

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



بازده پراکندگی جلوسو و عقبسو در غلاف نامرئیساز

محمد امین خان پور، 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 می پردازیم. نتایج نشان میدهد که بازدهی های پراکندگی جلوسو و عقب سو نسبت به این تغییرات با بازدهی پراکندگی کل غلاف که معمولا در مقالات مورد مطالعه قرار می گیرند متفاوت است. برای مثال با افزایش ضریب میرایی با آنکه بازدهی پراکندگی رو به جلو بسـیار کاهش می یابد ولی تاثیر اندکی روی بازدهی رو به عقب دارد. همچنین بیشـینه بازدهی کل غلاف لزوما با بیشـینه بازدهی های جلوسـو و عقبسو در یک فرکانس اتفاق نمی افتد. از طرف دیگر بازدهی جلوسو با افزایش ضریب میرایی با آنکه بازدهی های جلوسـو و

كليد واژه- فرامواد الكترومغناطيسي، نامرئيسازي، شبيهسازي عددي، FDTD، اپتيك تبديلي

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. 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.

مقدمه

برای نامرئی سازی اشیاء در سال های اخیر روش های 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 همكارانش [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 می شود، 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 می شود. همچنین برای ایجاد موج تخت از روش میدان کل/میدان پراکنده٬ استفاده نمودهایم. روش میدان کل/میدان پراکنده دارای این مزیت است که تنها بخش پراکنده شده موج می تواند 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 می شود 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 می شود [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 می گذارد و تغییری در فرم کلی معادلات ماكسول ايجاد نمى كند. با اعمال تغييرات 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 محيط مي گذارد را بدست آورده و با استفاده از مواد ساختمند این تغییرات را در گذردهی و تراوایی را در محیط اصلی اعمال می کنیم. روند تبدیل مختصات در شکل ۱ قابل مشاهده است.



¹ Finite-Difference Time-Domain

^{*} Total Field/Scatter Field

^r Uniaxial Perfectly Matched Layers

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

 $\varepsilon_r = \mu_r = \frac{r - R_1}{r}, \ \varepsilon_\theta = \mu_\theta = \frac{r}{r - R_1}, \ \varepsilon_z = \mu_z = \left(\frac{R_2}{R_2 - R_1}\right) \frac{r - R_1}{r} \quad (1)$

که در اینجا ۲ مکان هر نقطه نسبت به مرکز استوانه اخفاء شده، R1 شعاع دایره محو شده و R2 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 شبیهسازی 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 تطبیق یافته تک محوری می،اشند.

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 R2 محصور شده است. در این شبیهسازی ضریب پایداری کورانت⁴ سامانه معادل با: شبیهسازی ضریب پایداری کورانت⁴ سامانه معادل با: S=0.7 در نظر گرفته شده است و اندازه هر سلول فضایی معادل است با: $\lambda = \lambda / 150$ ، 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 می گردد. هر گام زمانی نیز توسط رابطه محاسبه می شود. فضای محاسباتی $dt = dx \times S / C$ 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 تطبیق یافته تک محوری با ضخامت ۱۰ سلول فضای بسته می گردد که مانع بازتاب موج به داخل محیط محاسباتی می گردد. محاسبات مربوط به محیط یاشنده و ناهمسانگرد مربوط به غلاف نامرئیساز توسط معادلات بدست آمده از روش معادلات ديفرانسيل كمكي⁴ انجام مي گردد. براي اعمال پاشندگی غلاف از مدل درود استفاده می کنیم. $\gamma = \varepsilon' \omega \tan \delta / (\varepsilon' - 1)$ ضريب ميرايي را با رابطه تعريف می گردد که در اين رابطه ' ε بخش حقيقی گذردهی، ω فرکانس زاویهای و (tan(δ) را تانژانت اتلاف می نامیم و به فرم $\varepsilon'/arepsilon' = arepsilon'/arepsilon'$ تعریف می شود که در اینجا arepsilon' بخش مجازی گذردهی است. در حالت ایده آل مقدار آن معادل با صفر است لذا تاثیر میرایی در سامانه مشاهده نمی گردد. برای بدست آوردن بازده در هر یک از راستاهای مورد نظر از روش زیر استفاده میشود:

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

نتيجه شبيهسازى

ابتدا به بررسی تاثیرات تغییر ضخامت غلاف می پردازیم. 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 می یابد اما با افزایش ضخامت بیش از ۶۶ میکرومتر، بازده رو به جلو

^a auxiliary differential equation

```
<sup>6</sup> Courant
```

۶۱۱

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

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 (δ)tal از ۲۰٫۰۰ تا ۵٫۰ 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 (δ)tal در بازهی میان ۲۰٫۰۱ تا ۵٫۰ باشد رفتار بازدههای عقب و جلو تقریبا یکسان هستند اما با افزایش (δ)tal شاهد آن هستیم که بازده رو به جلو افت شدیدی می کند در حالی که بازده رو به عقب شاهد کاهش بازده نسبتا کمی است.

نتيجهگيرى

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

- 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

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 می خواهیم 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 می شود 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 می شود اما روند کلی تغییرات بازده رو به جلو نشانگر این است که با رشد فرکانس شاهد بازده های کمتری خواهیم بود. اما همانطور که مشاهده می شود در بازده رو به عقب با افزایش