

طراحی، شبیه‌سازی و ساخت فیلترهای باند باریک میان‌نگذر و میان‌گذر فشرده میکروویوی بر پایه تئوری فرامواد

مصطفی دانائیان

دانشیار گروه مهندسی برق، دانشگاه ولی عصر^(ع) رفسنجان، danaeian@vru.ac.ir

چکیده

در این مقاله، فیلترهای جدید باند باریک^۱ میان‌نگذر^۲ و میان‌گذر^۳ فشرده^۴ میکروویوی با استفاده از یک ساختار چپگرد-راستگرد^۵ جدید برای کاربردهای WLAN ارائه شده است. به منظور طراحی فیلترهای باند باریک میان‌نگذر و میان‌گذر پیشنهادی، از سلول واحدی^۶ که سلول واحد Z شکل^۷ نامیده می‌شود، استفاده شده است. با قرار گرفتن سلول واحد Z شکل در کنار خط انتقال ریزنواری^۸، یک باند باریک میان‌نگذر در فرکانس ۵/۷ GHz رخ خواهد داد. در حالی که اگر از یک خازن اینتردیجیتال^۹ بین دو خط انتقال ریزنواری و در زیر سلول واحد Z شکل استفاده شود، یک باند باریک میان‌گذر در فرکانس ۵/MGHz رخ خواهد داد. با استفاده از ساختارهای چپگرد-راستگرد پیشنهادی، فیلترهای باند باریک میان‌نگذر و میان‌گذر یک طبقه و دو طبقه ارائه شده‌اند که ابعاد فیلترهای پیشنهاد شده یک طبقه برابر $0.17 \lambda_g \times 0.17 \lambda_g$ و ابعاد فیلترهای پیشنهاد شده دو طبقه برابر $0.35 \lambda_g \times 0.40 \lambda_g$ است. به منظور اعتبار بخشی به روش طراحی فیلترها، ساختار پیشنهادی فیلتر میان‌گذر دو طبقه ساخته و اندازه‌گیری شده است. با توجه به نتایج به دست آمده به وضوح دیده می‌شود که نتایج اندازه‌گیری با نتایج شبیه‌سازی سازگاری خیلی خوبی دارند. فیلترهای پیشنهادی دارای خصوصیتی همچون ابعاد بسیار کوچک، تلفات نسبتاً کم و طراحی آسان می‌باشند. از طرف دیگر، به دلیل یک لایه بودن ساختارهای ارائه شده، ساخت آن‌ها آسان و با کمترین هزینه انجام خواهد شد.

کلیدواژه: ساختارهای فراماده^{۱۰}، فیلتر میان‌نگذر و میان‌گذر باند باریک، خازن اینتردیجیتال، سلول واحد Z شکل، ساختارهای چپگرد-راستگرد، ابعاد کوچک.

^۱ Narrow Band
^۲ or Band Reject Notch Band
^۳ Band Pass
^۴ Compact
^۵ Composite Right-Left Handed (CRLH)
^۶ Unit-Cell
^۷ Z-shaped
^۸ Microstrip
^۹ Interdigital Capacitor
^{۱۰} Metamaterial

مقدمه

سازی این ساختارها، پیاده‌سازی مبتنی بر ساختارهای تشدیدی عملکرد بهتری در زمینه طراحی فیلترهای مایکروویوی از خود نشان می‌دهند. فیلترهای مایکروویوی طراحی شده بر اساس ساختارهای چپگرد-راستگرد دارای محاسنی از قبیل: تیز بودن لبه‌های فیلتر، تلفات باند عبور ناچیز، تضعیف خارج از باند عبور زیاد و مهمتر از همه کوچک شدن ابعاد است. علاوه موارد ذکر شده، تطبیق پذیری با هر دو تکنولوژی ریزنواری و CPW نیز از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است [۴-۱۹].

در این مقاله، فیلترهای باند باریک میان‌گذر و میان‌گذر یک طبقه و دو طبقه با ابعاد فشرده و با پاسخ فرکانسی مناسب مبتنی بر ساختارهای چپگرد-راستگرد طراحی، شبیه‌سازی و ساخته شده‌اند. سلول واحد چپگرد-راستگرد پیشنهادی به صورت یک سلول واحد Z شکل پیاده‌سازی شده است. روش عملکرد فیلترهای ارائه شده بدین صورت است که اگر سلول واحد Z شکل در کنار یک خط انتقال ریزنواری قرار بگیرد، یک باند باریک میان‌گذر در فرکانس مربوط به باند استاندارد WLAN (در فرکانس ۵/۷ GHz) رخ خواهد داد در حالی که اگر از یک خازن اینتردیجیتال میان دو خط انتقال ریزنواری در زیر سلول واحد Z شکل استفاده شود، یک باند باریک میان‌گذر در همان فرکانس رخ خواهد داد. فیلترهای پیشنهاد شده در این مقاله که با استفاده از ساختارهای چپگرد-راستگرد طراحی شده‌اند دارای مزیت‌هایی مثل ابعاد بسیار کوچک، فرکانس گزینی بالا، ضریب کیفیت بالا و تلفات کم هستند.

ساختارهای چپگرد-راستگرد

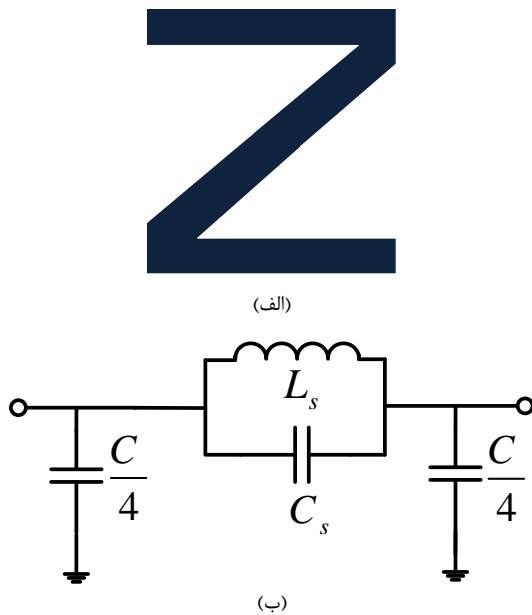
به ساختارهایی که دارای ϵ و μ منفی هستند چپگرد^{۱۱} (LH) و به ساختارهایی که دارای ϵ و μ مثبت هستند راستگرد^{۱۲} (RH) گفته می‌شود [۱۷-۱۹]. از دید مداری، مدل مداری ساختار راستگرد شامل یک خازن در شاخه موازی و یک سلف در شاخه سری می‌باشد در حالیکه مدل

فیلترهای مایکروویوی شبکه‌های دو دهانه‌ای هستند که کنترل پاسخ فرکانسی یک سیستم مایکروویوی را بر عهده دارند [۴-۱]. فیلترهای مایکروویوی کاربردهای بسیار وسیعی در سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم، رادارها، آنتن‌ها، سیستم‌های ارتباط ماهواره‌ای و غیره داشته باشد. از اینرو در سیستم‌های مایکروویوی مدرن، به فیلترهای پسیو مایکروویوی با مشخصات نزدیک به حالت ایده‌آل نیاز خواهیم داشت. عمده این مشخصات عبارتند از: پهنای باند مناسب، ضریب کیفیت بالا، خطی بودن، قابلیت عبور دادن مقدار توان لازم، تلفات کم و مهمتر از همه ساختارهایی با ابعاد کوچک و هزینه‌ی ساخت کم هستند [۴-۱]. بر همین اساس، طراحی ادوات پسیو مایکروویوی بویژه فیلترها توجه زیادی از مهندسان مایکروویوی را به خود جلب نموده است و تحقیقات گسترده‌ای در زمینه طراحی و ساخت فیلترهای مایکروویوی با تکنیک‌های مختلف به انجام رسیده است [۱-۴].

از طرف دیگر، در سالهای اخیر علاقه زیادی به تحقیق در زمینه ساختارهای چپگرد-راستگرد یا فراماده به دلیل خواص نامتعارف الکترومغناطیسی که از خود نشان می‌دهند بوجود آمده است [۴-۱۹]. فراماده یک ساختار الکترومغناطیسی مصنوعی و همگن است که دارای خواص فیزیکی غیر عادی می‌باشد [۴-۱۹]. ذکر این نکته حائز اهمیت است که فرامواد به صورت طبیعی در طبیعت یافت نمی‌شوند. در طراحی ادوات مایکروویوی مانند فیلترها، دیپلکسرها، تقسیم‌کننده‌های توان و غیره، استفاده از ساختارهای چپگرد-راستگرد به دلیل خواص منحصر به فردی که این ساختارها از خود نشان می‌دهند، مورد توجه طراحان و مهندسان علم مایکروویوی قرار گرفته است [۴-۱۹]. ساختارهای چپگرد-راستگرد به روش‌های متفاوتی قابل پیاده‌سازی می‌باشند که مهمترین آنها روش مبتنی بر ساختارهای غیرتشدیدی و روش مبتنی بر ساختارهای تشدیدی هستند [۴-۱۹]. از بین روش‌های مختلف پیاده-

^{۱۱} Left Handed (LH)
^{۱۲} Right Handed (RH)

در این مقاله به منظور تحقق فیلترهای میان‌گذر و میان‌گذر باند باریک از سلول واحد Z شکل استفاده شده است. این سلول واحد یک ساختار تشدیدی است که مانند یک تشدیدکننده LC موازی عمل می‌کند و می‌تواند با یک شار الکتریکی خارجی تحریک شود. بر همین اساس سلول واحد Z شکل پیشنهادی زمانی که توسط یک میدان الکتریکی خارجی متغیر با زمان در جهت محور Z تحریک شود، در نزدیکی فرکانس تشدید خود یک ε منفی تولید می‌کند. به عبارت دیگر، سلول واحد Z شکل می‌تواند به عنوان یک دو قطبی الکتریکی تشدیدی در نظر گرفته شود و با یک میدان الکتریکی خارجی و محوری تحریک می‌گردند. با توجه به این خصوصیت، از انتشار سیگنال در یک باند باریک در این ساختار جلوگیری می‌شود و بنابراین انتشار موجی نخواهیم داشت [۱۷-۱۹]. در شکل (۱) ساختار سلول واحد Z شکل و مدار معادل آن نشان داده شده است.



شکل ۱: الف) ساختار سلول واحد Z شکل پیشنهادی و ب) مدار معادل آن بنابراین با توجه به مدل مداری سلول واحد Z شکل، فرکانس تشدید از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه می‌باشد:

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

مداری ساختار چپگرد شامل یک خازن در شاخه سری و یک سلف در شاخه موازی می‌باشد [۱۷-۱۹]. ساختارهای چپگرد برخلاف ساختارهای راست‌گرد دارای سرعت فاز و ثابت انتشار منفی می‌باشند، ولی سرعت گروه در این مواد مانند ساختارهای راست‌گرد مثبت است [۱۷-۱۹]. ذکر این نکته حائز اهمیت است که ساختارهای چپگرد خالص وجود خارجی ندارند. زیرا با افزایش فرکانس مقادیر عناصر پارازیتیک در ساختار افزایش پیدا می‌کنند و این عناصر پارازیتیک خاصیت راست‌گرد از خود نشان می‌دهند. از اینرو یک ساختار چپگرد خالص نمی‌توان داشت و با ترکیبی از ساختارهای چپگرد و راستگرد روبرو هستیم که به آن‌ها ساختارهای چپگرد-راستگرد یا CRLH می‌گویند [۱۷-۱۹]. ساختار چپگرد-راستگرد یک ساختار الکترومغناطیسی مصنوعی و همگن است که دارای خواص فیزیکی غیرعادی می‌باشد. به طور کلی خطوط انتقال چپگرد و یا حالت عملی‌تر آنها یعنی ساختارهای چپگرد-راستگرد به روش‌های متفاوتی قابل پیاده‌سازی می‌باشند که مهمترین آنها روش مبتنی بر ساختارهای تشدیدی یا ساختارهای غیرتشدیدی هستند که به عنوان نمونه می‌توان به ساختارهای خازن اینتردیجیتال/استاب، استفاده از حلقه‌های تشدید دو تایی^{۱۳} و مکمل آنها^{۱۴} و همچنین استفاده از المان‌های فشرده SMD^{۱۵} اشاره کرد [۱۶-۱۸]. از بین روش‌های ارائه شده، روش پیاده‌سازی مبتنی بر ساختارهای تشدیدی عملکرد بهتری در زمینه طراحی فیلترهای میکروویوی از خود نشان می‌دهند زیرا در مقایسه با سایر فیلترهای متعارف موجود مانند چبی‌شف^{۱۶} یا باترورث^{۱۷} دارای ابعاد بسیار کوچکتری هستند. علاوه بر این، با هر دو تکنولوژی ریزنواری و CPW^{۱۸} سازگار می‌باشند [۱۷-۱۹]. در روش پیاده‌سازی مبتنی بر ساختارهای تشدیدی، سلول واحدها یا روی صفحه زمین حک می‌شوند یا در کنار خط انتقال ریزنواری قرار داده می‌شوند [۱۷-۱۹].

^{۱۳} Split Ring Resonator (SRR)
^{۱۴} Complementary Split Ring Resonators (CSRR)
^{۱۵} Surface Mount Device (SMD)
^{۱۶} Chebyshev
^{۱۷} Butterworth
^{۱۸} Coplanar Waveguide (CPW)

باند فرکانسی معینی را از میان سایر فرکانس‌ها انتخاب کرد. این ادوات از قسمت‌های اساسی مدارهای مخابراتی هستند که کاربرد زیادی در فرستنده‌ها و گیرنده‌های رادیویی دارند. فیلترها از نظر کاربرد به چهار گروه تقسیم‌بندی می‌شوند. فیلترهای پایین‌گذر، فیلترهای بالاگذر، فیلترهای میان‌گذر و فیلترهای میان‌نگذر یا فیلترهای حذف باند. فیلترهای میان‌گذر فیلترهای هستند که در فرکانس‌های باند عبور، سیگنال از فیلتر عبور کرده و در فرکانس‌های باند قطع سیگنال تضعیف می‌شود در حالی که فیلترهای میان‌نگذر عکس این کار را انجام می‌دهند یعنی اغلب فرکانس‌ها را بدون تضعیف عبور می‌دهند، اما محدوده مشخصی را به شدت تضعیف می‌کنند.

طراحی فیلتر میان‌نگذر مایکروویوی باند باریک

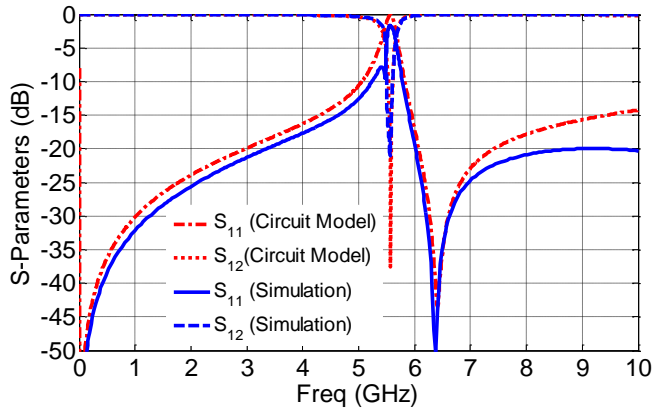
با توجه به قسمت قبل، به منظور طراحی فیلتر میان‌نگذر مایکروویوی از سلول واحد Z شکل استفاده شده است. با توجه به اینکه سلول واحد Z شکل زمانی که با یک شار الکتریکی خارجی تحریک شود مانند یک تشدیدکننده LC موازی عمل می‌کند. بنابراین در نزدیکی فرکانس تشدید خود یک ϵ منفی تولید می‌کند. به عبارت دیگر، سلول واحد Z شکل می‌تواند به عنوان یک دو قطبی الکتریکی تشدید در نظر گرفته شود. از اینرو، از انتشار سیگنال در یک باند باریک در نزدیکی فرکانس تشدید خود از عبور سیگنال جلوگیری کرده و انتشار موج صورت نمی‌پذیرد. بر اساس همین خاصیت، فیلترهای باند باریک میان‌نگذر یک طبقه و دو طبقه طراحی شده‌اند. پیکره‌بندی فیلتر باند باریک میان‌نگذر یک طبقه پیشنهادی به همراه پاسخ فرکانسی آن در شکل (۲) نشان داده شده‌اند. همانطور که در این شکل (۲-ب) مشاهده می‌شود، چنانچه سلول واحد Z شکل پیشنهادی در کنار خط انتقال ریزنوری قرار بگیرد، یک باند باریک میان‌نگذر در فرکانس ۵/۷ GHz رخ خواهد داد. مدار معادل فیلتر میان‌نگذر پیشنهادی یک طبقه در شکل (۳-الف) نشان داده شده است. در شکل (۳-ب) نیز پاسخ فرکانسی شبیه‌سازی شده فیلتر میان‌نگذر باند باریک با

که با تغییر ابعاد سلول واحد Z شکل می‌توان به راحتی فرکانس تشدید ساختار را تغییر داد. در حقیقت سلول واحد Z شکل مانند مکمل حلقه‌های تشدید دوتایی (CSRR) عمل می‌کند.

به منظور تحقق یک خط انتقال چپ‌گرد و انتشار موج به صورت عقب‌گرد، المان‌های دیگری که قادر به فراهم کردن ϵ یا μ منفی هستند نیز باید به ساختارها اضافه شوند [۱۹-۱۷]. اگر در طراحی از دو قطبی‌های مغناطیسی استفاده شود، چون در مجاورت فرکانس تشدید خود μ منفی از خود نشان می‌دهند بنابراین به المان دیگری که قادر به فراهم کردن ϵ است نیاز داریم که ϵ منفی می‌تواند با استفاده از میان‌راه‌های زمین شده (via ها) که در خط میزبان ایجاد می‌شوند، بدست آید [۱۹-۱۷]. این میان‌راه‌ها باعث می‌شوند که ساختار مانند یک دو قطبی الکتریکی عمل کرده و در فرکانس تشدید، ϵ منفی از خود نشان دهند [۱۹-۱۷]. در حالی که اگر از دو قطبی‌های الکتریکی استفاده شود، چون در مجاورت فرکانس تشدید خود ϵ منفی از خود نشان می‌دهند بنابراین به المان دیگری که قادر به فراهم کردن μ است نیاز داریم که μ منفی می‌تواند با استفاده از خازن اینتردیجیتال یا گپ‌های سری بدست آید [۱۹-۱۷]. خازن اینتردیجیتال یا گپ‌های سری باعث می‌شوند که ساختار مانند یک پلاسمای مغناطیسی عمل کرده و در فرکانس تشدید، μ از خود نشان دهند که این فرکانس تشدید بستگی به مدار تشدید تشکیل شده از خازن اینتردیجیتال و اندوکتانس خط انتقال در هر سلول دارد. از این رو در این مقاله برای آنکه محیطی داشته باشیم که به طور همزمان ϵ و μ منفی ایجاد شود، در طراحی ساختار پیشنهادی در کنار سلول واحد Z شکل (ϵ منفی) از خازن اینتردیجیتال (μ منفی) استفاده شده است [۱۹-۱۷].

طراحی فیلترهای مایکروویوی باند باریک پیشنهادی با استفاده از سلول واحد Z شکل

فیلترها مدارهایی هستند که توسط آنها می‌توان فرکانس یا

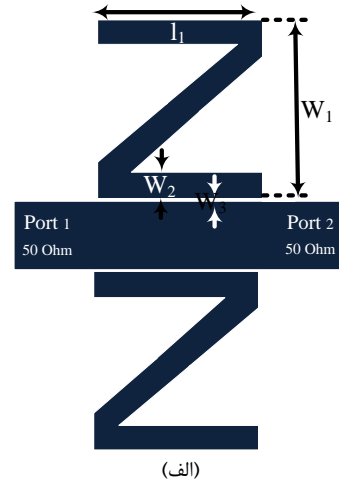


(ب)

شکل ۳: الف) مدار معادل فیلتر میان‌گذر پیشنهادی یک طبقه و ب) مقایسه نتایج شبیه‌سازی و نتایج مدار معادل

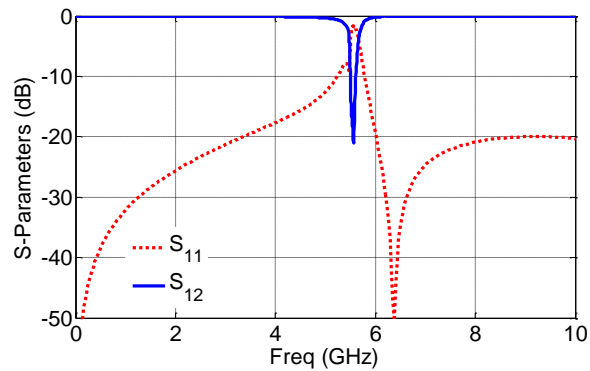
نمودار ضریب گذردهی الکتریکی (ϵ) فیلتر میان‌گذر باند باریک طراحی شده در شکل (۴) نشان داده شده است. با توجه به این شکل دیده می‌شود که ضریب گذردهی الکتریکی (ϵ) فیلتر میان‌گذر طراحی شده در نزدیکی فرکانس تشدید سلول واحد Z شکل ($5/7$ GHz) منفی است. این نمودار تأیید کننده این موضوع است که سلول واحد Z شکل زمانی که توسط یک میدان الکتریکی خارجی متغیر با زمان در جهت محور Z تحریک شود، در نزدیکی فرکانس تشدید خود یک ϵ منفی تولید می‌کند. این ضریب منفی در باند بیان شده، باعث عدم تطبیق بین دهانه تغذیه و خط می‌شود که در نتیجه باعث بوجود آمدن یک صفر انتقال در پاسخ فرکانسی فیلتر در نزدیکی فرکانس تشدید سلول واحد Z شکل می‌شود. پیکره‌بندی فیلتر باند باریک میان‌گذر دو طبقه پیشنهادی به همراه پاسخ فرکانسی آن نیز در شکل (۵) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۵)، فیلتر میان‌گذر باند باریک طراحی شده در فرکانس $5/7$ GHz با ایجاد دو صفر انتقال از عبور توان جلوگیری کرده است که حاصل آن یک باند توقف در فرکانس $5/7$ GHz شده است. همانطور که در شکل (۵) - ب دیده می‌شود یک باند توقف در همسایگی فرکانس $5/7$ GHz یعنی در نزدیکی فرکانس تشدید سلول واحد Z شکل وجود دارد. در حقیقت این باند توقف در نتیجه‌ی خواص ساختار است که در یک باند باریک در بالای فرکانس تشدید، سلول واحد Z شکل محیط با ϵ مثبت و زیاد و در یک باند باریک در پایین فرکانس تشدید

پاسخ فرکانسی شبیه‌سازی شده مدار معادل آن نمایش داده شده‌اند. با توجه به نتایج بدست آمده، به وضوح قابل مشاهده است که مدل مداری ارائه شده به خوبی رفتار فیلتر میان‌گذر طراحی شده را مدل می‌کند.



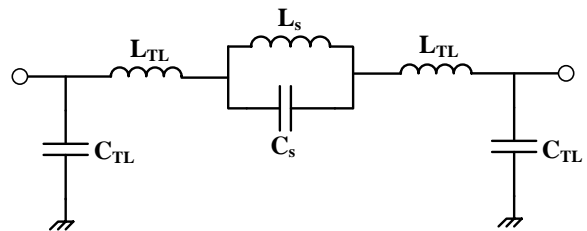
(الف)

(د)

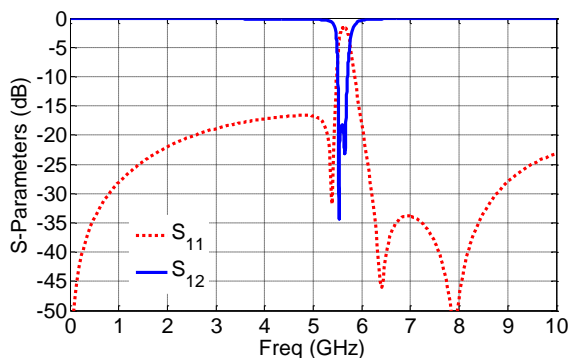


(ب)

شکل ۲: الف) پیکره‌بندی فیلتر باند باریک میان‌گذر پیشنهادی یک طبقه و ب) پاسخ فرکانسی آن



(الف)



(ب)

شکل ۵: الف) پیکره‌بندی فیلتر باند باریک میان‌گذر پیشنهادی دو طبقه و ب) پاسخ فرکانسی آن



(الف)

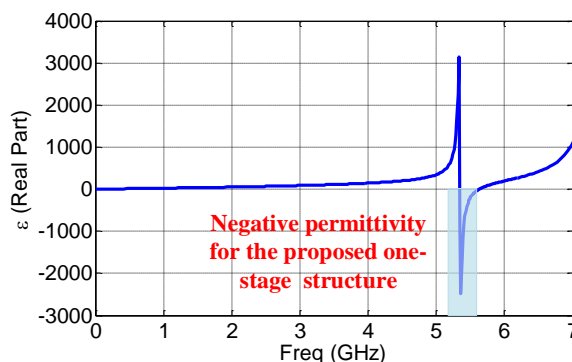
(ب)

شکل ۶: دیگرام جریان برای ساختار فیلتر میان‌گذر دو طبقه الف) در فرکانس ۲/۵ GHz ب) در فرکانس ۵/۷ GHz

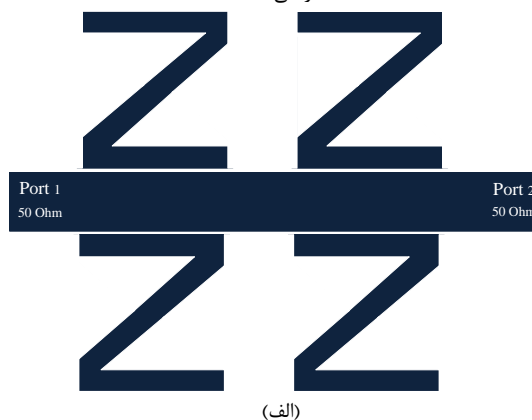
طراحی فیلتر میان‌گذر مایکروویوی باند باریک

بر اساس آنچه در قسمت قبل نیز بیان شد و به منظور تحقق یک خط انتقال چپ‌گرد و انتشار موج به صورت عقب‌گرد، المان دیگری که قادر به فراهم کردن μ منفی است باید به ساختار اضافه شود. از اینرو برای تبدیل فیلترهای باند باریک میان‌گذر به فیلترهای باند باریک میان‌گذر، از

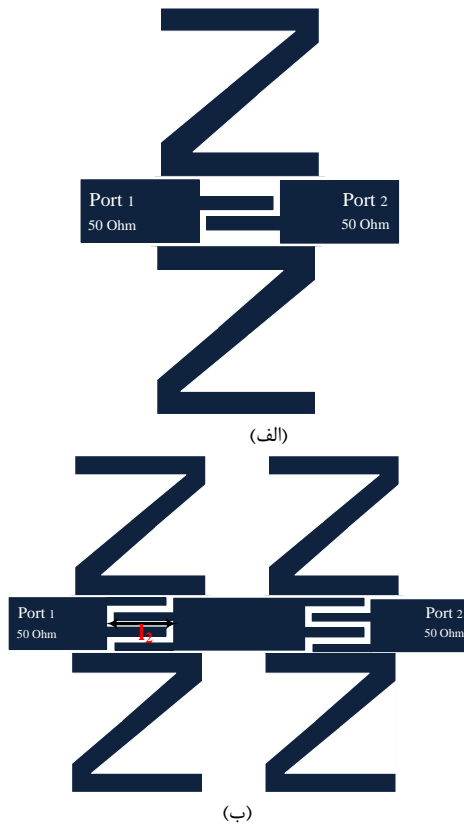
سلول واحد Z شکل محیط با ϵ منفی خواهیم داشت که باعث عدم تطبیق بین پورت تغذیه و خط می‌شود. در خارج از باند توقف، سیگنال سلول واحد Z شکل را نمی‌بیند و بین ورودی و خروجی انتشار می‌یابد. اما در داخل باند توقف، سلول واحدهای Z شکل به وضوح تحریک می‌شوند. در این حالت هیچ سیگنالی بین ورودی و خروجی انتشار نمی‌یابد. در شکل (۶) دیگرام جریان برای فیلتر باند باریک میان‌گذر پیشنهادی دو طبقه برای دو فرکانس در باند توقف و قبل از آن نشان داده شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود در فرکانس ۲/۵ GHz سیگنال انتشار می‌یابد بدون آنکه سلول واحدهای Z شکل تحریک شوند ولی در فرکانس ۵/۷ GHz، سلول واحدهای Z شکل به وضوح تحریک شده‌اند و توان تزریق شده به خط به سمت منبع بر می‌گردد. بنابراین در این فرکانس هیچ انتشار موجی رخ نخواهد داد.



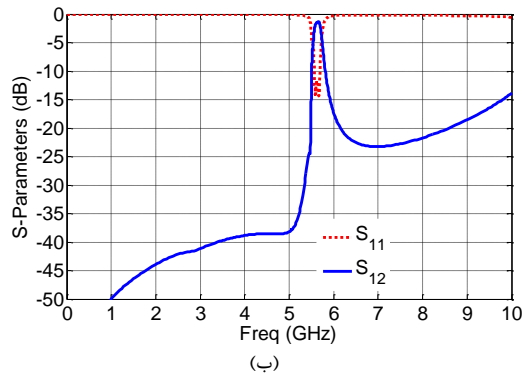
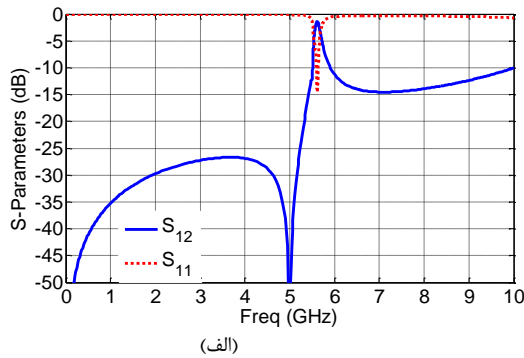
شکل ۷: نمودار ضریب گذردهی الکتریکی (ϵ) فیلتر میان‌گذر باند باریک طراحی شده



(الف)



شکل ۷: پیکره‌بندی فیلترهای باند باریک میان‌گذر پیشنهادی الف) یک طبقه و ب) دو طبقه



شکل ۸: پاسخ فرکانسی فیلترهای باند باریک میان‌گذر پیشنهادی الف) یک طبقه و ب) دو طبقه

خازن اینتردیجیتال در ساختار فیلترهای میان‌گذر پیشنهادی استفاده شده است. اضافه کردن خازن اینتردیجیتال در وسط خط انتقال ریزنواری باعث می‌شود که ساختار مانند یک پلاسمای مغناطیسی عمل کرده و در فرکانس تشدید، μ از خود نشان دهد. فرکانس تشدید ساختار بستگی به مدار تشدید تشکیل شده از خازن اینتردیجیتال و اندوکتانس خط انتقال و ابعاد سلول واحد Z شکل دارد. پیکره‌بندی فیلترهای باند باریک میان‌گذر یک طبقه و دو طبقه پیشنهادی در شکل (۷) نشان داده شده‌اند. پاسخ فرکانسی فیلترهای باند باریک میان‌گذر طراحی شده در شکل (۸) نشان داده شده‌اند. همانطور که در این شکل‌ها دیده می‌شود، با اضافه شدن خازن اینتردیجیتال در زیر سلول واحد Z شکل، باند باریک میان‌گذر به باند باریک میان‌گذر تبدیل شده و یک باند عبور در فرکانس $5/7$ GHz خواهیم داشت. بعلاوه، با دو طبقه کردن مدار، فیلتر طراحی شده دو طبقه دارای لبه‌های تیزتر، باند قطع وسیع‌تر و پاسخ فرکانسی بهتر شده است.

ابعاد ساختار سلول واحد Z شکل برای فیلترهای یک طبقه و دو طبقه به صورت زیر انتخاب شده‌اند:

$l_1=5/3$ mm	$w_1=5/5$ mm	$w_2=0/8$ mm	$w_3=0/1$ mm
--------------	--------------	--------------	--------------

ابعاد خازن اینتردیجیتال نیز برای فیلتر میان‌گذر یک طبقه برابر $1/3 \times 0/6$ mm² و برای فیلتر میان‌گذر دو طبقه برابر $1/1 \times 1/1$ mm² انتخاب شده‌اند. همچنین عرض خط ریزنواری استفاده شده به منظور داشتن تطبیق ۵۰ اهم با دهانه‌های ورودی و خروجی، $1/13$ mm در نظر گرفته شده است. از محاسن بسیار مهم فیلترهای طراحی شده این است که پهنای باند و همچنین فرکانس مرکزی، هردو می‌توانند با تغییر ابعاد سلول واحد Z شکل و ابعاد خازن اینتردیجیتال به آسانی تغییر کنند.

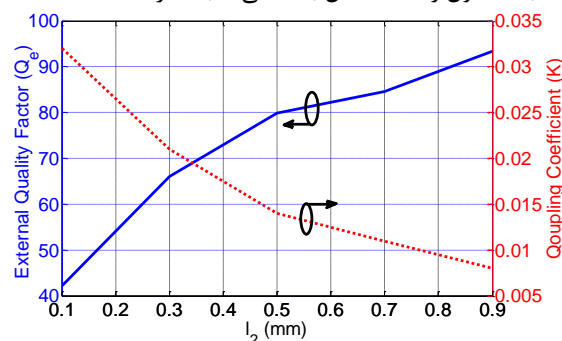
همانطور که در پاسخ فرکانسی فیلترهای میان‌گذر یک طبقه و دو طبقه مشاهده می‌شود، میزان S_{12} در باند قطع بیشتر از 20 dB است و بیانگر آن است که انتقال توان در یک محدوده فرکانسی محدودی صورت نمی‌پذیرد. از اینرو در این محدوده فرکانسی انتشار موجی رخ نمی‌دهد. فیلتر میان‌گذر باند باریک یک طبقه پیشنهادی، دارای ابعادی به میزان $0.17 \lambda_g \times 0.17 \lambda_g$ است که معادل $12/2 \times 5/3 \text{ mm}^2$ است و فیلتر میان‌گذر باند باریک دو طبقه پیشنهادی نیز دارای ابعادی به میزان $11 \times 12/2 \text{ mm}^2$ است که معادل $0.35 \lambda_g \times 0.40 \lambda_g$ است که طول موج هدایت شده^{۲۲} در فرکانس مرکزی فیلتر می‌باشد. در طراحی ساختارهای پیشنهادی از زیر لایه‌ی RO4003C با ثابت دی الکتریک 3/55 و ضخامت 0/58 mm استفاده شده است. عرض خط انتقال هم به منظور تطبیق 50 اهم در دهانه‌های ورودی و خروجی برابر 1/13 mm در نظر گرفته شده است. همچنین فیلترهای میان‌گذر باند باریک پیشنهادی یک طبقه و دو طبقه به ترتیب دارای ابعاد کوچکی به اندازه $12/2 \times 5/3 \text{ mm}^2$ و $(0.40 \lambda_g \times 0.17 \lambda_g)$ و $11 \times 12/2 \text{ mm}^2$ و $(0.35 \lambda_g \times 0.40 \lambda_g)$ هستند. در این ساختارها نیز از زیر لایه‌ی RO4003C با ثابت دی الکتریک 3/55 و ضخامت 0/58 mm استفاده شده است. همانطور که در پاسخ فرکانسی‌های مربوط به این ساختارها مشاهده می‌شود، میزان S_{12} در باند عبور برای فیلتر میان‌گذر یک طبقه کمتر از 1 dB و میزان S_{12} در باند عبور برای فیلتر میان‌گذر دو طبقه کمتر از 1/9 dB است که بیان‌کننده‌ی توانایی بالای این فیلترها در عبور سیگنال و انتقال توان با حداقل تلفات می‌باشد. همچنین میزان S_{11} در باند عبور برای هر دو فیلتر تقریباً برابر 15 dB است که این پارامتر نیز بیانگر میزان کم توان برگشتی به دهانه‌ی ورودی و تلفات کم این فیلترها است. علاوه بر این، به منظور داشتن شبیه‌سازی‌های نزدیک به حالت عملی، تلفات دی الکتریک و تلفات اهمی لایه‌ی فلزی نیز در محاسبات وارد شده‌اند که میزان رسانایی برای مس را $\sigma = 5/8 \times 10^7 \text{ S/m}$ و تانژانت تلفات را برای زیر لایه

برای فیلتر میان‌گذر طراحی‌شده دو طبقه، ضریب کیفیت خارجی^{۱۹} و ضریب تزویج^{۲۰} به ترتیب از رابطه‌های زیر به دست می‌آیند.

$$Q_e = \frac{2f_0}{BW} \quad (2)$$

$$K = \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 + f_2^2} \quad (3)$$

که f_0 فرکانس مرکزی فیلتر (فرکانس تشدید)، BW پهنای باند 3dB فیلتر و f_1 و f_2 به ترتیب بیشترین و کمترین فرکانس تشدید ساختار فیلتر میان‌گذر طراحی‌شده دو طبقه می‌باشند. نمودارهای مربوط به تغییر ضریب کیفیت خارجی (Q_e) و ضریب تزویج (K) با توجه به ابعاد خازن اینتردیجیتال در شکل (9) رسم شده است. با توجه به این شکل دیده می‌شود که با تغییر ابعاد خازن اینتردیجیتال می‌توان به راحتی پهنای باند و تیز بودن لبه‌های فیلتر را تغییر داد. همچنین فرکانس مرکزی را نیز می‌توان با تغییر ابعاد سلول واحد Z شکل به آسانی جابجا کرد.



شکل 9: نمودار تغییرات ضریب کیفیت خارجی (Q_e) و ضریب تزویج (K) فیلتر میان‌گذر دو طبقه با تغییر ابعاد خازن اینتردیجیتال

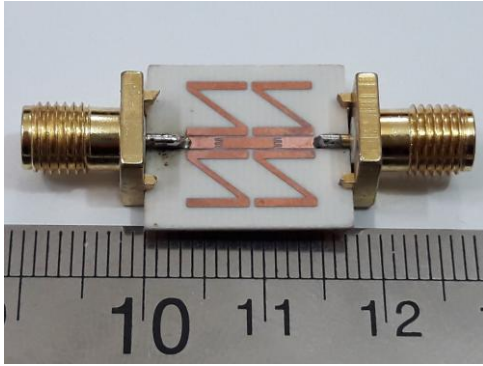
نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری فیلترهای طراحی

شده

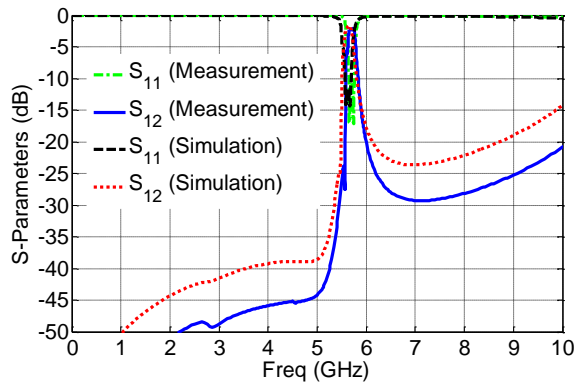
در این مقاله فیلترهای باند باریک میان‌گذر و میان‌گذر فشرده‌ای بر پایه تئوری فرامواد طراحی و شبیه‌سازی شده‌اند. پاسخ فرکانسی فیلترهای طراحی شده با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز الکترومغناطیسی ADS^{۲۱} بدست آمده‌اند.

^{۲۲} Guided Wavelength

^{۱۹} External Quality Factor
^{۲۰} Coupling Coefficient
^{۲۱} Advanced Design System (ADS)



(الف)



(ب)

شکل ۱۰: الف) عکس ساخت و ب) مقایسه نتایج اندازه‌گیری شده با پاسخ فرکانسی شبیه‌سازی شده فیلتر پیشنهادی دو طبقه

جدول ۱: مقایسه عملکرد فیلتر میان‌گذر باند باریک پیشنهادی با سایر فیلترها

Ref Num.	FBW (%)	IL (dB)	RL (dB)	S.F.	Size ($\lambda_g \times \lambda_g$)
[۲۰]	۱/۱	۳/۳	۱۵	۰/۴۱	۴ (λ_g^2)
[۲۱]	۵/۸	۳/۷	۱۸	۰/۱۸	۰/۶۶×۰/۲۶
[۲۲]	۵/۱	۲	۲۷	۰/۳۴	۰/۲۷×۰/۲۷
[۲۳]	۶/۷	۱/۵	۱۵	۰/۴۹	۰/۸۰×۰/۳۹
[۲۴]	۲۶	۲/۵	۱۰	۰/۱۷	۱/۱۷×۰/۳۵
This Work	۳/۸	۲	۱۳	۰/۵۱	۰/۴۰×۰/۳۵

Fractional Bandwidth (FBW), Insertion Loss (IL), Return Loss (RL), selectivity factor of the passband (S.F.), S.F. = $\Delta f_{3dB} / \Delta f_{20dB}$, where Δf_{3dB} and Δf_{20dB} represent for 3-dB bandwidth and 20-dB bandwidth of the passband, respectively.

برابر $\tan \delta = 0.027$ برای کلیه شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شده است.

عکس ساخت فیلتر پیشنهادی در شکل (۱۰-الف) نشان داده شده است. همچنین نتایج شبیه‌سازی شده و نتایج اندازه‌گیری شده نمونه ساخته شده در شکل (۱۰-ب) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. بر اساس نتایج بدست آمده، دیده می‌شود که نتایج اندازه‌گیری با نتایج شبیه‌سازی سازگاری بسیار خوبی دارند. اختلاف ناچیز موجود میان نتایج اندازه‌گیری شده و نتایج شبیه‌سازی، به دلیل تلفات کانکتورها و تلفات در فرآیند اندازه‌گیری است. همانطور که در پاسخ اندازه‌گیری فیلتر مشاهده می‌شود میزان S_{12} اندازه‌گیری شده در باند عبور کمتر از ۲ dB است که بیان‌کننده‌ی توانایی بالای این فیلتر در عبور سیگنال و انتقال توان با حداقل تلفات در باند عبور می‌باشد. همچنین میزان S_{11} اندازه‌گیری شده در باند عبور کمتر از ۱۳ dB می‌باشد که این پارامتر نیز کم بودن میزان توان برگشتی به دهانه‌ی ورودی و تلفات کم این فیلتر را تایید می‌نماید. نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری نشان دهنده‌ی این است که فیلتر میان‌گذر دو طبقه پیشنهادی دارای پهنای باند کسری $3/8\%$ می‌باشد. اندازه‌گیری نتایج با استفاده از تحلیلگر شبکه‌ی 24 Rohde & Schwarz, zvk صورت گرفته است. در جدول شماره (۱)، فیلتر باند باریک میان‌گذر دو طبقه پیشنهادی با چند فیلتر باند باریک دیگر مقایسه شده است. همانطور که دیده می‌شود ابعاد فیلتر پیشنهادی در مقایسه با سایر فیلترهای باند باریک ذکر شده کوچکتر می‌باشد. بعلاوه، فیلتر پیشنهادی دارای لبه‌های بسیار تیز، تلفات بازگشتی و تلفات انتقال مناسب می‌باشد.

^{۲۲} Fractional Band Width (FBW)
^{۲۳} (VNA) Vector Network Analyzer

نتیجه‌گیری

داریم و در نتیجه یک باند باریک میان‌گذر برای کاربردهای WLAN بدست می‌آید. فیلترهای پیشنهادی به صورت یک طبقه و دو طبقه طراحی و شبیه‌سازی شدند. به منظور تأیید روش طراحی فیلترها، ساختار پیشنهادی فیلتر میان‌گذر دو طبقه ساخته و اندازه‌گیری شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده به وضوح دیده می‌شود که نتایج اندازه‌گیری با نتایج شبیه‌سازی سازگاری خیلی خوبی دارند. فیلترهای پیشنهادی در مقایسه با دیگر فیلترهای باند باریک دارای تلفات کم، دارای قابلیت کنترل پذیری فرکانس مرکزی و پهنای باند، لبه‌های بسیار تیز و ابعاد کوچکتری هستند.

در این مقاله، فیلترهای باند باریک میان‌گذر و میان‌نگذر جدید فشرده‌ای مبتنی بر ساختارهای چپگرد-راستگرد پیشنهاد شده است. ساختار فیلترهای پیشنهادی بر پایه یک سلول واحد Z شکل ارائه شده‌اند. با قرار گرفتن سلول واحد Z شکل پیشنهادی در کنار خط انتقال ریزنواری، یک باند باریک میان‌نگذر بدست می‌آید زیرا در این حالت از انتشار سیگنال در یک باند باریک در ساختار جلوگیری می‌شود و بنابراین انتشار موجی نخواهیم داشت. همچنین اگر از یک خازن اینتردیجیتال در وسط دو خط انتقال ریزنواری و در زیر سلول واحد Z شکل استفاده شود، انتشار موج عقبگرد

مراجع

1. Danaeian, Mostafa, Kambiz Afrooz, Ahmad Hakimi, and Ali-Reza Moznebi. "Compact bandpass filter based on SIW loaded by open complementary split-ring resonators." *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering* 26, no. 8, p. 674-682, 2016.
2. Danaeian, Mostafa, and Hossein Ghayoumi-Zadeh. "A novel wideband half-mode SIW bandpass filter based on evanescent-mode technique using complementary Z-shaped resonator." *Analog Integrated Circuits and Signal Processing* 98, no. 1, p. 187-192, 2019.
3. J. Garcia, J. Bonache, I. Gil, F. Martin, M. Castillo, and J. Martel, Miniaturized microstrip and CPW filters using coupled metamaterial resonators, *IEEE Trans Microwave Theory Tech* 54, p. 2628–2635, 2006.
4. Dhouibi, Abdallah, Shah Nawaz Burokur, André De Lustrac, and Alain Priou. "Study and analysis of an electric Z-shaped meta-atom." *Advanced Electromagnetics* 1, no. 2, p. 64-70, 2012.
5. M. Gil, J. Bonache, J. Garcia, J. Martel, and F. Martin, 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 Microwave Theory Tech* 55, p. 1296–1303, 2007.
6. Cui, Tie Jun, Xian Qi Lin, Qiang Cheng, Hui Feng Ma, and Xin Mi Yang. "Experiments on evanescent-wave amplification and transmission using metamaterial structures." *Physical Review B* 73, no. 24, p. 245119, 2006.
7. Dhouibi, Abdallah, Shah Nawaz Burokur, André De Lustrac, and Alain Priou. "Study and analysis of an electric Z-shaped meta-atom." *Advanced Electromagnetics*, vol. 1, no. 2, p. 64-70, 2012.
8. J.B. Pendry, A.J. Holden, D.J. Robbins, and W.J. Stewart, Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena, *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, vol. 47, p. 2075–2084, 1999.
9. F. Falcone, T. Lopetegi, J.D. Baena, R. Marques, F. Martín, and M. Sorolla, Effective negative-epsilon stopband microstrip lines based on complementary split ring resonators, *IEEE Microwave Wireless Compon Lett*, vol. 14, p. 280–282, 2004.
10. J. Martel, R. Marqués, F. Falcone, J.D. Baena, F. Medina, F. Martín, and M. Sorolla, A new LC series element for

- compact bandpass filter design, *IEEE Microwave Wireless Compon Lett*, vol. 14, p. 210–212, 2004.
11. J. Esteban, C.C. Penalosa, J.E. Page, T.M. Martin-Guerrero, and E. Marquez-Segura, Simulation of negative permittivity and negative permeability by means of evanescent waveguide modes-theory and experiment, *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, vol. 53, p. 1506–1514, 2005.
 12. T. Cui, X. Lin, Q. Cheng, H. Ma, and X. Yang, Experiments on evanescent-wave amplification and transmission using metamaterial structures, *Phys Rev B*, vol. 73, p. 245191–245198, 2006.
 13. Q. Cheng and T.J. Cui, Realization of left-handed transmission structures using the substrate integrated waveguide technology, *Int Biophoton, Nanophoton, Metamater Symp*, Hangzhou, China, October, pp. 447–450, 2006.
 14. P. Belov and C. Simovski, Subwavelength metallic waveguides loaded by uniaxial resonant scatterers, *Phys Rev E*, vol. 72, p. 0366181–03661811, 2005.
 15. J.D. Baena, J. Bonache, F. Martín, R. Marqués, F. Falcone, T. Lopetegi, M.A.G. Laso, J. García, I. Gil, M. Flores-Portillo, and M. Sorolla, Equivalent circuit models for split ring resonators and complementary split rings resonators coupled to planar transmission lines, *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, vol. 53, p. 1451–1461, 2005.
 16. Cao, Xin, Qiangming Cai, Yuyu Zhu, Zuxue Xia, and Jun Fan. "Design of a Notch-band Bandpass Filter based on the CRLH TL Loaded with Quarter-wavelength Resonator." In 2019 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM), pp. 1-3. IEEE, 2019.
 17. Caloz, Christophe, and Tatsuo Itoh. *Electromagnetic metamaterials: transmission line theory and microwave applications*. John Wiley & Sons, 2005.
 18. Marqués, Ricardo, Ferran Martín, and Mario Sorolla. *Metamaterials with negative parameters: theory, design and microwave applications*. Vol. 183. John Wiley & Sons, 2011.
 19. MartÑn, Ferran. *Artificial transmission lines for RF and microwave applications*. John Wiley & Sons, 2015.
 20. A. A. Khan and M. K. Mandal, Narrowband substrate integrated waveguide bandpass filter with high selectivity, *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett*, vol. 28, no. 5, p. 416–418, 2018.
 21. J. Wang, F. Huang, L. Zhu, C. Cai, and W. Wu, Study of a new planar-type balun topology for application in the design of balun bandpass filters, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech*, vol. 64, no. 9, p. 2824–2832, 2016.
 22. H. Lu, W. Wu, J. Huang, X. Zhang, and N. Yuan, Compact dual-mode microstrip bandpass filter based on Greek-cross fractal resonator, *Radioengineering*, vol. 26, no. 1, p. 275, 2017.
 23. W. Shen, Extended-doublet half-mode substrate integrated waveguide bandpass filter with wide stopband, *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett*, vol. 28, no. 4, p. 305–307, 2018.
 24. Khalil, Mohamad, Mahmoud Kamarei, and Jalal Jomaah. "Miniaturized Half-Mode Slow-Wave Substrate-Integrated Waveguide Bandpass Filter." *Wireless Personal Communications*, vol. 107, no. 1, p. 283-290, 2019.