

Vol. 12/ No. 47/Spring 2023

Research Article

Broadband H-Plan SIW Power Divider with Adjustable Output Powers

Pejman Mohammadi, Associate Professor^{1*} 

¹Microwave and antenna research center, Urmia Branch, Islamic Azad University, Urmia, Iran, p.mohammadi@iaurmia.ac.ir

Correspondence

Pejman Mohammadi, Associate Professor of Microwave and antenna research center, Urmia Branch, Islamic Azad University, Urmia, Iran, p.mohammadi@iaurmia.ac.ir

Received: 14 December 2022

Revised: 30 December 2022

Accepted: 14 January 2022

Abstract

Design and realization of a broadband H-plane Substrate Integrated Waveguide (SIW) power divider with equal and unequal output powers is presented. The configuration of the proposed structure is based on the three equal width SIW lines. In proposed SIW power divider septum has been realized with a row of metalized vias. The inclusive input bandwidth in the proposed structures is achieved due to the proper septum design. The output powers are controlled with the septum offset. The parametric analysis shows that the magnitude of outputs could be adjusted with septum offset and the width of SIW could control the cutoff frequency. Power flow from input port toward output port confirm the proposed design concept. Two SIW H-plane power dividers with the same and different outputs have been designed and produced. There are good agreements between simulation and measurement results for both structures. The input impedance bandwidth for equal and unequal prototypes is 3.4 GHz and 2 GHz respectively.

Keywords: Power Divider, SIW, Adjustable Outputs, Broadband

Highlights

- Adjustable output powers
- Broad impedance bandwidth
- Straight forward design of SIW power divider

Citation: P. Mohammadi, "Broadband H-Plan SIW Power Divider with Adjustable Output Powers," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 12, no. 47, pp. 53–60, 2023, doi: 10.30495/jce.2023.1975061.1180, (in Persian).

مقسم توان موجبر مجتمع شده در زیر لایه با پهنای باند وسیع در صفحه H با قابلیت کنترل توان‌های خروجی

پژمان محمدی*^۱ ID

چکیده:

طراحی و ساخت یک مقسم توان با استفاده از تکنولوژی موجبر مجتمع شده در زیر لایه با قابلیت کنترل توان‌های خروجی ارائه شده است. طراحی بر اساس مقسم توان موجبری در صفحه H انجام شده است که در آن از موجبر مجتمع شده در زیر لایه به جای موجبر مستطیلی استفاده می‌شود. در نتیجه مقسم توان ساخته شده دارای ابعاد کوچک و قیمت ارزان و همچنین سازگار با ساختارهای مسطح ماکروویوی است. کنترل توان‌های خروجی با استفاده از جداکننده صورت می‌گیرد. در موجبر مجتمع شده در زیر لایه قسمت جداکننده توسط مجموعه‌ای از سوراخ‌های متالیزه شده ساخته شده است. تغییر موقعیت جداکننده موجب تغییر انتقال توان به خروجی‌ها می‌شود. تطبیق امپدانس و تطبیق مد انتشار بین موجبر مجتمع شده در زیر لایه و خطوط مایکرواستریپ ورودی و خروجی توسط قسمت انتقالی صورت می‌گیرد. دو مقسم توان یکی با خروجی‌های یکسان و دیگری با خروجی‌های متفاوت بر اساس نتایج شبیه‌سازی ساخته شدند. نتایج اندازه‌گیری طراحی‌های انجام شده را تأیید می‌کنند. پهنای باند امپدانس هر دو مقسم توان ساخته شده وسیع است؛ و تفاوت توان‌های خروجی در پهنای باند وسیعی دیده می‌شود. بر اساس نتایج اندازه‌گیری پهنای باند مقسم‌های توان با خروجی‌های یکسان و متفاوت به ترتیب ۳/۴ گیگاهرتز و ۲ گیگاهرتز است. علاوه بر این تحلیل پارامتری مقسم توان جهت تعیین اثر ابعاد مختلف آن روی مشخصات الکتریکی انجام شده است.

کلید واژه‌ها: مقسم توان، موجبر مجتمع شده در زیر لایه، کنترل توان خروجی، پهنای باند وسیع

^۱ مرکز تحقیقات مایکروویو و آنتن، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران، p.mohammadi@iaurmia.ac.ir

نویسنده مسئول

*پژمان محمدی، دانشیار، مرکز تحقیقات مایکروویو و آنتن، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران، p.mohammadi@iaurmia.ac.ir

تاریخ دریافت: ۲۳ آذر ۱۴۰۱

تاریخ بازنگری: ۹ دی ۱۴۰۱

تاریخ پذیرش: ۲۴ دی ۱۴۰۱

<https://doi.org/10.30495/jce.2023.1975061.1180>

۱-مقدمه

موجبرهای مجتمع شده در زیر لایه^۱ یک تکنولوژی مسطح ارزان قیمت با تلفات کم هستند. برای ساخت موجبرهای مجتمع شده در زیر لایه از دو ردیف سوراخ متالیزه شده بر روی فیبر مدار چاپی استفاده می‌شود. این دو ردیف سوراخ‌های متالیزه شده به همراه صفحات فلزی مدار چاپی در واقع یک خط انتقال را تشکیل می‌دهند. بنابراین مشخصات مربوط به انتشار امواج در موجبرهای مجتمع شده در زیر لایه شبیه موجبر مستطیلی پر شده با دی‌الکتریک است [۱،۲].

^۱ Substrate Integrated Waveguide (SIW)

با در نظر گرفتن نسبت عرض مدار طراحی شده به ضخامت فیبر مدار چاپی موج‌برهای مجتمع شده در زیر لایه را می‌توان معادل موج‌بر مستطیلی در نظر گرفت. مد انتشار اصلی در موج‌برهای مجتمع شده در زیر لایه مد شبیه TE₁₀ است [۳]. شباهت مد انتشار امواج و مزایای موج‌برهای مجتمع شده در زیر لایه در مقایسه با موج‌برهای مستطیلی منجر به طراحی و ساخت قطعات ماکروویو با ساختارهای متفاوت زیادی شده است. مقسم‌های توان موج‌بری با وجود کاربرهای فراوان اندازه بزرگی دارند و به‌منظور کاهش تلفات اهمی و عمق پوستی، قسمت داخلی آن‌ها را با طلا یا نقره می‌پوشانند که منجر به افزایش قیمت آن‌ها می‌شود [۴]. علاوه بر این موج‌برها با قطعات مسطح قابلیت یکپارچه شدن را ندارند و برای اتصال به قطعات مسطح از قسمت‌های واسط جهت تطبیق امپدانسی استفاده می‌شود. موج‌برهای مجتمع شده در زیر لایه مشخصات الکتریکی موج‌برهای فلزی را دارند. علاوه بر این ابعاد آن‌ها کوچک بوده و هزینه ساخت آن‌ها در مقایسه با موج‌برهای فلزی کم است. آنتن‌ها و مقسم‌های توان دیپلکسرها و شیفت دهنده‌های فاز با تکنولوژی موج‌برهای مجتمع شده در زیر لایه نمونه‌هایی از مدارهای ساخته شده‌اند [۵-۱۲]. در مرجع [۱۳]، یک مقسم توان با تکنولوژی موج‌بر مجتمع شده با ابعاد کوچک و توان‌های خروجی یکسان و توان خروجی متفاوت و در مرجع [۱۴] یک مقسم توان ۸ راهه با تلفات کم ارائه شده است که در هر دو مورد پهنای باند امپدانسی کم بوده و مدار عملکرد به‌صورت باند باریک است. همچنین فرمول‌های تجربی در مورد طراحی مقسم توان با تکنولوژی موج‌بر مجتمع شده ارائه شده است [۱۵]. یک مقسم توان با تکنولوژی موج‌بر مجتمع شده و تشدیدکننده مثلی در نشان داده شده است که ساختار طراحی آن پیچیده است [۱۶]. با توجه به نیاز سیستم‌های مخابراتی جدید مقسم‌های توان با پهنای باند وسیع و ابعاد کوچک مورد توجه هستند [۱۷]. در مقسم توان با تکنولوژی موج‌بر مجتمع شده با ابعاد کوچک از تشدیدکننده مکمل حلقه شکسته^۱ جهت تنظیم توان خروجی استفاده می‌شود [۱۸]. ولی پاسخ فرکانسی آن باند باریک است و در مرجع [۱۹]، مقسم توان فقط توان‌های خروجی یکسان قابل دسترسی است. مقسم‌های توان با تکنولوژی موج‌بر مجتمع شده خاصیت فیلترینگ نیز دارند ولی پهنای باند آن‌ها کوچک است [۲۰، ۲۱]. همچنین مقسم توان‌هایی با تکنولوژی موج‌بر مجتمع شده با تعداد زیاد خروجی گزارش شده‌اند که ساختار پیچیده‌ای دارند [۲۲]. در این مقاله مقسم‌های توان به‌صورت مدار مجتمع شده در زیر لایه در صفحه H با خروجی‌های قابل کنترل طراحی و آزمایش شده‌اند. میزان توان خروجی در هر دهانه مقسم توان توسط یک جداکننده کنترل می‌شود. جداکننده توسط تعدادی از سوراخ‌های متالیزه شده ساخته می‌شود. نوآوری مقسم توان طراحی شده به‌صورت خلاصه به شرح زیر است.

- امکان کنترل توان‌های خروجی مقسم توان
- پهنای باند امپدانسی وسیع
- طراحی ساده موج‌بر مجتمع شده در زیر لایه و مقسم توان پیشنهادی

این مقاله به‌صورت زیر تنظیم شده است. در قسمت ۲ مراحل طراحی و شبیه‌سازی موج‌بر مجتمع شده در زیر لایه و مقسم توان پیشنهادی به همراه آنالیز پارامتری بیان خواهد شد. در قسمت ۳ نتایج عملی مربوط به آزمایش مقسم‌های مجتمع شده در زیر لایه با توان‌های خروجی‌های یکسان و متفاوت ارائه می‌گردد؛ و قسمت ۴ نتایج حاصله و مزایای ساختارهای پیشنهادی بررسی خواهند شد.

۲- طراحی و شبیه‌سازی موج‌بر مجتمع شده در زیر لایه و مقسم توان پیشنهادی

در حالت کلی تکنولوژی موج‌بر مجتمع شده شامل دو ردیف از سوراخ‌های متالیزه شده است که روی فیبر مدار چاپی قرار دارند. در این مقاله موج‌بر مجتمع شده مورد استفاده در باند X طراحی شده است. مقسم توان مورد نظر نیز شامل سه خط انتقال با تکنولوژی موج‌بر مجتمع شده است که به‌صورت حرف T انگلیسی به هم متصل شده‌اند. زیر لایه مورد استفاده RO۴۰۰۳ با تانژانت تلفات برابر ۰/۰۲۷، ضریب دی الکتریک برابر ۳/۵ و ضخامت ۰/۵۰۸ میلی‌متر است. مد اصلی انتشار در موج‌بر مجتمع شده مد TE₁₀ است که در آن فرکانس قطع و عرض موج‌بر مجتمع شده از روابط زیر محاسبه می‌گردد،

$$f_{10} = \frac{1}{2W\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (1)$$

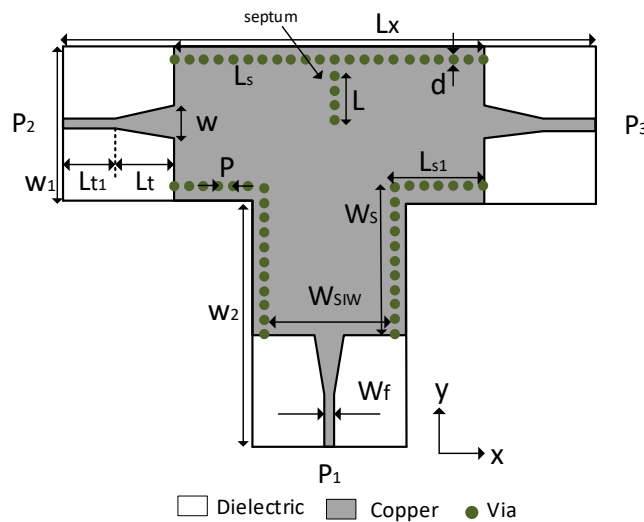
¹ Complementary Splir Ring Resonator

$$W_{SIW} = W + \frac{d^2}{0.95p} \quad (2)$$

در روابط فوق W عرض موجبر فلزی معادل، P فاصله بین سوراخ‌های متوالی و d قطر سوراخ‌های فلزی است. مقادیر P و d جهت به حداقل رساندن تلفات تشعشعی و افت بازگشتی تنظیم می‌شوند. برای حصول این شرایط روابط زیر باید در مراحل طراحی موجبر مجتمع شده در نظر گرفته شود.

$$\begin{cases} d < 0.2\lambda_{gSIW} \\ \frac{d}{p} \geq 0.5 \\ d/W_{SIW} > 0.4 \end{cases} \quad (3)$$

در رابطه ۳، λ_{gSIW} طول موج هدایت مربوط به موجبر مجتمع شده است. مقادیر فوق برای مقسم توان پیشنهادی در قسمت بعدی داده شده‌اند. مقسم توان پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده است. P_1 دهانه ورودی مقسم توان، P_2 و P_3 دهانه‌های خروجی هستند. دهانه‌های ورودی و خروجی به صورت خطوط مایکرواستریپ ۵۰ اهمی هستند ولی امپدانس ورودی موجبر مجتمع شده با آن‌ها متفاوت است علاوه بر این مد انتشار خطوط مایکرواستریپ از نوع شبه TEM است که با مد انتشار موجبر مجتمع شده که TE_{10} است متفاوت است؛ بنابراین جهت تطبیق امپدانسی و تطبیق مد انتشاری از قسمت انتقالی با عرض W و طول L_t مطابق شکل ۱ استفاده شده است. ابعاد مقسم توان شکل ۱ در جدول ۱ داده شده‌اند.



شکل ۱: مقسم توان به صورت مجتمع شده در زیر لایه

Figure 1. The proposed SIW power divider.

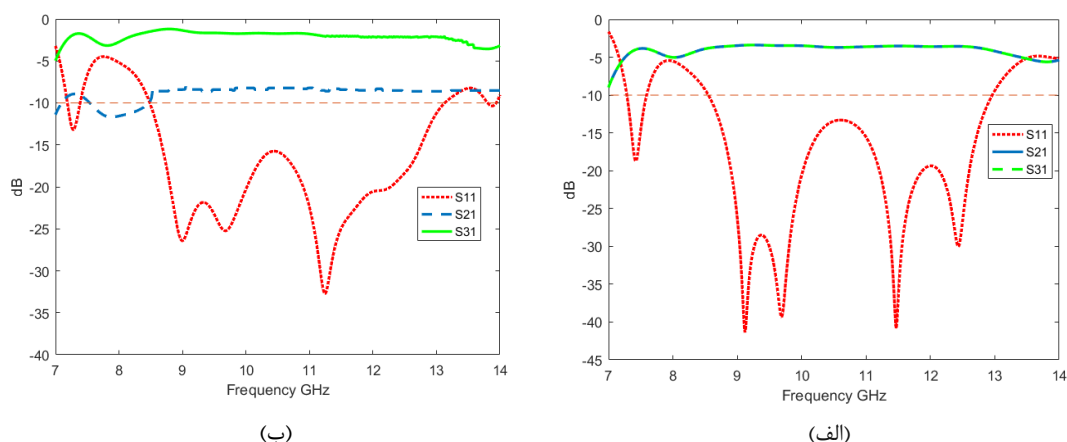
جدول ۱: ابعاد مقسم توان پیشنهادی (میلی‌متر)

Table 1. Proposed SIW power divider dimensions

W	L_t	W_f	W_{SIW}	P	d	L
۳	۵/۷۵	۱/۱	۱۱	۱/۵	۱	۵
W_1	W_2	W_s	L_x	L_s	L_{s1}	L_{t1}
۱۵	۲۳/۷۵	۲۰	۵۱/۵	۳۱	۱۰	۵

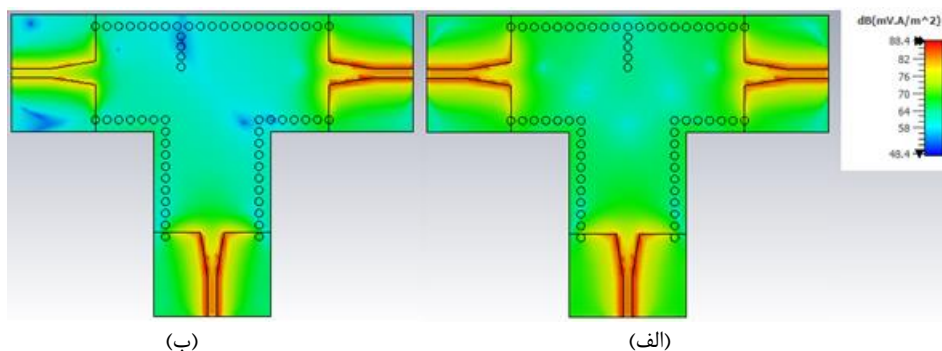
در این مقسم توان از جداکننده جهت کنترل توان به دهانه‌های خروجی استفاده می‌شود به این صورت که قرار گرفتن جداکننده به صورت متقارن نسبت به محور x باعث انتقال توان برابر به خروجی‌ها می‌شود و انحراف آن از خط تقارن باعث انتقال توان متفاوت به خروجی‌ها می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی مربوط به مقسم توان در نرم‌افزار CST در شکل ۲ نشان داده شده است. در شکل ۲ الف، نتایج شبیه‌سازی مربوط به مقسم توان با خروجی‌های یکسان است که در آن جداکننده در وسط مدار به صورت

متقارن قرار گرفته است. توان‌های خروجی S_{21} و S_{31} با هم برابر هستند ولی در شکل ۲ ب، جداکننده نسبت به خط تقارن فاصله $\Delta s=2$ میلی‌متر را دارد که در نتیجه توان‌های خروجی با هم متفاوت هستند. در هر دو نوع مقسم توان پهنای باند وسیع مشاهده می‌شود.



شکل ۲: پارامترهای پراکندگی مربوط به شبیه‌سازی مقسم توان با، الف) خروجی‌های یکسان، ب) خروجی‌های متفاوت
Figure 2. Simulation results of the proposed SIW power divider (a) equal outputs (b) different outputs

یکی از فاکتورهای مهم در مقسم‌های توان نحوه توزیع توان در دهانه‌های خروجی آن است. نمودارهای توزیع توان برای مقسم توان پیشنهادی در شکل ۳، نشان داده شده است. در شکل ۳ الف، که در آن انحراف از حالت تقارن جداکننده^۱ برابر صفر است توان توزیع شده در دهانه‌های ۲ و ۳ یکسان است. در شکل ۳ ب، با افزایش انحراف از حالت تقارن به ۴ میلی‌متر توان ارسالی به دهانه ۲ کاهش و توان ارسالی به دهانه ۳ افزایش می‌یابد.



شکل ۳: توزیع توان در مقسم توان پیشنهادی، الف) Offset=۲mm، ب) Offset=0mm
Figure 3. Power flow for proposed SIW power divider (a) equal output (b) offset(2mm)

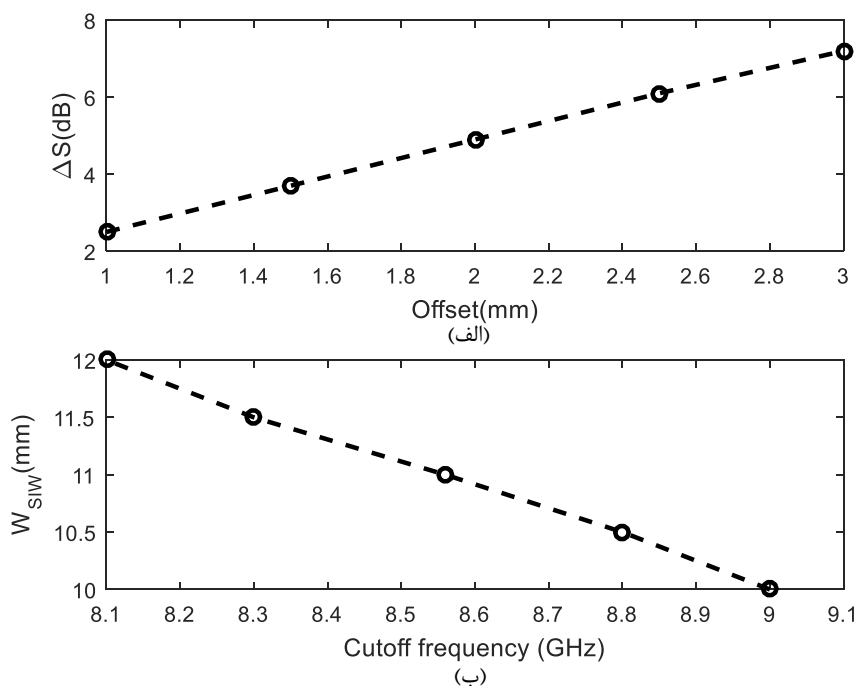
۲-۱- آنالیز پارامتری مقسم توان

در این قسمت پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد مقسم توان پیشنهادی بررسی می‌شود. یکی از مزایای این مقسم توان امکان کنترل توان‌های خروجی به وسیله جداکننده است. به منظور بررسی این مشخصه شبیه‌سازی مقسم توان برای مقادیر مختلف انحراف از حالت تقارن جداکننده صورت گرفت. اختلاف بین دامنه سیگنال‌های خروجی $\Delta S(\text{dB})=S_{31}-S_{21}$ در فرکانس ۱۰ گیگاهرتز در نمودار شکل ۴ الف، بر اساس نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده است.

بر اساس این شکل با افزایش تقارن جداکننده مقدار تفاوت دامنه سیگنال‌های خروجی افزایش می‌یابد. لازم به توضیح است که تغییر میزان تقارن جداکننده تأثیر قابل توجهی در فرکانس قطع مقسم توان پیشنهادی و پهنای باند آن ندارد. عرض موج بر

^۱ Offset

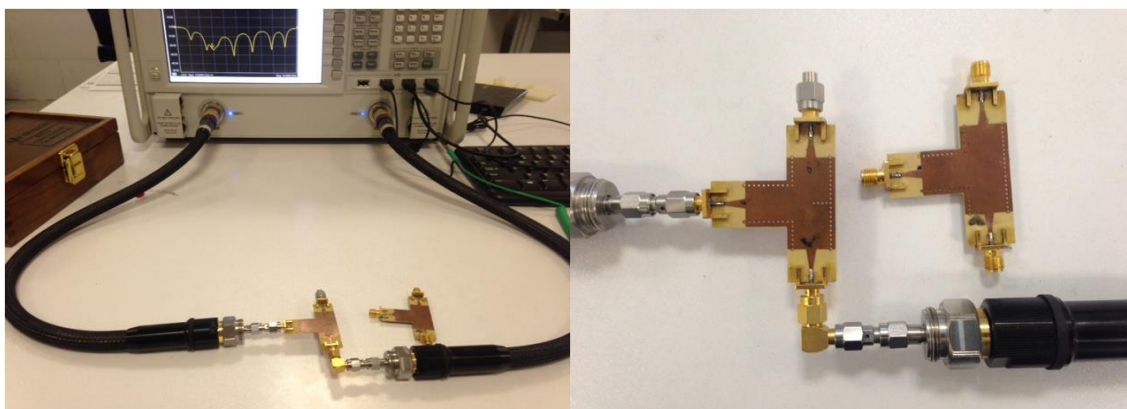
مجتمع شده در زیر لایه W_{SIW} پارامتر مهم دیگری است که تغییر آن باعث تغییر در فرکانس قطع می‌شود. در مقسم توان پیشنهادی فرکانس کار مدار بزرگ‌تر از فرکانس قطع است. ارتباط فرکانس قطع با W_{SIW} در شکل ۴ ب، بر اساس نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده است که در آن با افزایش W_{SIW} فرکانس قطع کاهش می‌یابد.



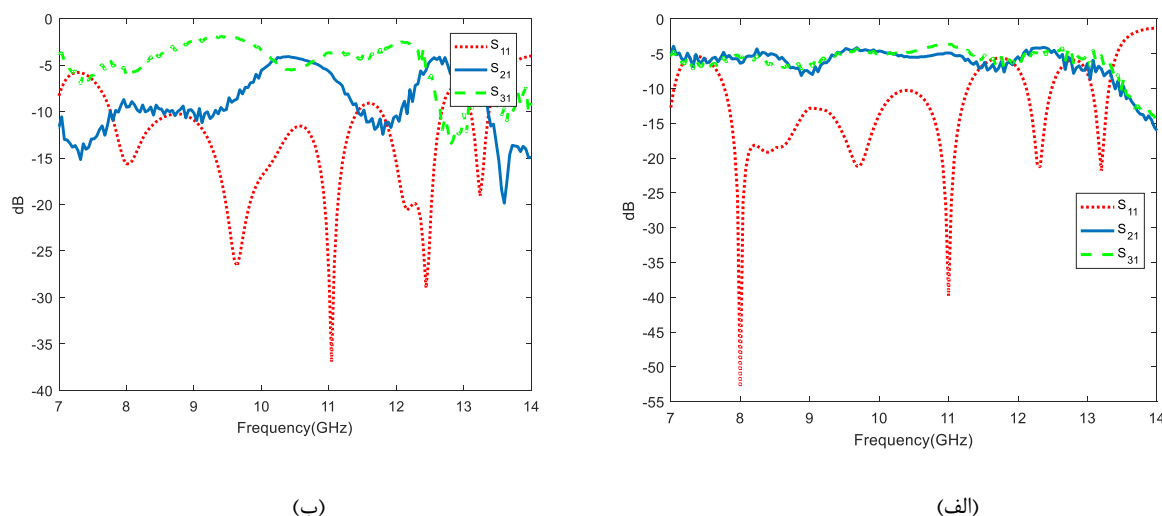
شکل ۴: الف) تفاوت توان‌های خروجی با تغییرات جداکننده، ب) تغییرات فرکانس قطع با عرض مقسم توان
Figure 4. (a) Output power difference with respect to septum offset (b) cutoff frequency variation with SIW width

۳- نمونه‌های ساخته شده و نتایج اندازه‌گیری

نمونه‌های مقسم توان با خروجی‌های یکسان و متفاوت ساخته شده و در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. پارامترهای پراکندگی با دستگاه آنالیزور شبکه مدل N5242A PNA-X اندازه‌گیری شده‌اند. برای مقسم توان با خروجی‌های متفاوت با انحراف از حالت تقارن جداکننده برابر ۲ میلی‌متر نتایج اندازه‌گیری در شکل ۶ نشان داده شده است. در مورد مقسم توان با خروجی‌های یکسان شکل ۶ الف، پهنای باند امپدانس وسیع حدود ۳/۴ گیگاهرتز مشاهده می‌شود که با نتایج شبیه‌سازی سازگار است. در مورد مقسم توان با خروجی متفاوت شکل ۶ ب، اندکی تفاوت در نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری وجود دارد ضمناً جابجایی فرکانسی در نتایج اندازه‌گیری نسبت به شبیه‌سازی مربوط به ثابت دی‌الکتریک و خطای اندازه‌گیری است.



شکل ۵: مقسم‌های توان ساخته شده با خروجی‌های یکسان و خروجی‌های متفاوت
Figure 5. Prototypes of fabricated SIW power dividers with equal and unequal output



شکل ۶: نتایج اندازه‌گیری مقسم‌های توان پیشنهادی، (الف) توان‌های خروجی یکسان، (ب) توان‌های خروجی متفاوت
 Figure 6. Measurement results for SIW power divider (a) equal outputs (b) different outputs

عملکرد ساختار پیشنهادی با ساختارهای مشابه در جدول شماره ۲ مقایسه شده است. نتایج مقایسه نشان می‌دهد که پهنای باند ساختار پیشنهادی از ساختارهای مشابه بهتر است.

جدول ۲: مقایسه ساختار پیشنهادی با ساختارهای مشابه

Table 2. Comparison of proposed structure with similar structures

مرجع	فرکانس کار (GHz)	تکنولوژی مورد استفاده	پهنای باند امپدانسی* (FBW)
[۲۰]	۲۷/۲	موج‌بر مجتمع شده در زیر لایه	۱/۸
[۲۱]	۲۸	موج‌بر مجتمع شده در زیر لایه	۵
[۲۲]	۷/۲	موج‌بر مجتمع شده در زیر لایه	۲۵
این مقاله	۹/۵	موج‌بر مجتمع شده در زیر لایه	۳۱/۶

*Fractional Bandwidth

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله طرح جدیدی از مقسم توان با تکنولوژی موج‌بر مجتمع شده در زیر لایه که در آن توان‌های خروجی قابل کنترل هستند ارائه شد. مراحل طراحی نسبتاً ساده بوده و با تکنولوژی ارزان قیمت فیبر مدار چاپی به راحتی قابل ساخت است. پهنای باند امپدانسی وسیع از مزایای قابل توجه قطعه پیشنهادی است. نتایج اندازه‌گیری نمونه‌های ساخته شده با نتایج شبیه‌سازی الکترومغناطیسی تطابق خوبی دارند. نتایج اندازه‌گیری پارامترهای پراکندگی S_{11} پهنای باند امپدانسی ۳/۴ گیگاهرتز و ۲ گیگاهرتز را برای ساختارهای با خروجی یکسان و متفاوت را نشان می‌دهد. همچنین در نتایج اندازه‌گیری پارامترهای پراکندگی S_{21} و S_{31} دو نمونه ساخته شده توان‌های خروجی یکسان و توان‌های خروجی با تفاوت حدود ۵ dB حاصل شد. ایده پیشنهاد شده در این طرح می‌تواند برای طراحی مقسم‌های توان با تعداد بیشتر دهانه‌های خروجی مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع

- [1] D. Deslandes and K. Wu, "Integrated microstrip and rectangular waveguide in planar form," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 11, no. 2, pp. 68–70, Feb. 2001, doi: 10.1109/7260.914305.
- [2] D. Deslandes and K. Wu, "Accurate modeling, wave mechanisms, and design considerations of a substrate integrated waveguide," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 54, no. 6, pp. 2516–2526, Jun. 2006, doi: 10.1109/TMTT.2006.875807.
- [3] Y. Cassivi, L. Perregrini, P. Arcioni, M. Bressan, K. Wu, and G. Conciauro, "Dispersion characteristics of substrate integrated rectangular waveguide," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 12, no. 9, pp. 333–335, Sep. 2002, doi: 10.1109/LMWC.2002.803188.
- [4] S. A. Banihashem, P. Mohammadi, and Y. Zehforoosh, "Magnetic-electric dipole antenna with circular polarization feature and directional pattern with improved bandwidth," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 12, no. 46, 2022, doi: 10.30495/jce.2022.1962047.1164, (in Persian).
- [5] F. Heidari, Z. Adelpoure and N. Parhizgar, "Simulation of Leaky Wave Antenna with Cosecant Squared Pattern Using Genetic Algorithm," *Journal of Communication Engineering*, Vol. 11 no. 42, pp. 69-76, 2021, (in Persian).
- [6] P. Mohammadi and S. Demir, "Two layers substrate integrated waveguide power divider," in *URSI General Assembly and Scientific Symposium*, Istanbul, Turkey, 2011, pp. 1-4, doi: 10.1109/URSIGASS.2011.6050563.
- [7] A. A. Khan and M. K. Mandal, "Miniaturized Substrate Integrated Waveguide (SIW) Power Dividers," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 26, no. 11, pp. 888-890, Nov. 2016, doi: 10.1109/LMWC.2016.2615005.
- [8] P. Mohammadi and A. S. Demir, "Multi-layer substrate integrated wave-guide E-plane power divider," *Progress in Electromagnetics Research C*, vol. 30, pp. 159-172, 2012, doi: 10.2528/PIERC12042905.
- [9] A. Piroutiniya and P. Mohammadi, "The Substrate Integrated Waveguide T-junction Power Divider with Arbitrary Power Dividing Ratio," *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, vol.31, no. 4, 2016.
- [10] R. V. Gatti and R. Rossi, "Hermetic Broadband 3-dB Power Divider/Combiner in Substrate-Integrated Waveguide (SIW) Technology," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 66, no. 6, pp. 3048-3054, June 2018, doi: 10.1109/TMTT.2018.2825347.
- [11] P. Mohammadi and R. Gheibi, "A new design of substrate integrated waveguide diplexer using complementary split ring resonators," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 29, no. 8, pp. 1-5, 2019, doi: 10.1002/mmce.21772.
- [12] M. K. Eslamloo and P. Mohammadi, "Compact size, equal-length and unequal-width substrate integrated waveguide phase shifter," *International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, 2016, pp. 373-376, doi: 10.1109/ICACT.2016.7423398.
- [13] A. A. Khan and M. K. Mandal, "Miniaturized Substrate Integrated Waveguide (SIW) Power Dividers," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 26, no. 11, pp. 888-890, Nov. 2016, doi: 10.1109/LMWC.2016.2615005.
- [14] K. Song, Y. Fan and Y. Zhang, "Eight-Way Substrate Integrated Waveguide Power Divider With Low Insertion Loss," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 56, no. 6, pp. 1473-1477, June 2008, doi: 10.1109/TMTT.2008.923897.
- [15] M. Ali, K.K. Sharma and R.P. Yadav, "Empirical design formulae for series-fed substrate integrated waveguides power divider," *Int J RF Microw Comput Aided Eng*, vol. 29, no. 7, 2019, doi: 10.1002/mmce.21859.

- [16] J. Zheng, X. Zhou, W. Tang, Y. Liu, G. Zhang, H. Yang and J. Yang, "Design of balanced to balanced filtering power divider based on right triangle substrate integrated waveguide cavity," *Int J RF Microw Comput Aided Eng*, vol. 99, pp. 1-10, 2021, doi: 10.1002/mmce.22766.
- [17] M. Pasian et al., "Substrate-Integrated-Waveguide E-Plane 3-dB Power-Divider/Combiner Based on Resistive Layers," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, no. 5, pp. 1498-1510, May 2017, doi: 10.1109/TMTT.2016.2642938.
- [18] M. Danaeian, A.-R. Moznebi, K. Afrooz, and H. Hakimi, "Miniaturised equal/unequal SIW power divider with bandpass response loaded by CSRRs," *Electron. Lett.*, vol. 52, pp. 1864-1866, 2016, doi: 10.1049/el.2016.2203.
- [19] R. Kazemi and A. E. Fathy, "Design of single-ridge SIW power dividers with over 75% bandwidth," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2014)*, 2014, pp. 1-3, doi: 10.1109/MWSYM.2014.6848353.
- [20] Y. -X. Yan, W. Yu and J. -X. Chen, "Millimeter-Wave Low Side- and Back-Lobe SIW Filtenna Array Fed by Novel Filtering Power Divider Using Hybrid TE₁₀₁/TE₃₀₁ Mode SIW Cavities," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 167706-167714, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3137297.
- [21] H. Jin, G. Q. Luo, W. Wang, W. Che, and K.-S. Chin, "Integration design of millimeter-wave filtering patch antenna array with SIW four-way antiphase filtering power divider," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 49804-49812, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2909771.
- [22] K. Song, Y. Chen, T. Kong and Y. Fan, "Broadband Eight-Way Substrate Integrated Waveguide Radial Power Divider/Combiner With High-Isolation," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 69268-69272, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2986339.

COPYRIGHTS

©2023 by the authors. Published by the Islamic Azad University Bushehr Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

