

# طراحی و شبیه سازی مبدل پهن باند خط هم محور به موجبر فاصله هوایی شیبی

داود ظریفی<sup>۱</sup>

۱-دانشیار گروه مخابرات دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان

## چکیده

این مقاله به طراحی و شبیه سازی یک مبدل پهن باند و کم تلف خط هم محور به موجبر فاصله هوایی شیبی برای کاربردهای موج میلی متری می پردازد. ساختار مبدل پیشنهادی برای عملکرد مناسب و تبدیل مود انتشاری خط هم محور به مود انتشاری موجبر فاصله هوایی توسط یک خط فاصله هوایی پهن باند در محدوده فرکانسی باند Ka بهینه سازی شده است. نتایج شبیه سازی ساختار پشت به پشت از مبدل طراحی شده نشان می دهد که مبدل با پهنای باند بیشتر از ۴۲٪ در محدوده فرکانسی ۲۶ تا ۴۰ گیگاهرتز، دارای تلفات عبوری کمتر از ۰/۵ dB بوده و تلفات بازگشتی آن بهتر از ۱۹ dB است. نتایج بدست آمده در طراحی و مجتمع سازی ساختارهای موجبر فاصله هوایی برای کاربردهای مختلف مایکروویو و موج میلی متری حائز اهمیت است.

**کلید واژه ها:** موجبر فاصله هوایی، مبدل پهن باند، خط هم محور

## Design and Simulation of Wideband Coaxial Line to Groove Gap Waveguide Transition

Davoud Zarifi<sup>1</sup>

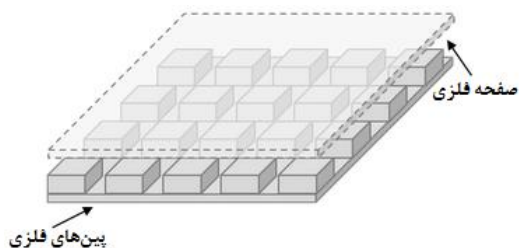
1- Associate Prof., School of Electrical and Computer Engineering, University of Kashan

### Abstract

This paper deals with the design and simulation of a wideband and low loss coaxial line to groove gap waveguide transition for millimeter-wave applications. The proposed transition structure is optimized to work at Ka-band to transform coaxial mode into the groove gap waveguide mode by means of a wideband slot-line. The simulation results of back to back structure show a maximum insertion loss of 0.5 dB and a return loss better than 20 dB over 42% relative bandwidth from 26 to 40 GHz. The obtained results can be valuable for the design and integration of gap waveguide structures for different microwave and millimeter-wave applications.

**Keywords:** Gap Waveguide, Broadband Transition, Coaxial Line

کاربردهای موج میلی متری مختلف، به مبدل‌هایی نیاز است که بتوانند ارتباط بین ساختارهای خط انتقالی و موجبری متداول به ساختارهای موجبر فاصله هوایی را فراهم کنند. این مبدل‌ها باید



شکل ۱- ساختار ایجادکننده باند توقف به عنوان ایده اساسی تکنولوژی موجبر فاصله هوایی

قابلیت تبدیل مؤثر مودهای ساختارهای موجبری متداول به مودهای موجبر فاصله هوایی را در یک پهنای باند قابل قبول و با تلفات عبوری کم داشته باشند. در سال‌های گذشته نمونه‌های مختلفی از این مبدل‌ها با ویژگی‌های مختلف در باندهای فرکانسی متفاوت طراحی و ساخته شده است که می‌توان به مبدل‌های خط هم‌محور و میکرواستریپ به انواع موجبرهای فاصله هوایی اشاره کرد [۲۲-۱۷].

در این مقاله به طراحی یک مبدل خط هم‌محور به موجبر فاصله هوایی پرداخته می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مبدل پیشنهادی، در کل باند فرکانسی Ka از ۲۶ تا ۴۰ گیگاهرتز دارای ضریب انعکاسی پایین‌تر از -۱۹ dB و تلفات عبوری کمتر از ۰/۵ dB است.

## ۲- طراحی بستر موجبری

اساس تکنولوژی موجبر فاصله هوایی بر مبنای استفاده از دو صفحه هادی کامل الکتریکی و مغناطیسی موازی با فاصله کمتر از ربع طول موج بنا نهاده شده است. تحقق صفحه هادی مغناطیسی با استفاده از آرایه متناوبی از پین‌های فلزی که بر روی یک صفحه فلزی قرار دارند صورت می‌گیرد. در چنین ساختاری که در شکل (۱) نشان داده شده است، با تغییر ابعاد پین‌ها، فاصله هوایی و دوره تناوب می‌توان به باند توقفی دست یافت که هیچ مودی اجازه انتشار ندارد. تأثیر تغییر پارامترهای فوق بر رفتار فرکانسی ساختار و باند توقف در [۴] بررسی شده است. نمودار پاشندگی چنین ساختاری را می‌توان با استفاده از تحلیل مودهای ویژه نرم‌افزار CST Microwave Studio بدست آورد. به عنوان نمونه، نمودار پاشندگی یک آرایه متناوبی از پین‌های فلزی که باند توقفی از ۲۰ تا ۴۱ گیگاهرتز ایجاد می‌کنند در شکل (۲) ارائه شده است. مشاهده می‌شود که در محدوده فرکانسی مورد نظر هیچ مودی اجازه انتشار ندارد. البته اگر یک یا چند ردیف پین حذف شده و مسیر موجبری با عرض مناسب فراهم

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده از امواج میلی متری و خصوصاً باندهای فرکانسی Ka و V بسیار مورد توجه قرار گرفته و در کاربردهای متنوعی نظیر پخش ویدئویی، ارتباطات کوتاه‌برد و اینترنت داخلی پرسرعت، واسطه‌های چندرسانه‌ای، رادارهای اتومبیل و ... استفاده شده است [۱]. چالش مهم و اساسی این باند فرکانسی، میزان تضعیف بالای امواج الکترومغناطیسی در فضای آزاد به دلیل تشدید ملکول‌های اکسیژن موجود در هوا است که با طراحی و ساخت آنتن‌های پربازده با بهره بالا قابل حل است. با توجه به تقاضای قابل توجه و روزافزون برای استفاده از این باند فرکانسی، طراحی و ساخت سایر ادوات موج میلی متری مانند انواع فیلترها، کوپلرها، مدارهای مجتمع و ... هم در چند سال گذشته پیشرفت و توسعه چشمگیری داشته است. هر چند که چالش‌های زیادی در مسیر ساخت و تحقق عملی این ساختارها و خطوط انتقال مربوطه به آنها با تکنولوژی‌های گوناگون وجود داشته است.

یکی از خطوط انتقال متداول مایکروویو، موجبرهای توخالی می‌باشند. این خطوط قابلیت تحمل توان بالایی دارند و به همین دلیل در اغلب کاربردهای فرکانس و توان بالا از موجبرها به استفاده می‌نمایند. همچنین موجبرهای تو خالی دارای تلفات کم می‌باشند، زیرا افت عایقی ندارند و افت هادی آنها توسط آبکاری قابل کنترل می‌باشد. از جمله مهم‌ترین معایب موجبرهای فلزی می‌توان به ساختار غیرصفحه‌ای، حجیم و سنگین آنها اشاره کرد که سازگاری و جمع‌آوری آنها با مدارات مجتمع را دشوار می‌سازد. همچنین عملکرد خوب این نوع موجبرها مستلزم اتصال الکتریکی خیلی خوب بین دیواره‌های فلزی آنها است. پیچیدگی و هزینه زیاد فرایند ساخت آنتن‌ها و قطعات موجبری در فرکانس‌های موج میلی متری از پیامدهای این چالش اساسی است.

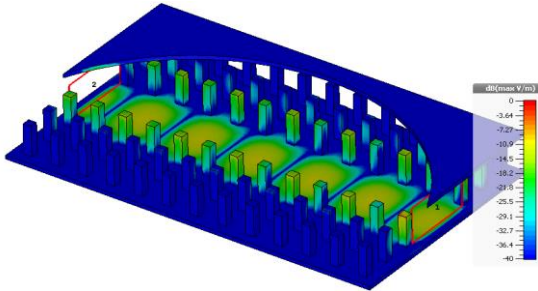
در سال‌های گذشته، نیاز به یک تکنولوژی جدید برای طراحی و ساخت آنتن‌ها و ادوات مختلف به خصوص برای محدوده فرکانسی موج میلی متری که طول موج و ابعاد فیزیکی کوچک است، کاملاً محسوس بود. در تکنولوژی موجبر فاصله هوایی که در سال ۲۰۰۹ معرفی شد، قطعات موجبری می‌توانند بدون اتصال الکتریکی لایه-های فلزی و در بسترهای موجبری کم‌تلف ساخته شوند [۴-۲]. در سال‌های اخیر، تکنولوژی موجبر فاصله هوایی در طراحی و ساخت انواع آنتن‌ها و ادوات مختلف موج میلی متری مانند تقسیم‌کننده‌های توان، کوپلر، فیلتر، تی جادویی، تغییردهنده فاز، سوئیچ و ... مورد استفاده قرار گرفته است [۱۶-۵].

با افزایش استفاده از تکنولوژی موجبر فاصله هوایی در

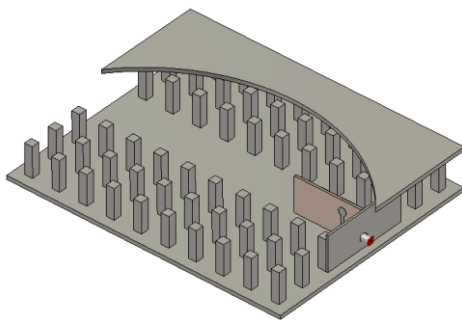
الکترومغناطیسی مقید به بستر موجبری است.

### طراحی و شبیه سازی مبدل

شکل (۳) ساختار مبدل خط هم محور به موجبر فاصله هوایی را نشان می دهد. این مبدل باید مود TEM خط هم محور را در



شکل ۴- توزیع میدان الکتریکی موجبر شکافی در فرکانس ۳۳ GHz



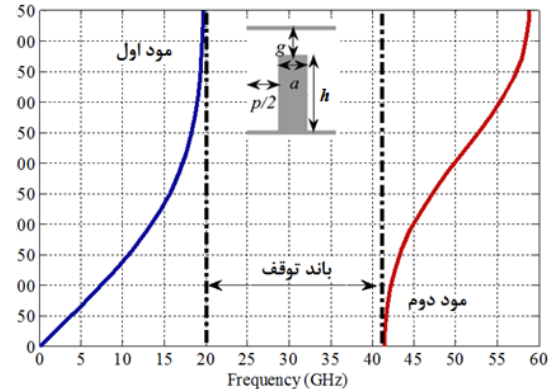
شکل ۵- ساختار مبدل خط هم محور به موجبر فاصله هوایی

پهنای باند مورد نظر از طریق یک بخش میکرواستریپ به مود انتشاری  $TE_{10}$  موجبر فاصله هوایی تبدیل کند. قسمت میکرواستریپ همان طور که در شکل (۶) هم نشان داده شده است، مشابه آنتن های پهن باند صفحه ای است که از دو قسمت تشکیل می شود. ابتدا خط هم محور و خط میکرواستریپ متصل به آن به یک خط مدار چاپی فاصله هوایی تبدیل می شود و سپس این خط فاصله هوایی با افزایش تدریجی عرض شکاف به سمت مسیر موجبری پیش می رود تا بتوان به مبدل پهنای باندی دست یافت. در انتهای خط میکرواستریپ هم یک پیچ دایروی قرار داده شده است. در حقیقت، راکتانس های خط میکرواستریپ و خط فاصله هوایی همدیگر را خنثی می کنند تا تطبیق امپدانس خوبی حاصل شود [۲۴]. همچنین مشاهده می کنید که در گوشه های بالا و پایین زیرلایه دو برش ایجاد شده است تا بتوان پارامترهای بیشتری برای بهینه سازی ساختار در اختیار داشت. زیرلایه استفاده شده از نوع RT5880 با ضریب عایقی ۲/۲ و ضخامت ۰/۲۵۴ mm می باشد.

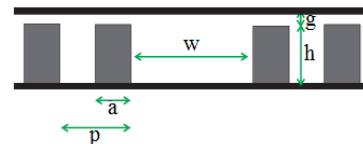
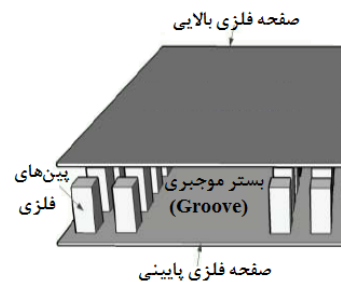
به منظور بررسی دقیق مبدل پیشنهادی، ساختاری متشکل از دو مبدل و مسیر موجبری بین آنها به عنوان یک ترکیب پشت به

شود، امکان انتشار موج وجود خواهد داشت.

در ساختار موجبر فاصله هوایی که در شکل (۳) نشان داده شده است، در فضای خالی بین های فلزی یک بستر با مسیر موجبری

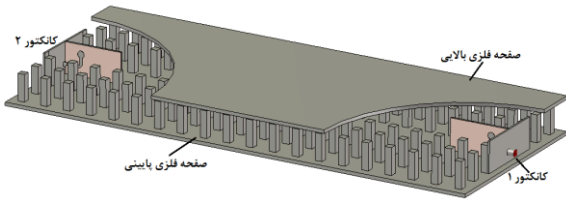


شکل ۲- نمودار پاشندگی ساختار متناوب از بین های فلزی. ابعاد برحسب میلی متر عبارتند از:  $a = 0.8$ ,  $h = 3$ ,  $p = 2$  و  $g = 0.5$

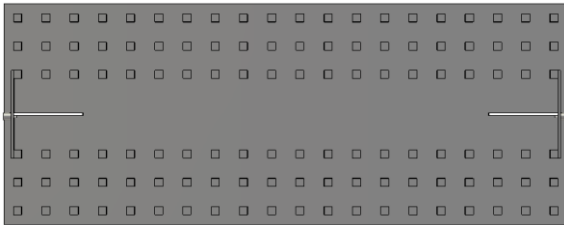


شکل ۳- ساختار یک موجبر فاصله هوایی

ایجاد می شود تا امکان انتشار موج در باند فرکانسی مورد نظر ایجاد شود. با شباهتی که این ساختار با موجبرهای مستطیلی متداول دارد، انتظار داریم مود غالب انتشاری به صورت  $TE_{10}$  باشد. در چنین ساختارهایی نیازی به اتصال دیواره های کناری موجبر به صفحه فلزی بالایی نیست. این ویژگی از نقطه نظر ساخت و تحقق عملی آنتن ها و ادوات موج میلی متری بسیار حائز اهمیت است؛ چرا که امکان حل یکی از چالش های اساسی این حوزه فراهم می شود. توزیع میدان الکتریکی ساختار موجبر شکافی با انتخاب  $w = 7/8$  mm که مشابه ابعاد موجبر مستطیلی استاندارد WR-28 می باشد، در شکل (۴) نشان داده شده است. می توان دید که در دیواره های موجبر فاصله هوایی و پس از طی دو ردیف از بین های فلزی، اندازه میدان الکتریکی حدود ۳۰ dB افت می کند و در نتیجه موج



الف



ب

شکل ۷- (الف) نمای سه بعدی، (ب) نمای بالایی دو مبدل قرار گرفته به صورت پشت به پشت.

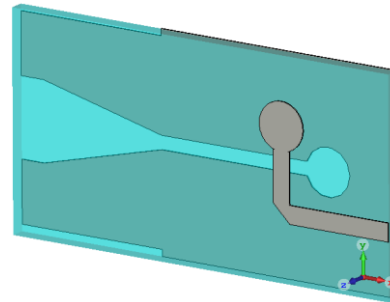
$$Error = \left( \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (|S_{11}(f_m)|^2 + |1 - S_{21}(f_m)|^2) \right)^{0.5} \quad (1)$$

که در آن نمونه های فرکانسی در محدوده فرکانسی GHz ۲۶ تا ۴۰ هستند. مقادیر بهینه پارامترها در جدول (۱) ارائه

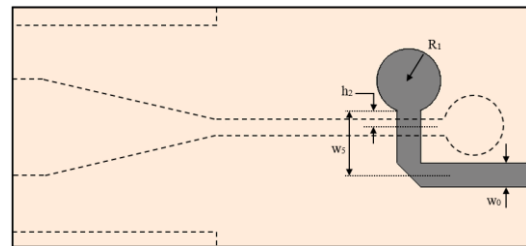
جدول ۱- مقادیر پارامترهای بهینه مبدل بر حسب میلی متر

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
۱/۰۰	$w_5$	۱/۹۵	$L_3$	۰/۴۰	$R_0$
۰/۵۰	$g$	۰/۴۰	$L_4$	۰/۴۰	$R_1$
۳/۸۰	$h$	۰/۲۳	$w_1$	۰/۳۰	$h_1$
۰/۸۰	$a$	۱/۳۲	$w_2$	۰/۳۰	$h_2$
۲/۰۰	$p$	۳/۳۸	$w_3$	۲/۱۶	$L_1$
۷/۱۱	$w$	۳/۶۰	$w_4$	۲/۳۶	$L_2$

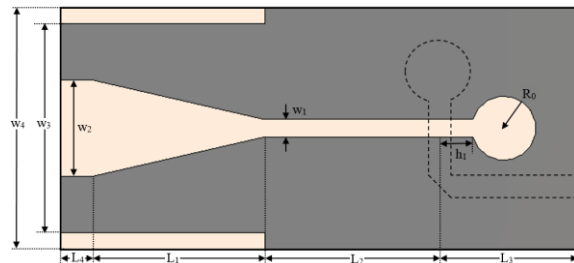
پشت مطابق شکل (۷) در نظر گرفته شده است. برای دستیابی به تطبیق خوب در ورودی و همچنین تلفات عبوری کم در محدوده فرکانسی ۲۶ تا ۴۰ گیگاهرتز، پارامترهای نشان داده در شکل (۶) توسط ابزار بهینه سازی نرم افزار CST بهینه سازی شده است. به منظور دستیابی به اهداف طراحی، تابع خطا را به صورت رابطه زیر تعریف می کنیم:



الف

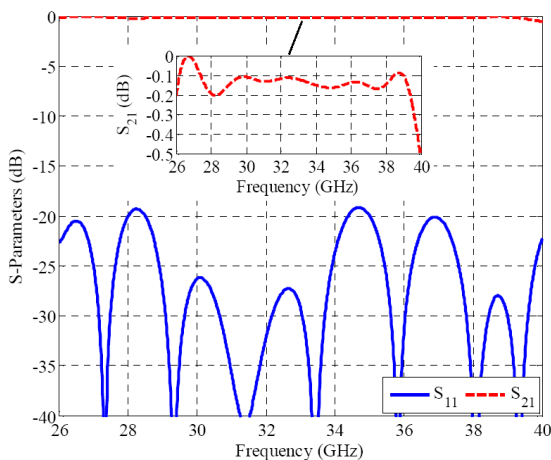


ب



ج

شکل ۶- قسمت میکرواستریپ مبدل. (الف) نمای سه بعدی، (ب) نمای روبرویی، (ج) نمای پشتی.



شکل ۸- پارامترهای پراکنده ساختار پشت به پشت از مبدل طراحی شده.

جدول ۲- مقایسه مشخصات مبدل پیشنهادی با نمونه های

مشابه

کار حاضر	[۲۳]	[۲۲]	[۲۱]	[۲۰]	[۱۹]	[۱۸]	
طول مبدل (برحسب $\lambda_0$ )	-	-/۵	-/۲۵	۴/۳	-/۵	۲/۷	
فرکانس مرکزی (GHz)	۳۳	۳۰	۹۵	۱۳	۲۲/۲۵	۵۷/۵	۱۷/۵
پهنای باند (%)	۴۲	۶/۷	۲۱	۲۸	۹۶	۳۳	۸۵
تلفات بازگشتی (dB)	۱۹	۲۰	۱۰	۱۵	۱۵	۲۰	۱۵
تلفات عبوری (dB)	-/۵	-/۰.۳	۲	-/۳.۵	۱	۱	-/۱.۵

#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله یک ساختار به عنوان مبدل خط هم محور به موجبر فاصله هوایی ارائه شده است. ضریب انعکاس ورودی و تلفات عبوری ساختار پیشنهادی به صورت ترکیب پشت به پشت در کل باند Ka از ۲۶ تا ۴۰ گیگاهرتز به ترتیب بهتر از  $-19$  dB و  $-0.5$  dB می باشد. نتایج بدست آمده در مجتمع سازی آنتن ها و ادوات میکروویو مبتنی بر موجبر فاصله هوایی برای کاربردهای مختلف میکروویو و موج میلی متری حائز اهمیت است.

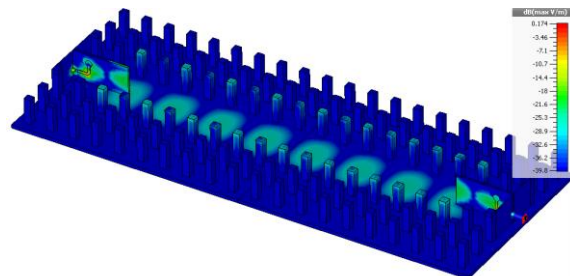
#### ۵- مراجع

- [1]. P. Smulders, "Exploiting the 60 GHz band for local wireless multimedia access: Prospects and future directions," IEEE Commun. Mag., vol. 40, no. 1, pp. 140-147, Jan. 2002.
- [2]. P.-S. Kildal, "Three metamaterial-based gap waveguides between parallel metal plates for mm/submm waves," in Proc. 3rd Eur. Conf. Antennas Propag., Berlin, Germany, pp. 28-32, Mar. 2009.
- [3]. P.-S. Kildal, E. Alfonso, A. Valero-Nogueira, and E. Rajo-Iglesias, "Local metamaterial-based waveguides in gaps between parallel metal plates," IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol. 8, no. 4, pp. 84-87, Apr. 2009.
- [4]. A. U. Zaman and P.-S. Kildal, "Gap waveguides," in *Handbook of Antenna Technologies*, Z. N. Chen, D. Liu, H. Nakano, X. Qing, and T. Zwick, Eds. Singapore: Springer, 2016, pp. 3273-3347.
- [5]. D. Zarifi, A. Farahbakhsh and A. U. Zaman, "A Gap Waveguide-Fed Wideband Patch Antenna Array for 60-GHz Applications," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 65, no. 9, pp. 4875-4879, Sep. 2017.
- [6]. A. Farahbakhsh, D. Zarifi and A. U. Zaman, "A mmWave Wideband Slot Array Antenna Based on

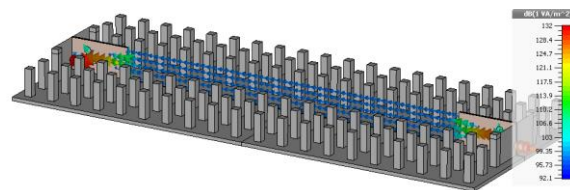
شده است. شبیه سازی و بهینه سازی ساختار پیشنهادی با یک کامپیوتر محاسباتی با مشخصات پردازشی CPU Intel Xeon E5-2690 v4 و حافظه رم ۱۲۸ GB انجام شده است.

نتایج شبیه سازی پارامترهای پراکنندگی ساختار بهینه در شکل (۸) نشان داده شده است. مشاهده می شود که ضریب انعکاس ورودی ساختار تقریباً در کل بازه فرکانسی باند Ka کمتر از  $-19$  dB و تلفات عبوری هم کمتر از  $-0.5$  dB است. به منظور اطمینان از عملکرد مناسب مبدل، توزیع میدان و توان انتشاری در فرکانس مرکزی ۳۳ گیگاهرتز در شکل (۹) نشان داده شده است. از نتایج بدست آمده مشخص است که تبدیل مود به خوبی در مبدل انجام شده و مود TEM خط هم محور به مود  $TE_{10}$  موجبر فاصله هوایی تبدیل می شود.

به منظور بررسی عملکرد مبدل پیشنهادی، مشخصات آن با چند نمونه از ساختارهای مشابه در جدول (۲) مقایسه شده است. مشاهده می شود که مبدل پیشنهادی، نسبت به نمونه های مشابه خود دارای اندازه نسبتاً کوچک، پهنای باند مناسب و پوشش کامل باند Ka و تلفات بازگشتی و جایگذاری قابل قبول می باشد. همچنین می توان ساختار مورد نظر را در فرکانس های بالاتر در محدوده امواج میلی متری هم بازطراحی و استفاده نمود.



الف



ب

شکل ۹- (الف) توزیع میدان الکتریکی، (ب) شار توان مبدل طراحی شده در فرکانس مرکزی ۳۳ GHz



- in bed of nails for parallel-plate mode suppression," *IET Microw. Antennas Propag.*, vol. 5, no. 3, pp. 262-270, Mar. 2011.
- [18]. S. I. Shams and A. A. Kishk, "Wideband coaxial to ridge gap waveguide transition," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 64, no. 12, pp. 4117-4125, Dec. 2016.
- [19]. D. Zarifi and H. Oraizi, "A V-band microstrip line to groove gap waveguide transition," *2016 16th Mediterranean Microwave Symposium (MMS)*, 2016, pp. 1-2.
- [20]. M. A. Nasr and A. A. Kishk, "Wideband inline coaxial to ridge waveguide transition with tuning capability for ridge gap waveguide," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 66, no. 6, pp. 2757-2766, Jun. 2018.
- [21]. S. Birgermajer, N. Jankovic, V. Radonic, V. Crnojevic-Bengin, and M. Bozzi, "Microstrip-ridge gap waveguide \_lter based on cavity resonators with mushroom inclusions," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 66, no. 1, pp. 136-146, Jan. 2018.
- [22]. J. M. Pérez-Escudero, A. E. Torres-García, R. Gonzalo and I. Ederra, "Design of a Groove Gap Waveguide to Microstrip inline transition," *2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2019, pp. 1-3.
- [23]. A. Pérez-Guimerá, M. Ferrando-Rocher, J. I. Herranz-Herruzo and A. Valero-Nogueira, "Half-Mode Groove Gap Waveguide to Coaxial In-Line Transition for mm-Wave Applications," *2023 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Florence, Italy, 2023, pp. 1-3.
- [24]. C. H. Chan, and Q. Xue, "An In-Line Waveguide-to-Microstrip Transition Using Radial-Shaped Probe," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 18, pp. 311-313, May 2008.
- Ridge Gap Waveguide With 30% bandwidth," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 2, pp. 1008-1013, Feb. 2018.
- [7]. M. Ferrando-Rocher, J. I. Herranz-Herruzo, A. Valero-Nogueira and B. Bernardo-Clemente, "Dual Circularly Polarized Aperture Array Antenna in Gap Waveguide for High-Efficiency Ka-Band Satellite Communications," *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, vol. 1, pp. 283-289, 2020.
- [8]. Z. Zhao, T. A. Denidni, "Millimeter-Wave Printed-RGW Hybrid Coupler with Symmetrical Square Feed," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 30, no. 2, pp. 156-159, Feb. 2020.
- [9]. J. Cao, H. Wang, S. Tao, S. Mou and Y. Guo, "Highly Integrated Beam Scanning Groove Gap Waveguide Leaky Wave Antenna Array," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 8, pp. 5112-5117, Aug. 2021.
- [10]. A. Palomares-Caballero, A. Alex-Amor, J. Valenzuela-Valdés and P. Padilla, "Millimeter-Wave 3-D-Printed Antenna Array Based on Gap-Waveguide Technology and Split E-Plane Waveguide," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 1, pp. 164-172, Jan. 2021.
- [11]. S. Peng, Y. Pu, Z. Wu and Y. Luo, "High-Isolation Power Divider Based on Ridge Gap Waveguide for Broadband Millimeter-Wave Applications," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 70, no. 6, pp. 3029-3039, June 2022.
- [12]. D. Sun and J. Xu, "A Novel Iris Waveguide Bandpass Filter Using Air Gapped Waveguide Technology", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 26, no. 7, pp. 475-477, July 2016.
- [13]. M. Rezaee and A. U. Zaman, "Realisation of carved and iris groove gap waveguide filter and E-plane diplexer for V-band radio link application," *IET Microwave Antenna and Propagation*, vol.11, no. 5, pp. 2109-2115, Oct. 2017.
- [14]. H. Abdollahy, A. Farahbakhsh, M. Ostovarzadeh, "Mechanical reconfigurable phase shifter based on gap waveguide technology" *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 132, Apr. 2021.
- [15]. D. Zarifi, A. Farahbakhsh and A. U. Zaman, "A Millimeter-Wave Six-Port Junction Based on Ridge Gap Waveguide," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 68699-68705, 2023.
- [16]. B. Yao, N. Huang, G. Zhang, X. Zhou, J. Lu, "Dual-band bandpass filter with high selectivity based on 3D printable groove gap waveguide," *IET Microw, Antennas Propag*, vol. 17, no. 10, pp. 827-831, 2023.
- [17]. P.-S. Kildal, A. U. Zaman, E. Rajo-Iglesias, E. Alfonso, and A. Valero-Nogueira, "Design and experimental verification of ridge gap waveguide