صورت رابطه (۲-۵) است.

(۲-۵)

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z_{oe}+Z_{oo}}{Z_{oe}-Z_{oo}} & \frac{-2jZ_{oe}Z_{oo}\cot(\beta_c l_c)}{Z_{oe}-Z_{oo}} \\ \frac{2j}{(Z_{oe}-Z_{oo})\cot(\beta_c l_c)} & \frac{Z_{oe}+Z_{oo}}{Z_{oe}-Z_{oo}} \end{bmatrix}$$

که β_c ثابت انتشار خطوط کوپل شده می‌باشد. همچنین ماتریس ABCD مدار معادل LC این خطوط کوپل شده به‌صورت رابطه (۲-۶) به دست می‌آید[۸].

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+Z_g Y_p & Z_g \\ Y_p(2+Z_g Y_p) & 1+Z_g Y_p \end{bmatrix} \quad (۲-۶)$$

که در آن $Y_P = j\omega C_P$ و $Z_g = 1/j\omega C_g$ می‌باشند. از مقایسه روابط (۲-۵) و (۲-۶) معادله ظرفیت خازن‌ها به‌صورت زیر حاصل می‌شود:

$$C_g = \frac{Z_{oe}-Z_{oo}}{2\omega Z_{oe}Z_{oo}\cot(\beta_c l_c)} \quad (۲-۷)$$

$$C_p = \frac{1}{\omega Z_{oe}\cot(\beta_c l_c)} \quad (۲-۸)$$

۲-۳- مدار معادل خمیدگی ۹۰ درجه:

خمیدگی ۹۰ درجه می‌تواند با استفاده از شبکه معادل T همان‌طور که در شکل(۳-ج) نشان داده شده است، مدل می‌شود. در این حالت روابط خازن و سلف به‌صورت زیر خواهند بود[9]:

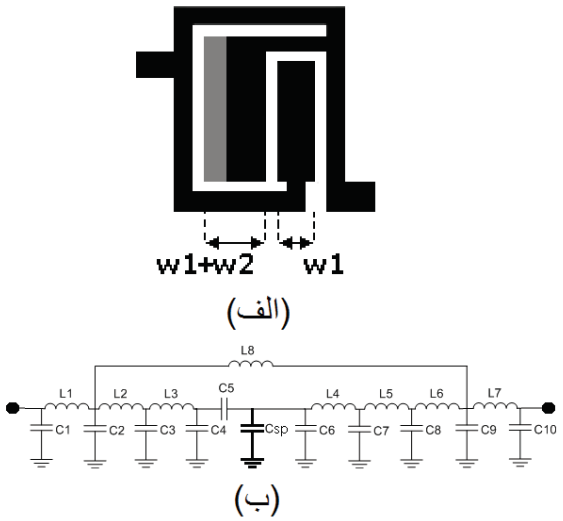
$$\frac{C}{W}(PF/m) = \begin{cases} \frac{(14\varepsilon_r+12.5)w/d-(1.83\varepsilon_r-2.25)}{\sqrt{w/d}} \\ +\frac{0.02\varepsilon_r}{w/d} \xrightarrow{for} w/d>1 \\ (9.5\varepsilon_r+1.25)w/d+5.2\varepsilon_r \\ +0.7 \xrightarrow{for} w/d<1 \end{cases} \quad (۲-۹)$$

$$\frac{l}{d}(nH/m) = 100\left\{4\sqrt{\frac{w}{d}-4.21}\right\} \quad (۲-۱۰)$$

که در اینجا w عرض خم و d ضخامت زیرلایه می‌باشد.

۲-۴- عدم تقارن:

حالت اولیه این رزوناتور به‌صورت خطوط انتقال کوپل شده یکسان می‌باشد، اما به‌منظور داشتن درجه آزادی بیشتر در کنترل کردن صفر و قطب‌های این رزوناتور، خطوط انتقال کوپل شده نامتقارن پیشنهاد شده است. تأثیرات این عدم تقارن در مدار معادل رزوناتور نشان داده شده است.



شکل(۴- الف): رزوناتور با خطوط کوپل شده نامتقارن ب) مدار معادل تقریبی آن

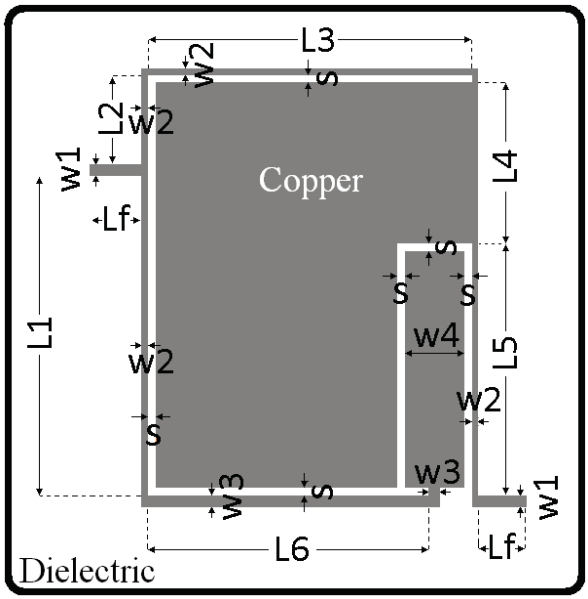
همان‌طور که در شکل(۴-الف) نشان داده شده است، خطوط

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.2.6.9]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.2 Summer 2017

تزویج شده ساختاری نامتقارن پیدا کرده‌اند. این عدم تقارن به‌صورت خط انتقال تکی ظاهر می‌گردد که با خط انتقال تزویج شده هم‌جوار خود تشکیل خط انتقال تزویج شده جدیدی می‌دهد. مدار خازنی ناشی از عدم تقارن موازی با مدار معادل خط تزویج شده نمایش داده شده است. این خازن با C_{SP} نشان داده شده و از رابطه (۲-۱۱) به دست می‌آید[8].

$$C_{SP} = \varepsilon_0 \varepsilon_r w / d \qquad (F/unitLength) \qquad (۲-۱۱)$$

که در اینجا w عرض خط کناری اضافه شده و d ضخامت زیرلایه است. در نهایت با توجه به موازی بودن خازن Csp و C6 مقدار خازن Csp به مقدار C6 اضافه شده و با همان C6 نمایش داده می‌شود. ابعاد این رزوناتور به‌منظور سنتز یک فیلتر با فرکانس قطع ۱/۶۹GHz بهینه شده است. شکل(۵) این رزوناتور را به‌صورت دقیق‌تر نشان می‌دهد. ابعاد این رزوناتور در جدول(۱) بیان شده است.



شکل(۵): رزوناتور پیشنهادی

جدول(۱): ابعاد رزوناتور پیشنهادی

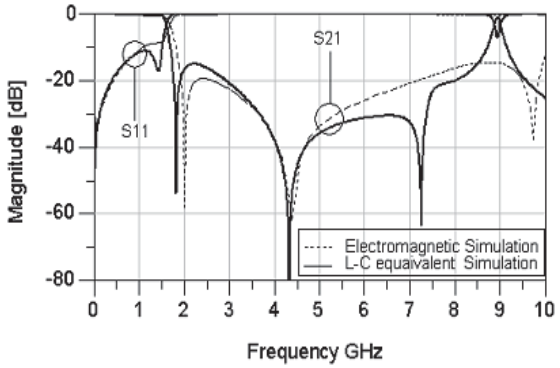
Lf	L1	L2	L3	L4	L5	L6
0.5mm	6.7mm	1.9mm	6.8mm	3.3mm	5.4mm	5.9mm
S	W1	W2	W3	W4	W5	
0.2mm	0.2mm	0.1mm	0.2mm	1.2mm	0.1mm	

مقادیر تقریبی ظرفیت خازن‌ها و اندوکتانس سلف‌ها، بر اساس فرکانس قطع و زیر لایه تعریف شده، محاسبه شده است[۸]. این مقادیر در جدول(۲) نشان داده شده است. با توجه به تقریب از خم‌های ۹۰ درجه که دارای w کمتر از ضخامت دی‌الکتریک d بوده‌اند صرف‌نظر شده است.

جدول(۲): مقادیر معادل LC به‌دست‌آمده برای رزوناتور پیشنهادی

L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7
0.64nH	4.2nH	3.1nH	0.26nH	0.26nH	0.13nH	4.07nH
L8	C1	C2	C3	C4	C5	C6
5.4nH	0.02pF	0.32pF	0.29pF	0.78pF	0.085pF	1.91pF
C7	C8	C9	C10	C_{SP}		
1.01pF	0.25pF	0.49pF	0.126pF	1.29pF		

نتایج شبیه‌سازی مداری و الکترومغناطیسی رزوناتور پیشنهادی به ازای مقادیر حاصل از تقریب مدل، در شکل(۶-الف) نشان داده شده است. تقریب صورت گرفته بر اساس فرکانس قطع است. مشاهده می‌شود که نتایج شبیه‌سازی الکترومغناطیسی و مداری، تطابق نسبتاً خوبی دارند و اختلاف اندک موجود بین آن‌ها نتیجه‌ی طبیعی تقریب‌های به کار رفته در مدل‌سازی خطوط مایکرواستریپ را نشان می‌دهد.

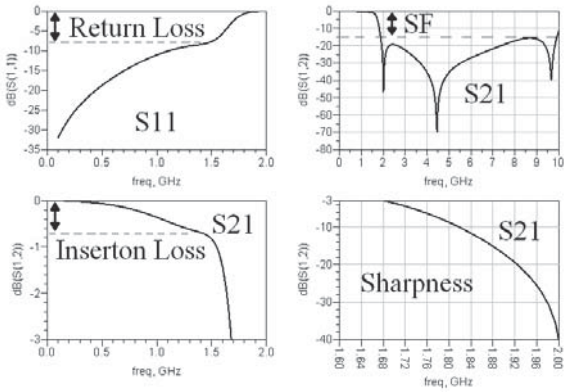


شکل(۶): مقایسه نتایج شبیه‌سازی مداری و الکترومغناطیسی رزوناتور پیشنهادی

مدار معادل فیلتر نشان می‌دهد این فیلتر مرتبه هفت است که در فرکانس‌های ۱,۸، ۴,۳ و ۷,۲ گیگاهرتز دارای صفر انتقال بوده، که سبب ایجاد باند توقف مناسبی شده است. جزئیات پارامترهای پراکندگی رزوناتور پیشنهادی در شکل(۷) نشان داده شده است.

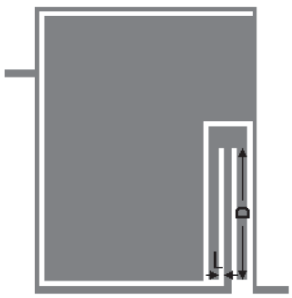
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.2.6.9]

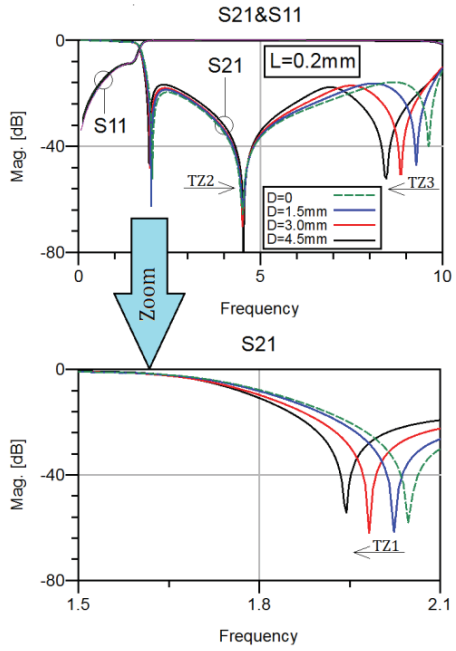


شکل(۷): جزئیات پارامترهای پراکندگی رزوناتور پیشنهادی

همان‌طوری که در شکل(۷) نشان داده شده است، تلفات تزریقی این رزوناتور کمتر از۰/۷dB در باند عبور است. نمودار S11 میزان تلفات بازگشتی در باند عبور را بهتر از ۸dB- نشان می‌دهد. همچنین تقریباً صفر بودن S11 در باند توقف (۲GHz تا ۱۰GHz) نشان دهنده تلفات تشعشعی بسیار کم و در حد صفر برای این رزوناتور است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که باند گذار این رزوناتور از ۳dB- به ۴۰dB- در حدود ۰/۳۲GHz است. با توجه به اینکه هدف، طراحی یک فیلتر با پاسخ تیز است، این ساختار نمی‌تواند پاسخ گوی نیاز ما باشد. بنابراین به‌منظور بهبود این مشخصه و افزایش درجه آزادی برای کنترل صفرهای انتقالی دو شکاف عرضی[۱۰] یکسان به یکی از خطوط تزویج شده اعمال شده است. رزوناتور طراحی شده نهایی در شکل(۸-الف) نشان داده شده است. به‌منظور مشخص شدن اثر اعمال شکاف عرضی بر رزوناتور، تغییر پاسخ به ازای تغییر D و با لحاظ L=۰/۲mm در شکل(۸-ب) نشان داده شده است. این تغییرات در مدار معادل به‌صورت افزایش در مقدار سلف L3 و کاهش مقدار خازن‌های C4 و C5 ظاهر می‌شود.



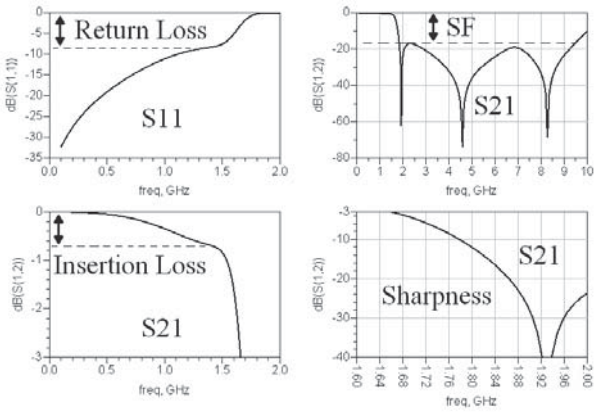
الف



ب

شکل(۸-الف): رزوناتور بهبود یافته ب) پاسخ رزوناتور به ازای تغییرات D

همچنان که از شکل(۸-ب) مشخص است با افزایش D، صفرهای انتقال محدود TZ1, TZ3 به سمت فرکانس‌های پایین‌تر منتقل می‌شوند. انتقال TZ3 به فرکانس‌های پایین‌تر سبب بهبود پاسخ در باند توقف می‌شود. با توجه به اینکه محل صفر انتقال موجود در مجاورت فرکانس قطع(TZ1) تعیین کننده شیب پاسخ در باند گذار است، بنابراین با انتقال TZ1 به فرکانس‌های پایین‌تر که با افزایش مقدار D محقق می‌شود می‌تواند شیب پاسخ را تا حد مطلوبی بهبود ببخشد. بدین منظور برای رزوناتور بهبود یافته مقدار D=۴/۵mm در نظر گرفته می‌شود. شکل(۹) جزئیات پارامترهای پراکندگی رزوناتور بهبود یافته با شکاف عرضی را نشان می‌دهد.



شکل(۹): جزئیات پارامترهای پراکندگی رزوناتور بهبود یافته

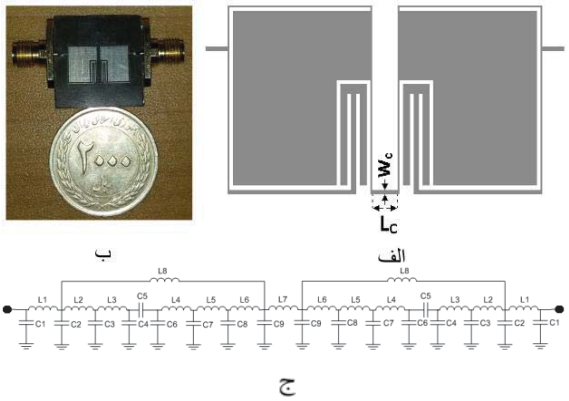
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.2.6.9]

همان‌گونه که از شکل(۹) دیده می‌شود، رزوناتور بهبود یافته در نمودار S21 دارای ریپل ناچیزی است و مقدار تلفات تزریقی در باند عبور کمتر از ۰/۷dB است. نمودار S11 میزان تلفات بازگشتی باند عبور را از DC تا ۱,۵GHz بهتر از ۹dB- نشان می‌دهد. این سبب می‌شود که رزوناتور طراحی شده دارای مقدار ناچیزی توان بازگشتی باشد. ضمناً تقریباً صفر بودن S11 در بازه نسبتاً وسیعی از باند حذف نشان می‌دهد که تلفات تشعشعی بسیار کم و قابل چشم‌پوشی است. مشاهده می‌شود که باند گذار این رزوناتور به۰/۲۶GHz کاهش یافته است و همچنین مقدار S21 در باند توقف از فرکانس ۱/۸۳GHz تا ۹GHz به زیر ۱۷dB رسیده است. نتایج گویای این است که این رزوناتور دو ضعف اساسی رزوناتور سنجاقی که شامل: ۱- وجود سیگنال‌های ناخواسته در باند توقف ۲- شیب مایل منحنی در باند گذار، را به‌خوبی برطرف کرده است.

۳- پیاده‌سازی و شبیه‌سازی فیلتر پایین‌گذر با باند گذار تیز و فاکتور توقیف بالا

به‌منظور سنتز فیلتر پایین‌گذر با باند گذار تیز و فاکتور توقیف بالا، از دو رزوناتور با ابعاد مشابه، که به‌صورت آینه، توسط خط انتقال مایکرواستریپ با طول و عرض W_C, L_C سری شده‌اند، استفاده شده است. این ساختار در شکل(۱۰-الف) نشان داده شده است. انجام این کار سبب می‌شود صفر انتقالی موجود در مجاورت فرکانس قطع، قوی‌تر شده و به‌تبع آن، شیب پاسخ در باند گذار تیزتر شود. همچنین قوی‌تر شدن سایر صفرهای انتقالی موجود در باند توقف سبب بهبود پاسخ و افزایش فاکتور توقیف می‌شود. افزایش میزان تلفات تزریقی (IL) اولین مشکلی است که از تحلیل الکترومغناطیسی این ساختار ظاهر می‌شود. مقادیر بهینه شده ابعاد قسمت‌های اضافه شده عبارت‌اند از: $W_C = ۰/۱ \text{ mm}$ ، $L_C = ۱ \text{ mm}$

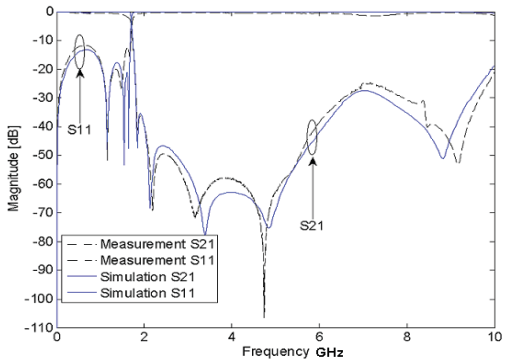


ج

شکل(۱۰- الف): ابعاد فیلتر طراحی شده ب) تصویری از فیلتر ساخته شده

ج) مدار معادل فیلتر طراحی شده

ساختار به‌دست آمده، بر روی زیر لایه دی‌الکتریک با استفاده از فنّاوری مدار چاپی حکاکی شده ساخته شده است. تصویر ساخته شده این فیلتر در شکل۱۰-ب و مدار معادل فیلتر در شکل(۱۰- ج) نشان داده شده است. اندازه‌گیری پارامترهای پراکندگی فیلتر ساخته شده توسط تحلیل‌گر شبکه ZVL13 صورت گرفته است. شکل(۱۱) نمودار پارامترهای پراکندگی S21 و S11 مربوط به دو حالت شبیه‌سازی و اندازه‌گیری را نشان می‌دهد.



شکل(۱۱): نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری فیلتر طراحی شده

منحنی پاسخ S21 در باند عبور نشان می‌دهد که میزان تلفات تزریقی این رزوناتور کمتر از ۰/۲ dB است. نمودار S۱۱ نشان می‌دهد که میزان تلفات بازگشتی در باند عبور بهتر از ۱۴ dB- است. این نشان می‌دهد که فیلتر طراحی شده دارای مقدار ناچیزی توان بازگشتی است. باند گذار این فیلتر (از ۳ dB- به ۴۰ dB-) به عدد ۰/۱۲GHz رسیده است، که نشان از تیز بودن پاسخ در باند گذار است. بنابراین بر اساس مطالب گفته شده‌ی پیشین، فیلتر طراحی شده دارای حداقل چهار مزیت اساسی نسبت به سایر فیلترهای طراحی شده است. مزیاتی که این ساختار را از سایر کارهای انجام شده متمایز می‌کند عبارت‌اند از: ۱- باند گذار تیز ۲- فاکتور توقیف بالا ۳- اندازه نرمالیزه کم ۴- ضریب شایستگی بالا. جدول(۳) مقایسه‌ای از این فیلتر با سایر کارهای انجام شده نشان می‌دهد.

جدول (۳): مقایسه‌ای از این فیلتر با سایر کارهای انجام شده

ref	ξ	*RSB*	*SF*	*NCS*	*AF*	*FOM*
[2]	36.3	1.323	1.5	0.0062	1	11543
[5]	40.7	1.078	2	0.0203	1	4312
[11]	81	1.72	2	0.0170	1	16400
[12]	58.6	1.54	2	0.0088	1	20495
[13]	52.5	1.22	2	0.0288	1	4478
[14]	56.6	1.7	2	0.0089	1	6373
[15]	22	1.55	1.5	0.0072	1	7095
[16]	200	1.41	2	0.1800	1	2805
[17]	46	1.37	2	0.0375	1	3279
[18] فیلتر طراحی شده	308	1.4	2	0.0108	1	79851

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.2.6.9]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol14 No.2 Summer 2017

۴- نتیجه‌گیری

به‌منظور سنتز فیلتر پایین‌گذر با باند گذار تیز و فاکتور توقیف بالا، از دو رزوناتور با ابعاد مشابه،که به‌صورت آینه، توسط خط انتقال مایکرواستریپ سری شده‌اند، استفاده شده است. فیلتر طراحی شده دارای فرکانس قطع ۱/۶۹ گیگاهرتز است. این فیلتر به‌صورت عملی ساخته شده و پارامترهای آن برای مقایسه با مقادیر تئوری اندازه‌گیری شده است. نتایج ساخت و اندازه‌گیری این فیلتر، انطباق خوبی با نتایج شبیه‌سازی از خود نشان می‌دهد. نهایتاً مقایسه‌ی نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی فیلترهای طراحی شده با فیلترهای پیشین ارائه شده است. این نتایج، نشان می‌دهد فیلتر طراحی شده در این مقاله نسبت به سایر فیلترهای ارائه شده در مقالات مختلف، دارای برتری قابل توجه‌ی است.

مراجع

[1] Nosrati, M. and A. Najafi, "Bandwidth enhancement and further size reduction of a class of elliptic-function low-pass filter using modified hairpin resonators," Progress In Electromagnetics Research C., Vol. 5, pp.187-194, 2008.

[2] Wang, J.; Xu, L.-J.; Zhao, S.; Guo, Y.-X.; Wu, W., "Compact quasi-elliptic microstrip lowpass filter with wide stopband," Electron. Lett, Vol. 46, No. 20, pp.1384 – 1385, Sep 2010.

[3] Zhewang MA, Kaneo NOMIYAMA, Members, and Yoshio KOBAYASHI, "Microstrip Lowpass Filters with Reduced Size and Improved Stopband Characteristics," IEICE TRANS. ELECTRON., VOL.E88–C, NO.1, pp.62-67, JANUARY 2005.

[4] Li, J.-L., Qu, S.-W., and Xue, Q, "Compact microstrip lowpass filter with sharp roll-off and wide stop-band," Electron. Lett., Vol.45, No.2, pp.110-111, 2009.

[5] Li, L., and Li, Z.-F, "Compact quasi-elliptic lowpass filter using symmetric rectangular coupled capacitors," Electron. Lett., Vol.44, No.2, pp.124-125, Jan.2008.

[6] Mandal, M.K., Mondal, P., Sanyal, S., and Chakrabarty, A, "Low insertion-loss, sharp-rejection and compact microstrip lowpass filters," IEEE Microwave and Wireless Components Letters., Vol.16, No.11, pp.600-602, Nov.2006.

[7] Wadell. C.B., "Transmission line design handbook," Artech House, Norwood, MA, USA, 1991.

[8] L.-H. Hsieh and K. Chang, "Compact elliptic-function low-pass filters using microstrip stepped-impedance hairpin resonators" , IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 51, no. 1, pp. 193–199, Jan. 2003.

[9] JIA-SHING HONG and M.J.LANCASTER, "Microstrip Filters for RF/Microwave Applications" , Wiley, New York, 2001.

[10] M. Hayati and A. Lotfi, "Elliptic-function lowpass filter with sharp cutoff frequency using slit-loaded tapered compact microstrip resonator cell," Electron. Lett., Vol.46, No.2, pp.143-144, Jan 2010.

[11] Hayati M, Abbasi H, Shama F. "Microstrip lowpass filter with ultra wide stopband and sharp roll-off". Arabian J. Sci. Eng. 39:6249–6253, 2014.

[12] Hayati M, Shama F, Abbasi H. "Compact microstrip lowpass filter with wide stopband and sharp roll-off using tapered resonator". Int. J. Electro;100:1751–1759, 2013.

[13] Hayati M, Yousefzadeh Y. "Compact lowpass filter with wide stopband using windmillshaped resonator". Arabian J. Sci. Eng.;39:3033–3038, 2014.

[14] Xu J, Ji YX, Wu W, Miao C. "Design of miniaturized microstrip LPF and wideband BPF with ultra-wide stopband". IEEE Microwave Compon. Lett.;23:397–399, 2013.

[15] Jin Xu ; Yu-Xue Ji , "Wen Wu ; Chen Miao Design of Miniaturized Microstrip LPF and Wideband BPF With Ultra-Wide Stopband,"IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., vol. 23, no. 8, , pp. 397 – 399, 2013.

[16] R. Gómez-García, M.-A. Sánchez-Soriano, M. Sánchez-Renedo, G. Torregrosa-Penalva and E. Bronchalo, " Extended-stopband microstrip lowpass filter using rat-race directional couplers," IEE Electron. Lett., vol. 49, no. 4, pp. 272-274, 2013.

[17] H. Sariri, Z. Rahmani, A. Lalbakhsh, S. Majidifar, "Compact LPF Using T-shaped Resonator," Frequenz, vol. 67, (1-2), pp. 17-20, 2013.

زیرنویس‌ها

1- Twisted asymmetric hairpin resonator
2 - Stop-Band Bandwidth
3 - Sharpness
4 - Compact Size
5 - Insertion Loss
6 - Scattering Parameters
7 - Typical
8 - Sharpness
9 - Relative Stop-Band Bandwidth
10 - Suppression Factor
11 - Normalized Circuit Size
12 - Architecture Factor
13 - Figure-Of-Merit
14 - Stepped Impedance
15 - Ladder
16 - Wide pass-band
17 - Sharp Transition band

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-09]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.2.6.9]