

طراحی و ساخت یک تزویج کننده مایکرواستریپی فشرده با حذف هارمونیک‌های ناخواسته به کمک تشدیدکننده‌های T شکل و امپدانس پله‌ای

سبحان روشنی، سمیه کریمی و سعید روشنی

چکیده: در این مقاله با استفاده از تشدیدکننده‌های T شکل و امپدانس پله‌ای، یک تزویج کننده مایکرواستریپی جدید با فرکانس کاری یک گیگاهرتز ارائه شده است. تزویج کننده پیشنهادی نسبت به تزویج کننده‌های پیشین از اندازه کوچک تری برخوردار بوده و عملکرد مطلوبی از خود نشان می‌دهد. تزویج کننده طراحی شده در مقایسه با تزویج کننده شاخه‌ای متداول دارای ۶۵٪ کاهش سایز می‌باشد و همچنین هارمونیک‌های دوم تا هفتم را نیز حذف می‌کند. تزویج کننده طراحی شده بر روی زیرلایه ۵۸۸۰ RT/duroid با ثابت دی‌الکتریک ۲/۲، ضخامت ۳۱ mil و تانژانت تلفات 0.0009 ساخته شده است. نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی تطبیق خوبی دارند که نشان از صحت طراحی قطعه دارد.

کلیدواژه: تزویج کننده، تشدیدکننده T شکل، تشدیدکننده امپدانس پله‌ای و حذف هارمونیک.

در [۳] چهار تشدیدکننده با استفاده از خطوط انتقال خم شده در تزویج کننده به کار رفته است. در این روش ابعاد تزویج کننده تا ۱۸٪ کاهش یافته و همچنین هارمونیک‌ها را در بازه فرکانسی نسبتاً وسیعی حذف می‌کند. ویژگی بارز طرح فوق حذف مناسب هارمونیک‌ها است، اما متأسفانه کاهش سایز در این کار خیلی چشم‌گیر نمی‌باشد و مدار دارای ساختاری بسیار پیچیده است.

در [۴] با استفاده از ساختار T شکل یک تزویج کننده در فرکانس ۲/۵ گیگاهرتز با کاهش سایز بسیار خوبی طراحی شده است. متأسفانه ساختار فوق هیچ حذف هارمونیکی ندارد.

در [۵] با استفاده از چهار تشدیدکننده ماریچی که در چهار شاخه تزویج کننده شاخه‌ای متداول به کار رفته است، یک تزویج کننده فشرده با حذف هارمونیک طراحی گردیده است. تزویج کننده طراحی شده فوق در فرکانس ۲/۴ گیگاهرتز عملکرد مناسبی دارد. سایز تزویج کننده مذکور در مقایسه با تزویج کننده شاخه‌ای متداول حدود ۲۴٪ کوچک تر می‌باشد. همچنین تزویج کننده فوق هارمونیک‌های دوم و سوم را حذف می‌کند.

در [۶] به کمک چهار تشدیدکننده MLCMRC به کار رفته در ساختار تزویج کننده شاخه‌ای متداول، یک قطعه فشرده با حذف هارمونیک‌های سوم و پنجم ارائه شده است. تزویج کننده فوق ۶۴٪ سایز مدار را کاهش می‌دهد، اما با توجه به ساختار پیچیده فقط دو هارمونیک را حذف می‌کند. در [۷] به کمک تشدیدکننده و ساختار خطوط خم شده یک تزویج کننده فشرده با حذف هارمونیک‌های ناخواسته طراحی گردیده است. تزویج کننده فوق در فرکانس ۱/۵ گیگاهرتز عملکرد مناسبی دارد اما دارای ساختاری نسبتاً پیچیده می‌باشد. در [۸] یک تزویج کننده فشرده با حذف هارمونیک به کمک ساختار زمین ناقص (DGS) طراحی شده است.

در [۹] تا [۱۱] به کمک استفاده از المان‌های فشرده (سلف و خازن) تزویج کننده‌های فشرده با حذف هارمونیک طراحی شده است. ساختارهای زمین ناقص و استفاده از المان‌های فشرده در فرکانس‌های بالا به علت نیاز به پروسه اضافی در فرایند ساخت مطلوب نمی‌باشند [۱۲] و [۱۳].

۱- مقدمه

با گسترش کاربرد ادوات مایکروویو و افزایش تقاضا، نیاز به سیستم‌هایی با کاهش ابعاد، توانایی حذف هارمونیک و هزینه‌های پایین در حال افزایش است. تا کنون تلاش‌های بسیاری در جهت به دست آوردن مدارهای مایکروویو با سایز کوچک و کارایی بالا صورت گرفته است که تزویج کننده‌ها نیز از این قاعده مستثنی نبوده‌اند. سیستم‌های ارتباطی مدرن با کیفیت و سرعت بالا نیاز به حذف هارمونیک برای جلوگیری از تداخل دارند. مشکل اساسی تزویج کننده‌های مایکرواستریپی متداول، بزرگ بودن اندازه تزویج کننده و حضور هارمونیک‌های ناخواسته در پاسخ فرکانسی می‌باشد. این مشکل طی سالیان گذشته توسط طراحان مختلف تا حدی برطرف شده که در ادامه به روند بررسی آنها می‌پردازیم.

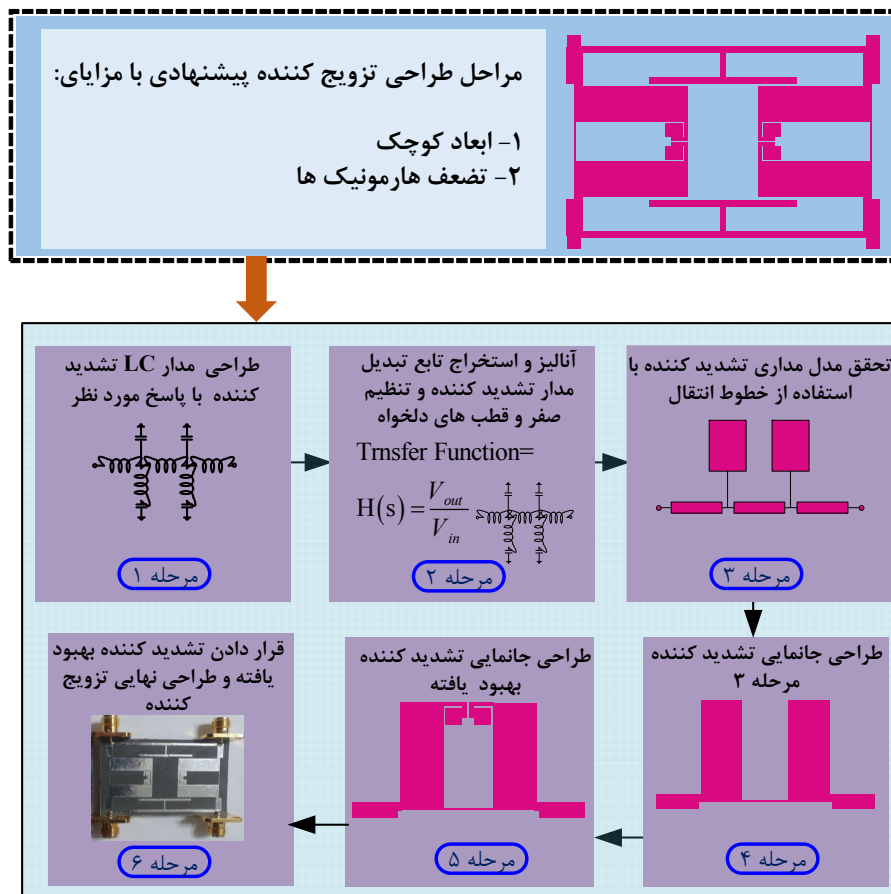
در [۱] روشی برای کوچک کردن ابعاد تزویج کننده ارائه شده است. در این مرجع یک تزویج کننده شاخه‌ای با استفاده از خطوط مایکرواستریپی متناوب ناپیوسته طراحی شده که این روش ابعاد تزویج کننده را تا ۴۰٪ کاهش داده است. متأسفانه در ساختار مذکور، هارمونیک‌های ناخواسته در

این مقاله در تاریخ ۱۲ دی ماه ۱۳۹۹ دریافت و در تاریخ ۷ تیر ماه ۱۴۰۰ بازنگری شد.

سبحان روشنی، گروه برق، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران، (email: sobhan_roshany@yahoo.ca)

سمیه کریمی، گروه برق، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران، (email: somaye_karimi_9696@yahoo.com)

سعید روشنی (نویسنده مسئول)، گروه برق، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران، (email: s_roshany@yahoo.com)



شکل ۱: روندنمای مراحل طراحی تزویج کننده پیشنهادی.

صورت مدار LC طراحی می شود که در فرکانس مورد نظر یک صفر انتقال ایجاد می کند که تضعیف دلخواه را در بازه فرکانسی مورد نظر در باند عبور تولید می نماید. در مرحله دوم توسط آنالیز ارائه شده، تابع تبدیل مدار LC استخراج می شود و نمودار اندازه- فاز Bode رسم می گردد که پاسخ مرحله قبل را تأیید می کند. در مرحله سوم با استفاده از خطوط انتقال، مدل مداری برای تشدید کننده اولیه طراحی شده تحقق می یابد و پاسخ فرکانسی رسم می گردد که روند طراحی در مراحل قبلی را تأیید می کند. در مرحله چهارم با توجه به مدل مداری، جانمایی تشدید کننده اولیه طراحی می شود که پاسخ آن تأیید کننده درستی مراحل قبلی است. در مرحله پنجم با اعمال تغییراتی در جانمایی تشدید کننده اولیه، ساختار تشدید کننده بهبود یافته ارائه می گردد که دارای پاسخ فرکانسی به مراتب مناسب تری از تشدید کننده اولیه می باشد و در مرحله آخر با قراردادن تشدید کننده های طراحی شده و تشدید کننده های T شکل در شاخه های اصلی تزویج کننده شاخه ای متداول، ساختار تزویج کننده پیشنهادی ارائه می گردد.

۲-۱ تشدید کننده T شکل طراحی شده

این تشدید کننده همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است دارای ساختار امپدانس پله ای بوده و می تواند مشخصه های خوبی از قبیل تلفات عبوری مناسب داشته باشد، ولی مشکل اساسی در طراحی این تشدید کننده ها سایز بزرگ آنها می باشد. تشدید کننده T شکل پیشنهادی برای حذف بیشتر و دقیق تر هارمونیک طراحی شده است. مقادیر ابعاد نشان داده شده در ساختار فوق در جدول ۱ آمده است.

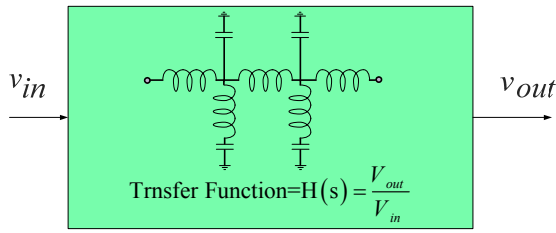
در این مقاله یک تزویج کننده فشرده با ساختاری ساده در فرکانس یک گیگاهرتز طراحی شده که ۶۵٪ سایز مدار را نسبت به تزویج کننده شاخه ای متداول کاهش داده و همچنین هارمونیک های دوم الی هفتم را حذف می کند.

۲- طراحی مدار

تزویج کننده شاخه ای به عنوان یک المان مقسم و ترکیب کننده توان در مدارهای میکروویو مورد توجه بسیار قرار گرفته است. خطوط میکرواستریپ نیز بستر مؤثری را برای انتقال امواج و سیگنال ها در محدوده فرکانسی میکروویو فراهم آورده است. خطوط میکرواستریپ بر خلاف عناصر فشرده شده مانند سلف و خازن محدودیت کاربرد در فرکانس های مختلف را ندارند. مزیت دیگر این خطوط این است که با طراحی تزویج کننده ها، فیلترها و سایر قطعات با این خطوط می توان آنها را تا ابعاد بسیار کوچکی فشرده سازی نمود. با توجه به این که کاهش وزن، حجم و پایین بودن قیمت ساخت از مزیت هایی می باشد که در ساختار این عناصر تأکید زیادی بر آن می شود، به دست آوردن یک خط انتقال معادل کوچک شده برای یک خط انتقال ساده میکرواستریپی از اهمیت بالایی برخوردار است.

در ساختار تزویج کننده شاخه ای پیشنهادی برای داشتن حذف هارمونیک و کاهش ابعاد از دو نوع تشدید کننده امپدانس پله ای و تشدید کننده T شکل استفاده شده است. ابتدا در ادامه طراحی تشدید کننده ها مورد بررسی قرار می گیرد.

طراحی تزویج کننده پیشنهادی همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، شامل ۶ مرحله می باشد. در مرحله اول تشدید کننده اولیه به



شکل ۴: تابع تبدیل مدل مداری LC تشدیدکننده اولیه.

جدول ۱: مقادیر ابعاد المان های به کار رفته در تشدیدکننده T شکل.

WT1 (mm)	LT1 (mm)	WT2 (mm)	LT2 (mm)
۰٫۵	۴	۱	۱۸

جدول ۲: مقادیر سلف و خازن های به کار رفته در مدل LC تشدیدکننده اولیه.

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
L_1	۰٫۸۶ nH	C_1	۱٫۶۸ pF
L_r	۷٫۲۵ nH	C_r	۱ pF
L_f	۲ nH		

جدول ۳: مقادیر ابعاد به کار رفته در مدل مداری خط انتقال تشدیدکننده اولیه.

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
Z_1	۲۶٫۶ Ω	θ_1	۴۱٫۴°
Z_r	۱۸۸ Ω	θ_r	۲۷٫۳°
Z_f	۸۸ Ω	θ_f	۲۴٫۶°

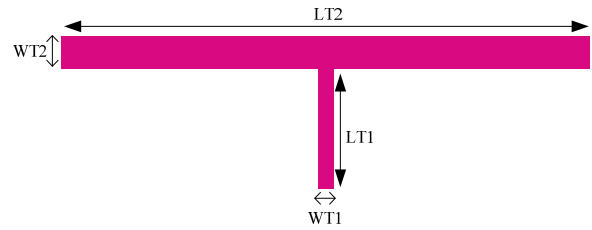
مقادیر سلف و خازن های به کار رفته در مدل LC تشدیدکننده امپدانس پله ای اولیه نشان داده شده در شکل ۳-الف به شرح آورده شده در جدول ۲ می باشد. همچنین مقادیر ابعاد به کار رفته در مدل مداری خط انتقال تشدیدکننده اولیه نشان داده شده در شکل ۳-ب به شرح نشان داده شده در جدول ۳ است. برای مدل LC تشدیدکننده امپدانس پله ای اولیه تابع تبدیل مدار $H(s)$ که در شکل ۴ آمده است به صورت (۱) محاسبه می شود.

نمودار اندازه-فاز Bode مدل مداری LC تشدیدکننده اولیه به صورت لگاریتمی در شکل ۵ آمده است. همان طور که دیده می شود تابع تبدیل فوق دارای یک صفر انتقال در فرکانس ۴ گیگاهرتز است که تأییدکننده نتایج مدل LC و مدل مداری خطوط انتقال می باشد. تشدیدکننده امپدانس پله ای طراحی شده در محیط EM و پاسخ فرکانسی آن در شکل ۶ نشان داده شده است. همان طور که دیده می شود، تشدیدکننده فوق دارای پهنای قطع وسیع با تلفات عبوری مناسب می باشد، اما متأسفانه پاسخ با گذار آهسته از باند عبور به باند قطع است و ابعاد تشدیدکننده نیز به نسبت بزرگ است.

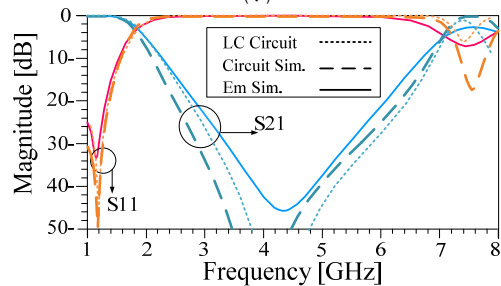
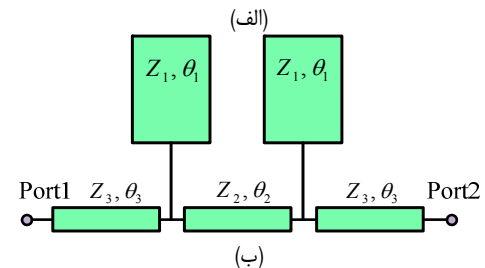
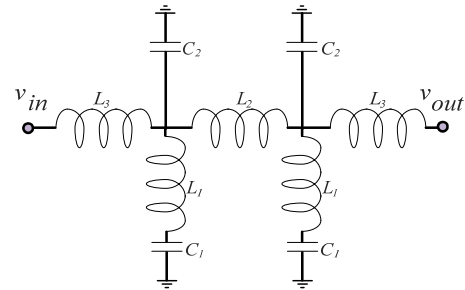
۳-۲ تشدیدکننده امپدانس پله ای پیشنهادی

همان طور که دیده شد، تشدیدکننده امپدانس پله ای اولیه دارای پاسخی با گذار آهسته از باند عبور به باند قطع است و پهنای باند قطع نیز بسیار وسیع نمی باشد. برای افزایش پهنای باند قطع با ایجاد خاصیت تزویج در تشدیدکننده فوق به صورت نشان داده شده در شکل ۷-الف

$$H(s) = \frac{1,56 \times 10^{51} s^4 - 1,34 \times 10^{50} s^3 + 2,16 \times 10^{49} s^2 + 4,81 \times 10^{48} s + 7,5 \times 10^{47}}{s^4 + 2,47 \times 10^{47} s^3 + 4,83 \times 10^{46} s^2 + 1,03 \times 10^{45} s + 6,67 \times 10^{44} s^0 + 1,284 \times 10^{43} s^7 + 2 \times 10^{42} s^6 + 2,5 \times 10^{41} s^5 + 1,68 \times 10^{40} s^4 + 7,5 \times 10^{39} s^3} \quad (1)$$



شکل ۲: ساختار تشدیدکننده T شکل به کار رفته.

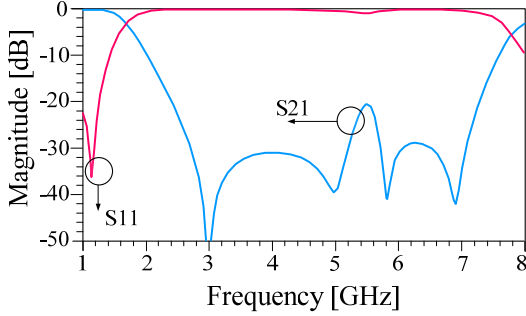
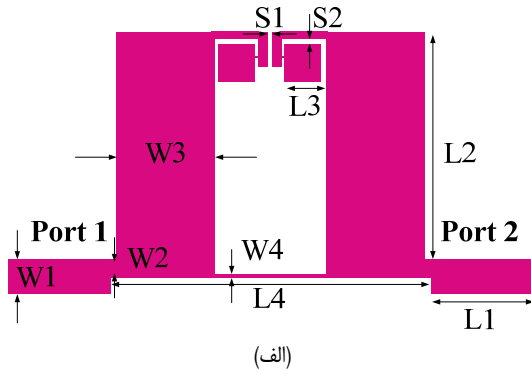


شکل ۳: (الف) مدل مداری LC، (ب) مدل مداری خط انتقال برای تشدیدکننده اولیه و (ج) پاسخ فرکانسی و مقایسه آنها.

۲-۲ تشدیدکننده امپدانس پله ای اولیه

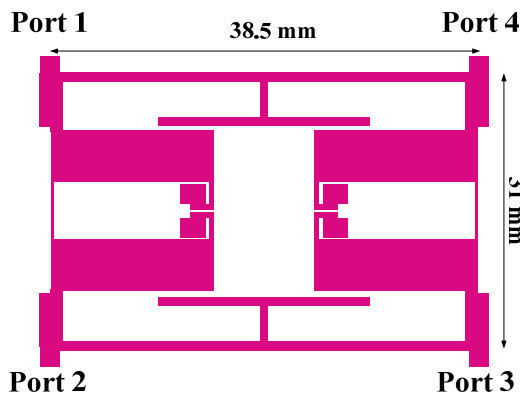
نام تشدیدکننده امپدانس پله ای مانند بیشتر تشدیدکننده ها از شکل ظاهری آن گرفته شده است. امپدانس پله ای ترکیبی است که در آن خطوط مایکرواستریبی با طول و عرض های گوناگون پشت سر هم قرار می گیرند. تشدیدکننده امپدانس پله ای یکی از پرکاربردترین تشدیدکننده ها در زمینه طراحی فیلترهای مایکرواستریبی نیز می باشد که مطالعات زیادی روی آن انجام شده است. ساختار ساده این تشدیدکننده ها از جمله دیگر مزایای آن در طراحی های مایکروویو است.

در شکل ۳-الف، مدل مداری LC و در شکل ۳-ب مدل مداری با خطوط انتقال برای تشدیدکننده امپدانس پله ای اولیه نمایش داده شده است. پاسخ فرکانسی مدل مداری با خطوط انتقال و مدل مداری LC، با پاسخ های جانمایی که در شکل ۳-ج نشان داده شده است، همخوانی خوبی دارند.



(ب)

شکل ۷: ساختار (الف) تشدیدکننده امپدانس پله‌ای پیشنهادی و (ب) پاسخ فرکانسی آن.



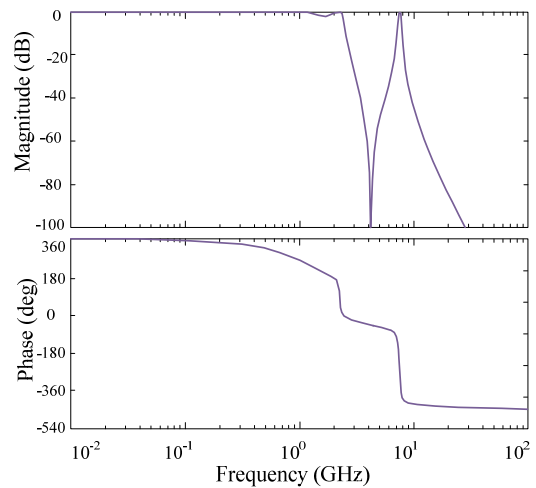
شکل ۸: ساختار تزویج کننده پیشنهادی.

اختلاف فاز بین دو دهانه خروجی آن وجود دارد. تزویج کننده شاخه‌ای متداول سه مشکل عمده دارد. اول این که سایز بسیار بزرگی دارد. دومین مشکل این است که پهنای باند فرکانسی آنها کم بوده و برای تزویج کننده شاخه‌ای متداول حداکثر پهنای باند نسبی (FBW) حدود ۱۵٪ می‌باشد. سومین ضعف، این است که تزویج کننده شاخه‌ای متداول توانایی حذف هارمونیک‌ها را ندارد و علاوه بر عبور سیگنال اصلی، هارمونیک‌ها نیز متأسفانه از تزویج کننده عبور می‌کنند. تزویج کننده پیشنهادی برای بهبود نقاط ضعف فوق طراحی شده و ساختار آن در شکل ۸ آمده است.

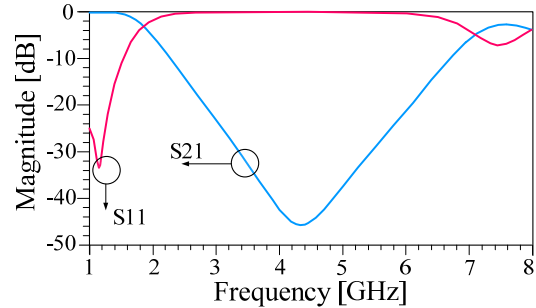
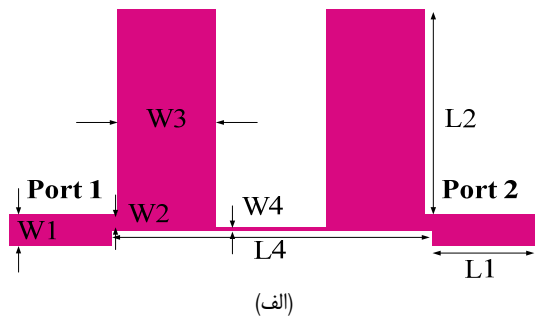
در تزویج کننده پیشنهادی با جایگذاری تشدیدکننده‌های T شکل و امپدانس پله‌ای پیشنهادی در شاخه‌های آن، ابعاد تزویج کننده به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. همچنین تشدیدکننده‌های به کار رفته باعث حذف هارمونیک‌های دوم، سوم، چهارم، پنجم، ششم و هفتم می‌شوند. در شکل ۹ پاسخ فرکانسی تزویج کننده پیشنهادی نمایش داده شده است.

۴- شبیه‌سازی و اندازه‌گیری

تزویج کننده پیشنهادی بر روی زیرلایه ۵۸۸۰ RT/druoid با ثابت دی‌الکتریک ۲٫۲، تانژانت تلفات ۰٫۰۰۰۹ و ضخامت ۳۱ mil ساخته شده است. جانمایی تزویج کننده پیشنهادی در مقایسه با تزویج کننده شاخه‌ای



شکل ۵: نمودار اندازه-فاز Bode مدل مدار LC تشدیدکننده اولیه.



(ب)

شکل ۶: ساختار (الف) تشدیدکننده امپدانس پله‌ای اولیه و (ب) پاسخ فرکانسی آن.

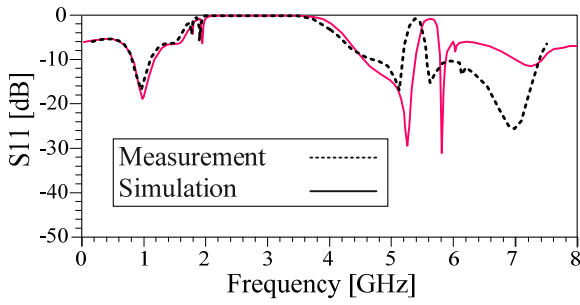
جدول ۴: مقادیر ابعاد المان‌های به کار رفته در تشدیدکننده امپدانس پله‌ای پیشنهادی.

W1 (mm)	W2 (mm)	W3 (mm)	W4 (mm)	S1 (mm)
۲	۰٫۵	۵٫۷	۰٫۱	۰٫۱
L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	L4 (mm)	S2 (mm)
۶	۱۳٫۷	۲٫۳	۱۸٫۶	۰٫۱

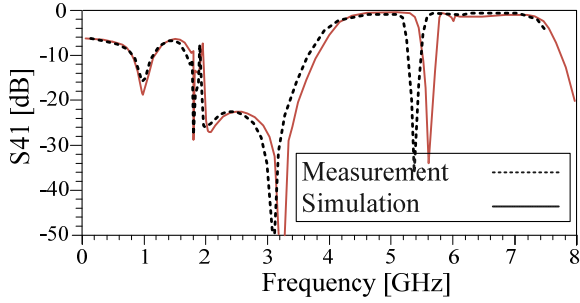
تشدیدکننده پیشنهادی طراحی شده است. در تشدیدکننده امپدانس پله‌ای پیشنهادی که در شکل ۷ آمده است با به کارگیری خاصیت تزویج بین دو شاخه انتهایی، مدار پهنای قطع وسیع تا فرکانس ۷٫۴ گیگاهرتز با سطح تضعیف ۱۰ dB- افزایش یافته است. پاسخ فرکانسی تشدیدکننده امپدانس پله‌ای پیشنهادی در شکل ۷-ب نشان داده شده است. مقادیر ابعاد المان‌های به کار رفته در ساختار تشدیدکننده امپدانس پله‌ای پیشنهادی در جدول ۴ آمده است.

۳- تزویج کننده شاخه‌ای پیشنهادی

تزویج کننده شاخه‌ای یک شبکه چهاردهانه است که دو ویژگی مهم دارد. یکی آن که خروجی آن ایزوله می‌باشد و دوم این که ۹۰ درجه

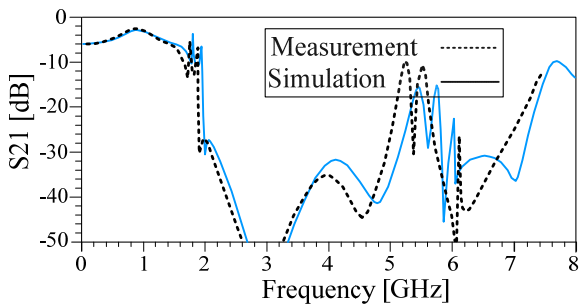


(الف)

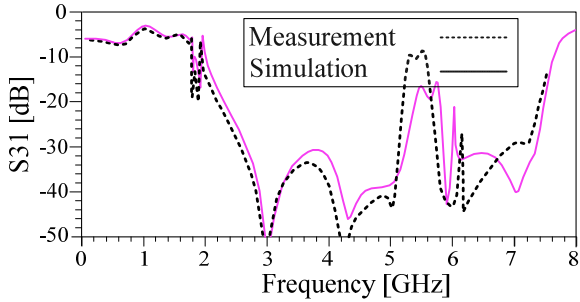


(ب)

شکل ۱۱: پاسخ فرکانسی تزویج کننده پیشنهادی، (الف) منحنی شبیه سازی و اندازه گیری شده S_{11} و (ب) منحنی شبیه سازی و اندازه گیری شده S_{41} .



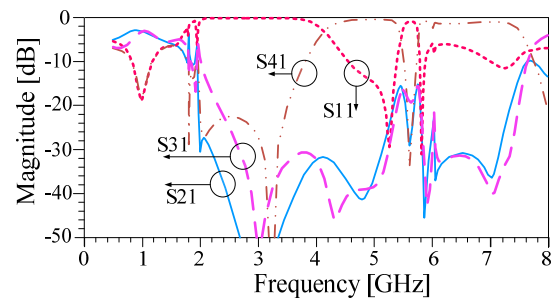
(الف)



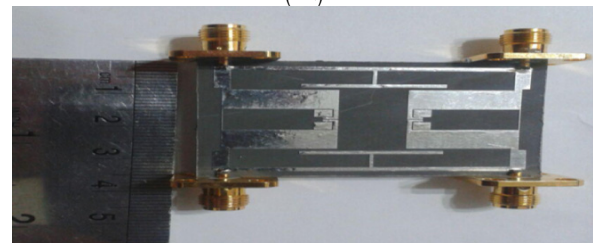
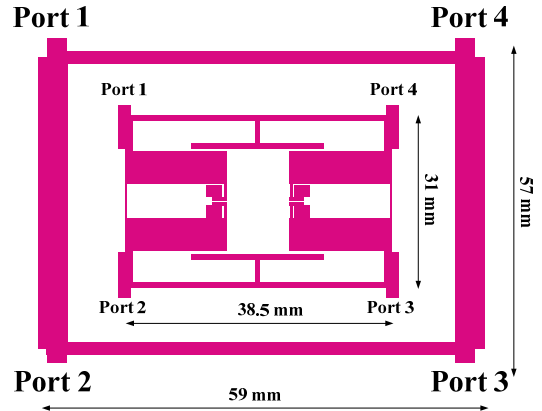
(ب)

شکل ۱۲: پاسخ فرکانسی تزویج کننده پیشنهادی، (الف) منحنی شبیه سازی و اندازه گیری شده S_{21} و (ب) منحنی شبیه سازی و اندازه گیری شده S_{31} .

۶۲ dB در هارمونیک سوم، تضعیف بیشتر از ۳۲ dB در هارمونیک چهارم، تضعیف بیشتر از ۳۶ dB در هارمونیک پنجم، تضعیف بیشتر از ۳۷ dB در هارمونیک ششم و تضعیف بیشتر از ۳۶ dB در هارمونیک هفتم می باشد. شکل ۱۳ بیانگر اختلاف فاز حدود ۹۰ درجه در پورت های خروجی تزویج کننده پیشنهادی در فرکانس کاری ۱ گیگاهرتز می باشد که بیانگر کارایی مطلوب و قابل قبول تزویج کننده طراحی شده در پورت های خروجی است. در جدول ۵ مقایسه ای بین تزویج کننده پیشنهادی و تزویج کننده شاخه ای متداول انجام شده که نتایج مقایسه عملکرد مناسب تزویج کننده را نشان می دهد. در جدول ۶ مقایسه ای بین تزویج کننده پیشنهادی و چند تزویج کننده با عملکرد مشابه نشان داده شده است.



شکل ۹: پاسخ فرکانسی تزویج کننده پیشنهادی.



شکل ۱۰: تزویج کننده پیشنهادی (الف) طراحی شده و مقایسه ابعاد آن با تزویج کننده متداول و (ب) تزویج کننده پیشنهادی ساخته شده.

متداول در شکل ۱۰-الف و تصویر تزویج کننده شاخه ای ساخته شده در شکل ۶-ب آمده است. ساین تزویج کننده ارائه شده $31\text{ mm} \times 38.5\text{ mm}$ می باشد که ۶۵٪ کاهش ابعاد را نسبت به تزویج کننده شاخه ای متداول نشان می دهد.

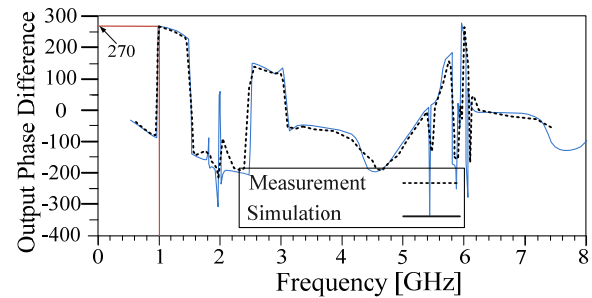
نتایج شبیه سازی و اندازه گیری شده پارامترهای پراکنندگی تزویج کننده ساخته شده در شکل های ۱۱ و ۱۲ آمده است. در شکل ۱۱ مقادیر اندازه گیری و شبیه سازی پارامترهای S_{11} و S_{41} نشان داده شده است. بر اساس مقادیر اندازه گیری شده در فرکانس کاری یک گیگاهرتز، تلفات بازگشتی (S_{11}) و ایزولاسیون (S_{41}) بیشتر از ۱۹ dB می باشد. در شکل ۱۲ مقادیر اندازه گیری و شبیه سازی پارامترهای S_{21} و S_{31} نشان داده شده است. تلفات عبوری در فرکانس کاری یک گیگاهرتز، حدود ۰/۱ دسی بل می باشد ($S_{21} = -2.9\text{ dB}$, $S_{31} = -3.1\text{ dB}$).

همچنین همان طور که در شکل های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می شود در بازه فرکانسی ۸۵۰ مگاهرتز الی ۱/۱۵ گیگاهرتز، S_{11} و S_{41} کمتر از ۱۰- دسی بل و تلفات عبوری کمتر از ۱ دسی بل می باشد که پهنای باند در بازه مذکور ۳۰۰ مگاهرتز است. لذا با توجه به فرکانس کاری یک گیگاهرتز، تزویج کننده پیشنهادی دارای پهنای باند نسبی حدود ۳۰٪ می باشد.

همچنین با توجه به نتایج دیده شده در شکل ۱۲، این تزویج کننده دارای تضعیف بیشتر از ۲۹ dB در هارمونیک دوم، تضعیف بیشتر از

جدول ۵: مقایسه عملکرد تزویج کننده پیشنهادی و تزویج کننده شاخه‌ای متداول.

نوع تزویج کننده	مساحت (mm×mm)	اندازه نسبی	حذف هارمونیک
مرسوم	۳۸٫۵×۳۱	%۱۰۰	ندارد
پیشنهادی	۵۹×۵۷	%۳۵	دارد



شکل ۱۳: اختلاف فاز پورت‌های خروجی در تزویج کننده پیشنهادی.

جدول ۶: مقایسه عملکرد چند تزویج کننده طراحی شده با تزویج کننده پیشنهادی.

مراجع	فرکانس کاری (گیگاهرتز)	کاهش ابعاد (درصد)	میزان حذف هارمونیک (دسی‌بل)							تلفات عبوری (دسی‌بل)	ایزولاسیون (دسی‌بل)	پهنای باند نسبی* (درصد)	روش به کار رفته
			دوم	سوم	چهارم	پنجم	ششم	هفتم					
[۴]	۲٫۵	۷۵	-	-	-	-	-	-	۰٫۷۹	۲۳	۱۶	استاب‌های انتهاها	
[۵]	۲٫۴	۷۶	۴۰	۳۰	-	-	-	-	۱٫۲	۱۰	۲۴	تشدیدکننده	
[۶]	۰٫۹	۶۴	-	۴۰	-	۶۰	-	-	۰٫۳	۳۶	۱۷	تشدیدکننده	
[۱۴]	۲	۷۲	۲۳	-	-	-	-	-	۰٫۳۹	۳۵	۱۰	ساختار امپدانس بالا و پایین	
[۱۵]	۱٫۵	۶۲	-	-	-	-	-	-	۰٫۸۵	۳۰	۲۰	ساختار چندلایه	
[۱۶]	۱٫۴۵	۴۶	-	۳۰	-	-	-	-	۰٫۱۲	۲۰	۳۰	ساختار زمین ناقص (DGS)	
[۱۷]	۰٫۶	۶۲	-	۲۰	۴۵	۴۰	۴۵	۲۵	۰٫۳۱	۳۰	۴۶	استاب‌های انتهاها	
[۱۸]	۳٫۵	۳۰	-	-	-	-	-	-	۰٫۶۵	۳۰	۳۱	استاب‌های انتهاها	
[۱۹]	۰٫۹	۷۰	۳۰	-	-	-	-	-	۱	۱۵	۵۱	خطوط کوپل شده	
تزویج کننده پیشنهادی	۱	۶۵	۲۹	۶۲	۳۲	۳۶	۳۷	۳۶	۰٫۱	۱۹	۳۰	تشدیدکننده و استاب‌های انتهاها	

* مقدار پهنای باند نسبی در کارهای پیشین بیان نشده است. در جدول فوق بر اساس نمودارهای رسم شده، مقدار پهنای باند نسبی به صورت تقریبی در بازه فرکانسی که در آن S_{11} و S_{21} کمتر از -10 دسی‌بل و تلفات عبوری کمتر از یک دسی‌بل باشد، محاسبه گردیده است.

Microwave Symposium Digest, pp. 1211-1214, Long Beach, CA, USA, 17-17 Jun. 2005.

- [6] S. Roshani and S. Roshani, "A compact coupler design using meandered line compact microstrip resonant cell (MLCMRC) and bended lines," *Wireless Networks*, vol. 27, no. 1, pp. 677-684, Jan. 2020.
- [7] F. Hosseinkhani and S. Roshani, "A compact branch-line coupler design using low-pass resonators and meandered lines open stubs," *Turkish J. of Electrical Engineering & Computer Sciences*, vol. 26, no. 3, pp. 1164-1170, May 2018.
- [8] S. Dwari and S. Sanyal, "Size reduction and harmonic suppression of microstrip branch-line coupler using defected ground structure," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 48, no. 10, pp. 1966-1969, Oct. 2006.
- [9] Y. H. Chun and J. S. Hong, "Compact wide-band branchline hybrids," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. 54, no. 2, pp. 704-709, Feb. 2006.
- [10] M. Beigizadeh, R. Dehghani, and A. Nabavi, "Analysis and design of a lumped-element hybrid coupler using limited quality factor of components," *AEU-International J. of Electronics and Communications*, vol. 82, no. 1, pp. 312-320, Dec 2017.
- [11] W. Shao, J. He, and B. Z. Wang, "Compact rat-race ring coupler with capacitor loading," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 52, no. 1, pp. 7-9, Jan. 2010.
- [12] K. K. Cheng and W. C. Ip, "A novel power divider design with enhanced spurious suppression and simple structure," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. 58, no. 12, pp. 3903-3908, Nov. 2010.
- [13] S. Roshani, "A Wilkinson power divider with harmonics suppression and size reduction using meandered compact microstrip resonating cells," *Frequenz*, vol. 71, no. 11-12, pp. 517-522, Nov. 2017.
- [14] J. Wang, B. Z. Wang, Y. X. Guo, L. C. Ong, and S. Xiao, "A compact slow-wave microstrip branch-line coupler with high performance," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 17, no. 7, pp. 501-503, Jul. 2007.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله یک تزویج کننده شاخه‌ای با استفاده از تشدیدکننده‌های امپدانس پله‌ای و T شکل در فرکانس کاری یک گیگاهرتز طراحی، شبیه‌سازی و ساخته شده است. نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری با هم تطبیق و همخوانی مطلوبی دارند. تزویج کننده ساخته شده دارای %۶۵ کاهش ابعاد نسبت به تزویج کننده شاخه‌ای متداول می‌باشد. حذف هارمونیک‌های دوم تا هفتم با سطح تضعیف بالا عملکرد مطلوب قطعه طراحی شده را نشان می‌دهد.

مراجع

- [1] K. O. Sun, S. J. Ho, C. C. Yen, and D. Van Der Weide, "A compact branch-line coupler using discontinuous microstrip lines," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 15, no. 8, pp. 519-520, Jul. 2005.
- [2] Z. Liu and R. M. Weikle, "A compact quadrature coupler based on coupled artificial transmission lines," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 15, no. 12, pp. 889-891, Dec. 2005.
- [3] B. F. Zong, G. M. Wang, C. X. Zhang, and Y. W. Wang, "Miniaturised branch-line coupler with ultra-wide high suppression stopband," *Electronics Letters*, vol. 50, no. 19, pp. 1365-1367, Sept. 2014.
- [4] M. Ali, S. K. A. Rahim, M. Z. M. Nor, and M. F. Jamlos, "Branch line coupler using hybrid T-model structure," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 54, no. 1, pp. 237-240, Jan. 2012.
- [5] J. Gu and X. Sun, "Miniaturization and harmonic suppression of branch-line and rat-race hybrid coupler using compensated spiral compact microstrip resonant cell," *IEEE MTT-S International*

زمینه های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: طراحی مدارات آنالوگ و کاربردهای آن، طراحی مدارات فعال و غیر فعال در فرکانس های باند رادیویی. ایشان تا کنون بیش از صد مقاله در مجلات معتبر دنیا به چاپ رسانده است.

سمیه کریمی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق الکترونیک در سال های ۱۳۹۴ و ۱۳۹۶ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه به پایان رسانده است. زمینه های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: طراحی مدارات آنالوگ و کاربردهای آن، طراحی مدارات فعال و غیر فعال در فرکانس های باند رادیویی.

سعید روشنی در سال ۱۳۸۷ مدرک کارشناسی مهندسی برق الکترونیک خود را از دانشگاه رازی کرمانشاه، در سال ۱۳۸۹ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق الکترونیک خود را از دانشگاه شاهد تهران و در سال ۱۳۹۳ مدرک دکتری خود را در رشته مهندسی برق الکترونیک از دانشگاه رازی کرمانشاه، دریافت نمود. ایشان در سال ۱۳۹۳ با عنوان دانشجوی نمونه کشور از رساله دکتری خود دفاع نمودند و از همان سال عضو بنیاد ملی نخبگان می باشند. از سال ۱۳۹۰ نام برده به عنوان عضو هیأت علمی گروه برق در دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه مشغول به کار هستند. ایشان از سال ۱۳۹۷ رئیس دانشکده فنی مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه می باشند. زمینه های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: طراحی مدارات آنالوگ و کاربردهای آن، طراحی مدارات فعال و غیر فعال در فرکانس های باند رادیویی. ایشان تا کنون بیش از صد مقاله در مجلات معتبر دنیا به چاپ رسانده است و موفق گردید در سال ۱۴۰۰ جز لیست، ۲ درصد دانشمندان برتر دنیا که توسط پایگاه داده اسکوپوس و انتشارات الزویر منتشر شده، قرار گیرد.

- [15] Y. Wang, K. Ma, and S. Mou, "A compact branch-line coupler using substrate integrated suspended line technology," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 26, no. 2, pp. 95-97, Jan. 2016.
- [16] Y. J. Sung, C. S. Ahn, and Y. S. Kim, "Size reduction and harmonic suppression of rat-race hybrid coupler using defected ground structure," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 14, no. 1, pp. 7-9, Feb. 2004.
- [17] V. R. Reddy, V. K. Velidi, and B. P. Rao, "Wideband harmonic suppressed compact rat-race coupler using triple stub m-shape unit," *Progress in Electromagnetics Research Letters*, vol. 96, no. 1, pp. 81-90, Mar. 2021.
- [18] A. A. Abdulbari, S. K. A. Rahim, M. Z. A. Abd Aziz, K. G. Tan, N. K. Noordin, and M. Z. M. Nor, "New design of wideband microstrip branch line coupler using T-shape and open stub for 5G application," *International J. of Electrical and Computer Engineering*, vol. 11, no. 2, pp. 1346-1355, Apr. 2021.
- [19] R. K. Barik, Q. S. Cheng, N. C. Pradhan, and K. S. Subramanian, "Highly miniaturized wideband 3-dB branch-line hybrid with second harmonic-suppression," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 62, no. 6, pp. 2248-2256, Jun. 2020.

سپحان روشنی، در سال ۱۳۸۸ مدرک کارشناسی مهندسی برق الکترونیک خود را از دانشگاه رازی کرمانشاه، در سال ۱۳۹۰ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق الکترونیک خود را از دانشگاه علم و صنعت تهران و در سال ۱۳۹۵ مدرک دکتری خود را در رشته مهندسی برق الکترونیک از دانشگاه رازی کرمانشاه، دریافت نمود. ایشان در سال ۱۳۹۲ با عنوان دانشجوی نمونه کشور انتخاب شدند و از همان سال عضو بنیاد ملی نخبگان می باشند. از سال ۱۳۹۳ نام برده به عنوان عضو هیأت علمی گروه برق در دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه مشغول به کار هستند. ایشان از سال ۱۴۰۰ در سمت رئیس باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان استان کرمانشاه مشغول به فعالیت می باشند.