

(مقاله پژوهشی)

شبیه‌سازی جاذب مبتنی بر فراسطح با پوشش گسترده برای جذب انرژی برای کاربردهای باند WiMax

موسی عبدالله‌وند^۱، امیرحسین آزادی^۲، سعید نیک‌مهر^۳، محمد بمانی^۴

^۱دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده فنی مهندسی، m.abdollahvand@uma.ac.ir

^۲دانشگاه تبریز، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، ah.azadi1400@ms.tabrizu.ac.ir

^۳دانشگاه تبریز، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، nikmehr@tabrizu.ac.ir

^۴دانشگاه تبریز، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، bemani@tabrizu.ac.ir

چکیده

در این مقاله، یک جاذب فراسطحی جدید برای برداشت توان بی‌سیم با راندمان بالا معرفی می‌شود. این جاذب قادر است انرژی الکترومغناطیسی را از زوایای وسیع جمع‌آوری کرده و این انرژی را به جریان مستقیم تبدیل کند تا یک سیستم برداشت الکترومغناطیسی کارآمد ایجاد شود. در این تحقیق، ویژگی‌های عملکردی جاذب شامل ضریب بازتاب، توزیع توان، و راندمان جذب و برداشت انرژی در زوایای مختلف بررسی شده است. جاذب در فرکانس ۳/۵ گیگاهرتز و با پایداری بالا در زوایای ۰ تا ۴۵ درجه برای امواج TE طراحی شده است. طراحی به گونه‌ای است که تطابق امپدانس تشدیدگرها با منبع تغذیه بهینه شده است تا انرژی به بهترین نحو انتقال یابد و تلفات به حداقل برسد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که برای یک سلول واحد با شرایط مرزی متناوب، راندمان جذب و برداشت انرژی به ۸۲ درصد می‌رسد.

واژگان کلیدی: جاذب فراسطح، شبکه تغذیه، تقسیم کننده توان، راندمان برداشت انرژی.



تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۰

تاریخ ویرایش مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۲۴

DOI: 10.22034/ijmt.2024.544437.1863

صص ۵۳-۶۰

۱- مقدمه

شبکه‌های حسگر بی‌سیم که برای مصرف انرژی کم طراحی شده‌اند، اخیراً به خاطر پیشرفت‌های سریع در فناوری اینترنت اشیا توجه زیادی را جلب کرده‌اند. این شبکه‌ها شامل چندین حسگر هستند که معمولاً با باتری‌های سنتی تأمین انرژی می‌شوند. اما باتری‌ها عمر محدودی دارند و باید تعویض شوند که با افزایش تعداد حسگرها، این کار می‌تواند مشکل‌ساز و زمان‌بر باشد. به همین دلیل، سیستم‌های برداشت انرژی الکترومغناطیسی می‌توانند برای حل این مشکل مفید باشند. امواج الکترومغناطیسی که از سیستم‌های ارتباطی مختلف مانند ماهواره‌ها، ایستگاه‌های موبایل، تلویزیون‌ها و روترهای وای‌فای به محیط اطراف منتشر می‌شوند، می‌توانند برای تأمین انرژی حسگرها استفاده شوند. سیستم‌های برداشت انرژی طراحی شده‌اند تا این امواج را جذب کرده و آن‌ها را به جریان مستقیم تبدیل کنند. آنتن‌ها، که بخش مهمی از این سیستم‌ها هستند، انرژی الکترومغناطیسی را جذب کرده و به جریان متناوب تبدیل می‌کنند [۱]، [۲]. جذب‌کننده‌های فراماده/فراسطح از آرایه‌هایی با یک لایه الگو در بالا و یک صفحه زمین در پایین تشکیل شده‌اند. تشدیدگرهای مختلف مانند تشدیدگرهای سلف-خازن، تشدیدگرهای حلقه تقسیم (Split) Ring Resonator و تشدیدگرهای حلقه الکتریکی (Electric Ring Resonator) به عنوان واحدهای مستقل عمل می‌کنند. این تشدیدگرها در فرکانس‌های خاصی بهینه عمل می‌کنند و ضریب بازتاب آن‌ها می‌تواند با تطبیق امپدانس به حداقل برسد [۳]، [۴]. [۵]، [۶]. با این حال، به دلیل طراحی خاص این جاذب‌ها، پهنای باند آن‌ها محدود و باریک است [۷]، [۸]. برای درک بهتر نحوه عملکرد این سیستم‌ها، از مدل‌های مداری مشابه استفاده شده که نحوه کار جذب‌کننده را در فرکانس‌های مختلف نشان می‌دهد [۹]. به دلیل این محدودیت، تقاضا برای جاذب‌های پهن‌بند افزایش یافته است. محققان برای بهبود پهنای باند جذب، از تکنیک‌هایی مانند ساختارهای چندلایه، بارگذاری عناصر فراماده و استفاده از مواد مقاوم‌تی استفاده کرده‌اند [۱۰]، [۱۱]، [۱۲]، [۱۳].

یک جاذب مبتنی بر فراسطح با ویژگی‌های مستقل از قطبش و زاویه باز را برای برداشت انرژی الکترومغناطیسی محیط و انتقال توان بی‌سیم معرفی می‌کند که زاویه برخورد مایل از ۰ درجه تا ۴۵ درجه تغییر می‌کند، این

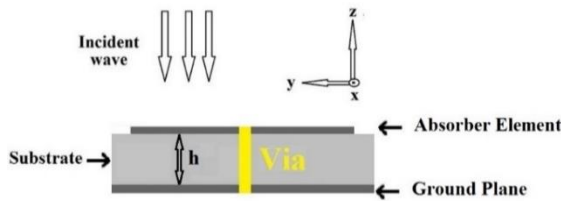
فراسطح همچنین می‌تواند کارایی برداشت موثر را حفظ کند [۱۴]، [۱۵]، [۱۶]، [۱۷]، [۱۸]. طراحی جاذب فراسطحی فوق نازک و پهن‌بند بر اساس افزایش ضریب جذب با کاهش ضرایب بازتاب و انتقال به‌طور همزمان می‌باشد. برای دستیابی به انتقال صفر از یک لایه زمین فلزی پیوسته استفاده شده است، در حالی که بازتاب با تطبیق امپدانس جاذب فراسطحی پیشنهادی با امپدانس فضای آزاد کاهش می‌یابد [۱۹]. ویژگی‌های فرامواد و جاذب از طریق تحلیل جریان سطحی، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۲۰].

جاذب‌های فراسطح با قابلیت جذب انرژی الکترومغناطیسی می‌توانند در محیط‌های دریایی کاربردهای مهمی داشته باشند. در سیستم‌های مخابراتی و راداری دریایی، این جاذب‌ها به کاهش بازتاب‌های ناخواسته و نویزها کمک کرده و کیفیت سیگنال‌ها را بهبود می‌بخشند. همچنین، در سیستم‌های برداشت انرژی از امواج الکترومغناطیسی، این جاذب‌ها می‌توانند انرژی مورد نیاز دستگاه‌های الکترونیکی زیرآبی، نظیر حسگرها و سیستم‌های مخابراتی، را تأمین کرده و نیاز به باتری‌ها را کاهش دهند. علاوه بر این، در سیستم‌های نظارتی و ایمنی کشتی‌ها و سکوها دریایی نیز می‌توانند به تأمین انرژی لازم و کاهش هزینه‌های عملیاتی کمک کنند.

در این مقاله، یک جاذب فراسطحی جدید برای برداشت توان بی‌سیم با راندمان بالا معرفی شده است. جاذب فراسطحی پیشنهادی توانایی جمع‌آوری انرژی الکترومغناطیسی را در زوایای وسیع دارد و می‌تواند توان دریافتی را به جریان مستقیم تبدیل کند تا یک سیستم برداشت الکترومغناطیسی ایجاد نماید. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که برای یک سلول واحد با شرایط مرزی متناوب، راندمان جذب و برداشت انرژی به ۸۲ درصد می‌رسد. همچنین، جریان سطحی و نسبت جذب در زوایای تابشی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. یافته‌های شبیه‌سازی نشان می‌دهد که پیک‌های جذب و پهنای باند تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار دارند.

۲- طراحی جاذب فراسطحی

سلول واحد جاذب فراسطحی پیشنهادی شامل یک تشدید کننده متقاطع شکل است که با دی الکتریک Rogers TMM10I با ثابت دی الکتریک ۹/۹ و ضخامت ۲/۵ میلی



شکل (۲) نمای جانبی جاذب پیشنهادی، ورق دی الکتریک و سطوح فلزی را نشان می‌دهد.

برای دستیابی به جذب کامل، امپدانس ورودی موثر باید با فضای آزاد مطابقت داشته باشد، که می‌توان با تنظیم گذر و نفوذپذیری ساختار جاذب فراسطوحی به دست آورد. بنابراین، پاسخ جذب را می‌توان با استفاده از رابطه (۲)، به شرح زیر محاسبه کرد [21]:

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) \quad (2)$$

که در آن، $R(\omega) = |S_{11}|^2$ و $T(\omega) = |S_{21}|^2$ ، نشان‌دهنده ضرایب بازتاب و انتقال هستند. تمام شبیه‌سازی‌های عددی این مطالعه در نرم‌افزار CST انجام شد که با استفاده از یک حل‌کننده حوزه فرکانس برای نشان دادن عملکرد جاذب فراسطوحی پیشنهادی و کسب بینش در مکانیزم جذب بهینه مایکروویو آن طراحی شده است.

یک شبیه‌سازی سلول واحد بی‌نهایت برای بهبود کارایی محاسباتی در مرحله توسعه طراحی مورد نیاز بود. با این حال، به دلیل دشواری ایجاد یک آرایه نامتناهی، یک سلول واحد در مرکز یک آرایه بزرگ ممکن است مشابه سلول واحد یک آرایه بی‌نهایت رفتار کند. در نتیجه، یک ساختار تناوبی نامتناهی در امتداد محورهای x-y یک سلول واحد با استفاده از آن از شرایط مرزی تناوبی شبیه‌سازی شد. یک میدان الکتریکی (E-Field) در امتداد محور X و یک میدان مغناطیسی (H-Field) در امتداد محور Y برای مدل‌سازی اعمال می‌شود.

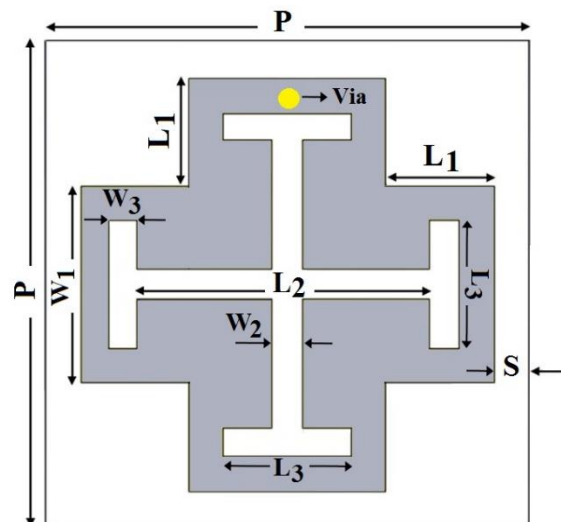
۳- نتایج و بحث

برای ارزیابی عملکرد جاذب، راندمان جذب به‌عنوان نسبتی از انرژی موج فرکانس رادیویی تعریف می‌شود که سلول واحد پس از برخورد با موج فرکانس رادیویی قادر است آن را جذب کند. به عبارت دیگر، این راندمان نشان می‌دهد چه مقدار از انرژی ورودی به جاذب به‌طور مؤثر جذب شده و در آن ذخیره می‌شود. این را می‌توان با استفاده از معادله زیر بدست آورد [۲۱]:

متر پوشیده شده است. یک لایه مس به عنوان یک صفحه زمین در لایه زیرین عمل می‌کند و به طور مؤثری عبور و مرور را مسدود می‌کند. این بستر به دلیل ثابت دی الکتریک بالای آن، که نیروی جذب شده را حفظ می‌کند، انتخاب شد. تشدیدکننده حلقه الکتریکی توسط یک صفحه زمین پشتیبانی می‌شود، که نقش مهمی در به حداکثر رساندن تابش امواج الکترومغناطیسی به جریان الکتریکی جریان مستقیم دارد. ابعاد هندسی تشدیدکننده حلقه الکتریکی برای دستیابی به رزونانس فرکانس مورد نظر در ۳/۵ گیگاهرتز بهینه شده است که در آن حداکثر جذب توان اتفاق می‌افتد.

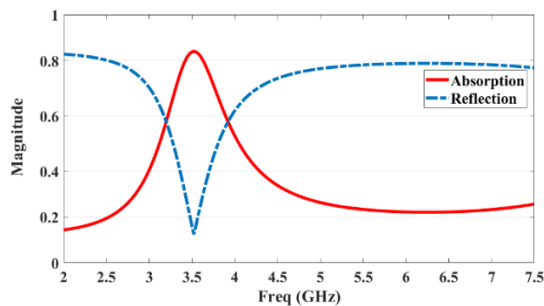
پارامترهای هندسی سلول واحد جاذب فراسطوحی پیشنهادی نشان داده شده در شکل ۱ به شرح زیر است (ابعاد بر حسب میلی متر): $P=26$ ، $L_1=5.94$ ، $W_1=10.8$ ، $L_2=16.8$ ، $W_2=1.08$ ، $W_3=1.2$ ، $L_3=7.2$ ، $S=1.6$ ، $h=2.5$ و $t=0.035$ متر، تشدیدکننده فلزی در لایه بالایی به وسیله یک المان مقاومتی که به‌طور دقیق طراحی شده است، به صفحه زمین متصل می‌شود، همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است. [13]:

$$Z_{in} = \sqrt{\frac{(1 + S_{11}(\omega))^2 - S_{21}^2(\omega)}{(1 - S_{11}(\omega))^2 - S_{21}^2(\omega)}}, \quad \omega = 2\pi f \quad (1)$$

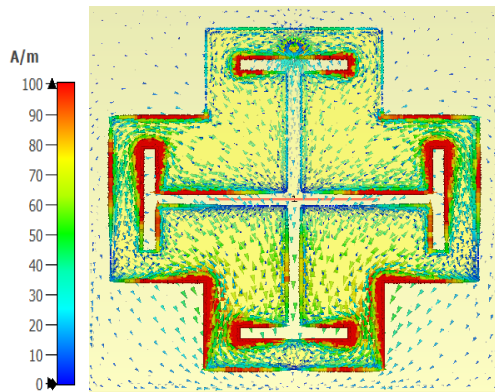


شکل (۱) هندسه سلول واحد جاذب پیشنهادی (خطوط خاکستری تیره فلزی و تمام ابعاد میلی متر هستند).

است و بیشتر در امتداد شکاف‌ها در فرکانس ۳/۵ گیگاهرتز متمرکز شده است. جریان سطح در سراسر ساختار جاذب سطح توزیع می‌شود، با غلظت‌های بالاتر در امتداد محور Y در بالای تشدیدکننده متقاطع و در امتداد محور X در لبه‌های چپ و راست شکاف متقاطع. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، حداکثر چگالی جریان سطحی با قرار دادن سوراخ پروب در سمت بالایی تشدیدکننده (در امتداد محور Y) که به یک بار مقاومتی منتقل شده است، به بار تحویل داده می‌شود. در ادامه، میزان جذب سلول واحد خود را تحت پارامترهای ابعادی و عملیاتی مختلف ارزیابی می‌کنیم که تنظیمات بهینه آن‌ها از روی آن تعیین می‌شود. این با مقایسه عملکرد سلول واحد قبل و بعد از بهینه سازی دنبال می‌شود.



شکل (۳) ضرایب جذب و انعکاس جاذب فراسطی پیشنهادی در حالت زاویه معمولی (۰).



شکل (۴) توزیع جریان سطحی روی سلول جذب کننده فراسطی در فرکانس ۳/۵ گیگاهرتز.

۵- مکانیسم های جذب و پارامترهای مختلف طراحی سلول واحد

سلول واحد پیشنهادی ابتدا تحت دیافراگم‌های مختلف وصله فلزی متقاطع شکل بزرگ (W_1)، که از ۸/۸ میلی متر تا ۱۲/۸ میلی متر (در مراحل ۱ میلی متر) متغیر است، ارزیابی می‌شود، در حالی که تمام پارامترهای دیگر روی

$$A(\omega) = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \quad (3)$$

که، $|S_{11}|$ و $|S_{21}|$ آنها به ترتیب نشان دهنده ضرایب بازتاب و انتقال هستند. در حالی که مربع مقادیر آنها $|S_{11}|^2$ و $|S_{21}|^2$ به عنوان انعکاس و انتقال واحد نامیده می‌شود. برای دستیابی به جذب کامل، باید بازتاب و انتقال انرژی به حداقل برسد. در این جاذب فراسطی، لایه زیرین از مس ساخته شده است که باعث کاهش چشمگیر امواج بازتابیده می‌شود. اگرچه، ساختار جاذب فراسطی پیشنهادی توسط صفحه مسی کامل ساخته شده است، معادله (۲) را می‌توان به موارد زیر تغییر داد:

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) \quad (4)$$

مهم‌ترین ویژگی یک جاذب، راندمان برداشت انرژی است که به عنوان مقدار انرژی جذب شده توسط جاذب و تبدیل آن به توان خروجی تعریف می‌شود [۱۵]. هدف اصلی، بهینه‌سازی این راندمان برای زوایای مختلف برخورد است تا بالاترین میزان توان ممکن از انرژی جذب شده به بار منتقل شود. راندمان تبدیل تشعشع به جریان متناوب با رابطه زیر تعریف می‌شود [۲۲]:

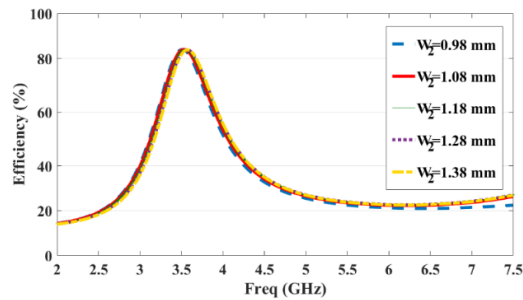
$$\eta_{Rad \rightarrow AC} = \frac{P_{load}}{P_{incident}} \quad (5)$$

که در آن $P_{incident}$ به معنای میانگین توان ورودی در منطقه تحت تاثیر و P_{load} به معنای میانگین توان منتقل شده به بار است.

۴- نتایج شبیه‌سازی شده سلول واحد

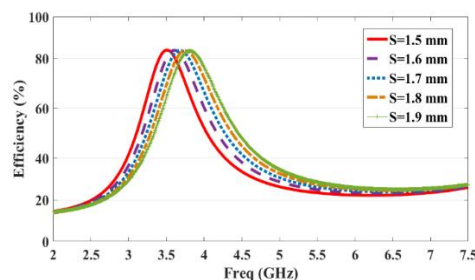
همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، ضرایب جذب، بازتاب و انتقال جاذب فراسطی پیشنهادی در فرکانس ۳/۵ گیگاهرتز بررسی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که جاذب پیشنهادی قادر است حدود ۸۲ درصد از انرژی ورودی را جذب کند. همچنین، ضریب بازتاب در حداقل مقدار خود قرار دارد و ضریب انتقال نزدیک به صفر است. به این ترتیب، مقدار جذب انرژی به‌طور عمده بر اساس ضریب بازتاب محاسبه می‌شود.

عملکرد جاذب فراسطی با استفاده از توزیع میدان الکتریکی و جریان سطحی در ۳/۵ گیگاهرتز مورد مطالعه قرار می‌گیرد تا مکانیسم فیزیکی ساختار جاذب فراسطی آشکار شود. شکل ۴ توزیع میدان الکتریکی (E-Field) جاذب فراسطی پیشنهادی را نشان می‌دهد، میدان الکتریکی در دو طرف بالا و پایین تشدیدکننده توزیع شده

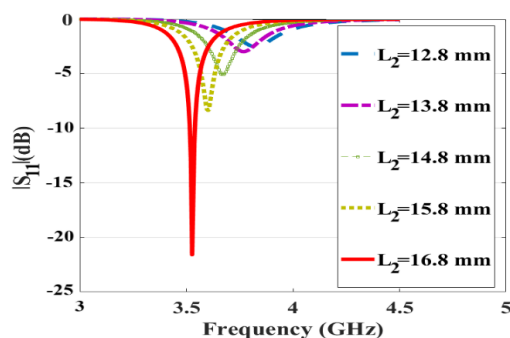


شکل (۶) بررسی اندازه های مختلف عرض شکاف متقاطع در شکل (W₂).

به منظور بررسی تأثیر شکاف متقاطع بر عملکرد جاذب فراسطوحی، طول شکاف متقاطع، که به صورت L_2 در شکل ۸ تعریف شده است، از $12/8$ میلی متر تا $16/8$ میلی متر در گام های 1 میلی متری تغییر می کند، در حالی که همه موارد دیگر پارامترها ثابت نگه داشته می شوند. شکل ۸ ضریب انعکاس با L_2 را نشان می دهد که از $12/8$ میلی متر تا $16/8$ میلی متر متغیر است. واضح است که فرکانس تشدید به سمت پایین تغییر می کند. این را می توان بر اساس معادله ای توضیح داد که نشان می دهد با تغییر مقادیر خازن و اندوکتانس، فرکانس رزونانس نیز تغییر می کند.



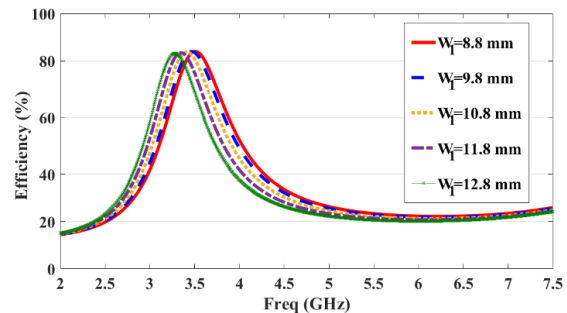
شکل (۷) بررسی کارایی فاصله لبه سازه پیشنهادی با وصله کراس شکل روی آن (S).



شکل (۸) بررسی ضریب بازتاب وابستگی در امتداد شکاف متقاطع.

در شکل ۹، نسبت جذب در شرایط بدون مقاومت برای نشان دادن اثر مقاومت اعمال شده بر روی شکاف لایه زمین

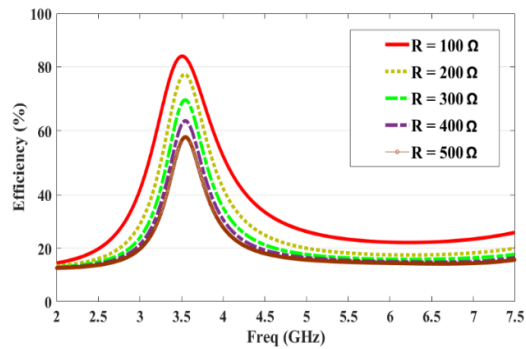
مقادیر پیش فرض تنظیم می شوند. خود را حفظ می کند جذب به دست آمده در شکل ۵ نشان داده شده است. با افزایش W_1 پیک های تشدید به سمت راست حرکت می کنند و به دلیل تأثیر اندازه W_1 بر رزونانس، باعث تغییر فرکانس می شود.



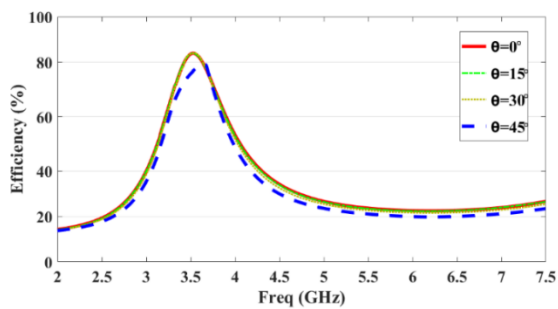
شکل (۵) بررسی اندازه های مختلف وصله بزرگ متقاطع فلزی (W₁).

در ادامه، همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، دیافراگم های مختلف شکاف ایجاد شده روی وصله فلزی متقاطع (W_2) ارزیابی شده است که از $0/98$ میلی متر تا $1/38$ میلی متر (در مراحل $0/1$ میلی متر) متغیر است. تغییر اندازه W_2 باعث جابجایی پیک های تشدید و جابجایی به سمت راست می شود. تغییر W_2 باعث تغییر در لبه های سازه می شود و بر میزان جذب تأثیر می گذارد. بهترین حالت جذب در بهینه ترین حالت ممکن زمانی رخ می دهد که W_2 برابر با $1/08$ میلی متر باشد.

در مرحله بعد فاصله لبه سازه با وصله ضربدری (S) بین $1/5$ میلی متر تا $1/9$ میلی متر (در مراحل $0/1$ میلی متر) تغییر می کند. جذب به دست آمده در شکل ۷ نشان می دهد که با کاهش S از $1/9$ میلی متر به $1/5$ میلی متر، فرکانس رزونانس به سمت $3/5$ گیگاهرتز تغییر می کند. زیرا کاهش S باعث عدم تطابق امپدانس بین سازه و فضای آزاد می شود که به نوبه خود باعث کاهش انعکاس و در نتیجه افزایش جذب می شود. در نتیجه $1/6$ میلی متر به عنوان مقدار بهینه انتخاب می شود زیرا بالاترین راندمان جذب را فراهم می کند.



شکل (۱۰) بررسی راندمان برداشت انرژی در مقادیر مختلف بار مقاومتی.



شکل (۱۱) بررسی نسبت جذب راندمان جاذب فراسطی در زوایای بروز مختلف.

جدول (۱) مطالعه مقایسه ای جاذب مبتنی بر فراسطح

پیشنهادهای با حالت های مختلف مقالات چاپ شده

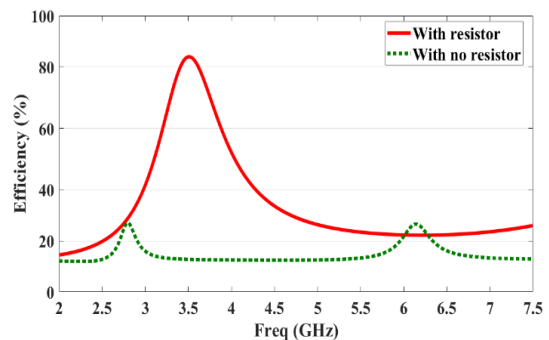
لایه بالایی	باند فرکانسی	راندمان	استفاده ه از حفره	فرکانس (گیگاهرتز)	ابعاد ساختار (میلی متر)	منابع
مس	باند S	۸۱٪	بله	۲/۶	۱۴/۷۵×۱۴/۷۵	۱۴
مس	باند C	۸۳٪	بله	۶/۲	۹/۶×۹/۶	۱۵
مس	باند C	۶۸٪	بله	۵/۸	۱۴×۱۴	۱۶
مس	باند C	۸۰٪	بله	۵/۸	۱۶/۷×۱۶/۷	۱۷
مس	باند S	۶۰٪	بله	۲/۴	۳۰×۳۰	۱۸
مس	باند KU, K, Ka	۹۸٪	خیر	۱۴/۳۵-۲۹/۱۸	۵/۵×۵/۵	۱۹
مس	باند C, X, Ku	۹۸٪	خیر	۴/۱-۱۳/۴۵	۸×۸	۲۰
مس	باند S	۸۲٪	بله	۳/۵	۲۶×۲۶	این کار

با توجه به ابعاد ساختار و استفاده از حفره جهت انتقال توان جذب شده به شبکه تغذیه و راندمان جذب بالاتر در مقایسه با ساختارهای دیگر می توان در زوایای گسترده از ساختار ارائه شده، استفاده کرد و در پوشش گسترده در فرکانس ۳/۵ گیگاهرتز در دستگاه های دریایی به کار گیرد.

در ساختار جاذب سطحی مقایسه شده است. شکل ۹ نتایج شبیه سازی شده خواص جذب محاسبه شده عددی را نشان می دهد. همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است، نسبت جذب کمتر از ۲۰٪ در ۲/۷۵ گیگاهرتز برای یک ساختار بدون مقاومت مشاهده شده است. برای ساختار جاذب سطحی با مقاومت، نسبت جذب بالاتر بیش از ۸۲٪ به دست آمد. بر اساس این تحلیل، یک عنصر مقاومتی با مقدار مقاومت بهینه برای دستیابی به نسبت جذب بالاتر ضروری است.

برای بررسی اثر مقادیر بار مقاومتی بر راندمان برداشت و راندمان برداشت از نرم افزار CST استفاده شد. مقدار مقاومت از ۱۰۰ Ω تا ۵۰۰ Ω متغیر است. حداکثر راندمان برداشت در ۱۰۰ Ω مشاهده شد. مقدار مقاومت بهینه تحت تأثیر اندازه سلول واحد، خواص دی الکتریک زیرلایه و موقعیت پروب است. شکل ۱۰ راندمان برداشت را در مقادیر مقاومت مختلف نشان می دهد. همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، مقدار راندمان برداشت با تغییر مقدار مقاومت تغییر می کند و حداکثر بازده برداشت حدود ۸۲٪ زمانی مشاهده شد که مقدار مقاومت ۱۰۰ Ω باشد.

برای اندازه گیری تأثیر زوایای برخورد مورب مختلف بر بازده جذب، سلول واحد فراسطی در زوایای مختلف فرود شبیه سازی شد. تابش ورودی از زوایای مختلف برخورد مورد بررسی قرار گرفت. جذب جذب کننده فراسطی در زوایای مختلف بروز از ۰ تا ۴۵ درجه (در مراحل ۱۵ درجه) محاسبه شد. شکل ۱۱ نسبت جذب را برای جاذب پیشنهادی در زوایای برخورد مختلف نشان می دهد، جایی که زوایای پلاریزاسیون است. نسبت جذب در زوایای برخورد ۰ درجه، ۱۵ درجه، ۳۰ درجه و ۴۵ درجه در ۳/۵ گیگاهرتز به ترتیب حدود ۸۲٪، ۸۱٪، ۸۰٪ و ۷۵٪ است.



شکل (۹) بررسی کارایی جاذب پیشنهادی با بار مقاومتی و بدون بار مقاومتی.

نتیجه گیری

در این مقاله، یک سیستم جدید جمع‌آوری توان بی‌سیم با راندمان بالا با استفاده از یک جاذب فراسطی ارائه شده است. این جاذب توانایی جمع‌آوری انرژی الکترومغناطیسی در زاویه‌های وسیع را داراست و توان دریافت شده را از طریق ترکیب جریان مستقیم به یک سیستم برداشت الکترومغناطیسی تبدیل می‌کند. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که جاذب فراسطی پیشنهادی در فرکانس ۳/۵ گیگاهرتز و با پایداری زاویه‌ای بالا از ۰ تا ۴۵ درجه برای امواج تابیده شده TE عمل می‌کند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این جاذب قادر است به راندمان جذب و برداشت ۸۲ درصد دست یابد. ضریب بازتاب حداقل و ضریب انتقال تقریباً صفر است. توزیع جریان سطحی نیز مورد مطالعه قرار گرفته و نشان داده شده است که جریان سطحی در دو طرف بالا و پایین تشدیدکننده توزیع شده و بیشتر در امتداد شکاف‌ها متمرکز شده است. به علاوه، بررسی اثر مقادیر مختلف بار مقاومتی نشان داد که حداکثر راندمان برداشت در مقدار مقاومت ۱۰۰ اهم به دست می‌آید. این بررسی‌ها نشان‌دهنده تأثیر قابل‌توجه مقدار مقاومت بر راندمان برداشت انرژی است.

مراجع

- multi-gap SRRs structure,” *Applied Physics A*, vol. 107, pp. 155–160, 2012.
- [7] M. Amiri, F. Tofigh, N. Shariati, J. Lipman, and M. Abolhasan, “Wide-angle metamaterial absorber with highly insensitive absorption for TE and TM modes,” *Scientific reports*, vol. 10, no. 1, p. 13638, 2020.
- [8] M. S. Sim, K. Y. You, F. Esa, M. N. Dimon, and N. H. Khamis, “Multiband metamaterial microwave absorbers using split ring and multiwidth slot structure,” *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 28, no. 7, p. e21473, 2018.
- [9] M. Abdollahvand et al., “Active frequency selective surface with switchable response for satellite communications in X and Ka bands,” *Int J RF Mic Comp-Aid Eng*, vol. 32, no. 9, Sep. 2022, doi: 10.1002/mmce.23255.
- [10] F. Ding, Y. Cui, X. Ge, Y. Jin, and S. He, “Ultra-broadband microwave metamaterial absorber,” *Applied physics letters*, vol. 100, no. 10, 2012.
- [11] B. Mulla and C. Sabah, “Multiband metamaterial absorber design based on plasmonic resonances for solar energy harvesting,” *Plasmonics*, vol. 11, pp. 1313–1321, 2016.
- [12] J. Tang, Z. Xiao, K. Xu, X. Ma, and Z. Wang, “Polarization-controlled metamaterial absorber with extremely bandwidth and wide incidence angle,” *Plasmonics*, vol. 11, pp. 1393–1399, 2016.
- [13] M. Bağmancı, O. Akgöl, M. Özaktürk, M. Karaaslan, E. Ünal, and M. Bakır, “Polarization independent broadband metamaterial absorber for microwave applications,” *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 29, no. 1, p. e21630, 2019.
- [14] M. E. Badawe and O. Ramahi, “Polarization independent metasurface energy harvester,” in *2016 IEEE 17th Annual Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON)*, Clearwater, FL, USA: IEEE, Apr. 2016, pp. 1–3. doi: 10.1109/WAMICON.2016.7483850.
- [15] H.-T. Zhong, X.-X. Yang, X.-T. Song, Z.-Y. Guo, and F. Yu, “Wideband metamaterial array with polarization-independent and wide incident angle for harvesting ambient electromagnetic energy and wireless power transfer,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 111, no. 21, p. 213902, Nov. 2017, doi: 10.1063/1.4986320.
- [16] F. Yu, J. Du, and X. Yang, “Four-band polarization-insensitive and wide-angle metasurface with simplified structure for harvesting electromagnetic energy,” presented at the 2019 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS), IEEE, 2019, pp. 1–3.
- [17] F. Yu, X. Yang, H. Zhong, C. Chu, and S. Gao, “Polarization-insensitive wide-angle-reception metasurface with simplified structure for harvesting electromagnetic energy,” *Applied physics letters*, vol. 113, no. 12, 2018.
- [1] M.-J. Nie, X.-X. Yang, G.-N. Tan, and B. Han, “A compact 2.45-GHz broadband rectenna using grounded coplanar waveguide,” *IEEE antennas and wireless propagation letters*, vol. 14, pp. 986–989, 2015.
- [2] C. Song, Y. Huang, J. Zhou, J. Zhang, S. Yuan, and P. Carter, “A high-efficiency broadband rectenna for ambient wireless energy harvesting,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 8, pp. 3486–3495, 2015.
- [3] X. Shen, T. J. Cui, J. Zhao, H. F. Ma, W. X. Jiang, and H. Li, “Polarization-independent wide-angle triple-band metamaterial absorber,” *Optics express*, vol. 19, no. 10, pp. 9401–9407, 2011.
- [4] A. Ghaneizadeh, K. Mafinezhad, and M. Joodaki, “A new compact dual-band perfect absorption ultrathin planar metasurface energy harvester in X-and V-bands with a wide incident angle,” *AIP Advances*, vol. 10, no. 8, 2020.
- [5] W. Li et al., “Polarization-insensitive wide-angle multiband metamaterial absorber with a double-layer modified electric ring resonator array,” *Aip Advances*, vol. 5, no. 6, 2015.
- [6] Q. Ye, Y. Liu, H. Lin, M. Li, and H. Yang, “Multi-band metamaterial absorber made of

- circular split ring resonator for multiband microwave applications,” *Results in Physics*, vol. 19, p. 103467, 2020.
- [21] N. I. Landy, S. Sajuyigbe, J. J. Mock, D. R. Smith, and W. J. Padilla, “A Perfect Metamaterial Absorber,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 100, no. 20, p. 207402, May 2008, doi: 10.1103/PhysRevLett.100.207402.
- [22] O. M. Ramahi, T. S. Almoneef, M. AlShareef, and M. S. Boybay, “Metamaterial particles for electromagnetic energy harvesting,” *Applied Physics Letters*, vol. 101, no. 17, p. 173903, Oct. 2012, doi: 10.1063/1.4764054.
- [18] A. A. Ghaleb Amer, S. Z. Sapuan, and N. Nasimuddin, “Wide-Coverage Suspended Metasurface Energy Harvester for ISM Band Applications,” in *2021 IEEE 19th Student Conference on Research and Development (SCoReD)*, Kota Kinabalu, Malaysia: IEEE, Nov. 2021, pp. 87–90. doi: 10.1109/SCoReD53546.2021.9652779.
- [19] A. S. Saadeldin, A. M. Sayed, A. M. Amr, M. O. Sayed, M. F. O. Hameed, and S. Obayya, “Broadband polarization insensitive metamaterial absorber,” *Optical and Quantum Electronics*, vol. 55, no. 7, p. 652, 2023.
- [20] M. Moniruzzaman, M. T. Islam, G. Muhammad, M. S. J. Singh, and M. Samsuzzaman, “Quad band metamaterial absorber based on asymmetric