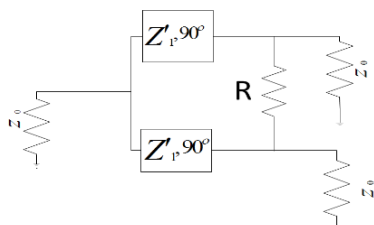


طراحی، شبیه‌سازی و ساخت یک تقسیم‌کننده توان ویلکینسون فشرده شش خروجی با استفاده از خطوط مرکب

مسعود حیدری و سعید روشنی



شکل ۱: ساختار یک مقسم توان ویلکینسون معمولی با دو خروجی.

تقسیم‌کننده توان ویلکینسون ارائه و بررسی شده که می‌تواند توان ورودی را بین تعداد خروجی‌های بیشتر تقسیم کند.

۲- طراحی مدار

مدار طراحی شده از یک تقسیم‌کننده با دو دهانه خروجی و دو مقسم که دارای سه دهانه در خروجی برای تقسیم توان است تشکیل شده است. تقسیم‌کننده‌های استفاده شده از نوع ویلکینسون با نسبت تقسیم برابر در خروجی هستند. تحلیل مدار را در دو قسمت انجام می‌دهیم و در قسمت اول تقسیم‌کننده توان ویلکینسون را که دارای دو خروجی است بررسی می‌کنیم. در این مقسم از یک خازن، مقاومت و خطوط مرکب که شامل خط میکرواستریپ و سلف می‌شود برای بهبود عملکرد مدار و کوچک‌سازی ابعاد آن استفاده شده است. این مدار به صورت جداگانه شبیه‌سازی شده که نتایج آن نیز ذکر و تحلیل شده است. در قسمت دوم به بررسی مقسمی که دارای سه دهانه است می‌پردازیم. تحلیل و نتایج شبیه‌سازی این مدار نیز به صورت جداگانه آورده شده است.

۲-۱ تحلیل تقسیم‌کننده با دو خروجی

در شکل ۱ یک تقسیم‌کننده معمولی ویلکینسون با دو دهانه نشان داده شده که از دو خط $\lambda/4$ و یک مقاومت به عنوان عنصر ایزولاسیون تشکیل شده است. در مدار پیشنهادی برای دستیابی به پارامترهای بهتر از مقسم توانی که شکل‌های ۲ و ۳ ساختار و شماتیک آن را نشان می‌دهد استفاده شده است.

پس از تحلیل مدار [۷]، (۱) تا (۵) برای به دست آوردن پارامترهای مربوط به مقسم توان دو خروجی به دست می‌آید

$$Z_1 = 2Z_2 \quad (1)$$

$$Z_3 = Z_2 \sqrt{2} \tan \theta_r \quad (2)$$

$$R = 4Z_2 \quad (3)$$

$$L = \frac{\sqrt{2}}{\omega} Z_2 (1 - \tan^2 \theta_r) \quad (4)$$

$$C = \frac{1}{4Z_2 \omega \tan \theta_r} \quad (5)$$

چکیده: در این مقاله یک ساختار مقسم توان ویلکینسون فشرده با بهره‌گیری از عناصر پسیو طراحی، شبیه‌سازی و ساخته شده است. ساختار پیشنهادی از یک مقسم توان با دو دهانه خروجی و دو مقسم توان که هر یک دارای سه خروجی برای تقسیم توان می‌باشند تشکیل شده است. تقسیم‌کننده‌های استفاده شده در این طرح از نوع ویلکینسون و متقارن هستند، از این مدار می‌توان برای تقسیم توان بین شش خروجی به صورت متقارن با تلفات کم بهره برد. در طرح پیشنهادی به جای استفاده از خطوط الکتریکی $\lambda/4$ از خطوط مرکب استفاده شده، همچنین برای ایزولاسیون بین خروجی‌های مقسمی که دارای دو دهانه برای تقسیم توان است از یک مقاومت و خازن استفاده شده، که این امر باعث کاهش ابعاد و همچنین کاهش مجموع طول الکتریکی خطوط و بهبود ایزولاسیون شده است. مدار طراحی شده در فرکانس کاری ۱/۵ گیگاهرتز شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده که نتایج تحلیل مدار در این مقاله قرار داده شده است.

کلیدواژه: ایزولاسیون، خطوط مرکب، مقسم توان، ویلکینسون.

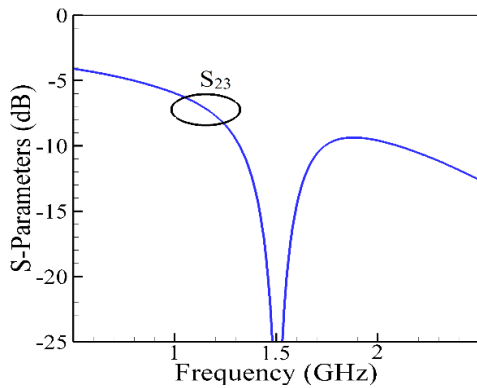
۱- مقدمه

امروزه به دلیل کاهش حجم مدارها که کاهش هزینه‌ها از نتایج آن است از طیف فرکانسی که به مایکروویو معروف است بسیار استفاده می‌شود. امواج رادیویی با فرکانس‌های بین ۳۰۰ مگاهرتز تا ۳۰۰ گیگاهرتز را امواج مایکروویو می‌نامند. خطوط مایکرواستریپ پایه طراحی مدارات فرکانس بالا در صنعت هستند. این خطوط که به صورت خطوط انتقال با ضریب دی‌الکتریکی مؤثر ارائه می‌شود می‌تواند به عنوان خط انتقال یا سلف و خازن معادل مدارهای فرکانس بالا به کار گرفته شود [۱]. مقسم‌های توان یکی از اولین و مقدماتی‌ترین عنصرها در شبکه‌ها و مدارهای فرکانس بالا هستند. در بین تقسیم‌کننده‌های توان با تلف کم تلف، تقسیم‌کننده‌های توان ویلکینسون می‌توانند بهترین انتخاب باشند چرا که ویژگی تقسیم‌کننده‌های کم تلف و مقاومتی را هم‌زمان دارا هستند. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به ایزوله‌سازی دهانه‌های خروجی، تطبیق امپدانس ورودی و خروجی، عدم اتلاف توان در عناصر ساختار و نیز ساختار مسطحشان اشاره کرد. به همین خاطر تلاش‌های زیادی در راستای تولید انواع گوناگون تقسیم‌کننده‌های توان ویلکینسون صورت گرفته است. تاکنون مطالعات زیادی با جنبه‌های مختلف روی این مقسم‌ها انجام گرفته است، از جمله موضوع‌ها می‌توان به چندباند بودن [۲]، تقسیم نامتقارن توان [۳]، تقسیم‌کننده با تعداد خروجی‌های زیاد [۴]، مقسم با پهنای باند وسیع [۵]، حذف هارمونیک‌ها [۶] و ... اشاره کرد. در این مقاله یک

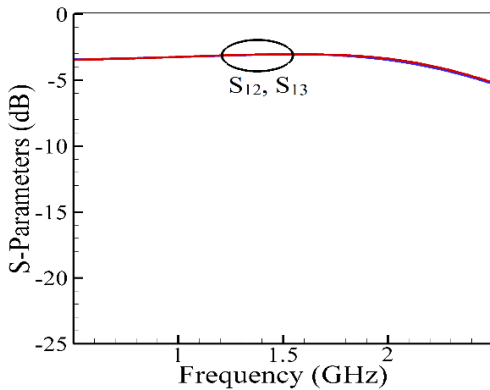
این مقاله در تاریخ ۵ خرداد ماه ۱۳۹۶ دریافت و در تاریخ ۲۸ بهمن ماه ۱۳۹۶ بازنگری شد.

مسعود حیدری، گروه برق، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران، (email: heydari.masoud@yahoo.com)

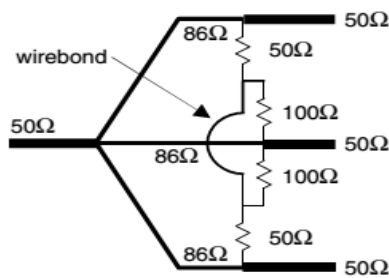
سعید روشنی (نویسنده مسئول)، گروه برق، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران، (email: roshany@ieee.org)



شکل ۵: نمودار ایزولاسیون در مدار شکل ۳.



شکل ۶: نمودار پارامتر تلفات عبوری در مدار شکل ۳.



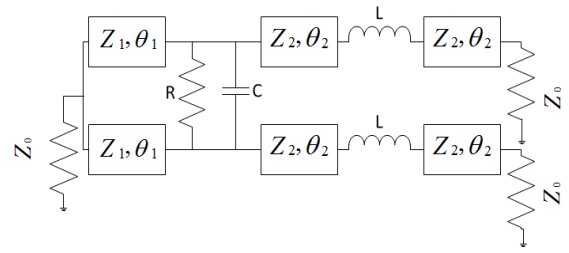
شکل ۷: تقسیم‌کننده توان با سه خروجی [۸].

۲-۲ بررسی تقسیم‌کننده با سه خروجی

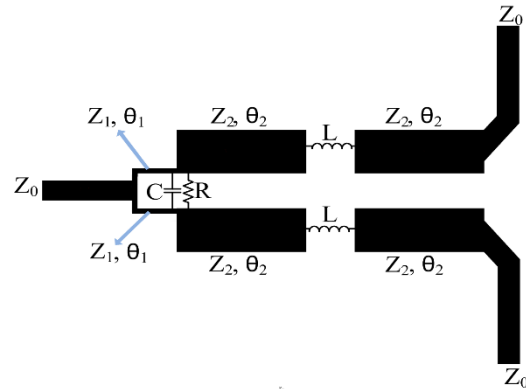
همان طور که اشاره شد مدار پیشنهادی شامل دو مقسم توان که هر کدام دارای سه دهانه در خروجی برای تقسیم توان به صورت متقارن است می‌شود. در این قسمت ابتدا یک مقسم توانی که برگرفته از تئوری ویلکینسون با سه دهانه در خروجی برای تقسیم توان است و در شکل ۷ نشان داده شده بررسی می‌شود [۸] و سپس برای کاهش اندازه از خطوط مرکب استفاده می‌کنیم.

خطوط $\lambda/4$ که در این نوع مقسم وجود دارد ابعاد مدار را افزایش می‌دهد و برای غلبه به این مشکل از خطوط مرکب که هم شامل خط مایکرواستریپ و هم عناصر پیسو می‌شود استفاده می‌کنیم. خط مایکرواستریپ و معادل آن که از دو خط با طول کمتر و یک سلف تشکیل شده در شکل ۸ نشان داده شده است.

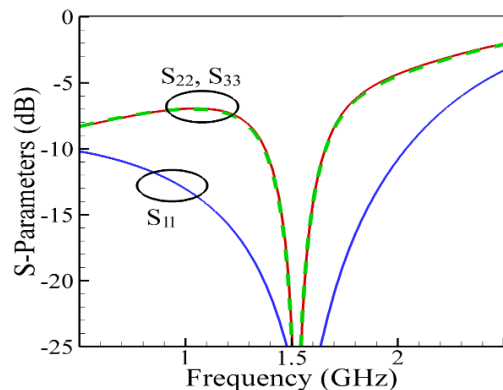
ساختار مدار پیشنهادی برای مقسم با سه خروجی در شکل ۹ نشان داده شده است. مدار از سه سلف و چهار مقاومت تشکیل شده که مقادیر آنها در جدول ۳ گزارش شده است. همچنین مقدار امپدانس مشخصه‌های شش خط مایکرواستریپ استفاده شده در مدار نیز در جدول ۴ آورده شده است.



شکل ۲: ساختار مقسم توان ویلکینسون پیشنهادی با دو خروجی.



شکل ۳: جانمایی تقسیم‌کننده توان پیشنهادی با دو خروجی.



شکل ۴: نمودار پارامترهای تلفات بازگشتی مدار شکل ۳.

جدول ۱: مقادیر امپدانس مشخصه و طول الکتریکی مدار شکل ۲.

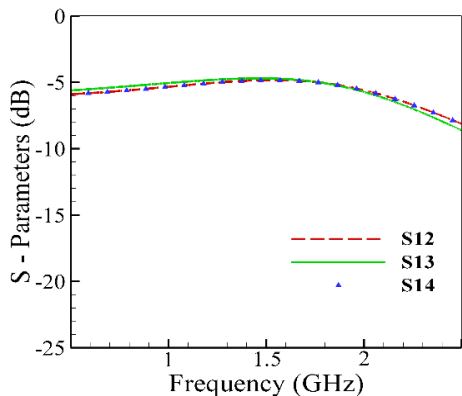
امپدانس	Z ₁ (Ω)	Z ₂ (Ω)	Z _r (Ω)	θ ₁ (°)	θ ₂ (°)
مقادیر	۵۰	۱۰۰	۲۹	۲۵٫۹	۵٫۲۲

جدول ۲: مقادیر عناصر مدار شکل ۲.

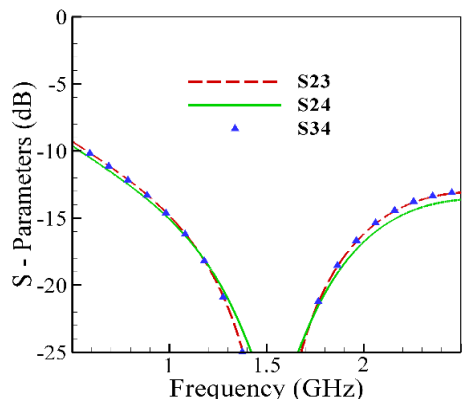
المان	L (nH)	R (Ω)	C (pF)
مقادیر	۶٫۱	۲۰۰	۳٫۶

با استفاده از (۱) تا (۵) و جایگذاری $Z_0 = 50 \Omega$ و $f = 5.1 \text{ GHz}$ مقادیر امپدانس مشخصه‌ها و عناصر طبق جدول ۱ و ۲ به دست می‌آیند. مدار پیشنهادی مقسم توان بررسی شده که برای تقسیم توان بین دو خروجی به صورت متقارن طراحی شده، توسط نرم‌افزار ADS شبیه‌سازی شده است. با توجه به شکل ۴ و ۵ دیده می‌شود که تلفات بازگشتی مدار در همه دهانه‌ها و ایزولاسیون بین دهانه‌ها خروجی، در فرکانس کاری مدار که ۱٫۵ گیگاهرتز است بهتر از ۲۵ دسی‌بل می‌باشند. شکل ۶ نشان‌دهنده تلفات عبوری مدار است که این مقدار برای این مقسم در فرکانس مرکزی ۱٫۵ گیگاهرتز برابر ۰٫۴ دسی‌بل می‌باشد

$$(S_{12} = S_{13} = -3 \text{ dB} \pm 0.4)$$



شکل ۱۲: نمودار تلفات عبوری مدار شکل ۱۰.



شکل ۱۳: نمودار ایزولاسیون بین خروجی‌های مدار شکل ۱۰.

جدول ۳: مقادیر عناصر استفاده‌شده در مدار شکل ۹.

عناصر	L_{11} (nH)	L_{12} (nH)	R_{11} (Ω)	R_{12} (Ω)
مقادیر	۶,۷۵	۸	۵۰	۱۰۰

جدول ۴: مقادیر امپدانس مشخصه و طول الکتریکی مدار شکل ۹.

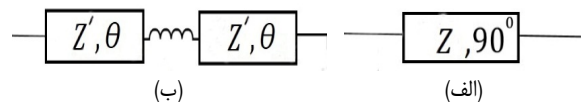
امپدانس	Z_1 (Ω)	Z_2 (Ω)	Z_3 (Ω)	θ_{11} ($^\circ$)	θ_{12} ($^\circ$)
مقادیر	۵۰	۴۸,۸	۲۵,۸	۲۷	۱۸

۳-۲ طراحی و بررسی تقسیم‌کننده توان با شش خروجی

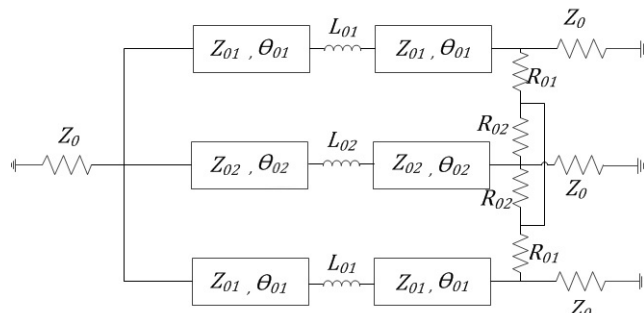
در این مقاله یک مقسم توان ویلکینسون با دو دهانه و یک مقسم ویلکینسون با سه دهانه در خروجی که هر کدام برای تقسیم توان به صورت متقارن طراحی شده ارائه گردید. در این طراحی توانسته‌ایم علاوه بر کوچک‌سازی اندازه مدار، پارامترهای پراکندگی را بر اساس آنچه توضیح داده شد نسبت به ساختار اولیه مدار بهبود ببخشیم. در این بخش به طراحی مدار اصلی که یک تقسیم‌کننده با شش دهانه در خروجی است پرداخته می‌شود. برای رسیدن به این هدف از یک مقسم توان دارای دو دهانه خروجی و دو تقسیم‌کننده با سه دهانه در خروجی که در بخش‌های قبل ارائه شد بهره گرفته شده به طوری که ساختار آن در شکل ۱۴ آمده است. با توجه به شکل می‌بینیم که مدار از عناصر خازن، مقاومت، سلف و ترکیب آن با خطوط میکرواستریپ تشکیل شده است.

۳- شبیه‌سازی و ساخت تقسیم‌کننده توان با شش خروجی

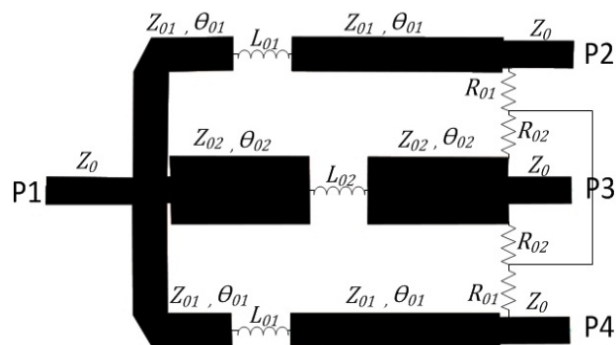
مدار پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار ADS روی زیرلایه‌ای از جنس Rogers-RO۴۰۰۳ با ضخامت ۲۰ mil و ضریب نسبی دی‌الکتریک



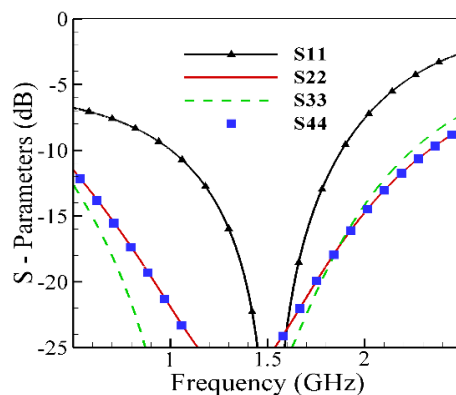
شکل ۸: (الف) خط میکرواستریپ و (ب) معادل آن.



شکل ۹: ساختار مدار پیشنهادی با سه خروجی.



شکل ۱۰: جانمایی مقسم توان سه خروجی پیشنهادی.



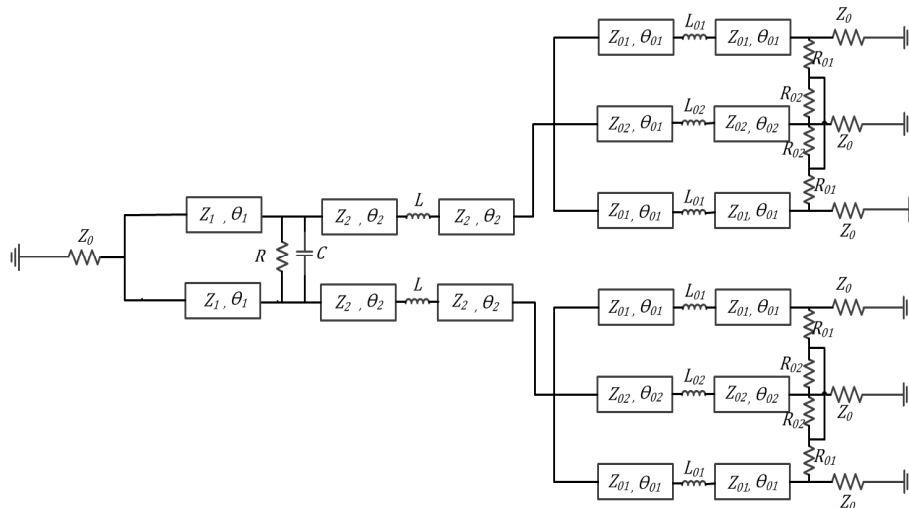
شکل ۱۱: نمودار تلفات بازگشتی مدار شکل ۱۰.

مدار طراحی‌شده را که جانمایی آن در شکل ۱۰ نشان داده شده به صورت جداگانه در نرم‌افزار ADS و با همان مشخصات در بخش ۲-۱ شبیه‌سازی شده است.

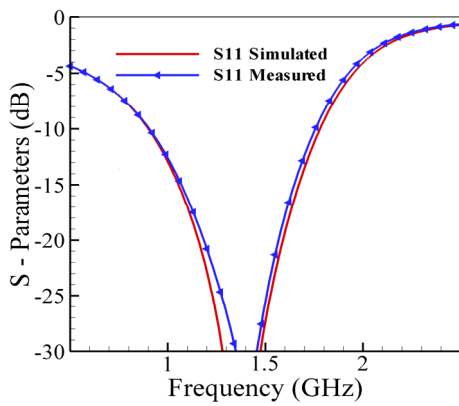
شکل ۱۱ تلفات بازگشتی مدار را نشان می‌دهد که می‌توان از آن نتیجه گرفت این پارامتر مدار در همه دهانه‌ها بهتر از ۲۵ دسی‌بل در فرکانس ۱/۵ گیگاهرتز (فرکانس کاری مدار) است.

با توجه به نتایج شبیه‌سازی، تلفات عبوری مدار که در شکل ۱۲ آمده کمتر از ۰/۱ دسی‌بل در فرکانس مرکزی مدار (۱/۵ گیگاهرتز) می‌باشد ($S_{12} = S_{13} = S_{14} = -4,77 \text{ dB} \pm 0,1$)

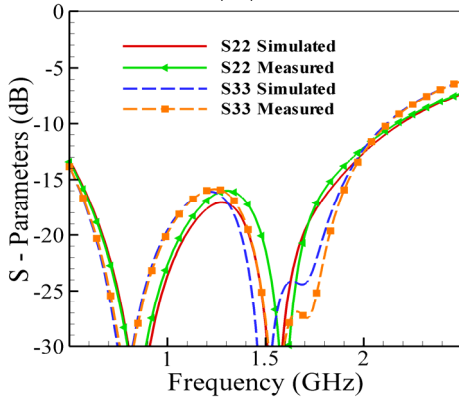
از شکل ۱۳ که ایزولاسیون دهانه‌های خروجی را نشان می‌دهد می‌توان نتیجه گرفت که این مقدار در فرکانس ۱/۵ گیگاهرتز که مدار برای کار در آن طراحی شده بهتر از ۲۵ دسی‌بل می‌باشد.



شکل ۱۴: ساختار مدار پیشنهادی با شش دهانه خروجی.

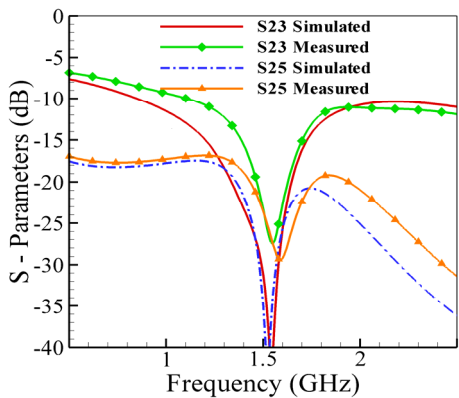


(الف)

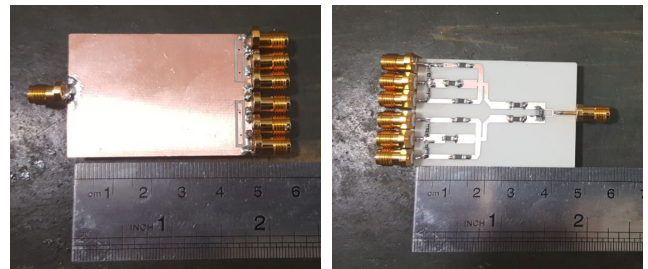


(ب)

شکل ۱۷: نمودارهای تلفات بازگشتی (الف) ورودی و (ب) خروجی.



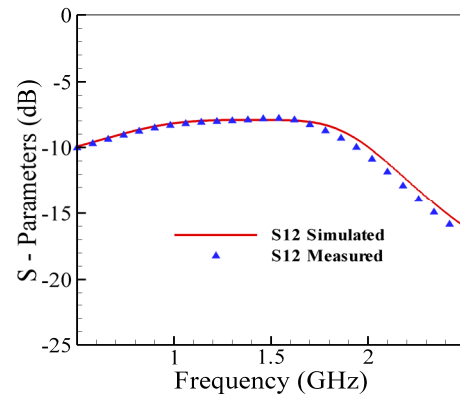
شکل ۱۸: ایزولاسیون مدار با شش خروجی.



(ب)

(الف)

شکل ۱۵: قطعه ساخته شده (الف) بالای مدار و (ب) پشت مدار.



شکل ۱۶: تلفات عبوری مدار با شش خروجی.

۳/۳۸ در فرکانس کاری ۱/۵ گیگاهرتز شبیه‌سازی شده است. شکل ۱۵ تصویر قطعه ساخته شده را نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده در شکل‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸ نشان داده شده است. ابعاد مدار $32 \text{ mm} \times 36.5 \text{ mm}$ یا $0.30 \lambda_g \times 0.26 \lambda_g$ (طول موج الکتریکی در فرکانس ۱/۵ گیگاهرتز است) به دست می‌آید.

با توجه به نمودار شکل ۱۶ و مقادیر اندازه‌گیری شده می‌توان نتیجه گرفت که تلفات عبوری مدار کمتر از ۰/۴ است

$$(S_{12} = S_{13} = S_{14} = S_{15} = S_{16} = S_{17} = -7.78 \text{ dB} \pm 0.4)$$

با توجه به شکل ۱۷ که نشان‌دهنده تلفات بازگشتی مدار است می‌توان نتیجه گرفت که این پارامتر مدار دارای مقادیری بهتر از ۳۰ دسی‌بل در فرکانس کاری ۱/۵ گیگاهرتز است

$$(S_{22} = S_{23} \text{ and } S_{24} = S_{25} = S_{26} = S_{27})$$

جدول ۵: مقایسه عملکرد مدار پیشنهادی.

پارامترها مراجع	تعداد پورت خروجی	اندازه مدار	عناصر فشرده	ایزولاسیون	پهنای باند نسبی (تلفات بازگشتی نسبی < ۱۵ dB)
[۴]	۳	$0.23 \lambda g \times 0.38 \lambda g$	R, C	۱۵ dB >	-
[۹]	۴	$0.66 \lambda g \times 0.60 \lambda g$	R, C	۲۵ dB >	٪۱۳
[۱۰]	۴	$0.54 \lambda g \times 0.45 \lambda g$	R, L, C	۱۵ dB >	٪۴۲، ٪۱۴
[۱۱]	۲	$1.06 \lambda g \times 0.29 \lambda g$	R, L, C	۱۳ dB >	٪۴۶، ٪۱۴
مدار طراحی شده	۶	$0.25 \lambda g \times 0.30 \lambda g$	R, L, C	۳۰ dB >	٪۴۰

- [2] G. Zhang, J. Wang, L. Zhu, and W. Wu, "Dual-band filtering power divider with high selectivity and good isolation," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 26, no. 10, pp. 774-776, Oct. 2016.
- [3] T. Zhang, X. Wang, and W. Che, "A varactor based frequency-tunable power divider with unequal power dividing ratio," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 26, no. 8, pp. 589-591, Aug. 2016.
- [4] W. Choe and J. Jeong, "N-way unequal wilkinson power divider with physical output port separation," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 26, no. 4, pp. 243-245, Apr. 2016.
- [5] Y. Wu and Y. Liu, "Compact 3-11 GHz UWB planar unequal power divider using two-section asymmetric coupled transmission lines and non-uniform microstrip," *Electronics Letters*, vol. 49, no. 16, pp. 1002-1003, 1 Aug. 2013.
- [6] W. C. Ip and K. K. M. Cheng, "A novel unequal power divider design with dual-harmonic rejection and simple structure," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 21, no. 4, pp. 182-184, Apr. 2011.
- [7] Z. X. Du, et al., "Unequal wilkinson power divider with reduced arm length for size miniaturization," *IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 6, no. 2, pp. 282-289, Feb. 2016.
- [8] D. Maurin and K. Wu, "A compact 1.7-2.1 GHz three-way power combiner using microstrip technology with better than 93.8% combining efficiency," *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 6, no. 2, p. 106, Feb. 1996.
- [9] T. Zhang and W. Che, "A four-way compact unequal power divider with arbitrary power ratio," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Computational Electromagnetics, ICCEM'16*, pp. 124-126, Guangzhou, China, 23-25 Feb. 2016.
- [10] T. Zhang, W. Che, H. Chen, and W. Feng, "A compact four-way dual-band power divider using lumped elements," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 25, no. 2, pp. 94-96, Feb. 2015.
- [11] N. Gao, G. Wu, and Q. Tang, "Design of a novel compact dual-band wilkinson power divider with wide frequency ratio," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 24, no. 2, pp. 81-83, Feb. 2014.

مسعود حیدری تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق-الکترونیک در سال‌های ۱۳۹۴ و ۱۳۹۶ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه به پایان رسانده است. از سال ۱۳۹۶ عضو باشگاه پژوهشگران جوان می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: طراحی مدارات آنالوگ و کاربردهای آن، طراحی مدارات فعال و غیر فعال در فرکانس‌های 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 نمود و از همان سال عضو بنیاد ملی نخبگان می‌باشد. از سال ۱۳۹۰ نام‌برده به عنوان عضو هیأت علمی گروه برق در دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه مشغول به کار است. ایشان از سال ۱۳۹۷ رئیس دانشکده فنی مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: طراحی مدارات آنالوگ و کاربردهای آن، طراحی مدارات فعال و غیر فعال در فرکانس‌های باند رادیویی.

ایزولاسیون بین دهانه‌های خروجی مدار در شکل ۱۸ نشان داده شده که با توجه به آن می‌توان نتیجه گرفت که ایزولاسیون مدار در فرکانس ۱/۵ گیگاهرتز که مدار برای آن طراحی شده است کمتر از ۳۰ دسی‌بل می‌باشد

$$(S_{r0} = S_{rf} = S_{rv} \text{ and } S_{rr} = S_{rf} = S_{rf} = S_{r0} = S_{rf} = S_{rv} = S_{r0} = S_{rf} = S_{rv} = S_{rf} = S_{rv})$$

می‌توان برای مدار طراحی شده با توجه به (۶)، پهنای باند نسبی را با در نظر گرفتن سطح تضعیف کمتر از ۱۵ دسی‌بل برای تلفات بازگشتی حدود ۴۰ درصد محاسبه کرد

$$\text{پهنای باند نسبی} = \frac{f_r - f}{0.5(f_r + f_1)} \quad (6)$$

در جدول ۵ عملکرد مدار پیشنهادی با برخی از مدارهای گزارش شده مقایسه گردیده است.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله یک مقسم توان ویلکینسون متقارن با ابعاد فشرده و ایزولاسیون بالا جهت کاربرد در باند فرکانسی L طراحی، شبیه‌سازی و ساخته شده است. این مدار می‌تواند توان ورودی را به صورت مساوی بین خروجی‌ها تقسیم کند. مدار پیشنهادی از یک مقسم دو خروجی متقارن ویلکینسون که با استفاده از عناصر خازن و مقاومت (که به صورت موازی استفاده شده) و همچنین خطوط مرکب که شامل خطوط میکرواستریپ و عنصر سلف می‌شود تشکیل شده که این روش ابعاد مدار را نسبت به مقسم توان معمولی کاهش داده است. مدار نهایی نیز شامل دو مقسم توان با سه خروجی است که در طراحی آن از خطوط مرکب و عنصر سلف و مقاومت بهره گرفته شده است. در این مدار نیز با قراردادن سلف بین خطوط میکرواستریپ ابعاد و طول الکتریکی خطوط کاهش پیدا کرده و همچنین از چهار مقاومت برای ایزولاسیون بین خروجی‌ها استفاده شده است. هر تحلیل هر یک از قسمت‌های مدار به صورت جداگانه و نتایج شبیه‌سازی آنها در این مقاله قرار گرفت است. اندازه و طول الکتریکی خطوط مدار ارائه شده که دارای شش مسیر خروجی است نسبت به دیگر مقسم توان که دارای خروجی‌های با تعداد بالا هستند کاهش یافته است. نتایج شبیه‌سازی و ساخت مدار در فرکانس مرکزی ۱/۵ گیگاهرتز نشان‌دهنده ایزولاسیون و تلفات بازگشتی بهتر از ۳۰ dB و تلفات عبوری کمتر از ۰.۴ dB است و پهنای باند نسبی مدار برای تلفات بازگشتی با در نظر گرفتن سطح تضعیف بیشتر از ۱۵ dB، ۴۰٪ می‌باشد.

مراجع

- [1] E. J. Wilkinson, "An N-way hybrid power divider," *IRE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. 8, no. 1, pp. 116-118, Jan. 1960.