



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



محاسبه گذردهی الکتریکی و مغناطیسی موثر سلول واحد فراماده برای استفاده در شل نامرئی ساز

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.forouzesfard@vru.ac.ir, malekhosseini@vru.ac.ir

فرامواد به عنوان مواد مصنوعی ساخته‌ی دست بشر در سال‌های اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته است. شل‌های نامرئی ساز بخش مهمی از فرامواد 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 شل نامرئی ساز مناسب باشد. با توجه به ویژگی خاص گذردهی الکتریکی و مغناطیسی مورد نیاز در یک شل 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 شل نامرئی ساز در مد TE در فرکانس عملکرد ۱۱ GHz را دارد.

کلید واژه- سلول واحد فراماده، شل نامرئی ساز، 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 Forouzesfard, Seyyed Mohammadbagher
Malekhosseini

Department of Physics, Faculty of Sciences, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan,
Iran

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

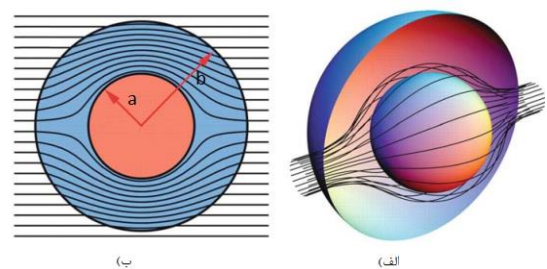
Metamaterials as a man-made artificial material have attracted many interests in recent years. This paper is devoted to design the unit cell of invisibility cloak as a significant part of metamaterial. The proper unit cell for invisibility cloak using split resonator is designed in this paper. We find 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.

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 سال ۲۰۰۶ ایده ساخت شل نامرئی‌ساز برای اولین بار به واقعیت تبدیل شد [۱]. فرامواد 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 ویژگی‌های 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 شل نامرئی‌ساز به کار رود و مقایسه ϵ و μ آن را محاسبه کرده‌ایم.

شل نامرئی‌ساز



شکل ۱: مسیر حرکت پرتوهای نور در شل نامرئی‌ساز. الف) نمای دو بعدی از شل نامرئی‌ساز. ب) نمای سه بعدی.

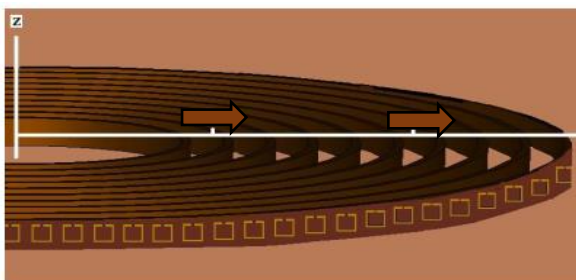
برای تحقق تجربی فراماده شل نامرئی‌ساز به گونه‌ای که پرتو نوری مطابق شکل ۱ هسته مرکزی شل نامرئی‌ساز را دور بزند و بدون نفوذ به هسته با پراکندگی صفر در طرف مقابل از شل خارج شود باید گذردهی الکتریکی و

مغناطیسی فراماده شل نامرئی‌ساز در ناحیه پوسته در شکل ۱- از روابط زیر پیروی کند [۲].

$$\begin{aligned}\epsilon_r &= \mu_r = \frac{r-a}{r} \\ \epsilon_\theta &= \mu_\theta = \frac{r}{r-a} \\ \epsilon_z &= \mu_z = \left(\frac{b}{b-a}\right)^2 \cdot \frac{r-a}{r}\end{aligned}\quad (1)$$

تحقق تجربی روابط ریاضی فوق در آزمایشگاه با محدودیت هایی روبرو است [۳]. بنابراین با حفظ شرایط انطباق ضریب شکست در مرزهای شل، روابط فوق را به شکل جدید به صورت رابطه (۲) بازنویسی می‌کنند که این موضوع باعث عدول از شل 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 [۳و۲].

$$\begin{aligned}\epsilon_z &= \left(\frac{b}{b-a}\right)^2 \\ \mu_r &= \left(\frac{r-a}{r}\right)^2 \\ \mu_\theta &= 1\end{aligned}\quad (2)$$

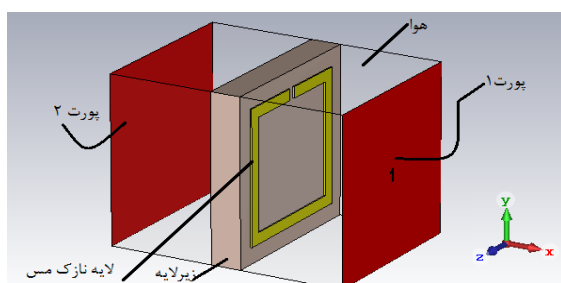


شکل ۲: ساختار پیشنهادی برای تحقق تجربی شل نامرئی‌ساز در مد TE با استفاده از ۱۰ لایه استوانه متشکل از تعداد زیادی مشدد حلقوی شکافدار [۴].

با انتخاب مناسب شعاع داخلی (خارجی) شل $a(b)$ مقدار مولفه های مختلف تانسور گذردهی الکتریکی و مغناطیسی قابل تنظیم خواهد بود بنابراین باید داشته باشیم $\epsilon_z > 1$ و $1 < \mu_r < \infty$. برای قطبش TE در مختصات استوانه‌ای ساختار لایه‌ای مطابق شکل ۲ متشکل از تعداد زیادی سلول

شبیه سازی

در این بخش قصد داریم سلول واحد شکل ۱-الف) را با استفاده از نرم افزار CST 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 محور Z مطابق شکل ۴ قرار می گیرد. در این شبیه سازی با انتخاب شرط مرزی مطابق با شکل ۴ و با توجه به طراحی لایه ای بیان شده در شکل ۲ باید مقادیر $\mu_0 = 1$ و $\epsilon_z > 1$ را بدست آوریم.



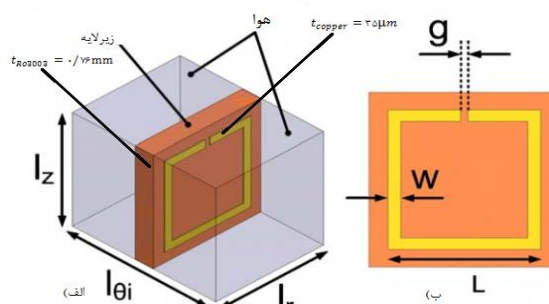
شکل ۴: نمایی از شبیه سازی سلول واحد در نرم افزار CST مشاهده می کنید.

گذردهی الکتریکی و مغناطیسی موثر ساختار وابسته به پارامترهای هندسی سلول واحد و شرایط مرزی مسئله تغییر می کند. برای محاسبه تابع گذردهی الکتریکی و مغناطیسی موثر در ساختار سلول واحد روش های مختلفی وجود دارد که در تمام آن ها از پارامترهای پراکندگی (کپارامتر) خروجی از نرم افزار جهت محاسبه گذردهی الکتریکی و مغناطیسی استفاده می شود. در این مقاله ما از دو روش جهت محاسبه گذردهی الکتریکی و مغناطیسی استفاده کرده ایم. 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 می شود.

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

در این مقاله هدف محاسبه گذردهی الکتریکی و مغناطیسی موثر سلول واحد به منظور استفاده در طراحی شل نامرئی ساز می باشد.

سلول واحد فراماده



شکل ۳: طرحواره الف) سه بعدی. ب) دوبعدی سلول واحد پیشنهادی با مشخصات $L_x = L_y = 4/5 (mm)$ و $L_z = 6 (mm)$ و $t_{\theta_i} = 0.18 (mm)$ و $g = 0.18 (mm)$ و $W = 0.3 (mm)$ و $L = 3/6 (mm)$ زیر لایه از جنس $RO3003$ با ضخامت $t_{R03003} = 0.76 mm$ و مشدد حلقوی شکافدار از جنس مس با ضخامت $t_{copper} = 35 \mu m$ می باشد.

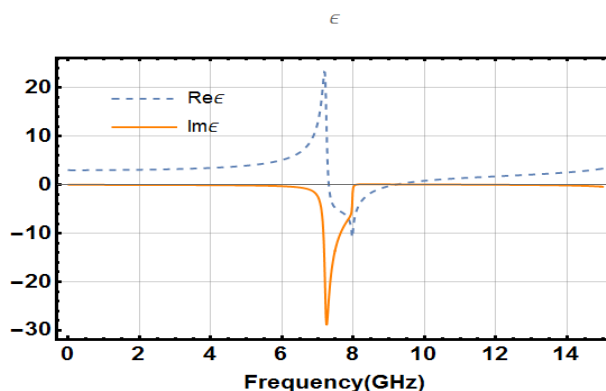
اصلی ترین عنصر در طراحی و ساخت شل نامرئی ساز سلول واحد است. هر سلول واحد دارای ابعاد هندسی و پارامترهای مشخصی می باشد که در شکل ۱-الف) طرحواره سه بعدی سلول واحد پیشنهادی در این مقاله جهت استفاده در شل نامرئی ساز را مشاهده می کنید. در شکل ۱-ب) طرحواره دو بعدی سلول واحد نشان داده شده که اندازه پارامتر g به عنوان پهنای شکاف، L طول و W پهنای 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 می کند [۵]. در این مقاله به محاسبه مقادیر ϵ و μ پرداخته می شود، در طراحی شل های نامرئی ساز مقادیر ϵ و μ موثر سلول واحد بسیار ارزشمند هستند.

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 11 GHz برای استفاده در طراحی شل نامرئی‌ساز مناسب است. وجود زیر لایه ارزان و قابل دسترس از جمله مزایای این سلول واحد است.

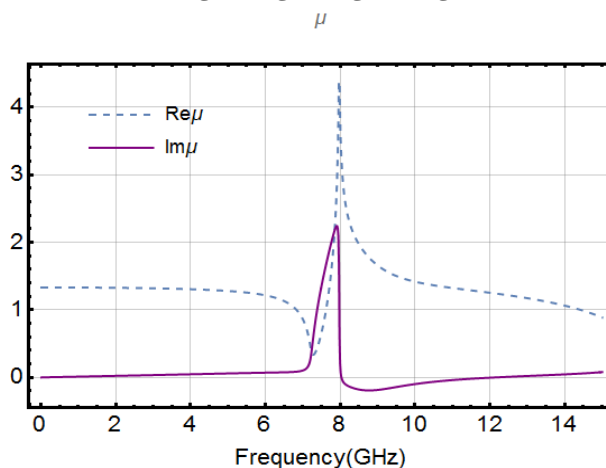
مراجع

- [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.
- [۴] 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. ۶۲۶-۶۳۳, ۲۰۱۸.
- [۵] B. Kanté, D. Germain, A. de Lustrac, "Experimental demonstration of a nonmagnetic metamaterial cloak at microwave frequencies", Physical Review B, Vol ۸۰, ۲۰۰۹.
- [۶] X. chen, et al. Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials, Physical Review E, Vol ۷۰, ۲۰۰۴.

شکل ۵-الف) و ب) به ترتیب قسمت های حقیقی و موهومی گذردهی الکتریکی مربوط به ساختار شکل ۲ با شرایط مرزی ذکر شده را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۶-الف) و ب) به ترتیب قسمت‌های حقیقی و موهومی نفوذپذیری مغناطیسی را نشان می‌دهد. به طور خاص در فرکانس 11 GHz مقادیر قسمت حقیقی گذردهی‌های الکتریکی و مغناطیسی به ترتیب برابر $1/12$ و $0/98$ می‌باشد. این مقادیر نشان می‌دهد که سلول واحد پیشنهادی می‌تواند برای استفاده در طراحی شل نامرئی‌ساز با قطبش TE در فرکانس عملکرد 11 GHz مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۵: قسمت حقیقی و موهومی گذردهی الکتریکی ساختار شکل ۳.



شکل ۶: قسمت حقیقی و موهومی نفوذپذیری مغناطیسی ساختار شکل ۳.

نتیجه گیری

سلول واحدی متشکل از مشدد حلقوی شکافدار جهت استفاده در فراماده شل نامرئی‌ساز طراحی و پیشنهاد شد.