

## فیلتر میان‌گذر فوق پهن باند با باند توقف وسیع بر اساس ساختارهای فراماده

خدیدجه رضانی بلداجی<sup>۱</sup>، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ مسعود موحدی<sup>۲</sup>، دانشیار؛ علی غفورزاده یزدی<sup>۳</sup>، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه یزد - یزد - ایران - Ramezanikhadige@stu.yazd.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه یزد - یزد - ایران - Movahhedi@yazd.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه یزد - یزد - ایران - Aghafoorzadeh@yazd.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله، یک فیلتر فشرده و فوق پهن باند با باند توقف بسیار وسیع، با استفاده از ساختارهای فراماده ارائه شده است. در ابتدا یک سلول فراماده با ترکیب خازن‌های بین‌انگشتی و شاخه اتصال کوتاه اصلاح شده است؛ سپس با افزایش اندوکتانس سلفی خطوط دست چپی و کاهش ظرفیت خازنی خطوط دست راستی، دو قطب پایدار در این سلول -که در اصطلاح تشدیدگر نامیده می‌شود- ظاهر شده که باعث ایجاد پهنای باند نسبتاً وسیعی شده است. در ادامه، با متوالی قرار دادن پنج تشدیدگر پیشنهادی، به فیلتری با باند عبور ۱۲/۶GHz-۳ و باند قطع ۲۰GHz-۱۴/۷ دست پیدا کرده‌ایم. اندازه کلی این فیلتر  $30 \times 8.85 \text{ mm}^2$  است که در مقایسه با بسیاری از فیلترهای پهن‌باند موجود دارای اندازه بسیار فشرده‌تری می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** فیلتر میان‌گذر پهن باند، فراماده، ساختار بین‌انگشتی، ریزنواری

## An Ultra Wide Bandpass Filter with Wide Stop Band Based on Metamaterial Structures

K. Ramezani-Boldaji<sup>1</sup>, MSc Student; M. Movahhedi<sup>2</sup>, Associate Professor; A. Ghafoorzade-Yazdi<sup>3</sup>, Assistant Professor

1- Electrical Engineering Department, Yazd University, Yazd, Iran, Email: Ramezanikhadige@stu.yazd.ac.ir

2- Electrical Engineering Department, Yazd University, Yazd, Iran, Email: Movahhedi@yazd.ac.ir

3- Electrical Engineering Department, Yazd University, Yazd, Iran, Email: Aghafoorzadeh@yazd.ac.ir

**Abstract:** In this paper, a new ultra wide band (UWB) filter with wide stop band, based on metamaterial structures is presented. At first, a new metamaterial unit cell including interdigital capacitor and short-circuited stub is repented. inductance and decreasing the right handed capacitance of the structure, two stable poles in the unit cell, which called resonator, are produced. Finally, by cascading five introduced resonators, an UWB filter with pass band from 2.8 GHz to 13.2 GHz and stop band from 14.7GHz to 17 GHz is presented. The total size of the proposed filter is  $30\text{mm} \times 8.85\text{mm}$  so that its size is more smaller in comparison with many other existing UWB filters.

**Keywords:** Ultra Wide Band-Pass Filter, Metamaterial, Interdigital Structure, Microstrip

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۰۹

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۱۷، ۱۳۹۶/۰۹/۲۲ و ۱۳۹۶/۱۰/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۳۰

نام نویسنده مسئول: علی غفورزاده یزدی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - یزد-دانشگاه یزد-پردیس فنی و مهندسی - دانشکده مهندسی برق

## ۱- مقدمه:

علت بیش از حد کوچک بودن ابعاد ساختار، ساخت این فیلترها در کشور با محدودیت‌های زیادی روبه‌رو می‌باشد. یکی دیگر از روش‌های پیاده‌سازی فیلترهای پهن باند، استفاده از ساختارهای زمین ناقص در صفحه زمین فیلتر است [۱۳، ۱۴]. در این فیلترها، جهت افزایش ضریب توزیع بین خازن‌های بین‌انگشتی به‌کاربرده شده در تغذیه این فیلتر، از شکاف‌هایی در صفحه زمین استفاده شده است. با ایجاد شکاف‌هایی باریک شونده در صفحه زمین، پهنای باند توقف این فیلترها افزایش یافته و به بیش از ۲۰GHz رسیده است. از دیگر روش‌های پیشنهاد شده برای پیاده‌سازی فیلتر میان‌گذر پهن باند می‌توان به ساختارهایی که در آن‌ها از ترکیب متوالی فیلتر پایین‌گذر و بالاگذر [۱۵] و یا ترکیب متوالی فیلترهای میان‌گذر و میان‌نگذر [۱۶] استفاده می‌کنند، نام برد. با وجود اینکه این نوع از فیلترها دارای باند توقف نسبتاً وسیعی هستند، اما داری اندازه بسیار بزرگی می‌باشند. برای کوچک‌سازی فیلترهای پهن باند در سال‌های اخیر، استفاده از ساختارهای فرامواد پیشنهاد شده است. ساختارهای فرامواد با داشتن ثابت انتشار منفی [۱۷] توانسته‌اند اندازه فیلترهای پهن باند را به نسبت قابل‌توجهی کاهش و تأخیر گروه این فیلترها را افزایش دهند. در مراجع [۲۲-۱۸] ساختارهای مختلف فیلترهای طراحی شده با استفاده از خازن بین‌انگشتی به همراه استاب اتصال کوتاه به‌عنوان ساختارهای متداول فراماده-ارائه شده‌اند. با وجود کوچک شدن اندازه، این نوع فیلترها دارای باند توقف نسبتاً کمی هستند و مقدار تیزی در لبه‌های انتهای باند عبور این فیلترها نیز بسیار کم می‌باشد. برای افزایش مقدار تیزی در ابتدا و انتهای باند عبور فیلتر پهن باند، استفاده از ساختارهای  $CSRR^2$ ،  $SRR^2$  و خازن‌های بین‌انگشتی به همراه  $CSRR$ ، در سال‌های اخیر پیشنهاد شده‌اند [۲۳-۲۵]. این نوع ساختارها، با پوشش دادن پهنای باند مورد نیاز، مقدار تیزی لبه‌ها در فرکانس‌های قطع بالا و پایین را نیز به نسبت قابل‌توجهی افزایش می‌دهند. اما باند توقف در این نوع فیلترها حداکثر تا ۱۵GHz می‌باشد.

در این مقاله، یک فیلتر میان‌گذر فوق پهن باند جدید ارائه شده است. فیلتر پیشنهادی از ساختار فراماده، محقق شده با استفاده از خازن‌های بین‌انگشتی پهن باند و شاخه اتصال کوتاه تشکیل شده است. همان‌طور که در [۲۶] بیان شده، استفاده از استاب اتصال کوتاه باعث ایجاد صفر انتقال در فرکانس‌های پایین در یک فیلتر پهن باند می‌گردد. سلول فراماده مورد استفاده در پیاده‌سازی فیلتر پهن باند پیشنهادی، ترکیبی از سلول ارائه شده در مرجع [۲۷] - که به‌عنوان ساختار تأخیری مورد استفاده قرار گرفته- به همراه یک استاب اتصال کوتاه می‌باشد. نتایج تحلیل مدار معادل سلول پیشنهادی و همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که سلول فراماده ارائه شده می‌تواند به‌عنوان یک ساختار فیلتری فوق پهن باند ایفای نقش نماید. علاوه بر این، متوالی نمودن چندین سلول، باعث افزایش پهنای باند و بهبود عملکرد فیلتری ساختار خواهد شد.

فیلتر میان‌گذر پهن باند یکی از اجزای مهم در سیستم‌های ارتباطی بیسیم است. زمانی که کمیسیون ارتباطات فدرال، باند فرکانسی ۳/۱GHz-۱۰/۶GHz را به‌عنوان باند فرکانسی برای کاربردهای تجاری در فوریه ۲۰۰۲ انتخاب نمود [۳-۱]، تکنولوژی ارتباطات بی‌سیم در محدوده پهن باند، مورد توجه بسیاری از علاقه‌مندان که در صنعت کار می‌کردند، قرار گرفت. از آن زمان، تحقیقات زیادی در زمینه طراحی و ساخت فیلترهای باند وسیع با روش‌های مختلف به انجام رسیده است که هرکدام دارای ساختارهای مختلفی می‌باشند. پیاده‌سازی با استفاده از ساختارهای چند مدی، تیز کردن لبه بالا و پایین فیلتر، کوچک‌سازی اندازه، افزایش باند قطع و بهبود کارایی الکتریکی از جمله پارامترهای مهم در بهینه‌سازی این نوع فیلترها می‌باشد. استفاده از چنین فیلترهایی در سیستم‌های پهن باند مزایایی از جمله انتقال داده با سرعت بالاتر و استفاده از توان انتقالی کمتری را به همراه دارد. اما از آنجایی که یکی از وظایف فیلترها در سیستم‌های مخابراتی، کاهش سطح نویز می‌باشد و میزان نویز خروجی وابسته به پهنای باند آن‌ها است، لذا در فیلترهای پهن باند، میزان نویز خروجی از فیلتر نسبت به فیلترهایی با پهنای باند کم به‌طور چشمگیری بیشتر می‌باشد.

برای دستیابی به فیلتر پهن باند، روش‌های مختلفی استفاده شده است. به‌عنوان مثال در مرجع [۴]، فیلتر پهن باند با ترکیب خط ریزنواری و موجبر هم‌صفحه‌ای (cpw) ارائه شده است. در این فیلتر، برای افزایش پهنای باند از یک تشدیدگر موجبر هم‌صفحه غیریکنواخت استفاده شده است. این تشدیدگر دارای سه فرکانس رزونانس اطراف فرکانس‌های پایین و بالا و در فرکانس میانی باند عبور می‌باشد. علاوه بر این، یک سطح ریزنواری/موجبر هم‌صفحه‌ای برای افزایش سطح توزیع در فرکانس‌های میانی به‌کاربرده شده است.

از میان روش‌های مختلف پیاده‌سازی فیلتر پهن باند، استفاده از ساختارهای رزونانسی مورد توجه بسیاری از علاقه‌مندان بوده است. در مراجع [۵-۹] ساختارهای مختلف رزونانسی استفاده شده، که معمولاً از یک تشدیدگر ۳ یا ۴ مده به همراه خطوط کوپلاژ موازی و یا خطوط توزیع بین‌انگشتی برای ایجاد صفر انتقال در پاسخ فرکانسی استفاده می‌شود. اگرچه پهنای باند این فیلترها تمام پهنای باند موردنظر سیستم‌های پهن باند را پوشش می‌دهد، اما این ساختارها دارای باند قطع نسبتاً کمی بوده و به علت استفاده از خطوط توزیع، دارای اندازه نسبتاً بزرگی هستند. در میان انواع مختلف تشدیدگرهای پیشنهاد داده شده برای پیاده‌سازی فیلتر پهن باند، فیلتر پیشنهاد شده در مراجع [۱۰-۱۲] از یک تشدیدگر دایروی شکاف‌دار به همراه خطوط توزیع بین‌انگشتی استفاده می‌کنند. این تشدیدگر، توانایی ایجاد تعداد مدهای بیشتری را در پاسخ فرکانسی مربوط به خود دارد. در این فیلترها، عرض استاب‌های دایروی شکل به اندازه ۰/۲ mm بوده و پهنای فاصله بین خطوط توزیع در آن‌ها، ۰/۱ mm و ۰/۰۵ mm می‌باشد. به

فرامواد ساختارهای الکترومغناطیسی همگنی هستند که دارای ضریب گذردهی الکتریکی و ثابت نفوذپذیری مغناطیسی منفی می‌باشند. سلول فراماده پیشنهادی در [۲۷]، که به‌عنوان خط تأخیر پهن باند مورد استفاده قرار گرفته است، به همراه مدار معادل آن در شکل (۳) نمایش داده شده است. پارامترهای مدار معادل این سلول از روابط (۱)–(۴) قابل محاسبه می‌باشند.

$$L_R = \frac{Z_0 \sqrt{\epsilon_{re}}}{Nc} L \quad (1)$$

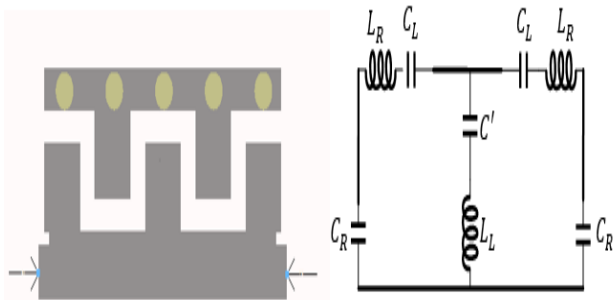
$$C_R = \frac{N \sqrt{\epsilon_{re}}}{Z_0} L \quad (2)$$

$$C_L = (\epsilon_r + 1) \left\{ \begin{array}{l} 4.409(N-3) \tanh \left[ .55 \left( \frac{h}{w} \right)^{0.45} \right] \\ + 9.92 \tanh \left[ .52 \left( \frac{h}{w} \right)^.5 \right] \end{array} \right\} \times 10^{-12} \quad (3)$$

$$L_l = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[ \frac{h \ln \left( \frac{h + \sqrt{r^2 + h^2}}{r} \right)}{+ \frac{3}{2} \left( r - \sqrt{r^2 + h^2} \right)} \right] + \frac{z_0 \sqrt{\epsilon_{re}}}{c} l' \quad (4)$$

در روابط (۱)–(۴)،  $h$  ضخامت خط ریزناری،  $r$  شعاع میله (via) زمین شده،  $\epsilon_r$  ضریب دی‌الکتریک مؤثر،  $L$  طول انگشت‌ها،  $N$  تعداد انگشت‌ها،  $w$  عرض هر کدام از انگشت‌ها،  $l'$  فاصله زوایای زمین شده تا پورت‌ها،  $Z_0$  امپدانس هر کدام از انگشت‌ها و  $c$  سرعت نور است.

پاسخ فرکانسی سلول خط تأخیر (شکل (۳)) در شکل (۴) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، سلول خط تأخیر ارائه شده در [۲۷] به مانند یک فیلتر پایین‌گذر عمل می‌نماید.

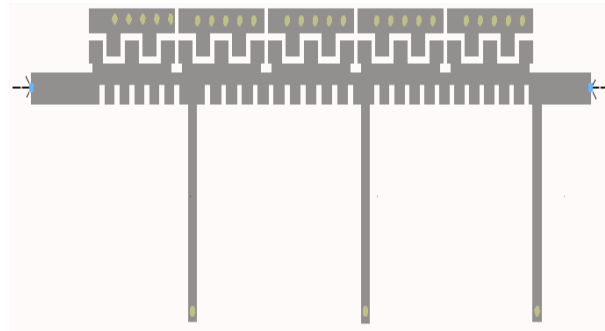


شکل ۳: سلول واحد برای پیاده‌سازی خط تأخیر پهن باند [۲۷]

ساختار نوشتاری مقاله حاضر به‌قرار زیر است. در بخش ۲، سلولی جدید بر پایه ساختارهای فراماده با پاسخ فرکانسی مشابه با فیلتر فوق پهن باند ارائه می‌شود. در ادامه این بخش، نتایج مدار معادل و تمام موج سلول ارائه شده مورد بحث قرار خواهد گرفت. در بخش ۳، فیلترهای مختلف فوق پهن باند طراحی شده با سلول پیشنهادی با اندازه‌های بسیار فشرده و باند توقف بسیار وسیع ارائه می‌شوند. در بخش پایانی نیز نتایج شبیه‌سازی و ساخت این فیلترها بر روی زیرلایه Rogers 4003C با ثابت دی‌الکتریک ۳/۵۵ و ثابت تلفات ۰/۰۰۲۷ و با ضخامت ۰/۵۵ میلی‌متر ارائه می‌شوند.

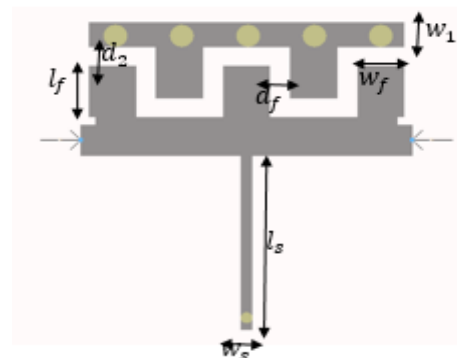
## ۲- فیلتر پیشنهادی و سلول تشکیل‌دهنده آن

ساختار فیلتر پیشنهادی در شکل (۱) نشان داده شده است این فیلتر به نوعی از ترکیب ۵ سلول فراماده تشکیل شده است. سلول‌های فراماده تشکیل‌دهنده این فیلتر که در اصطلاح تشدیدگر نامیده می‌شوند، در شکل (۲) نمایش داده شده‌اند.



شکل ۱: فیلتر فوق پهن باند پیشنهادی

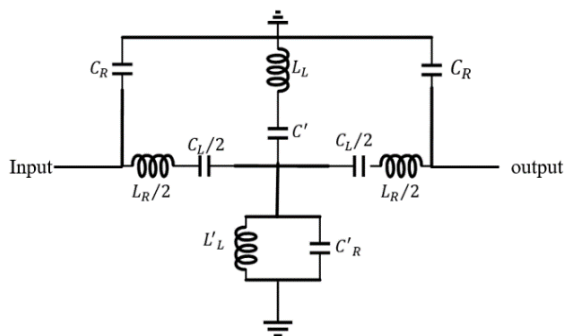
در این فیلتر برای رسیدن به پهنای باند موردنظر از خطوط بین انگشتی پهن باند و جهت ایجاد صفر انتقال از شاخه اتصال کوتاه با طول  $\lambda_g$  در فرکانس مرکزی فیلتر، استفاده می‌شود. همچنین با کاهش ظرفیت خازنی خطوط بین انگشت‌ها توانسته‌ایم به باند توقف وسیعی دست پیدا کنیم و یک سلول فراماده جدید ارائه نماییم.



شکل ۲: ساختار سلول فراماده فوق پهن باند

۲-۱- مدار معادل سلول واحد پیشنهادی برای طراحی فیلتر

مدار معادل سلول واحد پیشنهادی یا در اصطلاح تشدیدگر موردنظر (شکل (۳)) برای طراحی فیلتر را می‌توان به صورت شکل (۶) نمایش



شکل ۶: مدار معادل تشدیدگر پیشنهادی

داد. با در نظر گرفتن مدار معادل این ساختار، تابع انتقال این تشدیدگر جهت محاسبه صفر و قطبها و بررسی درستی عملکرد فیلتر محاسبه شده است. تابع انتقال این ساختار با توجه به روابط (۷)-(۹) به دست می‌آید.

$$S_{12} = 2 * F / (K + F)(j\omega K C_R + 2) \quad (7)$$

$$K = [4 + L_R C_L (j\omega)^2] / (2 C_L j\omega) \quad (8)$$

$$F = \frac{(L'_L L_L (j\omega)^3 + L'_L (j\omega))}{(L_L C'_L L'_L C'_R (j\omega)^4 + (j\omega)^2 (L'_L C' + L'_L C'_R + L_L C') + 1)} \quad (9)$$

محل صفرهای پایدار این فیلتر با صفر قرار دادن صورت تابع انتقال، به صورت روابط (۱۰) و (۱۱) محاسبه می‌شوند.

$$f_{z1} = \left( \frac{-[L'_L C' + L'_L C'_R + L_L C'] C_L}{+\sqrt{\Delta} / 2 (L'_L C'_R L'_L C'_L C_L)} \right) \quad (10)$$

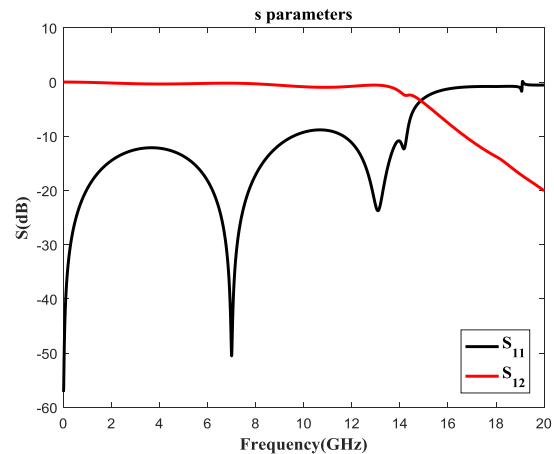
$$f_{z2} = \left( \frac{-[L'_L C' + L'_L C'_R + L_L C'] C_L -}{-\sqrt{\Delta} / 2 (L'_L C'_R L'_L C'_L C_L)} \right) \quad (11)$$

قابل ذکر است در روابط (۱۰) و (۱۱)،  $\Delta$  به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\Delta = [L'_L C' + L'_L C'_R + L_L C']^2 C_L^2 - 4 (L'_L C'_R L'_L C'_L C_L) C_L \quad (12)$$

محل قطبهای پایدار این فیلتر نیز با صفر قرار دادن مخرج تابع انتقال، که یک معادله درجه ۶ است، به دست می‌آید. چون محاسبه

برای تبدیل ساختار شکل (۳) (سلول خط تأخیر پهن باند) که به صورت یک فیلتر پایین گذر نیز عمل می‌کند به یک فیلتر میان‌گذر پهن باند، نیاز به استفاده از روشی است که در فرکانسهای پایین صفر انتقال ایجاد نموده و در نهایت سلول فراماده پیشنهادی را به یک فیلتر میان‌گذر تبدیل نماید.



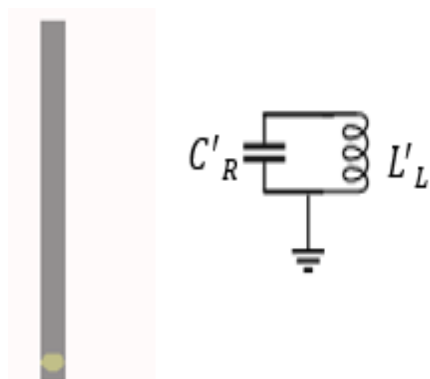
شکل ۴: نتایج شبیه‌سازی سلول خط تأخیر پهن باند

همان‌طور که در [۲۶] بیان شده است، استفاده از استاب اتصال کوتاه باعث ایجاد صفر انتقال در فرکانسهای پایین می‌شود. مدار معادل استاب اتصال کوتاه را می‌توان با توجه به مرجع [۲۸]، به صورت یک مدار LC که در شکل (۵) نمایش داده شده است، در نظر گرفت. مقدار ظرفیت خازنی و اندوکتانس سلفی این مدار LC طبق روابط زیر قابل محاسبه هستند.

$$L'_L = 2 * 10^{-4} L_S \left[ \frac{\ln(L_S / (w_S + t))}{+1.193 + .2235(w_S + t / L_S)} \right] * k_g \quad (5)$$

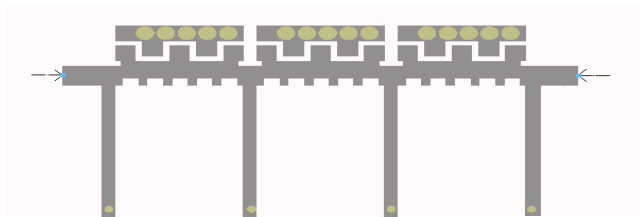
$$C'_R = 16.67 * 10^{-4} L_S (\sqrt{\epsilon_{re}} / Z_1) \quad (6)$$

در روابط (۵) و (۶)  $L_S$  طول استاب،  $w_S$  عرض استاب،  $t$  ضخامت استاب و  $Z_1$  امپدانس مشخصه استاب موردنظر می‌باشد.

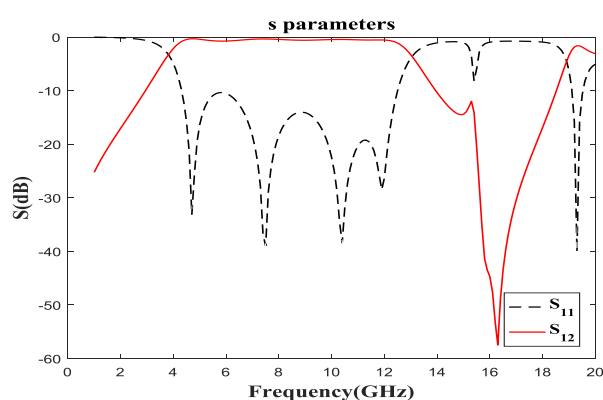


شکل ۵: ساختار و مدار معادل استاب اتصال کوتاه

موردنظر را گسترش داد. شکل (۸)، فیلتر فوق پهن باندی را نشان می‌دهد که از ترکیب ۳ سلول پیشنهادی و یک شاخه اتصال کوتاه اضافه‌تر طراحی شده است. همان‌گونه که از پاسخ فرکانسی این فیلتر مشاهده می‌شود پهنای باند نسبی این فیلتر ۱۰۶ درصد می‌باشد. به نظر می‌رسد بتوان با



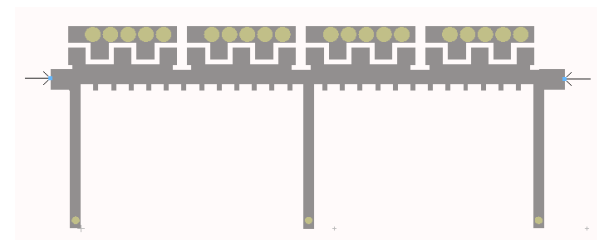
شکل ۸: فیلتر پهن باند با متوالی قرار دادن ۳ سلول پیشنهادی در کنار یکدیگر



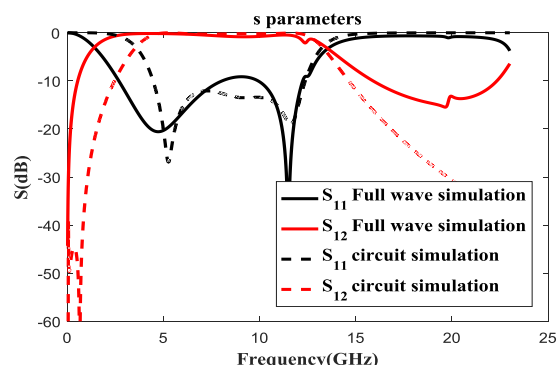
شکل ۹: پاسخ فرکانسی فیلتر پهن باند با متوالی قرار دادن ۳ سلول پیشنهادی در کنار یکدیگر

متوالی قرار دادن تعداد بیشتری از این تشدیدگرها، به فیلتری با پهنای باند بیشتر دست یافت. در ادامه روند طراحی فیلتر فوق پهن باند، ساختار فیلتر به صورت شکل (۱۰) اصلاح می‌گردد. این ساختار از ترکیب ۴ سلول خط تأخیر (شکل (۳)) به همراه ۳ شاخه اتصال کوتاه تشکیل شده است، که در مقایسه با فیلتر پیشنهادی شکل (۸) دارای پهنای باند بیشتری می‌باشد. در شکل (۱۰) ساختار فیلتر ذکر شده و در شکل (۱۱) پاسخ فرکانسی آن نشان داده شده است.

در نهایت با متوالی قرار دادن ۵ سلول خط تأخیر و ۳ شاخه اتصال کوتاه به صورت چیدمان شکل (۱)، فیلتر فوق پهن باند به دست خواهد آمد. پاسخ فرکانسی این فیلتر در شکل (۱۱) نمایش داده شده است. با در نظر گرفتن مقدار توان تلفاتی عبوری ۱/۵ dB برای این فیلتر، بازه عبور و باند انتقال در فرکانس‌های ۳GHz و ۱۲/۶GHz رخ می‌دهد.



جواب تحلیلی این معادله دشوار می‌باشد، لذا مقادیر قطب‌های این فیلتر با شبیه‌سازی مشخص شده‌اند. پاسخ فرکانسی مدار معادل سلول پیشنهادی به همراه نتایج شبیه‌سازی تمام موج این سلول که در نرم‌افزار HFSS انجام شده، در شکل (۷) ارائه شده است.



شکل ۷: مقایسه پاسخ فرکانسی مدار معادل سلول واحد پهن باند در نرم‌افزار ADS با نتایج موج کامل HFSS

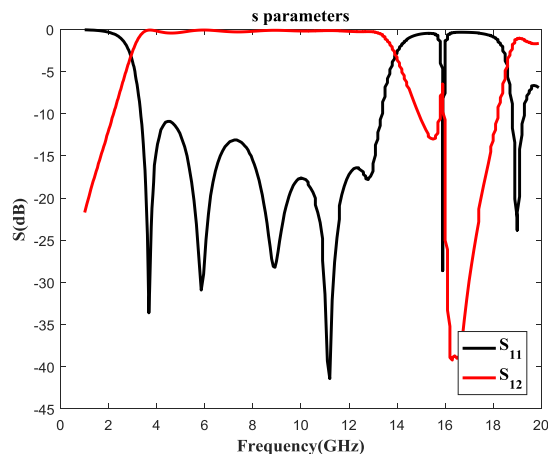
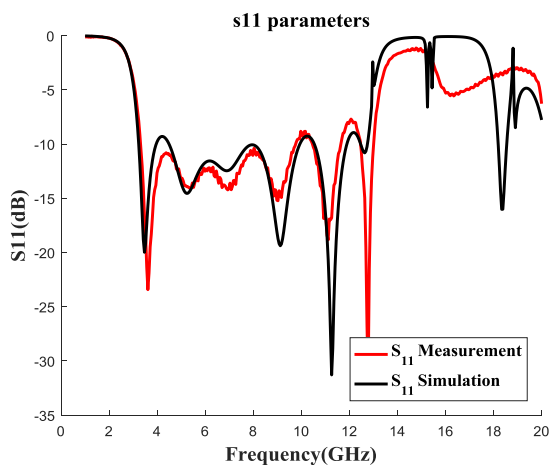
### ۳- شبیه‌سازی فیلترهای پهن باند و ارائه نتایج

پاسخ فرکانسی (پارامترهای پراکندگی) سلول واحد پیشنهادی که در شکل (۲) ارائه شده در شکل (۷) نشان داده شده است. با توجه به پاسخ فرکانسی به دست آمده، مشاهده می‌شود که با در نظر گرفتن مقدار توان تلفاتی به مقدار ۱dB، باند عبور این سلول از فرکانس فرکانس‌های  $f_{p1} = 4.11GHz$  و  $f_{p2} = 10.41GHz$  قرار دارند.

با توجه به پاسخ فرکانسی به دست آمده برای سلول واحد پیشنهادی و همچنین با در نظر گرفتن اثرات ناپیوستگی خطوط ریزنوری با جابه‌جایی مکان شاخه اتصال کوتاه می‌توان به تطبیق بهتری در این سلول دست یافت. در ادامه، برای رسیدن به پهنای باند فوق گسترده، با متوالی قرار دادن چندین سلول واحد پیشنهادی، پهنای باند فیلتر حاصل به صورت چشم‌گیری افزایش می‌یابد. همان‌گونه که قبلاً نیز بیان شد افزایش تعداد سلول‌های ساختار، افزایش تعداد قطب‌های سیستم و در نتیجه افزایش پهنای باند فیلتر را به دنبال خواهد داشت.

همچنین با توجه به فرمول‌های به دست آمده برای محاسبه فرکانس صفرهای انتقال، دیده می‌شود مقادیر صفرها بسیار وابسته به مقادیر سلف و خازن ایجاد شده به وسیله شاخه اتصال کوتاه هستند. بنابراین برای رسیدن به پهنای باند تعریف شده برای فیلترهای فرا پهن باند، نیاز به ایجاد یک صفر انتقال در فرکانس ۳GHz می‌باشد. لذا با اضافه کردن یک شاخه اتصال کوتاه دیگر می‌توان صفر انتقال در لبه پایین فیلتر را به فرکانس ۳GHz منتقل نمود. در واقع با اضافه کردن یک شاخه اتصال کوتاه اضافه‌تر، می‌توان با افزایش اندوکتانس سلفی خطوط دست چپی و کاهش ظرفیت خازنی خطوط دست راستی، پهنای باند

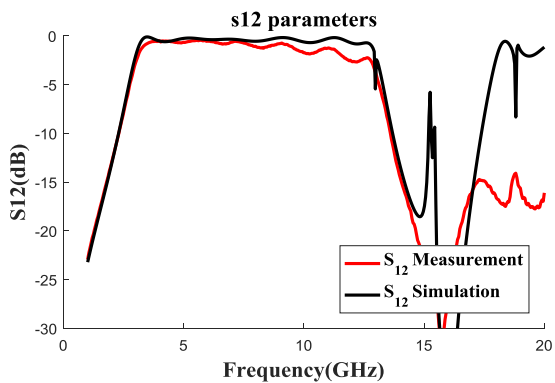
شکل ۱۰: فیلتر پهن باند با متوالی قرار دادن ۴ سلول خط تأخیر به همراه ۳ شاخه اتصال کوتاه



شکل ۱۱: پاسخ فرکانسی فیلتر فوق پهن باند شکل (۱۰)

شکل ۱۳: نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری پارامتر  $S_{11}$  ساختار

شکل (۱)



شکل ۱۴: نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری پارامتر  $S_{12}$  ساختار

شکل (۱)

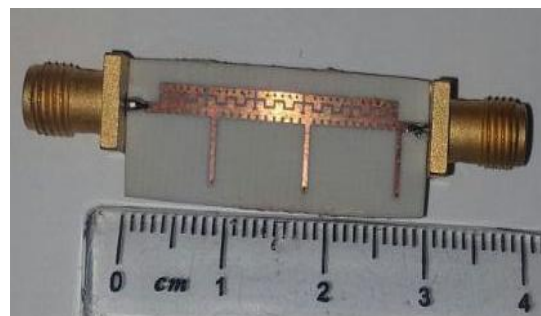
همچنین این فیلتر دارای ۶ قطب پایدار در فرکانس‌های  $3/5\text{GHz}$ ،  $5/2$ ،  $7/2$ ،  $9/1$ ،  $11/3$  و  $12/8$  بوده و باند توقف آن در بازه فرکانسی  $15/8-17/4\text{GHz}$  قرار دارد. در شکل (۱۲) نمایی از فیلتر فوق پهن باند ساخته شده، دیده می‌شود. با اندازه‌گیری پارامترهای پراکندگی این فیلتر به وسیله دستگاه Network analyzer که در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نشان داده شده است دیده می‌شود که مشابهت بسیار زیادی بین نتایج ساخت و شبیه‌سازی این فیلتر که در نرم‌افزار HFSS انجام شده است وجود دارد.

در شکل (۱۳) مقدار پارامتر  $S_{11}$  ساختار شکل (۱) در دو حالت شبیه‌سازی و نتایج اندازه‌گیری مقایسه شده است. همچنین در شکل (۱۴) مقدار پارامتر  $S_{12}$  این فیلتر نیز در دو حالت شبیه‌سازی و ارائه شده و مورد مقایسه قرار گرفته است. در این دو شکل مشابهت بسیار زیاد نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری فیلتر ساخته شده به خوبی قابل رؤیت می‌باشد.

همان‌طور که در شکل (۱۴) قابل مشاهده است، مقدار تیزی این فیلتر در دو لبه بالا و پایین آن برابر با  $1\text{dB/GHz}$ ، در دو حالت شبیه‌سازی و اندازه‌گیری می‌باشد. مقدار تأخیر گروه فیلتر فوق پهن باند در شکل (۱۵) نشان داده شده است.

همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، مقدار تأخیر این فیلتر در باند عبور فیلتر کاملاً ثابت و برابر با  $0.26\text{nsec}$  می‌باشد. قابل ذکر است که ثابت بودن تأخیر گروه در باند عبور فیلترها بسیار مهم بوده و به معنای عدم ایجاد اعوجاج فاز بر روی سیگنال عبوری از فیلتر پهن باند است. یکی از محاسن بسیار مهم فیلتر ارائه شده در این مقاله نسبت به بسیاری دیگر از فیلترهای فوق پهن باند دیگر، ثابت بودن تقریبی تأخیر گروه در باند عبور است. تغییرات تأخیر در باند عبور این فیلتر کمتر از  $0.1$  نانو ثانیه می‌باشد.

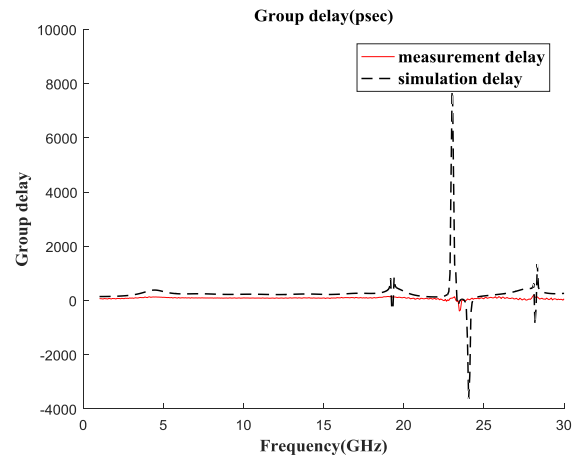
در جدول (۱) مقادیر پارامترهای بهینه به دست آمده ساختار در شبیه‌سازی تشدیدگر و فیلتر فوق پهن باند و در جدول (۲) پارامترهای محاسبه شده جهت پیاده‌سازی مدار معادل تشدیدگر فوق پهن باند ارائه شده است. قابل ذکر است که پارامترهای ساختار بر روی شکل (۲) تعریف شده و اسامی المان‌های مدار معادل بر روی شکل (۵) نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۲: فیلتر فوق پهن باند ساخته شده

$$RSB = \frac{stop\_bandwidth}{stop\_center\_frequency} \quad (15)$$

در رابطه (۱۳)  $NCS$  اندازه نرمالیزه شده فیلتر و  $RSB$  پهنای نسبی باند توقف فیلتر می‌باشند. با در نظر گرفتن مقدار تلف عبوری به مقدار  $1/5\text{dB}$  و مقدار تلف بازگشتی به مقدار  $15\text{dB}$  برای تمامی فیلترها پهنای باند نسبی و باند قطع محاسبه شده است. با توجه به جدول ارائه شده مشاهده می‌شود که پهنای باند فیلتر پیشنهادی به میزان  $123\%$  درصد بوده که در مقایسه با فیلترهای مورد مطالعه در این مقاله، افزایش چشمگیری داشته است. همچنین در این فیلتر با توجه به پهنای باند بسیار گسترده آن می‌توان گفت که اندازه این فیلتر در مقایسه با سایر فیلترها، بسیار کوچک‌تر اما نسبت به فیلترهای ساخته شده با ساختار  $SRR$  و  $CSRR$  بزرگ‌تر می‌باشد. همان‌گونه که قبلاً بیان گردید، یکی از محاسن فیلتر پیشنهادی عدم تغییر تأخیر گروه آن است که با توجه به جدول (۳) دیده می‌شود که میزان تأخیر گروه این فیلتر در مقایسه با سایر فیلترها دارای مقداری ثابت در تمامی باند عبور است. همچنین ساختار پیشنهادی دارای باند قطع  $20\text{GHz}$  -  $14/7$  می‌باشد که در مقایسه با فیلترهای ساخته شده با ساختارهای زمین ناقص و متوالی نمودن فیلتر پایین‌گذر و بالا‌گذر، دارای باند قطع کم‌تری می‌باشد. در کنار مزایای نام برده شده ساختار فوق دارای مقدار شیب قطع کمی در لبه‌های بالا و پایین نسبت به فیلترهای دیگر می‌باشد. این فیلتر نسبت به بسیاری از فیلترها دارای ضریب شایستگی بالاتری می‌باشد.



شکل ۱۵: مقدار تأخیر گروه فیلتر فوق پهن باند پیشنهادی

در جدول (۳)، فیلتر پیشنهادی با  $7$  فیلتر باند وسیع دیگر از جنبه‌های مختلف از قبیل پهنای باند نسبی، باند توقف، تیزی دامنه گزینندگی (roll-off)، مقدار تلفات بازگشتی در باند عبور، مقدار تأخیر گروه، ابعاد فیلتر مقایسه صورت گرفته است. همچنین با تعریف ضریب شایستگی به صورت رابطه (۱۳)، مزایا و معایب ساختار پیشنهادی ارائه شده است.

$$FOM = \frac{FBW \times RSB \times roll - off}{(NCS)} \quad (13)$$

$$NCS = \frac{size}{\lambda^2} \quad (14)$$

جدول (۱): مقادیر بهینه به دست آمده برای ابعاد ساختار جهت پیاده‌سازی فیلتر فوق پهن باند

Parameter (mm)	$w_f$	$L_f$	$d_f$	$d_2$	$w_1$	$w_s$	$l_s$
Value in filter	۰/۷۵	۰/۶	۰/۲۱	۰/۲	۰/۶۷۵	۰/۵	۶
Value in Unit cell	۰/۴	۰/۵	۰/۲۱	۰/۲	۰/۶۷۵	۰/۵	۶

جدول (۲): مقادیر به دست آمده برای المان‌های مدار معادل تشدیدگر

Parameter	$Z_0$	$F_0$	$C_R$	$L_L$	$C'$	$C_L$	$L_R$	$C'_R$	$L'_L$
value	$50\Omega$	$8.85\text{GHz}$	$1.4\text{pF}$	$1.03\text{nH}$	$20\text{pF}$	$1.357\text{pF}$	$1\text{nH}$	$1\text{pF}$	$86.07\text{nH}$

جدول (۳): مقایسه مشخصات فیلتر فوق پهن باند پیشنهادی در این مقاله با فیلترهای دیگر

Ref	FBW (درصد)	Stop band (GHz)	Return loss	Group delay (ns)	Size	Roll- off(dB/ GHz)	Geometry	FOM
[۴]	۱۰۹	۱۲/۵-۱۱/۵	۸	>۰/۴	$۰/۲۵ \lambda \times ۱ \lambda$	۱۳/۵	Cpw/microstrip	۴۵۷
[۵]	۱۰۹	۱۲/۸-۱۱/۵	۱۴	>۰/۲۵	$۱/۵۳ \lambda \times ۰/۲۵ \lambda$	۱۲	multi-mode resonators	۶۸۵
[۱۰]	۹۴	۱۷-۱۲	۱۰	>۰/۲	$۰/۱۸ \lambda \times ۰/۲۶ \lambda$	۱۳/۵	modified split ring resonator	۷۹۳
[۱۲]	۱۰۶	۱۳-۱۲	۱۲/۵	>۰/۲	$\lambda \times ۰/۱۵ \lambda$	۶/۱۳	Complementary split ring resonator	۱۹۴
[۱۳]	۱۰۹	۲۰-۱۲	۱۲	>۰/۲	$۱ \lambda \times ۰/۱۵ \lambda$	۹/۲۴	Defected ground structure	۱۰۵۰
[۱۵]	۹۲	۲۰-۱۲	۱۵	-	$۱/۳۴ \lambda \times ۰/۱۴ \lambda$	۴/۵	Cascade lowpass and highpass	۴۰۰
[۱۶]	۱۰۷	۲۶-۱۳	۱۵	>۰/۳۵	$\lambda \times ۰/۲۵ \lambda$	۳/۱۵	Cascade bandpass and bandstop	۱۱۰۰
This work	۱۲۳	۲۰-۱۴/۷	۱۰	۰/۲۶	$۱/۲۷ \lambda \times ۰/۱۵۱ \lambda$	۸/۸۷	Metamaterial structure	۷۹۴/۸۳

به کارگیری در گیرنده GPS»، مجله مهندسی برق دانشگاه

#### ۴- نتیجه‌گیری

تبریز، جلد ۴۶، شماره ۴، صفحه ۲۹۹-۳۰۶، ۱۳۹۵.

- [4] H. Wang, L. Zhu, and W. Menzel, "Ultra-wideband bandpass filter with hybrid microstrip/CPW structure," *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 15, no. 12, pp. 844-846, 2005.
- [5] S. Sun and L. Zhu, "Capacitive-ended interdigital coupled lines for UWB bandpass filters with improved out-of-band performances," *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 16, no. 8, pp. 440-442, 2006.
- [6] S. Sun, L. Zhu, and H.-H. Tan, "A compact wideband bandpass filter using transversal resonator and asymmetrical interdigital coupled lines," *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 18, no. 3, pp. 173-175, 2008.
- [7] S. W. Wong and L. Zhu, "Implementation of compact UWB bandpass filter with a notch-band," *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 18, no. 1, pp. 10-12, 2008.
- [8] R. Li and L. Zhu, "Compact UWB bandpass filter using stub-loaded multiple-mode resonator," *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 17, no. 1, pp. 40-42, 2007.
- [9] S. Khalid, W. P. Wen, and L. Y. Cheong, "Synthesis and design of four pole ultra-wide band (UWB) bandpass filter (BPF) employing multi-mode resonators (MMR)," in *Microwave Symposium Digest (MTT), 2012 IEEE MTT-S International, 2012*, pp. 1-3.
- [10] A. Kamma, G. S. Ready, P. Suggiseti, and J. Mukherjee, "A novel and compact ultra-wide band (UWB) filter using modified split ring resonator (MSRR)," in *Microwave and RF Conference (IMARc), 2014 IEEE International, 2014*, pp. 69-71.
- [11] Y. Zhou, B. Yao, Q. Cao, H. Deng, and X. He, "Compact UWB bandpass filter using ring open stub loaded multiple-mode resonator," *Electron. Lett.*, vol. 45, no. 11, pp. 554-556, 2009.

در این مقاله، یک فیلتر میان‌گذر فوق پهن باند، با استفاده از یک سلول فراماده جدید اصلاح شده است. ساختار سلول اصلاح شده ترکیبی از یک سلول خط تأخیر ساخته شده بر پایه ساختارهای فراماده به همراه شاخه اتصال کوتاه که امکان ایجاد صفر انتقال را فراهم می‌نماید، می‌باشد. بر اساس ساختار سلول پهن باند ارائه شده، فیلترهای فوق پهن باند مختلفی طراحی و در نهایت، با متوالی قرار دادن ۵ سلول خط تأخیر به همراه ۳ شاخه اتصال کوتاه، فیلتر فوق پهن باند با عملکرد فیلتری بسیار مناسب در نرم‌افزار HFSS شبیه‌سازی و در نهایت ساخته شده است. قابل ذکر است مشابهت بسیار خوبی در نتایج ساخت و شبیه‌سازی مشاهده می‌شود. فیلترهای پیشنهادی در این مقاله در مقایسه با بسیاری از فیلترهای دیگر، دارای پهنای باند بسیار بیشتر، ابعاد کوچک‌تر و پهنای باند ممنوعه بزرگ‌تری می‌باشد.

#### مراجع

- [1] Federal Communications Commission, *Revision of part 15 of the Commission's rules regarding ultra wideband transmission systems*, Tech. Rep., ET-Docket 98-153, FCC02-48, April, 2002.
- [۲] آزاده ایمانی، جواد نوری نیا و چنگیز قبادی، «آنتن دایورسیتی مسطح جدید پهن باند جهت استفاده در ارتباطات سیار»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۰، شماره ۲، صفحه ۱۳-۱۹، ۱۳۸۹.
- [۳] ایمان مجیدی، حسین همتی و سید حسن صدیقی، «طراحی آنتن چهارتابی شکافی فشرده با قطبش دایروی برای



- [21] J. Ju and S. Kahng, "A compact UWB bandpass filter using a center-tapped composite right/left-handed transmission-line zeroth-order resonator," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 53, no. 9, pp. 1974–1976, 2011.
- [22] K. U. Ahmed and B. S. Virdee, "Ultra-wideband bandpass filter based on composite right/left handed transmission-line unit-cell," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 61, no. 2, pp. 782–788, 2013.
- [23] M. Gil, J. Bonache, and F. Martín, "Metamaterial filters with attenuation poles in the pass band for ultra wide band applications," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 49, no. 12, pp. 2909–2913, 2007.
- [24] M. Gil, J. Bonache, J. Garcia-Garcia, J. Martel, and F. Martín, "Composite right/left-handed metamaterial transmission lines based on complementary split-rings resonators and their applications to very wideband and compact filter design," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 55, no. 6, pp. 1296–1304, 2007.
- [25] M. Danaeian, M. Movahhedi, A. Hakimi, and K. Afrooz, "A Compact Ultra-Wideband Bandpass Filter with Sharp-Rejection using Complementary Split Ring Resonators," *Amirkabir Int. J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 48, no. 1, pp. 1–10, 2016.
- [26] J. García-García, J. Bonache, and F. Martín, "Application of electromagnetic bandgaps to the design of ultra-wide bandpass filters with good out-of-band performance," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 54, no. 12, pp. 4136–4140, 2006.
- [27] J. Zhang, S. W. Cheung, and T. I. Yuk, "A compact and UWB time-delay line inspired by CRLH TL unit cell," in *TENCON 2010-2010 IEEE Region 10 Conference*, 2010, pp. 868–872.
- [28] A. Pourzadi, A. R. Attari, and M. S. Majedi, "A directivity-enhanced directional coupler using epsilon negative transmission line," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 60, no. 11, pp. 3395–3402, 2012.
- [12] D. Sarkar, T. Moyra, and L. Murmu, "An ultra-wideband (UWB) bandpass filter with complementary split ring resonator for coupling improvement," *AEU-International J. Electron. Commun.*, vol. 71, pp. 89–95, 2017.
- [13] G.-M. Yang, R. Jin, C. Vittoria, V. G. Harris, and N. X. Sun, "Small ultra-wideband (UWB) bandpass filter with notched band," *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 18, no. 3, pp. 176–178, 2008.
- [14] J. Li, J. Xu, T. A. Denidni, and Q. Zeng, "A Novel Ultra-Wideband Bandpass Filter Based on Multiple-Mode Resonators with Defected Ground Structure," in *Ubiquitous Wireless Broadband (ICUWB)*, 2015 IEEE International Conference on, 2015, pp. 1–4.
- [15] C.-L. Hsu, F.-C. Hsu, and J.-K. Kuo, "Microstrip bandpass filters for ultra-wideband (UWB) wireless communications," in *Microwave Symposium Digest, 2005 IEEE MTT-S International*, 2005, p. 4–pp.
- [16] C.-W. Tang and M.-G. Chen, "A microstrip ultra-wideband bandpass filter with cascaded broadband bandpass and bandstop filters," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 55, no. 11, pp. 2412–2418, 2007.
- [17] C. Caloz and T. Itoh, *Electromagnetic metamaterials: transmission line theory and microwave applications*. John Wiley & Sons, 2005.
- [18] S.-H. Oh, K.-T. Kim, J.-H. Lee, S. Kahng, and H.-S. Kim, "Design of the miniaturized ultra-wide band (UWB) filter using the metamaterial characteristic," in *Microwave Conference Proceedings (APMC)*, 2013 Asia-Pacific, 2013, pp. 954–956.
- [19] Q. Bu, J. Ding, and C. J. Guo, "New design of ultra-wideband bandpass filter using interdigitated coupled lines CRLH-TL structure," in *Antennas, Propagation & EM Theory (ISAPE)*, 2012 10th International Symposium on, 2012, pp. 486–489.
- [20] B. G. Xiao, P. Ye, Z. Y. Xie, and H. Liu, "Design of Ultra-Wideband Bandpass Filter Based on Composite Right/Left Handed Transmission Line," in *Advanced Materials Research*, 2012, vol. 460, pp. 66–69.

## زیر نویس‌ها

<sup>1</sup>. Coplanar waveguide

<sup>2</sup>. split ring resonator

<sup>3</sup>. Complementary split ring resonator