بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۶-۱۵ بهمن ۱۳۹۸

بازده پراکندگی جلوسو و عقب‌سو در غلاف نامرئی‌ساز

محمد امین خان‌پور، امیرحسین برادران قاسمی

دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده فیزیک، تهران، ایران

m_khanpour@sbu.ac.ir , a_b.ghasemi@sbu.ac.ir

چکیده –غلاف نامرئی ساز با کاهش میزان پراکندگی موج در برخورد با شی و حفظ فاز موج فرودی پس از عبور از مکان شی، موجب می شود تا شی مورد نظر تو سط ناظرین بیرونی قابل م شاهده نبا شد. با تفکیک بازدهی پراکندگی کل به بازدهی پراکندگی‌های جلو سو و عقب سو در یک غلاف نامرئی ساز بر پایه اپتیک تبدیلی که تو سط روش FDTD شبیه سازی می شود به برر سی تاثیر تغییرات فرکانس، ضخامت غلاف و ضریب میرایی بر روی این بازده‌ها می‌پردازیم. نتایج نشان می‌دهد که بازدهی‌های پراکندگی جلوسو و عقب‌سو نسبت به این تغییرات با بازدهی پراکندگی کل غلاف که معمولا در مقالات مورد مطالعه قرار می‌گیرند متفاوت ا ست. برای مثال با افزایش ضریب میرایی با آنکه بازدهی پراکندگی رو به جلو بسیار کاهش می‌یابد ولی تاثیر اندکی روی بازدهی رو به عقب دارد. همچنین بیشینه بازدهی کل غلاف لزوما با بیشینه بازدهی‌های جلوسو و عقب‌سو در یک فرکانس اتفاق نمی‌افتد. از طرف دیگر بازدهی جلوسو با افزایش ضخامت رفتاری نوسانی پیدا می‌کند.

کلید واژه- فراماد الکترومغناطیسی، نامرئی‌سازی، شبیه‌سازی عددی، FDTD، اپتیک تبدیلی

Forward and Backward Scattering Efficiency of Invisibility Cloak

Mohammad Amin Khanpour, Amir Hossein Baradaran Ghasemi

m_khanpour@sbu.ac.ir , a_b.ghasemi@sbu.ac.ir

Abstract- Invisibility Cloak manage to hide the object from the observer by matching the transient and incident wave phases and by decreasing the amount of scattering from the interaction between incident wave and object. By separating total efficiency into the forward and backward scattering Efficiencies in an invisibility cloak, we study the effects of incident wave frequency, Cloak Thickness and attenuation coefficient on both these efficiencies. The cloak is simulated by dispersive Finite-difference Time-Domain (FDTD) method based on transformation optics. Results show that forward and backward scattering efficiencies have different responses toward these changes compared to total efficiency of the cloak which is usually studied in scientific papers. For example, although the forward scattering efficiency decreases sharply by increasing the attenuation coefficient in the cloak, it has little effect on the backward scattering efficiency. Moreover, the maximum of total efficiency and the maximum of forward and backward scattering efficiencies do not occur at the same incident wave frequency. Likewise by increasing thickness of the cloak, forward scattering efficiency shows an oscillating behavior.

Keywords: Electromagnetic Metamaterials, invisibility Cloak, FDTD simulation, Transformation Optics

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

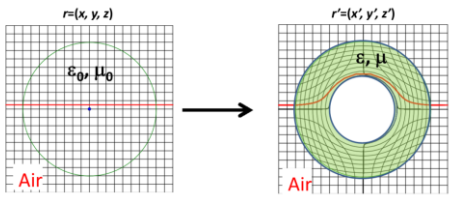
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]

مقدمه

برای نامرئی‌سازی اشیاء در سال‌های اخیر روش‌های مختلف و متنوعی ارائه شده است که یکی از اولین این تکنیک‌ها استفاده از اپتیک تبدیلی می‌باشد که در این روش با کاهش پراکندگی حاصل از عبور موج از مکان شی و حفظ فاز موج فرودی میتوان مانع از مشاهده شی توسط ناظران خارجی شد. با استفاده از این روش در سال ۲۰۰۶ پندری و همکارانش [۱] توانستند اولین نمونه ابتدایی این گونه از غلاف‌های نامرئی‌ساز را طراحی کنند. در گام بعدی محققان به بررسی محدودیت‌های این روش [۲]، محدوده بهینه پهنای باند برای غلاف [۳] و بررسی تاثیرات شکل ظاهری غلاف بر بازده آن [۴] پرداختند. یکی دیگر از نکات مهم در طراحی غلاف نامرئی‌ساز که در این مقاله به آن پرداخته می‌شود، عملکرد آن در توانایی به حداقل رساندن پراکندگی رو به جلو و همچنین رو به عقب بطور مستقل از هم می‌باشد. در مقاله حاضر برای پاسخ به این نکته، روش تفاضل-محدود در حوزه-زمان[۱] در زبان برنامه نویسی C++ برای غلافی که به شدت پاشنده و ناهمسانگرد است، پیاده‌سازی می‌شود. همچنین برای ایجاد موج تخت از روش میدان کل/میدان پراکنده[۲]، استفاده نموده‌ایم. روش میدان کل/میدان پراکنده دارای این مزیت است که تنها بخش پراکنده شده موج می‌تواند وارد فضای میدان پراکنده شود، لذا تعریف بازدهی غلاف در فضای میدان پراکنده بسیار کارامد خواهد بود. برای جلوگیری از بازتاب امواج در برخورد با لبه‌های فضا از سامانه لایه‌های کاملا تطبیق‌یافته تک محوری[۳] استفاده شده است. با بررسی مستقل جبهه‌های موج پراکنده شده در جلو و عقب غلاف سعی می‌شود تا به این پرسش پاسخ داده شود که تغییرات ضخامت غلاف، تغییرات فرکانس موج فرودی و تغییرات ضریب میرایی چه اثری در میزان موج پراکنده شده رو به جلو و همچنین رو به عقب از غلاف دارد.

نامرئی‌سازی به روش اپتیک تبدیلی

نظریه بنیادی اپتیک تبدیلی با آغاز از معادلات ماکسول و با استفاده از یک تبدیل مختصات بین دو فضا گسترش داده می‌شود [۶-۵]. نظریه اپتیک تبدیلی راجع به تبدیل میان کمیات در دو فضا بحث می‌کند که متغیرهای مختصاتی آنها بوسیله یک تبدیل مختصات به هم مربوط هستند. نکته مهمی که در اینجا باید به آن اشاره کرد این است که معادلات ماکسول نسبت به تغییر مختصات ناوردا هستند و هر گونه تغییری در فضا تنها روی مقادیر گذردهی الکتریکی و تراوایی مغناطیسی تأثیر می‌گذارد و تغییری در فرم کلی معادلات ماکسول ایجاد نمی‌کند. با اعمال تغییرات حاصله از تبدیل مختصات بر گذردهی و تراوایی محیط می‌توان فضای اصلی خود را که فضایی تخت است به فرم دلخواه تغییر دهیم یا حتی بخشی از فضا را عملاً حذف نماییم. در این روش نامرئی‌سازی ابتدا بخشی از فضا که شیء در آن قرار دارد را با استفاده از تبدیل مختصاتی حذف کرده و سپس تأثیری که این عمل بر روی گذردهی و تراوایی محیط می‌گذارد را بدست آورده و با استفاده از مواد ساختمند این تغییرات را در گذردهی و تراوایی را در محیط اصلی اعمال می‌کنیم. روند تبدیل مختصات در شکل ۱ قابل مشاهده است.



شکل ۱: شمایی از حرکت نور در محیط تغییر یافته[۱]

در بررسی حاضر، شیء مورد نظر استوانه‌ای تعریف شده است و پس از حذف شیء از محیط، تحولات گذردهی و

[۱] Finite-Difference Time-Domain

[۲] Total Field/Scatter Field

[۳] Uniaxial Perfectly Matched Layers

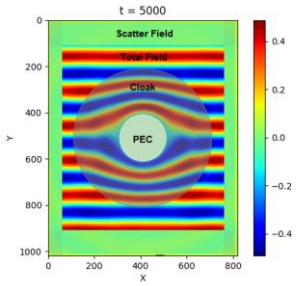
این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]

تراوایی نسبی محیط اطراف شیء حذف شده به شکل زیر بدست می‌آید[۱]:

$$\varepsilon_r = \mu_r = \frac{r-R_1}{r},\ \varepsilon_\theta = \mu_\theta = \frac{r}{r-R_1},\ \varepsilon_z = \mu_z = \left(\frac{R_2}{R_2-R_1}\right)\frac{r-R_1}{r} \quad (۱)$$

که در اینجا r مکان هر نقطه نسبت به مرکز استوانه اخفاء شده، R_1 شعاع دایره محو شده و R_2 شعاع غلافی دایروی است که مقادیر گذردهی و تراوایی را در آن تغییر می‌دهیم تا سامانه تغییر مختصات یافته حاصل شود. نتایج شبیه‌سازی برای پراکندگی موج تخت فرودی با طول موج ۱۰۰ میکرون از شیئی فلزی با شعاع ۵۰ میکرون و در حضور غلاف در شکل ۲ نمایش داده شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود پراکندگی جبهه موج از شی فلزی توسط غلاف بطور چشمگیری کاهش یافته است.



شکل ۲: تاثیر نامرئی‌ساز با ضخامت ۱۵۰ میکرومتر حول یک استوانه به شعاع ۵۰ میکرومتر رسانای ایده‌آل بر دامنه میدان مغناطیسی در برخورد با یک موج تخت با طول موج ۱۰۰ میکرومتر که در اینجا نوارهای آبی و قرمز نشانگر جبهه موج هستند. شرایط مرزی از نوع لایه‌های کاملا تطبیق‌یافته تک محوری می‌باشند.

پارامترهای شبیه‌سازی

برای مدل سازی سامانه مورد بررسی با استفاده از زبان برنامه نویسی C++ فضای دو بعدی را طراحی کردیم که یک استوانه با شعاع ۵۰ میکرومتر در مرکز فضا قرار دارد و توسط غلافی با ضخامت R_2 محصور شده است. در این شبیه‌سازی ضریب پایداری کورانت[۴] سامانه معادل با: S=0.7 در نظر گرفته شده است و اندازه هر سلول فضایی معادل است با: $dx = \lambda/150$ ، مقدار ۱۵۰ در اینجا به این علت انتخاب شده است که استفاده از مقادیر کوچکتر این مقدار موجب ایجاد خطا در محاسبه مقادیر گذردهی و تراوایی غلاف می‌گردد. هر گام زمانی نیز توسط رابطه $dt = dx \times S / C$ محاسبه می‌شود. فضای محاسباتی میدان کل در راستای x و در راستای y بترتیب دارای ۶۰۰ و ۸۰۰ سلول فضایی می‌باشد و پهنای هر لایه از بخش میدان پراکنده در هر ۴ راستا فضا ۱۰۰ خانه فضایی است و در نهایت فضای محاسباتی توسط لایه‌های کاملا تطبیق‌یافته تک محوری با ضخامت ۱۰ سلول فضای بسته می‌گردد که مانع بازتاب موج به داخل محیط محاسباتی می‌گردد. محاسبات مربوط به محیط پاشنده و ناهمسانگرد مربوط به غلاف نامرئی‌ساز توسط معادلات بدست آمده از روش معادلات دیفرانسیل کمکی[۵] انجام می‌گردد. برای اعمال پاشندگی غلاف از مدل درود استفاده می‌کنیم. ضریب میرایی را با رابطه $\gamma = \varepsilon'\omega\tan\delta/(\varepsilon'-1)$ تعریف می‌گردد که در این رابطه ε' بخش حقیقی گذردهی، ω فرکانس زاویه‌ای و tan(δ) را تانژانت اتلاف می نامیم و به فرم $\tan(\delta) = \varepsilon''/\varepsilon'$ تعریف می‌شود که در اینجا ε'' بخش مجازی گذردهی است. در حالت ایده آل مقدار آن معادل با صفر است لذا تاثیر میرایی در سامانه مشاهده نمی‌گردد. برای بدست آوردن بازده در هر یک از راستاهای مورد نظر از روش زیر استفاده می‌شود:

$$eff = \left(\left(A_{initial} - A_{scattered}\right)/A_{initial}\right)\times 100 \quad (۲)$$

نتیجه شبیه‌سازی

ابتدا به بررسی تاثیرات تغییر ضخامت غلاف می‌پردازیم. در اینجا فرکانس موج فرودی معادل ۳ تراهرتز در نظر گرفته شده است و ضخامت از ۱۶,۵ تا ۱۳۳ میکرومتر تغییر می‌کند. همانطور که در شکل ۳ قابل مشاهده است، بازده غلاف برای ضخامت‌های میان ۱۶,۵ تا ۶۶ میکرومتر در هر دو پراکندگی روبه جلو و روبه عقب افزایش می‌یابد اما با افزایش ضخامت بیش از ۶۶ میکرومتر، بازده رو به جلو

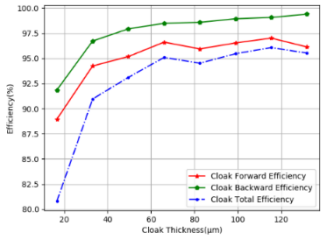
[۴] Courant

[۵] auxiliary differential equation

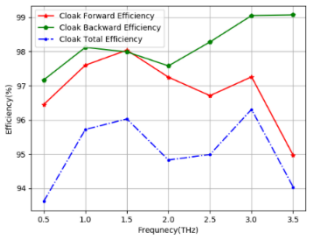
این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]

غلاف یک رفتار نوسانی از خود بروز می‌دهد. ولی بازده رو به عقب به رشد پایدار خود ادامه می‌دهد.

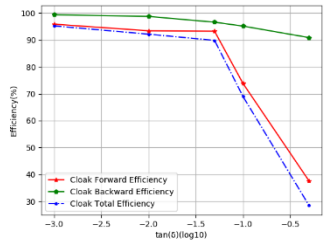


شکل ۳: نمودارهای تغییرات بازده غلاف برحسب تغییرات ضخامت غلاف در برهمکنش با موجی به فرکانس ۳ تراهرتز. نمودار قرمز رنگ برای بازدهی رو به جلو و نمودار سبز رنگ برای بازدهی رو به عقب را معین می‌کنند.



شکل ۴: نمودارهای تغییرات بازده غلاف برحسب تغییر فرکانس موج فرودی بر غلافی با ضخامت ۱۰۰ میکرومتر. نمودار قرمز رنگ برای بازدهی رو به جلو و نمودار سبز رنگ برای بازدهی رو به عقب را معین می‌کنند.

در گام بعدی با ثابت در نظر گرفتن ضخامت غلاف در اندازه ۱۰۰ میکرومتر و امواج تخت فرودی با فرکانسهای مختلف می‌خواهیم به بررسی تاثیر فرکانس‌ها در بازدهی غلاف بپردازیم.



شکل ۵: نمودارهای تغییرات بازده غلاف برحسب تغییرات ضریب میرایی در فرکانس ثابت ۳ تراهرتز و ضخامت غلاف ۱۳۳ میکرومتر. نمودار قرمز رنگ برای بازدهی رو به جلو و نمودار سبز رنگ برای بازدهی رو به عقب را معین می‌کنند

همان گونه که مشاهده می‌شود بازده رو به جلو در پس از عبور از فرکانس ۱,۵ تراهرتز شاهد یک روند نزولی است هرچند که در مکان ۳ تراهرتز دارای یک قله نسبی می‌شود اما روند کلی تغییرات بازده رو به جلو نشانگر این است که با رشد فرکانس شاهد بازده‌های کمتری خواهیم بود. اما همانطور که مشاهده می‌شود در بازده رو به عقب با افزایش فرکانس، تا پیش از فرکانس ۲ تراهرتز شاهد افت بازده و پس از آن شاهد رشد بازده غلاف هستیم.

در آخر به بررسی بازده رو به عقب و رو به جلو غلاف در حالاتی می‌پردازیم که مقدار $\tan(\delta)$ از ۰,۰۰۱ تا ۰,۵ تغییر کند. در این بررسی ضخامت غلاف ۱۳۳ میکرومتر و فرکانس موج فرودی ۳ تراهرتز در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل ۵ می‌توان بیان کرد که تا زمانی که مقدار $\tan(\delta)$ در بازه‌ی میان ۰,۰۰۱ تا ۰,۵ باشد رفتار بازده‌های عقب و جلو تقریبا یکسان هستند اما با افزایش $\tan(\delta)$ شاهد آن هستیم که بازده رو به جلو افت شدیدی می‌کند در حالی که بازده رو به عقب شاهد کاهش بازده نسبتا کمی است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله نشان دادیم که پراکندگی‌های رو به جلو و رو به عقب در غلاف نامرئی‌ساز رفتار مستقل از هم دارند و بهبود و یا نقصان در بازده یکی از این راستاها تاثیری در بازده راستای دیگر ندارد و در نتیجه بررسی بازده کلی پراکندگی غلاف که معمولا در مقالات مرتبط ذکر شده است می‌تواند دید ناقصی از عملکرد غلاف ارائه دهد.

مرجع‌ها

[1] J. B. Pendry, D. Schurig, and D. R. Smith, “Controlling electromagnetic fields,” Science 312, 1780–1782 (2006).

[2] Peijun Yao, Zixian Liang, Xunya Jiang, “Limitation of the electromagnetic cloak with dispersive material”, p. 44, Cambridge University Press, 2000.

[3] C. Argyropoulos, E. Kallos, Y. Hao, “Bandwidth evaluation of dispersive transformation electromagnetics based devices”, Appl Phys A, 103, pp. 715-719, 2011.

[4] Chao Li, Fang Li, “Two-dimensional electromagnetic cloaks with arbitrary geometries” , OPTICS EXPRESS, Vol. 16, No. 17, pp. 13414-13420, 2008

[5] U. Leonhardt. Optical conformal mapping. Science, 312:1777–1780, 2006.

[6] PU ZHANG, Theory of transformation optics and invisibility cloak design, Doctoral Thesis in Electromagnetic Theory, Stockholm, Sweden 2011

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]