

کاهش اثر بازتاب زمین در اندازه‌گیری RCS با استفاده از فنس‌های با تیپرینگ مقاومتی

حسین محمدزاده^۱، محمدحسین صدرارحامی^۲، محمدحسین شمس^{۳*}

۱- محقق، ۲- استادیار و ۳- استادیار، دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر، دانشکده الکتروسرام و مهندسی برق

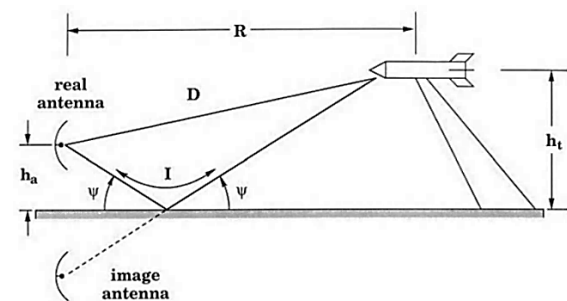
(دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۰۷، پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۰۶)

چکیده

یکی از مهمترین مسائل مورد بحث در طراحی تجهیزات نظامی، اختفا و مخفی شدن آن‌ها از دید رادارهای دشمن است. عموماً این اختفا در مقابل امواج با فرکانس‌های مایکروویو صورت گرفته و کمیتی که کمینه می‌شود سطح مقطع راداری (RCS) است. به منظور اندازه‌گیری این کمیت لازم است هدف مورد نظر را در یک محیط بدون بازتاب تحت تابش امواج الکترومغناطیس قرار داده و سپس نسبت به اندازه‌گیری امواج بازتاب شده از آن و در نتیجه تعیین RCS اقدام کرد. در اغلب موارد RCS یک جسم در عدم حضور زمین مورد نظر است. لیکن جسم مذکور به واسطه قرارگیری بر روی یک نگهدارنده (که پیلون نامیده می‌شود)، در معرض اثر زمین بوده و در اندازه‌گیری علاوه بر جسم واقعی، تصویر آن نیز مشاهده می‌شود. یکی از روش‌های کاهش اثر زمین استفاده از فنس‌های فلزی است. با این وجود تفرق از لبه‌ها و سطح بزرگ گلبه‌های کناری موج بازتاب شده از این فنس‌ها، استفاده از آن‌ها را دچار مشکل کرده است. همانطور که نشان داده می‌شود، استفاده از فنس‌های با تیپرینگ مقاومتی هر دو مشکل فوق را برطرف می‌کند. در این مقاله برای اولین بار با استفاده از ۷ عدد فنس با تیپرینگ مقاومتی و طراحی یک چیدمان مطلوب برای آن‌ها در قالب پنج مثال، این اثر تا حد زیادی حذف شده است. از آنجایی که طول فنس‌ها در حد چندین متر و چند ده طول موج است، در اینجا کل ساختار به صورت دو بُعدی در نظر گرفته شده و لذا از یک کد ممان (MoM) دو بُعدی، علاوه بر حل مجانبی نرم‌افزار CST، برای تحلیل ساختار مذکور استفاده شده است.

کلید واژه‌ها: اندازه‌گیری سطح مقطع راداری، سنتز توزیع امپدانس، کاهش اثر زمین، فنس‌های با تیپرینگ مقاومتی

۱- مقدمه



شکل (۱): مسیر مستقیم و غیرمستقیم بین آنتن و هدف قرارداده شده روی پیلون [۲].

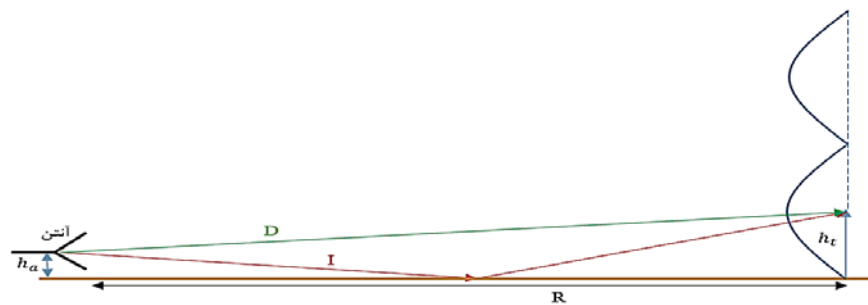
از آنجایی که با حضور زمین دو مسیر مستقیم و غیرمستقیم بین آنتن و هدف شکل می‌گیرد، لذا لازم است کمیتی با عنوان فاکتور انتشار موج F به صورت زیر تعریف کنیم. این کمیت در تحلیل‌های مربوط به اثر زمین مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$F = \left| \frac{E_D + E_I}{E_D} \right| = 2 \sin\left(\frac{k\delta}{2}\right) \quad (1)$$

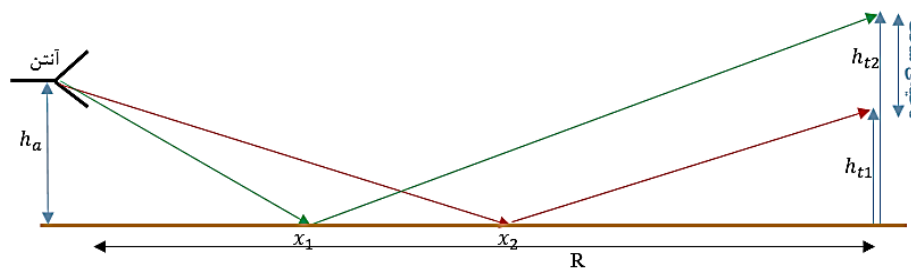
در این رابطه E_D و E_I به ترتیب میدان‌های مسیر مستقیم و غیرمستقیم در محل هدف، k عدد موج و δ تفاوت فاصله بین مسیر مستقیم و غیرمستقیم است که به صورت رابطه (۲) تقریب زده می‌شود.

$$\delta = I - D \cong \frac{2h_a h_t}{R} \quad ; R \gg h_a, h_t \quad (2)$$

سطح مقطع راداری (RCS) اهداف نظامی، کمیتی است که میزان اختفا از دید دشمن را نشان می‌دهد [۱]. هرچه میزان این کمیت کمتر باشد رادارهای دشمن برای آشکارسازی اهداف نیاز به فاصله کمتری تا آن‌ها دارند. به بیانی دیگر هر قدر RCS یک هدف کوچکتر باشد برای این که توسط رادار دشمن آشکار گردد باید به رادار نزدیکتر شود. برای طراحی یک سامانه با RCS کوچک می‌توان از شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای استفاده کرد، با این وجود به دلیل نیاز به مش‌های زیاد به منظور مدل‌سازی جزئیات ساختار از قبیل شکاف‌ها، پیچ‌ها و پرچ‌ها، که نیازمند حافظه و زمان شبیه‌سازی بسیار زیادی است، تعیین دقیق RCS یک سامانه صرفاً از طریق شبیه‌سازی امکان‌پذیر نیست. لذا تعیین RCS دقیق یک سامانه صرفاً از طریق اندازه‌گیری، میسر خواهد شد. در اغلب موارد اندازه‌گیری RCS اجسام در حضور زمین صورت می‌گیرد، در حالی که RCS جسم می‌بایست در فضای آزاد و در عدم حضور زمین انجام شود تا صرفاً اثرات ناشی از جسم در میدان بازتابی ظاهر شود. در واقع اگر جسمی در حضور زمین قرار گیرد موجب تصویر شدن آن توسط زمین شده و یک میدان بازتابی از تصویر نیز در محل آنتن گیرنده خواهیم داشت. این موضوع در شکل (۱) نشان داده شده است.

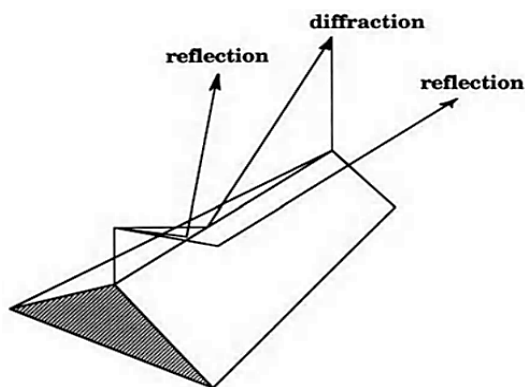


شکل (۲): نوسانات میدان در محل هدف.



شکل (۳): ناحیه ساکت اطراف هدف.

فلزی برای کاهش اثر زمین نشان داده شده است. در میان این روش‌ها، روش تغییر ارتفاع آنتن به دلیل هزینه بسیار اندک در مقایسه با سایر روش‌ها از مقبولیت بالایی برخوردار است. تغییر آنتن‌ها به منظور قرار گرفتن هدف مورد بررسی در پیک میدان کل و سپس تعیین محدوده تغییرات شدت میدان به اندازه ۱ dB برای ناحیه ساکت انجام می‌شود.



شکل (۴): روش زمین هشتی و اشعه‌های بازتاب شده و متفرق شده، به ترتیب از سطح و لبه طویل آن [۲].

بنابراین مطابق رابطه‌های (۱ و ۲)، با تغییر و کاهش ارتفاع آنتن، تا حدودی می‌توان دوره تناوب این میدان نوسانی را افزایش داده و در نتیجه تغییرات میدان حول هدف را کاهش داد.

با این حال، مشکل اساسی این است که حین افزایش دوره تناوب میدان، تا رسیدن به یک تغییرات اندک حول هدف، لزوماً بیشینه دامنه میدان در محل هدف قرار نمی‌گیرد و لازم است قابلیت تغییر ارتفاع هدف را نیز داشته باشیم. از طرفی، ارتفاع هدف تقریباً همان ارتفاع پیلون است که ثابت بوده و عملاً تغییر آن غیر ممکن است.

در شکل (۲) می‌توان این میدان نوسانی در محل هدف را مشاهده کرد.

مطابق شکل (۳)، ناحیه‌ای از ارتفاع که تغییرات شدت میدان در آن ناحیه در یک محدوده قابل قبول قرار دارد را ناحیه ساکت نامیده و تمام تلاش روش‌های حذف اثر زمین، کاهش تغییرات شدت میدان در ناحیه ساکت است. میزان تغییرات مطلوب شدت میدان در این ناحیه بسته به طراحی متفاوت خواهد بود، اما عموماً این میزان تغییرات در سطحی کمتر از ۲ dB قرار می‌گیرد.

حضور زمین در حین اندازه‌گیری RCS اثرات مخربی را به همراه دارد که به صورت زیر خلاصه می‌شود [۲].

- ۱- اثرات تداخلی میدان در محل هدف نوسانات شدیدی ایجاد می‌کند.
- ۲- این نوسانات فرم موج تخت را در محل هدف بهم می‌ریزد.
- ۳- مطابق شکل (۲) با قرار گرفتن هدف در کمینه دامنه میدان، دامنه موج برگشتی به شدت کاهش یافته و نویز غالب می‌شود.
- ۴- نوسانات مذکور مرجع فاز را در اندازه‌گیری فاز تغییر می‌دهند.

روش‌های متعددی برای کاهش اثر زمین وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش هشتی کردن باند اندازه‌گیری، فنس‌های فلزی بر روی باند، قرار دادن جاذب بر روی بخشی از باند و تغییر ارتفاع آنتن‌ها اشاره کرد. در شکل‌های (۳، ۴ و ۵) به ترتیب استفاده از روش‌های تغییر ارتفاع آنتن، زمین هشتی و فنس

از این رو ویژگی‌های مهم یک فنس مطلوب را می‌توان به شرح زیر بیان کرد:

- ۱- الگوی میدان بازتابی از آن دارای گلبرگ‌های کناری کوچکی باشد.
- ۲- تفرق از لبه نداشته باشد.
- ۳- میزان انرژی بازتابی از آن در حداکثر ممکن و در حد بازتاب از PEC باشد.

در واقع با استفاده از دیدگاه اشعه، می‌بایست اشعه بازتاب شده از فنس به سمتی دور از ناحیه هدف هدایت شود. برای دستیابی به این منظور، لازم است الگوی میدان بازتاب شده از فنس تا حد ممکن بیم اصلی باریکی داشته و گلبرگ‌های کناری آن نیز کوچک باشند. از طرفی لبه‌های طویل این فنس‌ها موجب تفرق میدان تابشی به آن‌ها شده و سطح شدت میدان در ناحیه هدف را بالا می‌برند. همچنین انرژی بازتابی از این صفحات می‌بایست تا حد ممکن نزدیک به انرژی بازتابی از یک PEC باشد تا بتوان مطمئن شد که مسیر اشعه بازتابی از زمین به سمت هدف به‌طور کامل مسدود شده است.

در این مقاله برای اولین بار به منظور رفع مشکلات مذکور از صفحات با تیپرینگ مقاومتی به‌عنوان فنس استفاده می‌شود. این صفحات به دلیل داشتن مقاومت بالا در لبه‌ها، میدان تفرقی بسیار ناچیزی داشته و تیپرینگ نرم مقاومتی آن‌ها از مرکز به سمت لبه‌ها موجب کاهش گلبرگ‌های کناری می‌گردد. همچنین سطح امپدانس کوچک در این صفحات موجب بازتاب حداکثر انرژی می‌شود، لذا نمی‌توان سطح امپدانس را در این صفحات خیلی بالا در نظر گرفت و حداکثر حدود 1500Ω در لبه‌ها انتخاب می‌شود، هرچند که به لحاظ ساخت نیز امکان تحقق امپدانس‌های بالا وجود ندارد.

۲-۱- روند طراحی و سنتز صفحه مقاومتی

کاری که می‌بایست در اینجا انجام داد، نوشتن مقاومت سطحی صفحه برحسب توزیع جریان آن و سپس سنتز یک توزیع جریان مناسب به‌منظور دستیابی به الگوی مطلوب است. برای نوشتن توزیع جریان برحسب مقاومت سطحی صفحه، از روش‌های متفاوتی می‌توان استفاده کرد. دو روش عمده، روش معادلات انتگرال و روش نورفیزیکی^۱ (PO) است. روش معادلات انتگرال یک روش نسبتاً دقیق بوده که با گسسته‌سازی ساختار و استفاده از روش‌های حل عددی، نظیر ممان (MoM) به حل مسأله و تعیین توزیع جریان می‌پردازد. از آنجایی که این روش یک رابطه تحلیلی در اختیار طراح قرار نمی‌دهد، استفاده از آن برای طراحی ساختار چندان مناسب نیست. ضمناً این میزان از دقت در اینجا مورد نیاز نبوده و می‌توان از روش PO که یک رابطه تحلیلی در

واضح است که این روش به طول موج سیگنال وابسته بوده و در مواردی که نیاز به جاروب فرکانسی داریم قابل استفاده نیست. بنابراین این روش را می‌توان بیشتر در فرکانس‌های پایین که دوره تناوب سیگنال ذاتاً زیاد است، و همچنین برای اجسام کوچک، به کار برد. از این رو لازم است توسط روش‌هایی اثر زمین حذف و یا به حداقل ممکن برسد.

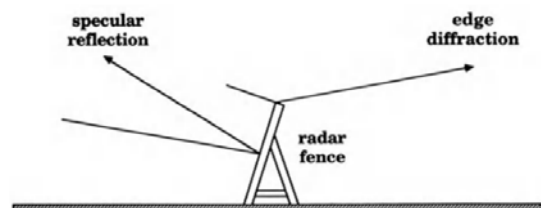
در این مقاله، ابتدا در بخش ۲ فنس‌های با تیپرینگ مقاومتی و برتری آن‌ها نسبت به فنس‌های فلزی به خوبی توضیح داده شده و سپس روند طراحی، فرمول‌بندی و سنتز صفحه مقاومتی بیان می‌شود. در این بخش همچنین گسسته‌سازی توزیع امپدانس به‌عنوان یک راه عملی پیاده‌سازی این توزیع‌های پیوسته ارائه می‌شود. در بخش ۳، روند طراحی و چیدمان فنس‌ها به‌منظور کاهش اثر زمین شرح داده می‌شود. در بخش ۴، نحوه محاسبه میدان‌ها در ناحیه هدف و دلیل استفاده از کد دو بُعدی ممان برای این منظور بیان می‌شود. در بخش ۵ نیز ابتدا یک فنس با تیپرینگ مقاومتی طراحی، سنتز و گسسته‌سازی شده و سپس طراحی چیدمان فنس‌ها برای کاهش اثر زمین در قالب سه مثال ارائه می‌شود.

۲- فنس‌های با تیپرینگ مقاومتی

همانطور که قبلاً نیز بیان گردید کاهش اثر زمین از ضروریات اندازه‌گیری RCS اجسام می‌باشد. یکی از روش‌های کاهش اثر زمین استفاده از تعدادی فنس بر روی زمین به منظور حذف بازتاب‌های ناشی از زمین است. در واقع این فنس‌ها در مسیر تابش موج به زمین قرار گرفته و از رسیدن موج تابشی آنتن به زمین و بازتاب آن به محدوده هدف و بالعکس، جلوگیری می‌کنند. با این وجود استفاده از فنس‌های فلزی دارای دو مشکل مهم به شرح زیر بوده که استفاده از آن‌ها را متوقف می‌کند.

- ۱- گلبرگ‌های کناری الگوی میدان بازتابی از سطح آن خیلی زیاد است.
- ۲- شدت میدان تفرق شده از لبه این فنس‌ها، در محل هدف، به‌خصوص با زیاد شدن تعداد آن‌ها بسیار بزرگ است.

در شکل (۵) اشعه بازتابی و تفرقی از یک فنس فلزی نشان داده شده است [۲].



شکل (۵) اشعه‌های بازتاب شده و متفرق شده به ترتیب از سطح و لبه یک فنس فلزی [۲].

¹ Physical Optics

$$E_{\text{tangent}}^T = JR(x) \quad (۸)$$

در حالت کلی، امپدانس مختلط است، با این حال وقتی σ بزرگ بوده و ϵ تقریباً برابر ϵ_0 است، امپدانس به صورت مقاومتی و حقیقی در نظر گرفته می شود. فرض می شود که مقاومت فقط در امتداد عرض تغییر کرده و در راستای طول ثابت است. بنابراین برای $R(x)$ داریم:

$$R(x) = \frac{1}{[\sigma + j\omega(\epsilon' - \epsilon_0)]t} \quad (۹)$$

مقاومت نرمالیزه شده نیز به صورت زیر تعریف می شود:

$$\eta(x) = \frac{R(x)}{\eta_0} = \frac{1}{[\omega\epsilon'' + j\omega(\epsilon' - \epsilon_0)]t} = \frac{1}{jk(\epsilon_r - \epsilon_0)t} \quad (۱۰)$$

که در آن $\eta_0 \approx 377 \Omega$ امپدانس فضای آزاد و ϵ_r نیز ثابت عایقی نسبی است. یک تقریب خیلی خوب برای رابطه (۱۰) به صورت زیر است:

$$\eta(x) \approx \frac{1}{\eta_0 \sigma(x)t} \quad (۱۱)$$

که یک امپدانس با مقدار حقیقی است.

برای محاسبه رابطه توزیع جریان بر حسب مقاومت سطحی یک نوار با صفحه مقاومتی با استفاده از روش PO به صورت زیر عمل می کنیم.

علاوه بر میدان تابیده شده به سطح صفحه مقاومتی، میدان های الکتریکی و مغناطیسی زیر نیز در بالای صفحه قرار دارند.

$$\vec{E}^T = \hat{z}\Gamma E_0 e^{jk(x\cos\phi_i - y\sin\phi_i)} \quad (۱۲)$$

$$\vec{H}^T = \Gamma H_0 (\hat{x}\sin\phi_i + \hat{y}\cos\phi_i) e^{jk(x\cos\phi_i - y\sin\phi_i)} \quad (۱۳)$$

در زیر صفحه نیز میدان های الکتریکی و مغناطیسی زیر حضور دارند:

$$\vec{E}^t = \hat{z}TE_0 e^{jk(x\cos\phi_i + y\sin\phi_i)} \quad (۱۴)$$

$$\vec{H}^t = TH_0 (-\hat{x}\sin\phi_i + \hat{y}\cos\phi_i) e^{jk(x\cos\phi_i + y\sin\phi_i)} \quad (۱۵)$$

شرط مرزی امپدانس برای یک صفحه با امپدانس سطحی Z_s به صورت زیر است [۶]:

$$\begin{aligned} E_z &= -Z_s H_x \\ E_x &= Z_s H_z \end{aligned} \quad (۱۶)$$

لذا برای میدان های کل H_x و E_z در مرز $y = 0$ و در تابش عمود داریم:

$$\begin{aligned} H_x|_{y=0} &= \frac{1}{\eta_0} (\Gamma - 1)E_0 \\ E_z|_{y=0} &= (1 + \Gamma)E_0 \end{aligned} \quad (۱۷)$$

اختیار طراح قرار می دهد استفاده کرد. در روش PO فرض بر صفحه بینهایت است، لذا میدان تفرق شده از لبه نیز وجود ندارد. لیکن در عمل اینگونه نبوده و صفحات محدود، و دارای لبه هستند. با این وجود اگر شرایط زیر برقرار باشد، می توان از روش PO با دقت قابل قبولی استفاده کرد [۳-۶].

- ۱- زاویه پراکندگی نزدیک خط عمود بر صفحه باشد.
- ۲- مقاومت در لبه ها خیلی زیاد باشد.
- ۳- تیپر مقاومتی در طول صفحه، تا حد ممکن پیوسته باشد.

۲-۲- فرمول بندی

فرض کنیم یک نوار نازک امپدانس به عرض $2L$ ، ضخامت t و طول بینهایت مطابق شکل (۶)، در دسترس بوده و تحت تابش میدان های الکترومغناطیسی با پلاریزاسیون های E و H به صورت زیر قرار می گیرد.

برای پلاریزاسیون E رابطه های (۳) و (۴).

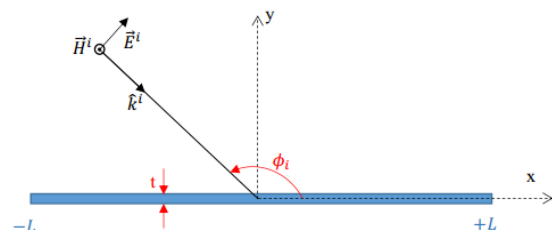
$$\vec{E}^i = \hat{z}E_0 e^{jk\hat{\rho}_i \cdot \vec{\rho}} = \hat{z}E_0 e^{jk(x\cos\phi_i + y\sin\phi_i)} \quad (۳)$$

$$\vec{H}^i = H_0 (-\hat{x}\sin\phi_i + \hat{y}\cos\phi_i) e^{jk(x\cos\phi_i + y\sin\phi_i)} \quad (۴)$$

و برای پلاریزاسیون H رابطه های (۵) و (۶) برقرار است.

$$\vec{H}^i = \hat{z}H_0 e^{jk\hat{\rho}_i \cdot \vec{\rho}} = \hat{z}H_0 e^{jk(x\cos\phi_i + y\sin\phi_i)} \quad (۵)$$

$$\vec{E}^i = E_0 (\hat{x}\sin\phi_i - \hat{y}\cos\phi_i) e^{jk(x\cos\phi_i + y\sin\phi_i)} \quad (۶)$$



شکل (۶): یک نوار نازک امپدانس که در معرض تابش موج تخت قرار دارد.

در این صورت بر روی این نوار نسبتاً بینهایت، میدان کل به صورت رابطه (۷) به جریان کل وابسته است [۳].

$$E_{\text{tangent}}^T = \frac{J}{[\sigma + j\omega(\epsilon' - \epsilon_0)]t} \quad (۷)$$

که در آن $J = J_\sigma + J_\epsilon$ به صورت جمع جریان القایی $J_\sigma = \sigma E^T$ و جریان پلاریزاسیون $J_\epsilon = j\omega(\epsilon' - \epsilon_0)E^T$ تعریف می شود. σ رسانندگی بر حسب $(1/\Omega m)$ ، ϵ گذردهی الکتریکی $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon' - j(\sigma/\omega)$ چون نوار باریک است، فرض می شود جریان فقط در امتداد طول و عرض نوار جاری می شود. بنابراین جریان J صرفاً با استفاده از مولفه های مماسی میدان الکتریکی کل E^T تعیین می شود. رابطه (۷) را می توان به صورت رابطه (۸) نوشت.

با جایگزینی رابطه (۱۶) در (۱۷) داریم:

$$1 + \Gamma = \frac{-Z_s}{\eta_0}(\Gamma - 1) \Rightarrow \Gamma = \frac{\frac{Z_s}{\eta_0} - 1}{\frac{Z_s}{\eta_0} + 1} = \frac{\eta - 1}{\eta + 1} \quad (18)$$

که در آن $\eta = \frac{Z_s}{\eta_0}$ امپدانس نرمالیزه است. بر روی سطح امپدانس مذکور دو جریان الکتریکی و مغناطیسی القا می‌شود که به صورت زیر به دست می‌آیند.

$$\vec{J}_s = \hat{n} \times (\vec{H}^i + \vec{H}^r) \Big|_{\text{on } s'} = \hat{z}(1 - \Gamma)H_0 \quad (19)$$

$$\vec{M}_s = -\hat{n} \times (\vec{E}^i + \vec{E}^r) \Big|_{\text{on } s'} = -\hat{x}(1 + \Gamma)E_0 \quad (20)$$

و $H_0 = E_0/\eta_0$ است. بنابراین با جایگذاری ضریب بازتاب Γ

از رابطه (۱۸) در روابط (۱۹) و (۲۰) داریم:

$$\vec{J}_s = \hat{z} \frac{2 \sin \phi_i}{\eta(x) + 1} H_0 e^{jkx \cos \phi_i} \quad (21)$$

$$\vec{M}_s = -\hat{x} \frac{2\eta(x)}{\eta(x) + 1} E_0 e^{jkx \cos \phi_i} \quad (22)$$

از آنجایی که سطح امپدانس رسانندگی بالایی دارد، مؤلفه مماسی میدان الکتریکی کل بر روی سطح در مقایسه با مؤلفه مماسی میدان مغناطیسی کل ناچیز بوده و لذا در روند طراحی و سنتز می‌توان از آن صرف نظر کرد [۷]. بنابراین با نوشتن امپدانس نرمالیزه $\eta(x)$ بر حسب جریان $\vec{J}_z(x)$ داریم:

$$\eta(x) = \frac{2 \sin \phi_i}{J_z(x)} H_0 e^{jkx \cos \phi_i} - 1 \quad (23)$$

همانطور که مشاهده می‌شود محاسبه $\eta(x)$ در روش PO بسیار ساده‌تر از روش معادلات انتگرال است. در اینجا منطقی است که فرض کنیم در مسأله سنتز $\phi_i = 90^\circ$ بوده و لذا از شیف فاز غیر لزوم که منجر به یک امپدانس مختلط می‌شود صرف نظر کنیم. بنابراین داریم:

$$\eta(x) = \frac{2}{J_z(x)} - 1 \quad (24)$$

امپدانس سنتز شده برای حالت تابش عمود در هر دو حالت تک پایه^۱ و دو پایه^۲ به خوبی عمل کرده و الگوی بازتابی مطلوب را بدست می‌دهد. در تابش عمود فاز جریان در امتداد نوار مقاومتی تقریباً ثابت بوده و لذا با دقت قابل قبولی می‌توان فاز جریان را صفر در نظر گرفت.

نکته‌ای که در اینجا حائز اهمیت است، سنتز یک توزیع امپدانس نرمالیزه شده $\eta(x)$ مطلوب با مقادیر صفر در مرکز نوار و حدود ۴ در انتهای نوار است. با این مقادیر، امپدانس از $0 \cdot \Omega$ در مرکز شروع شده و تا حدود $1500 \cdot \Omega$ در لبه‌های انتهایی نوار

ادامه می‌یابد. این مسأله ساخت فنس را عملی می‌کند، در واقع امپدانس خیلی زیاد قابل ساخت نیست. از طرفی چون طراحی چینش فنس‌ها به گونه‌ای خواهد بود که لازم می‌دارد بخش زیادی از فنس از جنس فلز با امپدانس صفر باشد، و همچنین با توجه به این که ساخت امپدانس به صورت پیوسته امکان پذیر نیست، لازم است از توزیع مذکور نمونه برداری به عمل آید که منجر به صفر شدن بخش زیادی از امپدانس سطح فنس می‌شود، و این توجیهی برای شروع امپدانس از صفر است.

حال که رابطه مربوط به توزیع امپدانس بر حسب توزیع جریان به دست آمد لازم است روش‌هایی برای سنتز توزیع جریان به منظور دستیابی به الگوی مطلوب بررسی شود. در همه این روش‌ها نکات زیر را می‌بایست در نظر گرفت:

- ۱- سنتز جریان به منظور دستیابی به الگوی مطلوب.
- ۲- در مرکز نوار مقدار توزیع جریان برابر ۲ باشد.
- ۳- در لبه‌های انتهایی نوار مقدار جریان بیش از حدود ۰/۴ باشد.

این موارد باعث می‌شود توزیع امپدانس نرمالیزه شده در مرکز صفحه امپدانس مقدار صفر و در لبه‌های انتهایی حدوداً مقداری برابر با ۴ داشته باشد. لازم به ذکر است که در اصل توزیع جریان سنتز شده برای یک صفحه متقارن حول محور y ها است که از $-L$ تا $+L$ گسترش یافته است. لیکن چون این صفحه مقاومتی به عنوان فنس بر روی زمین قرار داده می‌شود، بنابراین نیمه از 0 تا L برای قرارگیری بر روی زمین کافی است و نیمه دیگر توسط زمین تصویر می‌شود. لذا در اینجا هم برای یک صفحه متقارن توزیع جریان سنتز شده و الگوی آن به دست می‌آید ولی در نهایت نصف آن به عنوان فنس بر روی زمین قرار داده شده و در عملیات طراحی چینش مکان فنس لحاظ می‌شود.

۲-۳- روش‌های سنتز جریان صفحه مقاومتی

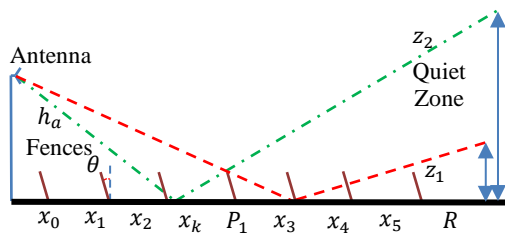
روش‌های مختلفی برای سنتز توزیع جریان وجود دارد. هم می‌توان از روش‌های سنتز آنتن، و هم می‌توان از روش‌های پردازش سیگنال (روش‌های پنجره‌گذاری) استفاده کرد [۸] و [۹].

از آنجایی که توزیع جریان در لبه‌های صفحه مقاومتی باید مقداری بیش از حدود ۰/۴ داشته باشد تا امپدانس نرمالیزه به حدود ۴ برسد، بنابراین در بین روش‌های مختلف پنجره‌گذاری، روش پنجره گوسی و روش پنجره نمایی یا پواسون مطلوب به نظر می‌رسد. رابطه مربوط به پنجره گوسی در حالت متقارن از $-L$ تا $+L$ در زیر آمده است [۹]:

$$J_z(n) = 2e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{2n}{\sigma(N-1)} \right)^2} \quad (25)$$

^۱ MonoStatic

^۲ BiStatic



شکل (۸): چیدمان فنس‌ها بر روی زمین به منظور کاهش اثر زمین در ناحیه ساکت بین z_1 تا z_2 .

نقطه P_1 تقریباً در فاصله $R/2$ از آنتن انتخاب می‌شود، این نقطه حدوداً در میانه ناحیه‌ای است که توسط آنتن روشن می‌شود. طول فنس‌ها می‌بایست برابر عرض ناحیه‌ای از زمین باشد که توسط آنتن روشن می‌شود. حدوداً طول فنس را 10 m انتخاب می‌کنیم. ارتفاع آنتن‌ها به ابعاد هدف و طول باند اندازه‌گیری وابسته است. هرچه ابعاد هدف بزرگتر باشد، لازم است ارتفاع آنتن‌ها نیز بیشتر باشد. طول باند بستگی به ابعاد هدف و فرکانس اندازه‌گیری دارد، در واقع می‌بایست $R > 2D^2/\lambda$ باشد تا شرط ناحیه-دور ارضا گردد. در این رابطه D بزرگترین بُعد جسم و λ طول موج فرکانس اندازه‌گیری است. تعداد فنس‌ها به میزان کاهش اثر زمین وابسته است. هرچه به ناحیه ساکت با تغییرات میدان کوچکتری در محل هدف نیاز باشد، تعداد فنس‌های بیشتری مورد نیاز است. زاویه θ به‌صورتی انتخاب می‌شود که بیشینه کاهش اثر زمین در محل هدف ایجاد گردد. این زاویه عموماً بین صفر تا 20° درجه و به وسیله شبیه‌سازی یا محاسبات تعیین می‌شود. عرض فنس بستگی به ارتفاع ناحیه ساکتی است که نیاز است در محل هدف وجود داشته باشد.

۴- محاسبه میدان در ناحیه هدف و در حضور فنس‌ها

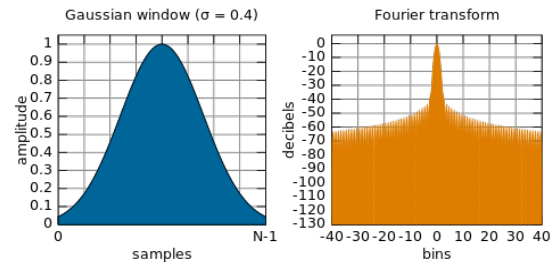
برای محاسبه میدان حاصل از فنس‌ها در محل هدف و به تبع آن صحت‌سنجی کاهش اثر زمین با اضافه شدن فنس‌ها، راه‌های متفاوتی وجود دارد. یک راه سرراست و ساده استفاده از نرم‌افزارهای موجود نظیر FEKO، CST، COMSOL و غیره است. با این وجود بنا به دلایلی که شرح داده خواهد شد، استفاده از این نرم‌افزارها تقریباً به جز در موارد خاصی، غیرممکن است.

از آنجایی که ناحیه وسیعی بین آنتن فرستنده و هدف روشن می‌شود، لازم است طول فنس‌ها را برابر عرض این ناحیه و بسیار طولی انتخاب کرد تا کل ناحیه را پوشش داده و اثر زمین نیز به نحو احسن حذف شود. طولی شدن فنس‌ها موجب افزایش سطح آن‌ها شده و فرآیند شبیه‌سازی را به خصوص در فرکانس‌های بالا دچار مشکل می‌کند. از این‌رو می‌بایست ساختار مذکور را به‌صورت دو بُعدی شبیه‌سازی کرد. این عمل تقریباً هیچ تقریبی ندارد چون طول هر کدام از فنس‌ها چندین برابر طول موج در پایین‌ترین فرکانس بوده و لذا تغییرات جریان سطحی در جهت طول فنس‌ها

که در آن $(N-1)/2$ انحراف معیار استاندارد، و N تعداد کل نقاط از $-L$ تا $+L$ است و به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$N = \frac{2L}{\Delta x} + 1 \quad (26)$$

n نیز در بازه $[(N-1)/2] \leq n \leq [(N-1)/2]$ قرار دارد. توزیع مربوطه به‌همراه تبدیل فوریه آن در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل (۷): توزیع گوسی به‌همراه تبدیل فوریه آن.

از این‌رو پنجره‌ی گوسی با پارامتر $\sigma = 0.4$ برای سنتز جریان انتخاب می‌شود، با انتخاب این پنجره، می‌توان به SLL حدود 30 dB دست پیدا کرد.

۲-۴- گسسته‌سازی توزیع امیدانس

توزیع امیدانس به‌دست آمده در بخش قبل یک توزیع پیوسته بوده که امکان پیاده‌سازی عملی آن را دچار مشکل می‌کند. حتی در صورت امکان پیاده‌سازی امیدانس پیوسته، هزینه این پیاده‌سازی بسیار زیاد است. بنابراین تنها راه حل این مسئله گسسته‌سازی توزیع امیدانس است. چون لازم است قسمت زیادی از سطح صفحه مقاومتی از فلز با امیدانس صفر تشکیل شود، و با توجه به این‌که امیدانس از صفر شروع می‌گردد، بنابراین می‌بایست بسته به شیب نمودار توزیع امیدانس، از نمودار مذکور در بازه‌هایی با تغییرات امیدانسی یکسان نمونه‌برداری انجام شود. این‌رو برای ساخت فنس کافی است صفحات امیدانسی گسسته‌سازی شده کنار هم قرار داده شود.

۳- روند طراحی و چیدمان فنس‌ها

در طراحی و چیدمان فنس‌ها فرض بر این است که صرفاً ناحیه‌ای از فنس که از فلز با امیدانس صفر (PEC) تشکیل شده است در حذف اثر زمین وارد می‌شود و بقیه نقاط با امیدانس مخالف صفر فقط به منظور حذف اثر میدان تفرقی از لبه فنس و کاهش گلبرگ‌های کناری الگوی بازتابی از فنس، به‌کار برده می‌شوند. در این طراحی یک فنس را در وسط قرار داده و از روی آن ناحیه ساکت به‌دست می‌آید. در هر دو طرف فنس مذکور نیز می‌بایست دست‌کم 3λ فنس قرار داده تا طراحی را بهبود بخشد. نحوه چیدمان فنس‌ها در شکل (۸) نشان داده شده است.

بسیار زیاد، چگالی اشعه خیلی زیاد، تعداد مش بسیار زیاد در ساختار و غیره هستیم. همچنین تعدادی محدودیت نیز به واسطه حل سه‌بعدی مسأله ایجاد می‌شود. یکی از این محدودیت‌ها استفاده از صفحه فلزی بسیار وسیع به منظور الگوسازی زمین واقعی بوده که علاوه بر افزایش حجم مش‌بندی، اثر لبه‌های آن نیز به پاسخ مسأله اضافه می‌شود. این درحالیست که در حل دو‌بعدی مسأله اثر زمین با یک ضریب بازتاب منفی یک به مسأله اضافه شده و مشکلات مربوط به حل مجانبی با نرم‌افزار CST رخ نمی‌دهد.

۵- نتایج شبیه‌سازی

در اینجا چند نمونه از طراحی چیدمان فنس و الگوی سنتز شده به منظور کاهش اثر زمین ارائه می‌شود. در این طراحی از ۷ عدد فنس بین آنتن و هدف استفاده شده است. در مرحله اول با توجه به محدودیت‌های بیان شده در بخش قبل، فاصله بین آنتن و هدف را برابر $R = 2000 \text{ m}$ قرار داده و مسأله را صرفاً به وسیله روش دو‌بعدی حل می‌کنیم. از آنجایی که آنتن ناحیه بزرگی را بر روی زمین روشن می‌کند، طول فنس از چندین λ بزرگتر شده و لذا می‌توان فنس‌ها و منبع را به‌صورت دو‌بعدی در نظر گرفت. بنابراین ساختار به‌طور کلی به‌صورت دو‌بعدی در نظر گرفته شده و با استفاده از یک کد دو‌بعدی MoM تحلیل شده است [۱۰]. از این‌رو برای مثال‌های اول و دوم تغییرات میدان به‌نچار شده در یک محدوده‌ای از ارتفاع در محل هدف، در هر دو حالت بدون فنس و با فنس رسم شده و برای مثال سوم نیز، میدان بازتاب شده از یک هدف دو‌بعدی در حالت‌های حضور و عدم حضور زمین، در محل آنتن گیرنده به‌دست می‌آید. در مرحله دوم به منظور صحت‌سنجی توأمان طراحی چیدمان و کد دو‌بعدی از حل مجانبی نرم‌افزار CST نیز استفاده می‌شود. برای این منظور دو مثال با ابعاد بسیار کوچکتر از مثال‌های قبل، با $R = 50 \text{ m}$ و $h_a = 5 \text{ m}$ ، در نظر گرفته شده و توسط هر دو حل دو‌بعدی و مجانبی تحلیل می‌شود.

۵-۱- طراحی و سنتز فنس

حال با استفاده از توزیع گوسی، یک توزیع مقاومتی برای صفحه امپدانس سنتز می‌شود که در تابش عمود، گلب‌گ‌های کناری را حدود ۳۰ dB پایین‌تر از گلب‌گ اصلی قرار داده و امپدانس در لبه فنس را حداکثر تا حدود $1/5 \text{ k}\Omega$ بالا ببرد. برای این منظور شاخص‌های توزیع گوسی به‌صورت زیر تنظیم می‌شوند:

$$\sigma = 0.53 ; L = 2m ; \Delta x = 0.01 L$$

با تنظیمات فوق، توزیع جریانی به‌صورت شکل (۹) به‌دست می‌آید.

وجود ندارد. نرم‌افزار COMSOL قابلیت شبیه‌سازی ساختارهای دو‌بعدی را دارد و می‌توان از آن استفاده کرد. با این وجود نرم‌افزار مذکور برای استفاده در این کار دارای دو مشکل اساسی است. اول این‌که این نرم‌افزار قادر به شبیه‌سازی ساختارهای با سطح امپدانس با شرایط خاص این مسأله نیست، در حالی‌که فنس‌های مورد استفاده در این پروژه همه دارای تیپ‌رینگ مقاومتی هستند. دوم این‌که این نرم‌افزار از روش عنصر محدود (FEM) برای حل مسأله استفاده می‌کند که ذاتاً با مسائل پراکندگی امواج که در آن ابعاد جسم و فضای حل مسأله بزرگ است، در تضاد می‌باشد.

بنابراین لازم است مسأله محاسبه میدان حاصل از فنس‌های در مجاورت زمین را با استفاده از روش ممان دو‌بعدی حل کرده و حل سطوح امپدانس را نیز به آن اضافه کرد. از این‌رو در این کار پژوهشی، نرم‌افزار شبیه‌ساز محاسبه میدان فنس‌های با تیپ‌رینگ مقاومتی در حضور زمین نیز ایجاد شد و علاوه بر نرم‌افزار CST از کد مذکور نیز در شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است. صحت‌سنجی این نرم‌افزار در شرایط خاص به وسیله نرم‌افزارهای COMSOL و CST انجام شده است.

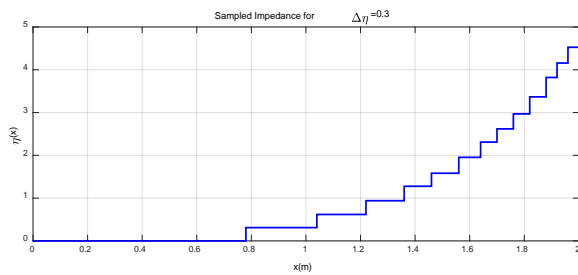
یک راه دیگر برای محاسبه میدان در محل هدف استفاده از حل مجانبی^۱ نرم‌افزار CST است. این حل بر مبنای روش SBR^۲ بوده و در شرایطی که ساختار مسأله در مقایسه با طول‌موج به اندازه کافی بزرگ باشد می‌توان از آن استفاده کرد. درحقیقت از این حل بیشتر در تحلیل ساختارهای فلزی استفاده می‌شود و برای تحلیل ساختارهای عایقی نمی‌توان از این حل استفاده کرد. با این وجود برای ساختارهای با سطوح امپدانس تحت شرایط خاصی می‌توان از این حل استفاده کرد. اگر ساختار مورد بررسی صرفاً از یک سطح امپدانس و یا چند سطح امپدانس مجزا، استفاده کرده باشد می‌توان با دقت قابل قبولی از حل مجانبی برای تحلیل این ساختار استفاده کرد. لیکن در ساختارهایی که از چند سطح امپدانس متصل به یکدیگر استفاده می‌کنند شرایط به نحو دیگری رقم خواهد خورد. در محل اتصال دو سطح با امپدانس متفاوت ناپیوستگی جریان اتفاق افتاده و متأسفانه حل مجانبی قادر به تحلیل این ناپیوستگی‌ها نخواهد بود. در حالی‌که در روش ممان تمامی این اثرها به‌صورت دقیق در نظر گرفته می‌شود. بنابراین در این شرایط حل مجانبی دچار خطای زیادی خواهد شد.

از طرفی حل مذکور دارای کاستی‌های دیگری بوده که استفاده از آن را باز هم محدود می‌کند. هرچند در این روش اثر تفرق لبه و بازتاب‌های چندگانه در نظر گرفته می‌شود، لیکن به‌دلیل بزرگ بودن فضای حل مسأله، مشکل فاصله بین اشعه^۳ اتفاق افتاده و لذا نیازمند استفاده از الگوهای تابشی با وضوح

^۱ Asymptotic

^۲ Shooting and Bouncing Rays

^۳ Ray Spacing



شکل (۱۲): گسسته‌سازی توزیع امپدانس به منظور تسهیل در پیاده‌سازی آن.

مطابق این شکل، توزیع امپدانس به ۱۴ قطعه با پله‌های امپدانس یکسان و عرض‌های متفاوت افراز شده است. بخش اعظمی از صفحه امپدانس دارای امپدانس صفر بوده و لذا میدان بازتابی از آن نسبت به یک صفحه فلزی معادل چندان تفاوتی ندارد.

۵-۲- طراحی چیدمان فنس‌ها

حال با استفاده از فنس‌های طراحی شده در بخش قبل، اثر زمین در قالب پنج مثال برای هدفی که در فاصله‌های ۲۰۰۰ m و ۵۰ m از آنتن‌ها قرار گرفته است، کاهش می‌یابد. برای این منظور از ۷ عدد فنس استفاده کرده و در فاصله ۲۰۰۰ m، آنتن برای فرکانس‌های ۱۰ GHz و ۱۸ GHz در ارتفاع ۱۸ m از سطح زمین قرار می‌گیرد. در فاصله ۵۰ m نیز آنتن برای هر دو فرکانس ۷ GHz و ۱۰ GHz در ارتفاع ۱۰ m از سطح زمین قرار می‌گیرد.

برای مثال اول ابتدا مولفه‌های مربوط به محل قرارگیری فنس‌ها، بازه‌ای که در آن میدان الکتریکی در راستای ارتفاع اندازه‌گیری می‌شود، ارتفاع آنتن، فرکانس و زاویه کجی θ به صورت زیر تنظیم شده و سپس شبیه‌سازی انجام می‌شود.

$$P = [918.7, 958.5, 1000, 1045.3,$$

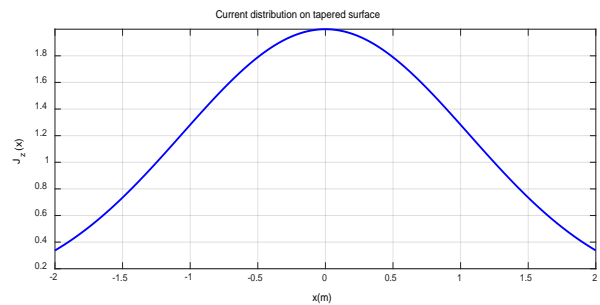
$$1092.6, 1142.1, 1193.9] m$$

$$z_1 = 14.95m, z_2 = 17.93m$$

$$\Rightarrow \Delta z = 2.98m, L = 2m$$

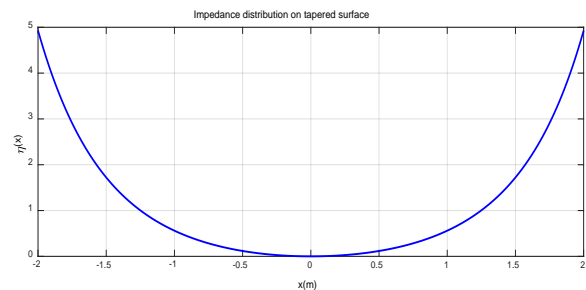
$$h_a = 18m, f = 10GHz, \theta = 0^\circ$$

با تنظیم مولفه‌های فوق‌الذکر، تغییرات میدان در حوالی هدف و در راستای ارتفاع برای دو حالت به دست می‌آید. در حالت اول فنس‌ها حضور نداشته و اثر تداخلی میدان بازتاب شده از سطح زمین با میدان تابش شده از آنتن فرستنده در محل هدف ظاهر می‌شود. این اثر تداخلی، گاه به صورت سازنده بوده و گاه به صورت مخرب است. بنابراین تغییرات میدان در ناحیه مذکور بسیار زیاد است و به این دلیل فرم موج تخت در محل هدف بهم می‌ریزد. در حالت دوم با اضافه کردن فنس‌ها بین نواحی آنتن و هدف به صورتی که قبلاً توضیح داده شد، سعی در حذف اثر



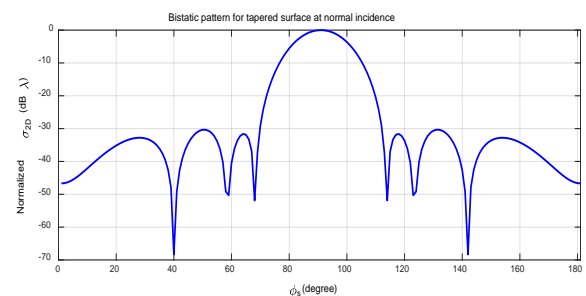
شکل (۹): توزیع جریان سنتز شده برای یک صفحه امپدانس به منظور کاهش گلبرگ‌های کناری.

با قرار دادن توزیع جریان مذکور در (۲۴) توزیع امپدانس متناظر آن به صورت شکل (۱۰) به دست می‌آید.



شکل (۱۰) توزیع امپدانس متناظر توزیع جریان به دست آمده برای صفحه امپدانس

اگر یک موج تخت به صورت عمود بر این صفحه تابانده شود، الگوی دوپایه آن به صورت شکل (۱۱) به دست می‌آید. مطابق شکل مذکور سطح گلبرگ‌های کناری حداقل ۳۰ dB پایین‌تر از سطح گلبرگ اصلی است. بنابراین می‌توان گفت که اهداف اولیه به دست آمده است.



شکل (۱۱) الگوی دوپایه برای یک صفحه امپدانس تیپر شده در حالت تابش عمود بر صفحه.

همانگونه که قبلاً نیز بیان شد، به دلیل افزایش هزینه و مشکلات مربوط به پیاده‌سازی توزیع امپدانس پیوسته، لازم است این توزیع امپدانس گسسته‌سازی شده و سپس توسط چندین نوار امپدانس که در کنار همدیگر قرار گرفته‌اند ساخته شود. این کار به طور قطع سادگی در ساخت و کاهش چشمگیر هزینه را به همراه دارد، با این وجود دقت مورد نظر کاهش پیدا می‌کند. در شکل (۱۲) گسسته‌سازی توزیع امپدانس مشاهده می‌شود.

مطابق این شکل، بیشینه تغییرات میدان در یک ارتفاع حدود ۳ m حول هدف، در حضور و عدم حضور فنس‌ها به ترتیب برابر ۲/۱۲ dB و ۵۲/۵۸ dB است. از این‌رو مطابق مثال اول مقدار قابل توجهی از اثر زمین و به میزان بیش از ۵۰ dB از تغییرات میدان ناشی از اثر زمین در محل هدف به واسطه حضور فنس‌ها حذف شده است.

به‌عنوان مثال سوم، به‌منظور صحت‌سنجی اثر فنس‌ها، میدان پراکنده شده از یک هدف دو بُعدی در محل آنتن گیرنده به‌دست می‌آید. برای این کار سه حالت را در نظر می‌گیریم. در حالت اول به‌عنوان یک حالت مطلوب فرض می‌شود هدف در فضای آزاد قرار داشته و هیچ‌گونه میدان تداخلی وجود ندارد. بنابراین صرفاً میدان تابش و بازتابش از مسیر مستقیم در محاسبات لحاظ می‌گردد. در حالت دوم، هدف در حضور زمین و در ارتفاع ۱۵ m از سطح آن قرار می‌گیرد. با این کار اثر تداخلی میدان بازتابی از سطح زمین نیز وارد محاسبات می‌شود. در حالت سوم، هفت عدد فنس بین آنتن و هدف قرار گرفته و سعی می‌شود اثر تداخلی میدان بازتابی از سطح زمین حذف شود. بنابراین انتظار می‌رود، میدان بازتابی از هدف در محل آنتن گیرنده برای حالت‌های اول و سوم بسیار به یکدیگر نزدیک شود. با فرض $R = 2000$ m، $h_a = 18$ m، $f = 1$ GHz، $h_t = 15$ m، $h_a = 18$ خط قائم (θ) برابر 2° ، میدان پراکنده شده از یک هدف دو بُعدی با طول ۱ m به‌صورت جدول (۱) خواهد بود.

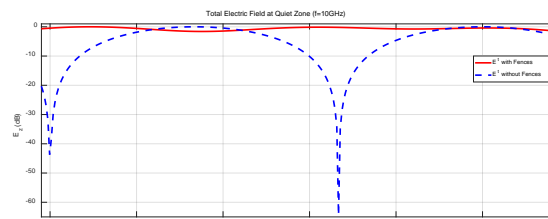
جدول (۱): مقایسه میدان پراکنده شده از هدف، در محل آنتن‌ها، برحسب موقعیت‌های مختلف قرارگیری هدف.

حالت	وضعیت هدف	شدت میدان بر حسب dB
۱	هدف در فضای آزاد	۳,۰۹۷۹
۲	هدف در حضور زمین	۵,۶۸
۳	هدف در حضور زمین با ۷ عدد فنس بین آنتن و هدف	۳,۱۰۸

مطابق انتظار و محاسبات انجام شده در جدول (۱)، میدان پراکنده شده از هدف در محل آنتن گیرنده برای حالت‌های اول و سوم بسیار به یکدیگر نزدیک است.

مطابق محدودیت‌های بیان شده در بخش قبل برای حل مجانبی نرم‌افزار CST، در مثال‌های چهارم و پنجم، فاصله بین آنتن و هدف را به ۵۰ m کاهش داده و مسأله به وسیله هردو حل دو بُعدی و مجانبی تحلیل می‌شود. برای این منظور ابتدا فرکانس را برابر ۷ GHz قرار داده و سپس مولفه‌های زیر را به منظور کاهش اثر زمین در ناحیه هدف، تنظیم و سپس شبیه‌سازی انجام می‌شود.

تداخلی میدان بازتابی از زمین در محل هدف داریم. با این کار تداخل میدان‌های مسیر مستقیم از آنتن به هدف و مسیر غیرمستقیم از زمین به هدف تا حد زیادی کاهش یافته و لذا تغییرات میدان در محل هدف به شدت محدود می‌شود. تغییرات میدان به‌هنگار شده مربوط به حالت‌های فوق، در شکل (۱۳) آمده است.



شکل (۱۳): تغییرات میدان به‌هنگار شده کل حوالی هدف، در حضور و عدم حضور فنس‌ها در فرکانس ۱۰ GHz برای $R = 2$ km و $h_a = 18$ m.

مطابق شکل مذکور، بیشینه تغییرات میدان در یک ارتفاع حدود ۳ m حول هدف، در حضور و عدم حضور فنس‌ها، به ترتیب برابر ۱/۶ dB و ۶۴/۳۶ dB است. بنابراین مقدار قابل توجهی از اثر زمین و به میزان بیش از ۶۲ dB از تغییرات میدان ناشی از اثر زمین در محل هدف به واسطه حضور فنس‌ها حذف شده است.

مثال دوم نیز کاملاً شبیه به مثال اول بوده و صرفاً فرکانس به ۱۸ GHz افزایش پیدا کرده است. بنابراین مطابق مثال قبل، مولفه‌های زیر به منظور کاهش اثر زمین در ناحیه هدف، تنظیم و سپس شبیه‌سازی انجام می‌شود.

$$P = [918.7, 958.5, 1000, 1045.2, 1092.5,$$

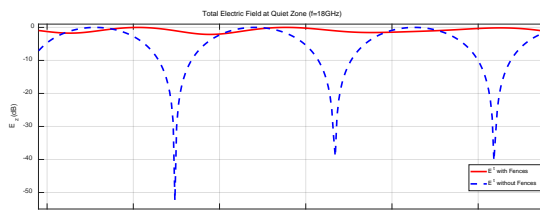
$$1142, 1193.6] m$$

$$z_1 = 14.95m, z_2 = 17.93m$$

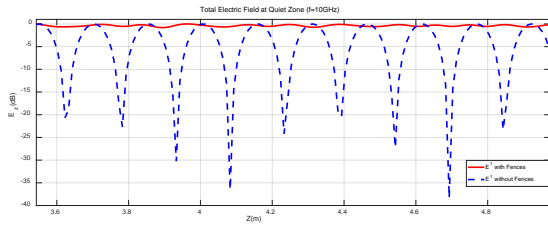
$$\Rightarrow \Delta z = 2.98m, L = 2m$$

$$h_a = 18m, f = 18GHz, \theta = 2^\circ$$

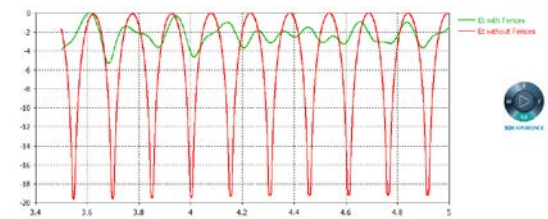
در این مثال نیز، به وسیله استفاده از فنس‌های فوق تغییرات میدان در محل هدف به شدت محدود شده و لذا تغییرات میدان به‌هنگار شده در ناحیه هدف در حضور و عدم حضور فنس‌ها، به‌صورت شکل (۱۴) خواهد بود.



شکل (۱۴): تغییرات میدان به‌هنگار شده کل حوالی هدف، در حضور و عدم حضور فنس‌ها در فرکانس ۱۸ GHz برای $R = 2$ km و $h_a = 18$ m.



شکل (۱۷): تغییرات میدان بهنجار شده کل حوالی هدف، در حضور و عدم حضور فنس‌ها در فرکانس ۱۰ GHz برای $h_a = 5\text{ m}$ و $R = 50\text{ m}$ استفاده از حل دو بُعدی کد ممان.



شکل (۱۸): تغییرات میدان بهنجار شده کل حوالی هدف، در حضور و عدم حضور فنس‌ها در فرکانس ۱۰ GHz برای $h_a = 5\text{ m}$ و $R = 50\text{ m}$ استفاده از حل مجانبی نرم‌افزار CST.

مطابق شکل (۱۷)، بیشینه تغییرات میدان در یک ارتفاع حدود $1/5\text{ m}$ حول هدف، در حضور و عدم حضور فنس‌ها به ترتیب برابر 0.82 dB و 38.36 dB است. از این رو مقدار قابل توجهی از اثر زمین و به میزان بیش از 37 dB از تغییرات میدان ناشی از اثر زمین در محل هدف به واسطه حضور فنس‌ها حذف شده است. با این وجود همانطور که در مثال قبل شرح داده شد و در شکل (۱۸) نیز مشاهده می‌شود، حل مجانبی نرم‌افزار CST قادر به تحلیل دقیق سطوح امپدانسی متصل به یکدیگر نیست.

برای شبیه‌سازی این مثال‌ها با استفاده از نرم‌افزار CST از یک سامانه با ۱۶ هسته و فرکانس ساعت $4/1\text{ GHz}$ استفاده شده است. با این وجود زمان شبیه‌سازی‌ها تا حدود ۲ ساعت به طول انجامید. در حالی که زمان مورد نیاز برای شبیه‌سازی این مثال‌ها با استفاده از کد ممان دو بُعدی و توسط یک سامانه با ۶ هسته و فرکانس ساعت $3/8\text{ GHz}$ کمتر از یک دقیقه است.

با توجه به پنج مثال ارائه شده در این مقاله، ایده استفاده از فنس‌های با تیپرینگ مقاومتی کاهش چشمگیر اثر زمین را به همراه داشته و لذا استفاده از این ایده در کاهش اثر زمین موفقیت‌آمیز بوده است.

لازم به ذکر است که تغییرات واقعی میدان ناشی از اثر زمین در محل هدف از $-\infty\text{ dB}$ تا $+6\text{ dB}$ در نوسان است. در واقع هر چقدر اثرات تداخلی سازنده و کاهنده میدان مسیره‌های مستقیم و غیرمستقیم کامل‌تر رخ دهد، میزان بازه تغییرات میدان در محل هدف نیز افزایش می‌یابد. بنابراین بسته به افزایش میدان در جهت ارتفاع، ممکن است در بعضی نقاط این تداخل کاهنده

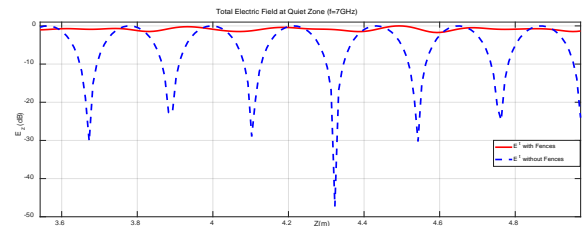
$$P = [21.45, 23.16, 25, 27.047, 29.26, 31.67, 34.27] \text{ m}$$

$$z_1 = 3.543\text{ m}, z_2 = 4.973\text{ m}$$

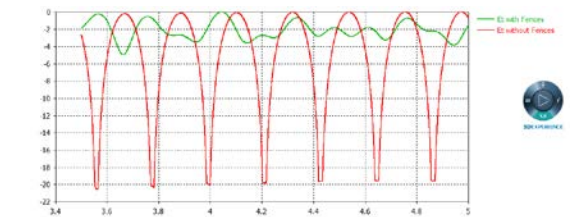
$$\Rightarrow \Delta z = 1.43\text{ m}, L = 1\text{ m}$$

$$h_a = 5\text{ m}, f = 7\text{ GHz}, \theta = 7^\circ$$

در شکل‌های (۱۵ و ۱۶) تغییرات میدان بهنجار شده مربوط به اثر زمین در حالت‌های با فنس و بدون فنس که به ترتیب به وسیله حل‌های دو بُعدی کد ممان و مجانبی نرم‌افزار CST تحلیل شده، آمده است.



شکل (۱۵): تغییرات میدان بهنجار شده کل حوالی هدف، در حضور و عدم حضور فنس‌ها در فرکانس ۷ GHz برای $h_a = 5\text{ m}$ و $R = 50\text{ m}$ استفاده از حل دو بُعدی کد ممان.



شکل (۱۶): تغییرات میدان بهنجار شده کل حوالی هدف، در حضور و عدم حضور فنس‌ها در فرکانس ۷ GHz برای $h_a = 5\text{ m}$ و $R = 50\text{ m}$ استفاده از حل مجانبی نرم‌افزار CST.

مطابق شکل (۱۵)، بیشینه تغییرات میدان در یک ارتفاع حدود $1/5\text{ m}$ حول هدف، در حضور و عدم حضور فنس‌ها به ترتیب برابر 1.74 dB و 47.3 dB است. از این رو مقدار قابل توجهی از اثر زمین و به میزان بیش از 45 dB از تغییرات میدان ناشی از اثر زمین در محل هدف به واسطه حضور فنس‌ها حذف شده است. با این وجود همانطور که قبلاً بیان شد و در شکل (۱۶) نیز مشاهده می‌شود، حل مجانبی نرم‌افزار CST قادر به تحلیل دقیق چند سطح امپدانسی متصل به یکدیگر نبوده و لذا خطای نسبتاً زیادی در محاسبات وارد می‌شود.

مثال پنجم نیز کاملاً شبیه به مثال چهارم بوده و صرفاً فرکانس به 10 GHz افزایش پیدا کرده است. بنابراین مطابق مثال قبل، مولفه‌های زیر به منظور کاهش اثر زمین در ناحیه هدف، تنظیم و سپس شبیه‌سازی انجام می‌شود.

$$P = [21.45, 23.16, 25, 27.047, 29.26, 31.67, 34.27] \text{ m}$$

$$z_1 = 3.543\text{ m}, z_2 = 4.973\text{ m}$$

$$\Rightarrow \Delta z = 1.43\text{ m}, L = 1\text{ m}$$

$$h_a = 5\text{ m}, f = 10\text{ GHz}, \theta = 7^\circ$$

۷- مراجع

- [1] M. Taslimi and A. Ebrahimzadeh, "Implementation of RCS Software Calculator Using Physical Optics Theorem (RCSP0)," *Journal of Radar*, vol. 4, no. 4, pp. 1-10, 2017 (In persian).
- [2] E.F. Knott, *Radar Cross Section Measurements*, New York: Van Nostrand Reinhold, 1993.
- [3] R.L. Haupt and V.V. Liepa, "Synthesis of Tapered Resistive Strips", *IEEE Transactions Antennas and Propagation*, vol. AP-35, No. 11, pp. 1217-1225, Nov. 1987.
- [4] R. Haupt and V.V. Liepa, "The Validity of Approximating Currents on a Resistive Strip Using Physical Optics", *Antennas and Propagation Society International Symposium*, Vol. 24, pp. 137-140, 1986.
- [5] T.B.A. Senior and V.V. Liepa, "Backscattering from Tapered Resistive Strips", *IEEE Transactions Antennas and Propagation*, vol. 32, No. 07, pp. 747-751, July. 1984.
- [6] T.B.A. Senior, "Scattering by resistive strip", *Radio Science*, Vol. 14, No. 5, pp. 911-924, October 1979.
- [7] T.B.A. Senior and J.L. Volakis, *Approximate Boundary Conditions in Electromagnetics*, London: The Institution of Electrical Engineers (IET), 1995.
- [8] W.L. Stutzman and Gary A. Thiele, *Antenna Theory and Design*", Third Edition, John Wiley & Sons, 2013.
- [9] V.K. Ingle and J.G. Proakis, *Digital Signal Processing Using MATLAB*, Third Edition, Cengage Learning, 2012.
- [10] W.C. Gibson, *The Method of Moments in Electromagnetics*, second edition, New York: Chapman & Hall/CRC, 2015.

بیشتر رخ داده و لذا تغییرات میدان در جهت منفی بیشتر شود. لیکن تغییرات قابل قبول میدان از $-\infty$ dB (برای حالتی که هر دو میدان مسیره‌های مستقیم و غیرمستقیم به‌صورت کاملاً غیرهم‌فاز با یکدیگر جمع شده باشند) تا $+6$ dB (برای حالتی که هر دو میدان مسیره‌های مستقیم و غیرمستقیم به‌صورت کاملاً هم‌فاز با یکدیگر جمع شده باشند) رخ می‌دهد. از این‌رو تفاوت‌های نشان داده شده برای تغییرات میدان در حالت بدون فنس، به‌دلیل افزایش غیرکامل در جهت ارتفاع است. در این مثال‌ها به‌منظور ایجاد شرایط مناسب برای مقایسه حل‌های دو بُعدی و مجانبی نرم‌افزار CST، تغییرات میدان به‌صورت به‌هنگار شده آمده و لذا بازه تغییرات میدان از $-\infty$ dB تا 0 dB است.

۶- نتیجه‌گیری

همانطور که در بخش‌های قبل ملاحظه شد، به‌منظور ایجاد یک ناحیه ساکت در محل هدف و حوالی آن، لازم است بازتاب میدان از سطح زمین حذف و یا به حداقل مقدار ممکن برسد. روش‌های متعددی برای حذف و یا کاهش این اثر وجود دارد که از آن جمله می‌توان به زمین هشتی، فنس‌های فلزی، جاذب بر روی زمین و تغییر ارتفاع آنتن‌ها اشاره کرد. در این مقاله برای اولین بار از فنس‌های با تیپرینگ مقاومتی برای حذف اثر زمین استفاده شد. بنابراین با استفاده از ۷ عدد فنس با تیپرینگ مقاومتی و طراحی یک چیدمان مطلوب برای آن‌ها، اثر بازتاب زمین بر اندازه‌گیری RCS تا حد زیادی حذف شده است. این موضوع با رسم تغییرات میدان به‌هنگار شده در حوالی هدف و در راستای ارتفاع با حضور و عدم حضور فنس‌ها در قالب چند مثال و در شکل‌های (۱۳ تا ۱۸) نشان داده شده است. همچنین میدان پراکنده شده در محل آنتن، در حضور و عدم حضور فنس‌ها و یکبار هم در عدم حضور زمین محاسبه و نتیجه به‌دست آمده در جدول (۱) ارائه شد، که موفقیت روش مذکور را بار دیگر تأیید کرد. در این مقاله یک بار کل ساختار به‌صورت دو بُعدی در نظر گرفته شده و لذا از یک کد ممان دو بُعدی برای تحلیل آن استفاده شد، در مرحله بعد به‌منظور صحت‌سنجی توأمان فنس‌ها و طراحی چیدمان آن‌ها و همچنین کد ممان دو بُعدی، از حل مجانبی نرم‌افزار CST نیز استفاده شده است. همانطور که مشاهده شد، حل مجانبی نرم‌افزار CST در تحلیل ساختارهایی که از اتصال چند سطح با امپدانس متفاوت تشکیل شده، ناتوان است. بنابراین حل ممان دو بُعدی استفاده شده در این مقاله به‌عنوان تنها راه‌حل تحلیل این دسته از مسائل مطرح می‌باشد.

