بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۲-۱۴ بهمن ۱۴۰۰

محاسبه گذردهی الکتریکی و مغناطیسی موثر سلول واحد فراماده برای استفاده در شنل نامرئی‌ساز

امین بازماندگان مغوئی، محمدرضا فروزش فرد و سید محمد باقر ملک حسینی
گروه فیزیک دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، دانشکده علوم پایه، رفسنجان، ایران

a.bazmandegan@stu.vru.ac.ir, m.forouzeshfard@vru.ac.ir, malekhosseini@vru.ac.ir

فراماده به عنوان مواد مصنوعی ساخته‌ی دست بشر در سال‌های اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته است. شنل‌های نامرئی ساز بخش مهمی از فراماده هستند که طراحی سلول واحد آن‌ها موضوع این مقاله است. در این مقاله قصد داریم با استفاده از مشدد حلقوی شکافدار سلول واحدی را طراحی کنیم که برای استفاده در طراحی شنل نامرئی‌ساز مناسب باشد. با توجه به ویژگی خاص گذردهی الکتریکی و مغناطیسی مورد نیاز در یک شنل نامرئی ساز پس از طراحی سلول واحد، گذردهی الکتریکی و مغناطیسی موثر آن با دو روش محاسبه شده است. با استفاده از نتایج هر دو روش که انطباق خوبی با هم دارند ثابت شده است سلول واحد طراحی شده قابلیت استفاده در طراحی شنل نامرئی ساز در مد TE در فرکانس عملکرد ۱۱ GHz را دارد.

کلید واژه- سلول واحد فراماده، شنل نامرئی‌ساز، گذردهی الکتریکی و مغناطیسی موثر، مشدد حلقوی شکافدار

Calculating the effective permittivity and permeability of a metamaterial unit cell for applying in invisibility cloak

Amin Bazmandeganmaghoie, Mohammadreza Forouzeshfard, Seyyed Mohammadbagher Malekhosseini
Department of Physics, Faculty of Sciences, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran
a.bazmandegan@stu.vru.ac.ir, m.forouzeshfard@vru.ac.ir, malekhosseini@vru.ac.ir

Metamaterials as a man-made artificial material have attracted many interests in recent years. This paper is devoted to design the unit cell of invisibility cloak as a significant part of metamaterial. The proper unit cell for invisibility cloak using split resonator is designed in this paper. We find the effective permittivity and permeability of the designed unit cell based on two methods with respect to required special dielectric permittivity and permeability for invisibility cloak. Finally, using the result extracting from the two methods which are in good agreement, we prove that the design unit cell can be applied as an invisibility cloak unit cell at the operating frequency of ۱۱ GHz.

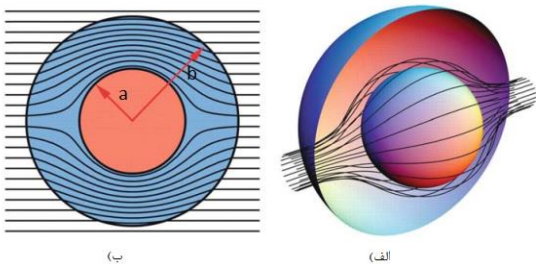
Keywords: Metamaterial Unit Cell, Invisibility Cloak, Effective Permittivity and Permeability, Split Ring Resonator.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-29]

مقدمه

نامرئی‌سازی یکی از اهداف بشر از قدیم تا به امروزه بوده، با گذشت قرن ها انسان هنوز به دنبال راهی برای تحقق این امر است. در سال۲۰۰۶ ایده ساخت شنل نامرئی‌ساز برای اولین بار به واقعیت تبدیل شد [۱]. فراموادِ دسته‌ای از مواد مصنوعی ساخته‌ی دست بشر است. فرا مواد می‌تواند ترکیب آرایه‌ای از میله‌ها و حلقه‌های فلزی باشد. بیشتر پدیده‌های الکترومغناطیسی از معادلات ماکسول پیروی می‌کنند. معادلات ماکسول مجموعه از معادلات هستند که ارتباط بین میدان‌ها، منابع و ویژگی های محیطی را بیان می‌کنند. ویژگی‌های الکترومغناطیسی یک ماده توسط دو پارامتر تعیین می‌شود: گذردهی الکتریکی ε و نفوذپذیری مغناطیسی μ. برای دست یافتن به ε و μ خاص در یک فراماده باید سلول واحد مناسب را طراحی کنیم[۲]. در این مقاله سلول واحدی را طراحی کرده‌ایم که می‌تواند برای استفاده در شنل نامرئی‌ساز به کار رود و مقایر ε و μ آن را محاسبه کرده‌ایم.

شنل نامرئی‌ساز



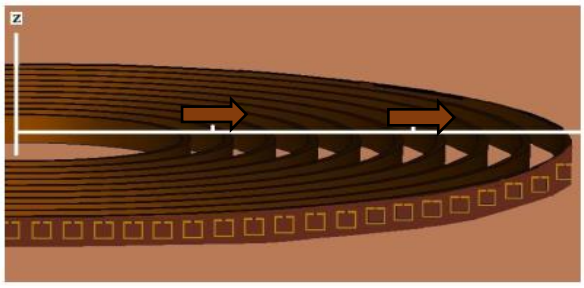
شکل۱: مسیر حرکت پرتوهای نور در شنل نامرئی‌ساز. الف) نمای دو بعدی از شنل نامرئی‌ساز. ب) نمای سه بعدی.

برای تحقق تجربی فراماده شنل نامرئی‌ساز به گونه‌ای که پرتو نوری مطابق شکل۱ هسته مرکزی شنل نامرئی‌ساز را دور بزند و بدون نفوذ به هسته با پراکندگی صفر در طرف مقابل از شنل خارج شود باید گذردهی الکتریکی و مغناطیسی فراماده شنل نامرئی‌ساز در ناحیه پوسته در شکل۱- از روابط زیر پیروی کند [۲].

$$\varepsilon_r = \mu_r = \frac{r-a}{r}$$
$$\varepsilon_\theta = \mu_\theta = \frac{r}{r-a} \qquad (۱)$$
$$\varepsilon_z = \mu_z = \left(\frac{b}{b-a}\right)^۲ \cdot \frac{r-a}{r}$$

تحقق تجربی روابط ریاضی فوق در آزمایشگاه با محدودیت هایی روبرو است [۳]. بنابراین با حفظ شرایط انطباق ضریب شکست در مرزهای شنل، روابط فوق را به شکل جدید به صورت رابطه(۲) بازنویسی می‌کنند که این موضوع باعث عدول از شنل نامرئی‌ساز کامل می‌شود، اما تحقق تجربی آن در آزمایشگاه ممکن می‌شود. روابط(۱) برای قطبش TE (میدان الکتریکی در راستای محور استوانه Z) به صورت زیر تصحیح می‌شود[۲و۳].

$$\varepsilon_z = \left(\frac{b}{b-a}\right)^۲$$
$$\mu_r = \left(\frac{r-a}{r}\right)^۲ \qquad (۲)$$
$$\mu_\theta = ۱$$



شکل۲: ساختار پیشنهادی برای تحقق تجربی شنل نامرئی‌ساز در مد TE با استفاده از ۱۰ لایه استوانه متشکل از تعداد زیادی مشدد حلقوی شکافدار [۴].

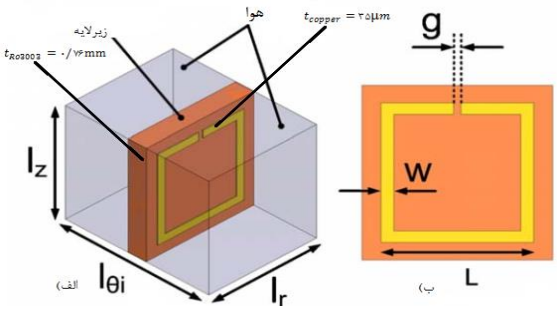
با انتخاب مناسب شعاع داخلی(خارجی) شنل a(b) مقدار مولفه های مختلف تانسور گذردهی الکتریکی و مغناطیسی قابل تنظیم خواهد بود بنابراین باید داشته باشیم $\varepsilon_z > ۱$ و $۰ < \mu_r < ۱$. برای قطبش TE در مختصات استوانه‌ای ساختار لایه‌ای مطابق شکل۲ متشکل از تعداد زیادی سلول

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-29]

واحد کنار هم چیده شده پیشنهاد می‌شود [۴]. سلول واحد ساختار متشکل از یک مشدد حلقوی شکافدار است که در بخش بعد به آن پرداخته می‌شود.

در این مقاله هدف محاسبه گذردهی الکتریکی و مغناطیسی موثر سلول واحد به منظور استفاده در طراحی شنل نامرئی‌ساز می‌باشد.

سلول واحد فراماده

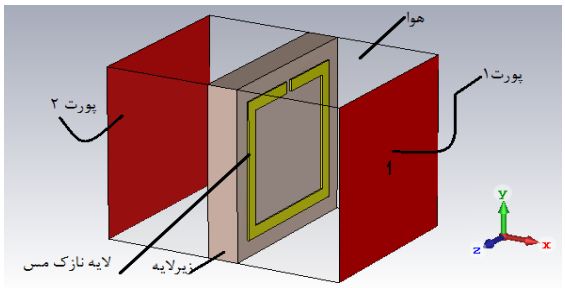


شکل۳: طرحواره الف) سه بعدی. ب) دوبعدی سلول واحد پیشنهادی با مشخصات $l_z = l_r = ۴/۵(mm)$، $l_{\theta_i} = ۶(mm)$ و $g = ۰/۱۸(mm)$، $W = ۰/۳(mm)$ و $L = ۳/۶(mm)$. زیر لایه از جنس RO۳۰۰۳ با ضخامت t_{Ro3003} = ۰/۷۶mm و مشدد حلقوی شکافدار از جنس مس با ضخامت t_{copper} = ۳۵μm می‌باشد.

اصلی‌ترین عنصر در طراحی و ساخت شنل نامرئی‌ساز سلول واحد است. هر سلول واحد دارای ابعاد هندسی و پارامترهای مشخصی می‌باشد که در شکل ۱-(الف) طرحواره سه بعدی سلول واحد پیشنهادی در این مقاله جهت استفاده در شنل نامرئی‌ساز را مشاهده می‌کنید. در شکل۱-(ب) طرحواره دو بعدی سلول واحد نشان داده شده که اندازه پارامتر g به عنوان پهنای شکاف، L طول و W پنهای نوار مسی در شکل زیر آورده شده است. با تغییر ابعاد سلول واحد مثل W،L و g مقادیر نفوذپذیری مغناطیسی μ و نفوذپذیری الکتریکی ε تغییر می‌کند [۵]. در این مقاله به محاسبه مقادیر ε و μ پرداخته می‌شود، در طراحی شنل‌های نامرئی ساز مقادیر ε و μ موثر سلول واحد بسیار ارزشمند هستند.

شبیه سازی

در این بخش قصد داریم سلول واحد شکل۱-الف) را با استفاده از نرم افزارCST شبیه سازی کنیم و مقادیر ε و μ را برای این سلول واحد بدست آوریم. ساختار مورد مطالعه تحت تابش موج تخت منتشر شونده در جهت X با جهت میدان الکتریکی در راستای محورZ مطابق شکل۴ قرار می‌گیرد. در این شبیه سازی با انتخاب شرط مرزی مطابق با شکل ۴ و با توجه به طراحی لایه‌ای بیان شده در شکل۲ باید مقادیر $\mu_\theta = ۱$ و $\varepsilon_z > ۱$ را بدست آوریم.

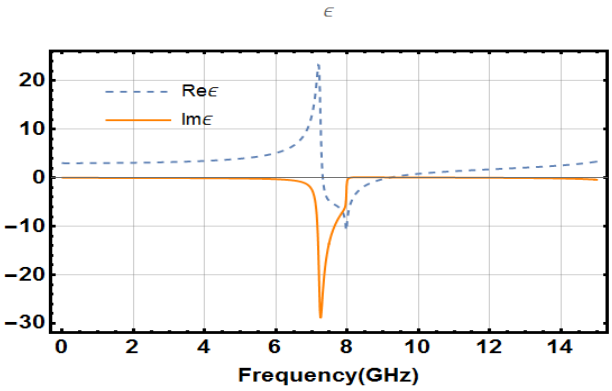


شکل۴: نمایی از شبیه سازی سلول واحد در نرم افزار CST مشاهده می‌کنید.

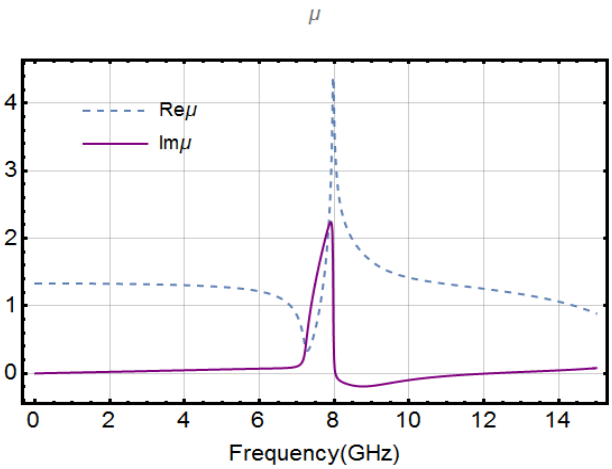
گذردهی الکتریکی و مغناطیسی موثر ساختار وابسته به پارامترهای هندسی سلول واحد و شرایط مرزی مسئله تغییر می‌کند. برای محاسبه تابع گذردهی الکتریکی و مغناطیسی موثر در ساختار سلول واحد روش‌های مختلفی وجود دارد که در تمام آن‌ها از پارامترهای پراکندگی (Sپارامتر) خروجی از نرم افزار جهت محاسبه گذردهی الکتریکی و مغناطیسی استفاده می‌شود. در این مقاله ما از دو روش جهت محاسبه گذردهی الکتریکی و مغناطیسی استفاده کرده‌ایم. در روش اول این محاسبه توسط خود نرم افزار CST انجام شده است و نتایج حاصل از آن با روش دوم که از طریق کدنویسی در نرم افزار Mathematica و مبتنی بر الگوریتم بازگشتی [۶]. بدست آمده، مقایسه شده است. نتایج حاصل از هر دو روش انطباق بسیار خوبی با یکدیگر دارد که در اینجا فقط نتایج حاصل از روش دوم ذکر می‌شود.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-29]

شکل۵-الف) و ب) به ترتیب قسمت های حقیقی و موهومی گذردهی الکتریکی مربوط به ساختار شکل۲ با شرایط مرزی ذکر شده را نشان می‌دهد. همچنین شکل۶-الف) و ب) به ترتیب قسمت‌های حقیقی و موهومی نفوذپذیری مغناطیسی را نشان می‌دهد. به طور خاص در فرکانس ۱۱ GHz مقادیر قسمت حقیقی گذردهی‌های الکتریکی و مغناطیسی به ترتیب برابر ۱/۱۲ و ۰/۹۸ می‌باشد. این مقادیر نشان می‌دهد که سلول واحد پیشنهادی می‌تواند برای استفاده در طراحی شنل نامرئی ساز با قطبش TE در فرکانس عملکرد ۱۱ GHz مورد استفاده قرار گیرد.



شکل۵: قسمت حقیقی و موهومی گذردهی الکتریکی ساختار شکل۳.



شکل۶: قسمت حقیقی و موهومی نفوذپذیری مغناطیسی ساختار شکل۳.

نتیجه گیری

سلول واحدی متشکل از مشدد حلقوی شکافدار جهت استفاده در فراماده شنل نامرئی ساز طراحی و پیشنهاد شد. با تنظیم مناسب ابعاد پارامترهای هندسی سلول واحد پیشنهادی گذردهی‌های الکتریکی و مغناطیسی موثر ساختار محاسبه شد. مقادیر گذردهی الکتریکی و مغناطیسی بدست آمده برای ساختار در فرکانس ۱۱ GHz برای استفاده در طراحی شنل نامرئی‌ساز مناسب است. وجود زیر لایه ارزان و قابل دسترس از جمله مزایای این سلول واحد است.

مراجع

[۱] X. Jiang, Metamaterial, In Tech, ۲۰۱۲.

[۲] W. Cai, V. Shalev, Optical Metamaterial, Springer,۲۰۱۰.

[۳] U. Leonhardt, T. Philbin, Geometry And Light, Dover publication, ۲۰۱۰.

[٤] E. Moghbeli, H. Askari, M. R. Frouzeshfard, “The effect of geometric parameters of a single-gap SRR metamaterial on its electromagnetic properties as a unit cell of interior invisibility cloak in the microwave regime”, Optics & Laser Technology, Elsevier, Volume ۱۰۸, pp. ٦٢٦-٦٣٣, ۲۰۱۸.

[٥] B. Kanté, D. Germain, A. de Lustrac, “Experimental demonstration of a nonmagnetic metamaterial cloak at microwave frequencies”, Physical Review *B*, Vol ۸۰, ۲۰۰۹.

[٦] X. chen, et al. Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials, Physical Review *E*, Vol ۷۰, ۲۰۰٤.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-29]