

مدل سازی عددی متا مواد به منظور استفاده در کاربردهای استتاری

داود مجیدی^۱

تاریخ دریافت: ۹۱/۰۷/۱۰

تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۰/۰۴

چکیده

در این مقاله، ابتدا متا مواد از منظری تاریخی بررسی و نیز تکنیک‌های فعال و غیرفعال نامرئی‌سازی معرفی می‌شوند. سپس با توجه به پتانسیل بالای فناوری نامرئی‌سازی غیر فعال در زمینه نظامی، شبیه‌سازی پوشش‌های نامرئی‌سازی با استفاده از نرم‌افزار Comsol ارائه شده است. شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان می‌دهند که می‌توان با این روش پوشش‌های نامرئی‌سازی با شکل کاملاً دلخواه طراحی نمود. این موضوع که پوشش نامرئی‌سازی قادر است پرتوهای الکترومغناطیسی را به دور ناحیه داخلی پوشش و بدون ایجاد اختلالی خم کند و از نفوذ موج‌های الکترومغناطیسی به داخل آن ناحیه جلوگیری کند، در تمامی شبیه‌سازی‌های انجام شده به وضوح قابل مشاهده است. همچنین از این ویژگی متا مواد می‌توان برای حفاظت اهداف در برابر تهدیدات الکترومغناطیسی، نظیر پالس‌های الکترومغناطیس قوی استفاده نمود.

کلیدواژه‌ها: متا مواد، استتار، پوشش نامرئی‌سازی، شبیه‌سازی، پالس الکترومغناطیسی قوی

۱- مقدمه

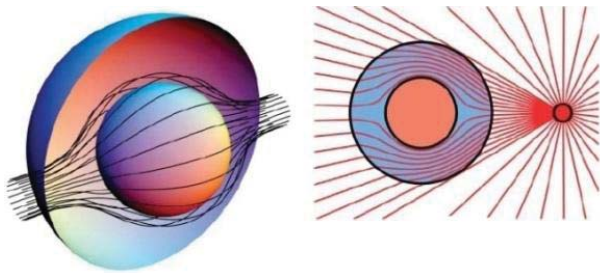
برای کنترل امواج الکترومغناطیسی می‌توان از متا موادها استفاده نمود. واژه متا به معنای فراتر یا فرا است و امروزه متا موادها به مواد مرکبی اطلاق می‌شود که ساختار واحد آنها از طول موج تابش فرودی بسیار کوچک‌تر است و خواصی را از خود نشان می‌دهند که به‌طور طبیعی در مواد مشاهده نمی‌شود.

نخستین کوشش برای کشف مفهوم مواد مصنوعی در اواخر قرن نوزدهم انجام شد، هنگامی که در سال ۱۸۹۸ میلادی، بوز^۱ نخستین آزمایش مایکروویو را برای بررسی رفتار ساختارهای تابیده شده انجام داد [۱]. در سال ۱۹۱۴، لیندمن^۲ بر روی محیط‌های کایرال مصنوعی که توسط تعداد زیادی از سیم‌های مارپیچی شکل کوچک که به‌طور تصادفی در یک محیط قرار گرفته بودند، تحقیق می‌کرد [۲]. همچنین کوک^۳ در سال ۱۹۴۸ موفق به ساخت لنزهای سبک وزن مایکروویو با آرایشی از رساناهای کروی، دیسکی و خطی که به‌طور تناوبی قرار گرفته بودند، شد و توانست به‌طور مؤثر، ضریب شکستی را برای محیط مصنوعی ایجاد کند [۳]. در سال ۱۹۹۶ پندری^۴ به‌طور نظری [۴] و متعاقب آن در سال ۱۹۹۸ به‌طور تجربی [۵] به بررسی محیط مرکبی از سیم‌های فلزی نازک تناوبی پرداخت. این محیط به‌طور مؤثر در مقابل موج‌های الکترومغناطیسی با طول موج بزرگ‌تر از ثابت شبکه سیم‌ها، مانند محیط پلاسما رفتار می‌کرد. برای بسامدهای پایین‌تر از بسامد پلاسما، ساختار سیم‌های نازک منجر به ضریب گذردهی منفی می‌شد. او در سال ۱۹۹۹ نشان داد [۶] که چگونه می‌توان محیطی که دارای ضریب نفوذپذیری مغناطیسی منفی و رفتار تشدید لورنتسی^۵ می‌باشد را به‌دست آورد.

زمینه پژوهشی اپتیک تبدیلی که با استفاده از متا موادها امکان‌پذیر است، در واقع نگرش جدیدی به پایه‌های اپتیک دارد. همانند نسبت عام که مکان و زمان در آن به صورت خمیده می‌باشد، در اپتیک تبدیلی نیز فضا برای انتشار امواج الکترومغناطیسی به‌طور دلخواه خمیده می‌شود. توانایی طراحی و ساخت فضای خمیده اپتیکی، امکان کنترل شارش انرژی الکترومغناطیسی را با دقت نانومتر فراهم می‌کند. نخستین بار رابطه میان انتشار نور و هندسه فضا-زمان در قرن گذشته و در مقالات تام^۶ [۷،۸] پایه‌گذاری شده است. همچنین اپتیک تبدیلی بر پایه نتایج بنیادی دولین^۷ [۹] و نلسون^۸ [۱۰] پایه‌گذاری شد.

نامرئی‌سازی به‌وسیله متامواد بر پایه اپتیک تبدیلی^۹ می‌باشد و

فرآیندی را توصیف می‌کند که به‌وسیله آن می‌توان موج الکترومغناطیسی را کنترل نمود و آنرا از اطراف جسم عبور داد، بدون اینکه با جسم برهم‌کنشی داشته باشد. نتیجه این فرآیند، نامرئی شدن جسم است. از جمله کاربردهای ادوات نامرئی‌ساز می‌توان به نامرئی کردن ادوات جنگی، نامرئی کردن سایت‌ها و مکان‌های استراتژیک از دید دشمن، محافظت مدارهای الکترونیکی از پالس‌های الکترومغناطیسی و ... اشاره نمود.



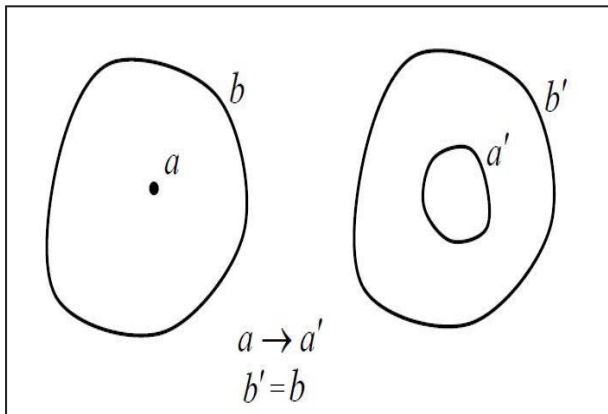
شکل ۱- پوشش‌های نامرئی‌ساز این توانایی را دارند که موج الکترومغناطیسی که بر آنها می‌تابد را از اطراف خود عبور دهند و جسم درون پوشش را نامرئی سازند.

تاکنون هیچ‌کدام از روش‌های استتار فعال یا فناوری پنهان‌سازی، قادر به نامرئی‌سازی ایده‌آل اجسام نمی‌باشند. وسیله نامرئی‌ساز کاملاً باید خواص پراکندگی مشابه خلأ داشته باشد. به عبارت دیگر، وسیله و جسمی که می‌خواهند پنهان بمانند باید نوری را بازتاب نکرده و هم‌چنین سایه‌ای ایجاد نکنند. خوشبختانه با استفاده از ساختارهای مصنوعی متا موادها می‌توان با انعطاف‌پذیری بالا تجهیزات جدیدی با عملکردهای قابل کنترل ساخت و نامرئی‌سازی کامل اجسام را انجام داد.

روش تبدیل مختصات برای ساخت محیط‌های الکترومغناطیسی با تابع پاسخ مورد انتظار توجه زیادی را به خود جلب کرده است. بر پایه شکل نوردای معادلات ماکسول تحت تبدیل مختصات، تغییر توپولوژیکی در فضای تبدیل یافته، به‌طور مؤثری معادل با تغییرات پارامترهای محیط می‌باشد. پندری [۱۱] با استفاده از یک تبدیل خاص، برای اولین بار موفق به طراحی پوشش‌های نامرئی‌ساز کروی و استوانه‌ای شد که این قابلیت در آنها وجود داشت که امواج الکترومغناطیسی را حول ناحیه‌ای هدایت کنند. این کار نظری بلافاصله با آزمایشی در محدوده امواج مایکروویو و با استفاده از متا موادها تأیید شد [۱۲]. روش تبدیل مختصات، یک روش کاملاً عمومی و کلی است و به‌دست آوردن پارامترهای محیط متشکل از متا مواد برای شکل و تابع پاسخ خاص بسیار مشکل می‌باشد. برای پوشش‌های نامرئی‌ساز با شکل معلوم، مانند مربع [۱۳] و بیضی [۱۴]، می‌توان با به‌دست آوردن صورت صحیح تانسور تبدیل، متا مواد و محیط را طراحی نمود.

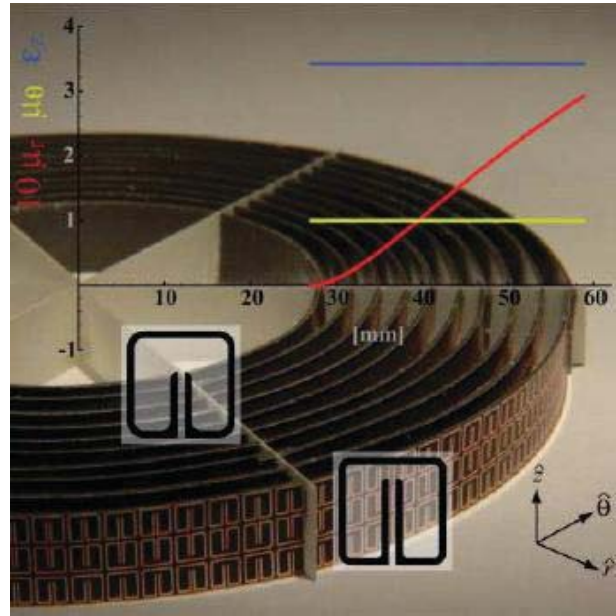
- 1- JagadisChunder Bose
- 2- Lindman
- 3- Kock
- 4- Pendry
- 5- Lorentz
- 6- Tamm
- 7- Dolin
- 8- Nelson
- 9- Transformation optics

الکترومغناطیسی در دستگاه اصلی از یک نقطه پراکندگی ندارد و هم چنین معادلات ماکسول تحت تبدیلات دستگاه مختصات ناورد است، لذا رفتار موج الکترومغناطیسی در ناحیه بیرونی دو سیستم یکسان است. از آنجا که در سیستم اصلی پراکندگی مشاهده نمی شود لذا در سیستم تبدیل یافته نیز پراکندگی مشاهده نخواهد شد. از آنجا که حجم ناحیه تحت تبدیل کاهش می یابد لذا چگالی پرتوهای الکترومغناطیسی نیز در داخل ناحیه افزایش می یابد. هم چنین اگر جسمی در داخل پوشش نامرئی ساز قرار گیرد، از دید ناظر بیرونی دیده نخواهد شد؛ زیرا موج الکترومغناطیسی اطراف جسم خم می شود و با جسم برهم کنشی نخواهد داشت و بنابراین جسم نامرئی می شود. همانطور که قبلاً عنوان شد تبدیل مختصات در این دسته از پوشش های نامرئی ساز باید به گونه ای باشد که مرز بیرونی تحت تبدیل مختصات تغییری نکند. همچنین می بایست حجم ناحیه در فضای مجازی به لایه ای فشرده تر در فضای فیزیکی تغییر یابد. تبدیلی هایی که این دو ویژگی را داشته باشند قابلیت کاربرد برای ساخت و محاسبه پوشش های نامرئی ساز را خواهند داشت و این تبدیلات یکتا نمی باشند. اگرچه می توان از پوشش های نامرئی ساز استوانه ای برای نامرئی کردن اجسام با شکل دلخواه استفاده نمود، اما بهتر است که بتوان راهی برای ساخت پوشش های نامرئی ساز با شکل دلخواه ارائه نمود که در آن، محدودیت شکل خاص پوشش برداشته شود. در صورتی که شکل پوشش نامرئی ساز دلخواه باشد آنگاه مشکلی که بلافاصله پیش می آید این است که نمی توان به آسانی تبدیلی یافت که دو ویژگی ذکر شده را داشته باشند.



شکل ۳- شماتیک تبدیل مختصات برای یک پوشش نامرئی ساز دلخواه

همین امر موجب می شود که یافتن تبدیل و ساخت پوشش های نامرئی ساز با شکل دلخواه به صورت نظری غیر قابل حل باشد. در این زمینه تنها راه حل، استفاده از روش های عددی برای حل مسئله می باشد که در ادامه به آن پرداخته می شود.



شکل ۲- ساختار اولین پوشش نامرئی ساز در بسامد میکروویو.

در سال های اخیر، برای طراحی پوشش های نامرئی ساز با شکل غیرمتعارف و بر پایه نظریه تبدیل، روش های مختلفی پیشنهاد شده است. یان^۱ به طور نظری نشان داد که ساخت پوشش نامرئی ساز دلخواه با تحلیل خواص موج در مرز پوشش امکان پذیر است [۱۵]. جیانگ^۲ با استفاده از توابع اسپلاین غیریکنواخت، مرز هندسی پوشش نامرئی سازی با شکل نامتعارف را توصیف نمود [۱۶] و با استفاده از آن، پارامترهای محیط را به دست آورد. هم چنین برای مشخص نمودن و توصیف مرزهای تصادفی از بسط فوریه متناهی نیز استفاده شده است [۱۷]. در این روش، بعد از به دست آوردن بسط فوریه مرز، خواص محیط محاسبه می شود. تمامی پژوهش های انجام شده که به آنها اشاره شد، رهیافت های نیمه تحلیلی و نیمه عددی می باشند که برای محاسبه تانسور تبدیل، مورد استفاده قرار می گیرند.

۲- شبیه سازی پوشش نامرئی ساز با شکل دلخواه

اساس اصلی در پوشش های نامرئی ساز در این است که حجم مشخصی در فضای اصلی، با استفاده از تبدیل مختصات، به لایه ای در دستگاه تبدیل یافته نگاشته شود.

این تبدیل باید دارای دو ویژگی باشد. نخستین ویژگی مهم این است که تحت تبدیل نباید بخش بیرونی حجم تغییر کند. ویژگی دوم این تبدیل این است که نقطه ای در دستگاه اصلی باید به یک حجم متناهی داخل مرز بیرونی نگاشته شود. در واقع از آنجا که موج

1- Yan

2- Jiang

بالا می‌باشد و تنها تفاوت آن این است که در فضای فیزیکی نوشته شده است. لذا خواهیم داشت:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x_1'^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2'^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_3'^2} \right) U_i = 0 \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

$$U(a') = a, U(b') = b \quad a' < x < b'$$

که در این رابطه U_i نماینده مختصات در فضای مجازی است. در مسائل سه بعدی، سه معادله لاپلاس باید حل شود در حالی که در فضای دوبعدی تعداد معادلات لاپلاس که باید حل شود به دو معادله کاهش می‌یابد. همچنین این روش قابل استفاده در هر بعد فضای می‌باشد و از این لحاظ محدودیتی ندارد. علاوه بر این از آنجا که حل معادله لاپلاس تحت شرایط مرزی دیریکله به صورت عددی کاملاً مسئله معلوم و شناخته شده است، لذا می‌توان آن را برای هر شکل دلخواهی استفاده نمود. در نتیجه، این روش برای محاسبات پوشش‌های نامرئی‌ساز با هر شکل دلخواهی قابلیت استفاده دارد. بعد از حل معادله (۲) با شرایط مرزی مشخص، می‌توان مشتقات جزئی اپراتور را محاسبه نمود و با توجه به آن می‌توان تانسور تغییر مختصات را به دست آورد.

برای شبیه‌سازی، رفتار موج الکترومغناطیسی فرودآمده بر پوشش نامرئی‌ساز استوانه‌ای استفاده می‌شود. هندسه این سیستم در شکل (۴) آورده شده است. با استفاده از ماژول الکترومغناطیسی این نرم‌افزار مسئله استوانه رسانای کامل که با پوشش نامرئی‌ساز احاطه شده است شبیه‌سازی می‌شود. در چهار سمت ناحیه‌ای که شبیه‌سازی در آن انجام می‌شود لایه PML قرار دارد. برای داشتن شرایط مرزی دوره‌ای از این لایه استفاده می‌شود که وظیفه آن جذب امواج الکترومغناطیسی رسیده به مرز و جلوگیری از بازتابش آن می‌باشد و همین امر موجب می‌شود که ناحیه شبیه‌سازی شده مانند ناحیه‌ای با مرزهای بی‌نهایت شود. موج تخت الکترومغناطیسی با قطبش TE از سمت چپ ناحیه، بر روی پوشش فرود می‌آید.

در این مسئله قبل از انجام شبیه‌سازی الکترومغناطیسی باید دو معادله لاپلاس به طور عددی حل شوند. سپس با استفاده از حل معادله لاپلاس می‌توان تانسور تبدیل را به دست آورد. پس از حل معادله لاپلاس، شبیه‌سازی الکترومغناطیسی پوشش نامرئی‌ساز استوانه‌ای انجام می‌شود.

شکل (۵) نتیجه شبیه‌سازی انجام شده بر روی این سیستم را نشان می‌دهد. در این شکل اندازه مولفه عمود بر سطح میدان الکتریکی در نقاط مختلف ناحیه نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود موج الکترومغناطیسی از سمت چپ بر روی پوشش نامرئی‌ساز می‌تابد و هنگامی که موج از سمت چپ به راست ناحیه پیش می‌رود دچار تغییر شکل همواری توسط پوشش نامرئی‌ساز شده

شکل (۳) طرح شماتیک یک پوشش نامرئی‌ساز با شکل دلخواه را نشان می‌دهد. فرض کنید که ناحیه‌ای از فضا در فضای مجازی توسط مرز بیرونی با شکل دلخواه b احاطه شده باشد. ناحیه مورد بررسی در داخل این مرز قرار گرفته است. حال فرض کنید که نقطه‌ای کاملاً دلخواه در داخل این مرز و در فضای مجازی با نام a انتخاب شود. برای به دست آوردن پوشش نامرئی‌ساز باید تبدیل مختصاتی بر روی این فضا انجام گیرد. فرض می‌شود که تحت تبدیل خاصی، نقطه a در فضای مجازی به مرز داخلی a' در فضای فیزیکی نگاشته شود؛ همچنین مرز بیرونی تحت این تبدیل خاص بدون تغییر باقی بماند ($b = b'$). شرایط مرزی ذکر شده را می‌توان به زبان ریاضی به شکل $U'(a) = a'$ و $U'(b) = b'$ نوشت که در این معادلات اپراتور U' مختصات جدید نقطه‌ای در فضای مجازی را تحت تبدیل مختصات محاسبه می‌کند. حال مسئله این است که چگونه می‌توان تغییرات این اپراتور در داخل لایه نامرئی‌ساز را مشخص نمود. انتخاب معمول این اپراتور به صورت اپراتور خطی می‌باشد، اما باید دقت نمود که لزومی ندارد که این اپراتور حتماً خطی باشد. در صورتی که بتوان اپراتوری پیدا کرد که دو شرط ذکر شده را داشته باشد، حتی در صورت غیرخطی بودن مشکلی نخواهد داشت. اما در پوشش‌های نامرئی‌ساز با شکل دلخواه، به دست آوردن اپراتور و در نتیجه، به دست آوردن مشتقات و تغییرات بسیار مشکل است.

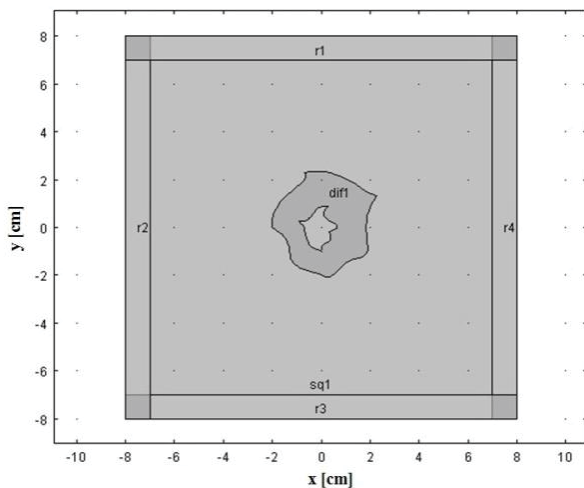
برای اینکه بتوان از عملکرد پوشش نامرئی‌ساز اطمینان حاصل نمود و شرایطی را ایجاد کرد که این پوشش بازتابی ایجاد نکند، باید مشتقات این اپراتور و خود آن پیوسته باشند. لذا این مشتقات باید به اندازه کافی هموار باشند تا بازتابی ایجاد نکنند. از طرفی می‌دانیم که جواب‌های معادله لاپلاس با شرایط مرزی دیریکله، هارمونیک می‌باشند. این موضوع پیشنهاد می‌دهد که می‌توان تبدیلات و در نتیجه، تغییرات اپراتور را از حل معادله لاپلاس $\Delta U' = 0$ با شرایط مرزی $U'(a) = a'$ و $U'(b) = b'$ به دست آورد. چون جواب‌های معادله لاپلاس با شرایط مرزی دیریکله هارمونیک می‌باشند، لذا وجود و پیوستگی مشتقات اپراتور تضمین می‌شود. در واقع معادله لاپلاس در فضای مجازی به شکل زیر است:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x_1'^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2'^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_3'^2} \right) U'_i = 0 \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

$$U'(a) = a', U'(b) = b' \quad a < x < b$$

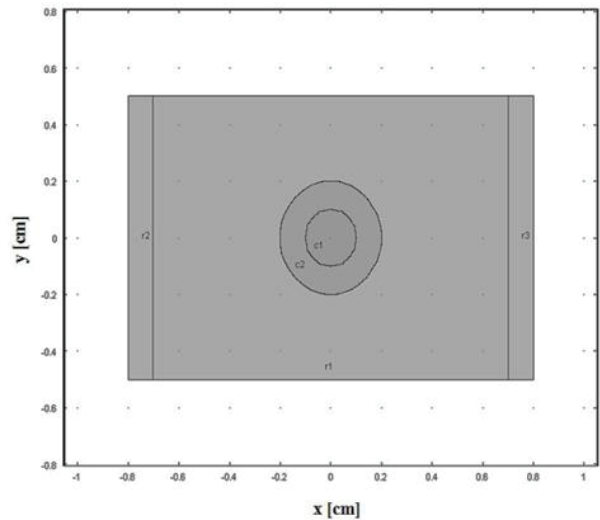
حال می‌توان این معادلات لاپلاس را به طور عددی حل کرد و برای پوشش‌های نامرئی‌ساز با هر شکل دلخواه، تبدیل را به دست آورد. به صورت کاملاً هم‌ارز می‌توان معادله لاپلاس معکوس که در فضای فیزیکی نوشته شده است را نیز حل نمود. این معادله مشابه معادله

سیستم دوم که شبیه سازی آن انجام شده است، پوشش نامرئی ساز با شکل کاملاً دلخواه می باشد که با استفاده از حل عددی معادلات لاپلاس طراحی شده است. تبدیل مختصات برای این شکل دلخواه به وسیله حل معادله لاپلاس به صورت عددی به دست می آید و از آن برای شبیه سازی رفتار موج الکترومغناطیسی فرود آمده بر پوشش نامرئی ساز با شکل دلخواه استفاده می شود. هندسه پوشش نامرئی ساز با شکل دلخواه در شکل (۶) آورده شده است. با استفاده از مازول الکترومغناطیسی این نرم افزار، مسئله رسانای کامل با شکل دلخواه که با پوشش نامرئی ساز احاطه شده است، شبیه سازی می شود. در چهار سمت ناحیه ای که شبیه سازی در آن انجام می شود لایه PML قرار دارد. موج تخت الکترومغناطیسی با قطبش TE از سمت چپ ناحیه، بر روی پوشش نامرئی ساز فرود می آید. در این حالت قبل از شبیه سازی الکترومغناطیسی باید دو معادله لاپلاس به طور عددی حل شوند. سپس با استفاده از حل معادله لاپلاس می توان تانسور تبدیل را به دست آورد. جواب حل عددی دو معادله لاپلاس در شکل (۷) آورده شده است. پس از حل معادله لاپلاس، شبیه سازی الکترومغناطیسی پوشش نامرئی ساز استوانه ای انجام می شود.



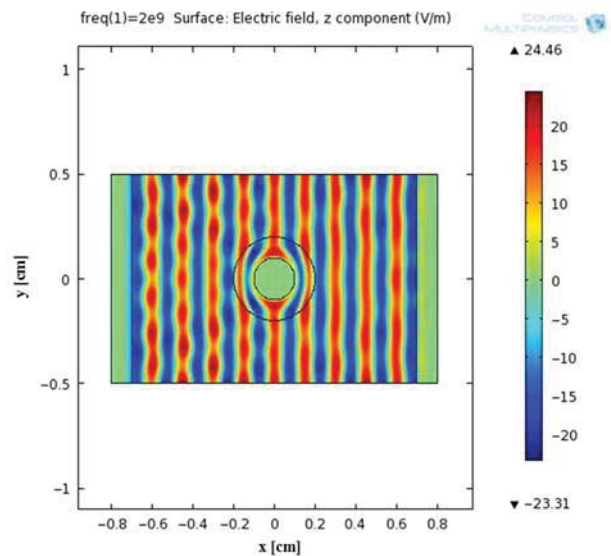
شکل ۶- هندسه پوشش نامرئی ساز با شکل کاملاً دلخواه که با استفاده از حل معادله لاپلاس شبیه سازی می شود

در شکل (۸) نتیجه شبیه سازی انجام شده بر روی پوشش نامرئی ساز با شکل دلخواه آورده شده است. در این شکل، اندازه مولفه عمود بر سطح میدان الکتریکی در نقاط مختلف ناحیه نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می شود موج الکترومغناطیسی از سمت چپ بر روی پوشش نامرئی ساز فرود می آید و هنگامی که موج از سمت چپ به سمت راست ناحیه پیش می رود دچار تغییر شکل هموار توسط پوشش نامرئی ساز شده و بدون ایجاد اختلالی به سمت جلو حرکت می کند. همچنین همانطور که مشاهده می شود موج الکترومغناطیسی

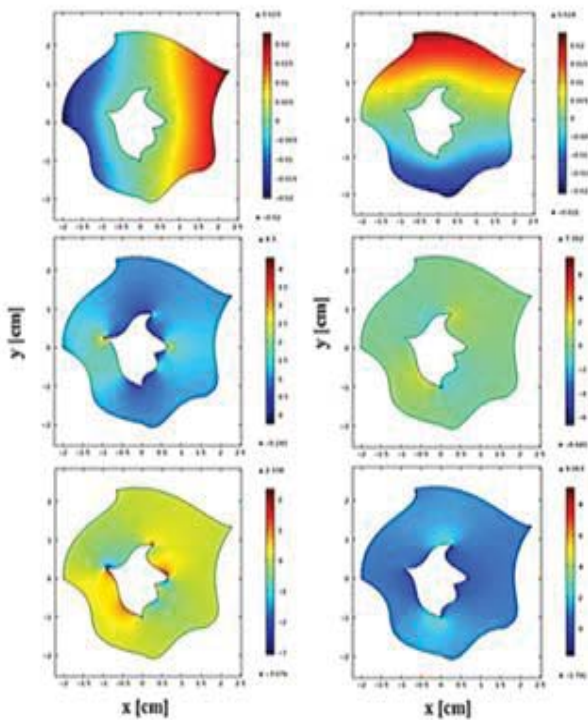


شکل ۴- هندسه پوشش نامرئی ساز استوانه ای که با استفاده از حل معادله لاپلاس شبیه سازی می شود.

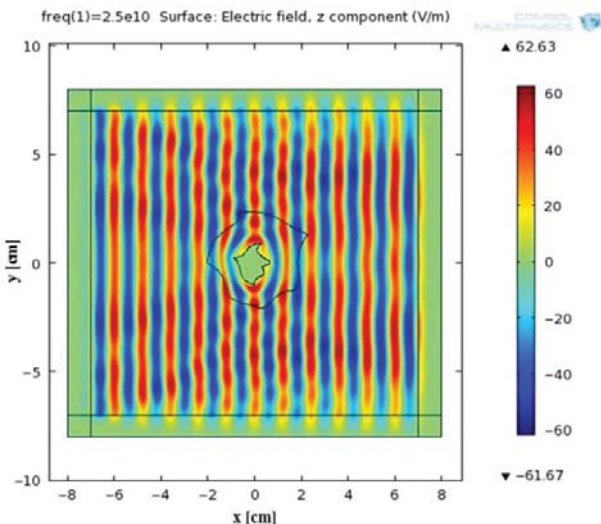
و به سمت جلو طی مسیر می کند. همچنین موج الکترومغناطیسی از ناحیه داخلی خارج می شود و با اجسام داخلی برهم کنشی نخواهد داشت و در واقع دیده نخواهند شد. اگر ناظری در سمت راست قرار گیرد و به امواج الکترومغناطیسی که به او می رسد نگاه کند، تغییر و پراکندگی در موج مشاهده نخواهد کرد و این موضوع بدان معناست که پوشش نامرئی ساز و اجسام داخل آن دیده نخواهند شد. می توان مشاهده کرد که با استفاده از تبدیلات غیرخطی که از حل معادلات لاپلاس به دست می آیند نیز می توان پوشش های نامرئی ساز به دست آورد.



شکل ۵- اندازه مولفه Z میدان الکتریکی موج الکترومغناطیسی که بر پوشش نامرئی ساز استوانه ای فرود آمده است.



شکل ۷- حل معادله لاپلاس در لایه نامرئی ساز با شکل دلخواه. سمت چپ شکل و از بالا به پایین به ترتیب مربوط به حل عددی X ، $\partial x / \partial x'$ و $\partial x / \partial y'$ می‌باشند. سمت راست شکل و از بالا به پایین به ترتیب مربوط به حل عددی Y ، $\partial y / \partial x'$ و $\partial y / \partial y'$ می‌باشند.



شکل ۸- اندازه مؤلفه Z میدان الکتریکی موج الکترومغناطیسی که بر پوشش نامرئی ساز با شکل کاملاً دلخواه فرود آمده است.

به ناحیه داخلی وارد نمی‌شود و در نتیجه با هر جسمی که در داخل آن باشد برهم‌کنشی نخواهد داشت. اگر ناظری در سمت راست قرار گیرد و به امواج الکترومغناطیسی که به او می‌رسد نگاه کند، تغییر و پراکندگی در موج مشاهده نخواهد کرد و این موضوع بدان معناست که پوشش نامرئی ساز و اجسام داخل آن دیده نخواهند شد. پس مشاهده می‌شود که با استفاده از تبدیلات غیرخطی که از حل معادلات لاپلاس به دست می‌آیند می‌توان پوشش‌های نامرئی ساز با شکل کاملاً دلخواه را طراحی و محاسبه نمود.

۳- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

هیچ‌کدام از روش‌های استتار فعال قادر به نامرئی‌سازی ایده‌آل اجسام نبوده و تنها تکنیک استتار غیرفعال که مبتنی بر عدم بازتاب نوری هدف باشد و در عین حال هیچ انرژی نیز جذب نکند، قادر به نامرئی‌سازی ایده‌آل خواهد بود. در نتیجه، این فناوری از پتانسیل بالایی جهت استفاده در ادوات، تجهیزات و یونیفورم‌های پرسنلی افراد نظامی برخوردار می‌باشد.

با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده می‌توان نتیجه گرفت که ساخت پوشش نامرئی ساز با شکل کاملاً دلخواه امکان‌پذیر می‌باشد. نحوه شبیه‌سازی و محاسبات مربوطه در این پروژه به تفصیل مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. همچنین راهکارهایی عنوان شد که می‌توان با استفاده از آنها پوشش‌های نامرئی ساز با شکل کاملاً دلخواه را طراحی نمود. از ویژگی‌های پوشش‌های نامرئی ساز این است که برخلاف روش‌های دیگر استتار که هر یک دارای نقصی می‌باشند و نامرئی‌سازی کامل را امکان‌پذیر نمی‌سازند، این قابلیت را دارد که اجسام داخل پوشش را از دید ناظر بیرونی کاملاً نامرئی نماید. این موضوع می‌تواند در نامرئی‌سازی ادوات مختلف نظامی مانند تانک، هواپیما و ... از دید دشمن مورد استفاده قرار گیرد. همچنین با استفاده از پوشش‌های نامرئی ساز می‌توان سایت‌های مهم و استراتژیک را از دید ادوات مختلف سنجش از دور پنهان نمود. علاوه بر این، از جمله کاربردهای دیگری که می‌توان برای این پوشش‌ها متصور شد، استفاده از آنها برای محافظت مدارها و تاسیسات مهم و حیاتی الکتریکی از گزند بمب‌های الکترومغناطیسی است. این موضوع که پوشش نامرئی ساز قادر است که پرتوهای الکترومغناطیسی را به الکترومغناطیسی به داخل آن ناحیه جلوگیری کند، در تمامی شبیه‌سازی‌های انجام شده به وضوح قابل مشاهده است. در نتیجه، تجهیزات الکتریکی که در داخل پوشش قرار گرفته‌اند پالس بمب الکترومغناطیسی را احساس نخواهند کرد.

مراجع

1. J. C. Bose, On the rotation of plane of polarisation of electric waves by a twisted structure, Proc. Roy. Soc., 63(1898) 146.
2. I. V. Lindell, A. H. Sihvola, J. Kurkijarvi, K. F. Lindman, The last Hertzian and a Harbinger of electromagnetic chirality, IEEE Antennas Propag. Mag., 34 (1992) 24.
3. W. E. Kock, Metallic delay lenses, Bell Sys. Tech. J., 27 (1948) 58.
4. J. B. Pendry, A. J. Holden, W. J. Stewart, I. Youngs, Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures, Phys. Rev. Lett., 76 (1996) 4773.
5. J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, W. J. Stewart, Low frequency plasmons in thin-wire structures, J. Phys.: Condens. Matter, 10 (1998) 4785.
6. J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, W. J. Stewart, Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 47 (1999) 2075.
7. I. Y. Tamm, Electrodynamics of an anisotropic medium in the special theory of relativity, J. Russ. Phys. Chem. Soc., 56 (1924) 248.
8. I. Y. Tamm, Crystal-optics of the theory of relativity pertinent to the geometry of a biquadratic form, J. Russ. Phys. Chem. Soc., 57 (1925) 1.
9. L. S. Dolin, On a possibility of comparing three-dimensional electromagnetic systems with inhomogeneous filling, Izv. Vyssh.Uchebn. Zaved., Radiofiz., 4 (1961) 964.
10. M. Lax, D. F. Nelson, Maxwell equations in material form, Phys. Rev. B, 13 (1976) 1777.
11. [11] J. B. Pendry, D. Schurig, D. R. Smith, Controlling Electromagnetic Fields, Science 312 (2006) 1780.
12. D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice, S. A. Cummer, J. B. Pendry, A. F. Starr, D. R. Smith, Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies, Science, 314 (2006) 977.
13. M. Rahm, D. Schurig, D. A. Roberts, S. A. Cummer, D. R. Smith, Design of Electromagnetic Cloaks and Concentrators Using Form-Invariant Coordinate Transformations of Maxwell's Equations, Photonics Nanostruc. Fundam. Appl., 6 (2008) 87.
14. H. Ma, S. B. Qu, Z. Xu, J. Q. Zhang, B. W. Chen, J. F. Wang, Material parameter equation for elliptical cylindrical cloaks, Phys. Rev. A, 77 (2008) 013825.
15. W. Yan, M. Yan, Z. Ruan, M. Qiu, Coordinate transformations make perfect invisibility cloaks with arbitrary shape, New J. Phys., 10 (2006) 043040.
16. W. X. Jiang, J. Y. Chin, Z. Li, Q. Cheng, R. Liu, T. J. Cui, Analytical design of conformally invisible cloaks for arbitrarily shaped objects, Phys. Rev. E, 77 (2008) 066607.
17. F. Nicolet, F. Zolla, S. Guenneau, Electromagnetic analysis of cylindrical cloaks of an arbitrary cross section, Opt. Lett., 33 (2008) 1584.

Numerical Simulation of Metamaterials with Arbitrary Shapes for Camouflage Applications

D. Majidi¹

Abstract

Metamaterials are artificial composites that acquire their electromagnetic properties from embedded subwavelength metallic structures. In theory, the effective electromagnetic properties of metamaterials at any frequency can be engineered to take on arbitrary values, including those not appearing in nature. As a result, this new class of materials can dramatically add a degree of freedom to the control of electromagnetic waves and open new vistas in military camouflage and offer the possibility of target's perfect cloaking. In this paper, we firstly introduce active and passive metamaterials and then we simulate them with arbitrary shapes.

Key Words: *Metamaterials, Camouflage, Cloaking, Simulation, Electromagnetic Pulse*

1- Department of Camouflage and Concealment, MalekAshtar University (d.majidi@lycos.com)