



Two-Dimensional Microwave Displacement Sensor Using Groove Gap Waveguide Structure

Mohammad Hosseinzadeh¹, Javad Ghalibafan^{2*}, Morteza Rezaee³ 

¹ Master's degree, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

² Associate Professor, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

³ Associate Professor, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Article Type: Research paper

Receive: 25 June 2025

Revise: 14 October 2025

Accept: 17 November 2025

Available online: 30 November 2025

Keywords:

Microwave sensors

Transmission zero

Displacement sensor

Groove gap waveguide (GGW)

In this paper, groove gap waveguide technology is used to design a two-dimensional microwave displacement sensor. The unique feature of the gap waveguide is lack of electrical connection between the top and bottom plates, making it an ideal choice for displacement sensors. The proposed sensor uses two quarter-wavelength short-circuited stubs in series in the wave transmission path to generate transmission zeros in frequency response. The arrangement of these stubs allows displacement detection in two dimensions. This paper investigates the effect of inserting dielectric Teflon blades to shift the transmission zero point at the short-circuited stubs. The design ensures that the two frequency ranges corresponding to transmission zeros are sufficiently spaced apart, preventing overlap and providing enough frequency range to accommodate shifts in the transmission zero frequency. The sensor operates in the frequency range of 9.35 to 9.85 GHz for horizontal displacement and 10.1 to 11 GHz for vertical displacement. The sensor sensitivity is 65 MHz/mm at both displacements.

Cite this article: M hosseinzadeh, J Ghalibafan and M Rezaee, Two-Dimensional Microwave Displacement Sensor Using Groove Gap Waveguide Structure. *Applied Electromagnetics*, vol. 13, no. 2, pp. 27- 35, 2025.

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455153.1404.13.2.4.1>



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

Publisher: Imam Hossein University

حسگر جابجایی دوبعدی ماکروویوی با استفاده از ساختار موجبر فاصله هوایی شیاردار

محمد حسین زاده^۱، جواد قالیبافان^۲، مرتضی رضایی^۳

^۱ کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

^۲ دانشیار، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

^۳ دانشیار، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

چکیده	مشخصات مقاله
این مقاله از فناوری موجبر فاصله هوایی شیاردار برای طراحی یک حسگر جابجایی دوبعدی ماکروویوی استفاده می‌کند. ویژگی منحصر به فرد موجبر فاصله هوایی، عدم وجود اتصال الکتریکی میان صفحات بالا و پایین است که آن را به گزینه‌ای مناسب برای پیاده‌سازی حسگرهای جابجایی تبدیل می‌کند. حسگر پیشنهادی از دوشاخه (stub) اتصال کوتاه به طول یک‌چهارم طول موج و به صورت سری در مسیر انتقال موج بهره می‌برد تا صفرهای انتقال در پاسخ فرکانسی ایجاد شوند. نحوه آرایش این شاخه‌ها امکان تشخیص جابجایی در دو بعد را فراهم می‌کند. در این مقاله، تأثیر ورود تیغه‌های دی‌الکتریک از جنس تفلون برای جابجایی نقطه صفر انتقال در محل شاخه‌های اتصال کوتاه بررسی شده است. طراحی به گونه‌ای انجام شده که دو بازه فرکانسی مربوط به صفرهای انتقال، به اندازه کافی از یکدیگر فاصله داشته باشند تا از هم‌پوشانی جلوگیری شود و محدوده فرکانسی لازم برای جابجایی فرکانس صفر انتقال فراهم باشد. حسگر در محدوده فرکانسی ۹/۳۵ GHz تا ۹/۸۵ GHz برای جابجایی افقی و ۱۰/۱ GHz تا ۱۱ GHz برای جابجایی عمودی عمل می‌کند. حساسیت حسگر در هر دو جابجایی ۶۵ MHz بر mm است.	تاریخچه مقاله: نوع مقاله: علمی - پژوهشی دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۴ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۲۲ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۶ ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۹/۰۹ کلیدواژه‌ها: حسگرهای ماکروویوی صفر انتقال حسگر جابجایی موجبر فاصله هوایی

استناد: محمد حسین زاده، جواد قالیبافان و مرتضی رضایی. حسگر جابجایی دوبعدی ماکروویوی با استفاده از ساختار موجبر فاصله هوایی شیاردار. *الکترومغناطیس کاربردی*. ۱۳(۲): صص ۲۷-۳۵. (۱۴۰۴).

<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455153.1404.13.2.4.1>

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

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین(ع).



OPEN ACCESS

۱- مقدمه

اندازه‌ی فشرده، حساسیت بالا، هزینه پایین در پیاده‌سازی و قابلیت کاربرد در حوزه‌های مختلف، ازجمله عواملی هستند که باعث توجه روزافزون صنعتگران و محققان به حسگرهای ماکروویوی در سال‌های اخیر شده‌اند [۱-۲]. این حسگرها، که به‌عنوان اجزایی برای تبدیل مشخصه‌های فیزیکی به مشخصه‌های ماکروویوی عمل می‌کنند، در کاربردهای گسترده‌ای ازجمله اندازه‌گیری مشخصه‌های الکترومغناطیسی مواد و عایق‌های الکتریکی [۳]، تشخیص نقص [۴]، پایش محیط [۵]، کاربردهای زیست پزشکی و بیولوژیکی [۶-۷]، تشخیص مبتنی بر میدان الکتریکی [۸]، تشخیص ضخامت و کشش [۹]، و سنجش جابجایی‌های فیزیکی و زاویه‌ای [۱۰-۱۳] به کار می‌روند. از سوی دیگر، حسگرهای ماکروویوی قادر به اندازه‌ی مشخصه‌های مکانیکی نیز هستند. این حسگرها که به‌عنوان حسگرهای جابجایی شناخته می‌شوند، توانسته‌اند دقت و کارایی اندازه‌گیری در این حوزه را به‌طور چشمگیری ارتقا دهند [۱].

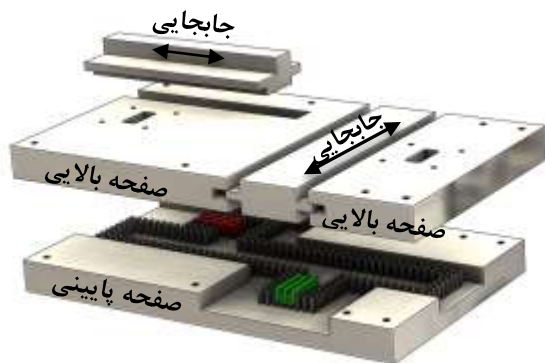
حسگرهای جابجایی ماکروویوی را می‌توان در دسته‌بندی‌های مختلفی نظیر حسگرهای خطی یک‌بعدی [۱]، دوبعدی [۱۱] و [۱۳] و حسگرهای زاویه‌ای [۱۴] طبقه‌بندی کرد. حسگرهای جابجایی ماکروویوی به دلیل ویژگی‌های برجسته‌ای همچون حساسیت بالا، هزینه پایین، پاسخ سریع، عملکرد غیرفعال و مقاومت در برابر شرایط محیطی دشوار، در مقایسه با حسگرهای نوری و سایر روش‌های رایج مانند فراصوت، خازنی و القایی، به گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای صنعتی تبدیل شده‌اند. برخی از این کاربردها شامل اتوماسیون، مهندسی هوافضا، تراز و موقعیت‌یابی هست [۱۵]. علاوه بر این، این حسگرها به‌عنوان ابزارهای تحقیقاتی نیز شناخته‌شده و در بسیاری از پروژه‌های پژوهشی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲].

فناوری خط انتقال (TL) یکی از روش‌های پرکاربرد در طراحی حسگرهای جابه‌جایی ماکروویوی است. علاوه بر این، ساختارهای موج‌بری نیز برای این منظور مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۶-۱۷]. مقالات متعددی نشان‌دهنده کارایی تکنیک خط انتقال در پیاده‌سازی حسگرهای ماکروویوی هستند که از مزایایی همچون امکان یکپارچه‌سازی، ابعاد فشرده و هزینه ساخت پایین برخوردارند [۱۳] و [۲۰-۱۸]. تلفات زیر لایه در فرکانس‌های بالا محدودیت قابل‌توجهی برای استفاده از حسگرهای جابه‌جایی و چرخشی ایجاد می‌کند. به همین دلیل،

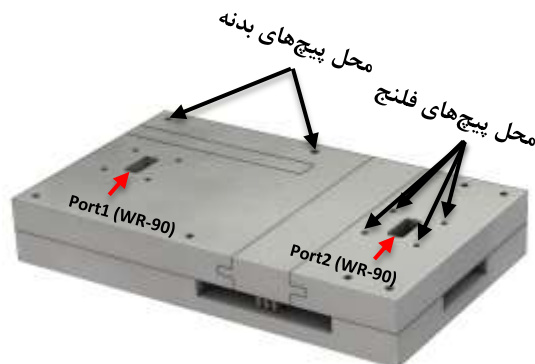
استفاده از فناوری خط انتقال در فرکانس‌های پایین متداول‌تر است [۱۳]، [۱۸] و [۲۱-۲۲]. از سوی دیگر، نیاز به تشدیدهای فرکانسی تیز و عمیق و همچنین حساسیت و ضریب کیفیت بالا (Q) موجب شده است که از ساختارهای موج‌بری نیز برای مقاصد حسگری استفاده شود. حسگرهای مبتنی بر موج‌برهای فلزی عموماً حجیم هستند، اما از اتلاف بسیار کمی برخوردارند و می‌توانند روشی مطلوب برای اندازه‌گیری جابجایی و سرعت خطی و زاویه‌ای باشند [۱۰] و [۱۲]. باین‌حال استفاده از این تکنیک در طراحی حسگرها محدود است. این امر عمدتاً به این دلیل است که هزینه‌ی بالای ساخت موج‌برهای توخالی به‌عنوان یک مانع در باندهای فرکانسی بالا نظیر موج میلی‌متری در نظر گرفته می‌شود. سازه‌های موج‌بری معمولاً در بخش‌های کوچک‌تر ساخته می‌شوند و سپس با استفاده از شیوه‌های اتصال با پیچ، پیوند انتشار یا لحیم‌کاری عمیق به یکدیگر متصل می‌شوند [۲۴-۲۳]. در باندهای فرکانس موج میلی‌متری قطعات بسیار کوچک هستند که این امر درصد خطا در فرآیند مونتاژ و نتایج ساخت را بالا می‌برد [۲۴].

فناوری موج‌بر فاصله‌هوایی، به‌عنوان یک نوع پیشرفته از موج‌برهای مستطیلی، در چند دهه اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است. این موج‌برها با استفاده از پین‌های فلزی دوره‌ای، امواج الکترومغناطیس را به‌طور مؤثری هدایت کرده و از تداخل و نشت امواج جلوگیری می‌کنند [۱۰]. این ویژگی‌ها موج‌برهای فاصله‌هوایی را به یک انتخاب مناسب برای کاربردهای پیشرفته در فرکانس‌های موج میلی‌متری و زیر میلی‌متری تبدیل کرده است. موج‌برهای فاصله‌هوایی با محدود کردن و هدایت امواج الکترومغناطیسی در راستای انتشار در درون یک موج‌بر صفحه موازی کار می‌کنند. این امر با استفاده از ساختارهای باند ممنوعه الکترومغناطیسی (EBG) محقق می‌شود. سطوح EBG با امپدانس سطحی بسیار بالا، ویژگی‌های رسانای مغناطیسی را در برخوردی معمولی امواج ترکیب می‌کنند و از انتشار امواج در یک باند فرکانسی خاص جلوگیری می‌کنند. درواقع، این مفهوم از سطوح نرم و سخت الهام گرفته‌شده است که در آن سطوح نرم مانع از انتشار امواج می‌شوند، درحالی‌که سطوح سخت اجازه انتشار امواج را می‌دهند [۲۶-۲۵]. به‌طور عمومی، فناوری مربوطه برای حل مشکل اتلاف توانی که از اتصال الکتریکی ناقص بین بخش‌های موج‌برهای معمولی توخالی اتفاق می‌افتد به کار می‌رود. ازاین‌رو، فناوری موج‌بر فاصله‌هوایی از فاصله‌بند انتشار ارائه‌شده توسط یک جفت موازی از هادی الکتریکی کامل (PEC)

موج بر اصلی به صورت اتصال باز دیده شده و در نتیجه یک صفر انتقال در پاسخ فرکانسی موج بر ایجاد خواهد شد. برای پیاده سازی حسگر دوبعدی، دوشاخه اتصال کوتاه مجزا و در دو راستای افقی و عمودی استفاده شده است. هرکدام از این شاخه ها که دارای طول متفاوت می باشند، صفر انتقال در بازه متفاوت ایجاد خواهند نمود. در انتها نیز برای تغییر فرکانس صفر انتقال در اثر جابجایی،



شکل (۱). نمای سه بعدی از حسگر جابجایی دوبعدی پیشنهادی در بستر موج بر فاصله هوایی شیاردار



شکل (۲). نمایش حسگر جابجایی دوبعدی مونتاژ شده، جایی که ابعاد دو درگاه تحریک متناسب با استاندارد WR-۹۰ هست.

شاخه ها با دی الکتریک متحرک بارگذاری شده اند. ساختار حسگر پیشنهادی که در موج بر GGW پیاده سازی شده است در شکل (۲) قابل مشاهده است. با توجه به این شکل، برای استحکام بالا و عدم جابجایی صفحات، پیچ هایی در طرفین بدنه در نظر گرفته شده است. با توجه به این که حسگر در محدوده GHz ۹/۳۵ تا ۱۱ GHz کار می کند، از دو درگاه تحریک متناسب با استاندارد موج بر مستطیلی WR-۹۰ و باند فرکانسی X استفاده شده است. به دلیل استفاده از فلنج در تغذیه این حسگر، محل طراحی درگاه های تحریک از صفحه بالایی هست. در این صورت باید یک مسیر انتقال موج از فلنج به موج بر فاصله هوایی

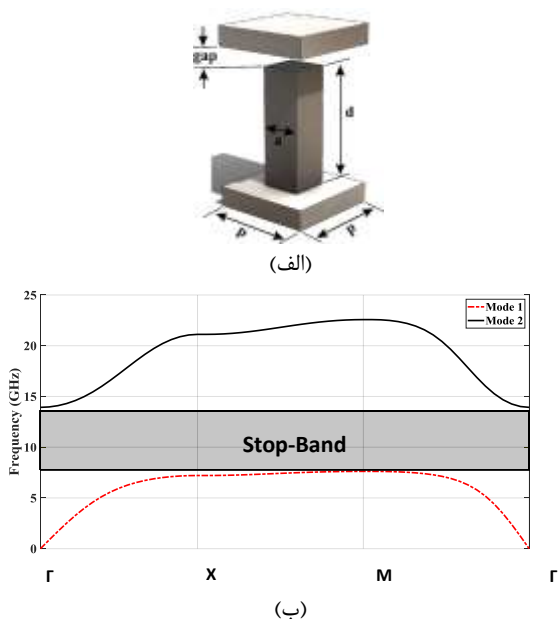
و هادی مغناطیسی کامل (PMC) بهره می برد. با در نظر گرفتن فاصله ی بین این دو سطح کمتر از یک چهارم طول موج، این امکان فراهم می شود تا دیواره های جانبی یک موج بر معمولی را با ساختار موازی PEC-PMC جایگزین کرد. بنابراین، موج بر از نیاز به اتصال الکتریکی میان سطوح رسانای بالا و پایین بی نیاز می شود. در این حالت، نکته جالب توجه وجود دو بخش مجزا در موج بر های شکافی است که اصل اساسی حسگر ارائه شده در این مطالعه هست [۱۲].

پژوهش [۱۲] به معرفی یک حسگر جابجایی و یک حسگر چرخشی مبتنی بر تغییر فاز انتقال در فناوری GGW می پردازد. در این ساختار بخشی از پین ها در سطح بالایی قرار دارند که با جابجایی طولی سطح بالایی نسبت به سطح پایینی، طول تشدیدگر و در نتیجه فرکانس تشدید تغییر می کند. همچنین، فاز موج منعکس شده یا منتقل شده می تواند برای حسگر جابجایی استفاده شود. همچنین پژوهش [۲۷] یک تغییر دهنده فاز مبتنی بر فناوری موج بر فاصله هوایی شیاردار را برای کاربردهای باند Ku معرفی می کند. مبنای عملکرد این تغییر دهنده فاز، تنظیم دیواره جانبی GGW است که منجر به تغییر ثابت انتشار و تغییر فاز می شود. شبیه سازی ها و نتایج اندازه گیری نشان می دهند که تغییر دهنده فاز به نتایج قابل قبولی رسیده است و در محدوده فرکانسی ۱۲ GHz تا ۱۷ GHz به طور مؤثر عمل می کند. لازم به ذکر است که هر روش و ساختار، مزایا و محدودیت های خود را دارد که باید با توجه به شرایط محیطی و انتظارات کاربردی، مورد ارزیابی دقیق تر قرار گیرد.

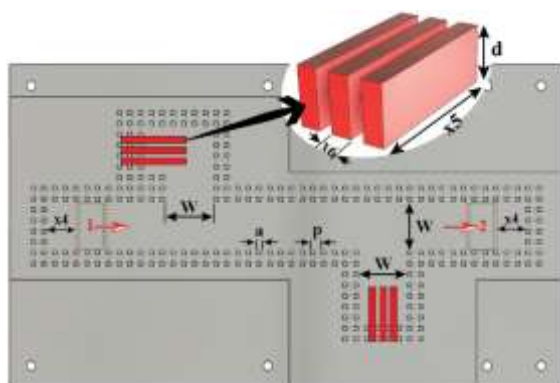
این مقاله یک حسگر جابجایی دوبعدی ماکروویوی مبتنی بر فناوری موج بر فاصله هوایی شیاردار ارائه می کند. در بخش دوم مقاله، اعتبارسنجی مفهوم حسگر پیشنهادی از طریق طراحی و شبیه سازی تمام موج انجام می شود. سپس، عملکرد حسگر بررسی شده و در بخش سوم با سایر حسگرهای جابجایی دوبعدی مقایسه می شود. در بخش چهارم، نتایج این بررسی ها تحلیل شده و نتیجه گیری نهایی ارائه می گردد.

۲- طراحی حسگر جابجایی دوبعدی

نمای سه بعدی حسگر پیشنهادی مبتنی بر فناوری موج بر فاصله هوایی شیاردار در شکل (۱) قابل مشاهده است. اساس طراحی حسگر بر مبنای بارگذاری یک خط انتقال موج بری با شاخه سری هست. با فرض اینکه شاخه سری دارای طول برابر با ربع طول موج بوده و انتهای آن اتصال کوتاه شده باشد، از محل اتصال آن به



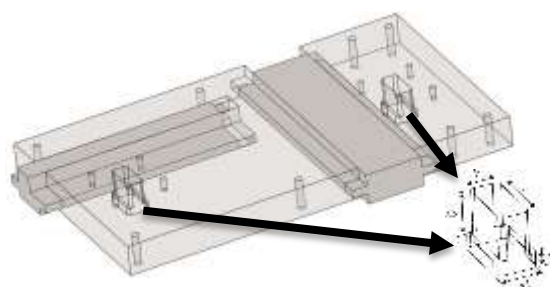
شکل (۴). (الف) سلول واحد طراحی شده برای حسگر جایجایی دوبعدی؛ در این سلول $d = 8/75 \text{ mm}$ ، $p = 5 \text{ mm}$ ، $a = 2 \text{ mm}$ و $\text{gap} = 1/41 \text{ mm}$ در نظر گرفته شده است و (ب) محاسبه نمودار پراکندگی برای ساختار سلول واحد



شکل (۵). بررسی صفحه پایینی حسگر پیشنهادی از نمای بالا، جایی که $x_6 = 2/9 \text{ mm}$ و $x_5 = 25 \text{ mm}$ ، $x_4 = 10 \text{ mm}$ ، $w = 23 \text{ mm}$ هست.

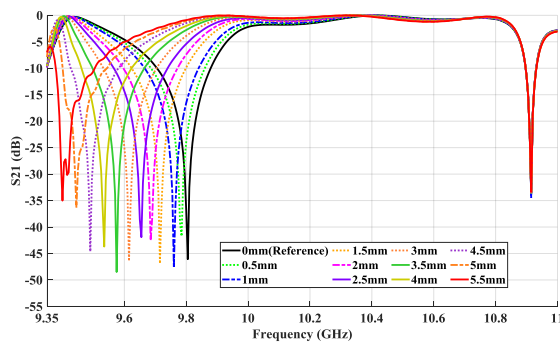
برای دستیابی به قابلیت سنجش دوبعدی، یکی از شاخه‌ها با چرخشی ۹۰ درجه طراحی شده است. همان‌طور که در این مقاله توضیح داده شده، اگر طول فیزیکی شاخه‌ها ضریب عدد فردی از یک‌چهارم طول موج در فرکانس کاری باشد، انتهای شاخه‌های اتصال کوتاه به حالت اتصال باز تبدیل می‌شود که این امر موجب ایجاد انقطاع در عبور موج خواهد شد. طراحی باید به گونه‌ای انجام شود که دو بازه فرکانسی مربوط به تشکیل صفر انتقال به اندازه کافی از یکدیگر فاصله داشته باشند تا از همپوشانی جلوگیری شده و فضای فرکانسی لازم برای جایجایی صفر انتقال فراهم شود. برای به حداکثر رساندن حساسیت حسگر، در هر شاخه از سه ردیف تیغه‌های دی‌الکتریک با ابعاد یکسان

همانند شکل (۳) طراحی شود. ساختار هندسی سلول واحد با در نظر گرفتن شرایط مرزی متناوب به همراه ابعاد طراحی شده در شکل (۴) الف) قابل مشاهده است. با توجه به این شکل مجموع ارتفاع پین و ارتفاع فاصله هوایی، $10/16 \text{ mm}$ طراحی شده است که متناسب با ارتفاع یک موج بر استاندارد WR-۹۰ هست. شکل (۴) ب) نمودار پراکندگی سلول واحد متناوب را برای مدهای مرتبه اول و دوم نشان می‌دهد. مطابق با این شکل، ابعاد طراحی شده به گونه‌ای است که باند توقف سلول‌های واحد محدوده فرکانسی $7/7 \text{ GHz}$ تا 13 GHz را پوشش می‌دهد. برای کاهش نشتی امواج الکترومغناطیس، در طراحی حسگر پیشنهادی از دو ردیف سلول واحد استفاده شده است به گونه‌ای که سیگنال امکان نشت از طریق فاصله هوایی را نداشته باشد و صرفاً در کانال‌های تعبیه شده منتشر شود. شکل (۵) چیدمان این سلول‌ها و محل ورود تیغه‌های دی‌الکتریک را نشان می‌دهد. در این طراحی تیغه‌های دی‌الکتریک از جنس تفلون نسوز (PTFE) با گذردهی نسبی $\epsilon_r = 2/1$ انتخاب شده‌اند. برای ساخت حسگر موردنظر می‌بایست مشابه روش استفاده شده در [۱۰] از تکنیک‌های ماشین‌کاری دقیق با استفاده از CNC روی آلومینیوم استفاده گردد. بخش بالایی و پایینی به صورت مجزا ماشین‌کاری شده و روی یکدیگر قرار داده شده و پیچ شوند. برای دی‌الکتریک نیز می‌توان بردهای فرکانس بالای موجود پس از برداشتن لایه مس آن استفاده نمود. دی‌الکتریک به بخش زیرین لایه بالایی چسب زده می‌شود. در این حسگر از دوشاخه اتصال کوتاه که به صورت سری با خط انتقال قرار گرفته‌اند، استفاده شده است.



شکل (۶). طراحی مسیر انتقال از فلنج به موج‌بر فاصله هوایی در حسگر جایجایی پیشنهادی. ابعاد مسیر انتقال به صورت $x_1 = 14/16 \text{ mm}$ ، $x_2 = 5 \text{ mm}$ ، $x_3 = 15 \text{ mm}$ ، $x_4 = 22/86 \text{ mm}$ ، $a = 10/16 \text{ mm}$ و $b = 10/16 \text{ mm}$ هست.

قرار دارد، درحالی که صفر انتقال دوم که به شاخه اول مربوط می شود، در فرکانس $10/905$ GHz و به صورت جابجا شونده ظاهر می شود. در این شبیه سازی تیغه های دی الکتریک در شاخه اول با گام های $0/5$ mm و تا حداکثر $7/5$ mm جابجا شده اند. فرکانس صفرهای انتقال مربوط به شاخه، بدون توجه به میزان جابجایی، در یک فرکانس ثابت باقی مانده اند. در این حالت، میزان جابجایی فرکانس صفر انتقال 600 MHz اندازه گیری شده است.

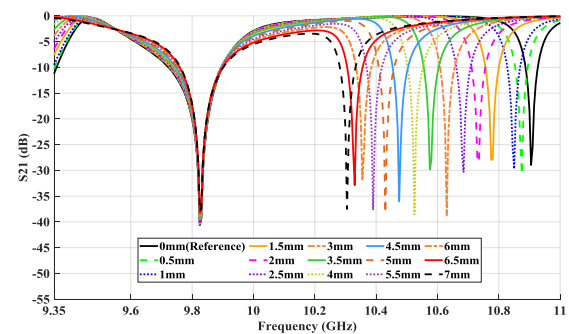


شکل (۸). بررسی جابجایی فرکانس صفر انتقال در حسگر جابجایی پیشنهادی به ازای جابجایی تیغه های دی الکتریک در شاخه دوم

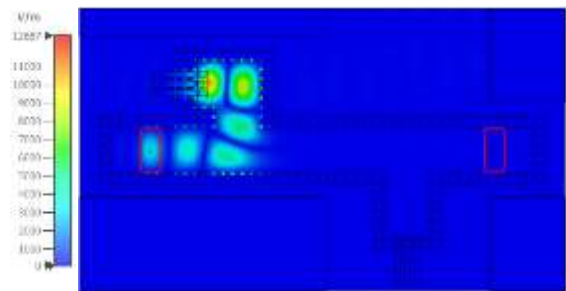
شکل (۷) توزیع میدان الکتریکی را در شرایطی که تیغه های دی الکتریک به اندازه 6 mm وارد شاخه اول شده اند، نمایش می دهد. با توجه به این که جابجایی تنها در راستای افقی انجام می شود، میدان الکتریکی صرفاً در ناحیه درگاه تحریک و شاخه اول منتشر می شود. به دلیل وجود شاخه با طولی برابر یک چهارم طول موج، انتشار موج در همان ناحیه متوقف شده و از رسیدن به درگاه تحریک دوم جلوگیری می شود. این توزیع میدان برای تمامی صفرهای انتقال در محدوده فرکانسی مربوط به جابجایی اول مشابه است. بر اساس این شکل، تیغه های دی الکتریک مربوط به جابجایی دوم در تمام مراحل خارج از شاخه دوم قرار دارند و تأثیری بر نتایج شبیه سازی نمی گذارند. با توجه به هم پاسخ بودن حسگر پیشنهادی، رفتار توزیع میدان الکتریکی از درگاه تحریک دوم مشابه با درگاه تحریک اول است.

نتایج شبیه سازی نمودار پاسخ انتقال حسگر جابجایی دوبعدی، برای جابجایی تیغه های دی الکتریک مربوط به شاخه دوم در شکل (۸) نشان داده شده است. با توجه به این شکل، اگر تیغه های دی الکتریک مربوط به شاخه دوم با گام های $0/5$ mm جابجا شوند، دو محدوده صفر انتقال ایجاد می شود. صفر انتقال اول مربوط به شاخه دوم است و در فرکانس $9/82$ GHz ایجاد می شود. صفر انتقال دوم مربوط به شاخه اول است و در فرکانس $10/905$ GHz قرار دارد. در این شبیه سازی تیغه های

استفاده شده است. با ورود بیشتر تیغه های دی الکتریک به داخل شاخه ها، طول الکتریکی میدان تغییر می کند. این تغییر طول، باعث جابجایی محل فرکانس صفر انتقال می شود که این امر معیار مناسبی برای ساخت یک حسگر جابجایی هست. هنگام جابجایی تیغه های دی الکتریک در شاخه اول، تنها فرکانس صفر انتقال مرتبط با این شاخه باید تغییر کند، درحالی که فرکانس صفر انتقال شاخه دوم بدون تغییر باقی بماند. این شرط برای شاخه دوم نیز به همین صورت برقرار است.



شکل (۶). بررسی جابجایی فرکانس صفر انتقال در حسگر جابجایی پیشنهادی به ازای جابجایی تیغه های دی الکتریک در شاخه اول



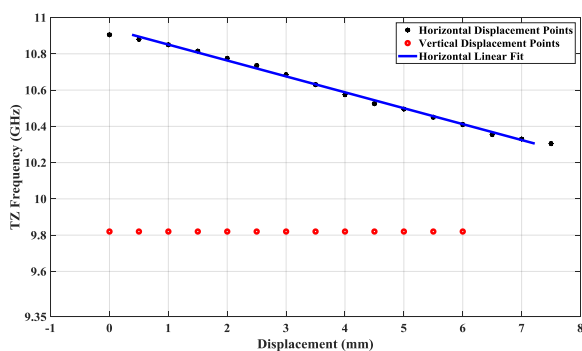
شکل (۷). نمایش توزیع میدان الکتریکی در فرآیند جابجایی تیغه های دی الکتریک مربوط به شاخه اول

رعایت این اصل منجر به طراحی یک حسگر جابجایی دوبعدی می شود. در هر دو مسیر جابجایی، نقطه مرجع زمانی تعریف می شود که تیغه های دی الکتریک به میزان $2/5$ mm وارد شاخه های اتصال کوتاه شوند.

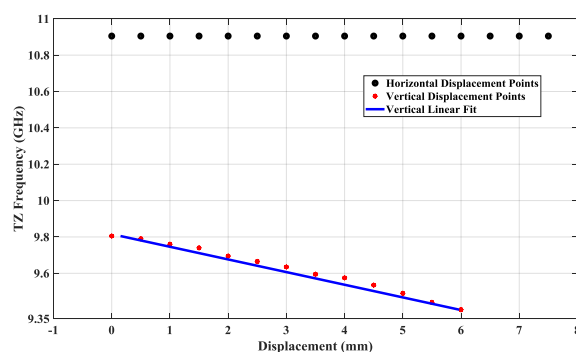
۳- شبیه سازی و تحلیل نتایج حسگر جابجایی دوبعدی

شکل (۶) نتیجه شبیه سازی نمودار پاسخ انتقال حسگر جابجایی دوبعدی را در اثر جابجایی تیغه های دی الکتریک در شاخه اول نشان می دهد. همان طور که در شکل (۶) مشاهده می شود، دو صفر انتقال در دو محدوده فرکانسی تشکیل شده است. صفر انتقال اول، مربوط به شاخه دوم، در فرکانس ثابت $9/82$ GHz

جدول (۱) عملکرد حسگر جابجایی دوبعدی پیشنهادی را با سایر حسگرهای جابجایی ماکروویوی و باهدف مشابه مقایسه می‌کند. حسگر پیشنهادی با بهره‌گیری از فناوری موج‌بر فاصله هوایی و حذف زیر لایه‌های تلفاتی، از قابلیت مقیاس‌پذیری و استفاده در فرکانس‌های بالاتر برخوردار است. این ویژگی همراه با ساختار فلزی حسگر، منجر به تحمل توان‌های بالاتر و ارائه حساسیت متقارن در جابجایی‌های افقی و عمودی شده است که آن را به گزینه‌ای قابل توجه نسبت به نمونه‌های پیشین تبدیل می‌کند. باهدف بررسی تأثیر تغییرات دما بر حساسیت حسگر پیشنهادی، شبیه‌سازی جامعی برای تمام مراحل جابجایی دوبعدی در دماهای ۳۰-، ۲۰ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد انجام شده است. شکل ۱۱ تغییرات فرکانس صفر انتقال برحسب جابجایی مکانیکی را برای دو مسیر جابجایی در دماهای یادشده نمایش می‌دهد. این نتایج بیان می‌کنند که حسگر پیشنهادی حساسیت کمی به تغییرات دما دارد و برای کاربردهای صنعتی مناسب است.



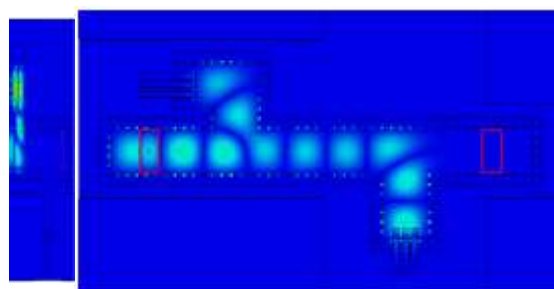
(الف)



(ب)

شکل (۱۰). تغییرات فرکانس صفر انتقال در مقابل جابجایی مکانیکی (الف) جابجایی افقی تیغه‌های دی‌الکتریک در شاخه اول و (ب) جابجایی عمودی تیغه‌های دی‌الکتریک در شاخه دوم

دی‌الکتریک در شاخه دوم تا اندازه ۶ mm جابجا شده‌اند. مطابق شکل (۸)، صفرهای انتقال مربوط به شاخه اول، بدون توجه به میزان جابجایی، در یک فرکانس ثابت باقی می‌مانند. میزان جابجایی فرکانس صفر انتقال در این شبیه‌سازی ۴۰۵ MHz هست. شکل (۹) توزیع میدان الکتریکی را در شرایطی که تیغه‌های دی‌الکتریک به اندازه ۶ mm وارد شاخه دوم شده‌اند، نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، مبنای انتشار موج درگاه تحریک اول هست. همچنین تیغه‌های دی‌الکتریک مربوط به جابجایی افقی در تمامی مراحل خارج از شاخه اول بوده و تأثیری در نتایج شبیه‌سازی ندارند.



شکل (۹). نمایش توزیع میدان الکتریکی در فرآیند جابجایی تیغه‌های دی‌الکتریک مربوط به شاخه دوم

یکی از ویژگی‌های برجسته حسگر پیشنهادی، نمایش رفتار خطی در پاسخ به جابجایی تیغه‌های دی‌الکتریک است. شکل (۱۰). (الف) تغییرات فرکانس صفر انتقال را در اثر جابجایی افقی تیغه‌های دی‌الکتریک در شاخه اول نشان می‌دهد؛ درحالی‌که شکل (۱۰). (ب) تغییرات فرکانس صفر انتقال را در اثر جابجایی عمودی تیغه‌های دی‌الکتریک در شاخه دوم نمایش می‌دهد. این شکل‌ها به روشنی رفتار خطی حسگر پیشنهادی را نشان می‌دهند که می‌توان آن را با استفاده از رابطه (۱) برای جابجایی افقی و رابطه (۲) برای جابجایی عمودی مدل‌سازی کرد.

$$F_1(x) = -11/4 x + 124/7 \quad (1)$$

$$F_2(x) = -14/36 x + 141 \quad (2)$$

در رابطه‌های (۱) و (۲)، x بیانگر فرکانس صفر انتقال برحسب گیگاهرتز و F نشان‌دهنده جابجایی به میلی‌متر است. تاکنون حسگر جابجایی دوبعدی مشابهی بر مبنای GGW گزارش نشده است. حسگر پیشنهادی با الهام از کار قبلی نویسندگان در [۱۰] برای سنجش جابجایی یک‌بعدی توسعه‌یافته و با استفاده از تیغه دی‌الکتریک، قابلیت سنجش دوبعدی را فراهم کرده است.

جدول (۱). مقایسه عملکرد حسگر جابجایی دوبعدی پیشنهادی با سایر

حسگرهای مشابه

مرجع	فناوری	مبنای سنجش	فرکانس (GHz)	میانگین حساسیت
[۱۳]	ML: DGS	جابجایی فرکانس TZ در پاسخ S_{21}	جابجایی افقی: ۳-۵ GHz/mm جابجایی عمودی: ۶-۱۰ GHz/mm	۰/۴۱
[۲۸]	ML: BC-SRR	جابجایی فرکانس TZ در پاسخ S_{21}	۲/۵	افقی: ۰/۱ GHz/mm عمودی: ۰/۰۸ GHz/mm
[۱۷]	ML: CSRR	جابجایی فرکانس در پاسخ S_{21}	۱/۴-۲/۲	افقی: ۰/۰۹ GHz/mm عمودی: ۰/۰۷۳ GHz/mm
[۱۱]	ML: DR	تغییر دامنه در فرکانس ثابت در پاسخ S_{11}	۳/۶۷	افقی و عمودی: ۱/۰۴ dB/mm مورب: ۱/۱۴ dB/mm
[۱۱]	GGW	جابجایی فرکانس TZ در پاسخ S_{21}	۱۰/۴-۱۱/۲	یکبعدی افقی: ۱۰۰ MHz/mm
حسگر پیشنهادی	GGW	جابجایی فرکانس TZ در پاسخ S_{21}	۹/۳۵-۱۱	افقی: ۶۵ MHz/mm عمودی: ۶۵ MHz/mm

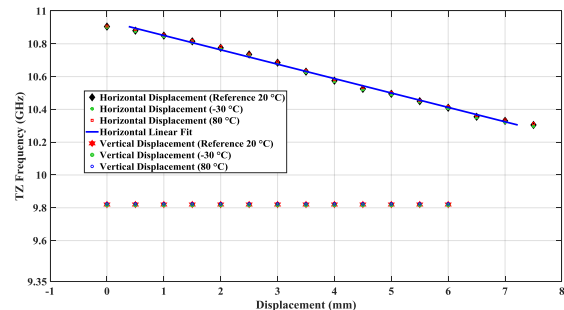
* ML = Microstrip Line, ** DGS = Defected Ground Structure, *** BC-SRR = Broadside-Coupled Split Ring Resonators, **** DR = Dielectric Resonator

این مقاله به طراحی و شبیه‌سازی یک حسگر جابجایی دوبعدی مبتنی بر فناوری موج بر فاصله هوایی شیاردار می‌پردازد که قادر است جابجایی‌ها را در دو جهت و با دقت بالا اندازه‌گیری کند. طراحی حسگر به گونه‌ای انجام شده است که با رعایت فاصله کافی بین دو بازه فرکانسی تشکیل صفر انتقال، همپوشانی رخ نمی‌دهد. جابجایی تیغه‌های دی‌الکتریک در هر شاخه به‌طور مستقل منجر به تغییر فرکانس صفر انتقال مربوط به آن شاخه می‌شود، درحالی‌که فرکانس صفر انتقال دیگری ثابت باقی می‌ماند. این ویژگی کلیدی باعث می‌شود حسگر بتواند هر دو جهت جابجایی را به‌صورت مستقل شناسایی کند.

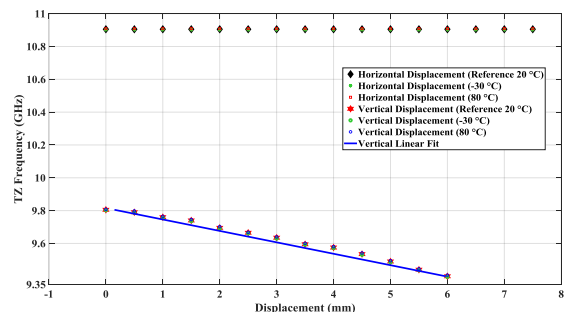
نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که حسگر پیشنهادی عملکرد مطلوبی دارد و می‌تواند به‌عنوان یک گزینه مناسب در باند موج میلی‌متری نیز به کار گرفته شود. حسگر در محدوده فرکانسی ۹/۳۵ GHz تا ۹/۸۵ GHz برای جابجایی افقی و ۱۰/۱ GHz تا ۱۱ GHz برای جابجایی عمودی عمل می‌کند و حساسیت ۶۵ MHz بر mm در هر دو مسیر جابجایی دارد. مقایسه این حسگر با سایر حسگرهای جابجایی دوبعدی موجود، نشان‌دهنده مزیت‌های قابل‌توجهی از جمله دقت بالا، پایداری فرکانسی و مقیاس‌پذیری فرکانسی است. این پژوهش نه تنها یک رویکرد نوین برای سنجش جابجایی دوبعدی ارائه می‌دهد، بلکه زمینه‌ساز توسعه فناوری‌های پیشرفته‌تر در حوزه حسگرهای ماکروویوی و باند موج میلی‌متری هست.

۵- مراجع

- [1] Zhang, Zhuowei, Chi-Hou Chio, Kam-Weng Tam, Gang Zhang, Xin Zhou, Cheng Teng, and Ngai Kong. "Microwave Displacement Sensors Based on Filtering Phase Shifter with Chebyshev Response." IEEE Sensors Journal, vol. 24, no. 10, pp. 15857-15864, 2024.
- [2] Chio, Chi-Hou, Roberto Gomez-Garcia, Li Yang, Kam-Weng Tam, Wai-Wa Choi, and Sut-Kam Ho. "An Angular-Displacement Microwave Sensor Using an Unequal-Length-Bi-Path Transversal Filtering Section." IEEE Sensors Journal, vol. 20, no. 2, pp. 715-722, 2019.
- [3] Arda Seçme, Uzay Tefek, Burak Sarı, Hadi Sedaghat Pisheh, H. Dilara Uslu, Özge Akbulut, Berk Kucukoglu, et al. "High-Resolution Dielectric Characterization of Single Cells and Microparticles Using Integrated Microfluidic Microwave Sensors." IEEE Sensors Journal, vol. 23, no. 7, pp. 6517-6529, 2023.
- [4] Hernandez-Aguila, Miguel, Jose-Luis Olvera-Cervantes, Edel-Serafin Hernandez-Gomez, and Alonso Corona-Chavez. "Displacement Sensor with High Sensitivity and Linearity Based on a Half-Wavelength SIR for Crack Width Measurement." IEEE Sensors Journal, vol. 24, no. 8, pp. 12332-12339, 2024.



(الف)



(ب)

شکل (۱۱). بررسی تأثیر تغییرات دما بر تغییر فرکانس صفر انتقال در

محدوده جابجایی مکانیکی حسگر پیشنهادی در (الف) جابجایی افقی

تیغه‌های دی‌الکتریک در شاخه اول و (ب) جابجایی عمودی تیغه‌های

دی‌الکتریک در شاخه دوم

Electromagnetics, vol. 7, no. 2, 2020, (In Persian). dor: 20.1001.1.26455153.1398.7.2.11.6.

[21] Jahangiri, Payam, Mohammad Naser-Moghadasi, Behbod Ghalamkari, and Massoud Dousti. "A New Planar Microwave Sensor for Fat-Measuring of Meat Based on SRR and Periodic EBG Structures." *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 346, 113826, 2022.

[22] Yi, Zhenxiang, and Chuxi Wang. "Noninvasive Glucose Sensors Using Defective-Ground-Structure Coplanar Waveguide." *IEEE Sensors Journal*, vol. 23, no. 1, pp. 195–201, 2023.

[23] Rahiminejad, S., A.U. Zaman, E. Pucci, H. Raza, V. Vassilev, S. Haas, P. Lundgren, P.-S. Kildal, and P. Enoksson. "Micromachined Ridge Gap Waveguide and Resonator for Millimeter-Wave Applications." *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 186, pp. 264–269, 2012.

[24] Wang, Jie, Yongle Wu, Weimin Wang, and Li Ma. "Wideband Mm-Wave High-Gain Multibeam Antenna Array Fed by 4×4 Groove Gap Waveguide Butler Matrix with Modified Crossover." *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 154, 154287, 2022.

[25] Per-Simon Kildal, Eduardo C Alfonso, Alejandro Valero-Nogueira, and Eva Rajo-Iglesias. "Local Metamaterial-Based Waveguides in Gaps between Parallel Metal Plates." *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, pp. 84–87, 2009.

[26] Palomares-Caballero, Angel, Antonio Alex-Amor, Pablo Escobedo, Juan Valenzuela-Valdes, and Pablo Padilla. "Low-Loss Reconfigurable Phase Shifter in Gap-Waveguide Technology for mm-Wave Applications." *IEEE Transactions on Circuits and Systems II-Express Briefs*, vol. 67, no. 12, pp. 3058–3062, 2020.

[27] Abdollahy, Hassan, Ali Farahbakhsh, and Mohammad Hossein Ostovarzadeh. "Mechanical Reconfigurable Phase Shifter Based on Gap Waveguide Technology." *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 132, 153655, 2021.

[28] Horestani, Ali K, Jordi Naqui, Zahra Shaterian, Derek Abbott, Christophe Fumeaux, and Ferran Martín. "Two-Dimensional Alignment and Displacement Sensor Based on Movable Broadside-Coupled Split Ring Resonators." *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 210, pp.18–24, 2014.

[5] Hatem El Matbouly, Naïmi Boubekeur, and Frédéric Domingue. "Passive Microwave Substrate Integrated Cavity Resonator for Humidity Sensing." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 63, no. 12, pp. 4150–4156, 2015.

[6] Charvadeh, Sina Rahmani, Mohammad Hosseinzadeh, and Javad Ghalibafan. "The EBG-Based Biosensor for Setting the Appropriate Dialysis Time in Hemodialysis Process." *IEEE Sensors Journal*, vol. 23, no. 15, pp. 17619–17626, 2023.

[7] Charvadeh, Sina Rahmani, and Javad Ghalibafan. "Investigation of Textile Permittivity under the Influence of Fever for Designing a Wearable Temperature Sensing Antenna." *Biosensors and Bioelectronics: X*, vol. 12, 100264, 2022.

[8] Noras, Maciej A. "Activity Detection and Recognition with Passive Electric Field Sensors." *IEEE Transactions on Industry Applications* 58, no. 1 (2021): 800–806.

[9] Lee, Chieh-Sen, and Chin-Lung Yang. "Single-Compound Complementary Split-Ring Resonator for Simultaneously Measuring the Permittivity and Thickness of Dual-Layer Dielectric Materials." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 63, no. 6, pp. 2010–2023, 2015.

[10] Mohammad Hosseinzadeh, Javad Ghalibafan, Morteza Rezaee, and Ali Kheiridoost, "A High-Resolution Microwave Displacement Sensor Based on Interferometry in Groove Gap Waveguide Technology." *IEEE Sensors Journal*, vol. 24, no. 24, pp. 40774–40780, 2024.

[11] Regalla, Premsai, and A. V. Praveen Kumar. "Two-Dimensional Wide Dynamic Range Displacement Sensor Using Dielectric Resonator Coupled Microwave Circuit." *IEEE Sensors Journal*, vol. 23, no.24, pp. 30222–30230, 2023.

[12] Horestani, Ali K., Zahra Shaterian, and Michal Mrozowski. "High Dynamic Range Microwave Displacement and Rotation Sensors Based on the Phase of Transmission in Groove Gap Waveguide Technology." *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 1, pp. 182–189, 2022.

[13] Morteza Rezaee, and Mojtaba Joodaki. "Two-Dimensional Displacement Sensor Based on CPW Line Loaded by Defected Ground Structure with Two Separated Transmission Zeroes." *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 4, pp. 994–999, 2017.

[14] Teng, Cheng, Chi-Hou Chio, Kam-Weng Tam, and Pui-Yi Lau. "An Angular Displacement Microwave Sensor with 360° Dynamic Range Using Multi-Mode Resonator." *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 3, pp. 2899–2907, 2021.

[15] Jha, Abhishek Kumar, Adam Lamecki, Michal Mrozowski, and Maurizio Bozzi. "A Microwave Sensor with Operating Band Selection to Detect Rotation and Proximity in the Rapid Prototyping Industry." *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 1, pp. 683–693, 2021.

[16] Chataut, Robin, and Robert Akl. "Massive MIMO Systems for 5G and beyond Networks—Overview, Recent Trends, Challenges, and Future Research Direction." *Sensors*, vol. 20, no. 10, pp. 2753, 2020.

[17] M. Norozi, M. H. Ostovarzadeh, and S. A. R. Parizi, "Design of V Band 4×4 Butler Matrix in Ridge Gap Waveguide Technology," *Journal of Applied Electromagnetics*, vol. 11, no. 2, 2023, (In Persian). dor: 20.1001.1.26455153.1402.11.2.2.5.

[18] Ren, Kewei, Peng-Wen Zhu, Tongwen Sun, Junchao Wang, Dawei Wang, Jun Li, and Wen- Sheng Zhao. "A Complementary Split-Ring Resonator (CSRR)-Based 2D Displacement Sensor." *Symmetry*, vol. 14, no. 6, 1116, 2022.

[19] Zahra Shaterian, and Michal Mrozowski. "Multifunctional Bandpass Filter/Displacement Sensor Component." *IEEE Access*, vol. 11, pp. 27012–27019, 2023.

[20] M. S. Dehghani and D. Zarifi, "Design of Power Divider Based on Gap Waveguide Technology for Use in Low Sidelobe Level 60-GHz Slot Array Antenna," *Journal of Applied*