

نهان‌ساز گمراه کننده با قابلیت ایجاد تصویر مجازی در هر نقطه‌ی دلخواه از فضا

مسعود حبیبی فر^۱

علی عبدالعالی^۲

چکیده

در این مقاله پوشش نهان‌ساز گمراه کننده‌ای ارائه شده است که جسم را در محل خودش نامرئی کرده و تصویری مجازی و بزرگتر از جسم، و در نقطه‌ای دلخواه از فضا ایجاد می‌کند. پوشش مذکور علاوه بر جابجا کردن تصویر جسم به صورت شعاعی، می‌تواند تصویر مجازی را با هر زاویه‌ی دلخواهی حول جسم بچرخاند. این پوشش ترکیبی از دو لایه‌ی جابجا کننده و چرخاننده می‌باشد که حول جسم قرار می‌گیرند. لایه‌ی جابجا کننده سبب می‌شود که تصویر مجازی در فاصله‌ای دورتر از جسم ایجاد شود، و لایه‌ی چرخاننده قادر است این تصویر را با زاویه‌ی دلخواه بچرخاند.

کلید واژه

نهان‌ساز گمراه کننده، جابجا کننده‌ی تصویر، چرخاننده‌ی میدان، تصویر مجازی

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد برق، دانشگاه علم و صنعت ایران habibifar@elec.iust.ac.ir

^۲ استادیار دانشکده برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

تاریخ پذیرش: ۱۵ تیر ۱۳۹۱

تاریخ دریافت: ۲۰ اردیبهشت ۱۳۹۱

نامرئی کردن یک جسم در مقابل امواج الکترومغناطیسی موضوعی است که در دهه‌ی اخیر توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. برای نامرئی‌سازی باید سطح مقطع راداری جسم تا حد امکان کاهش یابد. یکی از روش‌های نامرئی‌سازی، روشی است که آلو^۳ و انقطاع^۴ بر مبنای مواد پلازما ارائه کرده اند و قادر است سطح مقطع راداری را به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد [۱،۲]. اما ایده‌آل‌ترین روش نامرئی‌سازی که تاکنون مطرح شده، روشی است که پندری^۵ بر مبنای معادلات ماکسول و با استفاده از روش انتقال مختصات ارائه کرد [۳] و به عنوان مبنای روش‌های نامرئی‌سازی قرار گرفت [۴-۷]، چرا که در این روش امواج الکترومغناطیسی دیگر قادر نیستند به درون هسته‌ی نهان‌ساز نفوذ کنند و به این ترتیب، جسمی که در این ناحیه قرار گرفته باشد، بدون توجه به جنس و ابعادش، به طور کامل از دید امواج محفوظ می‌ماند. با گسترش مطالعات بر روی این موضوع ایده‌های جدیدی مطرح شد که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به نهان‌ساز جابجا کننده و چرخاننده‌ی میدان الکترومغناطیسی اشاره کرد. اساس عملکرد نهان‌ساز جابجا کننده این است که تصویر جسم پوشش داده شده در محل واقعی جسم قرار نگیرد؛ بلکه تصویر، در فاصله‌ای دورتر نسبت به مکان واقعی ایجاد گردد [۸]. در نتیجه ناظر بیرونی همراه شده و مکان واقعی جسم را تشخیص نمی‌دهد [۹-۱۲]. اما با استفاده از آن فقط می‌توان تصویر را به صورت شعاعی جا به جا کرد. اساس عملکرد چرخاننده‌ی میدان نیز بر مبنای تبدیل مختصات زاویه‌ای می‌باشد که با استفاده از آن می‌توان جهت انتشار میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی را درون هسته‌ی نهان‌ساز چرخاند [۷، ۱۳، ۱۴]. برای چرخاننده‌ی میدان تا کنون کاربرد نهان‌سازی مطرح نشده است و تنها قابلیتی که برای آن ذکر شده، همان تغییر جهت انتشار میدان‌ها می‌باشد.

در این مقاله با استفاده از ترکیب این دو پوشش، قابلیت جدیدی ارائه شده است که با استفاده از آن می‌توان تصویر مجازی ایجاد شده توسط جابجا کننده را، با هر زاویه‌ی دلخواه، حول جسم چرخاند. به این ترتیب دیگر تغییر مکان تصویر لزوماً شعاعی نخواهد بود و می‌توان مختصات آن را در فضای اطراف جسم کنترل کرده و در نقطه‌ی مورد نظر قرار داد. بزرگترین مزیت ایجاد یک

Alu^۳Engheta^۴Pendry^۵

تصویر مجازی از جسم تحت پوشش نسبت به پنهان ساختن آن، این است که دیگر مهم نیست پنهان سازی در عمل به صورت ایده آل صورت گرفته باشد. زمانی که از پوشش های پنهان ساز استفاده می شود، اگر در عمل پنهان سازی به صورت ایده آل صورت نپذیرد، جسم تحت پوشش ممکن است رؤیت شده و مورد اصابت قرار گیرد. اما با استفاده از این پنهان ساز بدون نیاز به نامرئی کردن جسم، می توان ناظر را گمراه کرد. به این ترتیب ناظر تصور می کند که هدف را می بیند، اما هرچه تلاش کند قادر نخواهد بود آن را مورد اصابت قرار دهد. زیرا مکان و ابعاد واقعی هدف متفاوت از آن مشخصاتی است که به ناظر ارائه می شود.

نهان ساز جابجا کننده

با استفاده از یک نهان ساز جابجا کننده می توان تصویری مجازی از جسم ایجاد کرد که ناظر بیرونی را گمراه می کند. در ساختار یک نهان ساز کروی، اگر بخواهیم ناحیه ی $0 < r < R_2$ را به درون ناحیه ی $R_1 < r < R_2$ انتقال دهیم، به گونه ای که $R_1 < R_2$ بوده و بخش $0 < r < R_1$ از فضا نامرئی شود، باید انتقال مختصات شعاعی به صورت $r' = f(r)$ داشته باشیم. تابع تبدیل انتخاب شده باید شرایط زیر را ارضا کند.

$$f(R_1) = 0, \quad f(R_2) = R_2 \quad (1)$$

با استفاده از روابط انتقال مختصات می توان مقادیر ضرایب گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی نسبی را به صورت زیر به دست آورد:

$$\epsilon_r = \mu_r = \frac{f^2(r)}{r^2 f'(r)}, \quad \epsilon_\theta = \mu_\theta = \epsilon_\phi = \mu_\phi = f'(r) \quad (2)$$

اگر تابع تبدیل انتخاب شده به صورت چند جمله ای باشد، مقادیر ϵ و μ دارای نقاط تکین بوده و به شدت ناهمسانگرد می باشند. برای از بین بردن ناهمسانگردی می توان به صورت زیر عمل کرد:

$$\epsilon_r = \mu_r = \epsilon_\theta = \mu_\theta = \epsilon_\phi = \mu_\phi \Rightarrow \frac{f^2(r)}{r^2 f'(r)} = f'(r) \Rightarrow f(r) = \pm r f'(r) \quad (3)$$

حال اگر برای ناحیه ی $0 < r < R_1$ ، مقدار مثبت و برای ناحیه ی $R_1 < r < R_2$ مقدار منفی را در نظر بگیریم خواهیم داشت:

$$\begin{cases} 0 < r < R_1 & f_1(r) = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2 r \\ R_1 < r < R_2 & f_2(r) = \frac{R_2^2}{r} \end{cases} \quad (۴)$$

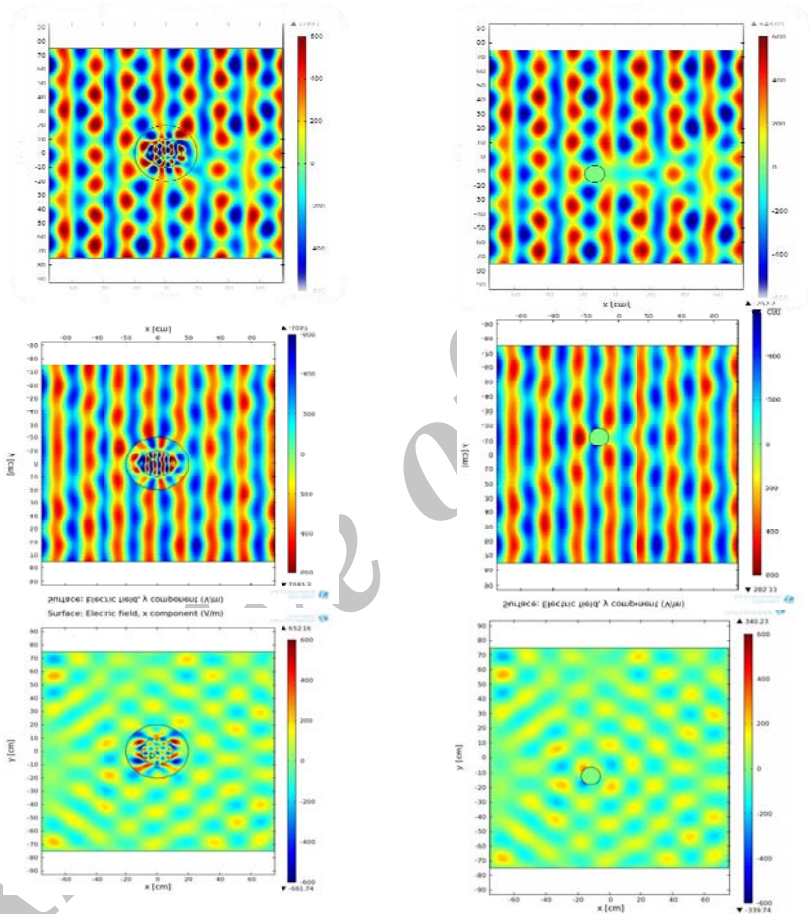
بنابراین مقادیر ضرایب گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی نسبی به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\begin{cases} 0 < r < R_1 & \varepsilon_r = \mu_r = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2 \\ R_1 < r < R_2 & \varepsilon_r = \mu_r = -\left(\frac{R_2}{r}\right)^2 \end{cases} \quad (۵)$$

همان طور که ملاحظه می‌شود، با استفاده از تابع تبدیل مذکور، پروفایل نهان‌ساز به صورت همسانگرد به دست آمده و دیگر شامل نقاط تکین نمی‌شود. اما بزرگترین ویژگی چنین تبدیلی این است که اگر جسمی در ناحیه‌ی داخلی نهان‌ساز قرار بگیرد، پس از برخورد موج تابشی به مجموعه‌ی جسم و نهان‌ساز، در اثر رزونانس بین نواحی داخلی و خارجی، تصویری مجازی و در ناحیه‌ی دورتر از جسم تشکیل می‌شود. توجه علمی این موضوع با استفاده از تئوری پراکندگی "می" و تعریف توابع پتانسیل ϕ_{TM} و ϕ_{TE} صورت می‌پذیرد [۸]. از ویژگی‌های تصویر مجازی این است که با توجه به نسبت R_2/R_1 ، اگر جسم مورد نظر کره‌ای به شعاع R_s بوده و در مکان \vec{r}_0 نسبت به مرکز نهان‌ساز قرار داشته باشد، تصویر مجازی که از آن ایجاد می‌شود کره‌ای به شعاع $(R_2/R_1)^2 R_s$ بوده و در مکان $(R_2/R_1)^2 \vec{r}_0$ نسبت به مرکز نهان‌ساز قرار خواهد داشت. اگر $R_1 = 10\text{cm}$ و $R_2 = 20\text{cm}$ انتخاب شوند، تصویر کره‌ای فلزی به شعاع $R_s = 1.5\text{cm}$ که در $(-3\text{cm}, -3\text{cm})$ قرار گرفته است معادل تصویر کره‌ای فلزی به شعاع $R_s = 4 \times 1.5\text{cm}$ می‌شود که در مکان $(-12\text{cm}, -12\text{cm})$ قرار گرفته باشد. این موضوع در شکل (۱) که از طریق شبیه‌سازی در نرم‌افزار کامسول^۷ به دست آمده نمایش داده شده است. در این شکل موج تابشی $\vec{E} = E_0 \hat{y}$ در جهت $+\hat{x}$ و با فرکانس 1.5GHz به ساختار برخورد می‌کند. در ستون چپ شکل (۱) کره‌ی فلزی پوشش داده شده با جابجا کننده، و در ستون راست شکل (۱) کره‌ی فلزی بزرگتر که در ناحیه‌ی دورتر نسبت به کره‌ی تحت پوشش قرار دارد نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می

Mie scattering theory^۶COMSOL^۷

شود الگوی پراکندگی میدان الکتریکی E_x و E_y برای این دو جسم یکسان است. این امر بیانگر آن است که تصویر جسمی که تحت پوشش نهان ساز جابجا کننده قرار می گیرد، به صورتی بزرگتر و در مکانی دورتر از آن تشکیل می گردد.



شکل ۱. الگوی پراکندگی میدان الکتریکی E_x ، E_y و E_z . ستون چپ: کره ی فلزی پوشش داده شده با $R_s = 1.5\text{cm}$ و در مکان $(-3\text{cm}, -3\text{cm})$ و ستون راست: کره ی فلزی تنها با $R_s = 6\text{cm}$ و در مکان $(-12\text{cm}, -12\text{cm})$. سطر اول E_z ، سطر دوم E_y و سطر سوم E_x را نشان می دهد.

چرخانده‌ی میدان

چرخانده‌ی میدان می‌تواند جهت انتشار موج را در ناحیه‌ی تحت پوشش با زاویه‌ی دلخواهی بچرخاند. فرض کنید انتقال مختصاتی کروی و به صورت زیر داشته باشیم: [۷]

$$r' = r, \quad \theta' = \theta, \quad \varphi' = \varphi + g(r), \quad \begin{cases} g(R_1) = \varphi_0 \\ g(R_2) = 0 \end{cases} \quad (۶)$$

در این صورت مقادیر ضرایب گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی نسبی به شکل زیر به دست می‌آیند:

(۷)

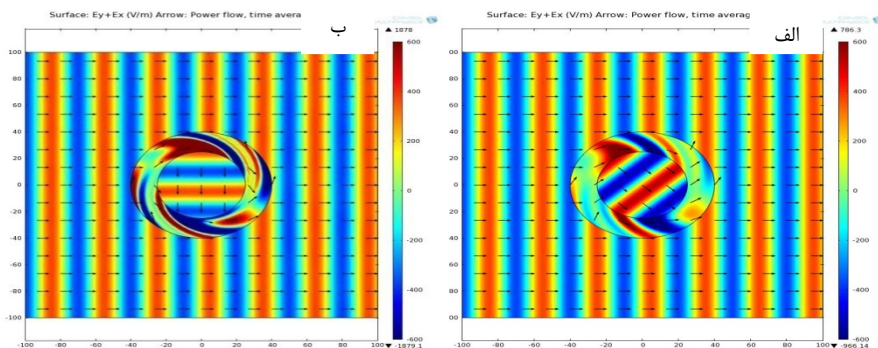
$$\Lambda = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \alpha & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \varepsilon = \frac{1}{\det(\Lambda)} \Lambda^{-1} \varepsilon_0 (\Lambda^{-1})^T, \quad \varepsilon_0 = \varepsilon_0 I \Rightarrow \varepsilon_r = \mu_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\alpha & 0 & 1 + \alpha^2 \end{bmatrix}$$

برای داشتن چرخش ایده‌آل باید میدان در مرز خارجی پوشش با محیط خارج تطبیق داشته باشد و زاویه‌ی φ از مرز R_2 تا رسیدن به مرز R_1 به میزان φ_0 تغییر پیدا کند. بنابراین جهت موج انتشاری در صفحه‌ی $x-y$ به اندازه‌ی φ_0 چرخش پیدا خواهد کرد. در نتیجه تابع $g(r)$ باید به گونه‌ای انتخاب شود که شرایط مذکور را برآورده کرده و پروفایلی تا حد امکان ساده را به دست دهد. طبق آنچه در [۷] آمده تابع تبدیل به صورت زیر انتخاب می‌شود:

(۸)

$$g(r) = \varphi_0 \left[\frac{\ln(r) - \ln(R_2)}{\ln(R_1) - \ln(R_2)} \right]$$

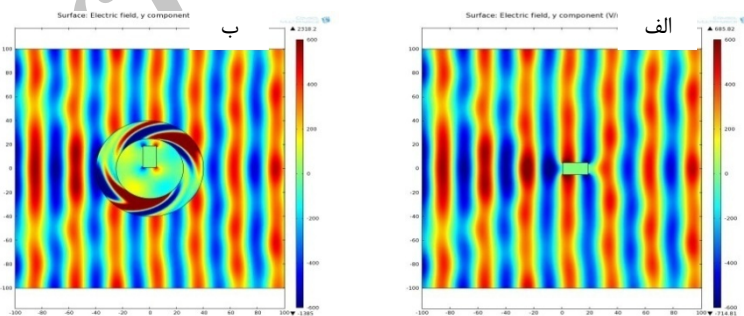
در شکل (۲) چرخش جهت انتشار و چرخش پلاریزاسیون موج تابشی داخل چرخانده به خوبی مشاهده می‌شود. در شکل (۲-الف) مقدار $\varphi_0 = \pi/4$ و در شکل (۲-ب) مقدار $\varphi_0 = \pi/2$ انتخاب شده است. در این شکل موج تابشی $\vec{E} = E_0 \hat{y}$ در جهت $+\hat{x}$ به ساختار چرخانده برخورد می‌کند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با انتخاب $\varphi_0 = \pi/2$ ، در ناحیه‌ی داخل چرخانده موج الکتریکی به اندازه‌ی $\pi/2$ می‌چرخد. این چرخش هم در جهت انتشار موج و هم در پلاریزاسیون آن مشاهده می‌شود. یعنی در ناحیه‌ی داخل پوشش موج الکتریکی $\vec{E} = E_0 \hat{x}$ داریم که در جهت $-\hat{y}$ منتشر می‌شود.



شکل ۲. چرخش جهت انتشار و پلاریزاسیون با استفاده از پوشش چرخاننده؛ الف) $\varphi_0 = \pi/4$. ب) $\varphi_0 = \pi/2$

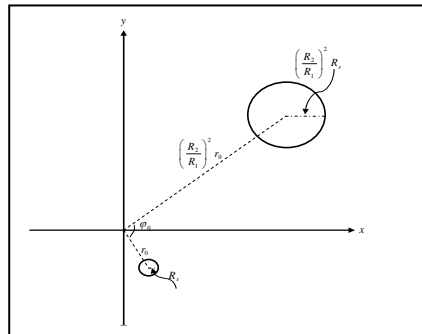
با توجه به آنچه در [۱۴] آمده است، اگر مکان یک جسم به اندازه φ_0 بچرخد، با استفاده از یک لایه ی چرخاننده با زاویه چرخش φ_0 ، می توان به نوعی این جابجایی را جبران کرد. یعنی الگوی پراکندگی میدان برای جسم در مکان اولیه، با الگوی پراکندگی جسم چرخانده شده ی تحت پوشش، یکسان خواهد بود شکل (۳).

در این شکل زاویه ی $\varphi_0 = \pi/2$ انتخاب شده است. به بیانی دیگر می توان گفت تصویر جسمی که درون چرخاننده و در مکان (r_0, φ) قرار دارد، در جایی دیگر با مختصات $(r_0, \varphi + \varphi_0)$ به نظر می رسد.



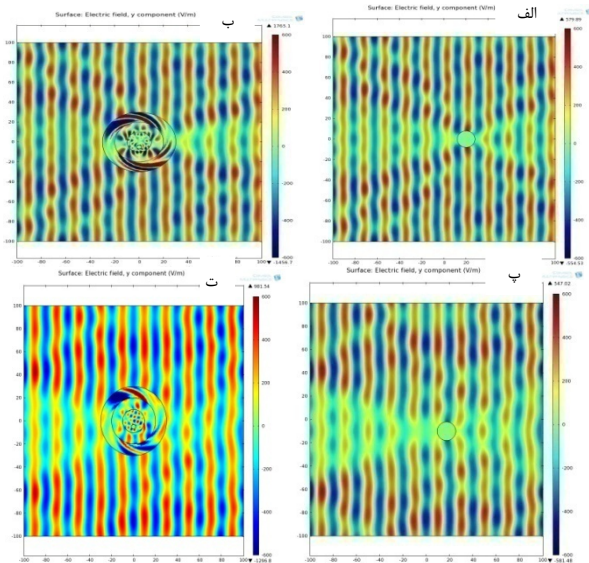
شکل ۳. یکسان بودن الگوی پراکندگی ؛ الف) جسم فلزی تنها در مکان $(r_0, 0)$. ب) جسم فلزی تحت پوشش چرخاننده با $\varphi_0 = \pi/2$ و در مکان $(r_0, \pi/2)$

همان طور که ملاحظه می‌شود، پوشش چرخاننده کاربرد نهان‌سازی یا گمراه‌کنندگی ندارد. زیرا برای ناظر بیرونی، اهمیتی ندارد که جسم داخل پوشش چرخیده باشد. اما قابلیت جدیدی که در این مقاله ارائه شده است، استفاده‌ی همزمان از دو پوشش جابجا کننده و چرخاننده می‌باشد. وجود لایه‌ی چرخاننده می‌تواند سبب چرخش تصویر مجازی گردد. یعنی با استفاده‌ی توأم از این دو پوشش می‌توان تصویر مجازی جسم را در هر نقطه‌ی دلخواهی از فضا قرار داد. تعیین فاصله‌ی تصویر مجازی از مبدأ، و اندازه‌ی بزرگنمایی با استفاده از نسبت $(R_2/R_1)^2$ در لایه‌ی جابجا کننده، و تعیین زاویه‌ی آن در صفحه‌ی $x-y$ با استفاده از پارامتر φ_0 در لایه‌ی چرخاننده صورت می‌پذیرد (شکل ۴).



شکل ۴. نحوه‌ی تعیین مکان تصویر مجازی در فضا

نتایج شبیه‌سازی آنچه که گفته شد در شکل (۵) آمده است. در این شکل برای پوشش جابجا کننده مقادیر $R_2 = 20\text{cm}$ و $R_1 = 10\text{cm}$ در نظر گرفته شده است. برای پوشش چرخاننده نیز که بلافاصله بعد از آن قرار گرفته است، در سطر بالا $\varphi_0 = \pi/2$ و در سطر پایین $\varphi_0 = \pi/3$ و ضخامت 10cm منظور شده است. جسم تحت پوشش، کره‌ای فلزی با شعاع $R_s = 2\text{cm}$ می‌باشد که مرکز آن در مکان $(r_0, \varphi) = (5\text{cm}, 0)$ قرار دارد. همان‌طور که دیده می‌شود، در سطر بالا الگوی پراکندگی میدان مانند حالتی است که کره‌ای فلزی با شعاع $R'_s = 4 \times 2 = 8\text{cm}$ در مکان $(r'_0, \varphi') = (20\text{cm}, \pi/2)$ قرار گرفته باشد و در سطر پایین الگوی پراکندگی میدان مانند حالتی است که کره‌ای فلزی با شعاع $R'_s = 4 \times 2 = 8\text{cm}$ در مکان $(r'_0, \varphi') = (20\text{cm}, \pi/3)$ قرار گرفته باشد. یعنی در واقعیت کره‌ی کوچکتر در فضا قرار دارد، اما ناظر بیرونی به اشتباه تصور می‌کند که کره‌ای بزرگتر و در مکانی دیگر در فضا وجود دارد.



شکل ۵. ایجاد تصویر مجازی از جسم تحت پوشش در نقطه‌ی دلخواه از فضا. الف) کره‌ای فلزی با شعاع

$$R_s = 2\text{cm} \text{ در مکان } (r'_0, \varphi') = (20\text{cm}, \pi/2),$$

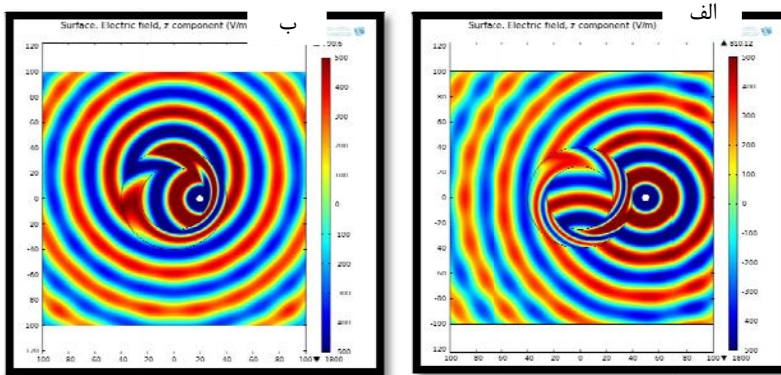
ب) کره‌ای فلزی با شعاع $R_s = 2\text{cm}$ در مکان $(r_0, \varphi) = (5\text{cm}, 0)$ و تحت پوشش گمراه کننده با پارامتر بزرگنمایی

۴ و زاویه چرخش $\varphi_0 = \pi/2$ پ) کره‌ای فلزی با شعاع $R_s = 4 \times 2 = 8\text{cm}$ در مکان $(r'_0, \varphi') = (20\text{cm}, \pi/3)$

ت) کره‌ای فلزی با شعاع $R_s = 2\text{cm}$ در مکان $(r_0, \varphi) = (5\text{cm}, 0)$ و تحت پوشش گمراه کننده با پارامتر بزرگنمایی

$$\varphi_0 = \pi/3 \text{ و زاویه چرخش}$$

البته باید دقت داشت که تصویر ایجاد شده توسط جا به جا کننده، خارج از فضای چرخاننده قرار نگیرد. یعنی حتماً مقدار $(R_2/R_1)^2 r_0$ باید کوچکتر از شعاع خارجی لایه ی چرخاننده باشد. زیرا در غیر این صورت عملکرد لایه‌ی چرخاننده مطلوب نبوده و نمی‌تواند چرخش مطلوب را به دست دهد. برای تبیین این موضوع طبق آنچه در شبیه‌سازی شکل (۶) آمده، یک منبع جریان $J_0 \hat{z}$ یک بار در ناحیه‌ی داخل چرخاننده، (شکل ۶-ب) و یک بار خارج از آن قرار گرفته است (شکل ۶-الف). همان طور که ملاحظه می‌شود اگر منبع خارج از چرخاننده باشد برآیند چرخش‌های موج ورودی و خروجی به گونه‌ای است که در الگوی پراکندگی کلی، چرخشی ایجاد نمی‌شود. به بیان دیگر اگر منبع (پراکنده‌گر) داخل چرخاننده باشد، مانند آن است که یک منبع (پراکنده‌گر) تنها، و در مکان دیگری که دوران یافته‌ی مکان واقعی است قرار داشته باشد. اما اگر منبع (پراکنده‌گر) خارج از چرخاننده باشد، تفاوتی با منبع (پراکنده‌گر) تنها نخواهد داشت.



شکل ۶. منبع جریان در حضور چرخانده‌ی میدان. الف) منبع جریان خارج از چرخانده، ب) منبع جریان داخل چرخانده

همان‌طور که ملاحظه می‌شود با انتخاب زاویه‌ی چرخش $\varphi_0 = \pi/2$ ، میدان ناشی از منبع جریان واقع در $(x, y) = (20\text{cm}, 0)$ که داخل چرخانده قرار گرفته است مانند میدان ناشی از منبع تنها و قرار گرفته در $(x, y) = (0, 20\text{cm})$ می‌باشد، در حالی که اگر منبع خارج از چرخانده باشد تغییری حاصل نمی‌شود.

نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا دو پوشش جابجا کننده‌ی الگوی پراکندگی میدان و چرخانده‌ی میدان و چگونگی عملکرد آنها مورد بررسی قرار گرفت و نتایج شبیه‌سازی‌ها برای این دو پوشش ارائه گردید. سپس با استفاده از ترکیب این دو ایده‌ی موجود، قابلیت جدیدی ارائه گردید که می‌توان بر اساس آن نهان‌ساز گمراه کننده‌ای طراحی کرد که قابلیت ایجاد تصویر مجازی از جسم تحت پوشش را، در هر نقطه‌ی دلخواه از فضا داراست. با استفاده از این نهان‌ساز جدید می‌توان ناظر بیرونی را در تشخیص مکان و ابعاد واقعی جسم تحت پوشش، به اشتباه انداخت. نتایج شبیه‌سازی‌های ارائه شده نیز به خوبی این مطلب را تأیید می‌کردند.

- [1] A. Alu and N. Engheta, "Achieving Transparency with Plasmonic and Metamaterial Coating," *Phys.Rev.E*, (2005), vol. 72, p. 016623.
- [2] A. Alu and N. Engheta, "Multifrequency Optical Invisibility Cloak with Layered Plasmoni Shells," *phys.Rev.Lett*, (2008), vol. 100, p. 113901.
- [3] J. B. Pendry, D. Schurig, and D. R. Smith, "Controlling Electromagnetic Fields," *Science*, (2006), vol. 312, p. 17801782.
- [4] D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice, S. A. Cummer, J. B. Pendry, A. F. Starr, and D. R. Smith, "Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies," *Science*, (2006), p.1133628.
- [5] S. A. Cummer, B. Popa, D. Schurig, and D. R. Smith, "Full-wave Simulations of Electromagnetic Cloaking Structures," *Phys.Rev.E*, (2006), vol. 036621.
- [6] N. B. Kundtz, D. R. Smith, and J. B. Pendry, "Electromagnetic Design with Transformation Optics," *IEEE*, (2011), vol. 99, p.1622.
- [7] Y. Luo, H. Chen, J. Zhang, L. Ran, and J. A. Kong, "Design and Analytical Full-wave Validation of the Invisibility Cloaks, Concentrators, and Field Rotators Created With a General Class of Transformations," *Phys.Rev.B*, (2008), vol 77, p. 125127.
- [8] Y. Luo, J. J. Zhang, and H. S. Chen, "Wave and Ray Analysis of a Type of Cloak Exhibiting Magnified and Shifted Scattering Effect," *PIER*, (2009), vol. 95, p. 167.
- [9] Y. Lai, J. Ng, H. Y. Chen, D. Han, J. J. Xiao, Zh. Zhang, and C. T. Chan, "Illusion Optics: The Optical Transformation of an Object into Another Object," *Phys.Rev.Lett*, (2009), vol. 102, p. 253902.
- [10] W. Li, J. Guan, Zh. Sun, and W. Wang, "Shifting Cloak Constructed with Homogeneous Materials," *Elsevier*, (2010), vol. 50, p. 607.
- [11] Y. Lai, H. Chen, Zh. Zhang, and C. T. Chan, "Complementary Media Invisibility Cloak that Cloaks Objects at a Distance Outside the Cloaking Shell," *Phys.Rev.Lett*, (2009), vol. 102, p. 093901.
- [12] W. Li, J. Guan, W. Wang, Zh. Sun, and Z. Fu, "A General Cloak to Shift the Scattering of Different Objects," *Appl. Phys*, (2010), vol. 43, p. 245102.
- [13] M. Kadic, S. Guenneau, and S. Enoch, "Transformational Plasmonics: Cloak, Concentrator and Rotator for SPPs," *Optics Express*, (2010), Vol. 18, No. 11, p. 12027.
- [14] H. Chen, and C. T. Chan, "Transformation Media that Rotate Electromagnetic Fields," *Appl. Phys. Lett*, (2007), vol. 90, p. 241105.