

Design, Simulation and Fabrication of Ultra-Wide-Band Electromagnetic Waves Absorber with Optimal Dimensions Based on Metamaterial

J. khalilpour^{1*}, H. R. Dalili Oskouyi², S. A. Taghavi³

* electrical faculty, Khatam-ol- anbia air defense university. Tehran. Iran

(Received: 27/05/2020; Accepted: 02/08/2020)

Abstract

In this paper, an ultra-wide-band Metamaterial Absorber with simple structure and optimum dimensions and thickness is proposed for X-band applications. This structure design with using three split circular rings and its dimensions optimized with HFSS. The unit cell of the proposed absorber has low dimensions and thickness (thickness $0.066 \lambda_0$ at 10 GHz central frequency). An array of 24×24 elements of the proposed metamaterial absorber with dimensions of $[170 \times 170 \text{ mm}]^2$ was constructed and evaluated in practice. The structural parameters of resultant Metamaterial including permeability (μ) and permittivity (ϵ) are extracted by using Nicolson- Rose method. The results of simulation and practical measurement, show that, almost in total X-band rang (of 7.3 GHz to 11.5 GHz), the structure of the absorption bandwidth is 90%. Also, the studing of the results shows that, there is a good agreement between the acting measurement and simulation. The designed structure was also tested for the angles of perpendicular and obliquely incident electromagnetic wave, that, up to 45 degrees, absorption bandwidth did not change much.

Keywords: Metamaterial Absorber, Split Ring, Absorption Band

* Corresponding author E-mail: j_khalilpour@ssau.ac.ir

طراحی، شبیه‌سازی و ساخت جاذب امواج الکترومغناطیسی پهن‌بند با

ابعاد بهینه مبتنی بر فراماده

جعفر خلیل‌پور^{۱*}، حمیدرضا دلیلی اسکویی^۲، سیدعلی تقوی^۳

۱- دانشیار، دانشکده برق دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء (ص)، ۲- دانشیار، دانشگاه شهید ستاری، تهران، ایران ۳- کارشناسی ارشد، دانشکده برق

دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء (ص)، تهران، ایران

(دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۰۷، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۱۲)

چکیده

در این مقاله، یک جاذب فراماده پهن‌بند با ساختاری ساده، ابعاد و ضخامت بهینه برای کاربردهای باند X پیشنهاد شده است. این ساختار با استفاده از سه حلقه دایروی شکافدار طراحی شده و با نرم‌افزار HFSS ابعاد آن بهینه‌سازی شده است. سلول واحد جاذب پیشنهادی دارای ابعاد و ضخامت کم (ضخامت $20.066 \lambda_0$ در فرکانس مرکزی 10 GHz) می‌باشد. یک آرایه 24×24 عنصری از جاذب فراماده پیشنهادی با ابعاد $170 \times 170 \text{ mm}^2$ ساخته شده و مورد ارزیابی عملی قرار گرفت. مولفه‌های ساختاری فراماده حاصل شامل ضریب نفوذ مغناطیسی (μ) و ضریب گذردهی الکتریکی (ϵ) آن با روش نیکلسون-رز استخراج شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری عملی، نشان می‌دهد که تقریباً در کل محدوده باند $x(7/3 \text{ GHz}$ الی $11/50 \text{ GHz})$ ، ساختار دارای پهنای باند جذب بالای ۹۰ درصد می‌باشد. همچنین بررسی نتایج حاصله نشان می‌دهد که تطابق بسیار خوبی بین پاسخ اندازه‌گیری عملی و شبیه‌سازی برقرار می‌باشد. ساختار طراحی شده برای زوایای برخورد عمود و مایل موج الکترومغناطیسی، مورد آزمایش قرار گرفت که تا زاویه تابش ۴۵ درجه، پهنای باند جذب ساختار تغییر محسوسی نمی‌کند.

کلید واژه‌ها: جاذب فراماده، حلقه دایروی شکافدار، باند جذب

همکارانش توانستند ساختاری ارائه دهند که بتواند ϵ و μ همزمان منفی ایجاد کند [۲].

۱- مقدمه

ویژگی‌های منحصر به فرد ساختارهای کامپوزیتی مصنوعی و ساخته دست بشر "فرامواد" [۲]، توجه بسیاری از دانشمندان را به خود جلب نموده و در کاربردهای مختلفی از جمله جاذب‌ها [۴-۳]، آنتن‌ها [۶-۵]، پوشش [۷] و غیره مورد استفاده قرار گرفته است. جاذب‌ها از قدیمی‌ترین و پرکاربردترین ساختارها به منظور کاهش سطح مقطع راداری (Radar Cross Section) هدف به‌شمار می‌روند که هم با استفاده از مواد جاذب راداری [۸] و هم با استفاده از ساختارهای جاذب راداری ساخته می‌شوند. هرچه سطح مقطع راداری کمتر باشد، امکان این‌که توسط ابزارهای آشکارساز دیده شود، کمتر است.

این جاذب‌ها با جذب پرتوهای امواج ورودی کار می‌کنند. با پیشرفت فناوری و قابلیت ساخت مواد و طراحی آن‌ها در مقیاس نانو و حتی کوچکتر، تلاش جهت ساخت جاذب‌هایی بسیار نازک و سبک‌تر از انواع متداول نیز آغاز شد. یکی از روش‌های مناسب برای حل برخی از مشکلات و محدودیت‌های روش‌های مربوط به جاذب‌های راداری معمولی، در کاهش سطح مقطع راداری، استفاده از فرامواد است که با توجه به ویژگی‌های منحصر به فردشان از جمله امکان طراحی آن‌ها در فرکانس‌های بالا

فرامواد^۱ به صورت کلی به‌عنوان ساختارهای الکترومغناطیسی همگن مؤثر مصنوعی شناخته می‌شوند که خصوصیات غیرمعمولی از خود نشان می‌دهند که در طبیعت به راحتی یافت نمی‌شوند [۱]. آن‌ها ساختارهای دست چپی هستند که ضریب گذردهی الکتریکی ϵ و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی μ در این مواد منفی است. فرامواد ساختارهای متناوب جدیدی هستند که در سال‌های اخیر به دلیل خواص و کاربردهای متنوع بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند.

تاریخچه فراماده، به قرن بیستم میلادی برمی‌گردد، یعنی زمانی که فیزیکدان روسی، ویکتور وسلایگو [۱] در مقاله‌ای با عنوان "خصوصیات الکترومغناطیسی مواد با گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی همزمان منفی" به بررسی نظری امکان وجود ماده‌ای با ضریب شکست منفی که نور را در خلاف جهت عادی منحرف می‌کند، پرداخت [۱]. در نهایت، D.R Smith و همکارانش با الهام از تحقیقات انجام شده توسط Pendry و

* نویسنده مسئول: j_khalilpour@ssau.ac.ir

¹ metamaterials

ساختار، بهترین حالت جذب مشاهده گردید. این ساختار، ساخته شده و مورد اندازه‌گیری قرار گرفته که نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری در تطابق خوبی با هم قرار دارند.

۲- طراحی

در این مقاله دو مرحله طراحی مورد توجه قرار گرفته است. طراحی جذب و طراحی فراماده SRR، که به‌طور مفصل در زیر مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۱- طراحی جذب

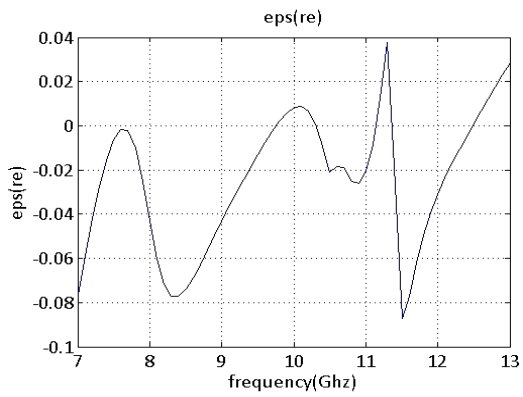
جذب پهن باند پیشنهادی در شکل (۱) نشان داده شده است. سلول واحد، از یک پیچ فلزی در بالا و صفحه زمین در انتها که به‌وسیله یک زیرلایه دی‌الکتریک از هم جدا شده‌اند، تشکیل شده است. زیرلایه FR-4 با $\epsilon_r = 4.4$ و $\tan \delta = 0.02$ به‌عنوان دی‌الکتریک با ضخامت ۲ mm مورد استفاده قرار گرفت. لایه بالایی از سه حلقه دایروی شکافدار، که دو رینگ وسطی با یک شکاف و بزرگترین رینگ با دو شکاف هستند، تشکیل گردیده است. دو رینگ وسطی دارای یک شکاف در یک جهت و در جهت x-y قرار داده شده و شکافهای بزرگترین رینگ نیز در امتداد مورب ساختار قرار دارند. هر دو پیچ بالایی و صفحه زمین انتهایی بوسیله مس با ضخامت ۰/۰۳۵ mm و ضریب هدایت پذیری $\sigma = 5.8 \times 10^7 S/m$ ساخته شده‌اند. ابعاد سلول واحد و پیچ بالایی عبارتند از: $a = 6.9$ ، $r_1 = 1.6$ ، $r_2 = 2.3$ ، $r_3 = 3.15$ ، $w_1 = 0.7$ ، $w_2 = 0.5$ ، $w_3 = 0.51$ ، $g_1 = 0.3$ ، $g_2 = 0.1$ ، $g_3 = 0.4$ (کلیدها واحدها بر حسب میلی‌متر می‌باشند). این ابعاد با بهینه‌سازی تک تک المان‌ها و سوییچ متغیرهای آن‌ها به‌دست آمده و بهترین حالت برای این ساختار می‌باشند. این ساختار با ضخامت ۰/۰۶۶ λ_0 با در نظر گرفتن فرکانس مرکزی ۱۰ GHz طراحی شده و به منظور تحلیل یک آرایه بی‌نهایت برای جذب پیشنهادی، از نرم‌افزار HFSS و شرایط مرزی Master-Slave و تحریک با Floquet port در شبیه‌سازی استفاده گردیده است. قابلیت جذب (Absorptivity) می‌تواند به‌صورت زیر بیان شود:

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

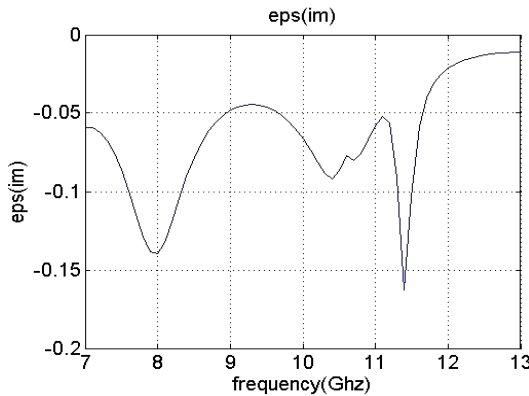
که در آن، $|S_{11}|^2$ معادل توان منعکس شده و $|S_{21}|^2$ معادل توان انتقال یافته می‌باشد. از آنجا که بخش انتهایی ساختار با صفحه فلزی به‌طور کامل پوشانده شده است، لذا انتقال موجی نخواهیم داشت و $|S_{21}|^2 = 0$ می‌گردد. بنابراین، قابلیت جذب می‌تواند به‌وسیله کم کردن انعکاس موج از ساختار جذب، بهبود یافته و به جذب مطلوب برسد.

نظیر تراهرتز، وزن، حجم و هزینه کم و سادگی ساختار آن‌ها بیشتر مورد توجه می‌باشند. این مواد طوری طراحی و شکل‌دهی می‌شوند که، انتشار امواج الکترومغناطیسی برخورد شده به خود را تغییر می‌دهند. همچنین این جاذب‌ها می‌توانند برای کاهش سطح مقطع راداری و فناوری پنهان‌سازی (Stealth) مورد استفاده قرار بگیرند.

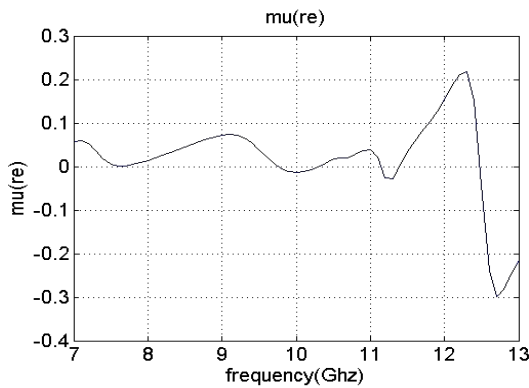
علاقتمندی به سمت جاذب‌های فرامواد، به‌دلیل ساختار با ضخامت کم و فشرده آن می‌باشد که باعث شده جایگزین جاذب‌های معمولی در باندهای فرکانسی مایکروویو، نوری، مرئی و مادون قرمز گردیده است [۹-۱۰]. همچنین این جاذب‌های فراماده، مزیت‌های دیگری از جمله جذب نزدیک به یک و پهنای باند خوب را نیز دارند. از این‌رو، جاذب‌های فراماده گوناگونی برای تک باند [۱۱]، چند بانده [۱۶-۱۲] و پهن باند [۱۸-۱۷] پیشنهاد شده‌اند. در سال‌های اخیر، جاذب‌های فراماده با پهنای باند زیاد، مورد توجه قرار گرفته‌اند. با وجود طبیعت بسیار نازک و جذب نزدیک به یک، یکی از معایب جاذب‌های فرامواد، باریک بودن پهنای باند عملکردی آن‌ها می‌باشد. پهنای باند جاذب‌های فراماده، با استفاده از ساختارهای چند لایه [۲۰-۱۹]، چند رزونانسی [۲۱] و تک لایه [۲۳-۲۲] افزایش یافتند. در ساختارهای چند لایه، لایه‌هایی از ماده دی‌الکتریک، برای جذب پهن باند، قرار داده شده است. این لایه‌های چندگانه، ضمن این که ضخامت جذب را افزایش می‌دهند، بهره‌برداری از آن‌ها جهت استفاده‌های معمولی را نیز سخت می‌نمایند. ساختارهای چند رزونانسی، از چند رزوناتور تشکیل شده که پهنای باند جذب وسیعی را می‌دهد، اگرچه اندازه آن‌ها بزرگ می‌باشد. در نتیجه، رزوناتورها با هم ترکیب شدند تا یک رزوناتور فشرده در یک لایه شکل گیرد، که طراحی و کنترل فرکانس رزونانس آن آسان است. ساختارهای تک‌لایه، با بهینه‌سازی مناسب، افزایش جذب و پهنای باند وسیع را به دنبال دارند. اگرچه این نوع از جاذب‌ها، جذب با پهنای باند بهینه شده را با ساختار هندسی ساده‌تر نشان می‌دهند، اما ابعاد سلول واحد برای پیاده‌سازی آن‌ها در کاربردهای معمولی، بسیار بزرگ است. این ساختارهای جاذب فراماده، عموماً به‌صورت آرایه‌ای از سلول واحد در بالای زیرلایه و صفحه کامل مسی در انتهای زیرلایه تشکیل شده است. در این مقاله یک جاذب فراماده پهن باند، تک لایه و با ابعاد بهینه برای فرکانس‌های باند X طراحی و شبیه‌سازی شده و تقریباً کل محدوده باند X را پوشش می‌دهد. این ساختار با ضخامت کم (ضخامت ۰/۰۶۶ λ_0 با در نظر گرفتن فرکانس مرکزی ۱۰ GHz) پهنای باند جذب بسیار خوب ۴/۲ GHz را با جذب بالای ۹۰ درصد از فرکانس ۷/۳ GHz الی ۱۱/۵ GHz نشان می‌دهد. شعاع، پهنای حلقه و پهنای شکاف‌های مربوط به هر یک از حلقه‌ها تغییر داده شد تا در بهینه‌ترین حالت قیدشده برای



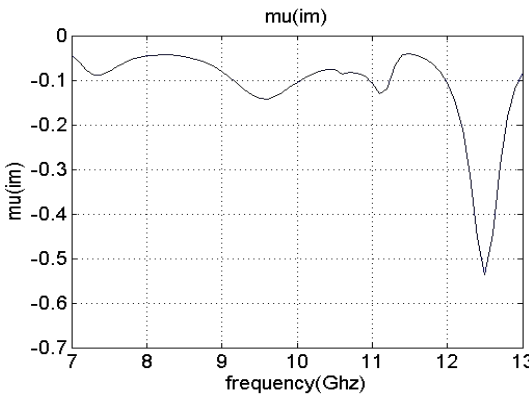
(الف)



(ب)

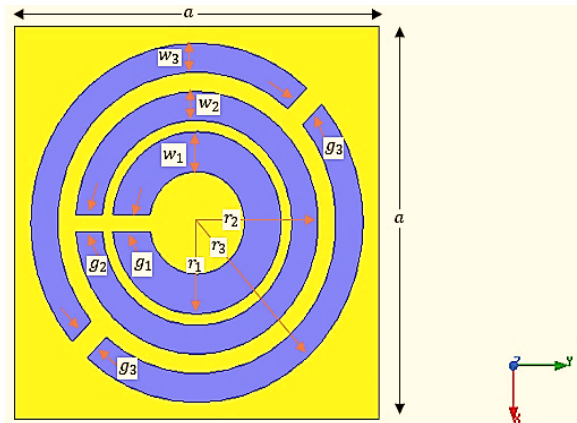


(ج)



(د)

شکل (۲): مولفه‌های ساختاری جاذب فراماده، الف) بخش حقیقی (ε)، ب) بخش موهومی (ε)، ج) بخش حقیقی (μ)، د) بخش موهومی (μ).



شکل (۱): نمای جلویی از ساختار سلول واحد جاذب فراماده.

۲-۲- طراحی فراماده

در طراحی فراماده از روش نیکلسون-رز [۲۶-۲۵] که در روابط (۵-۲) آمده، استفاده شده است. برای طراحی فراماده ابتدا سلول واحد را طراحی کرده و با استفاده از فرمول‌های نیکلسون-رز ثابت می‌کنیم که ϵ و μ سلول واحد، هر دو در فرکانس مورد نظر منفی هستند. بعد از طراحی سلول واحد نتایج را به یک آرایه 24×24 عنصری تعمیم می‌دهیم. شکل (۱) ابعاد سلول واحد جاذب فراماده را نشان می‌دهد.

$$\Gamma = \frac{\sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} - 1}{\sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} + 1} = \frac{\eta - 1}{\eta + 1} \quad (2)$$

$$\epsilon_r \approx \frac{2}{jk_0 d} \frac{1 - V_1}{1 + V_1} \quad (3)$$

$$\mu_r \approx \frac{2}{jk_0 d} \frac{1 - V_2}{1 + V_2} \quad (4)$$

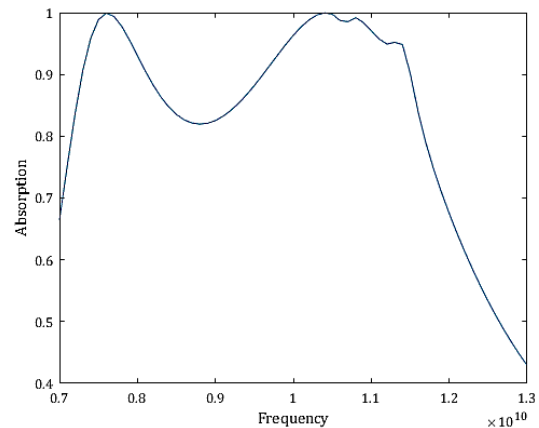
$$k = \frac{1}{jd} \frac{(1 - V_1)(1 + \Gamma)}{(1 - \Gamma V_1)} \quad (5)$$

در روابط فوق، Γ ضریب بازگشتی، η امپدانس ذاتی محیط، μ_r ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی فراماده، ϵ_r ضریب گذردهی الکتریکی نسبی فراماده، d ضخامت لایه‌ها، k_0 عدد موج فضای آزاد و $V_1 = s_{21} + s_{11}$ ، $V_2 = s_{21} - s_{11}$ می‌باشند.

ضریب گذردهی الکتریکی و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی فراماده حاصل با استفاده از روابط (۲ تا ۵) در شکل (۲) نشان داده شده‌اند. در شکل (۲) به وضوح نشان داده شده است که ضریب گذردهی الکتریکی و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی فراماده حاصل منفی هستند.

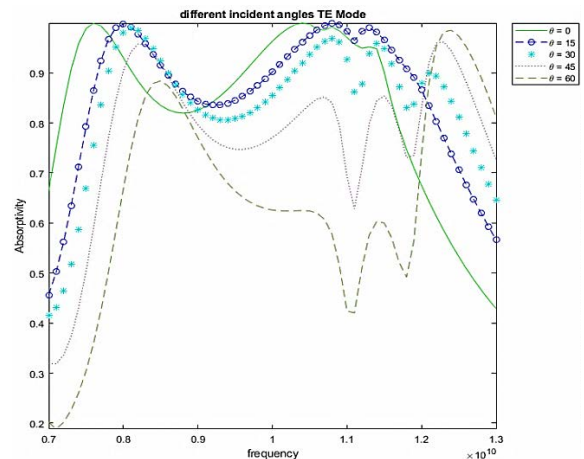
۳- شبیه‌سازی

در شکل (۳) می‌توان مشاهده نمود که، پهنای باند جذب بسیار خوب $4/2$ GHz را با جذب بالای ۹۰ درصد از فرکانس $7/3$ GHz الی $11/5$ GHz و با ۳ پیک در فرکانس‌های $7/6$ GHz، $99/96$ GHz و $10/4$ GHz به ترتیب با درصد جذب $99/91$ ، $99/96$ و $99/19$ به دست آمده است.



شکل (۳): نمودار جذب ساختار سلول واحد جاذب فراماده با زاویه برخورد مستقیم.

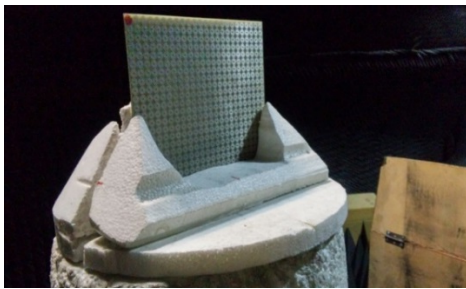
به منظور نشان دادن رفتار جاذب پهن‌بند در مواجهه با موج‌های برخوردی با زوایای مختلف، ساختار طراحی شده تحت زوایای تابش از ۰ درجه الی ۶۰ درجه قرار گرفت که در شکل (۴) نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل مشخص است، ساختار با تابش موج از زاویه ۰ درجه الی ۴۵ درجه تقریباً پهنای باند خود را حفظ می‌کند و تغییرات کمی را شاهد هستیم. حتی در زاویه تابش ۶۰ درجه نیز در برخی فرکانس‌ها جذب بالای ۹۰ درصد دارد که نشان دهنده حساسیت بسیار کم جاذب به زاویه تابش می‌باشد.



شکل (۴): نمودار جذب ساختار سلول واحد جاذب فراماده تحت زوایای تابش ۰ درجه الی ۶۰ درجه.

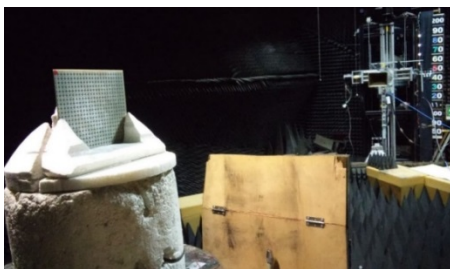
۳-۱- مکانیسم جذب

جریان سطحی و توزیع میدان الکترومغناطیسی در فرکانس مرکزی 10 GHz به ترتیب در شکل‌های (۸ - ۵) نشان داده شده‌اند. این اشکال برای تحلیل ساز و کار جذب جاذب فراماده مورد استفاده قرار می‌گیرند. همان‌گونه که در شکل‌های (۵ و ۶) نشان داده شده است، توزیع‌های جریان سطحی در فرکانس مرکزی در لایه بالایی (شکل ۵) و لایه پایینی (شکل ۶) غیرموازی با یکدیگر هستند. این جریان‌های سطحی، حلقه‌های جریان چرخشی را در اطراف میدان مغناطیسی تشکیل می‌دهند و در این فرکانس، میدان‌های الکتریکی با میدان‌های مغناطیسی هم‌پوشانی می‌کنند تا به بیشترین مقدار جذب برسند. با بررسی توزیع جریان سطحی ساختار در می‌یابیم که در فرکانس‌های پایین، جریان سطحی به‌طور عمده در حلقه بیرونی توزیع شده، در حالی که مقدار کمی جریان از طریق حلقه داخلی در فرکانس پایین جریان می‌یابد. در فرکانس‌های بالاتر این موضوع برعکس شده و جریان سطحی به‌طور عمده در حلقه داخلی توزیع می‌شود. در هر چهار قله جذب، این جریان‌های سطحی از طریق حلقه‌هایی که در اطراف میدان مغناطیسی برخوردی گردش می‌کنند، شکل می‌گیرند، لذا تشکیل رزونانس مغناطیسی قوی می‌دهند. رزونانس الکتریکی مابین پچ فلزی بالا و پایین شکل گرفته و در این فرکانس‌های جذب به هم، کوپل می‌شوند و جذب بالا محقق می‌گردد. در فرکانس رزونانس در شکاف‌های ساختار، به دلیل رخ دادن تشدید الکتریکی، خازن‌های قوی ایجاد می‌شود. همچنین به دلیل تولید جریان‌های موازی و غیر هم‌جهت در لایه‌های فلزی، تشدید مغناطیسی قوی بین آن‌ها به وجود می‌آید. شکل (۷ و ۸) نشان می‌دهند که، میدان‌های الکتریکی در نزدیکی شکاف‌های رینگ‌های حلقوی و میدان‌های مغناطیسی در قسمت پایینی رینگ‌های حلقوی در فرکانس مرکزی متمرکز شده‌اند تا جذب را به حداکثر برسانند. برای بررسی رزونانس الکتریکی، توزیع میدان الکتریکی در ساختار و برای بررسی رزونانس مغناطیسی، چگالی جریان الکتریکی رو سطوح فلزی را مد نظر قرار می‌دهیم. همان‌گونه که در شکل مشخص است، در فرکانس‌های پایین، حلقه‌های بیرونی تحت تأثیر قرار دارند. با افزایش فرکانس، ابتدا حلقه‌های میانی رزونانس کرده و با بیشتر کردن فرکانس، توزیع میدان در حلقه داخلی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. وجود جریان‌های موازی و خلاف جهت، شاهدی بر ایجاد خاصیت سلفی بین دو لایه فلزی در هر فرکانس رزونانس می‌باشد. با بررسی توزیع میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی مشخص است که در فرکانس‌های پایین حلقه بیرونی کمک کننده اصلی است و یک میدان الکترومغناطیسی بسیار موضعی در اطراف حلقه ایجاد می‌نماید. در فرکانس‌های بالا نیز حلقه بیرونی بسیار نقش دارد با این‌که حلقه داخلی نقش بسیار کمی دارد.



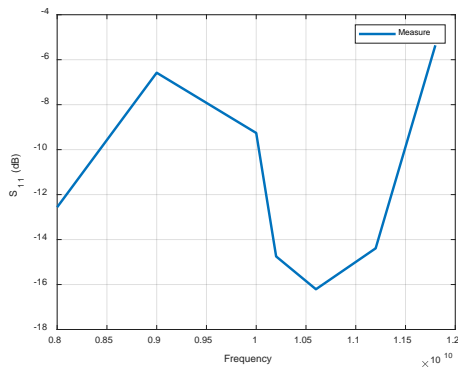
شکل (۹): نمونه‌ای از جاذب فراماده ساخته شده.

جاذب ساخته شده، ابتدا در اتاق آنتن تحت تست قرار گرفت. نحوه قرارگیری جاذب در اتاق آنتن در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



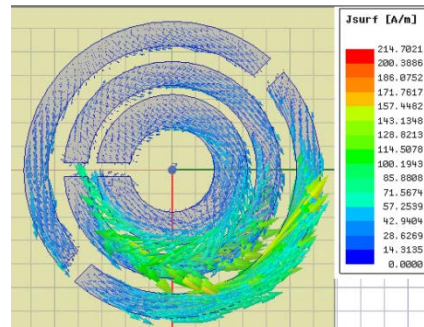
شکل (۱۰): نحوه قرارگیری جاذب فراماده در اتاق آنتن.

شیوه تست بدین‌گونه است که، در ساختار جاذب پیشنهادی با توجه به این‌که پشت جاذب به‌طور کامل با مس پوشانده شده، لذا این صفحه فلزی پوشانده شده با مس به‌طور کامل به‌عنوان استاندارد و مرجع اندازه‌گیری در نظر گرفته شده و با مقایسه الگوی تشعشعی صفحه فلزی و الگوی تشعشعی ساختار فراماده روی زیرلایه، موج بازگشتی Back to Front جاذب مشخص گردید. تست در فرکانس‌های ۸ GHz، ۹ GHz، ۱۰ GHz، ۱۰/۲ GHz، ۱۰/۶ GHz، ۱۱/۲ GHz و ۱۱/۸ GHz انجام گردید و نتایج تست به‌ازای فرکانس‌های یاد شده در برنامه متلب گنجانده شده و نتیجه آن در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

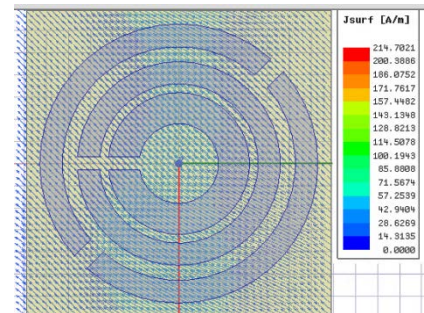


شکل (۱۱): نمودار S11 جاذب ساخته شده به‌ازای فرکانس‌های منتخب.

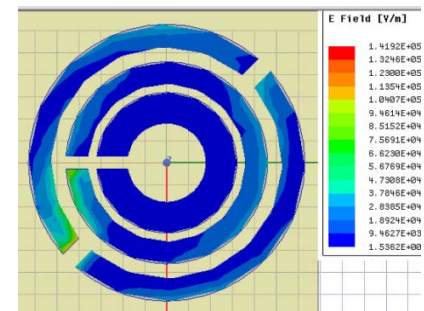
همچنین در شکل (۱۲)، جذب ساختار به‌ازای فرکانس‌های یاد شده در دو حالت شبیه‌سازی و آزمایشگاهی به‌صورت مقایسه‌ای نشان داده شده است.



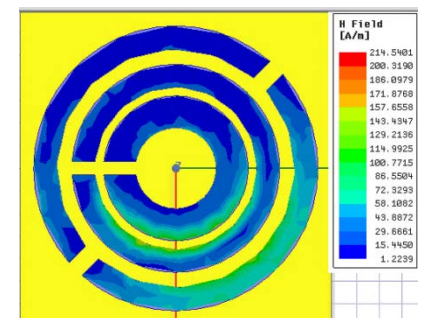
شکل (۵): توزیع جریان‌های سطحی برای لایه بالایی جاذب فراماده.



شکل (۶): توزیع جریان‌های سطحی برای لایه پایینی جاذب فراماده.



شکل (۷): توزیع میدان الکتریکی در جاذب فراماده.



شکل (۸): توزیع میدان مغناطیسی در ساختار جاذب فراماده در فرکانس ۱۰ GHz.

۴- نتایج اندازه‌گیری جاذب ساخته شده

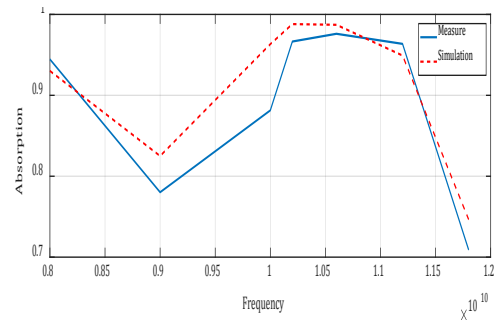
به‌منظور ارزیابی پاسخ جاذب فراماده طراحی و شبیه‌سازی شده، نمونه‌ای از آن با ابعاد $170 \times 170 \text{ mm}^2$ متشکل از یک آریه 24×24 عنصری در امتداد محورهای x و y ساخته شد و تحت آزمایش قرار گرفت. نمونه‌ای از جاذب ساخته شده در شکل (۹) آورده شده است.

همانطور که از جدول (۱) مشاهده می‌شود، ساختار پیشنهادی دارای پهنای باند جذب بالاتر نسبت به سایر تحقیقات مشابه می‌باشد. همچنین ابعاد فیزیکی ساختار پیشنهادی، نسبت به مقالات مورد اشاره، کوچکتر می‌باشد.

ساختار طراحی شده برای زوایای برخورد عمود و مایل موج الکترومغناطیسی، مورد آزمایش قرار گرفت که جذب خوبی را تحت زوایای مختلف موج برخوردی از خود نشان داد. ساختار با تابش موج از زاویه ۰ درجه الی ۴۵ درجه، تقریباً پهنای باند خود را حفظ می‌کند و تغییرات کمی در آن مشاهده می‌شود. حتی در زاویه تابش ۶۰ درجه نیز در برخی فرکانس‌ها جذب بالای ۹۰ درصد دارد که نشان دهنده حساسیت بسیار کم جذب، به زاویه تابش می‌باشد. همچنین این ساختار برای قطبش متفاوت تحت زوایای تابش عمود و مایل موج الکترومغناطیسی، آزمایش گردید. این ساختار به دلیل طراحی نامتقارن، حساس به قطبش است و در زوایای مختلف در جذب دارای تأثیرات متنوعی است. توزیع میدان الکترومغناطیسی و نمودارهای جریان‌های سطحی برای تجزیه و تحلیل ساز و کار جذب ساختار پیشنهادی نشان داده شده‌اند. جاذب فراماده را می‌توان برای کاربردهای زیادی از جمله در فناوری پنهان‌سازی، تداخل الکترومغناطیسی (EMI)، سازگاری الکترومغناطیسی (EMC) و تصویربرداری فازی به کار برد.

۶- مراجع

- [1] V. G. Veselago, "The Electrodynamics of Substances With Simultaneously Negative Value of ϵ and μ ," Sov. Phys. Usp., vol. 10, pp. 509-514, 1968.
- [2] D. R. Smith and W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz, "Composite Medium With Simultaneously Negative Permeability and Permittivity," Phys. Rev. Lett., vol. 84, pp. 4184-4187, 2000.
- [3] N. I. Landy, S. Sajuyigbe, J. J. Mock, D. R. Smith, and W. J. Padilla, "Perfect Metamaterial Absorber," Phys. Rev. Lett., vol. 100, p. 207402, 2008.
- [4] F. Billotti, L. Nucci, and L. Vegni, "An SRR Based Microwave Absorber," Microwave and Opt. Tech. Lett., vol. 48, pp. 2171-2175, 2006.
- [5] A. Sharifi and J. Khalilpour, "Patch Antenna Gain Enhancement With Metamaterial Split Ring Resonator Radome," App. electromagnetism Scientific biweekly, vol. 3, no. 3, pp. 39-44, 1395. (In Persian)
- [6] Ch. Arora, S. S. Pattnaik, and R. N. Baral, "Performance Enhancement of Patch Antenna Array for 5.8 Ghz Wi-MAX Applications Using Metamaterial Inspired Technique," Int. J. Electron. and Commun., vol. 79, pp. 124-131, 2017.
- [7] W. Chettiar, U. K. Chettiar, A. V. Kildishev, and V. M. Shalaev, "Optical Cloaking With Materials," Int. J. Electronics and Commun., Nature photonics, vol. 1, pp. 224-227, 2007.
- [8] D. Hamonpeyma and A. Alighanbari, "Non-Uniform and Local Coverage of The Aircraft with the Lowest Radar Cross Section and The Lowest Weight of The Absorber Material," Radar Magazine, vol. 5, no. 2, pp.27-40, 1396. (In



شکل (۱۲): نمودار مقایسه میزان جذب جاذب شبیه‌سازی شده و ساخته شده به ازای فرکانس‌های منتخب.

همان‌گونه که از نمودارهای یاد شده قابل درک است، هماهنگی قابل قبولی بین جذب به‌دست آمده در حالت‌های شبیه‌سازی و آزمایشگاهی وجود دارد. اختلاف به‌وجود آمده بین این حالت، مربوط به نویز اتاق آنتن و همچنین شرایط محیطی و شرایط تست جاذب می‌باشد.

جدول (۱): مقایسه ساختارهای قبلی ارائه شده با ساختار این مقاله

جاذب	فرکانس مرکزی (GHz)	ابعاد سلول واحد (mm)	ابعاد سلول واحد بر حسب فرکانس مرکزی	ضخامت (mm)	FWHM (%)
Ramya et al [۱۴]	۱۰	۱۰	$0.33 \lambda_0$	۱/۲	۲۳
Yoo et al [۱۵]	۱۰/۱۵	۱۳/۸	$0.476 \lambda_0$	۵/۶	۴۵
Bhattacharya et al [۱۶]	۱۰	۱۴	$0.466 \lambda_0$	۱	five band
Lee et al [۱۷]	۱۰	۱۴/۳	$0.473 \lambda_0$	۰/۶	۱۱
Ghosh et al [۱۸]	۱۰/۰۵	۷/۱	$0.244 \lambda_0$	۲	۴۳
Liu et al [۲۴]	۱۱/۱۱	۴۰	$1.49 \lambda_0$	۰/۸	۲۰
ساختار پیشنهادی	۱۰	۶/۹	$0.33 \lambda_0$	۲	۴۵/۹

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک ساختار جاذب فراماده پهن باند با ابعاد و ضخامت بهینه ارائه شده است که تقریباً کل باند X را تحت پوشش قرار می‌دهد. از لحاظ هندسی، ساختار به‌صورت ساده طراحی شده و ضخامت آن $0.166 \lambda_0$ در فرکانس مرکزی ۱۰ GHz بوده و از سه حلقه دایروی شکافدار تشکیل شده که دو رینگ وسطی دارای یک شکاف و بزرگترین رینگ دارای دو شکاف می‌باشند. ساختار طراحی شده برای کاربردهای باند X مناسب بوده و پهنای باند جذب بسیار خوب ساختار، ۴/۲ GHz با جذب بالای ۹۰ درصد از فرکانس ۷.۳ GHz الی ۱۱.۵ GHz، نشان دهنده، ۴۲/۱۲۱ درصد جذب در فرکانس مرکزی ۱۰ GHz می‌باشد. همچنین ساختار پیشنهادی، ۳ پیک در فرکانس‌های ۷/۶ GHz، ۱۰/۴ GHz و ۱۰/۸ GHz به‌ترتیب با درصد جذب ۹۹/۹۱، ۹۹/۹۶ و ۹۹/۱۹، دارد. در جدول (۱) ساختار جاذب طراحی و ساخته شده، با ساختارهای قبلی ارائه شده، مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

- Persian)
- [18] S. Ghosh, S. Bhattacharya, D. Chaurasiya, and K.V. Srivastava, "An Ultra Wideband Ultrathin Metamaterial Absorber Based on Split Sing Resonators," *App. Phys.*, vol. 14, pp. 1172–1175, 2015.
- [19] S. Bhattacharya, S. Ghosh, D. Chaurasiya, and K.V. Srivastava, "Bandwidth-Enhanced Dual-Band Dual-Layer Polarization-Independent Ultra-Thin Metamaterial Absorber," *App. Phys.*, vol. 118, pp. 207–215, 2015.
- [20] H. Xiong, J. S. Hong, C. M. Luo, and L. L. Zhong "An Ultrathin And Broadband Metamaterial Absorber Using Multi-Layer Structures," *J. Appl. Phys.*, vol. 114, p. 064109, 2013.
- [21] L. Lee, J. Wang, H. Du, S. Qu, and Z. Xu, "A Band Enhanced Metamaterial Absorber Based on E-Shaped All-Dielectric Resonators," *AIP Advances*, vol. 5, p. 017147, 2015.
- [22] D. Sood and C. C. Tripathi, "A Wideband Wide-Angle Ultrathin Low-Profile Metamaterial Microwave Absorber," *Microwave and Opt. Tech. Lett.*, vol. 58, pp. 1131–1135, 2016.
- [23] S. Ramya and I. S. Rao, "A Compact Ultra-Thin Ultrawideband Microwave Metamaterial Absorber," *Microwave and Opt. Tech. Lett.*, vol. 59, pp. 1837–1845, 2017.
- [24] Y. Liu, S. Gu, C. M. Luo, and X. Ahao "Ultra-Thin Broadband Metamaterial Absorber," *J. Appl. Phys.*, vol. 108, pp. 19–24, 2012.
- [25] D. Zarifi, A. Farahbakhsh, and M. Soleymani, "Extraction of Electromagnetic Parameters of A Homogeneous and Homogeneous Metamaterial Blade Using The State Space Method," *App. electromagnetism Scientific biweekly*, vol. 2(2), pp. 1-9, 1393. (In Persian)
- [26] A. M. Nicolson and G.F. Ross, "Measurement of The Intrinsic Properties of Materials By Time-Domain Techniques," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 19, pp. 377–382, 1970.
- [9] N. Zhang, N. Zhang, P. Zhou, D. Cheng, X. Weng, J. Xie, and L. Deng, "Dual-Band Absorption of Mid-Infrared Metamaterial Absorber Based on Distinct Dielectric Spacing Layers," *Opt. Lett.*, vol. 38, pp. 1125–1127, 2013.
- [10] H. Tao, N. I. Landy, C. M. Bingham, X. Zhang, R. D. Averitt, and W. J. Padilla, "A Metamaterial Absorber for The Thz Regime: Design, Fabrication and Characterization," *Opt. Express.*, vol. 16, pp. 7181–7188, 2008.
- [11] M. R. Soheilifar, R. A Sadeghzadeh, and H Gobadi, "Design and Fabrication of A Metamaterial Absorber In The Microwave Range," *Microwave and Opt. Tech. Lett.*, vol. 56, pp. 1748–1752, 2014.
- [12] H. Li, L. H. Yua, B. Zhou, X. P. Shen, Q. Cheng, and T. J Cui, "Ultrathin Multiband Gigahertz Metamaterial Absorbers," *J. App. Phys.*, vol. 110, p. 014909, 2011.
- [13] B. Ni, X. S Chen, L. J. Huang, J. Y. Ding, G. H Li, and W Lu, "A Dual-Band Polarization Insensitive Metamaterial Absorber With Split Ring Resonator," *Opt. and Quantum Electronics*, vol. 45, pp. 747–753, 2013.
- [14] S. Ramya and I. S. Rao, "Design of Polarization-Insensitive Dual Band Metamaterial Absorber," *Prog. Electromagnetics Research M*, vol. 50, pp. 23–31, 2016.
- [15] Y. J. Yoo, Y. J. kim, et. al., "Triple-Band Perfect Metamaterial Absorption, Based on Single Cut-Wire Bar," *App. Phys. Lett.*, vol. 106, p. 071105, 2015.
- [16] A. Bhattacharya, S. Bhattacharya, S. Ghosh, D. Chaurasiya, and K.V. Srivastava, "An Ultrathin Penta-Band Polarization-Insensitive Compact Metamaterial Absorber for Airborne Radar Applications," *Microwave and Opt. Tech. Lett.*, vol. 57, pp. 2519-2524, 2015.
- [17] J. Lee and S. Lim, "Bandwidth-Enhanced and Polarisation-Insensitive Metamaterial Absorber Using Double Resonance," *Electronics Lett.*, vol. 47, pp. 8-9, 2011.