

آنتن موج نشتی شبه پلاسمون پلاریتون سطحی تک لایه با قطبش دایروی مبتنی بر تکنیک هولوگرافیک

سجاد زهره وند^۱ نادر کمجانی^۲

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و صنعت ایران- تهران- ایران

sajjad_zohrevand@elec.iust.ac.ir

۲- دانشیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و صنعت ایران - تهران- ایران

n_komjani@iust.ac.ir

چکیده: در این مقاله با استفاده از تکنیک هولوگرافیک، یک آنتن موج نشتی مبتنی بر فناوری شبه پلاسمونیک با قطبش دایروی طراحی شده است. برای کنترل کردن قطبش پرتوی تابشی ساختار موج نشتی، اولین بار با استفاده از یک سلول واحد ناهمسانگرد (دارای شکل صلیبی) بدون صفحه زمین، سطح امپدانس (هولوگرام) پیاده سازی شود. برای ناهمسانگرد کردن سلول واحد پیشنهادی از ترکیب روابط تبدیل نوری و الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات استفاده شده است. تغییر ابعاد دو بازوی صلیب و زاویه چرخش صلیب، اجزا مورد نیاز تانسور امپدانس سطح برای تحقق هولوگرام را تعیین می کند. میزان بهره واقعی، بازده تشعشعی، سطح گلبرگ جانبی و پهنای باند نسب محوری به ترتیب $15.3dBi$ ، 82% ، $-11dB$ و 11.8% می باشد. میزان مرور زاویه ای 15° با تغییر فرکانس از 16 تا 18 گیگاهرتز به دست آمده است. نتایج شبیه سازی با استفاده از نرم افزارهای متلب و CST آورده شده است.

واژه های کلیدی: SSPP، آنتن موج نشتی، تکنیک هولوگرافیک، فراسطح ناهمسانگرد، قطبش دایروی.

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.20.3.1

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۶/۲۳

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۱/۸/۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۹/۱۰

نام نویسنده مسئول: دکتر نادر کمجانی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - میدان رسالت - خیابان هنگام - خیابان دانشگاه - دانشگاه علم و صنعت ایران - دانشکده برق

۱- مقدمه

پیشرفت های شگرف در حوزه فناوری های مرتبط با اپتیک و فوتونیک که از حدود شش دهه پیش با اختراع لیزر و فیبر نوری آغاز شده است، با سرعت قابل ملاحظه ای تا به امروز در حال پیگیری است. پهنای باند بی نظیر به همراه بازده بالایی که سیستم های انتقال فیبر نوری در مقایسه با موارد مشابه الکترونیکی ارائه می دهند باعث شده که توجه بیشتر محققین رشته های مخابرات و الکترونیک، به حوزه فوتونیک و علوم مرتبط معطوف شود. در این میان با ظهور فناوری های ساخت و اندازه گیری در حوزه نانو و همچنین گسترش روزافزون قابلیت های پردازش و تحلیل عددی ساختارهای پیچیده، شاخه ای از علم فوتونیک به نام "نانو فوتونیک" که به تحلیل و کنترل برهمکنش نور و ماده در ابعاد بسیار کمتر از طول موج می پردازد، مورد توجه ویژه قرار گرفته است. یکی از شاخه های رو به گسترش نانو فوتونیک، «پلاسمونیک» است. «علم پلاسمونیک» زیرمجموعه ای از علم فوتونیک است که به بررسی فرایندهای فیزیکی می پردازد که منجر به تحدید (متمرکزسازی) نور و هدایت آن در ساختارهای فلزی-دی الکتریکی می گردد [۱]. به طور دقیق تر، هدف اصلی در پلاسمونیک، متمرکز سازی میدان های الکترومغناطیسی در ابعادی کمتر از طول موج است. این علم مبتنی بر فرآیندهایی است که طی آن امواج الکترومغناطیسی با الکترون های هدایتی در محل مرز مشترک با فلزات برهمکنش مؤثر دارند [۲].

واژه «پلاسمون» برای اولین بار توسط پاینر در سال ۱۹۵۶ مطرح شد. او با ارائه یک توصیف نظری برای انرژی تلف شده الکترون های سریع در حین عبور از فلز، این تلفات را ناشی از نوسانات تجمعی الکترون های آزاد فلز دانست و واژه پلاسمون را برای واحد این نوسانات به کار برد. تقریباً همزمان، فانو از عبارت «پلاریتون» برای نوسان کوپل شده میان الکترون های مقید و نور استفاده کرد. اولین نظریه «پلاسمون های سطحی» به زمانی برمی گردد که ریچی در سال ۱۹۵۷، حضور موده های پلاسمونی در نزدیکی سطح فلزات را با بررسی تلفات انرژی الکترونی در یک پوسته نازک فلزی توصیف نمود. همچنین در سال ۱۹۶۸، ریچی و همکارانش توانستند رفتار غیرعادی برانگیخته شدن تشدید پلاسمون های سطحی بر روی توری فلزی را برحسب فرکانس های تشدید پلاسمون سطحی که بر روی توری تحریک شده اند، توصیف نمایند [۳].

همان طور که ذکر شد، به طور طبیعی پلاسمون های سطحی (SPP) در محدوده فرکانس اپتیک وجود دارند و نور را در مقیاس زیر طول موج به شدت محدود می کنند. همچنین به دلیل عدم حد پراش، SSP ها کاربردهای فراوانی پیدا کرده اند. با این حال، از آنجاکه فلزات در فرکانس های پایین تر (محدوده مایکروویو و تراهرتز) مانند رسانای الکتریکی کامل رفتار می کنند، SSP های طبیعی در مرز بین فلز-دی الکتریک در دسترس نیستند. برای حل این مسئله، با تقلید از SSP ها

در فرکانس های نوری، مفهوم شبه پلاسمونیک سطحی (SSPP) برای محدوده مایکروویو و تراهرتز پیشنهاد شده است. امواج شبه پلاسمونیک سطحی در سال های اخیر به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته اند و به عنوان نوسان طولی چگالی بارهای سطحی که در مرز بین دی الکتریک و فلز بدون تلفات تشعشی منتشر می شوند، مورد پذیرش قرار گرفته اند [۴]. از آنجایی که یک مرز تخت بین فلز و دی الکتریک را فقط با تابش موج با قطبش p یا TM می توان تحریک نمود، بنابراین یک موج تابشی با قطبش TM را می توان به موج سطحی تزویج کرد. دلیل این رویداد را می توان در نیاز به مؤلفه عمودی میدان الکتریکی برای ایجاد بار قطبیده شده سطحی دانست. امواج با قطبش p یا TM دارای مؤلفه میدان الکتریکی در صفحه تابش هستند، در حالی که امواج با قطبش s یا TE فاقد این مشخصه می باشند و میدان الکتریکی عمود بر صفحه تابش است. نمودار پاشندگی موج سطحی شبه پلاسمونیک تا قبل از حد مجاز فرکانس پلاسم، خط نور را دنبال می کند. از نقطه نظرمومنوم، ناحیه ای که منحنی پاشندگی نزدیک خط نوری است، مود "شبه فوتون گریزینگ" و در ناحیه ای که منحنی پاشندگی از خط نوری فاصله می گیرد، مود "شبه پلاسمون" خواهیم داشت. در ناحیه مایکروویو، از آنجاکه فرکانس های مایکروویو چندین مرتبه از فرکانس پلاسمای سطحی کمتر هستند، فقط با ایجاد اختلال و ایجاد شکاف باندی در منحنی پاشندگی مودها به حد مجاز خواهیم رسید. در محدوده فرکانس مایکروویو و تراهرتز، SSPP روی سطوح هادی با سوراخ ها و شیارهای متناوب مشاهده می شود [۵]. نوارهای بسیار نازک فلزی راه راه، که با فناوری مسطح و پلاسمون های سطحی کانفورمال بر روی سطوح منحنی سازگار هستند می توانند مدهای شبه پلاسمون سطحی را که در محدوده فرکانس مایکروویو منتشر می شوند، پشتیبانی کنند [۶]. با استفاده از موجبرهای پلاسمونیک، کاربردهای مختلفی برای مدهای SSPP به عنوان ادوات مایکروویو و آنتن مثل کوپلرها [۷]، خطوط انتقال [۸]، مقسم های توان [۹]، فیلترهای پهن باند [۱۰]، سنسورها [۱۱]، سیرکولاتورها [۱۲]، تولیدکننده های هارمونیک دوم [۱۳] و تغذیه آنتن ها [۱۴] گزارش شده است. از دیگر کاربردهای مد SSPP استفاده در آنتن های موج نشتی است. امواج SSPP از نوع موج آهسته هستند که در آن بردار k در جهت انتشار بزرگتر از k_0 در فضای آزاد است. اگر ادوات تشعشی مبتنی بر موجبرهای پلاسمونیک (مانند آنتن ها) در عمل مورد نیاز باشند، امواج سطحی موجبر پلاسمونیک بایستی به امواج سریع $k < k_0$ تبدیل شوند. تشعشات موج نشتی که با نشت تدریجی انرژی الکترومغناطیسی از یک ساختار ایجاد می شوند را به اصطلاح آنتن موج نشتی می نامند. در عمل بیم های تشعشی با تغییر فرکانس می توانند فضا را مرور کنند [۱۵].

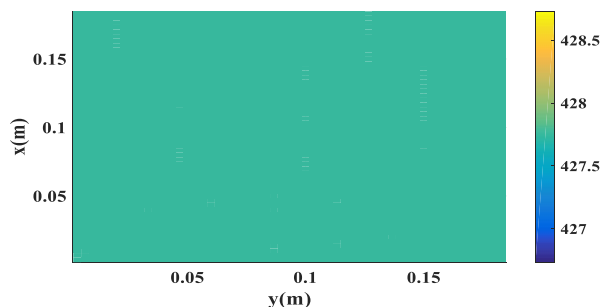
به طور کلی آنتن نشتی به دو دسته یکنواخت (موج سریع) و دوره ای (موج آهسته) تقسیم می شوند. آنتن های موج نشتی یکنواخت اغلب یک چهارم فضای جلویی را مرور می کنند و در نزدیکی بروسداید کار

۲- طراحی آنتن موج نشستی بر اساس تکنیک هولوگرافیک

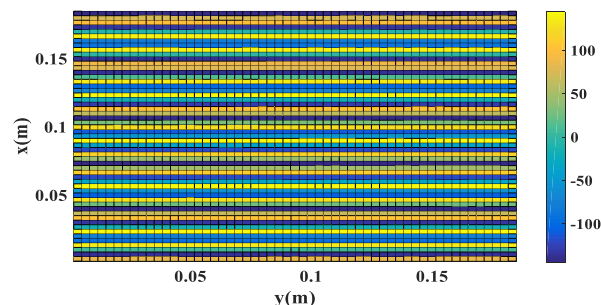
تکنیک هولوگرافیک می‌تواند در اجرای سطح امپدانس مصنوعی برای سنتز الگوی آنتن‌های موج سطحی استفاده شود. بر اساس اصل هولوگرافیک، یک جبهه موج هدف را می‌توان توسط یک هولوگرام بازایی کرد که تداخل بین امواج مرجع و هدف را ثبت می‌کند. به‌طور کلی، رابطه توزیع اجزای ماتریس امپدانس هولوگرام و امواج ثبت‌شده را می‌توان به‌صورت زیر نوشت [۲۲]:

$$\bar{Z}_s = j \begin{pmatrix} X & 0 \\ 0 & X \end{pmatrix} + j \frac{M}{2} \text{Im} \{ \bar{\psi}_{obj} \otimes \bar{\psi}_{ref}^* - \bar{\psi}_{ref} \otimes \bar{\psi}_{obj}^* \} \quad (1)$$

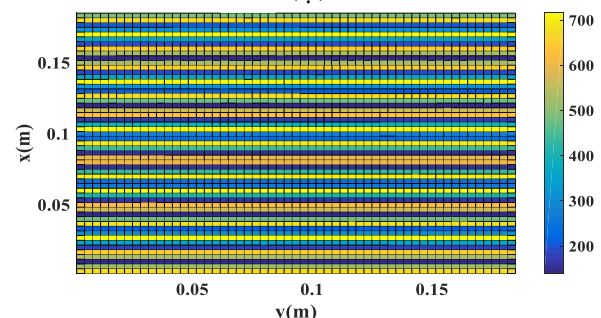
که در آن $\bar{\psi}_{obj}$ و $\bar{\psi}_{ref}$ به ترتیب نشان‌دهنده امواج مرجع و هدف هستند. در اینجا X میانگین امپدانس سطح و M به ترتیب ضریب مدولاسیون سلول واحد همسانگرد است.



(الف)



(ب)



(ج)

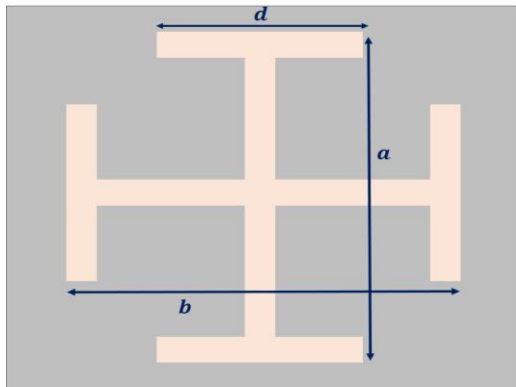
شکل (۱): نحوه توزیع اجزای ماتریس امپدانس سطح هولوگرام.

Z_{xx} (الف)، Z_{xy} (ب) و Z_{yy} (ج)

نمی‌کنند، اما آنتن‌های موج نشستی متناوب می‌توانند مرور موردنظر را در هم در جهت عقب و هم در جهت جلو انجام دهند. [۱۶] فراسطوح به دلیل ابعاد کوچک و تلفات کم، مزایای زیادی در طراحی آنتن‌های مسطح دارد [۱۷]. همچنین منحنی پراکندگی SSPP تابعی از پارامترهای هندسی سازه است [۵]. تاکنون، تلاش‌هایی برای دستیابی به یک آنتن موج نشستی SSPP با استفاده از سطح مدوله‌شده انجام‌شده است و برای اولین بار توسط یک سلول واحد اسکالر، یک آنتن موج نشستی SSPP با قطبش خطی ایجاد شد. [۱۵] سپس، برای به دست آوردن قطبش‌های مختلف، سلول واحد اسکالر را چرخانده می‌شود تا سه شرط لازم برای تبدیل قطبش را فراهم شود [۱۸-۱۹]، اما در هیچ‌یک از این موارد، سلول واحد ناهمسانگرد برای ایجاد قطبش دایروی استفاده نشده است.

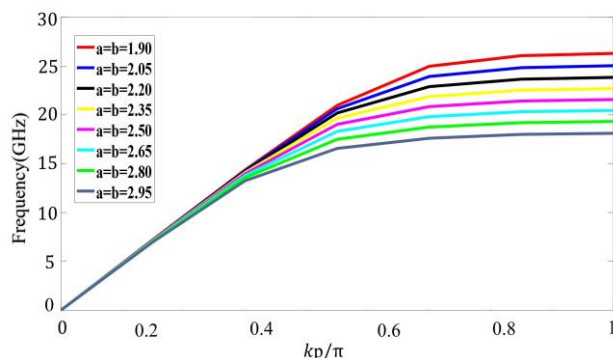
در این مقاله برای اولین بار از سلول‌های واحد ناهمسانگرد برای به دست آوردن قطبش دایروی در آنتن موج نشستی SSPP استفاده می‌کنیم و مزیت اصلی کار ما نسبت به کارهای مشابه این است که در کارهای دیگر به دلیل استفاده از یک روابط سطح مدوله‌شده یک‌بعدی، الگو تشعشعی تنها قابلیت چرخش در صفحه E را دارد، اما در کار ما، الگوی تشعشعی آنتن این قابلیت را دارد تا به ازای زاویه‌های مختلف در کل فضا چرخانده شود. درواقع در کار ما، تئوری کلاسیک آنتن موج نشستی و اصل هولوگرافیک در محدوده فرکانسی میکروویو برای طراحی فراسطح موج نشستی SSPP ترکیب شده‌اند. با ترکیب مفهوم فراسطح‌های موج نشستی SSPP و اصل هولوگرافیک، یک سطح امپدانس مصنوعی ناهمسانگرد ساخته می‌شود. جهت تابش بیم بالایی با قطبش راست‌گرد و بیم پایینی با قطبش چپ‌گرد و به ترتیب در زوایای $(\varphi = 90^\circ, \theta = -18^\circ)$ و $(\varphi = 90^\circ, \theta = -162^\circ)$ در فرکانس طراحی در نظر گرفته شده است. فرکانس طراحی 18 گیگاهرتز است و بهره پرتوهای جلو و عقب به‌طور مساوی در نظر گرفته می‌شود. سپس، یک گذار بین موجبر هم صفحه^۲ با امپدانس 50Ω و خط شبه پلاسمونیک در فرکانس عملیات طراحی شده است که امواج هدایت‌شده را به SSPP ها با راندمان بالا در پهنای باند موردنیاز، تبدیل می‌کند. استفاده از آنتن شیپوری مبتنی بر فناوری موجبر مجتمع شده در زیرلایه نیز می‌تواند به عنوان یک گزینه خوب برای تحریک ساختار مطرح گردد [۲۰]. الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) برای یافتن ابعاد متناظر بازوهای صلیب و زوایای چرخش صلیب و تحقق اجزای تانسور امپدانس سطح سلول واحد استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی‌های عددی و تمام موج تطابق خوبی دارد (این شبیه‌سازی‌ها توسط نرم‌افزارهای CST Microwave Studio و MATLAB انجام شده‌اند)، که کاربردهای بالقوه‌ای در مدارهای پلاسمونیک یکپارچه و آنتن‌ها دارند. آنتن موج نشستی پیشنهادی برای کاربردهای باند فرکانسی Ku طراحی شده است. از باند فرکانسی Ku بیشتر در ماهواره‌های ارتباطات تجاری استفاده می‌شود [۲۱].

الکتریکی عمود بر سطح امپدانس است و مود TE دارای مؤلفه موازی با سطح امپدانس است. سطوح امپدانس همسانگرد (اسکالر)، تنها می‌توانند مدهای TE و TM را هدایت کنند در حالیکه سطوح امپدانس ناهمسانگرد (تانسوری)، قابلیت هدایت هر دو مود را به‌طور هم‌زمان و یا جداگانه دارند. در این مقاله از سلول واحد دارای مود TM بدون صفحه زمین برای پشتیبانی از امواج SSPP استفاده شده است.



شکل (۲): سلول واحد پیشنهادی (قسمت تیره نشان‌دهنده فلز و قسمت روشن نشان‌دهنده زیرلایه است)

برای تحریک مود SSPP بایستی ساختار سلول واحد به‌صورت زمین نشده باشد تا بتواند موج در مرز بین هادی و زیرلایه تحدید شود. وجود صفحه زمین باعث ایجاد مود هایبرید TEM و $SSPP$ می‌شود و هدف در این مقاله تحریک مود $SSPP$ خالص می‌باشد. وجود صفحه زمین باعث حذف بیم غیرمستقل دوم می‌شود و وجود یا حذف بیم دوم بستگی به کاربرد موردنظر طراح دارد. اضافه کردن صفحه زمین به این ساختار باعث می‌شود مود غالب از TM به TE تغییر کند. برای تحریک مود TM بایستی از مدهای مرتبه بالاتر استفاده کرد. شکل (۲) شماتیک سلول واحد صلیبی همسانگرد مورد استفاده را نشان می‌دهد. شکل (۳) نمودار پاشندگی فرکانسی این سلول واحد را به ازای تغییرات مقادیر مختلف بازوهای سلول واحد صلیبی نشان می‌دهد.



شکل (۳): نمودار پاشندگی سلول واحد پیشنهادی بر حسب مقادیر مختلف بازوهای آن

برای یک موج مرجع با جبهه موج مسطح که در جهت y حرکت می‌کند و موج هدف در جهت موردنظر با قطبش دایره‌ای تابش می‌کند، امواج مرجع و هدف به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\vec{\psi}_{ref} = (0, 1, 0)e^{-jkny} \quad (۲)$$

$$\vec{\psi}_{obj} = (\pm j \cos \theta, 1, \mp j \sin \theta \cos \varphi)e^{-jk(x \sin \theta \cos \varphi + y \sin \theta \sin \varphi)} \quad (۳)$$

جایی که θ و φ زاویه جهت پرتوها در سیستم مختصات کروی هستند. علائم مثبت و منفی در رابطه (۳) به ترتیب نشان‌دهنده راست‌گرد و چپ‌گرد بودن بیم تشعشعی است. n نشان‌دهنده ضریب شکست مؤثر امپدانس سطحی است و از رابطه $n = \sqrt{1+X^2}$ به دست می‌آید.

در این مقاله، جهت تابش پرتو روبه‌جلو به‌صورت راست‌گرد و پرتو رو به عقب به‌صورت چپ‌گرد و به ترتیب در زوایای $(\varphi = 90^\circ, \theta = -18^\circ)$ و $(\varphi = 90^\circ, \theta = -162^\circ)$ در فرکانس طراحی 18 گیگاهرتز در نظر گرفته شده است. اساس کار طراحی آنتن موج نشتی SSPP در این مقاله بر اساس تکنیک هولوگرافیک می‌باشد. همان‌طور که گفته شد معادله (۲) و (۳) به ترتیب بیانگر موج مرجع و موج هدف است، این دو موج را در معادله (۱) قرار داده و مقدار امپدانس سطحی موردنیاز به دست می‌آید. مقادیر Z_{xx} ، Z_{xy} و Z_{yy} اجزای مختلف تانسور امپدانس سطحی است (برای $M = 288$ و $X = 427\Omega$) که در شکل (۱) نشان داده شده است.

۳- سلول واحد پیشنهادی

یک مرحله مهم در توصیف امپدانس سطح هولوگرام، انتخاب بهترین شکل سلول واحد برای تحقق سطح امپدانس موردنیاز یا همان هولوگرام است. به همین منظور، سلول واحدهایی که به شکل مربع، دایره و شش‌ضلعی هستند، مناسب‌ترین انتخاب هستند. سلول واحد مورد استفاده در این مقاله از سلول واحدی صلیبی شکل استفاده شده است، که در شکل ۲ نیز نشان داده شده است. ابعاد سلول واحد باید در مقایسه با طول موج مؤثر فرکانس کاری به‌اندازه کافی کوچک باشد. همچنین برای تسهیل تحریک موج سطحی، ضخامت بستر باید بیشتر از یک‌دهم طول موج مؤثر باشد. سلول واحد مورد استفاده باید به‌گونه‌ای باشد که بتواند اجزای مختلف تانسور امپدانس سطح را که در شکل (۱) نشان داده شده است، پوشش دهد. بنابراین در این مقاله از سلول واحد صلیبی شکل بدون صفحه زمین استفاده شده است.

مکانیزم کلی آنتن هولوگرافیک موج نشتی تبدیل امواج سطحی مقید مود TM_0 یا TE_0 به امواج تشعشعی با قطبش دلخواه و شکل الگوی تشعشعی خاص است. غالباً رفتار آنتن‌های موج نشتی با امپدانس مدوله‌شده به شکلی است که موج تشعشعی آنتن به‌صورت جهت‌دار خواهد بود. طبق تعریف مود TM شامل میدان‌هایی با مؤلفه میدان

۴- نحوه بدست آوردن سلول واحد ناهمسانگرد

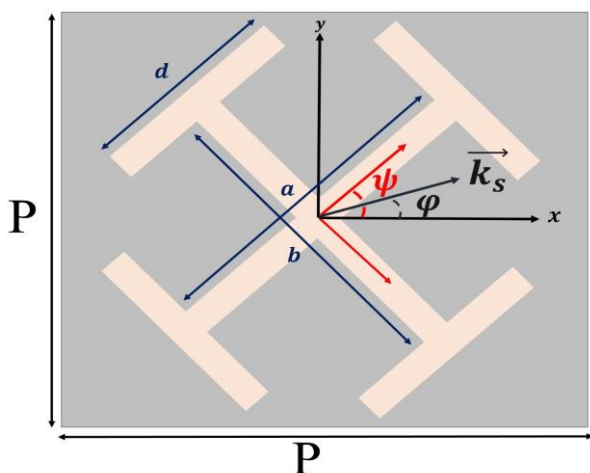
برای کنترل کردن قطبش الگوی تشعشعی ما نیاز داریم از سلول واحد ناهمسانگرد استفاده کنیم. با استفاده از ترکیب روابط تبدیل نوری^۵ و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات سعی می‌کنیم سلول واحدمان را ناهمسانگرد کنیم. سه پارامتر طراحی را اندازه بازوی کوچک و بزرگ و زاویه چرخش صلیب در نظر می‌گیریم که برای پیاده‌سازی سه جزء از ماتریس امپدانس سطح استفاده می‌شوند. برای درک بهتر به شکل (۵) توجه نمایید. برای پیاده‌سازی اجزاء ماتریس امپدانس سطحی از معادلات زیر محاسبه می‌شود [۲۴]:

$$Z_{xx} = \cos^2(\psi - \varphi)X_1 + \sin^2(\psi - \varphi)X_2 \quad (۴)$$

$$Z_{yy} = \sin^2(\psi - \varphi)X_1 - \cos^2(\psi - \varphi)X_1 \quad (۵)$$

$$Z_{xy} = \sin(\psi - \varphi)\cos(\psi - \varphi)(X_1 - X_2) \quad (۶)$$

پارامترهای ψ و φ در شکل (۵) نشان داده شده است. علاوه بر این، X_1 و X_2 امپدانس سلول‌های واحد هستند که با محورهای اصلی در زمانی که زاویه چرخش صفر است، تراز شده‌اند. مقدار دوره تناوب هر سلول واحد برابر $\lambda/5$ و مقدار $d = 1.5mm$ در نظر گرفته شده است.

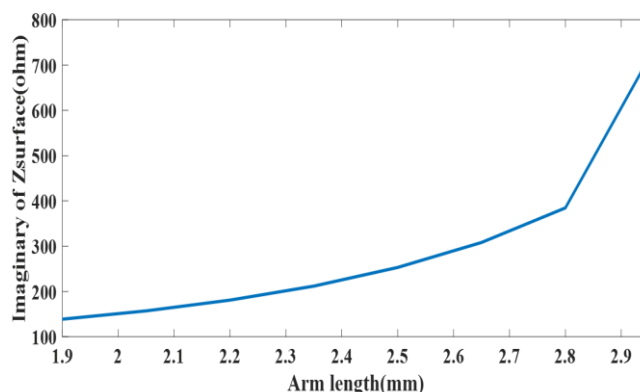


شکل (۵): شماتیک سلول واحد ناهمسانگرد پیشنهادی

مقادیر X_1 و X_2 مانند محاسبه امپدانس سطح سلول واحد همسانگرد (نشان داده شده در شکل (۲)) با شبیه‌سازی به صورت سوئیپ پارامتری در حل‌کننده Eigen mode نرم‌افزار CST به دست می‌آید. تغییرات X_1 و X_2 برحسب a و b در شکل (۶) نشان داده شده است. در این سلول واحد از زیرلایه Rogers RO4003 با ثابت دی‌الکتریک $\epsilon_r = 3.55$ و $\tan \delta = 0.0027$ استفاده شده $h = 0.5mm$ است.

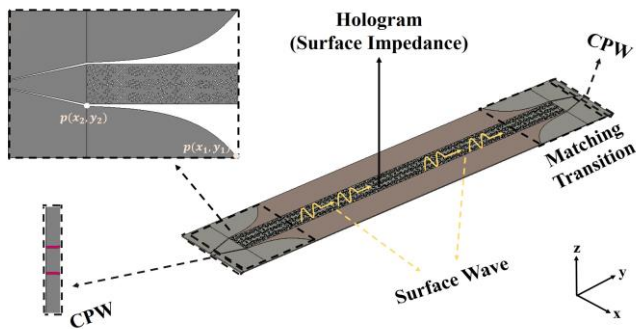
شکل (۳) نمودار پاشندگی سلول واحد پیشنهادی برحسب مقادیر مختلف طول بازوها را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۳) مشخص است با تغییر طول بازوی صلیب از $1/9$ میلی‌متر تا $2/95$ میلی‌متر، این سلول واحد اختلاف‌فاز حدود 78° در فرکانس 18 گیگاهرتز به ما می‌دهد. این مقدار اختلاف‌فاز که از تغییر طول بازوهای صلیب به دست می‌آید در تعیین مقدار امپدانس سطحی سلول واحد نقش دارد. به عبارت دیگر بیشترین و کمترین مقدار امپدانس سطحی که سلول واحد می‌تواند پوشش دهد از روی همین مقدار فاز سلول واحد در فرکانس 18 گیگاهرتز به دست می‌آید.

برای محاسبه امپدانس سطحی هر سلول واحد از رویکرد معرفی شده در [۲۳] استفاده می‌کنیم. بر این اساس، ابتدا موج صفحه به سلول واحد می‌تابد و نرم‌افزار تمام موج (مانند CST) امپدانس ورودی را محاسبه می‌کند. سپس از روی امپدانس ورودی محاسبه شده توسط نرم‌افزار، امپدانس سطحی به دست می‌آید. شکل (۴) نحوه تغییرات بخش موهومی امپدانس سطحی سلول واحد را برحسب مقادیر مختلف بازوهای صلیب نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۳) سلول واحد در حالتی که اندازه بازو $1/9$ میلی‌متر است مقدار فاز $76/6^\circ$ درجه و در حالتی که اندازه بازو به $2/95$ میلی‌متر تغییر می‌یابد فازی برابر $154/5^\circ$ درجه در فرکانس کاری را ارائه می‌دهد. همان‌طور که گفته شد مقدار فاز به دست آمده مستقیماً در تعیین امپدانس هر سلول واحد نقش دارد. همان‌طور که در شکل (۴) مشخص است، هنگامی که طول بازو $1/9$ میلی‌متر باشد، امپدانس سطحی سلول واحد برابر 139 اهم و هنگامی که طول بازو به $2/95$ میلی‌متر افزایش یابد، امپدانس سطحی سلول واحد برابر 716 اهم خواهد شد. به عبارت دیگر این سلول واحد می‌تواند با تغییر طول بازو از $1/9$ میلی‌متر تا $2/95$ میلی‌متر بازه امپدانسی 139 تا 716 اهم را پوشش دهد.



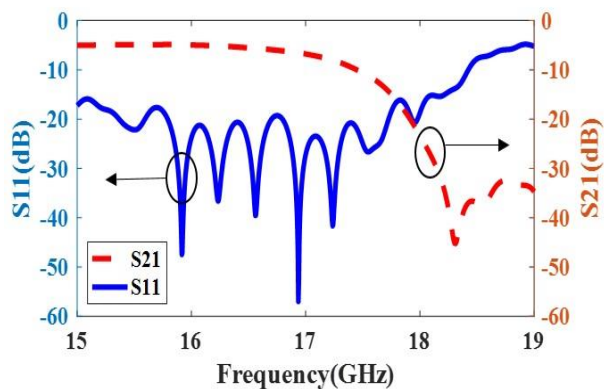
شکل (۴): نحوه تغییرات قسمت موهومی امپدانس سطحی سلول واحد برحسب مقادیر مختلف بازوهای آن

پهنای بازو تاثیر به سزایی در نتایج ندارد و به نحوی انتخاب شده است که حداقل دو مش در شبیه‌سازی تمام موج بر روی پهنای بازو باشد و همچنین جهت اجتناب از افزایش تلفات اهمی، پهنای بازو بسیار زیاد در نظر گرفته نشده است.

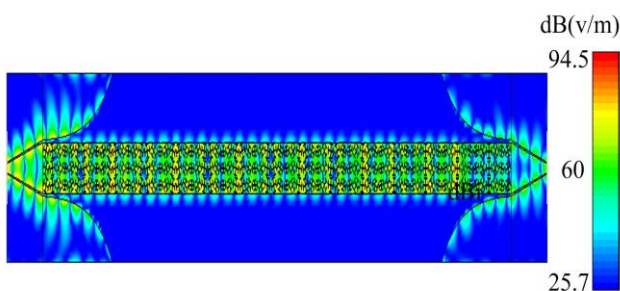


شکل (۷): شماتیک آنتن موج نشتی پیشنهادی

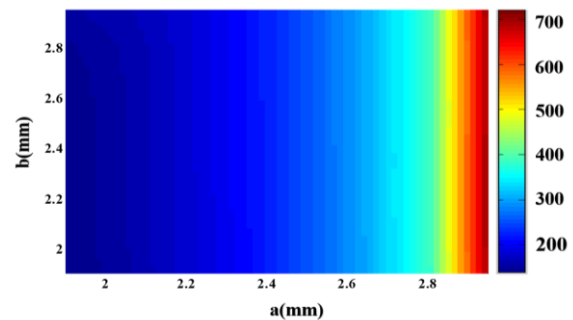
برای به حداکثر رساندن انتقال توان، و به منظور تحقق امپدانس، مومنوم و تطبیق مود، یک گذار به عنوان مبدل مود در ناحیه دوم برای اتصال CPW به خط SSPP مورد نیاز است. این مبدل مود شامل دو بخش است: یک خط CPW و یک زمین فلیرینگ شده، که در شکل (۷) قابل مشاهده می باشد. برای به دست آوردن منحنی مربوط به صفحه زمین فلیرینگ، دو نقطه $p(x_1, y_1)$ و $p(x_2, y_2)$ در نظر گرفته شده است که به ترتیب نقطه شروع و پایان منحنی را نشان می دهند. منحنی زمین فلیرینگ به صورت $y = C_1 \exp(\alpha x) + C_2, (x_1 < x < x_2)$ می باشد. که در این معادله نوشته شده، $C_1 = (y_2 - y_1) / [\exp(\alpha x_2) - \exp(\alpha x_1)]$ و $\alpha = 0.1$ می باشد. پس از شبیه سازی نمودار پارامترهای S در شکل (۸) نشان داده شده است.



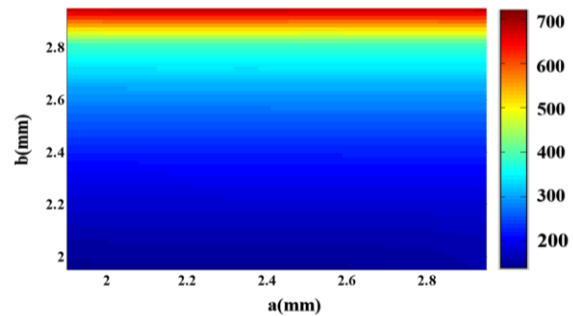
شکل (۸): نمودار پارامترهای S شبیه سازی شده ساختار



شکل (۹): نحوه توزیع میدان الکتریکی در صفحه xoy



(الف)



(ب)

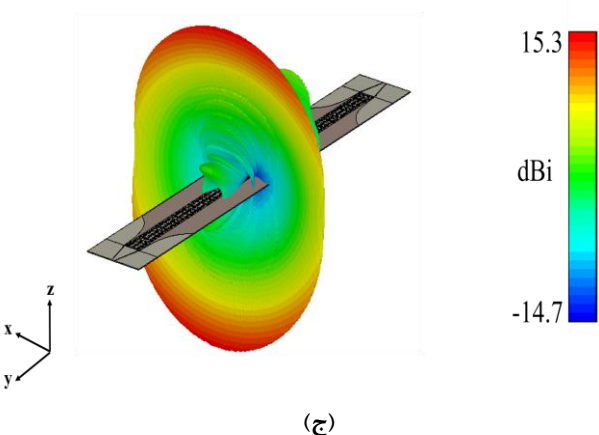
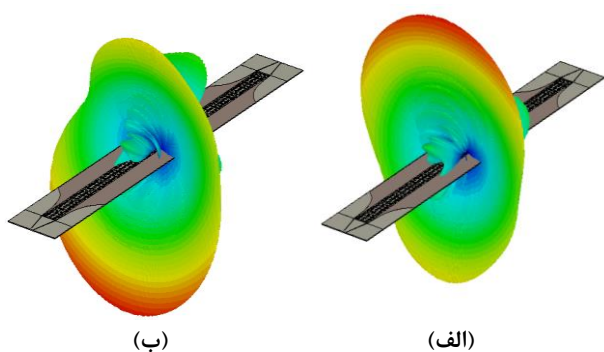
شکل (۶): تغییرات (الف) X_2 و (ب) X_1 بر حسب تغییرات بازوهای صلیب در فرکانس 18 گیگاهرتز

۵- پیاده سازی ساختار و بررسی نتایج بدست آمده

به طور کلی، یافتن بهترین مقادیر برای پارامترهای هندسی یک پچ (و یا اسلات) به طوری که دقیقاً توزیع امپدانس هولوگرام را برآورده کند، دشوار است. این موضوع در سلول های واحد ناهمسانگرد پیچیده تر هم می شود، جایی که هر المان باید به طور هم زمان سه کمیت Z_{xx} ، Z_{yy} و Z_{xy} را برای هر سلول روی هولوگرام داشته باشد. ما از یک الگوریتم بهینه سازی، یعنی بهینه سازی ازدحام ذرات، برای تسهیل فرآیند نقشه برداری استفاده می کنیم. این الگوریتم پارامترهای هندسی بهینه، یعنی a ، b و w را برای هر سلول واحد پیدا می کند، به طوری که عنصر سه جزء مورد انتظار امپدانس ورودی آن موقعیت را شناسایی می کند. بنابراین، سه مقدار امپدانس ورودی مورد انتظار به عنوان پارامترهای ورودی الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات در نظر گرفته می شود. پس از استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات و تعیین بهترین مقادیر a ، b و w برای هر عنصر و قرار دادن پچ مناسب در موقعیت های آن ها، کل ساختار توسط نرم افزار CST آماده شبیه سازی می شود. در واقع هدف ما تحقق و تکمیل فرآیند طراحی یک آنتن موج نشتی SSPP بر اساس اصل هولوگرافیک در فرکانس 18 گیگاهرتز بود که قادر به تولید دو پرتو هم زمان با قطبش دایره ای مستقل می باشد که این از اعتبار تکنیک طراحی ما بود. در شکل زیر آنتن طراحی شده به همراه قسمت های مختلف آن مشخص شده است.

تا 18 گیگاهرتز متغیر است، شبیه‌سازی کردیم. شکل (۱۰) الگوی تشعشعی قطبی را در سه فرکانس مختلف (16، 17 و 18 گیگاهرتز) نشان می‌دهد. بررسی دقیق پرتوهای مرور شده نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس از 16 به 18 گیگاهرتز، پرتویی که در سمت بالای آنتن قرار می‌گیرد، از زاویه -3° تا زاویه -18° حرکت می‌کند. یعنی پرتو می‌تواند حدود 15° مرور کند. رفتار مشابهی توسط پرتو آینه‌ای در پشت آنتن دنبال می‌شود، یعنی پرتو از -177° به سمت -162° حرکت می‌کند. شکل (۱۱) الگوی سه‌بعدی آنتن را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که پرتوهای قرار گرفته در قسمت بالا و پشت آنتن به ترتیب راست‌گرد و چپ‌گرد هستند.

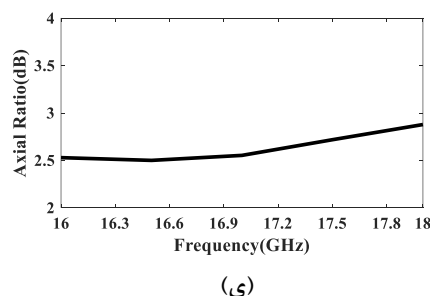
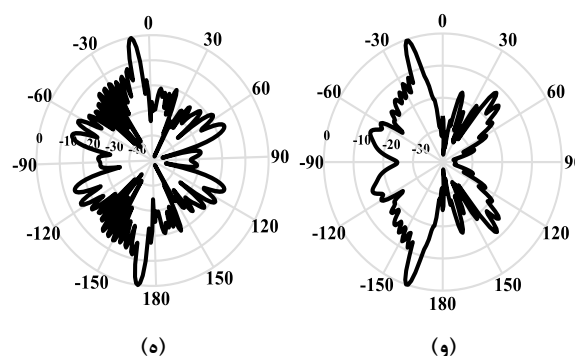
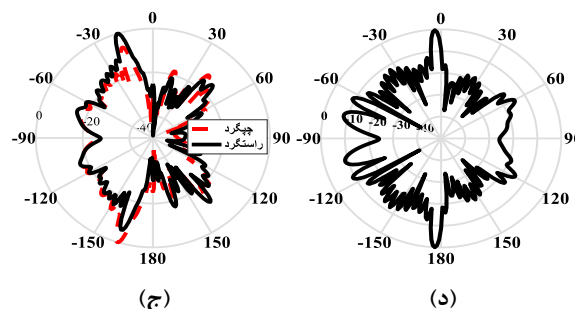
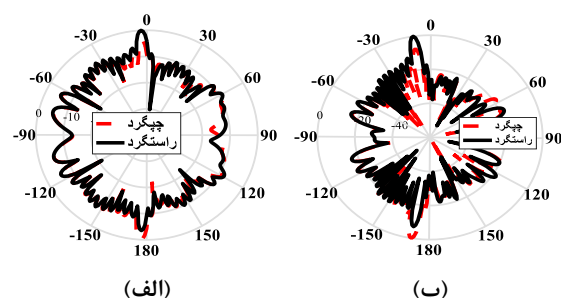
شکل (۱۰) (د) نسبت محوری تابش‌های قطبش دایره‌ای را نشان می‌دهد. نسبت محوری هر دو تابش چپ‌گرد و راست‌گرد کمتر از 3dB از فرکانس 16 تا 18 گیگاهرتز است که نشان‌دهنده عملکرد خوب قطبش دایروی آنتن موج نشستی است.



شکل (۱۱): الگوی تشعشعی ۳ بعدی آنتن موج نشستی. (الف) راست‌گرد (ب) چپ‌گرد (ج) بهره آنتن در فرکانس 18 گیگاهرتز

مقایسه این مقاله با مقالات منتشر شده اخیر در جدول (۱) ارائه شده است. همان‌طور که در جدول (۱) مشخص است ما برخلاف سایر کارهای مشابه، با استفاده از سلول واحدی ناهمسانگرد توانستیم قطبش دایروی را بدست آوریم. بر این اساس ابعاد ساختار، میزان بهره

شکل (۹) هم نحوه توزیع میدان الکتریکی در ساختار پیشنهادی را نشان می‌دهد که امواج SSPP به‌خوبی توسط ساختار موج نشستی پشتیبانی می‌شوند.



(ی)

شکل (۱۰): الگوهای تشعشعی چپ‌گرد و راست‌گرد آنتن پیشنهادی در (الف) فرکانس ۱۶ گیگاهرتز. (ب) فرکانس ۱۷ گیگاهرتز. (ج) فرکانس 18 گیگاهرتز. اندازه الگوی تشعشعی نرمالیزه در فرکانس (د) ۱۶ گیگاهرتز. (ه) ۱۷ گیگاهرتز. (و) ۱۸ گیگاهرتز و (د) نسبت محوری

به‌منظور بررسی رفتار مرور زاویه‌ای آنتن و نوع امواج تابشی در هر فرکانس، رفتار آنتن را توسط نرم‌افزار CST در زمانی که فرکانس از 16

مراجع

- [1] Maier SA, Atwater HA. Plasmonics: Localization and guiding of electromagnetic energy in metal/dielectric structures. *Journal of applied physics*. 2005 Jul 1;98(1):10.
- [2] Maier SA. Plasmonics: fundamentals and applications. Springer Science & Business Media; 2007 May 16.
- [3] Brongersma ML, Kik PG. Surface plasmon nanophotonics. Springer; 2007.
- [4] S. Zohrevand and N. Komjani, "Generation of orbital angular momentum modes via SSPP leaky-wave antenna based on holography technique," 2022 30th International Conference on Electrical Engineering (ICEE), 2022, pp. 325-330, doi: 10.1109/ICEE55646.2022.9827383.
- [5] F. J. Garcia-Vidal, L. Martín-Moreno, and J. B. Pendry, "Surfaces with holes in them: New plasmonic metamaterials," *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 7(2), S97 (2005).
- [6] Shamsi Soleimani, Salma Mirhadi, Nader Komjani. (2021) Design of a broadband diplexer based on substrate integrated plasmonic waveguide. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering* 63. Online publication date: 9-Aug-2021.
- [7] A. P. Hibbins, M. J. Lockyear, I. R. Hooper, and J. R. Sambles, "Waveguide arrays as plasmonic metamaterials: Transmission below cut-off," *Phys. Rev. Lett.* 96, 073904 (2006).
- [8] H. F. Ma, X. Shen, Q. Cheng, W. X. Jiang, and T. J. Cui, "Broadband and high-efficiency conversion from guided waves to spoof surface plasmon polaritons," *Laser Photon. Rev.* 8(1), 146–151 (2014).
- [9] Salma Mirhadi and Nader Komjani, "A dual-band power divider based on higher-order modes of spoof surface plasmon polaritons", *AIP Advances* 11,095102 (2021) <https://doi.org/10.1063/5.0048390>.
- [10] L. Zhao, X. Zhang, J. Wang, W. Yu, J. Li, H. Su, and X. Shen, "A novel broadband band-pass filter based on spoof surface plasmon polaritons," *Sci. Rep.* 6, 36069 (2016).
- [11] Z. Ma, S. M. Hanham, P. Arroyo Huidobro, Y. Gong, M. Hong, N. Klein, and S. A. Maier, "Terahertz particle-in-liquid sensing with spoof surface plasmon polariton waveguides," *APL Photonics* 2(11), 116102 (2017).
- [12] T. Qiu, J. Wang, Y. Li, and S. Qu, "Circulator based on spoof surface plasmon polaritons," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 16, 821–824 (2017).
- [13] C. Zhang, Y. Fan, J. Guo, X. Fu, and T. J. Cui, "Second-harmonic generation of spoof surface plasmon polaritons using nonlinear plasmonic metamaterials," *ACS Photonics* 3(1), 139–146 (2015).
- [14] J. J. Xu, J. Y. Yin, H. C. Zhang, and T. J. Cui, "Compact feeding network for array radiations of spoof surface plasmon polaritons," *Sci. Rep.* 6, 22692 (2016)
- [15] Kong, G., Ma, H., Cai, B. et al. Continuous leaky-wave scanning using periodically modulated spoof plasmonic waveguide. *Sci Rep* 6, 29600 (2016). <https://doi.org/10.1038/srep29600>.
- [16] Mohammad Amin Chaychi zadeh & Nader Komjani (2021) Improved performance of an axially-modulated conformal leaky-wave holographic antenna through using variable modulation index, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 35:15, 2020-2033, DOI: 10.1080/09205071.2021.1927856.
- [17] B. H. Fong, J. S. Colburn, J. J. Ottusch, J. L. Visser, and D. F. Sievenpiper, "Scalar and tensor holographic

واقعی در فرکانس طراحی، سطح گلبیگ جانبی، پهنای باند نسبت محوری، میزان مرور زاویه‌ای و بازده تشعشعی ساختار معیار مقایسه در نظر گرفته شده است. با توجه به جدول (۱) می‌توان گفت ساختار پیشنهاد شده که با استفاده از سلول واحد ناهمسانگرد تحقق بخشیده شده است علاوه بر اینکه ابعاد کوچک‌تری دارد ولی میزان بهره واقعی و بازده تشعشعی بیشتری را در مقایسه با سایر کارهای انجام‌شده ارائه می‌کند.

جدول (۱): مقایسه آنتن پیشنهادی با کارهای مشابه

ساختار	[15]	[18]	[19]	کار ما
فرکانس طراحی (GHz)	9.3	9	10	18
نوع سلول واحد	همسانگرد	همسانگرد	همسانگرد	ناهمسانگرد
نوع قطبش	خطی	دایروی	دایروی	دایروی
ابعاد ساختار (λ_g)	15.9	18.36	24.9	15.1
بهره در فرکانس طراحی (dBi)	12.2	12	9	15.3
SLL (dB)	-8.5	-10	-9	-11
پهنای باند AR	---	13.9%	4%	11.8%
مرور زاویه‌ای	20°	20°	10°	15°
بازده تشعشعی	90%	77%	80%	82%

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از تکنیک هولوگرافیک، طراحی یک آنتن موج نشستی شبه پلاسمون پلاریتون سطحی با قطبش دایروی در فرکانس 18 گیگاهرتز شرح داده شد که دارای $15.3dBi$ بهره بوده و با تغییر فرکانس از 16 تا 18 گیگاهرتز 15° از فضا را مورد مرور قرار می‌دهد. برای پیاده‌سازی این ساختار موج نشستی مبتنی بر فناوری شبه پلاسمونیک، برای اولین بار از سلول واحدهای ناهمسانگرد برای تحقق سطح هولوگرام استفاده شده است. تانسور امپدانس سطح ناهمسانگرد، از ترکیب روابط تبدیل نوری و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و با در نظر گرفتن سه پارامتر طراحی (طول دو بازو و زاویه چرخش صلیب) به دست آورده شده است. پس از شبیه‌سازی می‌توان دید که پرتوی بالایی و پایینی ساختار موج نشستی به ترتیب دارای قطبش راست‌گرد و قطبش چپ‌گرد می‌باشد که نشان از طراحی موفق آنتن پیشنهادی دارد.

- artificial impedance surfaces," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 58, pp. 3212-3221, 2010.
- [18] Wang, Meng and Ma, Hui Feng and Tang, Wen Xuan and Sun, Shi and Cui, Tie Jun, "Leaky-Wave Radiations with Arbitrarily Customizable Polarizations Based on Spoof Surface Plasmon Polaritons", Phys. Rev. Applied, Jul2019, doi:10.1103/PhysRevApplied.12.014036.
- [19] M. Wang, H. C. Wang, S. C. Tian, H. F. Ma and T. J. Cui, "Spatial Multi-Polarized Leaky-Wave Antenna Based on Spoof Surface Plasmon Polaritons," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 68, no. 12, pp. 8168-8173, Dec. 2020, doi: 10.1109/TAP.2020.2997471.
- [۲۰] پالودی، کمجانی، خنجریان. "طراحی، شبیه سازی و ساخت آنتن شیپوری پهن باند مبتنی بر تکنولوژی SIW." مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران جلد (۳) ۱۸، ۱۹-۱۱، ۱۴۰۰.
- [۲۱] عزیزی، کمجانی، چایچی زاده. "طراحی، شبیه سازی و ساخت آنتن فابری پرو تک باند با قطبش دایروی در باند ku." مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران جلد (۱) ۱۶، ۱۴۷-۱۵۴، ۱۳۹۸.
- [22] B. H. Fong, J. S. Colburn, J. J. Ottusch, J. L. Visher, and D. F. Sievenpiper, "Scalar and tensor holographic artificial impedance surfaces," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 58, pp. 3212-3221, 2010.
- [23] M. Movahhedi, M. Karimipour and N. Komjani, "Multibeam Bidirectional Wideband/Wide-Scanning-Angle Holographic Leaky-Wave Antenna," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 18, no. 7, pp. 1507-1511, July 2019, doi: 10.1109/LAWP.2019.2920953
- [24] Werner, D.H., Jiang, Z.H., Turpin, J.P., Wu, Q. and Gregory, M.D., 2014. Transformation electromagnetics inspired lens designs and associated metamaterial implementations for highly directive radiation. In Transformation Electromagnetics and Metamaterials (pp. 221-261). Springer, London.

زیر نویس ها

^۱Surface Plasmon Polariton

^۲Spoof Surface Plasmon Polariton

^۳Coplanar Waveguide

^۴Particle Swarm Optimization (PSO)

^۵Transformation Optic (TO)