

جبران سازی اثرات اختلال سطح آنتن بازتابنده با استفاده از بازتابنده فرعی شکل داده شده

سید ابوالفضل حدادی^۱، ایاز قربانی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، ۲- دانشیار، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت: ۹۵/۰۸/۰۲؛ پذیرش: ۹۵/۱۱/۱۲)

چکیده

ظواهر شدن اختلال بر سطح بازتابنده اصلی سبب تغییر الگوی تشعشعی در آنتن‌های بازتابنده شده و ویژگی‌های تشعشعی این آنتن را به خصوص در فرکانس‌های بالا تخریب می‌کند. روش‌های متفاوتی برای جبران سازی اثرات نامطلوب اختلال سطح بازتابنده اصلی وجود دارد. در این مقاله، نشان داده می‌شود که چگونه می‌توان با استفاده از شکل‌دهی سطح بازتابنده فرعی اقدام به جبران سازی این اثرات نمود. بر مبنای ریاضیات وردشی می‌توان الگوی تشعشعی آنتن بازتابنده را خطی سازی و به صورت ماتریسی بازنویسی کرد. با استفاده از روش تفکیک مقادیر ویژه می‌توان اقدام به حل مسئله معکوس نموده و نشان داده می‌شود که برای یک ساختار دوبازتابنده‌ای، روش ارائه شده با دقت مناسبی قادر به طراحی بازتابنده فرعی مطلوب است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که اگر دامنه اختلال سطح بازتابنده اصلی کمتر از یک چهارم طول موج باشد، الگوریتم ارائه شده با دقت و سرعت قادر به طراحی بازتابنده فرعی مورد نظر است.

واژگان کلیدی

آنتن بازتابنده، روش نور فیزیکی، اختلالات سطح، جبران سازی، بازتابنده فرعی شکل داده شده.

۱- مقدمه

لبه‌ها، نظریه هندسی پراش (GTD) جهت اصلاح روش GO و فیزیکی پراش (PTD) برای اصلاح روش PO ارائه شده‌اند [۲]. چنانچه هدف از تحلیل، تعیین الگوی تشعشعی در محدوده پرتو اصلی و چند گل‌برگ کناری اول باشد روش PO دارای دقت و سادگی در پیاده سازی است [۴]. این در حالی است که روش‌های GO/GTD در محل پرتو اصلی قادر به تعیین جهت‌مندی نیستند [۵].

از نظر تئوری، آنتن بازتابنده دارای پهنای باند نامحدود است. آن‌چه در عمل سبب محدود شدن پهنای باند می‌شود، اختلال سطح روی بازتابنده است که از هم فاز شدن میدان‌های بازتابش جلوگیری می‌کند. این پدیده به خصوص در فرکانس‌های بالاتر با کاهش طول موج و بزرگ شدن اثرات اختلال سطح، مشهودتر است [۳]. این نوع اختلال به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند [۶]: اختلال تصادفی و اختلال منظم.

اختلال تصادفی ناشی از پدیده‌های تصادفی در فرآیندهای ساخت و نصب بازتابنده هستند [۷]. ماشین‌های تولیدکننده سطوح بازتابنده دقتی محدود دارند. همچنین نصب این سطوح نیز با ادواتی صورت می‌پذیرد که دارای دقت محدودی هستند. تمامی این موارد به صورت تصادفی ظاهر می‌شوند و تفکیک حد اثرگذاری آن‌ها چندان میسر نیست. در هر حال، ترکیب این اثرات موجب تغییرات اغلب نامطلوبی در رفتار الگوی تشعشعی آنتن می‌شوند.

اگرچه که ویژگی‌های آنتن بازتابنده توسط ایزاک نیوتون در قرن ۱۶ میلادی کشف شده و در تلسکوپ‌های بازتابی از آن استفاده شد، اما این آنتن تا جنگ جهانی دوم، جز در اخترشناسی، چندان مورد توجه قرار نگرفت [۱]. از آن پس، کاربردهای متعدد راداری، ماهواره‌ای و سنجشی برای این آنتن تعریف شده و مورد استفاده قرار گرفته است [۲]. به دلیل بهره زیاد، از این آنتن در مخابرات ماهواره‌ای، زمینی، عمق فضا و عکس برداری‌های راداری استفاده می‌شود [۳]. مزیت اصلی این آنتن، ارائه بهره بالا، پهنای باند وسیع و هزینه نسبتاً کم است. آنتن با بازتابنده اصلی سه‌موی از متداول‌ترین انواع این آنتن است. این آنتن‌ها می‌توانند قطری تا ۱۰۰۰ برابر طول موج داشته باشند و محدوده فرکانسی آن‌ها می‌تواند از ۲۰۰ MHz تا ۶۰۰ GHz باشد [۱].

تکنیک‌های متفاوتی برای تحلیل آنتن‌های بازتابنده وجود دارد. به دلیل بزرگ بودن ساختارهای بازتابنده نسبت به طول موج، استفاده از روش‌هایی چون ممان (MoM) و المان محدود (FEM) چندان متداول نیست. در عوض، روش‌های مجانبی با بهره‌گیری از مفهوم ردگیری اشعه یا جریان القایی در این گونه ساختارها بسیار کارآمد هستند. روش نور هندسی (GO) بر مبنای ردگیری اشعه و روش نور فیزیکی (PO) بر مبنای جریان القایی از معروف‌ترین روش‌های مجانبی هستند. برای دخیل کردن پراش

مکانیکی سطح به صورت اکتیو [۳۴-۳۵] که از این روش به خصوص در رادیوتلسکوپ‌هایی که بازتابنده آن‌ها به صورت پنل‌های مجاور هم است، استفاده می‌شود [۳۶-۳۷]. این روش اغلب نیازمند صرف هزینه بالایی است و جز در مورد سازه‌های عظیم توجیه ندارد.

۲- استفاده از آرایه تغذیه که [۴۱-۴۸] در این روش میدان تابشی به سطح اختلال یافته به گونه‌ای تغییر می‌یابد که انحراف فاز دهانه‌ای ناشی از جابه‌جایی سطح، توسط میدان تغذیه جبران شود. طراحی شبکه و ساخت آن‌ها موجب افزایش هزینه و وزن و پیچیدگی سامانه خواهد شد.

۳- استفاده از رفکتور فرعی شکل یافته [۴۵-۴۸] که موضوع مورد بحث در این مقاله است، نیز روشی متداول است. در این حالت اختلال سطح بازتابنده اصلی با ایجاد برآمدگی و فرورفتگی و به اصطلاح شکل‌دهی بازتابنده فرعی جبران‌سازی می‌شود. این روش از نظر پیاده‌سازی ساده‌تر از دو روش دیگر است به خصوص در مواقعی که هزینه‌های مالی جز فاکتورهای طراحی باشد. البته نقطه ضعف این راه‌کار آن است که در این روش اختلال سطح بازتابنده اصلی یک‌بار برای همیشه با بازتابنده فرعی جبران می‌شوند و در صورت بروز اختلال جدید، این اختلال قابل جبران‌سازی نیستند. البته بازتابنده فرعی در برخی موارد به صورت آرایه بازتابی تخت و سطوح تخت شکل‌پذیر نیز گزارش شده که این حالت مورد بحث ما نخواهد بود.

این مقاله درصدد آن است تا برای یک آنتن دوبازتابنده‌ای، سطح بازتابنده فرعی را به گونه‌ای شکل دهیم که میدان تشعشی از بازتابنده اصلی اختلال یافته تا حد ممکن نزدیک به میدان تشعشی آنتن بدون اختلال باشد. یک راه‌حل ساده، استفاده از تقریب اشعه نور هندسی است و به این ترتیب مسیر اشعه‌های مختلف از تغذیه به بازتابنده فرعی و از بازتابنده فرعی به بازتابنده اصلی یکسان می‌شود. این تقریب، دچار عدم دقت زیاد به دلیل در نظر نگرفتن پدیده‌های پراش است و از این رو در این مقاله مورد توجه قرار نگرفته و در عوض از تقریب نور هندسی استفاده خواهد شد.

در [۲۵] تعداد زیادی پارامتر برای توصیف سطح رفکتور فرعی و اصلی استوانه‌ای (و نه سهموی) استفاده شده و با پیاده‌سازی یک الگوریتم بهینه‌سازی، پارامترهای توصیفی سطح بازتابنده فرعی به دست می‌آیند. چنین روشی نیازمند تعداد تکرارهای زیاد است و در بازتابنده‌های بزرگ چندان کارآمد نخواهد بود. در این مقاله نشان داده خواهد شد که با داشتن یک رابطه خطی بین تغییرات میدان‌های تشعشی و تابع اختلال سطح، مسئله طراحی بازتابنده فرعی جبران‌ساز با سرعت قابل حل است.

نویسندگان مقاله حاضر در مقاله‌ای جداگانه اقدام به خطی‌سازی الگوی تشعشی آنتن بازتابنده اختلال یافته نموده‌اند [۴۶]. این فرمول‌بندی قادر است تا در حضور اختلالی با دامنه کمتر از یک‌چهارم طول موج با دقتی بسیار بالا الگوی تشعشی

در [۷] یک رابطه آماری مفید برای افت جهت‌مندی آنتن بازتابنده ارائه شده است. سپس در [۸] توضیح داده شد که فرمول مذکور میزان افت بهره را بیشتر از مقدار واقعی تخمین می‌زند و بر این مبنا مدلی برای اصلاح این رابطه ارائه شد. البته کارهای دیگری نیز برای تحلیل اثرات اختلال تصادفی بر سطح پلاریزاسیون متعامد [۹-۱۰]، سطح گل‌برگ‌های جانبی [۱۱-۱۳] و شکل الگوی تشعشی [۱۴-۱۵] نیز صورت پذیرفته است. در تمامی این کارها از تقریب نورهندسی استفاده شده است.

اختلال منظم ناشی از پدیده‌های است که قابل اندازه‌گیری و اجتناب هستند. تغییرات دمایی منجر به تغییر سطوح بازتابنده می‌شوند. همچنین گرانش زمین نیز باعث ایجاد اختلال بر سطح آنتن می‌شود. لرزش‌ها و تنش‌های ناشی از فرآیند جهت‌گیری نیز به صورت دینامیک سطح را تغییر می‌دهد. در این حالت، تحلیل‌های آماری کارآمد نیست و باید برای هر شکلی از اختلال، تحلیل جداگانه داشت.

برای رده‌ای از اختلال‌های منظم متداول در برخی مقالات تلاش‌هایی برای شناسایی اثرات اختلالی بر بهره محوری، سطح گل‌برگ‌های کناری، سطح پلاریزاسیون متقاطع و شکل الگوی تشعشی صورت پذیرفته است [۴، ۲۴-۱۶]. همچنین، اختلال‌های متناوب باعث بروز گل‌برگ‌های گریپینگ می‌شود که در [۱۸-۱۷، ۲۵] مورد توجه قرار گرفته است. در تمامی این کارها، کلاسی از اختلال در نظر گرفته شده و نحوه تغییرات پارامترهای تشعشی رصد شده است.

برای تعیین اختلال سطح بازتابنده در عمل از روش فوتوگرامتری [۲۶-۲۷] استفاده می‌شود. در این روش نشان‌گرهایی بر سطح بازتابنده نصب می‌شود و با دوربینی مخصوص موقعیت این نشان‌گرها تعیین می‌شود. هزینه تامین و نگهداری تجهیزات در این روش، آن‌را برای بازتابنده‌های عظیم مناسب می‌سازد.

روش دیگر، انجام هولوگرافی [۲۸-۳۰] است. در این روش دامنه و فاز میدان دور آنتن در محدوده زاویه‌ای نسبتاً وسیع و در تعداد نقاط زیادی اندازه‌گیری شده و از روی تبدیل فوریه معکوس آن، میدان‌های دهانه‌ای آنتن بازتابنده به دست می‌آیند. با داشتن فاز نسبی میدان‌های دهانه‌ای می‌توان اختلال سطح را ارزیابی نمود. انجام هولوگرافی اغلب وقت‌گیر است و برای اختلال‌های متغیر ممکن است در زمان هولوگرافی شاهد تغییر سطح باشیم [۳۱-۳۲].

در عمل اختلال سطح اجتناب‌ناپذیر است و گاهی اثرات این اختلال آن قدر زیاد است که نیاز به مهار این اثرات مخرب داریم. راه‌کارهای متفاوتی برای جبران‌سازی اثرات اختلال سطح بازتابنده داریم. از این میان می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد [۳۳]:

۱- قراردادن محرک‌های مکانیکی پشت بازتابنده و اصلاح

$\{x_f, y_f, z_f\}$ بیان شده‌اند. همچنین یک دستگاه مختصات اصلی به صورت $\{x, y, z\}$ در نظر گرفته شده است که نتایج نهایی مسئله و میدان‌های تشعشی نهایی در آن بیان می‌شوند. به علاوه از این دستگاه مختصات به عنوان دستگاه مختصات واسط در تبدیل مختصات بین اجزا نیز استفاده می‌شود.

یک رهیافت بسیار قوی در تحلیل تشعشع از بازتابنده شامل تخمین جریان‌های روی سطح بازتابنده و تبدیل این جریان‌ها به میدان‌های دور با استفاده از قوانین ماکسول است. یک تقریب مناسب آن است که فرض کنیم در هر نقطه از بازتابنده جریان القایی به گونه‌ای است که گویی آن نقطه بخشی از یک هادی صفحه‌ای بی نهایت است. این تقریب را تقریب نور فیزیکی می‌نامند [۲].

در تقریب نور فیزیکی جریان سطحی روی نقاط سطح بازتابنده

$$\vec{J}^{PO} = 2\hat{u}_N \times \vec{H}^{inc} \quad (1)$$

تقریب زده می‌شود که در آن بردار نرمال یکه سطح بازتابنده است که به سمت آنتن تغذیه نشانه می‌رود. بردار \vec{H}^{inc} میدان مغناطیسی تشعشی تابش یافته توسط آنتن تغذیه است. با داشتن جریان، میدان دور تشعشی از بازتابنده با انتگرال‌های تشعشی قابل تعیین است.

طبق تقریب نور فیزیکی تابع تشعشی به صورت زیر است:

$$\vec{G}(\theta, \phi) = \frac{\eta}{j2\lambda} \hat{u}_N \times \left[\iint_{\Sigma} \vec{J}^{PO} e^{jk\vec{r}' \cdot \hat{u}_r} d\Sigma \right] \times \hat{u}_N \quad (2)$$

که در آن، λ طول موج، η امپدانس فضای آزاد و $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ عدد موج است.

در رابطه (۲)، \vec{r}' بردار موقعیت نقاط بر روی سطح بازتابنده بوده و بردار نرمال در راستای نقطه مشاهده در میدان دور است که به صورت زیر قابل ارزیابی است:

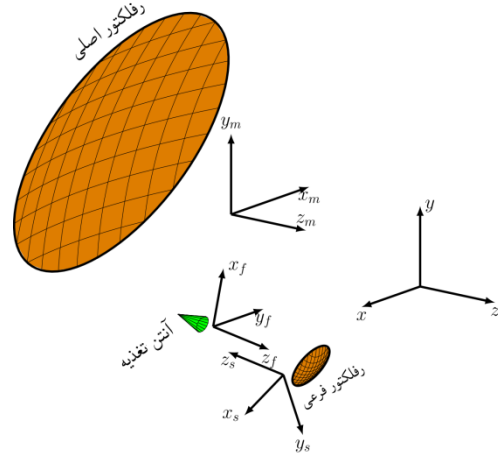
$$\hat{u}_r = \sin \theta \cos \phi \hat{u}_x + \sin \theta \sin \phi \hat{u}_y + \cos \theta \hat{u}_z \quad (3)$$

چنانچه قصد محاسبه میدان تشعشی در میدان نزدیک را داشته باشیم، می‌توان از فرمول بندی (۴) استفاده نمود.

$$\vec{E}(\vec{r}, \theta, \phi) = -jk\eta \iint_{\Sigma} \left[\frac{e^{-jk|\vec{R}|}}{4\pi|\vec{R}|} \left(1 + \frac{1}{jk|\vec{R}|} + \frac{1}{(jk|\vec{R}|)^2} \right) \vec{J}^{PO} - \left(1 + \frac{3}{jk|\vec{R}|} + \frac{3}{(jk|\vec{R}|)^2} \right) (\vec{J}^{PO} \cdot \hat{u}_R) \hat{u}_R \right] d\Sigma, \quad (4)$$

که در آن، $\vec{R} = \vec{r} - \vec{r}'$ بوده و میدان مغناطیسی نیز از قوانین ماکسول قابل تعیین است.

اختلال یافته را تعیین نماید. در این مقاله، این فرمول بندی به صورت ماتریسی بازنویسی شده و حالت معکوس آن برای یافتن اختلال سطح حل می‌شود. سرعت حل مسئله در مقاله حاضر بسیار بالا خواهد بود. این رهیافت قابل استفاده برای هر نوع آنتن بازتابنده، ساده تر از نظر پیاده سازی و دارای سرعت بالاتر است.



شکل (۱). اجزای مسئله در تحلیل آنتن‌های بازتابنده شامل آنتن تغذیه، بازتابنده فرعی و آنتن تغذیه و دستگاه‌های مختصات مرتبط با هر یک.

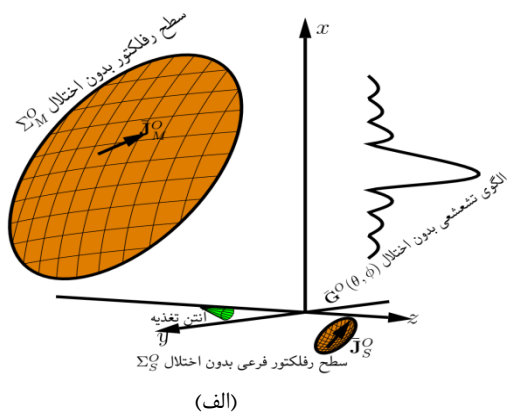
در [۴۵] بر اساس تقریبی که دارای دقتی کمتر از فرمول بندی پیشنهادی این مقاله است، روشی برای حل مسئله جبران سازی ارائه شده است. نحوه استخراج میدان مغناطیسی بهینه در این کار بسیار پیچیده است و در این جا فرمول بندی بسیار ساده تری برای این کار ارائه خواهد شد. همچنین، به دلیل دقت بالاتر فرمول بندی این مقاله، سطوح بالاتری از اختلال (یک چهارم طول موج) برای سطوح منظور می‌شود، حال آن که در مقاله مذکور، این سطح تنها یک دهم طول موج است.

در ادامه ابتدا به معرفی ریاضیات تحلیل مسئله پرداخته شده و پس از آن، مسئله جبران سازی، تحلیل خواهد شد. با داشتن فرمول بندی، حل مسئله برای یک ساختار نمونه، یک بازتابنده جبران ساز طراحی خواهد شد و نمودارهای الگوی تشعشی تشریح خواهند شد. در بخش آخر، جمع بندی مقاله ارائه خواهد شد.

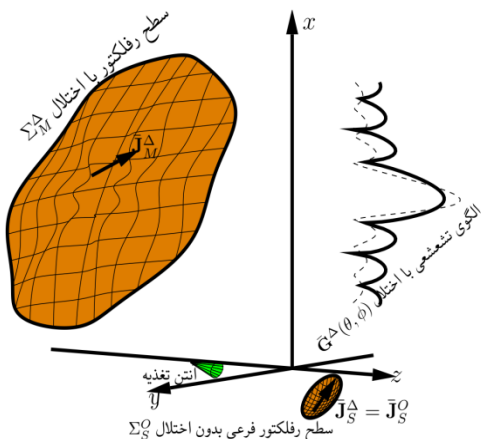
۲- ریاضیات مسئله و فرمول بندی

در حالت کلی، سطح بازتابنده اصلی، سطح بازتابنده فرعی و آنتن تغذیه، اجزای اصلی در مسئله تحلیل آنتن‌های بازتابنده هستند. برای هر یک از این اجزا بایستی تحلیل‌های الکترومغناطیسی صورت پذیرد. از این رو بایستی هندسه هر یک از این اجزا شناسایی شود. در شکل (۱) این اجزا نمایش یافته‌اند.

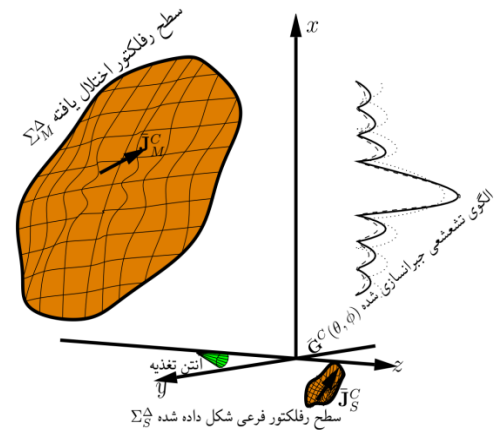
ملاحظه می‌شود که برای بازتابنده اصلی، بازتابنده فرعی و آنتن تغذیه به صورت جداگانه دستگاه‌های مختصاتی فرض شده است که به ترتیب به صورت $\{x_m, y_m, z_m\}$ ، $\{x_s, y_s, z_s\}$ و



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۲). توصیف حالت‌های مختلف در حل مسئله جبران‌سازی. (الف) ساختار ایده‌آل بدون اختلال که هدف از جبران‌سازی، بازسازی الگوی تشعشی به صورت $\bar{G}^O(\theta, \phi)$ است، (ب) ساختار اختلال‌یافته که اثرات اختلال سطح بازتابنده اصلی در آن سبب خراب‌شدن الگوی تشعشی و تغییر آن به $\bar{G}^\Delta(\theta, \phi)$ شده و (ج) ساختار جبران‌سازی‌شده که در آن به تغییر شکل سطح بازتابنده فرعی، می‌توان الگوی تشعشی $\bar{G}^C(\theta, \phi)$ را تا حد ممکن به حالت ایده‌آل در شکل (الف) نزدیک نمود.

ماتریس $[U]$ یک ماتریس $M \times M$ و شامل مجموعه‌ای از بردارهای ویژه‌ی خروجی ماتریس $[T]$ است. همچنین $[V]$ نیز

۱-۲- خطی‌سازی انتگرال تشعشی

در [۴۶] به این موضوع پرداخته شده است که با بروز اختلال بر سطح بازتابنده، تغییرات الگوی تشعشی آنتن چگونه با رفتار تابع اختلال مرتبط است. تغییرات تابع میدان دور یک آنتن بازتابنده به دلیل ایجاد اختلال سطح عبارت است از:

$$\Delta G_{co} = G_{co}^{dis} - G_{co}^{undis} \approx \int_{\psi} \int_t \left[\hat{u}_{co} \cdot \frac{\delta \bar{F}[z]}{\delta z(t, \psi)} \right] \Delta z(t, \psi) dt d\psi \quad (5)$$

که در آن، $\frac{\delta \bar{F}[z]}{\delta z(t, \psi)}$ مشتق وردشی است که در [۴۶] به دست آمده است. همچنین بردار یکه پلاریزاسیون اصلی است و طبق تعریف سوم لودویگ [۴۷] به دست می‌آید. متغیرهای t و ψ به صورت قطبی در دهانه بازتابنده اصلی تعریف می‌شوند تا انتگرال سطحی به انتگرال دوگانه تبدیل شود.

رابطه (۵) را می‌توان در فرم ماتریسی نیز ارائه نمود. چنان‌چه بخواهیم برای M نقطه مشاهده در زوایای (θ_j, ϕ_j) که در آن $M, j = 1, \dots, M$ مسئله را حل کنیم، خواهیم داشت:

$$[\Delta G_{co}] = [T][\Delta z] \quad (6)$$

که در آن، $[\Delta G_{co}]$ ماتریسی $M \times 1$ به صورت $[\Delta G_{co}(\theta_1, \phi_1), \dots, \Delta G_{co}(\theta_M, \phi_M)]^T$ و شامل تغییرات تابع میدان دور در راستای نقاط مشاهده است. همچنین ماتریس $[T]$ یک ماتریس مستطیلی $M \times N$ است که عناصر آن عبارتند از:

$$T_{ij} = \frac{\eta}{j\lambda} \left(\hat{u}_{co} \cdot \frac{\delta \bar{F}[z]}{\delta z(t_i, \psi_i)} \right) w_i \quad (7)$$

همچنین ماتریس Δz ماتریسی $N \times 1$ است و $[\Delta z(t_1, \psi_1), \dots, \Delta z(t_N, \psi_N)]^T$ شامل اختلال سطح در نقاط روی سطح بازتابنده است. به این ترتیب رابطه (۶)، فرم ماتریسی مسئله مستقیم است. با داشتن ماتریس اختلال $[\Delta z]$ و تشکیل ماتریس سامانه $[T]$ ، می‌توان تغییرات تابع میدان دور را از روی ماتریس $[\Delta G_{co}]$ تعیین نمود.

۲-۲- حل مسئله معکوس: تعیین تابع اختلال

برای تعیین تابع اختلال از روی تغییرات میدان‌های تشعشی، با مسئله معکوس رو به رو خواهیم بود. همان‌طور که در بخش قبل دیدیم، مسئله مستقیم یعنی تعیین تغییرات میدان‌های تشعشی از روی تابع اختلال با استفاده از رابطه (۶) قابل حل است. در این بخش با حل مسئله معکوس رابطه‌ی (۶) سروکار داریم.

بر اساس روش تفکیک مقادیر ویژه (SVD) در حالت کلی ماتریس مستطیلی $[T]$ قابل بازنویسی به صورت حاصل ضرب سه ماتریس است [۴۸]:

$$[T]_{M \times N} = [U]_{M \times M} [\Sigma]_{M \times N} [V]_{N \times N}^T \quad (8)$$

اختلال سطح بازتابنده اصلی، سطح بازتابنده فرعی را به گونه‌ای تغییر شکل داد که الگوی تشعشی جبران سازی شده $\bar{G}^C(\theta, \phi)$ به الگوی ایده آل $\bar{G}^0(\theta, \phi)$ نزدیک باشد.

در شکل (۲-ج) هندسه مسئله جبران سازی آمده است. در این حالت میدان آنتن تغذیه بر روی سطح بازتابنده فرعی جبران ساز، Σ_S^C ، یک جریان سطحی متفاوت $\bar{J}_S^C = 2\hat{u}_{N\Sigma_S^C} \times \bar{H}_S^C$ به صورت القاء می‌نماید. به همین ترتیب، سطح مختل بازتابنده اصلی نیز دارای جریان سطحی $\bar{J}_M^C = 2\hat{u}_{N\Sigma_M^A} \times \bar{H}_S^C$ می‌شود و الگوی تشعشی نهایی نیز $\bar{G}^C(\theta, \phi)$ خواهد بود

۲-۵- فرمول بندی حل مسئله جبران سازی

در مسئله‌ی جبران سازی به دنبال آنیم که

$$\min \Delta G_{co}^C(\theta, \phi) = \left\| G_{co}^0(\theta, \phi) - G_{co}^C(\theta, \phi) \right\|, \quad (10)$$

for $\theta < \theta_m$, and $0 < \phi < 2\pi$,

یا به عبارت دیگر، بایستی برای محدوده مشاهده مطلوب اختلال الگوی تشعشی جبران سازی شده با الگوی ایده آل کمینه گردد.

برای این کار بایستی ابتدا جریان القایی بهینه روی سطح بازتابنده اصلی به گونه‌ای تعیین گردد که بتواند تشعشع $G_{co}^0(\theta, \phi)$ را فراهم آورد. این جریان بهینه روی سطح بازتابنده اصلی عبارت است از:

$$\bar{J}_M^{C, opt} = \bar{J}_M^O e^{-jk\Delta z_M} \quad (11)$$

که در آن Δz_M همان اختلال موجود بر سطح بازتابنده اصلی است. با تقریب مناسبی می‌توان میدان مغناطیسی بهینه بر سطح بازتابنده اصلی و تشعشع یافته از بازتابنده فرعی را نیز از رابطه اخیر تعیین نمود:

$$\bar{H}_S^{C, opt} = \bar{H}_S^O e^{-jk\Delta z_M}. \quad (12)$$

به این ترتیب می‌توان تغییرات میدان تابشی از بازتابنده فرعی بر بازتابنده اصلی را به دست آورد که عبارت است از:

$$\begin{aligned} \Delta \bar{H}_S^C &= \bar{H}_S^{C, opt} - \bar{H}_S^O = \bar{H}_S^O (e^{jk\Delta z_M} - 1) \\ &= -2j\bar{H}_S^O e^{-jk\frac{\Delta z_M}{2}} \sin\left(k\frac{\Delta z_M}{2}\right) \end{aligned} \quad (13)$$

حال بایستی سطح بازتابنده فرعی به گونه‌ای تغییر شکل یابد که بتواند این تغییرات در میدان مغناطیسی بر روی نقاط بازتابنده اصلی را ایجاد نماید. ملاحظه می‌شود که در این حالت نیز با مسئله‌ای نظیر مسئله تخمین رو به رو هستیم. به این معنی که تغییرات میدان تشعشی از بازتابنده را داریم و به دنبال تغییرات سطح بازتابنده فرعی هستیم. این مسئله نیز به صورت ماتریسی قابل فرمول بندی است:

ماتریسی $M \times M$ که مجموعه‌ای از بردارهای ویژه‌ی ورودی ماتریس $[T]$ را شامل می‌شود. در نهایت ماتریس $[\Sigma]$ یک ماتریس قطری $M \times N$ است که عناصر قطر آن همان مقادیر ویژه ماتریس $[T]$ هستند. همچنین عملگر $[]^T$ به صورت ترانهاده‌ی مزدوج عمل می‌کند [۴۸-۴۹]. با استفاده از مفهوم شبه-معکوس در جبر خطی بر مبنای روش SVD می‌توان حل معکوس رابطه‌ی (۶) را بر مبنای رابطه‌ی (۸) به صورت زیر نوشت

$$[\Delta z] = [V][\Sigma]^+ [U]^T [\Delta G_{co}]. \quad (9)$$

که $[\Sigma]^+$ ترانهاده (transpose) ماتریس $[\Sigma]$ است که در آن عناصر غیرصفر با معکوس آن‌ها جایگزین شده است.

۲-۳- توصیف مسئله آنتن دوبازتابنده‌ای

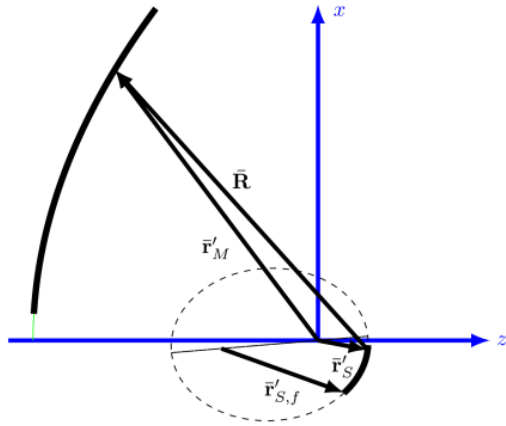
با توجه به شکل (۲-الف) می‌توان گفت که مسئله شامل سه جزء آنتن تغذیه، بازتابنده فرعی (سطح Σ_S^O) و بازتابنده اصلی (سطح Σ_M^O) است. بالا نویس 0 برای توصیف سطحی است که مختل نشده باشد. البته در شکل مذکور از هندسه گریگورین استفاده شده که در آن سطح بازتابنده فرعی به صورت محدب و بخشی از یک بیضی گون دوار است. در حالت کسگرین این سطح به صورت مقعر (بخشی از یک هذلولی) مطرح می‌شود.

میدان مغناطیسی تابشی از آنتن تغذیه \bar{H}^{feed} در برخورد با سطح بازتابنده فرعی سبب القای جریان سطح \bar{J}_S^O می‌گردد که در تقریب نور هندسی $\bar{J}_S^{PO} = 2\hat{u}_{N\Sigma_S^O} \times \bar{H}^{feed}$ قابل تقریب است. این جریان نیز میدان مغناطیسی تشعشی \bar{H}_S^O را فراهم می‌آورد که با استفاده از رابطه (۲) به عنوان میدان تغذیه به سطح بازتابنده اصلی (سطح Σ_M^O) می‌تابد. در نهایت با القای جریان سطحی $\bar{J}_M^O = 2\hat{u}_{N\Sigma_M^O} \times \bar{H}_S^O$ روی بازتابنده اصلی، عامل اصلی تشعشع آنتن فراهم می‌آید. پترن تشعشی نهایی آنتن را با $\bar{G}^0(\theta, \phi)$ نمایش می‌دهند.

۲-۴- مسئله جبران سازی

با بروز اختلال بر سطح بازتابنده اصلی، با مسئله جدید روبه رو هستیم. این حالت در شکل (۲-ب) نمایش داده شده است. سطح اختلال یافته برای بازتابنده اصلی را با Σ_M^A نشان داده می‌شود که به دلیل اختلاف با سطح Σ_M^O جریان سطحی روی آن به $\bar{J}_M^A = 2\hat{u}_{N\Sigma_M^A} \times \bar{H}_S^A$ تغییر یافته است. این جریان نیز سبب انتشار تابع تشعشی $\bar{G}^A(\theta, \phi)$ می‌گردد که با $\bar{G}^0(\theta, \phi)$ متفاوت است. هدف از جبران سازی، نزدیک کردن این دو الگو به یکدیگر است.

در بخش ۲-۲ به این مطلب پرداخته شد که چگونه می‌توان از روی تغییرات میدان تشعشی $\Delta G_p = G_p^A - G_p^O$ تخمینی از اختلال سطح بازتابنده اصلی به دست آورد. به هر حال، آن چه در این بخش مطرح است آن است که چگونه می‌توان در حضور



شکل (۳). تشریح مفهوم بردار \bar{R} و $\hat{u}_{r_{S,f}}$

که در آن، ماتریس‌های $[V_S]$ ، $[\Sigma_S]$ و $[U_S]$ با روش SVD تشریح شده در رابطه (۸) به دست می‌آیند.

۶-۲- فلوجارت پیشنهادی

برای یافتن سطح بازتابنده فرعی جبران‌ساز فلوجارتی همانند شکل (۴) ارائه نمود. براساس این الگوی حل مسئله، می‌توان حلقه تکرار تعیین سطح را تا آنجا تکرار نمود که بهره محوری در ساختار جبران‌سازی شده به بهره ساختار ایده‌آل نزدیک گردد. البته در عمل با انتخاب مناسب الگوی نمونه‌برداری از سطح بازتابنده‌ها، تعداد این تکرارها محدود است و همگرایی به‌نحو مناسبی رخ می‌دهد.

با انتخاب مناسب تعداد نقاط روی سطح بازتابنده فرعی و اصلی می‌توان دقت و همگرایی پاسخ‌ها را بهبود داد. بر همین اساس در بخش بعدی به این موضوع خواهیم پرداخت.

۷-۲- نکات مرتبط با دقت و همگرایی روش

پیشنهادی

براساس تئوری نایکوئیست، انتخاب مناسب تعداد و محل نقاط مشاهده سبب همگرایی روش شده و مسئله را از حالت بد وضعیتی خارج می‌سازد. در مسئله جبران‌سازی نقاط مشاهده روی سطح بازتابنده اصلی واقع هستند. از این نقطه نظر بایستی نمونه‌برداری از سطح بازتابنده اصلی به صورت شبکه‌بندی مستطیلی (و نه دایره‌ای) صورت پذیرد. همچنین فاصله‌گذاری این نقاط بایستی بزرگ‌تر از نیم طول موج باشد. به این ترتیب می‌توان عدد وضعیت ماتریس $[T_{S,p}]$ را کنترل نمود و همگرایی روش را محقق کرد.

$$[\Delta H_{M,p}] = [T_{S,p}] [\Delta z_S] \quad (14)$$

که در آن، بردار شامل تغییرات سطح در نقاط مختلف (N_{Σ_S} نقطه) بازتابنده فرعی است. همچنین برداری $[\Delta H_{M,p}]_{N_{\Sigma_M} \times 1}$ شامل تغییرات میدان تشعشعی از بازتابنده فرعی که روی N_{Σ_M} نقطه از سطح بازتابنده اصلی اختلال یافته Σ_M^A ارزیابی می‌شود. ماتریس $[T_{S,p}]$ همان ماتریس سامانه است که در بخش ۲-۱ معرفی شد:

$$T_{S,p}(i, j) = -jk \left(\hat{u}_p(\theta_j, \phi_j) \cdot \frac{\delta \bar{F}_S}{\delta z_S(t_i, \psi_i)} \right) w_i, \quad (15)$$

که در آن، مشتق تابعی انتگرال تشعشعی برای بازتابنده فرعی است. به دلیل ارزیابی میدان تشعشعی بازتابنده فرعی در میدان نزدیک، تفاوت‌هایی در فرمول مشتق وردشی وجود دارد. بردار پلاریزاسیون \hat{u}_p نیز با توجه به پلاریزاسیون تغذیه به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که بیشترین دامنه برای میدان‌های مغناطیسی حاصل شود.

مشتق وردشی در رابطه (۱۵) به صورت

$$\hat{u}_p(\theta_j, \phi_j) \cdot \frac{\delta \bar{F}_S}{\delta z_S(t_i, \psi_i)} = jk \left[\left[\left((\hat{u}_R - \hat{u}_f) \cdot \hat{u}_z \right) \bar{N}_{\Sigma_S} + \hat{u}_z \times \left(\bar{N}_{\Sigma_S} \times \hat{u}_R - (\hat{u}_z \cdot \bar{N}_{\Sigma_S}) (\hat{u}_z \times \hat{u}_f) \right) \right] \times \hat{H} \right] \left(\hat{u}_p \times \hat{u}_R \right) \frac{e^{-jk|\bar{R}|}}{4\pi|\bar{R}|} \left(1 + \frac{1}{jk|\bar{R}|} \right) \quad (16)$$

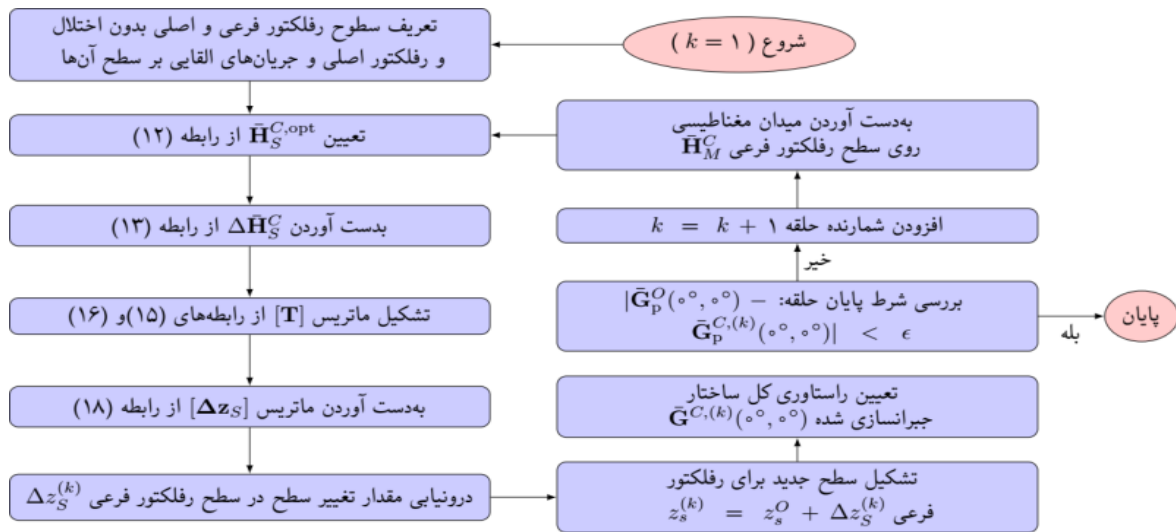
قابل فرمول‌بندی است که در آن، بردار \bar{R} عبارت است از بردار فاصله نقاط بازتابنده اصلی و فرعی و $\hat{u}_{r_{S,f}}$ بردار یک نقطه سطح بازتابنده فرعی در دستگاه مختصات آنتن تغذیه یعنی $\bar{r}_{S,f}$ است که این بردارها در شکل (۳) نمایش داده شده‌اند.

$$\bar{R} = \bar{r}_M - \bar{r}_S, \quad (17)$$

با ارزیابی مشتق وردشی در رابطه (۱۶) می‌توان ماتریس سامانه در رابطه (۱۵) را به دست آورد. از سوی دیگر تغییرات میدان مغناطیسی از بازتابنده فرعی از رابطه (۱۳) تعیین می‌شود. در نهایت با داشتن ماتریس $[T_{S,p}]$ و بردار $[\Delta H_{M,p}]$ در رابطه (۱۴) می‌توان بردار $[\Delta z_S]$ را از طریق روش ارائه‌شده در رابطه (۹) به دست آورد.

مشابه رابطه (۹) در مورد تغییر شکل بازتابنده فرعی نیز می‌توان نوشت:

$$[\Delta z_S] = [V_S] [\Sigma_S]^+ [U_S]^* [\Delta H_{M,p}] \quad (18)$$



شکل (۴). فلوچارت روش پیشنهادی برای طراحی بازتابنده فرعی جهت جبران سازی اختلال سطح بازتابنده اصلی.

۳- نتایج

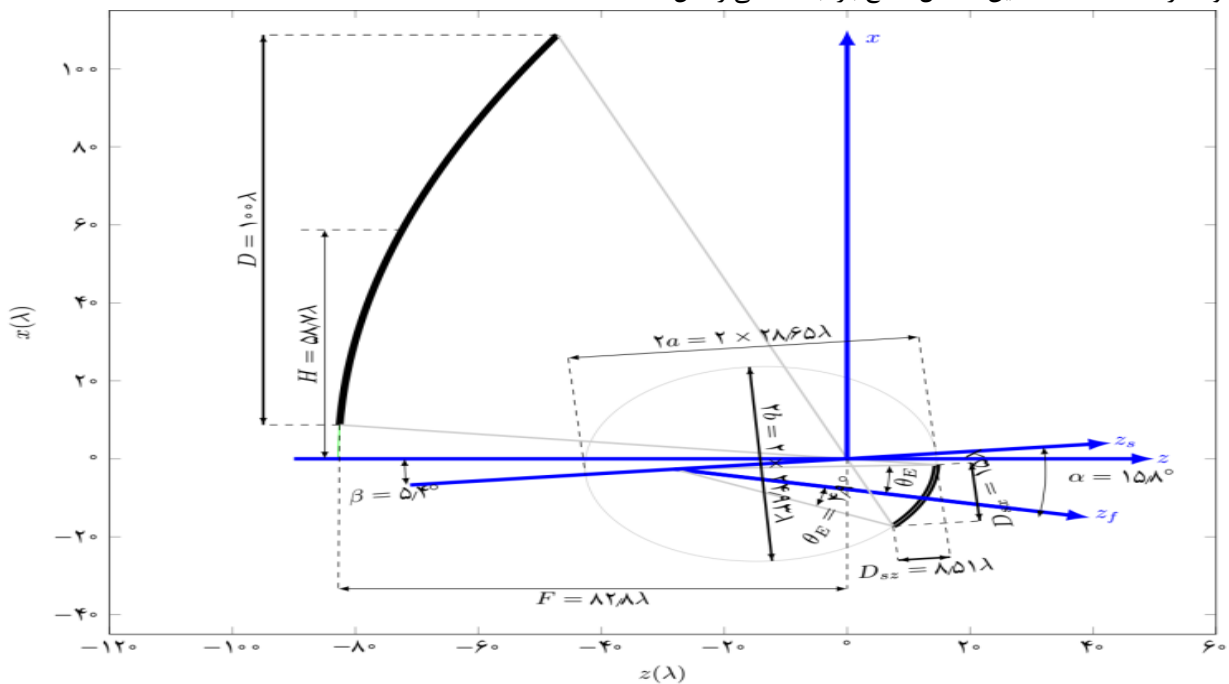
نموده و نشان داده می شود که مسئله جبران سازی بر اساس فلوچارت ارائه شده در شکل (۴) و فرمول بندی ارائه شده قابل حل است.

۳-۱- توصیف مسئله نمونه

بر اساس معادلات طراحی ارائه شده در [۵۰-۵۱] یک ساختار گریگورین با پارامترهای معرفی شده در جدول (۱) به عنوان ساختار نمونه مورد بررسی قرار گرفته است و این آنتن در شکل (۵) ترسیم شده است.

در این بخش به حل یک مسئله جبران سازی پرداخته می شود. ابتدا هندسه مسئله مذکور و جزئیات طراحی آن ارائه شده و الگوی تشعشی آنتن مذکور استخراج می شود. پس از آن نوعی از اختلال روی سطح بازتابنده اصلی اعمال می شود و اثرات این اختلال بر الگوی تشعشی بررسی می شود.

نشان خواهیم داد که با تحقق میدان مغناطیسی بهینه \bar{H}_M^{opt} روی سطح بازتابنده مختل، می توان اثرات اختلال را جبران سازی نمود. در ادامه مسئله تخمین اختلال سطح بازتابنده اصلی را حل



شکل (۵). آنتن دوبازتابنده ای گریگورین آفست در نظر گرفته شده به عنوان ساختار مرجع در حل مسئله جبران سازی. پارامترهای جزئی تر این ساختار در جدول (۱) آمده است.

جدول (۱). پارامترهای طراحی برای ساختار دوبازتابنده‌ای نمونه جهت بررسی روش جبران سازی

مقدار/وضعیت	نماد پارامتر	پارامتر
	D	قطر رفلکتور اصلی
	F	فاصله کانونی رفلکتور اصلی
	H	ارتفاع آفت رفلکتور اصلی
	a	نیم قطر بزرگ بیضی گون
	b	نیم قطر کوچک بیضی گون
	e	خروج از مرکز بیضی گون
	D_{sx}	قطر رفلکتور فرعی در راستای محور x
	D_{sz}	قطر رفلکتور فرعی در راستای محور z
	α	زاویه بین محور بیضی گون و آنتن تغذیه
	β	زاویه بین محور بیضی گون و سهمی گون
	\hat{u}_p	پلاریزاسیون آنتن تغذیه
	ET	باریک شدگی لبه برای الگوی تشعشعی آنتن تغذیه
	θ_E	زاویه لبه برای آنتن تغذیه
	b_H	پارامتر پرتو گاوسی برای الگوی تشعشعی آنتن تغذیه
	\hat{u}_{HR}	
	-15 dB	
	49°	
	0.3804	

زاویه بین محور سهمی گون و بیضی گون (زاویه β) و زاویه بین محور آنتن تغذیه و محور بیضی گون (زاویه α) دو پارامتر اساسی در طراحی ساختارهای دوبازتابنده‌ای هستند. با انتخاب مناسب این دو زاویه می‌توان میزان پلاریزاسیون متعامد را صفر کرد که به این شرط، شرط میزوگوچی می‌گویند [۵۱]. چنین شرطی در پارامترهای جدول (۱) رعایت شده است.

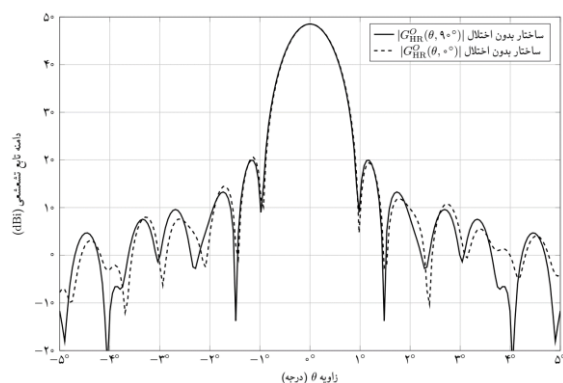
در آنتن مرجع، قطر بازتابنده اصلی $D = 100 \lambda$ بوده و دارای فاصله کانونی $F = 82.8 \lambda$ است. ارتفاع آفت برای بازتابنده اصلی $H = 58.7 \lambda$ انتخاب شده است. بازتابنده فرعی دارای نیم قطر اصلی $a = 28.8 \lambda$ و نیم قطر فرعی $b = 24.93 \lambda$ بوده و محور آن با محور بازتابنده اصلی، زاویه‌ی $\beta = 5.4^\circ$ را می‌سازد. آنتن تغذیه با پلاریزاسیون افقی \hat{u}_{HR} و الگوی تشعشعی گاوسی به کار گرفته شده که دارای زاویه لبه‌ای به اندازه $\theta_E = 11.9^\circ$ با باریک‌شدگی تشعشعی $ET = -15 \text{ dB}$ (پارامتر گاوسی $b_H = 0.3804$) است. آنتن تغذیه واقع بر کانون بیضی گون بوده و با محور بیضی گون زاویه $\alpha = 15.8^\circ$ می‌سازد. با این پارامترهای طراحی، قطر دهانه بازتابنده فرعی در راستای محورهای x_s و z_s به ترتیب $D_{sx} = 15 \lambda$ و $D_{sz} = 8.5 \lambda$ خواهد بود.

برای آنتن دوبازتابنده‌ای معرفی شده، طبق روال تحلیل ارائه شده در بخش ۲ شبیه‌سازی‌های عددی با روش نور فیزیکی صورت پذیرفته است. نتیجه تحلیل در شکل (۶) آمده است.

نتایج برای دو صفحه اصلی $\phi = 0^\circ$ و $\phi = 90^\circ$ نشان داده شده‌اند. ملاحظه می‌شود که جهت‌مندی این آنتن برابر $|G_{HR}(0^\circ, 0^\circ)| = 48.5 \text{ dBi}$ در راستای محور z است. در صفحه $\phi = 90^\circ$ که صفحه تقارن هندسی ساختار محسوب می‌شود، شاهد الگوی کاملاً متقارن هستیم و گل‌برگ‌های اول و دوم به ترتیب دارای سطوح 19.4 dBi در $\phi = \pm 1.18^\circ$ و 11.9 dBi در

$\phi = \pm 1.78^\circ$ هستند. در صفحه $\phi = 0^\circ$ شاهد عدم تقارن در الگوی تشعشعی هستیم که ناشی از عدم تقارن هندسی است. در این صفحه گل‌برگ اول در زوایای مثبت دارای سطح 19.4 dBi در زاویه $\phi = \pm 1.18^\circ$ و گل‌برگ اول در زوایای منفی نیز دارای سطح 20.55 dBi در زاویه $\phi = \pm 1.13^\circ$ واقع می‌شوند. اختلافی از نوع سینوسی به صورت

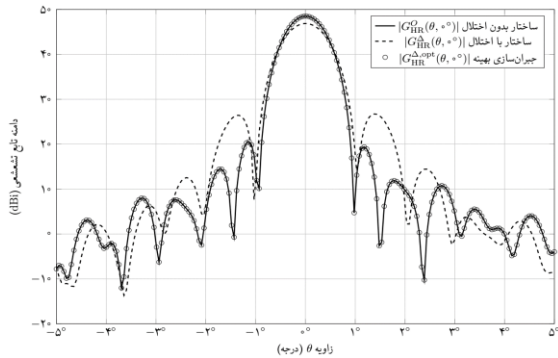
$$\Delta z_M(t, \psi) = \lambda / 4t^3 \sin(3\psi), \quad (19)$$



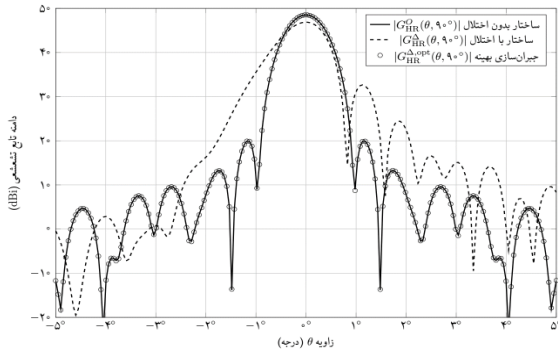
شکل (۶). الگوی تشعشعی برای آنتن دوبازتابنده‌ای مرجع بدون اختلال توصیف شده در شکل (۵) و جدول (۱) در دو صفحه اصلی $\phi = 0^\circ$ (خط بریده) و $\phi = 90^\circ$ (خط ممتد)

به سطح بازتابنده فرعی اعمال می‌گردد. این نوع اختلال در مرکز برابر با صفر و در لبه‌ها بیشینه می‌شود. اختلافی از این نوع از متداول‌ترین حالات اختلال سطح محسوب می‌شود که برای مدل سازی اثرات ناشی از گرانش یا حرارت بر تغییر سطح بازتابنده مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶، ۷، ۱۹، ۴۵]. چنین اختلافی سبب تغییر رفتار الگوی تشعشعی خواهد شد. در شکل (۷-الف) الگوی تشعشعی بدون اختلال و با اختلال در صفحه $\phi = 0^\circ$ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که در مقایسه با شکل (۶)، جهت‌مندی به اندازه 1.65 dB کاهش یافته و به مقدار 26.74 dBi رسیده است. همچنین گل‌برگ اول از مقدار 19.4 dBi در حالت بدون اختلال، به سطح 26.74 dBi رسیده که معادل افزایشی حدود 7.35 dB است. همچنین برای صفحه $\phi = 90^\circ$ الگوی تشعشعی اختلال یافته به صورت شکل (۷-ب) خواهد بود. ملاحظه می‌شود که اختلال ظاهر شده تا چه حد در عدم تقارن الگوی تشعشعی موثر است. به گونه‌ای که در زوایای منفی پدیده افزایش عرض پرتو اصلی و ظهور شانه به جای گل‌برگ را شاهد هستیم. همچنین در زوایای مثبت گل‌برگ اول به سطح 32.67 dBi رسیده که در مقایسه با حالت بدون اختلال حدود 13.27 dB افزایش یافته است. چنین تغییری در ویژگی‌های الگوی تشعشعی تنها در اثر اعمال اختلافی با دامنه یک چهارم طول موج رخ می‌دهد!

در شکل های (۸-الف) و (۸-ب) نتیجه اعمال میدان بهینه بر سطح بازتابنده اختلال یافته $|G_{HR}^{C,opt}(\theta, \phi)|$ برای هر دو صفحه $\phi = 0^\circ$ و $\phi = 90^\circ$ آمده است. ملاحظه می شود که الگوی تشعشی در این حالت بسیار به حالت ایده آل $|G_{HR}^0(\theta, \phi)|$ نزدیک است. به عبارت دیگر با تحقق میدان مغناطیسی ایده آل $H_S^{C,opt}$ بر سطح بازتابنده اصلی می توان اثرات اختلال سطح بازتابنده اصلی را جبران سازی نمود.



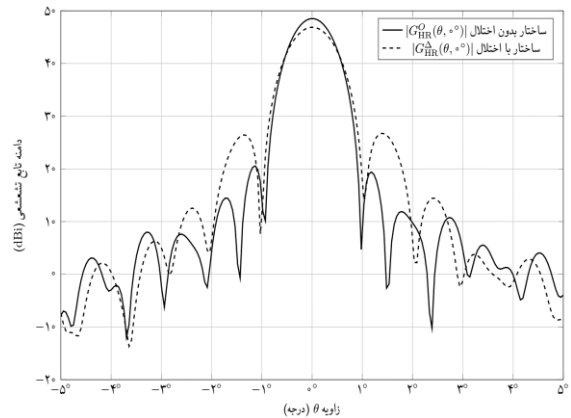
(الف)



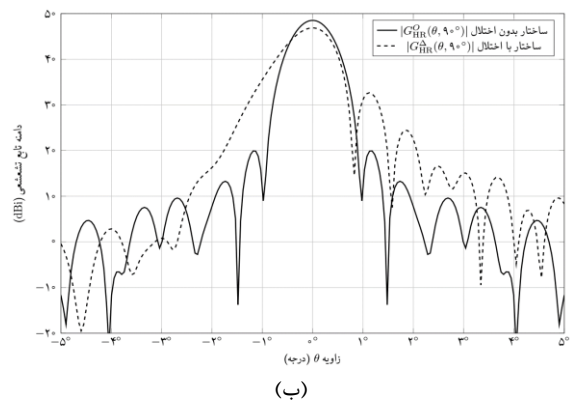
(ب)

شکل (۸). الگوی تشعشی برای آنتن دوبازتابنده ای با اختلال با میدان مغناطیسی بهینه بر سطح بازتابنده اصلی مختل، (دوایر توخالی) و آنتن مرجع بدون اختلال (خط ممتد) و آنتن با اختلال (خط بریده). (الف) $\phi = 0^\circ$ و (ب) $\phi = 90^\circ$ ملاحظه می شود که با تحقق میدان مغناطیسی بهینه از رابطه (۱۲) می توان الگوی ساختار با اختلال را به خوبی بهبود داد.

با داشتن تغییرات لازم در میدان مغناطیسی تشعشی از رفکتور فرعی روی نقاط بازتابنده اصلی اختلال یافته، گام بعدی عبارت است از: تخمین تغییرات لازم روی سطح بازتابنده جهت رسیدن به این تغییرات لازم. نتیجه تخمین تغییرات لازم برای سطح بازتابنده فرعی در شکل (۹) آمده است. ملاحظه می شود که تغییرات لازم بر سطح بازتابنده فرعی نیز رفتار مشابه اختلال بازتابنده اصلی (سینوسی) داشته و دامنه آن در اکثر نقاط کمتر دامنه اختلال سطح بازتابنده اصلی (یک چهارم طول موج) است.



(الف)

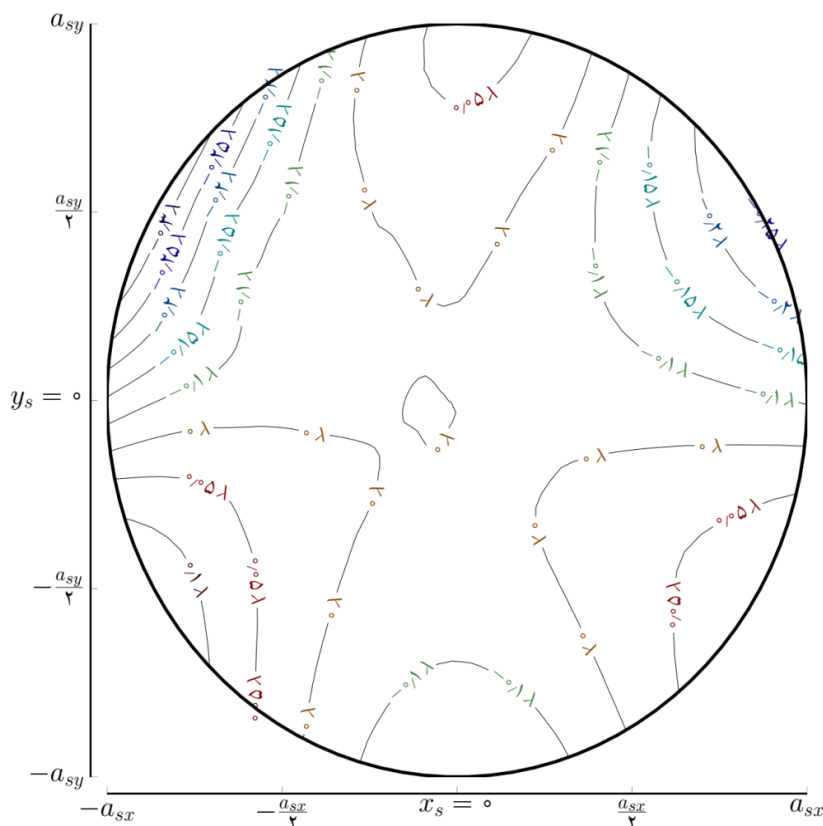


(ب)

شکل (۷). الگوی تشعشی برای آنتن دوبازتابنده ای مرجع بدون اختلال (خط ممتد) توصیف شده در شکل (۵) و جدول (۱) و آنتن با اختلال (خط بریده) توصیف شده در رابطه (۱۹) در دو صفحه اصلی (الف) $\phi = 0^\circ$ و (ب) $\phi = 90^\circ$

۳-۲- شکل دهی سطح بازتابنده فرعی جهت جبران سازی اثرات اختلال سطح بازتابنده اصلی

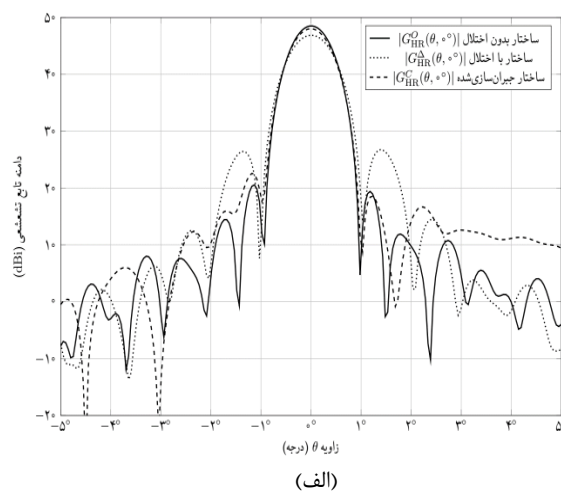
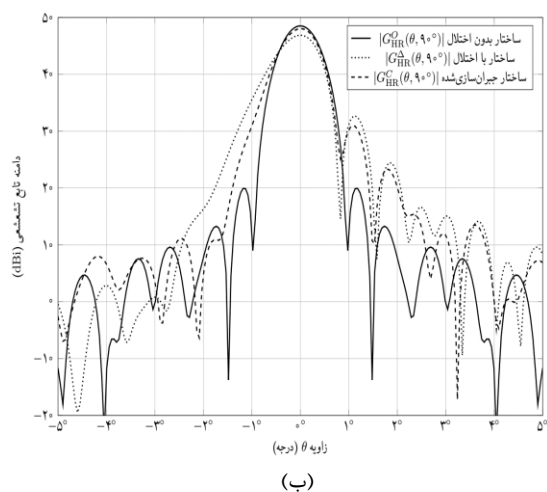
در این بخش به چگونگی طراحی سطح بازتابنده فرعی جهت جبران سازی اثرات اختلال سطح بازتابنده فرعی خواهیم پرداخت. ابتدا نشان خواهیم داد که اعمال میدان مغناطیسی بهینه به سطح بازتابنده اصلی چگونه می تواند سبب بهبود الگوی تشعشی (حتی در حضور اختلال سطح) گردد. پس از آن، مسئله تخمین سطح را به گونه ای حل می کنیم که میدان مغناطیسی بهینه بر سطح بازتابنده اصلی ایجاد شود. روال بهینه سازی تا آنجا پیش می رود که جهت مندی ساختار جبران سازی شده (شکل ۲-الف) تا حد ممکن به جهت مندی ساختار بدون اختلال (شکل ۲-ب) نزدیک شود. روال دقیق چنین روشی در فلوجارت شکل (۴) آمده است. تشخیص میدان مغناطیسی بهینه روی سطح بازتابنده اصلی اختلال یافته $H_S^{C,opt}$ که ناشی از بازتاب از سطح بازتابنده فرعی است، از روی رابطه (۱۲) میسر است.



شکل (۹). کانتورهای سطوح تغییرات لازم بر سطح بازتابنده فرعی Δz_s^{nom} جهت جبران سازی اختلال بازتابنده اصلی
($a_{sy} = 10.09\lambda$ و $a_{sx} = 7.5\lambda$)

مختل و جبران سازی شده در دو صفحه اصلی $\phi = 0^\circ$ و $\phi = 90^\circ$ را به نمایش می گذارند. ملاحظه می شود که الگوی تشعشی جبران سازی شده به حالت ایده آل نزدیک شده است.

پس از به دست آوردن سطح بازتابنده جبران ساز اقدام به شبیه سازی الگوی تشعشی جبران سازی شده می کنیم. شکل های (۱۰-الف) و (۱۰-ب) مقایسه ای از الگوهای تشعشی ایده آل،



شکل (۱۰). الگوی تشعشی برای آنتن دوبازتابنده ای جبران سازی شده (خط بریده) و آنتن مرجع بدون اختلال (خط ممتد) و آنتن با اختلال (خط نقطه ای). در صفحات اصلی (الف) $\phi = 0^\circ$ و (ب) $\phi = 90^\circ$ ملاحظه می شود که با استفاده از بازتابنده فرعی جبران ساز توصیف شده در شکل (۹) می توان الگوی تشعشی ساختار اختلال یافته را به حالت ایده آل نزدیک نمود.

جدول (۲). خلاصه‌ای از پارامترهای اصلی جهت مقایسه ساختارهای ایده‌آل، مختل و جبران‌سازی‌شده بر اساس شکل (۱۰)

میزان بهبود	ساختار جبران‌سازی‌شده	ساختار اختلال یافته	ساختار ایده‌آل	کمیت
۱/۱۵dB	۴۸/۰dBi	۴۶/۸۵dBi	۴۸/۵dBi	راستوری
۸/۲dB	۱۸/۵۴dBi	۲۶/۷۴dBi	۱۹/۴۰dBi	گل‌برگ اول مثبت
۳/۸۷dB	۲۲/۵۶dBi	۲۶/۴۳dBi	۲۰/۵۵dBi	گل‌برگ اول منفی
۱/۶۹dB	۳۰/۸۸dBi	۳۲/۶۷dBi	۱۹/۹۳dBi	گل‌برگ اول مثبت
۱/۱۲dB	۲۳/۳۲dBi	۲۴/۴۴dBi	۱۳/۲۸dBi	گل‌برگ دوم مثبت

به‌گونه‌ای بازبینی نمود که با شکل دادن سطح بازتابنده فرعی، اثرات اختلال سطح بازتابنده اصلی جبران‌سازی گردد. بر مبنای این فرمول‌بندی، فلوچارتی پیشنهاد شد که با استفاده از آن با سرعت بالا و دقت مناسبی می‌توان بازتابنده فرعی جبران‌ساز را طراحی نمود. به‌عنوان مسئله نمونه، برای یک آنتن دوبازتابنده‌ای بزرگ همین فرمول‌بندی و روش پیشنهادی را اعمال نموده و نشان دادیم که به‌نحو بسیار کارآمدی می‌توان تخریب الگوی تشعشعی ناشی از اختلال سطح بازتابنده اصلی را با اصلاح سطح بازتابنده فرعی جبران‌سازی نمود.

۵- مراجع

- [1] S. K. Sharma, S. Rao, and L. Shafai, "Handbook of Reflector Antennas and Feed Systems," Volume I: Theory and Design of Reflectors, Artech house, 2013.
- [2] T. S. Bird, "Reflector Antennas," Singapore: Springer Singapore, pp.1-61, 2014.
- [3] Y. Rahmat-Samii and R. Haupt, "Reflector Antenna Developments: a Perspective on the Past, Present and Future," Antennas and Propagation Magazine, IEEE, vol. 57, pp. 85-95, April 2015.
- [4] D.-W. Duan and Y. Rahmat-Samii, "A Generalized Diffraction Synthesis Technique for High Performance Reflector Antennas," Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 43, no. 1, pp. 27-40, 1995.
- [5] G. Cortés-Medellín and P. F. Goldsmith, "Analysis of Active Surface Reflector Antenna for a Large Millimeter Wave Radio Telescope," Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 42, no. 2, pp. 176-183, 1994.
- [6] Y. Rahmat-Samii, "Effects of Deterministic Surface Distortions on Reflector Antenna Performance," in Annales des télécommunications, vol. 40, pp. 350-360, Springer, 1985.
- [7] J. Ruze, "Antenna Tolerance Theory—a Review," in IEEE Proceedings, vol. 54, pp. 633-642, 1966.
- [8] M. S. Zarghamee, "On Antenna Tolerance Theory," Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 15, no. 6, pp. 777-781, 1967.
- [9] S. Ghobrial, "Axial Cross Polarization in Reflector Antennas with Surface Imperfections," Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 28, no. 5, pp. 610-616, 1980.
- [10] J. Jervase, S. Ghobrial, et al., "Axial Cross Polarization in Reflector Antennas with Surface Errors of Large Correlation Diameter," Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 31, no. 4, pp. 662-665, 1983.
- [11] H. Ling, Y. T. Lo, and Y. Rahmat-Samii, "Reflector Sidelobe Degradation due to Random Surface Errors,"

جدول (۲) خلاصه‌ای از مقایسه پارامترهای اساسی بین سه ساختار ایده‌آل، مختل و جبران‌سازی‌شده را ارائه می‌کند. با توجه به شکل (۱۰) می‌توان گفت که جهت‌مندی ساختار که در حالت ایده‌آل برابر 48.5 dBi بوده و به‌دلیل اختلال سطح بازتابنده اصلی با 1.65 dBi افت (یعنی ۳۱ درصد کاهش)، به سطح 46.85 dBi رسیده بود، با استفاده از بازتابنده فرعی شکل‌یافته و جبران‌سازی به سطح 48.0 dBi می‌رسد که تنها ۱۰ درصد کمتر از حالت ایده‌آل کمتر است. به عبارت دیگر، با استفاده از جبران‌سازی توانسته‌ایم بیش از 1 dBi افت جهت‌مندی را جبران‌سازی کنیم.

با توجه به شکل (۱۰-الف) که نشان دهنده الگوی تشعشعی در صفحه $\phi = 0^\circ$ است، شاهدیم که سطح گل‌برگ‌های کناری به خوبی جبران‌سازی شده است. سطح گل‌برگ اول در زوایای مثبت که از مقدار 19.4 dBi در حالت ایده‌آل، به مقدار 26.74 dBi در حالت مختل رسیده است، با استفاده از بازتابنده فرعی شکل‌یافته به سطح 18.54 dBi می‌رسد که معادل بیش از 8 dB بهبود است. برای گل‌برگ اول در زوایای منفی این بهبود حدود 4 dB است.

با توجه به شکل (۱۰-ب) نیز می‌توان ملاحظه نمود که بهبود در سطح گل‌برگ‌های الگوی تشعشعی در صفحه $\phi = 90^\circ$ به خوبی صفحه‌ی دیگر نیست، اگرچه که میزانی از بهبود قابل مشاهده است. با استفاده از جبران‌سازی، برای گل‌برگ اول و دوم در زوایای مثبت به ترتیب حدود 2 dB و 1 dB کاهش سطح گل‌برگ‌ها را شاهد هستیم.

بدین ترتیب، می‌بینیم که بازتابنده فرعی شکل‌یافته می‌تواند به خوبی اثرات اختلال سطح بازتابنده اصلی را جبران‌سازی کند و برای طراحی چنین سطحی، روش پیشنهادی توسط مقاله حاضر کارآمد خواهد بود.

۴- نتیجه‌گیری

مهم‌ترین عامل محدودکننده حد بالای فرکانس برای عملکرد صحیح آنتن بازتابنده، اختلال‌هایی است که بر سطح بازتابنده ظاهر می‌شود. در این مقاله نشان داده شد که چگونه می‌توان با استفاده از یک فرمول‌بندی جدید، مسئله آنتن دو بازتابنده‌ای را

- transactions on antennas and propagation, vol. 53, no. 8, pp. 2590–2596, 2005.
- [27] J. W. Baars, "The Paraboloidal Reflector Antenna in Radio Astronomy and Communication," Springer, 2007.
- [28] Y. Rahmat-Samii, "Microwave Holography of Large Reflector Antennas—Simulation Algorithms," IEEE Transactions on antennas and Propagation, vol. 33, no. 11, pp. 1194–1203, 1985.
- [29] Y. Rahmat-Samii, "Surface Diagnosis of Large Reflector Antennas Using Microwave Holographic Metrology: an Iterative Approach," Radio Science, vol. 19, no. 5, pp. 1205–1217, 1984.
- [30] J. Bennett, A. Anderson, P. McInnes, and A. Whitaker, "Microwave Holographic Metrology of Large Reflector Antennas," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 24, no. 3, pp. 295–303, 1976.
- [31] G. Harp, R. Ackermann, et al., "Primary Beam and Dish Surface Characterization at the Allen Telescope Array by Radio Holography," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 59, no. 6, pp. 2004–2021, 2011.
- [32] G. R. Harp, "private communication," 2013–2015.
- [33] W. A. Imbriale, "Distortion Compensation Techniques for Large Reflector Antennas," in Aerospace Conference, 2001, IEEE Proceedings, vol. 2, pp. 2–799, 2001.
- [34] R. Paradies and M. Hertwig, "Shape Control of Adaptive Composite Reflectors," Composites Part B: Engineering, vol.30, no.1, pp.65–78, 1999.
- [35] D. Gorinevsky and T. T. Hyde, "Adaptive Membrane for Large Lightweight Space Telescopes," in Astronomical Telescopes and Instrumentation, pp.330–338, International Society for Optics and Photonics, 2002.
- [36] "Five hundred meter aperture spherical telescope," <http://www.fast.bao.ac.cn/>.
- [37] "The 305m telescope," <http://www.naic.edu/>.
- [38] R. J. Acosta, "Active Feed Array Compensation for Reflector Antenna Surface Distortions," 1988.
- [39] A. R. Cherrette, R. J. Acosta, P. T. Lam, and S.-W. Lee, "Compensation of Reflector Antenna Surface Distortion Using an Array Feed," IEEE transactions on antennas and propagation, vol. 37, no. 8, pp. 966–978, 1989.
- [40] N. Amitay and H. Zucker, "Compensation of Spherical Reflector Aberrations by Planar Array Feeds," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 20, no. 1, pp. 49–56, 1972.
- [41] Y. Rahmat-Samii, "Array Feeds for Reflector Surface Distortion Compensation: Concepts and Implementation," IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 32, no. 4, pp. 20–26, 1990.
- [42] S. Xu, Y. Rahmat-Samii, and W. A. Imbriale, "Subreflectarrays for Reflector Surface Distortion Compensation," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 57, no. 2, pp. 364–372, 2009.
- [43] P. R. Lawson and J. L. Yen, "A Piecewise Deformable Subreflector for Compensation of Cassegrain Main Reflector Errors," IEEE transactions on antennas and propagation, vol. 36, no. 10, pp. 1343–1350, 1988.
- [44] P. Cowles and E. Parker, "Reflector Surface Error Compensation in Cassegrain Antennas," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 23, no. 3, pp. 323–328, 1975.
- [45] B. Gonzalez-Valdes, J. A. Martinez-Lorenzo, C. Rappaport, and A. G. Pino, "A New Physical Optics Based Approach to Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 34, no. 2, pp. 164–172, 1986.
- [12] P. Lian, B. Duan, W. Wang, B. Xiang, and N. Hu, "Effects of non-Uniform Surface Errors Along the Radius on Reflector's Radiation Characteristic and Its Quality Evaluation," Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 63, no. 5, pp. 2312–2316, 2015.
- [13] R. P. Corkish, "A Survey of the Effects of Reflector Surface Distortions on Sidelobe Levels," Antennas and Propagation Magazine, IEEE, vol. 32, no. 6, pp. 6–11, 1990.
- [14] P. Rocca, N. Anselmi, and A. Massa, "Interval Arithmetic for Pattern Tolerance Analysis of Parabolic Reflectors," Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 62, no. 10, pp. 4952–4960, 2014.
- [15] J.-W. Kim, B. S. Kim, S. Nam, and C. W. Lee, "Computation of the Average Power Pattern of a Reflector Antenna with Random Surface Errors and Misalignment Errors," Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 44, no. 7, pp. 996–999, 1996.
- [16] S. Zhang, B. Duan, H. Bao, and P. Lian, "Sensitivity Analysis of Reflector Antennas and Its Application on Shaped Geo-Truss Unfurlable Antennas," Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 61, no. 11, pp. 5402–5407, 2013.
- [17] K. Bahadori and Y. Rahmat-Samii, "Characterization of Effects of Periodic and Aperiodic Surface Distortions on Membrane Reflector Antennas," Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 53, no. 9, pp. 2782–2791, 2005.
- [18] A. Greve and D. Morris, "Repetitive Radio Reflector Surface Deformations," Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 53, no.6, pp.2123–2126, 2005.
- [19] W. T. Smith and R. J. Bastian, "An Approximation of the Radiation Integral for Distorted Reflector Antennas Using Surface-Error Decomposition," Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 45, no. 1, pp. 5–10, 1997.
- [20] T.-H. Lee, R. Ruddock, and M. C. Bailey, "A Surface Distortion Analysis Applied to the Hoop/Column Deployable Mesh Reflector Antenna," Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 37, no. 4, pp. 452–458, 1989.
- [21] Y. Zong, B. Duan, Y. Ban, W. Wang, W. Xu, C. Wang, and J. Du, "Surface Configuration Design of Cable-Network Reflectors Considering the Radiation Pattern," Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 62, no. 6, pp. 3163–3173, 2014.
- [22] R. J. Langley and E. A. Parker, "Wave Scattering from Error-Compensating Secondary Reflectors," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 27, pp. 527–530, 1979.
- [23] B. M. Thomas and P. Rayner, "Effect of Surface Distortions on the Crosspolarisation Performance of Paraboloidal Reflectors," Electronics Letters, vol. 13, no. 16, pp. 478–480, 1977.
- [24] K. Chan and A. Raab, "Surface-Current Analysis of Distorted Reflector Antennas," Microwaves, Optics and Antennas, IEEE Proceedings H, vol. 128, no. 4, pp. 206–212, 1981.
- [25] R. Hoferer, Y. Rahmat-Samii, et al., "Subreflector Shaping for Antenna Distortion Compensation: an Efficient Fourier-Jacobi Expansion with GO/PO Analysis," Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 50, no. 12, pp. 1676–1687, 2002.
- [26] R. Subrahmanyam, "Photogrammetric Measurement of the Gravity Deformation in a Cassegrain Antenna," IEEE

- [49] J. A. Martinez-Lorenzo, C. M. Rappaport, and A. G. Pino, "Reflector Antenna Distortion Determination: an Iterative-Field-Matrix Solution," *Radio Science*, vol. 43, no. 4, 2008.
- [50] C. Granet, "Designing Axially Symmetric Cassegrain or Gregorian Dual-Reflector Antennas from Combinations of Prescribed Geometric Parameters, Minimum Blockage Condition While Taking into Account the Phase-Center of the Feed," *Antennas and Propagation Magazine, IEEE*, vol. 40, no. 3, pp. 82–89, 1998.
- [51] C. Granet, "Designing Classical Offset Cassegrain or Gregorian Dual-Reflector Antennas from Combinations of Prescribed Geometric Parameters," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 44, no. 3, pp. 114–123, 2002.
- Subreflector Shaping for Reflector Antenna Distortion Compensation," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 1, pp. 467–472, 2013.
- [46] A. Haddadi and A. Ghorbani, "Distorted Reflector Antennas: Analysis of Radiation Pattern and Polarization Performance," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 10, pp. 4159–4167, 2016.
- [47] A. Ludwig, "The Definition of Cross Polarization," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 21, no. 1, pp. 116–119, 1973.
- [48] B. Noble, J. W. Daniel, et al., "Applied Linear Algebra," *Prentice-Hall New Jersey*, vol. 3, 1988.

Surface Distortion Compensation in Reflector Antennas Using a Shaped Sub-Reflector

S. A. Hadadi, A. Ghorbani*

Amirkabir University of Technology

(Received: 23/10/2016, Accepted: 31/01/2017)

Abstract

Surface distortions on the main reflector change the radiation pattern of the reflector antenna and degrade their radiation characteristics. There are different methods to compensate the undesired effects of the main reflector's surface distortion. In the present study, it has been shown that by using a shaped sub-reflector, one can compensate the effects of the main reflector's distortions. Based on the variational mathematics, the radiation pattern has been linearized and reformulated in the matrix form. The reverse problem has been solved using the Singular Value Decomposition (SVD), and it is shown that for a dual-reflector antenna, the proposed method can be used to design a compensator shaped sub-reflector. Results show that if the amplitude of the distortion on the main reflector is less than quarter wavelength, the proposed algorithm can converge to the solution very fast.

Keywords: Reflector Antenna, Physical Optics Method, Surface Distortions, Compensation, Shaped Sub-Reflector.

* Corresponding author E-mail: ghorbani@aut.ac.ir