

نامرئی سازی پهن باند برای اجسام با شکلهای متنوع با استفاده از شبکه خط انتقال و فراماده

محمد دانایی فرا^۱

منوچهر کامیاب^۲، امیر جعفر قلی^۳

چکیده

در این مقاله روش استفاده از خطوط انتقال و ساختارهای فراماده برای نهان سازی ارائه شده است. خطوط انتقال باعث می شود که امواج الکترومغناطیس درون شبکه خط انتقال اطراف شیء کوپل شده و بدون اینکه اسکترینگ در جهت جلو و عقب اتفاق بیافتد، از شیء عبور کند. استفاده از خطوط انتقال بدون بار، پهنای باند زیادی را برای ما فراهم می کند. با استفاده از ساختاری جدید که دارای فضایی خالی در مرکز ساختار نهان سازی است، امکان قرار گرفتن اشیاء با ابعاد بزرگ تر ایجاد شده است. با استفاده از روشی جدید، در این مقاله تلاش شده است که کیفیت نهان سازی ارتقا یابد. برای این منظور از فراماده درون ساختار استفاده شده است. این محیط با قرار دادن میله های باریک در ساختار خط انتقال ایجاد شده و پهنای باند را افزایش داده است.

کلید واژه

نهان سازی، خطوط انتقال، فراماده

۱. دانشجوی دکتری دانشکده برق دانشگاه خواجه نصیر طوسی danaeifar@kntu.ac.ir

۲. دانشیار دانشکده برق دانشگاه خواجه نصیر طوسی

۳. دانش آموخته دکتری، دانشکده برق دانشگاه خواجه نصیر طوسی
تاریخ دریافت: ۹۰/۲/۱۰ تاریخ پذیرش: ۹۰/۴/۱۵

مقدمه

شگفت‌انگیز بودن نهان‌سازی اشیاء، منجر به توسعه ساختارهای پوشش الکترومغناطیسی شده و طراحی پوشش نامرئی‌کننده الکترومغناطیسی در سالهای اخیر مورد توجه قرار گرفته است. آلوم^۱ و انقطاً^۲ با استفاده از پاشندگی بسامدی مواد پلاسمونیک، امکان بکارگیری پوشش پلاسمونیک برای کاهش انعکاس از یک یا مجموعه‌هایی از کره‌های کوچک را پیشنهاد کرده‌اند [۱,۲]. از این ایده همچنین برای پنهان کردن یک جزء به شکل همزمان در بسامدهای متفاوت در ناحیه نوری استفاده میشود [۳]. روش‌های دیگر مبتنی بر تبدیل مختصات فضایی معادلات ماکسول است که توسط پندری^۳ ارائه شد [۴]. در این روش پوششی کروی یا استوانه‌هایی با گرادیان فضایی و پارامترهای ماده نامتقارن مورد توجه است که می‌تواند موج ورودی را خم کند و بدون این که آن را دچار آشفستگی سازد، درون ناحیه پوشش هدایت نماید. پندری ساختاری پیشنهاد کرد که در آن میدان‌های الکترومغناطیسی اطراف شیء به درون آن هدایت می‌شوند [۴]. ساختار پوشش پیشنهاد شده به ماده ایی ناهمگن و نامتقارن احتیاج دارد که هر دو پارامتر ((پذیرندگی)) و ((گذردهی)) به شکل مستقل کنترل می‌شوند و به صورت شعاعی وابستگی دارند. برای پیاده‌سازی چنین شرایطی باید از مواد غیر طبیعی مثل فراماده‌ها و یا مواد پلاسمونیکی استفاده کرد. در عمل وجود پاشندگی در فراماده اجتناب‌ناپذیر است و در نتیجه باند محدود می‌شود. دو اشکال ((محدود بودن پهنای باند)) و ((دشواری پیاده‌سازی ماده با شرایط دلخواه))، روش‌های دیگر را برای نهان‌سازی ایجاب می‌کند. [۵] برای حل این مشکل، استفاده از ساختار خط انتقال بدون بار را برای شبکه‌ای از میله‌ها در بسامد میکروویو پیشنهاد نمود و [۶] استفاده از خطوط انتقال بار شده را برای پیاده‌سازی محیط نهان‌سازی در بسامد VHF ارائه نمود. مزیت روش ارائه شده در افزایش پهنای باند می‌باشد و نقطه ضعف این روش محدود بودن آن به استفاده از اشیاء با شکل میله است که کاربردی بودن این روش را زیر سوال می‌برد. در این مقاله با استفاده از ساختارهای خط انتقال روشی پیشنهاد می‌شود تا محدودیت اشیاء نهان‌سازی شده برطرف شود و در ضمن خواص روش ارائه شده از قبیل پهنای باند بالا، حفظ گردد.

در این مقاله، علاوه بر نامرئی‌سازی استوانه‌هایی با شعاع بزرگ، یک روش جدید برای افزایش پهنای باند عملیاتی در ساختار نهان‌سازی با شبکه خط انتقال ارائه شده است. بررسی‌های متعدد نشان می‌دهد

-
1. Alu
 2. Engheta
 3. Pendry

که خط انتقال با دی الکتریکی که دارای ضریب گذردهی نسبی زیر یک است، پهنای باند را افزایش می دهد. برای این منظور، آرایه هایی از سیم های موازی برای پیاده سازی این ماده مورد استفاده قرار گرفت. از نرم افزار CST Microwave Studio نیز برای شبیه سازی استفاده شده است.

ساختار خط انتقال استفاده شده در نهان سازی

همانطور که در مقدمه مقاله اشاره شد، روش ارائه شده توسط پندری [۴] دارای پهنای باند محدودی است و از طرفی پیاده سازی آن بسیار مشکل است. گروه آلیتالول [۵] روشی ارائه می کند که دارای پهنای باند بزرگی است و پیاده سازی آن نسبت به روش پندری [۴] ساده تر است. البته مشکل این روش محدود بودن اشیا نهان سازی شده است که فقط میله های فلزی را شامل می شود. در این بخش ساختار خط انتقال تشکیل دهنده نهان سازی را بررسی می کنیم و سپس نحوه بکارگیری آنها و شبیه سازی های مربوطه را در بخش های بعد ارائه می دهیم.

شبکه خط انتقال بار شده از یک خط انتقال به همراه سلف و خازن به عنوان بارهای شبکه تشکیل می شود. وجود سلف و خازن باعث می شود که به دلیل رزنانس بوجود آمده، پهنای باند کاهش پیدا کند. لذا سلف و خازن را از این ساختار حذف می کنیم و از خطوط انتقال بدون بار استفاده می نماییم.

در حالتی که سلف و خازن از این شبکه حذف شوند، شبکه بدون بار بدست می آید. از میان خطوط انتقال متنوع موجود با توجه به بسامد کاری و ساختار نهان سازی در نظر گرفته شده از خطوط انتقال موازی^۱ به عنوان خط انتقال استفاده شده است. یک سلول DSPSL و پارامترهای مربوطه در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به نظر بالانیس [۱۲]، مقادیر Z_0 و k_0 با توجه به بسامد کاری و مقدار w/h قابل محاسبه است. برای حالت $h=0.825\text{mm}$ و $w=0.95\text{mm}$ در بسامد $F=4\text{GHz}$ و $\epsilon_r=1$ امپدانس و ثابت انتشار خط DSPSL بدست می آید (طول هر سلول خط انتقال را $d=4.9\text{mm}$ در نظر می گیریم). برای محاسبه ثابت انتشار با فرض اینکه انتشار در یک جهت اتفاق می افتد، از رابطه (۱) می توان بهره گرفت. امپدانس نیز از رابطه (۲) برای این ساختار قابل استخراج است [۷].

$$\cos(q_z) = -2 \frac{K_{FW}}{S_{FW}} \quad (1)$$

$$Z_0 = \frac{a_{FW} + b_{FW}e^{-jq_z} + c_{FW} + d_{FW}e^{-jq_z}}{2e_{FW} + 2f_{FW}e^{-jq_z}} \quad (2)$$

1. Double-sided parallel- strip line (DSPSL)

که در آن برای رابطه (۱)

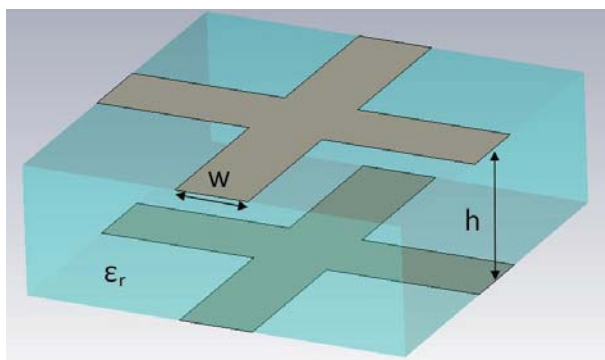
$$a_{FW} = c_{FW} = \frac{1}{A_t + D_t} \quad (۲) \quad \text{است و برای } K_{FW} = -\frac{B_t C_t - D_t A_t}{A_t + D_t} \frac{1}{B_t} - \frac{A_t}{B_t} \text{ و } S_{FW} = \frac{1}{B_t(A_t + D_t)}$$

$$f_{FW} = \frac{B_t C_t - D_t A_t}{B_t} - \frac{D_t}{B_t} \frac{B_t C_t - D_t A_t}{A_t + D_t} \text{ و } e_{FW} = \frac{D_t}{B_t} \frac{1}{A_t + D_t} \quad , \quad b_{FW} = d_{FW} = -\frac{B_t C_t - D_t A_t}{A_t + D_t} ,$$

که Z_0 و k_0 ثابت انتشار و امپدانس مشخصه شبکه DSPSL و d ابعاد سلول را نشان می دهد.

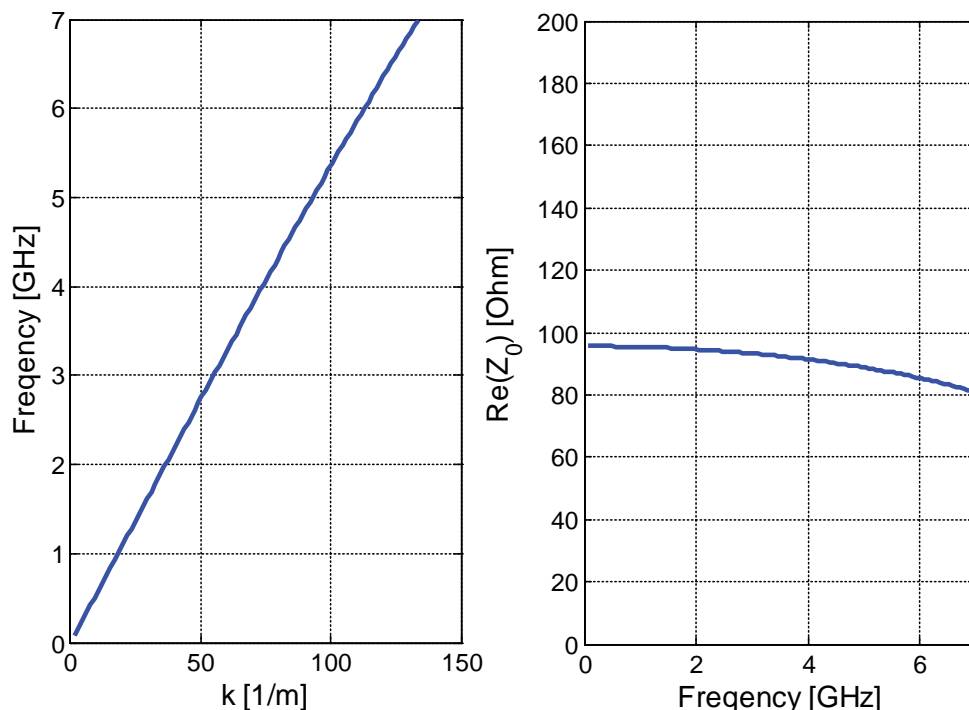
$$\begin{pmatrix} A_t & B_t \\ C_t & D_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(k_0 d / 2) & jZ_0 \sin(k_0 d / 2) \\ jZ_0^{-1} \sin(k_0 d / 2) & \cos(k_0 d / 2) \end{pmatrix} \quad (۳)$$

که Z_0 و k_0 ثابت انتشار و امپدانس مشخصه شبکه DSPSL و d ابعاد سلول را نشان می دهد.



شکل (۱) یک سلول خط انتقال موازی و پارامترهای مربوطه

باتوجه به مقادیر تعیین شده، امپدانس و ثابت انتشار برای ساختار خط انتقال DSPSL بدست می آید. ثابت انتشار و امپدانس برای مقدار ضریب گذردهی نسبی $\epsilon_r = 1$ بر حسب بسامد در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲) ثابت انتشار و امپدانس برای شبکه خط انتقال بدون بار DSPSL، برای مقدار ضریب گذردهی نسبی $\epsilon_r=1$

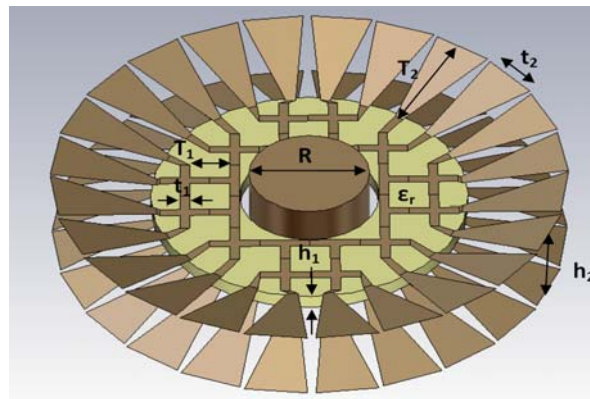
شیء استوانه ای نهان سازی شده

اخیراً، ساختاری استوانه ای شکل، متشکل از چندین لایه شبکه دو بعدی از خطوط انتقال برای نهان سازی در نظر گرفته شده است [۸،۹]. مکانیزم بکار گرفته شده در نهان سازی بر اساس خط انتقال این است که امواج الکترومغناطیس از طریق شبکه خط انتقال به شکل موثری عبور می کنند. در نتیجه، این ساختار نهان سازی تنها برای اجسامی که به اندازه کافی کوچک هستند بکار می رود تا بتوان این اجسام را درون ساختار تعبیه کرد [۹]. این اشکال محدودیت های زیادی را بر کاربردهای عملی تحمیل می کند.

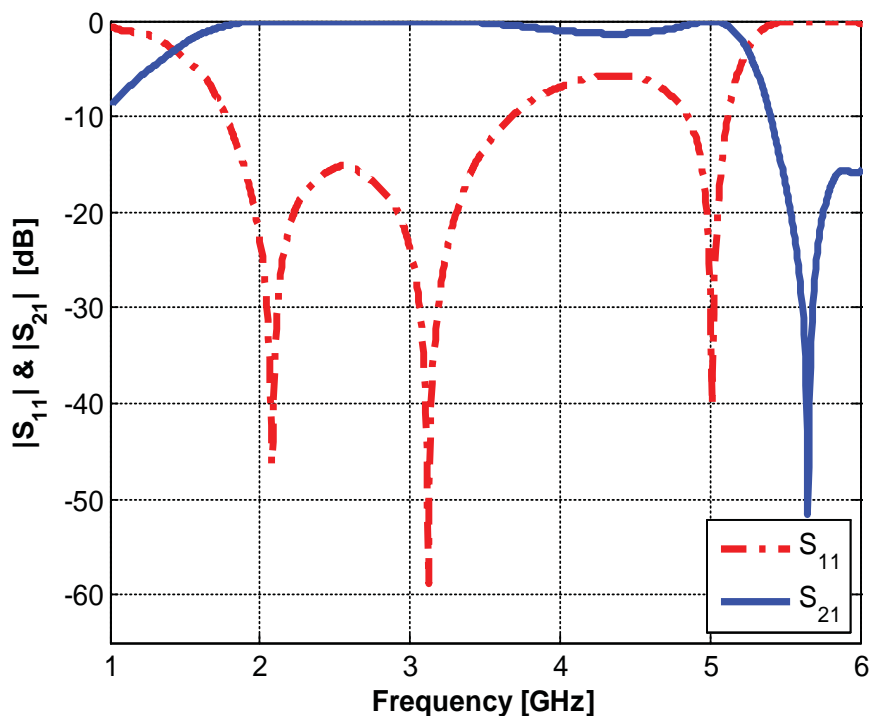
برای توسعه روش فوق در شکل ها و ابعاد متنوع تر از روش زیر استفاده می کنیم تا هم مزیت پهنای باند زیاد ساختار خط انتقال بدون بار را داشته باشیم و هم بتوانیم شکل هائی با ابعاد بزرگتر را نهان سازی کنیم. برای رسیدن به این هدف در ساختار پیشنهاد شده در نظریه گروه آلیتالول [۹] تغییراتی اعمال می کنیم. تعداد کمی از سلول های مرکزی ساختار را جدا سازی و فضایی را جهت قرار دادن

یک شیء استوانه ای در مرکز فراهم می کنیم. شکل ۳ یک دیسک از این ساختار استوانه ای را نشان می دهد. در این ساختار تعدادی سلول خط انتقال به یکدیگر متصل شده و شبکه ای از این خطوط را پدید می آورند. ابعاد و نحوه قرار گرفتن این سلولها نیز در شکل نشان داده شده است. در این ساختار شیء نهان سازی شده در فضایی استوانه ایی با قطر 12 mm قرار می گیرد. برای تطبیق در این روش، همان طور که در شکل ۳ مشاهده می کنید، از خطوط تیره شده استفاده می کنیم. هنگامی که امواج الکترومغناطیس به شبکه می رسند از طریق transition layers (با $h=4.14\text{mm}$ و $w=6.17\text{mm}$ ، و طول $L=10.54\text{mm}$) به داخل شبکه کوپل شده و با عبور از درون شبکه از طریق transition layers مقابل به مد انتشاری تبدیل می شوند. در این حالت میزان اسکترینگ به شدت کاهش پیدا می کند. با توجه به جهت موج تابیده شده، اگر ساختار را در جهت Z توسعه دهیم؛ در میزان اسکترینگ تفاوتی بوجود نمی آید. لازم به ذکر است که امواج تابیده شده از نوع موج تخت (TEM) هستند و شرایط مرزی به گونه ای انتخاب شده است که دو موج H_x و E_z به درون ساختار کوپل شود.

در این حالت امواج کوپل شده به ساختار با میزان خطایی قابل قبول از اطراف شیء عبور می کنند. شکل ۴ ضرایب انعکاسی و عبوری را برای استوانه با $\epsilon_r=1$ در این ساختار نشان می دهد. همان طور که در شکل مشاهده می شود، ضریب انعکاس، S_{11} ، در بازه بسامدی گسترده ای در مقایسه با ضریب عبور، S_{21} ، دارای مقدار کوچکی است. این مقادیر برای ضرایب اسکترینگ نشان دهنده نهان سازی در باند وسیعی از بسامد است.



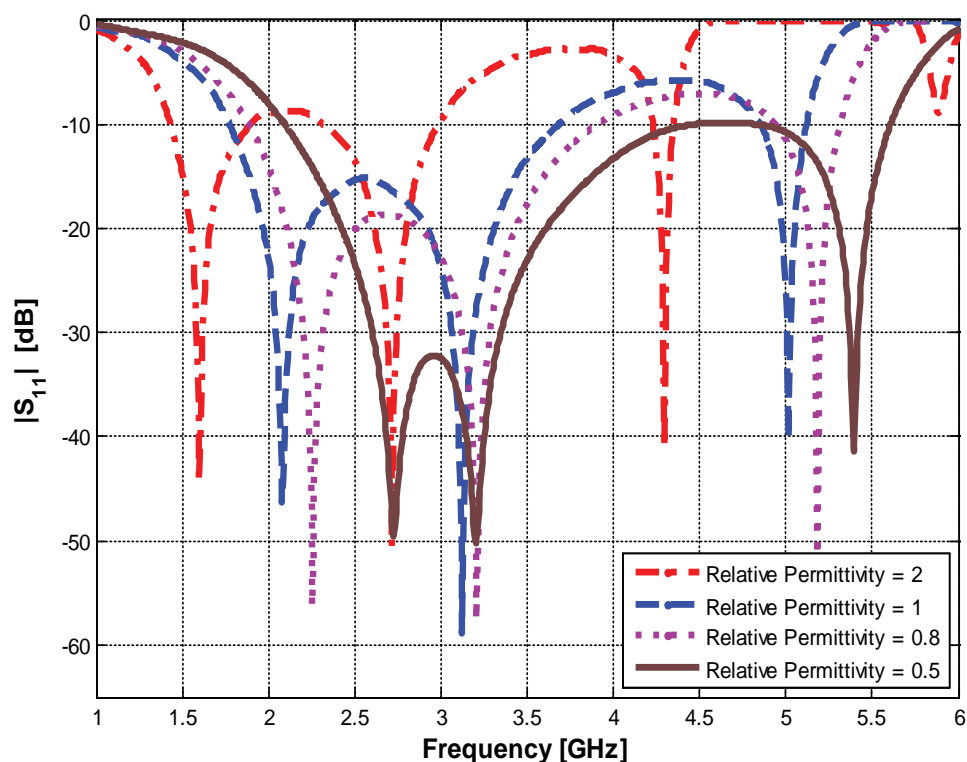
شکل ۳) یک دیسک از ساختار نهان سازی با استفاده از خطوط انتقال بدون بار و شیء نهان سازی شده استوانه ای و ابعاد مورد استفاده: $\epsilon_r = 1$ ، $R = 12\text{mm}$ ، $t_1 = 0.95\text{mm}$ ، $h_1 = 1.65\text{mm}$ ، $T_1 = 3.96\text{mm}$ ، $t_2 = 6.17\text{mm}$ ، $h_2 = 8.28\text{mm}$ ، $T_2 = 10.54\text{mm}$



شکل ۴) ضرایب انعکاس برای ساختار نهان سازی شده شکل ۳ با شی استوانه در $\epsilon_r = 1$ و بسامدهای متفاوت.

تأثیر ضریب گذردهی بر ساختار نهان سازی

تمامی شبیه سازی های بالا در ضریب هدایتی $\epsilon_r = 1$ انجام شده است. حال فرض می کنیم که در ساختار استوانه ای (شکل ۳) مقادیر مختلفی برای ϵ_r در نظر بگیریم. ضرایب انعکاس برای مقادیر مختلف ϵ_r در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می شود، در حالتی که $\epsilon_r = 2$ است نتایج در مقایسه با حالتی که $\epsilon_r = 1$ است غیر قابل قبول می باشد. امپدانس برای حالت $\epsilon_r = 1$ نسبت به بسامد یکنواخت است و این استقلال امپدانس نسبت به بسامد باعث افزایش پهنای باند در این ساختار می گردد. در حالی که در مورد $\epsilon_r = 2$ این خاصیت از دست رفته است و پاسخ ها غیر قابل قبول می باشند. شکل ۵ ضرایب انعکاسی ساختار استوانه ای (شکل ۳) را در چهار مقدار $\epsilon_r = 0.5$ ، $\epsilon_r = 0.8$ ، $\epsilon_r = 1$ و $\epsilon_r = 2$ نشان می دهد. در واقع کاهش ضریب گذردهی نسبی به مقداری کمتر از ۱ باعث افزایش کیفیت نهان سازی می شود.



شکل ۵) مقایسه ضرایب انعکاس در ساختار استوانه ای در چهار حالت

$$\epsilon_r = 2 \text{ و } \epsilon_r = 1, \epsilon_r = 0.8, \epsilon_r = 0.5$$

پیاده سازی فراماده با استفاده از Thin Wire

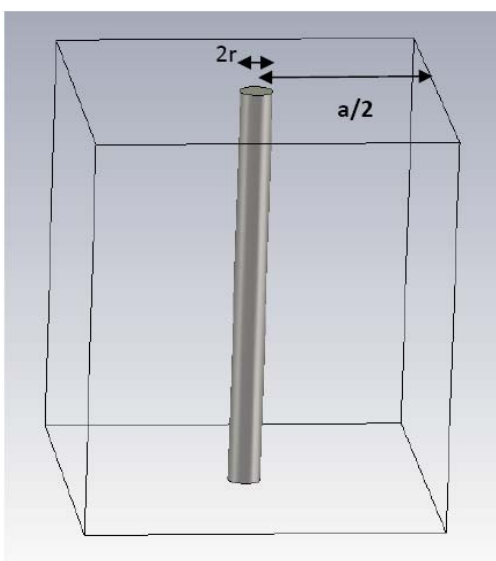
برای کنترل خواص الکتریکی یک محیط و داشتن مقدار منفی و نزدیک به صفر گذردهی الکتریکی، می توان از ساختار میله ای متناوب استفاده کرد. پارامترهای اساسی در شبکه میله ای متناوب عبارتند از فاصله میله ها از یکدیگر و قطر میله ها. با انتخاب مناسب این مقادیر می توان به رابطه ای مناسب میان گذردهی و بسامد رسید.

در [۱۱] رابطه میان گذردهی و پارامترهای ساختار میله ای متناوب با استفاده از مدل درود ارائه شده است.

$$\varepsilon_{eff}(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\varepsilon_0 a^2 \omega_p^2 / \pi r^2 \sigma)} \quad (4)$$

چنانچه میله های فلزی درون محیطی با ε_h باشد، در عبارت (۴) در سمت راست رابطه به جای ۱ باید ε_h قرار گیرد.

با توجه به بخش قبل مشخص شد که کاهش ضریب گذردهی نسبی به مقداری کمتر از ۱ اثر مثبتی بر کیفیت نهان سازی خواهد داشت. برای رسیدن به این مقدار از ضریب گذردهی، میتوان از فراماده استفاده کرد. برای رسیدن به دی الکتریکی با ضریب شکست نزدیک به صفر مدل Thin Drude با Wire در غیاب خطوط انتقال در بسامد پلاسما حدود 2 GHz طراحی می شود. یک سلول ساختار میله ای متناوب در شکل ۶ به همراه پارامترهای موثر آن نشان داده شده است.

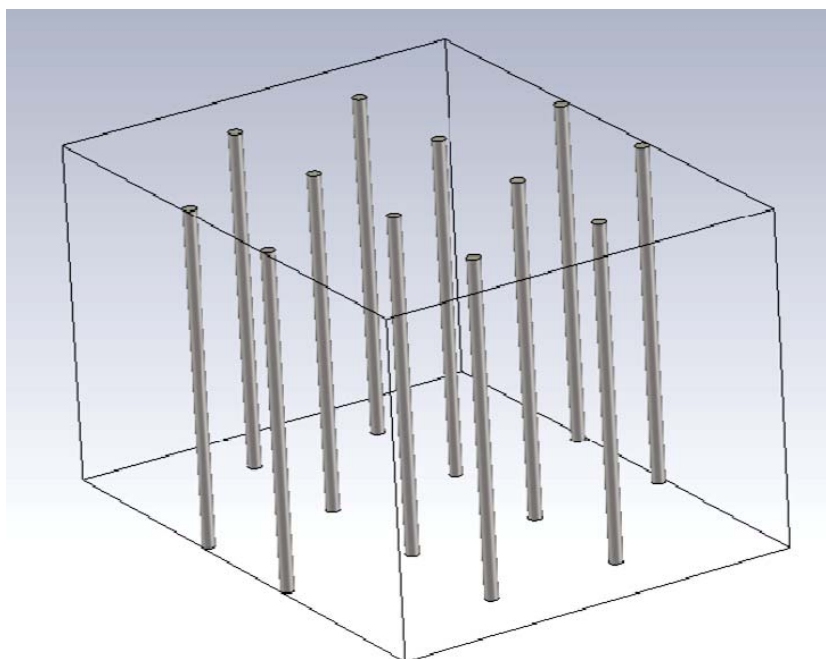


شکل ۶ تک سلول ساختار میله ای متناوب با پارامترهای موثر آن.

برای طراحی مدل Drude از فرمول زیر استفاده میشود [۱۱]:

$$\omega_p^2 = \frac{2\pi c_0^2}{a^2 \left[\ln\left(\frac{a^2}{4r(a-r)}\right) \right]} \quad (5)$$

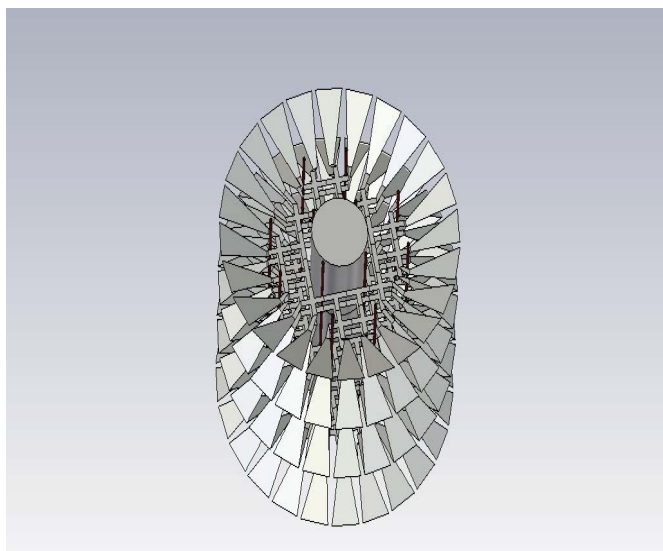
بسامد 2 GHz برای طراحی شبکه میله ای متناوب در نظر گرفته می شود. برای یافتن a متناسب با این ساختار ابعاد ساختار نهان سازی استوانه ای مذکور مورد توجه قرار گرفت. نهایتاً با استفاده از رابطه (۵) و ملاحظات مطرح شده، شبکه میله ای طراحی شد. در این شبکه شعاع میله ها $r=1 \mu\text{m}$ و فاصله میله ها از یکدیگر $a=10 \text{ mm}$ در بسامد $f=2 \text{ GHz}$ در نظر گرفته شد. با این طراحی تعداد ۱۲ عدد میله، که در شکل ۷ نشان داده شده اند، برای قرار گرفتن درون ساختار نهان سازی استوانه ای، در نظر گرفته شد.



شکل ۷) ۱۲ میله در نظر گرفته شده برای پیاده سازی شبکه میله ای متناوب با استفاده از مدل Drude فراماده، در بسامد 2 GHz.

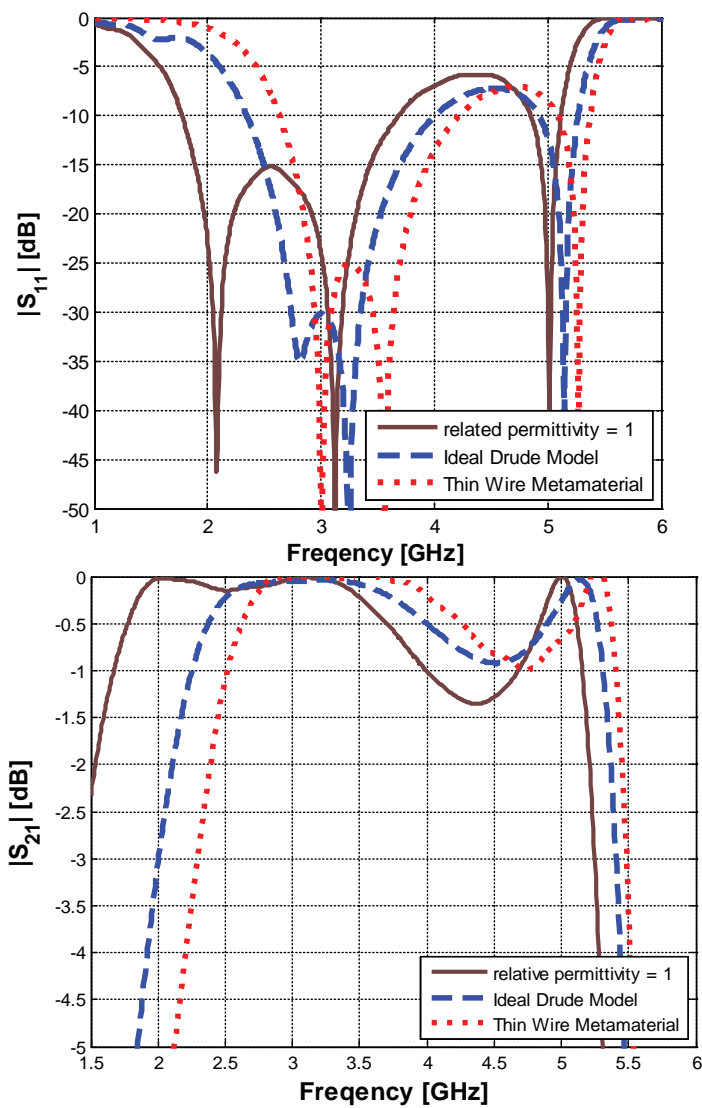
شبکه میله ای متناوب درون ساختار نهان سازی استوانه ای

در این مرحله شبکه میله ای متناوب طراحی شده در بخش قبل به درون ساختار نهان سازی استوانه ای انتقال داده می شود. شکل ۸ ساختار نهان سازی ارزیابی شده در بخش قبل به همراه شبکه ای از میله های نازک که مدل Drude فراماده را پیاده سازی می کنند، نشان می دهد. همان طور که در شکل مشاهده می شود و در بخش قبل نیز به آن اشاره شد، طراحی میله ها به گونه ای انجام شده است که متناسب با ابعاد ساختار باشند. محدودیت قطر استوانه مقدار فاصله میان میله ها (a) را محدود می نماید و کوچک بودن این مقدار باعث نازک شدن میله های شبکه میله ای متناوب می گردد (طبق رابطه ۵).



شکل ۸) پیاده سازی فراماده با استفاده از Thin Wire در ساختار نهان سازی.

برای بررسی نحوه عملکرد ساختار در ارتباط با نهان سازی، پارامترهای اسکترینگ ساختار، شامل S_{11} و S_{21} ، را در سه حالت بدون فراماده، فراماده Thin Wire و مدل Drude ایده آل محاسبه می کنیم. نتایج این محاسبات در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور مشاهده می شود، برای داشتن نهان سازی با کیفیت بالا که در واقع کم بودن مقدار ضریب انعکاس است، می توان از این ساختار بهره جست. با استفاده از این روش و در نظر گرفتن معیار $|S_{11}| < -25 \text{ dB}$ برای محاسبه، پهنای باند عملیاتی ساختار به میزان بسیاری افزایش نشان می دهد.



شکل ۹) ضرایب انعکاس، S_{11} و S_{21} شبیه سازی شده برای ساختار نهان سازی با شبکه خط انتقال در سه حالت $\epsilon_r=1$ ، فراماده با پیاده سازی Thin Wire و مدل ایده آل Drude

با اضافه کردن فراماده به ساختار اندکی از میزان پهنای باند با در نظر گرفتن معیار -10 dB کاسته می شود، ولی در ازای این کاهش ناچیز، کیفیت نهان سازی به مراتب بالا می رود.

همانطور که مشاهده شد، چنانچه کیفیت نهان سازی افزایش یابد، پهنای باند آن کاهش می یابد و برعکس. برای معیار پهنای باند زیر 40 dB- هر دو ساختار (با استفاده از فراماده Thin Wire و بدون استفاده از آن) دارای پهنای باند بسیار کمی هستند. در حالت نهان سازی غیر کامل با معیار پهنای باند مرسوم زیر 10 dB- در هر دو مورد پهنای باند افزایش نشان می دهد. با حضور فراماده در ساختار مساله مصالحه میان پهنای باند و کیفیت نهان سازی معنی پیدا می کند و برای طراحان فضایی را ایجاد می کند که با توجه به نیاز و کاربرد ساختارهای نهان سازی راجع به بکارگیری فراماده در این دسته از ساختارها تصمیم گیری نمایند.

باید توجه نمود که در مباحث مهندسی، همواره مساله اصلی مصالحه میان پارامترهای گوناگون و در نظر گرفتن نیازها و الزامات پروژه به عنوان اولویت کاری است. هدف از ارائه این بخش نشان دادن مسیری برای رسیدن به نهان سازی با کیفیت بالا با در نظر گرفتن محدودیت های پروژه بوده است.

نتیجه گیری

در این مقاله، امکان نامرئی سازی شیء استوانه ای با شعاع بزرگ فراهم شده که انجام این کار در چنین ساختارهایی تا پیش از این گزارش نشده است. علاوه بر این، برای افزایش پهنای باند در ساختار نهان سازی با شبکه خط انتقال روشی جدید پیشنهاد شده است. ارزیابی های عددی انجام شده نشان میدهد که کاهش ضریب گذردهی نسبی به کمتر از یک می تواند تاثیر مثبتی بر کیفیت نهان سازی داشته باشد. در نتیجه ساختار نهان سازی با شبکه خط انتقال با Thin Wire جهت پیاده سازی مدل فراماده Drude در نظر گرفته شد. چنانچه نهان سازی با کیفیت بالا مدنظر باشد، این ساختار پهنای باند عملیاتی را به شکل قابل توجهی افزایش می دهد.

سپاسگزاری

بدین وسیله از حمایت های مرکز تحقیقات مخابرات ایران و دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی که در انجام این پروژه ما را یاری نمودند، تشکر و قدردانی می نمایم.

مراجع

- [1] A. Alù and N. Engheta, "Achieving Transparency with Plasmonic and Metamaterial Coatings", Phys. Rev. E, vol. 72, p. 016623 (2005).
- [2] A. Alù and N. Engheta, "Cloaking and Transparency for Collections of Particles with Metamaterial and plasmonic Covers", Opt. Express, vol. 15, pp. 7578-7590 (2007).

- [3] A. Alù and N. Engheta, "Multifrequency Optical Invisibility Cloak with Layered Plasmonic Shells", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 100, p. 113901 (2008).
- [4] J. B. Pendry, D. Schurig, and D. R. Smith, "Controlling electromagnetic fields", *Science*, vol. 312, pp. 1780-1782 (2006).
- [5] Pekka Alitalo, Olli Luukkonen, Liisi Jylhä, Jukka Venermo, and Sergei A. Tretyakov, "Transmission-Line Networks Cloaking Objects From Electromagnetic Fields", *IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION*, VOL. 56, NO. 2, FEBRUARY 2008
- [6] Xiao Liu, Chao Li, Kan Yao, Xiankun Meng, and Fang Li, "Invisibility Cloaks Modeled by Anisotropic Metamaterials Based on Inductor-Capacitor Networks", *IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS*, VOL. 8, 2009
- [7] Pekka Alitalo, _ Stanislav Maslovski, _ and Sergei Tretyakov, "Tree-dimensional isotropic perfect lens based on LC-loaded transmission lines", *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS* 99, 064912 , 2006.
- [8] C. A. Balanis, *Advanced engineering electromagnetic*, New York: Wiley, 1989.
- [9] Pekka Alitalo¹, Olli Luukkonen¹, Fr´ed´eric Bongard², Jean-Francois Z´urcher², Juan R. Mosig², and Sergei A. Tretyakov,² "Broadband cloaking of selected objects in the microwave regime with a volumetric cloak comprising layered networks of transmission lines", *IEEE*, 2009.
- [10] CST MICROWAVE STUDIO 2008.
- [11] Wenshan Cai, Vladimir Shalaev, *Optical Metamaterials Fundamentals and Applications*, springer 2010.
- [12] C. A. Balanis, *Advanced engineering electromagnetic*, Wiley, New York, 1989.