Scientific Journal of Radar
Vol. 12, No. 1, Spring and Summer2024, Serial No. 31, pp. 161- 168
ISSN: 2322-4347, E-ISSN: 2980-8979

Design of X-band rotary joint in Printed Microstrip Gap Waveguide Technology for application in remote sensing radars

M.H. Ostovarzadeh Ravari *

Associate Professor, Department of Telecommunications and Electronics, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Graduate School of Industrial and Advanced Technology, Kerman, Iran

(Received: 2024/05/01, Revised: 2024/07/31, Accepted: 2024/08/24, Published: 2024/10/01)

DOR: https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1403.12.1.11.4

ABSTRACT

In this paper, a rotary joint is introduced in printed microstrip gap waveguide technology to provide 360-degree mechanical scanning capability in X-band Remote sensing radars. The advantages of using printed microstrip gap waveguide technology are reduced manufacturing challenges, time and cost compared to other technologies. The bottom plate of the proposed rotary joint is a substrate and the top plate is metal which both plates are fed by coaxial cables and a spatial gap is created between them using gap waveguide technology which provides the ability of rotation of this joint. The dimensions of the proposed rotary joint were optimized using frequency domain solver of CST software such that the frequency bandwidth of the insersion loss of this module be suitable for remote sensing radars which require good resolution of image details. Simulation results show that the rotary joint has a return loss better than 16 dB in the frequency range 9.3- 9.9 GHz and an insersion loss less than 0.2 dB in this frequency range. Comparison of simulation results performed by two frequency and time domain solvers of CST software confirms the accuracy of the design and simulation.

Keywords: Radar, Remote sensing, rotary joint, bandwidth, microstrip, gap waveguide

Cite this article: Ostovarzadeh Ravari, M.H., "Design of X-band rotary joint in Printed Microstrip Gap Waveguide Technology for application in remote sensing radars." *Radar*, vol. 12, no. 1, pp. 161- 168. 2024.

DOR: https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1403.12.1.11.4

© The Author(s). retain the copyright and full publishing rights

Publisher: Imam Hossein University

Corresponding Author Email: Mh.ostovarzadeh@kgut.ac.ir

"رادار"
سال دوازدهم، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۴۰۳، ص ۱۶۱- ۱۶۸
شاپا الکترونیکی: ۴۰۲۴ -۲۳۴۵ شاپا چاپی: ۴۰۳۲ -۲۳۴۵

علمی – پژوهشی

طراحی اتصال چرخشی باند X در فناوری موجبر شکافی ریز نواری چاپ‌شده به‌منظور کاربرد در رادارهای سنجش‌ازدور

محمدحسین استوارزاده

دانشیار، گروه مخابرات و الکترونیک، دانشکده برق و کامپیوتر، تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۱، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۱۳، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۱۰، انتشار: ۱۴۰۳/۰۶/۰۱)

DOR: https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1403.12.1.11.4

چکیده

در این مقاله یک اتصال چرخشی در فناوری موجبر شکافی ریز نواری چاپ‌شده به‌منظور ایجاد قابلیت اسکن مکانیکی ۳۶۰ درجه‌ای در رادارهای سنجش از راه دور باند X معرفی می‌شود. مزایای استفاده از فناوری موجبر شکافی ریز نواری چاپ‌شده، کم‌شدن زمان، هزینه و چالش‌های ساخت نسبت به سایر فناوری‌ها است. صفحه پایینی اتصال چرخشی ارائه‌شده زیرلایه و صفحه بالایی فلزی است که هر دو صفحه با کابل‌های هم‌محور تغذیه می‌شوند و بین آن‌ها با استفاده از فناوری موجبر شکافی فضایی ایجاد می‌شود که قابلیت چرخش این اتصال را فراهم می‌کند. با استفاده از حل‌کننده حوزه فرکانس نرم‌افزار CST ابعاد اتصال چرخشی پیشنهادشده بهینه گردید، به‌گونه‌ای که پهنای باند فرکانسی تلفات عبوری این ماژول برای رادارهای سنجش‌ازدور که نیاز به تفکیک خوب جزئیات تصاویر دارند مناسب باشد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که اتصال چرخشی دارای تلفات بازگشتی بهتر از ۱۶ dB در بازه فرکانسی ۹/۳ GHz تا ۹/۹ GHz و تلفات عبوری کمتر از ۰/۲dB در این بازه فرکانسی است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌های انجام‌شده توسط دو حل‌کننده حوزه فرکانس و حوزه زمان نرم‌افزار CST تأییدکننده دقت طراحی و شبیه‌سازی است.

کلیدواژه‌ها: رادار، سنجش‌ازدور، اتصال چرخشی، پهنای باند، ریز نواری، موجبر شکافی.

۱. مقدمه

رادارهای سنجش‌ازدور ریزموج ابزارهای بسیار قدرتمندی برای پایش و مطالعه محیط‌زیست هستند [۱-۳]. غیروابسته بودن به نور و هوا، قابلیت نفوذ به درون‌پوشش گیاهی و حتی خاک‌های خشک و حساسیت به ویژگی‌های فیزیکی مانند بافت سطح، رطوبت و حرکت از مزایای مهم این رادارها برای استفاده در حوزه محیط‌زیست هستند. باند فرکانسی X یکی از باندهای فرکانسی مورداستفاده این نوع رادارها است [۴-۵].

بسیاری از این رادارها به‌منظور پایش ۳۶۰ درجه‌ای محیط نیازمند چرخاندن آنتن حول محور خود هستند. برای چرخاندن آنتن و هم‌زمان امکان انتقال توان الکترومغناطیس به آنتن، نیاز به قطعه‌ای بنام اتصال چرخشی است [۳ و ۶]. استفاده از این اتصال باعث حذف کابل‌های بین بخش ثابت و متحرک و چرخش

استناد: استوار زاده راوری، محمد حسین، "طراحی اتصال چرخشی باند X در فناوری موجبر شکافی ریزنواری چاپ‌شده به‌منظور کاربرد در رادارهای سنجش‌ازدور." *رادار*، ۱۲(۱)، ۱۶۱- ۱۶۸، ۱۴۰۳.

DOR: https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1403.12.1.11.4

© **نویسنده(گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می‌دارند.**

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین(ع).

رایانامه نویسنده مسئول: Mh.ostovarzadeh@kgut.ac.ir

آن‌ها که باعث پاره شدن آن‌ها می‌شود، می‌شود [۷-۹]. اتصال چرخشی یک قطعه مکانیکی - الکترومغناطیسی بسیار دقیق است و وظیفه آن انتقال سیگنال‌های مایکروویو پرتوان (هم ارسالی و هم دریافتی) از یک بخش ثابت به یک بخش متحرک و چرخان، با کمترین تلفات و اعوجاج ممکن است؛ بنابراین یک اتصال چرخشی شامل روتور، استاتور و پنجره چرخشی است. استاتور به فرستنده - گیرنده ثابت متصل است درحالی‌که آنتن چرخان به قسمت روتور متصل است. پنجره چرخشی اتصال بین روتور و استاتور را هنگام چرخش فراهم می‌کند.

تاکنون اتصال‌های چرخشی با استفاده از فناوری‌های مختلفی مانند ریز نواری [۱۰] و موجبر مجتمع شده در زیرلایه [۱۱-۱۲] پیشنهاد شده‌اند. مزایای اصلی فناوری‌های برد مدارچاپی[1] هزینه ساخت پایین، سهولت ساخت و قابلیت مجتمع‌سازی آن‌ها با سایر اجزا است، اما چالش آن‌ها تلفات دی‌الکتریک و عدم قابلیت انتقال توان زیاد است. اتصالات چرخشی موجبر فلزی توانایی انتقال توان الکترومغناطیسی بالا را بدون تلفات عایقی دارند [۸، ۱۳ و ۱۴]، اما از پیچیدگی و هزینه‌های ساخت رنج می‌برند.

اخیراً فناوری موجبر شکافی [۱۵] برای کاربردهای فرکانس بالا پیشنهاد شده است که در مقایسه با موجبرهای سنتی، اجزایی کم اتلاف باقابلیت انتقال توان بالا هستند و فرایند تولید ساده‌تری را ارائه می‌دهند. برخلاف موجبرهای مرسوم که برای محدودکردن امواج الکترومغناطیسی به دیواره‌های فلزی پیوسته متصل متکی هستند، موجبرهای شکافی از ساختارهای تناوبی برای ایجاد یک باند توقف الکترومغناطیسی[2] مؤثر استفاده می‌کنند که از نشت موج جلوگیری می‌کند. این ویژگی منحصربه‌فرد، نیاز به تماس الکتریکی بین اجزای موجبر را از بین می‌برد و آن‌ها را برای کاربردهای فرکانس بالا که در آن‌ها تلرانس‌های مکانیکی و دقت مونتاژ بسیار مهم هستند، بسیار مناسب می‌سازد [۱۶-۲۰].

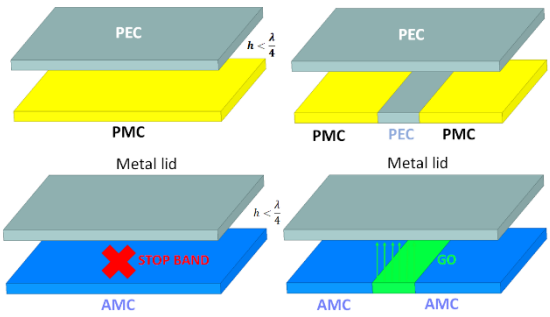
اتصالات چرخشی به دلیل عدم نیاز به تماس الکتریکی بین قسمت ثابت و چرخان، در فناوری موجبر شکافی طراحی شده‌اند [۲۱-۲۳]. لازم به ذکر است که اتصال چرخشی ارائه‌شده در این مرجع و [۲۱] با دهانه کابل هم‌محور تغذیه می‌شوند درحالی‌که اتصال‌های چرخشی ارائه‌شده در [۲۲ و ۲۳] با دهانه موجبری تغذیه می‌شوند که باعث می‌شود توانایی حمل توان بیشتری داشته باشند.

اگرچه فناوری موجبر فاصله هوایی پیچیدگی موجبرهای مرسوم را از بین می‌برد، اما از هزینه و زمان فرایند ماشین‌کاری CNC رنج می‌برد. در این مقاله، برای اولین‌بار یک اتصال چرخشی در فناوری موجبر شکافی ریز نواری چاپ‌شده[3] پیشنهاد می‌شود که به علت استفاده از فناوری برد مدارچاپی فرایند ساخت آن کم‌هزینه‌تر، با چالش کمتر و سریع‌تر است.

۲. موجبر شکافی ریز نواری چاپ‌شده

۲-۱. مفهوم موجبر شکافی

مفهوم موجبر شکافی از جلوگیری از انتشار موج الکترومغناطیسی در جهت نامطلوب و اجازه‌دادن به آن‌ها برای انتشار در جهت مطلوب ناشی می‌شود. این مفهوم از شرایط مرزی رسانای الکتریکی کامل و رسانای مغناطیسی کامل استفاده می‌کند. همان‌طور که در شکل (۱) نشان‌داده‌شده است، اگر فاصله دو صفحه موازی PEC/PMC کمتر از یک‌چهارم طول‌موج باشد، حل معادلات ماکسول با شرایط مرزی منتج به عدم انتشار موج الکترومغناطیس بین دو صفحه موازی می‌شود. زیرا همه مدهای انتشاری موجبر صفحه موازی در حالت قطع قرار دارند. این محدوده فرکانسی، باند توقف نامیده می‌شود. همان‌طور که می‌دانیم هیچ ماده PMC در طبیعت وجود ندارد؛ بنابراین می‌توان این سطوح را به‌صورت مصنوعی (رسانای مغناطیسی مصنوعی) با استفاده از پین‌های تناوبی در باند فرکانسی موردنظر ساخت. با بهینه‌سازی دوره و ابعاد پین‌ها، می‌توان باند توقف را برای باند فرکانسی موردنظر طراحی کرد [۲۴].



شکل (۱). مفهوم فناوری موجبر شکافی، فلش سبز به معنای انتشار مجاز موج است. ضربدر قرمز به معنای عدم امکان انتشار موج است

۲-۲. موجبر شکافی چاپ‌شده

اخیراً فناوری موجبر شکافی ریز نواری چاپ‌شده به دلیل اندازه جمع‌وجور، هزینه ساخت کم و قابلیت مجتمع شدن با مدارات صفحه‌ای توجه زیادی را به خود جلب کرده است. موجبر شکافی ریز نواری چاپ‌شده یک فناوری خط انتقال پیشرفته است که مزایای موجبرهای شکافی مرسوم را با سادگی ساخت برد مدارچاپی ترکیب می‌کند [۲۵]. در این فناوری ساختار هادی مغناطیسی کامل که معمولاً به‌صورت بستری از پچ‌های مربعی یا

[1] Printed Circuit Board
[2] Electromagnetic Band Gap
[3] Printed Microstrip Gap Waveguide

دایروی زمین شده قارچی شکل پیاده‌سازی می‌شود، در مجاورت هادی الکتریکی کامل یک باند توقف ایجاد می‌کند که مدهای صفحه موازی را سرکوب می‌کند و انتشار موج الکترومغناطیس در جهت مطلوب را تضمین می‌کند [۲۶ و ۲۷]. به‌عبارت‌دیگر، با استفاده از سلول‌های تناوبی، می‌توان سطح رسانای مغناطیسی مصنوعی ایجاد کرد که می‌تواند یک باند توقف برای موجبر صفحه موازی ایجاد کند. مطالعات اخیر نشان داده است که موجبر شکافی ریز نواری چاپ‌شده در مقایسه با موجبرهای ریز نواری و موجبر مجتمع شده در زیرلایه پاشندگی کمتر و قابلیت انتقال توان بالاتری دارد. در مقایسه با موجبرهای سنتی، موجبر شکافی ریز نواری چاپ‌شده نیاز به تماس الکتریکی بین صفحه بالا و پایین را از بین می‌برد که پیچیدگی ساخت را کاهش می‌دهد و درعین‌حال محصورسازی عالی موج و عملکرد کم‌تلفات را در فرکانس‌های بالا حفظ می‌کند. همچنین در مقایسه با موجبر شکافی فلزی که در آن پین‌ها با ماشین‌کاری CNC ساخته می‌شوند، فناوری موجبر شکافی ریز نواری چاپ‌شده زمان و هزینه و چالش‌های ساخت کمتری دارد. قابلیت یکپارچه‌سازی آسان، ممانعت از تابش و نشت و پهنای باند نسبتاً زیاد از مزایای دیگر این فناوری است.

۳. طراحی اتصال چرخشی

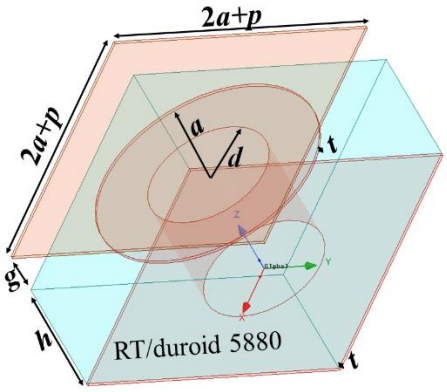
۳-۱. سلول واحد ساختار باند ممنوعه

سلول واحد که یک پچ فلزی دایره‌ای یا مستطیلی اتصال کوتاه شده مانند قارچ است، بلوک سازنده اصلی ساختار باند توقف الکترومغناطیسی در موجبرهای شکافی ریز نواری چاپ‌شده است که برای سرکوب مدهای ناخواسته و ایجاد یک باند توقف در باند فرکانسی موردنظر به کار می‌رود.

گام اصلی برای طراحی سلول واحد، دانستن حد بالا و پایین فرکانس کاری مطلوب برای ایجاد باند توقف در آن محدوده فرکانسی است؛ بنابراین ابتدا باید عامل‌های هندسی ساختار تناوبی قارچی شکل بهینه شوند تا باند توقفی به دست آید که در محدوده فرکانسی مطلوب قرار داشته باشد.

در این مقاله ابتدا یک سلول واحد قارچی شکل[۲۷] مطابق شکل (۲) برای ایجاد یک باند توقف در باند X که در این باند فرکانسی رادارهای سنجش‌ازدور مختلفی طراحی شده‌اند[۵-۴]، طراحی و بهینه‌سازی گردید. مطابق این شکل یک زیرلایه Rogers RT/Duroid 5880 با تلفات کم (ε_r=۲/۲ ، ۰/۰۰۰۹ = tanδ) با ارتفاع ۱/۵۷۵ mm برای به‌حداقل‌رساندن تلفات عایقی در باند X انتخاب شده است. یک پچ دایره‌ای‌شکل به شعاع a و ضخامت t روی زیرلایه چاپ‌شده است که توسط یک via با شعاع d به زمین متصل می‌شود. صفحه فلزی بالایی مربعی‌شکل در ارتفاع g از زیرلایه قرار گرفته است. طول سلول واحد به‌صورت $2a+p$ تعریف شده است که دوره تناوب ساختار هادی مغناطیسی قارچی شکل است. برای اینکه باند توقف این ساختار باند X را پوشش دهد، با استفاده از تحلیل پراکندگی نرم‌افزار CST عامل‌های سلول واحد مطابق جدول (۱) بهینه شده‌اند.

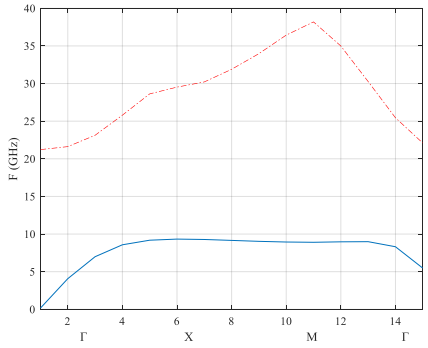
در شکل (۳) نمودار پراکندگی یک ساختار تناوبی نامحدود قارچی شکل نشان‌داده‌شده است که یک باند توقف را از فرکانس ۸ GHz تا ۲۲ GHz تضمین می‌کند.



شکل (۲). نمای سه‌بعدی از سلول واحد

جدول (۱). ابعاد سلول واحد

عامل	a	d	p
مقدار (mm)	۱/۷۷۵	۰/۳۸	۰/۲
عامل	h	t	g
مقدار (mm)	۱/۵۷۵	۰/۰۱۷	۰/۵۰۸



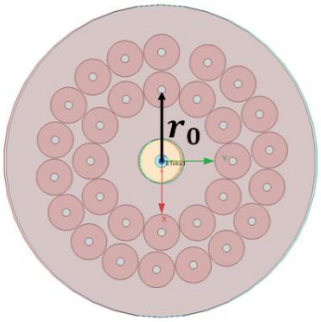
شکل (۳). نمودار پراکندگی سلول واحد پیشنهادی

۳-۲. طراحی مفصل چرخشی

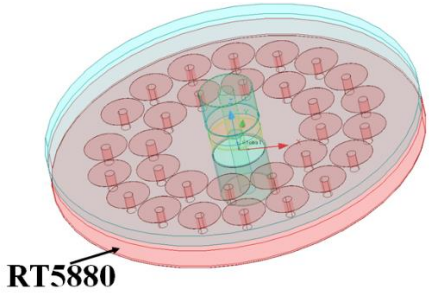
الف. ساختار پیشنهادی

شکل (۴) ساختار اتصال چرخشی پیشنهادی را نشان می‌دهد که

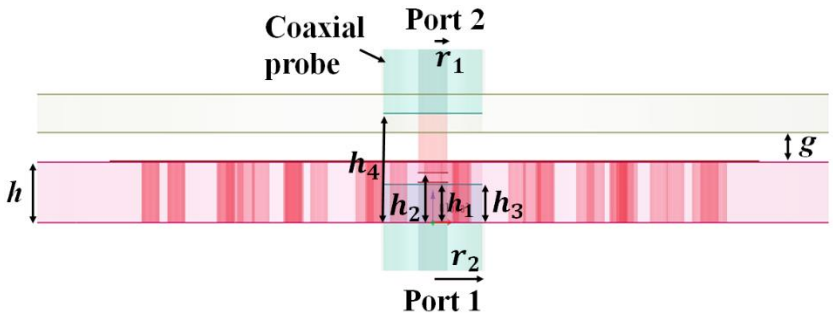
در آن دو کابل هم‌محور به‌عنوان دهانه‌های ورودی (پایین) و خروجی (بالا) در نظر گرفته شده‌اند. دهانه‌های کابل هم‌محور با عایق تفلون و امپدانس مشخصه ۵۰ Ω فرض شده‌اند که برای استفاده در باند X سازگار هستند. انتقال موج از دهانه ۱ به ۲ از طریق یک حفره دایروی که توسط قارچ‌هایی با ابعاد نشان‌داده‌شده در جدول (۱) محصورشده محقق می‌شود. لایه زیرین اتصال زیرلایه، دیسک بالایی هادی کامل و دیواره‌های جانبی قارچ‌هایی هستند که بافاصله هوایی طراحی شده یک باند توقف برای جلوگیری از نشت امواج الکترومغناطیسی ایجاد می‌کنند. لایه زیرین قسمت ثابت و لایه بالایی قسمت چرخان است و فاصله‌ای (فاصله هوایی) بین آن‌ها امکان چرخش دیسک بالایی را فراهم می‌کند. ارتفاع پروب هم‌محور توسط حل‌کننده حوزه فرکانس نرم‌افزار CST Studio برای بهترین تلفات ورودی بهینه شده است. ابعاد مفصل چرخشی بهینه در جدول (۲) آمده است.



ب



الف



ج

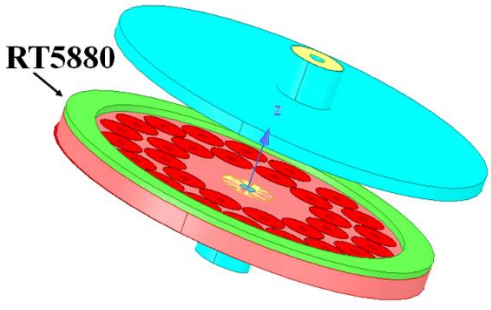
شکل (۴). ساختار اتصال چرخشی پیشنهادی الف) نمای سه‌بعدی ب) نمای بالا ج) نمای پهلو

جدول (۲). ابعاد اتصال چرخشی.

h_1	r_2	r_1	r_0	عامل
۱/۰۵	۲/۱۲۴	۰/۶۳۵	۸/۵	مقدار (mm)
	h_4	h_3	h_2	عامل
	۲/۸۵	۱	۱/۱	مقدار (mm)

ب. اعمال فاصله‌دهنده

به‌منظور نگه‌داشتن دیسک چرخان روی زیرلایه ثابت حاوی پین‌های قارچی شکل، همان‌طور که در شکل (۵) نشان‌داده‌شده است، از یک زیرلایه دی‌الکتریک Rogers RT/Duroid 5880 باضخامت g استفاده گردید.

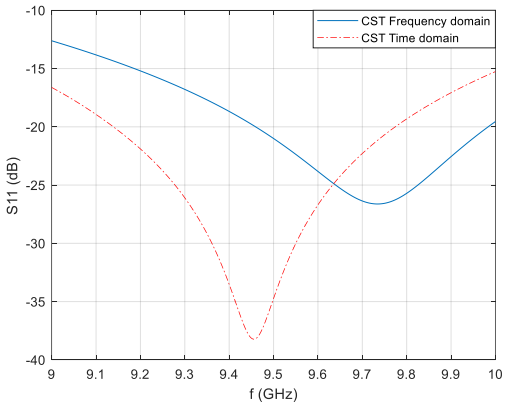


شکل (۵). اعمال فاصله‌دهنده

۴. نتایج شبیه‌سازی

شکل (۶) تغییرات افت بازگشتی اتصال چرخشی نسبت به فرکانس که توسط حل‌کننده حوزه فرکانس نرم‌افزار CST شبیه‌سازی شده است را نشان می‌دهد. همان‌طور از این شکل مشخص است افت بازگشتی در بازه فرکانسی ۹/۳GHz تا GHz

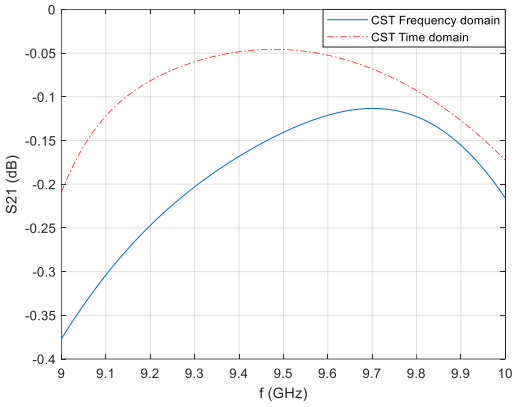
۹/۹ که پهنای باند رادارهای سنجش‌ازدور با پهنای باند نسبتاً زیاد در باند Xاست، کمتر از ۱۶ dB- است که نشان‌دهنده عملکرد مطلوب اتصال چرخشی پیشنهادی در این بازه فرکانسی است. برای مقایسه، این منحنی با نتیجه حاصل از شبیه‌سازی توسط حل‌کننده حوزه زمان نرم‌افزار CST مقایسه گردید. همان‌گونه که از این شکل مشخص است، هر دو حل‌کننده تطبیق امپدانس مناسبی را برای اتصال چرخشی پیشنهادی در بازه فرکانسی مدنظر نشان می‌دهند.



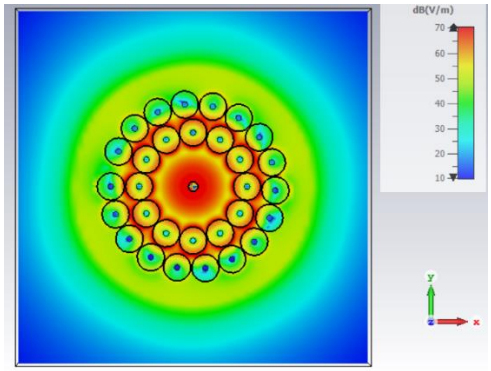
شکل (۶). تغییرات افت بازگشتی نسبت به فرکانس

همچنین نتیجه شبیه‌سازی افت عبوری اتصال چرخشی پیشنهادی توسط حل‌کننده حوزه فرکانس نرم‌افزار CST در شکل (۷) نشان‌داده‌شده است. طبق این شکل افت عبوری در بازه فرکانسی ۹/۳GHz تا ۹/۹ GHz کمتر از ۰/۲ dB است که نشان‌دهنده این مطلب است که در این بازه فرکانسی اکثر توانی که از دهانه ۱ وارد اتصال چرخشی شده است به دهانه ۲ رسیده است و ساختار قارچی شکل متناوب به همراه صفحه فلزی بالای آن مانع نشت موج به بیرون اتصال چرخشی شده‌اند. مقایسه این منحنی با نتیجه حاصل از شبیه‌سازی توسط حل‌کننده حوزه زمان نرم‌افزار CST نشان‌دهنده دقت شبیه‌سازی است. همان‌گونه که از جدول (۲) مشخص است ابعاد اتصال چرخشی پیشنهادی با درنظرگرفتن دقت ساخت ۵۰ میکرون بهینه شده‌اند. به‌منظور بررسی حساسیت به عامل‌های ساخت، شبیه‌سازی‌ها با فرض تلرانس ۲۰ درصد (۱۰ میکرون) برای ابعاد اتصال چرخشی تکرار شد و مشاهده گردید که تلفات عبوری در بدترین حالت حدود ۰/۵ dB است که مقدار قابل‌قبولی است.

شکل (۸) توزیع دامنه میدان الکتریکی داخل اتصال چرخشی را در فرکانس ۹/۵ GHz به‌صورت لگاریتمی نشان می‌دهد. همان‌گونه که از این شکل مشخص است میدان در خارج از ساختار دامنه ضعیف‌تری نسبت به میدان داخل ساختار دارد.



شکل (۷). تغییرات افت عبوری نسبت به فرکانس



شکل (۸). اندازه میدان الکتریکی در فضای بین دو صفحه اتصال چرخشی در فرکانس ۹/۵ GHz

در مقایسه با کارهای انجام شده اخیر می‌توان گفت اتصال چرخشی پیشنهادی نسبت به اتصالات چرخشی ارائه‌شده در فناوری‌های ریز نواری[۱۰] و موجبر مجتمع شده در زیرلایه [۱۱-۱۲] تلفات کمتری دارد و در مقایسه با فناوری‌های موجبری [۱۳-۱۴] و موجبر شکافی [۲۲-۲۴] هزینه و زمان و چالش‌های ساخت کمتری دارد. جدول (۳) مقایسه بین اتصال چرخشی طراحی شده در فناوری موجبر شکافی ریز نواری چاپ‌شده با اتصالات چرخشی ارائه‌شده در سایر فناوری‌ها را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از این جدول مشاهده می‌شود اتصال چرخشی پیشنهادی دارای هزینه و زمان ساخت و پهنای باند نسبی کم و تلفات عبوری قابل‌قبول نسبت به سایر فناوری‌ها است.

جدول (۳). مقایسه بین فناوری‌های مختلف

مرجع	فناوری	پهنای باند نسبی	حداکثر تلفات عبوری (dB)	هزینه و زمان ساخت
[۱۰]	Ms	N. A	۰/۳	کم
[۱۱]	SIW	۱۱/۱ ٪	۱/۰۹	کم
[۱۳]	RW	۴/۵ ٪	۰/۸	زیاد
[۲۱]	GW	۵۵ ٪	۰/۲۸	متوسط
این کار	PMGW	۶ ٪	۰/۲	کم

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله یک اتصال چرخشی با تلفات کم برای کاربرد در رادارهای سنجش‌ازدور باند X در فناوری موجبر شکافی ریز نواری چاپ‌شده طراحی شد. برای این منظور، یک زیرلایه حاوی پین‌های قارچی شکل که برای کار در باند موردنظر طراحی شده بودند، به‌عنوان بخش ثابت در نظر گرفته شد و یک دیسک فلزی چرخان در ارتفاع کمی بالای آن قرار گرفت. دو کابل هم‌محور به‌عنوان دهانه‌های این ساختار در نظر گرفته شدند. ابعاد اتصال چرخشی پیشنهادی برای دستیابی به پهنای باند مناسب بهینه شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که اتصال چرخشی پیشنهادی دارای تلفات عبوری کمی در بازه فرکانسی موردنظر است که می‌توان از آن در رادارهای سنجش‌ازدور استفاده کرد.

مزیت فناوری موجبر شکافی ریز نواری چاپ‌شده در مقایسه با موجبر شکافی فلزی این است که نیازی به ماشین‌کاری CNC ندارد، بنابراین ساخت آن آسان و مقرون‌به‌صرفه است، زیرا می‌توان آن را با استفاده از فناوری برد مدارچاپی ساخت. اما پهنای باند ساختار خیلی زیاد نیست؛ زیرا ارتفاع پین‌ها قابل‌تغییر نیست. کارهای بعدی می‌تواند شامل تکنیک افزایش پهنای باند با بردهای مدارچاپی چندلایه یا ساختار اتصال چرخشی چند حفره‌ای در فناوری موجبر شکافی ریز نواری چاپ‌شده باشد. همچنین می‌توان برای بهبود قابلیت حمل توان، به طراحی اتصال چرخشی در این فناوری با استفاده از تغذیه موجبری پرداخت.

۶. مراجع

[1] I. H. Woodhouse, "Introduction to Microwave Remote Sensing," CRC Press, Boca Raton, Florida, 2017.

[2] F. T. Ulaby, et al "Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing," The University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, USA, 2014.

[3] A. Moreira, P. Prats-Iraola, M.Younis, G.Krieger, I. Hajnsek & K. P. Papathanassiou, "A tutorial on synthetic aperture radar," IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, vol. 1, no. 1, pp. 6-43, 2013. https://doi.org/ 10.1109/MGRS.2013.2248301.

[4] Li-Chung Wu, Dong-Jiing Doong, Jian-Wu Lai, "Influences of Nononshore Winds on Significant Wave Height Estimations Using Coastal X-Band Radar Images," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 60, pp. 1-11, 2022.

https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3077903.

[5] Xuejian Cao, Youcun Qi, Guangheng Ni, "X-band polarimetric radar QPE for urban hydrology: The increased contribution of high-resolution rainfall capturing," Journal of Hydrology, vol. 617 (A), 2023.

https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128905.

[6] R. Baqué, P. Dreuillet, "The Airborne SAR-System: RAMSES NG Airborne Microwave Remote Sensing Imaging System," IET International Conference on Radar Systems, pp. 1-4, 2012.

https://doi.org/10.1049/cp.2012.1598.

[7] S. Borisov and A. Shishlov, "Antennas for Satcom-on-the-move review," in Proc. Int. Conf. Eng. Telecommun., Moscow, Russia, pp. 3–7, 2014.

https://doi.org/ 10.1109/EnT.2014.12.

[8] M. T. Azim, J. Park, and S. O. Park, "Contactless linear rotary joint at Ku-band," IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., vol. 29, no. 6, pp. 373–375, 2019.

https://doi.org/10.1109/LMWC.2019.2912271.

[9] S. Ghosh and L. C. Da Silva, "Waveguide rotary joint and mode transducer structure therefor," U.S. Patent 5 442 329, 1995.

[10] E. D. Evans, "An analysis of a coupled-ring rotary joint design," IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. 40(3), pp. 577–581, 1992. https://doi.org/ 10.1109/22.121738.

[11] Z. J. Xuan and Y. J. Cheng, "Rotary joint perpendicularly fed by a substrate integrated waveguide feeder," IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. 65, no. 10, pp. 3761–3768, 2017. https://doi.org/ 10.1109/TMTT.2017.2694824.

[12] L. Zhao, J. Shi, and K. Xu, "Broadband coaxial rotary joint with simple substrate integrated waveguide feeder," IEEE Access, vol. 7, pp. 139499–139503, 2019. https://doi.org/ 10.1109/ACCESS.2019.294336.

[13] A. Yevdokymov, V. Kryzhanovskiy, V. Pazynin, and K. Sirenko, "Ka-band waveguide rotary joint," IET Microw., Antennas Propag., vol. 7, no. 5, pp. 365–369, 2013. https://doi.org/10.1049/iet-map.2012.0326.

[14] P. H. Smith and G. H. Mongold, "A high-power rotary waveguide joint," IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. MTT-12, no. 1, pp. 55–58, Jan. 1964. https://doi.org/DOI: 10.1109/TMTT.1964.1125751M. T. Azim, J. Park, and S. O. Park, "Contactless linear rotary joint at Ku-band," IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., vol. 29, no. 6, pp. 373–375, 2019. https://doi.org/10.1109/LMWC.2019.2912271.

[15] P.-S. Kildal, E. Alfonso, A. Valero-Nogueira, and E. Rajo-Iglesias, "Local Metamaterial-Based Waveguides in Gaps Between Parallel Metal Plates," IEEE Antennas and Wireless Propccagation Letters, vol. 8, pp. 84–87. 2009. https://doi.org/10.1109/LAWP.2008.2011147.

[16] A. U. Zaman, M. Alexanderson, Ti. Vukusic, P.-S. Kildal, " Gap Waveguide PMC Packaging for Improved Isolation of Circuit Components in High-Frequency Microwave Modules," IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing

Technology, vol. 4, no. 1, pp. 16-25, 2014. https://doi.org/10.1109/TCPMT.2013.2271651.

[17] M. Norozi, M.H. Ostovarzadeh, A. Razavi Parizi, "Design of V Band 4×4 Butler Matrix in Ridge Gap Waveguide Technology," Scientific Journal of Applied Electromagnetics, vol. 11, no.2, pp. 17-23, 2023 (in persian).

https://journals.ihu.ac.ir/article_208374.html

https://dorl.net/dor/20.1001.1.26455153.1402.11.2.2.5.

[18] M. H. Ostovarzadeh, S. A. Razavi Parizi, "Design of Ku Band Monopulse Antenna in Gap WaveguideTechnology," journal of Radar, vol. 8, no. 1, pp. 111-117, 2020 (in persian). https://radar.ihu.ac.ir/article_205851.html. https://dorl.net/dor/20.1001.1.23454024.1399.8.1.11.6.

[19] R. Askarzadeh, A. Farahbakhsh, D. Zarifi, A. U. Zaman, "Wideband High-Efficiency Slot Array Antenna Based on Gap Waveguide Single-Layer Feeding Network," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 24, no. 2, pp. 519-523, 2025.https://doi.org/10.1109/LAWP.2024.3506712.

[20] A. Farahbakhsh, D. Zarifi, A. Vosoogh,Carlo Bencivenni, Michal Mrozowski, " A Wideband 8 × 8 Slot Array Antenna Using Gap Waveguide MLW Coaxial Line Technology for mmWave Applications," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 24, no. 7, pp. 1974 – 1978, 2025. https://doi.org/10.1109/LAWP.2025.3552962.

[21] A. Farahbakhsh, "Wideband Rotary Joint Based on Gap Waveguide Technology" IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 69, no.10, pp. 4385-4391, 2021. https://doi.org/10.1109/TMTT.2021.3090988.

[22] A. Farahbakhsh, D. Zarifi, M. Mrozowski, "Design of mmWave Broadband Rotary Joint and 360° Beam-Steering Rotenna Based on Gap Waveguide Technology," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 73, no. 7, pp. 4373 – 4383, 2025. https://doi.org/10.1109/TAP.2025.3552222.

[23] M. Nasri, D. Zarifi, "Design and Simulation of Waveguide Rotary Joint Based on Gap Waveguide Technology for 60 GHz Applications" Journal of "Radar", vol. 8, no. 2, pp. 73-78, 2021 (in persian).

https://journals.ihu.ac.ir/article_206043.html

https://dorl.net/dor/20.1001.1.23454024.1399.8.2.7.4

[24] E. Rajo-Iglesias and P.-S. Kildal, "Numerical studies of bandwidth of parallel-plate cut-off realized by a bed of nails, corrugations and mushroom-type electromagnetic bandgap for use in gap waveguides," IET Microwaves Antennas Propag. vol. 5, no. 3, pp. 282-289, 2011. https://doi.org/10.1049/iet-map.2010.0073.

[25] H. Raza, J. Yang, P.-S. Kildal, E. Alfonso, "Microstrip-Ridge Gap Waveguide – Study of Losses, Bends and Transition to WR-15," IEEE transactions on microwave theory and techniques, vol. 62, no. 9, pp. 1943 – 1952, 2014. https://doi.org/10.1109/TMTT.2014.2327199.

[26] A. T. Hassan; M. A. M. Hassan; A. A. Kishk, "Modeling and Design Empirical Formulas of Microstrip Ridge Gap Waveguide," IEEE Access, vol. 6, pp. 51002-51010, 2018. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2869718.

[27] O. Ayop, M. K.A Rahim, "Analysis of Mushroom-like Electromagnetic Band Gap Structure Using Suspended Transmission Line Technique," IEEE International RF & Microwave Conference, pp. 258-261, 2011.

https://doi.org/10.1109/RFM.2011.6168743.