

طراحی، تحلیل و شبیه‌سازی یک فیلتنای مایکرواستریپ با روی کرد طراحی فیلتر میان‌گذر

حبیب قربانی‌نژاد فومنی^۱، دانشیار؛ امید اتحادمحمک^۲، کارشناسی ارشد

۱- دانشکده فنی- دانشگاه گیلان- رشت- ایران- ghorbaninejad@guilan.ac.ir

۲- دانشکده فنی- دانشگاه گیلان- رشت- ایران- omid6958@gmail.com

چکیده: طراحی، تحلیل و شبیه‌سازی یک آنتن با قابلیت فیلترینگ ارائه شده‌است. یک آنتن مایکرواستریپ مربعی و فیلتر مایکرواستریپ میان‌گذر با تشدیدکننده‌های نصف طول موج تزویج‌شده‌ی موازی، برای طراحی یک فیلتنای یک‌دیگر ترکیب شده‌اند. زیرلایه این ساختار دارای ضریب دی‌الکتریک ۲/۶ است. اجزای این فیلتنای یک‌دیگر یک فیلتر مرتبه‌ی ۴ با پاسخ چیبشف را تشکیل می‌دهند که فرکانس مرکزی آن ۲/۴۵ گیگاهرتز است. ابتدا یک فیلتر میان‌گذر مایکرواستریپ با تشدیدکننده‌های نصف طول موج تزویج‌شده‌ی موازی، طراحی شد و سپس به‌جای تشدیدکننده‌ی آخر آن یک صفحه‌ی مایکرواستریپ مستطیلی قرار گرفت تا علاوه‌بر نقش تشدیدکننده‌ی آخر فیلتر، نقش یک عنصر تشعشع‌کننده را نیز ایفا کند. پهنای باند ۳ دسیبل این ساختار ۲۶۰ مگاهرتز و پهنای باند ۱۰- دسیبل آن برابر با ۱۰/۵ درصد است. فیلتنای پیشنهادی فرکانس‌های خارج از باند را به‌خوبی حذف می‌کند، در باند عبور بهره‌ی نسبتاً یک‌نواخت و الگوی تشعشعی مناسبی دارد. درستی عملکرد نمونه طراحی‌شده با نرم‌افزار شبیه‌سازی HFSS ارزیابی شده‌است.

واژه‌های کلیدی: آنتن، فیلتر، مایکرواستریپ، فیلتنای موازی، نصف-طول موج، تشدیدکننده

Design, analysis and simulation of a microstrip filtenna using pass band filter synthesis approach

Habib Ghorbaninejad¹, Associate Professor; Omid Etehadmohkam², MSc

1- Department of Electrical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran, Email: ghorbaninejad@guilan.ac.ir

2- Department of Electrical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran, Email: omid6958@gmail.com

Abstract: In this paper, the simulation, analysis and design of a filtering antenna (filtenna) has been presented. A rectangular microstrip antenna and a parallel-coupled half-wavelength resonator filter are combined together to design a filtenna. This structure has a substrate with dielectric constant of 2.6. The proposed structure form a forth order band-pass filter with Chebyshev response and center frequency of 2.45 GHz. First, a parallel-coupled half-wavelength resonator filter was designed using Filter Synthesis Approach, then a microstrip rectangular patch was used instead of the last resonator of filter to act not only as the last resonator of filter, but also as a radiating element. The 3-dB bandwidth of the structure is 260 MHz and the -10-dB bandwidth is equal to 10.5 percent. The proposed filtenna has a good out-of-band gain suppression, flat in-band gain, and well-shaped radiation pattern. The performance of the proposed filtenna has been simulated with HFSS.

Keywords: antenna, Filter, microstrip, filtenna, parallel-coupled, half-wavelength, resonator

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۱۰

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۲۷

نویسنده مسئول: حبیب قربانی‌نژاد

آدرس نویسنده مسئول: رشت- کیلومتر ۵ جاده تهران- دانشگاه گیلان- دانشکده فنی- کد پستی: ۴۱۹۹۶۱۳۷۶۹

۱- مقدمه

یک فیلتر میان گذر با تشدیدکننده‌های نصف طول موج تشریح می‌شود، در بخش سوم طراحی فیلتنای با استفاده از بخش دوم ارائه می‌شود و در بخش چهارم نتایج پژوهش بررسی می‌گردد.

۲- طراحی یک فیلتر میان گذر با تشدیدکننده‌های نصف طول موج تزویج‌شده موازی

برای طراحی ساختار پیشنهادی ابتدا یک فیلتر میان گذر با تشدیدکننده‌های نصف طول موج تزویج‌شده موازی با فرکانس میانی ۲/۴۵ گیگاهرتز و پهنای باند نسبی ۸٪ طراحی شده است (به منظور استفاده در شبکه‌ی WiFi). فیلتر موردنظر از مرتبه‌ی ۴ است، بنابراین باید از ۴ تشدیدکننده‌ی نصف طول موج استفاده کرد. این تشدیدکننده‌ها بر روی یک زیرلایه به طول (L) ۱۰۰ میلی‌متر و عرض (W) ۱۰۰ میلی‌متر قرار گرفته‌اند. ثابت دی‌الکتریک این زیرلایه ۲/۶ و ارتفاع آن ۱ میلی‌متر است. یک نمونه‌ی اولیه‌ی چپیشف چهار قطبی با ریپل باند عبور ۰/۰۴ دسیبل انتخاب شده است. تشدیدکننده‌های این فیلتر نصف طول موج هستند، به این معنی که طول آن‌ها به اندازه‌ی نصف طول موج هدایت شده می‌باشد، بنابراین طول هر تشدیدکننده یا L_r برابر با $41/4$ میلی‌متر است و پهنای W_r این تشدیدکننده نیز $2/79$ میلی‌متر انتخاب شده است. مقادیر فیلتر نمونه‌ی اولیه‌ی چپیشف به صورت زیر است [۱۲]:

$$g_0 = 1, g_1 = 0.9314, g_2 = 1.2920, g_3 = 1.5775 \\ g_4 = 0.7628, g_5 = 1.2210$$

با در دست داشتن پارامترهای نمونه‌ی اولیه، ضرایب تزویج و کیفیت فیلتر به صورت زیر به دست می‌آیند [۱۴]:

$$Q_{e1} = \frac{\Omega_c}{FBW} g_0 g_1 \quad (1)$$

$$Q_{en} = \frac{\Omega_c}{FBW} g_n g_{n+1} \quad (2)$$

$$M_{i,i+1} = \frac{FBW}{\Omega_c \sqrt{g_n g_{n+1}}} \quad (3)$$

در این روابط، n مرتبه‌ی فیلتر، Ω_c فرکانس قطع نرمالیزه شده، Q_{e1} ضریب کیفیت خارجی فیلتر در ورودی، Q_{en} ضریب کیفیت خارجی فیلتر در خروجی و $M_{i,i+1}$ ضریب تزویج مشترک بین تشدیدکننده‌های مجاور را نشان می‌دهند؛ بنابراین با استفاده از این روابط مقادیر ضرایب کیفیت و تزویج برای این فیلتر به شرح زیر است:

$$Q_{e1} = Q_{e4} = 11.64 \quad (4-الف)$$

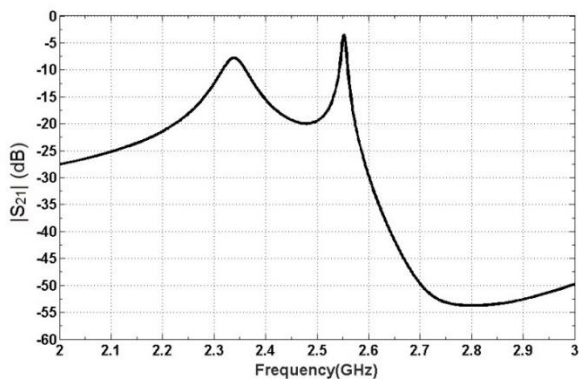
$$M_{1,2} = M_{3,4} = 0.073, M_{2,3} = 0.056 \quad (4-ب)$$

آنتن و فیلتر دو عضو بسیار مهم در دستگاه‌های مخابراتی هستند [۱، ۲]. آنتن وظیفه ارسال و دریافت سیگنال‌ها و فیلتر میان گذر وظیفه انتخاب سیگنال‌ها در باند عبور و حذف بقیه‌ی سیگنال‌های خارج‌باند را دارد. آنتن میکرواستریپ با مزایایی چون اندازه کوچک، وزن پایین، هزینه ساخت کم، ضخامت کم و قابلیت طراحی در گستره‌ی وسیعی از فرکانس‌ها، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است آنتن میکرواستریپ از یک زیرلایه تشکیل شده است که در یک طرف آن صفحه‌ی زمین و در طرف دیگر آن صفحه‌ی میکرواستریپ به نام پیچ قرار دارد. فیلترها را می‌توان به صورت میکرواستریپ طراحی کرد، در این صورت آن‌ها را می‌توان با آنتن‌های میکرواستریپ ترکیب کرد. آنتن با قابلیت فیلترینگ، آنتن فیلترکننده، یا فیلتنای (filtenna) مفهوم جدیدی است که اجازه می‌دهد فیلتر و آنتن به صورت هم‌زمان و در قالب یک ساختار فشرده طراحی شود. در واقع فیلتنای نوعی سازش میان ویژگی‌های آنتن و ویژگی‌های فیلتر است. فیلتنای باعث فشرده‌تر شدن، کمتر شدن نویز و بهبود عمل کرد دستگاه‌های مخابراتی می‌شود و زمان طراحی را بسیار کاهش می‌دهد.

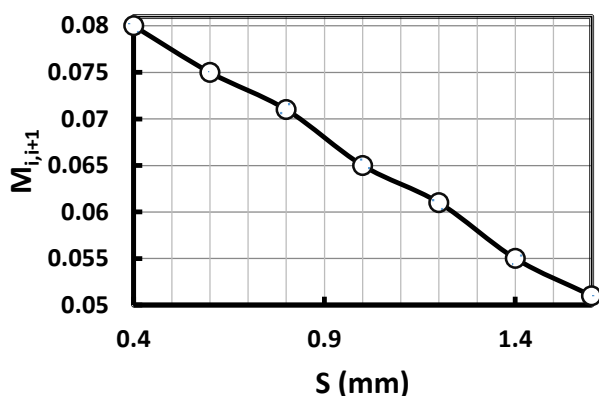
اولین بار در سال ۱۹۹۸ موضوع یک پارچه‌سازی آنتن و فیلتر در قالب یک قطعه‌ی مخابراتی مطرح شد [۳]. در سال‌های اخیر نیز پژوهش‌های زیادی طراحی فیلتنای را مدنظر قرار داده‌اند، از آن جمله می‌توان به یک پارچه‌سازی فیلترهای میان گذر و آنتن‌های میکرواستریپ [۴]، طراحی فیلتنای با استفاده از شیوه‌ی طراحی فیلتر [۵]، ارائه‌ی روشی مؤثر برای طراحی آنتن فیلترکننده [۶]، طراحی و ساخت یک فیلتنای جدید [۷]، طراحی یک آنتن اسلات پهن باند و قابل تنظیم [۸]، طراحی یک فیلتنای جدید با استفاده از تشدیدکننده‌های دو حالته [۹]، طراحی فیلتنای با گین بالا با کاربرد WCDMA [۱۰]، طراحی یک فیلتنای میکرواستریپ فشرده و فوق پهن باند [۱۱]، یک آنتن میکرواستریپ فیلترکننده دوبنده با استفاده از تشدیدکننده‌های امیدانس پله‌ای [۱۲] و یک فیلتنای فشرده با استفاده از رزوناتورهای CRLH و ساختار زمین ناقص [۱۳] اشاره کرد.

در پژوهش حاضر طراحی و شبیه‌سازی یک فیلتنای میکرواستریپ بر مبنای طراحی فیلتر ارائه شده است. به بیان ساده اساس این روش بر طراحی یک فیلتر میکرواستریپ استوار است که در آن تشدیدکننده‌ی آخری به نحو مناسبی که در ادامه توضیح داده خواهد شد؛ با یک پیچ تشعشع کننده جایگزین شده است. این فیلتنای در فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز طراحی شده است که در محدوده‌ی فرکانسی ISM قرار می‌گیرد و آن را برای کاربردهای صنعتی، علمی و پزشکی قابل استفاده می‌کند، همچنین در ارتباطات بی‌سیم کوتاه برد و شبکه‌ی WiFi نیز می‌توان از آن استفاده کرد. پهنای باند این ساختار نسبت به منابع [۵]، [۷]، [۸] و [۹] و [۱۱] و بسیاری دیگر از فیلتنای میکرواستریپ بیشتر است. حداکثر بهره‌ی این ساختار نیز ۴ دسیبل است که مقدار بسیار مناسبی محسوب می‌شود. نحوه‌ی ارائه مقاله به این صورت است که در بخش دوم طراحی

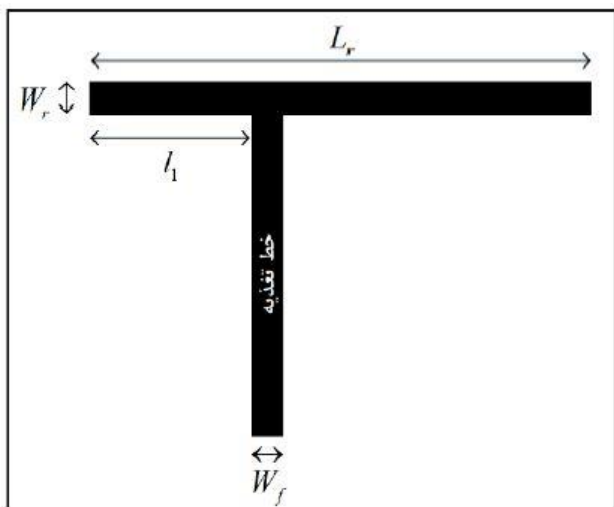
به دست آوردن ضریب تزویج که می توان از تزویج مجاورتی نیز استفاده نمود. در تزویج انشعابی یک خط مایکرواستریپ به صورت مستقیم به تشدیدکننده های اول و آخر متصل می شود. امپدانس این خط برابر با ۵۰ اهم می باشد، برای دستیابی به امپدانس ۵۰ اهم می بایست پهنای این خط مایکرواستریپ $W_f = 2.79 \text{ mm}$ باشد [۱۷].



شکل ۲: پاسخ انتقالی S_{21} بر حسب فرکانس به ازای $s = 0.84 \text{ mm}$

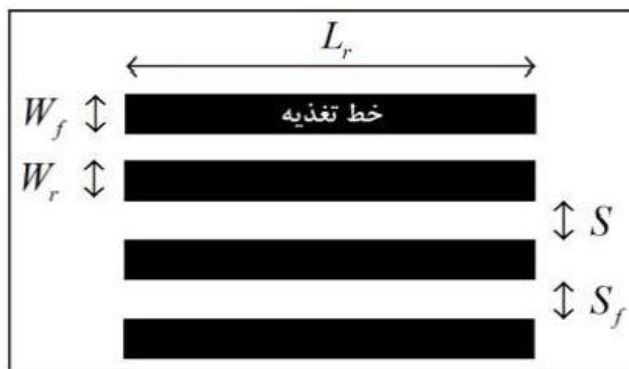


شکل ۳: نمودار طراحی $M_{i,i+1}$ به منظور تعیین فاصله s



شکل ۴: ساختاری برای استخراج نمودار طراحی Q_e

برای به دست آوردن نمودار طراحی $M_{i,i+1}$ ابتدا باید ساختاری مانند شکل ۱ را در نرم افزار HFSS شبیه سازی کرد. در این ساختار باید دقت داشت که عناصر بالایی و پایینی در شکل ۱ تشدیدکننده نیستند، بلکه خطوط تغذیهی مایکرواستریپی هستند که به صورت ضعیفی از طریق تزویج مجاورتی با تشدیدکننده ها تزویج شده اند.



شکل ۱: ساختاری برای استخراج نمودار طراحی $M_{i,i+1}$

این خطوط تغذیه دارای امپدانس ۵۰ اهم و پهنای W_f آن ها برابر با 2.79 mm میلی متر می باشد. به منظور کم شدن تزویج بین خطوط تغذیه و تشدیدکننده ها، فاصله S_f باید به اندازهی کافی زیاد باشد، البته در صورت طولانی بودن بیش از حد این فاصله تزویج بین خط تغذیه و تشدیدکننده ها از بین می رود که این امر مطلوب نیست. پس از انجام این شبیه سازی، پاسخ انتقالی که همان نمودار شاخص S_{21} بر حسب فرکانس است را باید رسم کرد و از آن طریق ضریب تزویج را با استفاده از رابطهی زیر به دست آورد [۱۴]:

$$M_{i,i+1} = \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_2^2 + f_1^2} \quad (5)$$

نمودار پاسخ انتقالی برای این ساختار دارای دو بیشینه است که در این رابطه f_1 و f_2 فرکانس هایی هستند که در آنها S_{21} بیشینه می شود. نمودار شاخص S_{21} به دست آمده از شبیه سازی را در شکل ۲ مشاهده می کنید. ضریب تزویج $M_{i,i+1}$ توسط فاصله S (فاصله ی بین دو تشدیدکننده) کنترل می شود.

با تغییر دادن فاصله S ، تکرار شبیه سازی و به دست آوردن ضرایب تزویج متناظر با هر مقدار S نمودار طراحی به دست خواهد آمد. نمودار طراحی به دست آمده برای $M_{i,i+1}$ که برای تعیین فاصله S استفاده می شود، در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به تشابه تمام تشدیدکننده ها می توان از این نمودار برای یافتن فاصله ی بین تمام تشدیدکننده ها استفاده کرد.

برای به دست آوردن نمودار طراحی Q_{e1} ابتدا ساختاری مانند شکل ۴ را در نرم افزار HFSS شبیه سازی می کنیم. در این فیلتر از تزویج خط انشعابی برای تغذیهی آن در ورودی و خروجی استفاده می شود، بنابراین برای به دست آوردن ضریب کیفیت خارجی در ورودی و خروجی می بایست از این نوع تزویج استفاده شود (برخلاف شیوهی

با داشتن این نمودارهای طراحی و داشتن مقادیر ضرایب کیفیت و توزیع که در مرحله دوم به دست آمدند، ابعاد فیلتر به شرح زیر مشخص می‌شود:

- از لبه‌ی تشدیدکننده‌ی اول یا l_1 برابر با $14/35$ میلی‌متر می‌باشد و با توجه به این که $Q_{e1} = Q_{e4}$ و تقارن فیلتر، فاصله‌ی خط تغذیه‌ی انشعابی خروجی از لبه‌ی تشدیدکننده‌ی آخر یا l_2 نیز برابر با $14/35$ خواهد بود.
- ضریب توزیع مشترک بین تشدیدکننده‌ی اول و دوم یا $M_{1,2}$ برابر با $0/073$ می‌باشد؛ بنابراین با توجه به شکل ۳ فاصله‌ی بین تشدیدکننده‌ی اول و دوم یا S_{12} برابر با $0/69$ میلی‌متر است؛ و با توجه به برابر بودن ضریب توزیع بین تشدیدکننده‌های اول و دوم و ضریب توزیع بین تشدیدکننده‌های سوم و چهارم ($M_{1,2} = M_{3,4}$) و مشابه بودن همه‌ی تشدیدکننده‌ها؛ فاصله‌ی بین تشدیدکننده‌های سوم و چهارم یا S_{34} نیز برابر با $0/69$ میلی‌متر خواهد بود.
- ضریب توزیع مشترک بین تشدیدکننده‌ی دوم و سوم یا $M_{2,3}$ برابر با $0/056$ است؛ بنابراین با توجه به شکل ۳ فاصله‌ی بین این دو تشدیدکننده یا S_{23} برابر با $1/37$ میلی‌متر است.

بنابراین تمام فواصل فیزیکی موردنظر برای طراحی فیلتر به دست می‌آیند و فیلتر موردنظر به صورت شکل ۷ خواهد بود. با شبیه‌سازی فیلتر موردنظر پاسخ انتقالی S_{12} آن مانند شکل ۸ است.

۳- طراحی فیلتنای

برای طراحی فیلتنای می‌بایست به جای تشدیدکننده‌ی آخر فیلتر یک عنصر تشعشع کننده را جای‌گزین کرد. در این پژوهش از یک صفحه‌ی تشعشع کننده (پچ) به جای تشدیدکننده‌ی آخر استفاده شده و خط تغذیه‌ی دوم نیز حذف گردیده است. همچنین به این دلیل که در توزیع مجاورتی ممکن است بهره‌ی آنتن کاهش پیدا کند، بین تشدیدکننده‌ی سوم و پچ از توزیع انشعابی استفاده شده است.

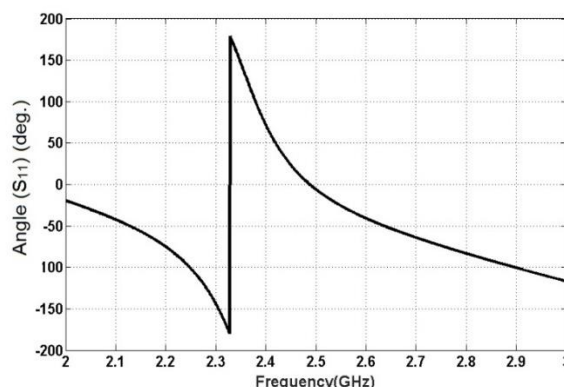
در فیلتنای باید یک عنصر تشعشع کننده جای‌گزین تشدیدکننده‌ی آخر فیلتر شود، اما تشدیدکننده‌های اول تا سوم بدون تغییر باقی می‌مانند. این امر دو نتیجه‌ی مهم در بردارد:

- ۱- ضرایب توزیع $M_{1,2}$ و $M_{3,4}$ دیگر با یکدیگر برابر نیستند؛ زیرا تشدیدکننده‌ی چهارم تغییر کرده است و به جای آن پچ قرار گرفته است.
- ۲- تشدیدکننده‌های اول تا سوم تغییر نمی‌کنند، پس ضریب توزیع مشترک بین آن‌ها نیز تغییری نمی‌کند؛ بنابراین با توجه به برابر بودن ضرایب توزیع و کیفیت فیلتر بخش قبل و فیلتنای، از نمودار طراحی به دست آمده برای $M_{i,i+1}$ در بخش قبل که در شکل ۳ به دست آمد؛ می‌توان در طراحی فیلتنای نیز استفاده نمود.

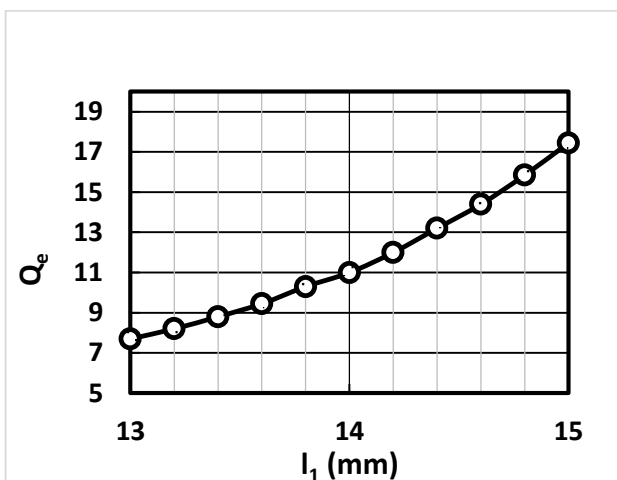
پس از انجام این شبیه‌سازی، باید فاز پاسخ انعکاسی که همان نمودار فاز شاخص S_{11} بر حسب فرکانس است را رسم کرد و از طریق آن ضریب توزیع را با استفاده از رابطه‌ی ۶ به دست آورد [۱۴]:

$$Q_e = \frac{f_0}{f_{+90} - f_{-90}} = \frac{f_0}{\Delta f_{\pm 90}} \quad (6)$$

در این رابطه، f_0 فرکانس مرکزی است و $\Delta f_{\pm 90}$ فرکانس‌هایی هستند که در آن‌ها فاز پاسخ انعکاسی برابر با ± 90 است. f_0 به طور دقیق‌تر فرکانسی است که در آن بیشینه‌ی تأخیر فاز اتفاق می‌افتد. نمودار فاز شاخص S_{11} به دست آمده از شبیه‌سازی در شکل ۵ مشاهده می‌شود. ضریب کیفیت Q_e توسط موقعیت انشعاب کنترل می‌شود. با تغییر موقعیت انشعاب نسبت به گوشه‌ی تشدیدکننده (l_1)، تکرار شبیه‌سازی و به دست آوردن ضرایب کیفیت متناظر با هر مقدار l_1 نمودار طراحی به دست خواهد آمد. نمودار طراحی به دست آمده برای Q_e که برای تعیین فاصله‌ی l_1 استفاده می‌شود، در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که پیش‌تر نیز گفته شد، به دلیل تقارن ساختار فیلتر و برابر بودن ضرایب کیفیت خارجی در ورودی و خروجی، از نمودار به دست آمده می‌توان برای تعیین موقعیت خط تغذیه‌ی انشعابی^۵ در خروجی نیز استفاده کرد، موقعیت انشعاب در خروجی l_2 نامیده شده است.

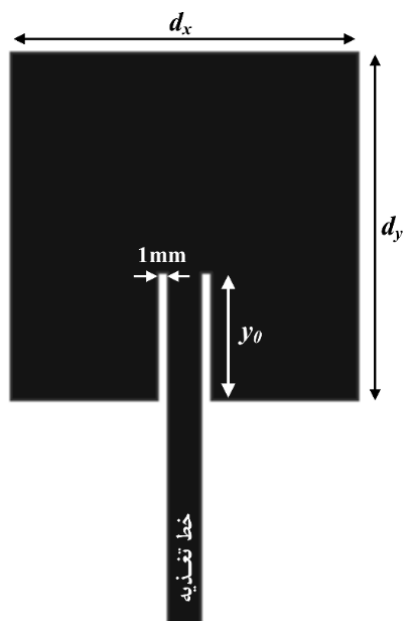


شکل ۵: فاز پاسخ انعکاسی بر حسب فرکانس به ازای $s = 0/84$ mm

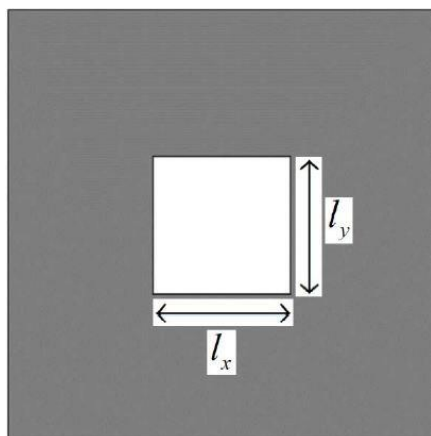


شکل ۶: نمودار طراحی Q_e به منظور تعیین فاصله‌ی l_1

برای به دست آوردن نمودار طراحی ضریب کیفیت خارجی فیلترنا باید ساختاری مانند شکل ۹ را شبیه سازی کرد. صفحه ی زمین استفاده شده به منظور کنترل ضریب کیفیت خارجی ساختار نیز در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۹: ساختار پچ مربعی به کاررفته در فیلترنا

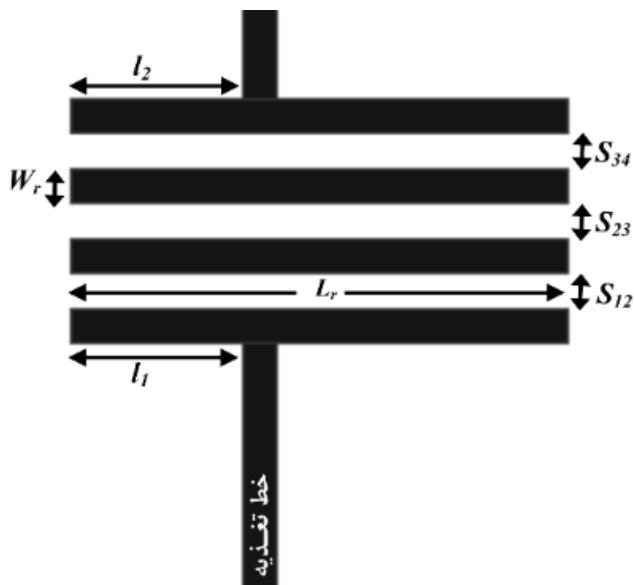


شکل ۱۰: صفحه ی زمین استفاده شده برای استخراج نمودار طراحی Q_{e4} (قسمت خاکستری رنگ صفحه ی فلزی زمین و قسمت سفید رنگ روزنه ی به کاررفته در آن)

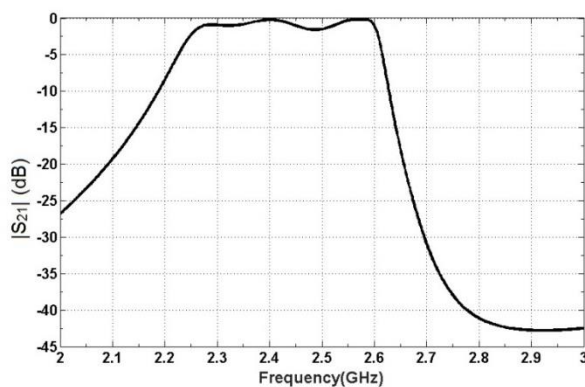
نمودار اندازه ی شاخص S_{11} شکل ۱۰ در شکل ۱۱ نشان داده شده است. برای به دست آوردن Q_{e4} از روابط ۵ تا ۸ استفاده می شود [۸، ۱۵ و ۱۶].

$$Q_L = \frac{f_0}{\Delta f} \quad (7)$$

در این رابطه f_0 فرکانس مرکزی و Δf پهنای باند نصف توان هست. به منظور محاسبه ی Δf ، می بایست سطح مربوط به ضریب کیفیت بارگذاری که با D_0 نشان داده شده است را محاسبه کرد، D_0 از طریق روابط ۸ و ۹ به دست می آید:



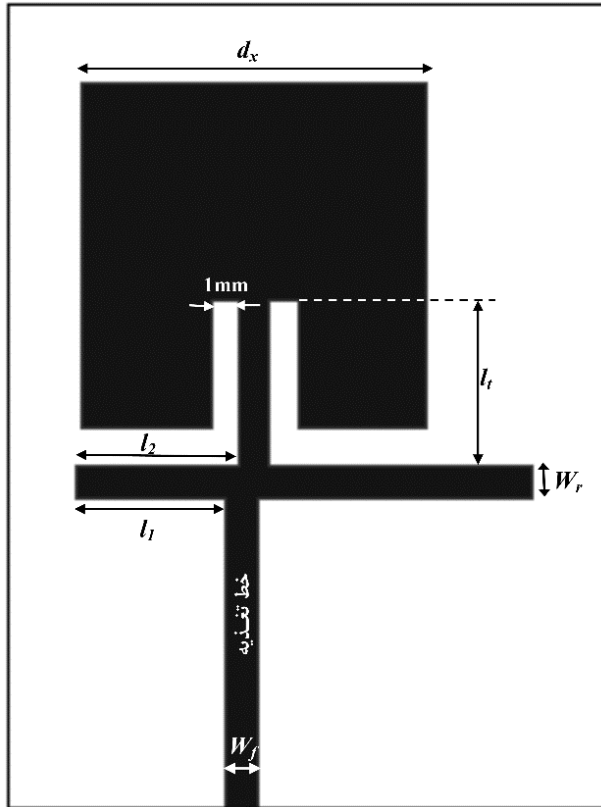
شکل ۷: فیلتر مرتبه ی ۴ میان گذر با تشدیدکننده های نصف طول موج تزویج شده ی موازی با پاسخ چبیشف



شکل ۸: پاسخ انتقالی S_{12} بر حسب فرکانس برای فیلتر مرتبه ی ۴ میان گذر با تشدیدکننده های نصف طول موج تزویج شده ی موازی با پاسخ چبیشف

بنابراین تنها ضریب تزویجی که در محاسبه ی آن تغییراتی ایجاد می شود و نمودار طراحی آن تغییر می کند، ضریب تزویج مشترک بین تشدیدکننده ی سوم و پچ افزوده شده -به عنوان تشدیدکننده ی چهارم- است. همچنین خط تغذیه ی خروجی نیز حذف می شود، اما خط تغذیه ی ورودی هیچ تغییری نمی کند؛ بنابراین نمودار طراحی Q_e در ورودی برای فیلتر که در شکل ۶ نشان داده شده است، می تواند در طراحی فیلترنا نیز استفاده شود؛ اما به دلیل تغییر تشدیدکننده ی آخر نمودار طراحی Q_e تغییر می کند، همچنین در محاسبه ی ضریب کیفیت خارجی در خروجی نیز تغییراتی ایجاد می شود.

در این پژوهش از یک صفحه ی تشعشع کننده ی پچ مربعی استفاده شده است. برای کنترل ضریب کیفیت پچ از یک روزنه ی مربعی درست در زیر پچ که در صفحه ی زمین ایجاد شده است، استفاده می شود و با تغییر اندازه ی اضلاع این روزنه می توان ضریب کیفیت را کنترل کرد.



شکل ۱۳: ساختاری برای استخراج نمودار طراحی $M_{3,4}$

$M_{3,4}$ را می‌توان با تغییر دادن l_2 و l_1 کنترل کرد. با شبیه‌سازی ساختار شکل ۱۵ نمودار اندازه‌ی S_{11} مانند شکل ۱۱ به دست می‌آید. برای به دست آوردن $M_{3,4}$ از طریق این نمودار باید ابتدا ضریب کیفیت خارجی این ساختار که $Q_{ext,3} = Q_{ext,N-1}$ نامیده شده‌است را با استفاده از روابط ۵ تا ۸ به دست آورد. سپس می‌توان با استفاده از رابطه‌ی ۱۱ ضریب تزویج مشترک بین تشدیدکننده‌ی سوم و پچ را محاسبه نمود [۸]:

$$k_{3,4} = \frac{1}{\sqrt{r_1 Q_{e4} Q_{ext,3}}} \quad (11)$$

با تغییر دادن اندازه‌ی l_2 ، تکرار شبیه‌سازی و به دست آوردن ضرایب تزویج مشترک $M_{3,4}$ متناظر با هر مقدار l_2 نمودار طراحی به دست خواهد آمد. نمودار طراحی به دست آمده برای $M_{3,4}$ که برای تعیین l_2 استفاده می‌شود، در شکل ۱۴ نشان داده شده‌است. لازم به ذکر است که در ساختار شکل ۱۳ نیز از روزنه‌ی مربعی در صفحه‌ی زمین استفاده شده‌است.

ساختار شکل ۱۵ به تغییرات l_t حساسیت کمی دارد، بنابراین از ترسیم نمودار طراحی $M_{3,4}$ به منظور تعیین فاصله‌ی l_t صرف نظر می‌شود. در عوض با استفاده از نرم‌افزار HFSS برای دستیابی به l_t مناسب، می‌توان یک بهینه‌سازی بر روی این پارامتر انجام داد. با بهینه‌سازی انجام شده، مناسب‌ترین مقدار برای این پارامتر ۱۹/۳۷۴ میلی‌متر تعیین گردید.

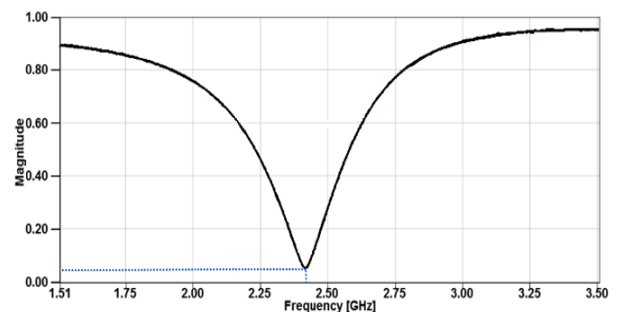
$$D_0 = \left(\frac{1 + r_1^2}{1 - r_1^2} \right)^{0.5} \quad (8)$$

$$r_1 = \begin{cases} \frac{1 + |S_{11}(f_0)|}{1 - |S_{11}(f_0)|} & (\text{overcoupled}) \\ \frac{1 - |S_{11}(f_0)|}{1 + |S_{11}(f_0)|} & (\text{undercoupled}) \end{cases} \quad (9)$$

در این روابط $|S_{11}(f_0)|$ اندازه‌ی شاخص S_{11} در فرکانس مرکزی است، در این فرکانس اندازه‌ی شاخص S_{11} کمینه است. در رابطه‌ی ۹، r_1 در حالت‌های بیش‌ترزویجی (Over-coupling) یا زیرترزویجی (Under-coupling) مقادیر متفاوتی دارد. برای تشخیص بیش‌ترزویجی یا زیرترزویجی بودن، می‌بایست ابتدا نمودار اسمیت رسم شود، اگر نمودار اسمیت مرکز شکل را در برگرفته باشد، ساختار بیش‌ترزویجی است، در غیر این صورت زیرترزویجی است. برای محاسبه‌ی Δf باید از محل کمینه نمودار به مقدار D_0 بالاتر رفت، سپس در سطح به دست آمده Δf محاسبه شود. پس از مشخص شدن Q_L ، از طریق رابطه‌ی زیر ضریب کیفیت خارجی به دست می‌آید:

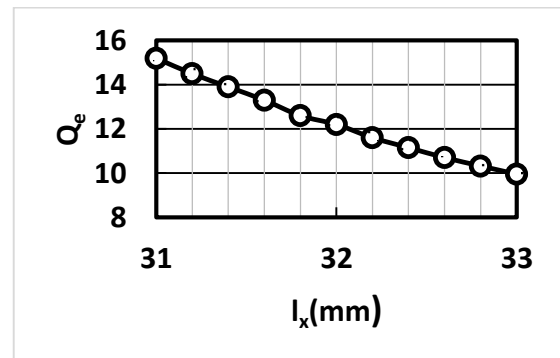
$$Q_e = Q_L(1 + r_1) \quad (10)$$

با تغییر دادن اندازه‌ی l_x ، تکرار شبیه‌سازی و به دست آوردن ضرایب کیفیت متناظر با هر مقدار l_x نمودار طراحی به دست خواهد آمد. نمودار طراحی به دست آمده برای Q_{e4} که برای تعیین l_x استفاده می‌شود، در شکل ۱۲ نشان داده شده‌است. برای به دست آوردن نمودار طراحی $M_{3,4}$ می‌بایست ساختاری مانند شکل ۱۳ را شبیه‌سازی کرد.

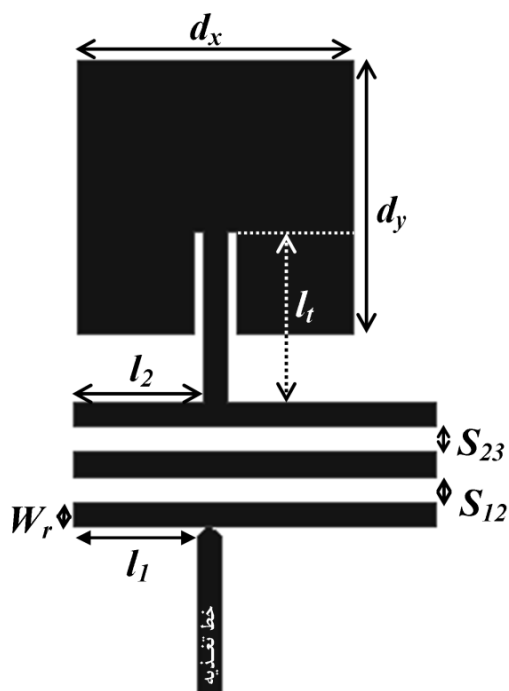


شکل ۱۱: نمودار اندازه‌ی پاسخ انعکاسی بر حسب فرکانس به ازای

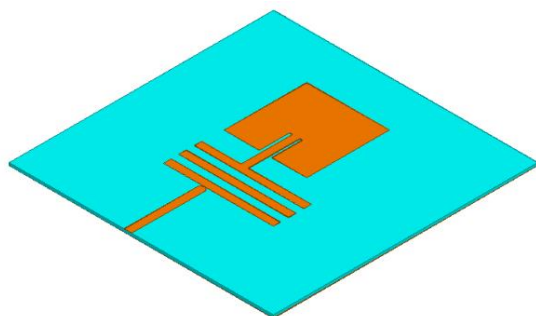
$$l_x = l_y = 0.35$$



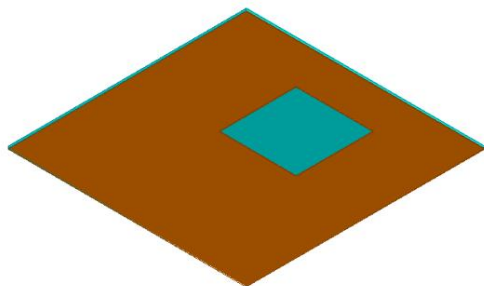
شکل ۱۲: نمودار طراحی Q_e به منظور تعیین فاصله‌ی l_x



شکل ۱۵: فیلتنای پیشنهادی از نمای بالا



(الف)



(ب)

شکل ۱۶: فیلتنای پیشنهادی به صورت سه بعدی الف- از نمای بالا ب- از نمای پایین

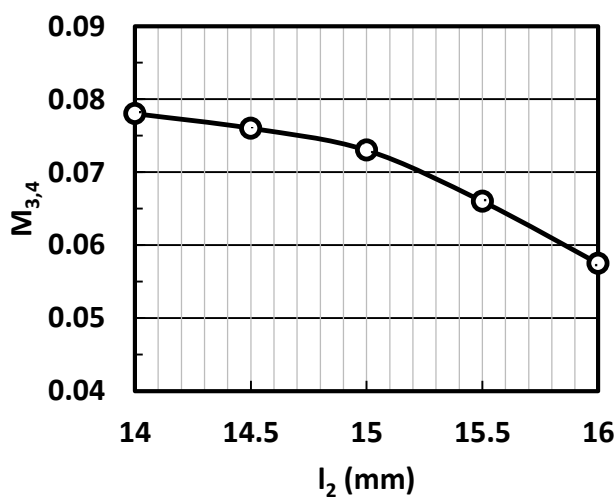
با داشتن نمودارهای طراحی نشان داده شده در شکل ۱۲ و ۱۴ و نیز با داشتن مقادیر $M_{3,4}$ و Q_{e1} که در رابطه ۴ به دست آمدند، ابعاد l_2 و l_x به شرح زیر مشخص می شود:

- ضریب کیفیت خارجی در خروجی یا Q_{e1} برابر با ۱۱/۶۴ هست؛ بنابراین باتوجه به شکل ۱۲ طول ضلع روزنه ای ایجاد شده در زمین یا l_x برابر با ۳۲/۴ میلی متر هست.
- ضریب تزویج مشترک میان تشدیدکننده های سوم و چهارم یا $M_{3,4}$ باتوجه به رابطه ۴ برابر با ۰/۰۷۳ است، بنابراین با توجه به شکل ۱۴ فاصله ی خط تغذیه ۳ انشعابی از لبه ی تشدیدکننده ی سوم یا l_2 برابر با ۱۴/۸۴ میلی متر هست.

باتوجه به مطالب گفته شده، ابعاد فیلتنای مورد نظر به شرح زیر هست:

$W = 100 \text{ mm}$	$L = 100 \text{ mm}$
$l_x = l_y = 32.4 \text{ mm}$	$d_x = d_y = 31.25 \text{ mm}$
$l_1 = 14.35 \text{ mm}$	$l_2 = 14.84 \text{ mm}$
$W_r = W_f = 2.79 \text{ mm}$	$l_i = 19.376 \text{ mm}$
$S_{12} = 0.69 \text{ mm}$	$S_{23} = 1.37 \text{ mm}$
$h = 1 \text{ mm}$	$L_r = 41.4 \text{ mm}$

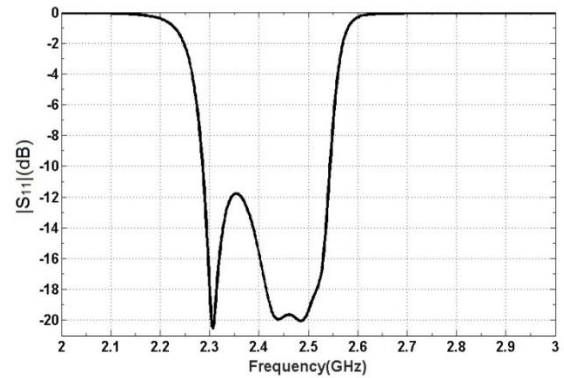
شکل نهایی فیلتنای در شکل ۱۵ نشان داده شده است و در شکل ۱۶ فیلتنای پیشنهادی به صورت سه بعدی مشاهده می شود.



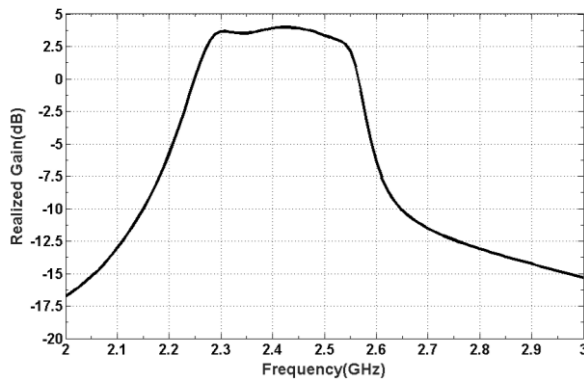
شکل ۱۴: نمودار طراحی $M_{3,4}$ به منظور تعیین فاصله ی l_2

در شکل ۱۷ نمودار پاسخ انعکاسی (تلفات برگشتی) برای فیلتنای پیشنهادی نشان داده شده است. باتوجه به این نمودار پهنای باند ۱۰- دسیبل این ساختار ۲۵۸ مگاهرتز است و برحسب درصد این پهنای باند برابر با ۱۰/۵ درصد هست.

درصد برابر با ۱۰/۵٪ است. بیشینه بهره‌ی این آنتن ۴ دسیبل است که باتوجه به این که بیشتر فیلتناها دارای بهره‌ای کم‌تر از ۵ دسیبل می‌باشند، بهره‌ی مناسبی محسوب می‌شود، همچنین ساختار پیشنهادی الگوی تشعشی مناسبی دارد. فیلتنای پیشنهادی قابلیت انتخاب بالایی دارد و به‌خوبی فرکانس‌های خارج از باند عبور را حذف می‌کند؛ ضمناً در باند عبور بهره‌ی فیلتنا تقریباً یکنواخت است که این ویژگی مطلوبی از لحاظ فیلترکنندگی آن محسوب می‌شود؛ بنابراین مشاهده می‌شود که ویژگی‌های فیلترکنندگی این فیلتنا نیز کاملاً مطلوب است. پهنای باند فیلتری این فیلتنا برحسب درصد برابر با ۱۰/۶٪ است.

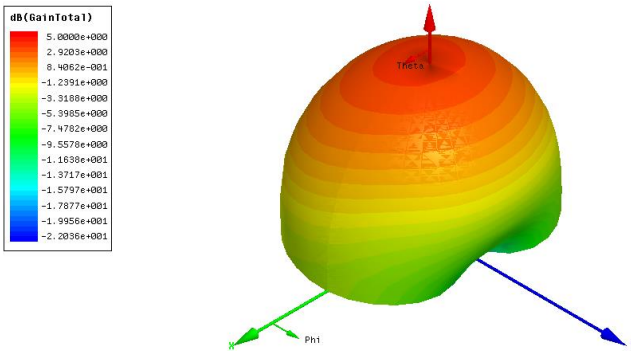


شکل ۱۷: نمودار پاسخ انعکاسی یا تلفات برگشتی فیلتنای پیشنهادی



شکل ۱۸: بهره‌ی فیلتنای پیشنهادی در فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز

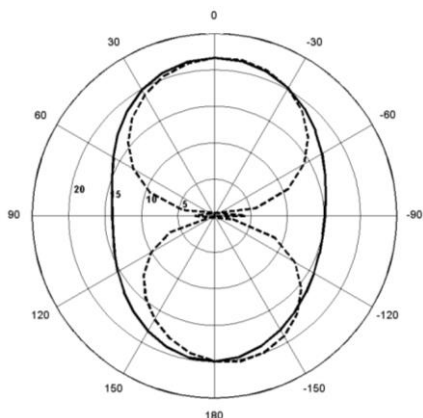
به‌طور معمول فیلترها دارای دو خط تغذیه می‌باشند، اما در این آنتن‌ها معمولاً تنها یک خط تغذیه به‌کار می‌رود. فیلتر طراحی شده در بخش‌های قبل و فیلتنای پیشنهادی نیز مانند اکثر فیلترها و آنتن‌ها به‌ترتیب دارای دو و یک خط تغذیه می‌باشند. مهم‌ترین شاخصی که در تعیین ویژگی‌های فیلتر به‌کار می‌رود، شاخص S_{21} یا پاسخ انتقالی آن است. این شاخص نشان می‌دهد که چه مقدار از امواج ورودی به ساختار از طریق خط تغذیه‌ی اول، به خط تغذیه‌ی دوم می‌رسد و این که در کدام فرکانس‌ها این انتقال بیشتر اتفاق می‌افتد؛ به‌همین دلیل از این شاخص به‌منظور تعیین پهنای باند فیلتر استفاده می‌شود. از آنجاکه فیلتنای پیشنهادی تنها دارای یک خط تغذیه است، بنابراین نمی‌توان از این شاخص به‌منظور تعیین ویژگی‌های فیلترکنندگی استفاده کرد؛ بدین‌منظور باید از نمودار بهره‌ی ساختار سود برد. نمودار بهره‌ی فیلتنای پیشنهادی در شکل ۱۸ نشان‌داده شده‌است. بهره‌ی یک آنتن نشان‌دهنده‌ی میزان توان انتقال‌داده‌شده در جهت حداکثر تشعشع^۶ است، در بهره‌های بزرگ‌تر از صفر، تشعشع به‌خوبی از طریق آنتن صورت می‌گیرد و هرچه بهره‌ی آنتن بیشتر باشد، توان تشعشع نیز بیشتر است؛ بنابراین همان‌گونه که در شکل ۱۸ دیده می‌شود، فیلتنای موردنظر در فاصله‌ی بین فرکانس‌های ۲/۲۸ تا ۲/۵۴ گیگاهرتز بیش‌ترین تشعشع را دارد و در سایر فرکانس‌ها تقریباً تشعشع نمی‌کند، بنابراین می‌توان گفت که فیلتنای پیشنهادی سایر فرکانس‌ها را به‌خوبی حذف کرده‌است. در شکل ۱۹ الگوی تشعشی میدان دور سه‌بعدی نمایش داده شده‌است. در شکل ۲۰ نیز الگوهای تشعشی میدان دور فیلتنای پیشنهادی در صفحه‌های میدان الکتریکی و مغناطیسی نشان‌داده شده‌است.



شکل ۱۹: الگوی تشعشی فیلتنای پیشنهادی به‌صورت سه‌بعدی

۴- نتیجه

در این پژوهش طراحی، تحلیل و شبیه‌سازی یک فیلتنای مایکرواستریپ با رویکرد طراحی فیلترهای میان‌گذر ارائه شد. این ساختار متشکل از سه رزوناتور نصف طول موج، یک صفحه‌ی تشعشع‌کننده، خط تغذیه‌ی مایکرواستریپ، یک لایه‌ی دی‌الکتریک و یک صفحه‌ی زمین ناقص می‌باشد. این فیلتنا خواص تشعشع‌کنندگی و فیلترکنندگی مناسبی دارد. پهنای باند ۱۰- دسیبل این فیلتنا ۲۵۸ مگاهرتز است که نسبت به ساختارهای مشابه بسیار مناسب است. پهنای باند این ساختار برحسب



شکل ۲۰: الگوی تشعشی فیلتنای پیشنهادی در صفحه‌های میدان الکتریکی (خط چین) و مغناطیسی (ممتد)

- [9] Yao, Zhi Hong, and Dong Chen, "A novel filtering antenna using dual-mode resonator." Progress In Electromagnetics Research Letters 58, pp. 113-118, 2016.
- [10] Zhao, Xiao-Lan, et al, "High gain filtering antenna for WCDMA application." Electromagnetic Compatibility (APEMC), Asia-Pacific International Symposium, IEEE, Vol. 1, 2016.
- [11] Wang, Rongda, and Peng Gao, "A compact microstrip ultra-wideband filtenna." Electronic Packaging Technology (ICEPT), 15th International Conference, IEEE, 2014.
- [12] Hsieh, Chin-Yuan, Cheng-Hsun Wu, and Tzyh-Ghuang Ma, "A compact dual-band filtering patch antenna using step impedance resonators." IEEE Antennas and wireless propagation letters 14, pp. 1056-1059, 2015.
- [13] Chen, L., and Y-L. Luo, "Compact filtering antenna using CRLH resonator and defected ground structure." Electronics Letters 50.21, pp. 1496-1498, 2014.
- [14] Hong, Jia-Shen G. and Michael J. Lancaster, *Microstrip filters for RF/microwave applications*. Vol. 167, John Wiley & Sons, 2004.
- [15] Aitken, J. E, "Swept-frequency microwave Q-factor measurement." Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, Vol. 123, No. 9, 1976.
- [16] Bray, J. R. and L. Roy, "Measuring the unloaded, loaded, and external quality factors of one-and two-port resonators using scattering-parameter magnitudes at fractional power levels." IEE Proceedings-Microwaves, Antennas and Propagation 151.4, pp 345-350, 2004.
- [17] Balanis, Constantine A, *Antenna theory: analysis and design*. John Wiley & Sons, 2016.

مراجع:

- [۱] علی اکبر دسترنج، « آنتن حلزونی ارشمیدسی چهاربازویی در باند فرکانسی ۴ تا ۲ گیگاهرتز برای سیستم‌های ردگیری مونیوپالس اهداف هوایی»، دوره ۴۷، شماره ۳، صفحه ۱۰۳۳-۱۰۲۵، ۱۳۹۶.
- [۲] ایمان مجیدی، حسین همتی و سید حسن صدیقی، « طراحی آنتن چهارتایی شکافی فشرده با قطبش دایروی برای به‌کارگیری در گیرنده‌ی GPS»، دوره ۴۶، شماره ۴، ۳۰۹-۲۹۹، ۱۳۹۵.
- [3] Le Nadan, T. Coupez, J. P. Toutain, S. & Person, C, "Integration of an antenna/filter device, using a multi-layer, multi-technology process." 28th European Microwave Conference, Vol. 1, pp. 672-677, 1998.
- [4] Queudet, F. et al, "Integration of pass-band filters in patch antennas." 32nd European Microwave Conference, IEEE, 2002.
- [5] Mansour, Ghaith, et al, "Design of filtering microstrip antenna using filter synthesis approach." Progress In Electromagnetics Research 145, pp. 59-67, 2014.
- [6] Ohira, Masataka, and Zhewang Ma, "An efficient design method of microstrip filtering antenna suitable for circuit synthesis theory of microwave bandpass filters." Antennas and Propagation (ISAP), International Symposium, IEEE, 2015.
- [7] Chuang, Chao-Tang, and Shyh-Jong Chung, "Synthesis and design of a new printed filtering antenna." IEEE Transactions on Antennas and Propagation 59.3, pp. 1036-1042, 2011.
- [8] Fakharian, Mohammad M. et al, "A wideband and reconfigurable filtering slot antenna." IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters 15, pp. 1610-1613, 2016.

زیر نویس‌ها

[†]Reflection Response
[‡]Tapped-line Feed[‡]Radiation[†]Substrate[‡]Patch[‡]Transmission Response