بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷

طراحی و شبیه‌سازی فراماده جاذب امواج راداری به منظور کاهش سطح مقطع راداری اجسام

مجید رضایت‌فام و عبدا... ملک‌زاده فرد خانقشلاقی*

مرکز تحقیقات اپتیک و لیزر، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران

*** نویسنده مسئول: Afard77@gmail.com**

چکیده – این مقاله به مطالعه فراماده جاذب امواج راداری می‌پردازد. ساختار جاذب از آرایه‌ای دوره‌ای از یک ساختار نوسانی به ضخامت ۰/۰۱۷ میلیمتر تشکیل شده است. نتایج شبیه سازی انجام شده با استفاده از نرم افزار CST نشان می‌دهد که این ساختار در فرود عمودی، ضریب جذب ۹۹/۹ درصد را در فرکانس ۹/۰۴ گیگاهرتز دارا است که سبب کاهش سطح مقطع راداری به اندازه ۳۰ دسی‌بل خواهد شد و با استفاده از این ساختار می‌توان بدنه اجسام را رادار گریز کرد.

کلید واژه- جاذب، رادار گریز، سطح مقطع راداری، فراماده

Design and Simulation of Radar Wave Meta-material Absorber for Reducing Radar Cross Section of Objects

Majid Rezayatfam, Abdollah Malakzade Fard khangheshlaghi*

Optic and Laser Research Center, Imam Hussein University, Tehran

Abstract- this article presents a study on a radar wave meta-material absorber. The absorber is constructed from a periodic array of a resonant structure with the thickness of 0.017 millimeter. Simulation results using CST software show that the absorber can operate with an absorption peak of 99.9 % at frequency of 9.04 GHz given a normally incident electromagnetic wave which will reduce the radar cross section down to 30 dB and by using this structure, body of an objects can be stealth.

Keywords: absorber, stealth, radar cross section, meta-material

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-17]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

مقدمه

استتار و اختفا تجهیزات نظامی از دید رادارهای دشمن امری اجتناب ناپذیر است. بدین منظور باید بدنه این نوع از تجهیزات را به گونه‌ای ساخت که امواج الکترومغناطیسی را جذب کنند. در گذشته در ساخت بدنه این تجهیزات از مواد جاذب رادار[1] استفاده می‌شد که به علت محدودیت‌هایی نظیر پاسخ الکترومغناطیسی ثابت، وزن بالا، ضخامت زیاد، پهنای جذب کم و ضریب جذب نامناسب در حوزه عملیاتی همراه با چالش‌هایی بودند، لذا تحقیقات در سال‌های آتی به توسعه ساختارهای جاذب رادار[2] اختصاص یافت [۱, ۲]. فراماده[3] یکی از این نوع ساختارها است که در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققین و پژوهشگران قرار گرفته است. فراماده نخستین بار در سال ۱۹۶۸ توسط وسلاگو فیزیکدان روس به صورت تئوری مطرح شد [۳] و در سال ۲۰۰۴ اولین ساختار فراماده با ضریب شکست منفی توسط اسمیت و همکارانش ساخته شد. این مواد مصنوعی، توانایی مهندسی امواج الکترومغناطیسی را دارا هستند تا بدین طریق خالق ویژگی‌هایی باشند که در مواد طبیعی وجود ندارد لذا استفاده از آنها در ادوات الکترومغناطیسی سبب بهبود عملکرد آنها خواهد شد [۴]. اولین فراماده جاذب در سال ۲۰۰۸ توسط گروه تحقیقاتی پادیلا و لندی برای ناحیه فرکانسی امواج ریزموج با ضریب جذب تئوری ۹۹ و تجربی ۸۸ درصد در فرکانس ۱۱/۶۵ گیگاهرتز ساخته شد [۵]. در سال‌های بعد عمده تحقیقات انجام شده در این حوزه به توسعه فرامواد جاذب پرداخت که در آنها افزایش ضریب جذب، افزایش پهنای باند فرکانسی، سبک و مقاوم بودن سازه جاذب و... از شاخصه‌های مهم طراحی ساختار محسوب می‌شد [۶, ۷]. لذا در این مقاله ساختاری جاذب مبتنی بر فرامواد طراحی و شبیه‌سازی می‌گردد که در فرکانس ۹/۰۴ گیگاهرتز دارای ضریب جذب ۹۹/۹ درصد است و از آن می‌توان برای کاهش سطح مقطع راداری[4] اجسام استفاده کرد. معمولا صفحات جاذب راداری که مبتنی بر فرامواد طراحی شده‌اند از پیکسل‌هایی به وجود آمده‌اند که هر پیکسل آن از سه جزء به وجود آمده است. جزء اول آن را نوسانگرهای میدان الکتریکی[5] و یا میدان مغناطیسی[6] به خود اختصاص داده‌اند. جزء دوم آن را یک دی-الکتریک با خاصیت اتلاف کنندگی و جزء سوم را یک صفحه زمینه فلزی به منظور کمینه‌سازی ضریب عبور قرار می‌دهند [۵].

تحلیل فرآیند جذب در فراماده جاذب

در اندرکنش مواد با امواج الکترومغناطیسی سه حالت رخ خواهد داد. دسته‌ای از امواج فرودی، بازتاب، عبور و یا جذب خواهند شد که رابطه (۱) برای آن قابل تصور است.

$$A(\omega)=1-R(\omega)-T(\omega) \qquad (۱)$$

در این رابطه $A(\omega)$ ضریب جذب، $R(\omega)$ ضریب بازتاب و $T(\omega)$ ضریب عبور است که تمام این پارامترها به فرکانس زاویه‌ای ω وابسته هستند. رسیدن به جذب بیشینه با برداشتن دو گام اساسی انجام خواهد شد. گام اول برای کمینه کردن ضریب بازتاب است که این مهم از طریق تطبیق امپدانس ساختار با امپدانس فضای آزاد به‌دست می‌آید و گام دوم به منظور کمینه کرن ضریب عبور، از طریق دی‌الکتریک اتلافگر و صفحه زمینه فلزی انجام خواهد شد. برای تطبیق امپدانس باید میان الگوی نوسانی ساختار و امواج فرودی کوپلینگ مناسبی صورت گیرد به طوری که امپدانس موج فرودی با امپدانس ساختار مطابقت داشته باشد. در این صورت جریان‌های پادموازی در المان‌های فلزی پدیدار خواهد شد که این جریان‌ها با میدان جابه‌جایی در داخل دی‌الکتریک حلقه جریان مداری را کامل کرده و نفوذپذیری مغناطیسی μ را تولید می‌کند. از طریق تغییر هندسه الگوی نوسانی می‌توان نفوذپذیری بهینه را تولید، و در نهایت به تطابق امپدانس مناسب دست یافت. [۷]. در این مقاله با استفاده از نرم افزار CST به طراحی و شبیه‌سازی ساختاری جاذب در محدوده فرکانسی امواج راداری خواهیم پرداخت که دارای پهنای باند و ضریب جذب مناسب است و از طریق محاسبه پارامترهای پراکندگی $R(\omega)=|S_{11}|^2$ و $T(\omega)=|S_{21}|^2$ ضریب جذب ساختار را از رابطه (۲) و سطح مقطع راداری را از رابطه (۳) برای آن به دست خواهیم آورد.

$$A(\omega)=1-|S_{11}|^2-|S_{21}|^2 \qquad (۲)$$

$$\sigma=\lim_{R\to\infty} 4\pi R^2\left|\frac{E_s}{E_i}\right|^2 \qquad (۳)$$

در این رابطه R فاصله بین هدف و رادار، E_s و E_i به ترتیب میدان الکتریکی پراکنده شده و تابشی به هدف است [۸]. از این رابطه می-

[1] Radar Absorb Material (RAM)
[2] Radar Absorb Structures (RAS)
[3] Meta-Material
[4] Radar Cross Section Reduction
[5] Electric ring resonator (ERR)
[6] Spilt ring resonator (SRR)

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-17]

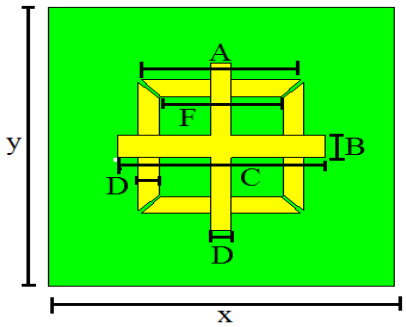
توان مقدار کاهش سطح مقطع راداری اهداف پوشانده شده با مواد جاذب را به دست آورد [۹].

$$\Delta\sigma = -10\log(1-A)\,\mathrm{dB} \qquad (۴)$$

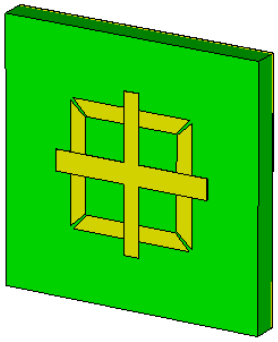
به عنوان مثال اگر جسم هدف با ماده‌ای جاذب با جذب ۵۰ درصد پوشانده شده باشد در این صورت کاهش سطح مقطع راداری تنها ۳ دسی‌بل و در صورتی که ضریب جذب ۹۰ درصد باشد کاهش سطح مقطع راداری، ۱۰ دسی‌بل خواهد بود.

طراحی و شبیه سازی ساختار فراماده جاذب

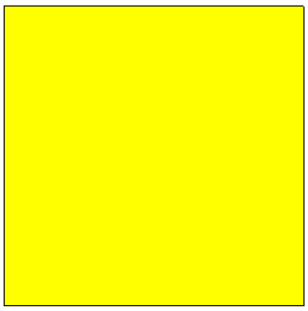
ساختار طراحی شده در این مقاله از سه بخش تشکیل شده است. یک بخش آن از یک لایه دی‌الکتریک اتلافگر از جنس FR-4 با گذردهی الکتریکی ۴/۳ و تانژانت اتلاف ۰/۰۲۵ به وجود آمده است که میان دو صفحه فلزی از جنس مس با رسانندگی $5.8\times10^{7}\ \frac{\mathrm{s}}{\mathrm{m}}$ ساندویچ شده است. شکل ۱ نمای روبه‌رو، شکل ۲ نمای سه بعدی و شکل ۳ نمای پشت این ساختار را نشان می‌دهد.



شکل۱: سلول واحد ساختار طراحی شده



شکل ۲: نمای سه بعدی ساختار



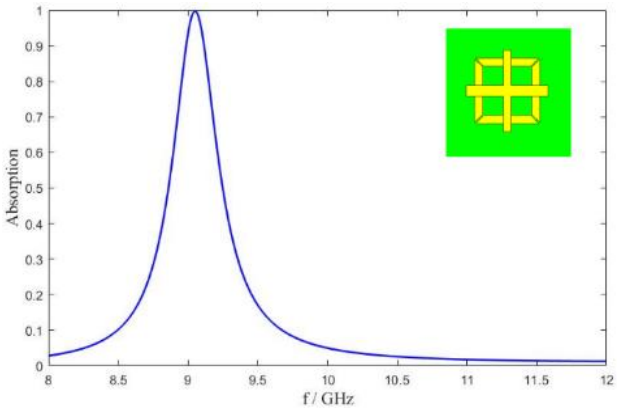
شکل ۳: نمای پشت ساختار

ابعاد این ساختار به میلیمتر در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱: ابعاد ساختار جاذب پیشنهادی

x	y	A	B	C	D	F
۱۰	۱۰	۴/۶	۰/۸	۶	۰/۶	۳/۵

ضخامت لایه دی‌الکتریک و لایه مسی به ترتیب برابر با ۱ و ۰/۰۱۷ میلیمتر است. نمودار جذب وابسته به فرکانس برای این ساختار در شکل ۴ آمده است.

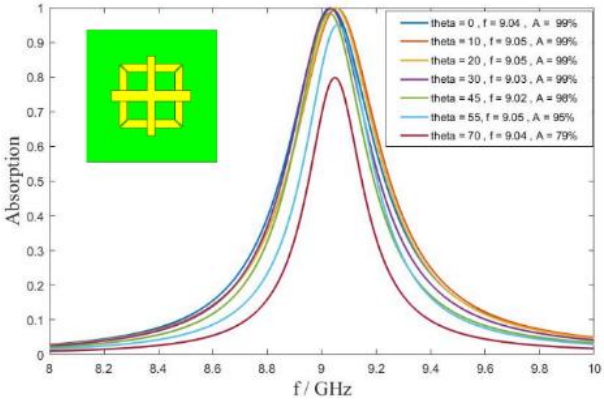


شکل ۴: نمودار جذب ساختار پیشنهادی

بر اساس این نمودار، ساختار پیشنهادی در فرکانس ۹/۰۴ گیگاهرتز دارای ضریب جذب ۹۹/۹ درصد است که کاهش سطح مقطع راداری برای آن برابر با ۳۰ دسی‌بل خواهد بود. نمودار جذب ساختار در زوایای متفاوت امواج فرودی در شکل ۵ آمده است.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-17]



شکل۵ : نمودار جذب ساختار در زوایای ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۵، ۵۵ و ۷۰ درجه

بر اساس این نمودار مشخص است که پیک جذب ساختار از زاویه ۰ تا ۵۵ درجه تغییرات فرکانسی کوچکی دارد و ضریب جذب ساختار در این زوایا قابل قبول است. در زاویه صفر درجه قوی‌ترین کوپلینگ میان امواج فرودی و ساختار رخ خواهد داد لذا متناسب با آن در این زاویه بیشترین ضریب جذب را خواهیم داشت و با افزایش زاویه به دلیل تضعیف کوپلینگ میان ساختار و امواج فرودی تطابق امپدانس به صورت جزئی برقرار خواهد شد لذا از ضریب جذب ساختار کاسته خواهد شد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله موفق به طراحی ساختاری جاذب مبتنی بر فرامواد شدیم که ضریب جذب ۹۹/۹ درصد را در فرکانس راداری ۹/۰۴ گیگاهرتز دارا است و باعث کاهش ۳۰ دسی-بل سطح مقطع راداری می‌شود لذا با توجه به جذب بالا، وزن کم و ضخامت پایین آن، کاندیدایی مناسب برای ساخت بدنه اجسام رادار گریز خواهد بود.

مراجع

[1] E. F. Knott, I.F.S.a.M.T.T., *Radar Cross Section*, ed. S. Edition. 2004, Artech House.

[2] Qin, F. and C. Brosseau, *A review and analysis of microwave absorption in polymer composites filled with carbonaceous particles.* Journal of applied physics, 2012. **111**(6): p. 4.

[3] Veselago, V.G., *The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of and μ.* Soviet physics uspekhi, 1968. **10**(4): p. 509.

[4] Smith, D.R., J.B. Pendry, and M.C. Wiltshire, *Metamaterials and negative refractive index.* Science, 2004. **305**(5685): p. 788-792.

[5] Landy, N.I., et al., *Perfect metamaterial absorber*. Physical review letters, 2008. **100**(20): p. 207402.

[6] Tuong, P., et al., *Perfect-absorber metamaterial based on flower-shaped structure.* Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, 2013. **11**(1): p. 89-94.

[7] Cheng, Y., Y. Nie, and R. Gong, *Metamaterial absorber and extending absorbance bandwidth based on multi-cross resonators.* Applied Physics B, 2013. **111**(3): p. 483-488.

[8] Skolnik, M.I., *Radar Handbook.* McGraw-Hill, ed. T. Edition. 2008., New York.

[9] Yang, H., et al., *Low RCS metamaterial absorber and extending bandwidth based on electromagnetic resonances.* Progress In Electromagnetics Research, 2013. **33**: p. 31-44.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-17]