

کالیبراسیون فاز آرایه آنتن‌های بشقابی با استفاده از ماهواره‌های LEO

امیر اکبری^{۱*}، ایاز قربانی^۲

۱- کارشناس ارشد ۲- دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت: ۹۳/۰۹/۲۲، پذیرش: ۹۴/۰۸/۰۹)

چکیده

ردیابی اهداف رادار گریز نیازمند استقرار رادارهایی با توان ارسالی بسیار بالاست که این امر خود مستلزم استفاده از آنتن‌های بشقابی با قطر زیاد می‌باشد. امروزه محققین اثبات نموده‌اند به جای استفاده از یک آنتن بشقابی با قطر زیاد می‌توان از آرایه‌ای شامل تعداد زیادی آنتن بشقابی با قطر کم استفاده نمود که این امر منجر به افزایش چشمگیر توان ارسالی موثر تا مقدار N^2PG می‌گردد که N تعداد آنتن‌ها، P توان ورودی هر آنتن و G بهره هریک از آنتن‌هاست. لازمه رسیدن به این مهم، هم‌فاز بودن تمام آنتن‌ها در محل هدف می‌باشد که این فرایند بعنوان کالیبراسیون فاز شناخته می‌گردد. در این مقاله چگونگی کالیبراسیون فاز با استفاده از ماهواره‌ها به‌عنوان اهداف مداری، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. همچنین تعیین مکان مرکز فاز آنتن‌های آرایه و موقعیت اهداف کالیبراسیون و اثر آن بر عملکرد آرایه‌هایی با ابعاد مختلف تحلیل گردیده است.

واژگان کلیدی

اهداف رادار گریز، کالیبراسیون فاز، مرکز فاز آنتن.

۱. مقدمه

کاربردهای راداری مورد توجه قرار داده‌اند [۱]. از جمله مهم‌ترین مزیت‌های استفاده از آرایه‌ی آنتنی می‌توان به انعطاف در اسکن نمودن فضا، قابلیت اطمینان بالا به دلیل امکان تعویض المان‌های خراب‌شده، قابلیت توسعه به‌صورت پیوسته و مقرون به‌صرفه بودن اشاره کرد. در حال حاضر برای ساخت یک آنتن بشقابی با قطر 70 m هزینه‌ای در حدود 100 میلیون دلار لازم است، در حالی‌که تنها با کسری از این مقدار می‌توان 40 آنتن بشقابی با قطر 12 m ساخت که همان توان ارسالی ایزوتروپیک موثر^۱ را ایجاد می‌کنند [۲]. نمایی از چنین آرایه‌ای در شکل ۱ نشان داده شده است. البته استفاده از آرایه آنتنی نیز خود با مشکلاتی روبرو است که مهم‌ترین آن‌ها دستیابی به هم‌فازی بین المان‌های آرایه در هر دو حالت ارسال و دریافت می‌باشد؛ به‌طوری‌که میدان‌های رسیده به هدف به‌صورت همدوس با یکدیگر جمع‌شده، موج منعکس‌شده از هدف به‌وسیله هریک از آنتن‌ها دریافت گردیده و سپس سیگنال‌های دریافتی در آنتن‌های مختلف مجدداً به‌صورت همدوس با یکدیگر

احداث سامانه راداری به‌منظور ردگیری و انهدام اهداف رادار گریز، نقش بسزایی در افزایش توان دفاعی کشور ایفا می‌کند. برای این منظور استقرار سامانه‌های راداری پهن-باند برای شناسایی و ردیابی اهداف رادار گریز با دقت بالا و به‌صورت بلادرنگ لازم است. برای افزایش دقت ردگیری علاوه بر پهنای باند، نسبت توان سیگنال به نویز بالا درگیرنده ضروری بوده که این خود تنها در صورتی میسر می‌گردد که حاصلضرب توان در بهره $(P \times G)$ برای آنتن‌های رادار به اندازه کافی زیاد باشد.

با توجه به این‌که افزایش توان ارسالی همواره با محدودیت مواجه است و نیز ساخت آنتن بشقابی با قطر زیاد و دقت کافی بسیار مشکل می‌باشد، در چند سال اخیر محققین استفاده از تعداد زیادی آنتن‌های بشقابی کوچک را به‌جای آنتن بشقابی با قطر زیاد برای

1- Effective Isotropic Radiated Power (EIRP)

*رایانامه نویسنده پاسخگو: amirakbari69@aut.ac.ir

نیست همه آنتن‌ها سیستم گیرنده داشته باشند. در ادامه فرض می‌کنیم آرایه در حالت دریافت از یک آنتن استفاده می‌نماید و فقط در ارسال به صورت همدوس عمل می‌کند. اشاره به این نکته ضروری است که هر یک از آنتن‌های آرایه مجهز به سیستم چرخاننده مکانیکی با دقت کافی است و لذا چرخش بیم آنتن‌ها به صورت الکترونیکی انجام نمی‌گیرد.

در عمل، افزایش SNR با ضریب γN^2 نشان داده می‌شود که γ راندمان آرایه است و در حالت همدوسی کامل مقداری برابر با یک خواهد داشت. از طرفی خطا در فرایند کالیبراسیون فاز موضوعی غیر قابل اجتناب است و راندمان آرایه را به طور مستقیم تحت تأثیر قرار می‌دهد. منابع اصلی خطا در کالیبراسیون فاز را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم نمود که عبارتند از: ۱- خطا در اندازه‌گیری فاز آنتن‌ها (مرحله ۲ کالیبراسیون)، ۲- خطا در تعیین مرکز فاز آنتن‌ها و مکان اهداف کالیبراسیون و ۳- خطا در فاز سیگنال ارسالی بر اثر جابه‌جایی مکانیکی آنتن‌ها، ناپایداری فاز زیر سیستم آنتن‌ها و رفتار فازی محیط انتشار. لازم به ذکر است که خطا در اندازه‌گیری فاز، ناشی از نداشتن نسبت سیگنال به نویز کافی در فرایند کالیبراسیون می‌باشد و می‌تواند بر حسب مشخصات آرایه و نوع اهداف مورد استفاده در کالیبراسیون محاسبه گردد. در بخش‌های ۳ و ۴ مقاله به ترتیب به محاسبه خطای اندازه‌گیری فاز و تعیین مرکز فاز و مکان اهداف کالیبراسیون خواهیم پرداخت. به طور کلی گزینه‌های مختلفی می‌توانند به عنوان اهداف کالیبراسیون در نظر گرفته شوند از جمله [۹]:

(۱) آنتن هورن نصب شده روی دکل در فاصله دور از آنتن‌های آرایه

(۲) ماه و یا اهداف نصب شده روی ماه

(۳) اهداف مداری زمین از جمله اهداف مدار نزدیک زمین^۲

آنتن‌های نصب شده روی دکل اگرچه همواره در دسترس‌اند، اما دارای مشکلاتی نظیر اثرات چند مسیره بودن سیگنال، پیدا کردن محل مناسب و پایدار برای نصب دکل، قرار گرفتن دکل در راه نزدیک آنتن‌ها و در نظر گرفته نشدن جابه‌جایی مرکز فاز آنتن‌ها حین چرخش می‌باشند. استفاده از ماه و یا اهداف نصب شده روی ماه با مشکلاتی مانند حذف کلاتر، نبود SNR کافی و ناهموازی سطح ماه همراه است. در ادامه به تجزیه و تحلیل کالیبراسیون فاز آرایه با استفاده از اهداف LEO می‌پردازیم.

مساله مورد نظر در این مقاله تعیین خطای کالیبراسیون با استفاده از ماهواره‌های LEO بر اثر عواملی نظیر خطای اندازه‌گیری فاز، خطای تعیین موقعیت اهداف کالیبراسیون و خطا در تعیین موقعیت آنتن‌ها می‌باشد. منابع خطای مذکور ابتدا برای آرایه‌ای

جمع می‌شوند. به منظور دستیابی به هم‌فازی روشی قابل اطمینان برای تعیین فاز هر کدام از آنتن‌های آرایه و سپس تصحیح فاز هر یک از آن‌ها مورد نیاز است که این فرایند به عنوان کالیبراسیون فاز آرایه شناخته می‌گردد. اگرچه برای انجام کالیبراسیون فاز روش‌های متعددی پیشنهاد گردیده است [۸-۳]، به طور کلی می‌توان آن را در مراحل زیر خلاصه نمود:

(۱) ارسال سیگنال توسط آنتن‌های آرایه به سمت اهداف

کالیبراسیون

(۲) تعیین فاز و تأخیر زمانی هر کدام از آنتن‌ها با استفاده از

مرحله یک

(۳) تولید مجدد سیگنال‌های آنتن‌های آرایه بر اساس فاز و تأخیر

محاسبه شده از مرحله دو

اگر توان ارسالی و بهره آنتن‌ها مشابه باشند، توان رسیده به هدف N^2 برابر توان رسیده به‌زای ارسال یکی از آنتن‌هاست. همچنین در حالت دریافت، سیگنال‌های همه آنتن‌ها به صورت همدوس با یکدیگر جمع شده و توان دریافتی کل N^2 برابر توان دریافتی هر یک از آنتن‌هاست. بنابراین در شرایط همدوسی کامل در ارسال و دریافت، توان دریافتی آرایه N^4 برابر می‌گردد؛ از طرفی با جمع شدن سیگنال‌های آنتن‌های مختلف در گیرنده، توان نویز N برابر می‌گردد و لذا می‌توان نتیجه گرفت در صورت استفاده از آرایه فازی از N آنتن بشقابی، نسبت سیگنال به نویز^۱ با ضریب N^3 نسبت به حالت تک-آنتن افزایش می‌یابد.



شکل ۱. نمایی از آرایه آنتنی

برای این‌که آرایه در هر دو حالت ارسال و دریافت به صورت همدوس عمل نماید، بایستی همه آنتن‌ها علاوه بر فرستنده مجهز به سیستم گیرنده نیز باشند. از طرفی اگر همدوسی فقط در حالت ارسال برقرار بوده و در حالت دریافت، فقط یکی از آنتن‌ها به کار گرفته شود، SNR با ضریب N^2 افزایش می‌یابد ولی در عوض لازم

2- Low Earth Orbit (LEO)

1- Signal to Noise Ratio (SNR)

مقاله به کالیبراسیون فاز در حالت ارسال می‌پردازیم و فرض می‌کنیم در حالت دریافت تنها یکی از آنتن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

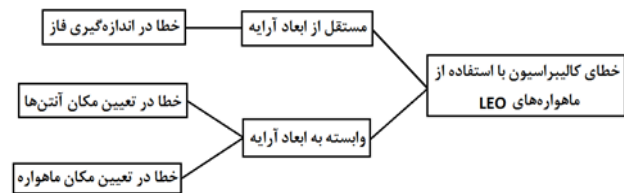
با توجه به این‌که آنتن‌های آرایه بایستی در جهات مختلف اقدام به ردگیری موشک‌های بالستیک نمایند، کالیبراسیون فاز نیز بایستی در جهات مختلف انجام گردد. برای مثال فرض کنید بخواهیم آرایه را به ازای زوایای افقی ۱۰۰ تا ۳۰۰ درجه و زوایای عمودی ۱۰ تا ۶۰ درجه با فواصل زاویه‌ای ۵ درجه کالیبره نماییم. در این‌صورت کالیبراسیون بایستی برای ۴۰۰ جهت مختلف انجام شود. پس از انجام کالیبراسیون، برای هر جهت توزیع فاز بین المان‌های آرایه به‌دست می‌آید و در بانک اطلاعاتی ذخیره می‌گردد تا در هنگام ردگیری مورد استفاده قرار گیرد.

دوره تناوب گردش اهداف LEO به دور زمین بسته به ارتفاع مداری آن‌ها بین ۸۸ دقیقه تا ۱۲۷ دقیقه می‌باشد. بنابراین هر یک از این اهداف در طول شبانه روز بین ۱۱ تا ۱۶ مرتبه به دور زمین می‌چرخند و در صورتی‌که در زاویه دید آرایه قرار گیرند می‌توان از آن‌ها برای کالیبراسیون در زوایای افقی و عمودی متنوع بهره برد. در این مقاله به‌منظور شبیه‌سازی گردش اهداف LEO و نیز مسیر حرکت موشک از نرم‌افزار STK [۱۰]. استفاده شده است. مطابق شکل (۳-الف) زاویه‌ی عمودی (θ) به‌عنوان زاویه بین بردار جهت هدف و صفحه مماس بر زمین در محل آرایه تعریف شده است. زاویه افقی (φ) نیز به‌عنوان زاویه بین تصویر بردار جهت هدف در صفحه مماس بر زمین و جهت شمال محلی تعریف گردیده است. به‌منظور کالیبراسیون فاز با استفاده از یک هدف LEO مشخص، بایستی مسیر حرکت LEO، مسیر حرکت موشک را قطع نماید. این موضوع در شکل (۳-ب) برای آرایه قرار گرفته در اصفهان، هدف LEO با ارتفاع مداری ۵۰۰ km، انحراف مداری ۴۵° درجه و طول نقطه صعود ۲۵° درجه و مسیر حرکت یک موشک بالستیک فرضی ملاحظه می‌گردد.

توجه کنید لزومی ندارد کالیبراسیون هم‌زمان با ردگیری هدف انجام گیرد؛ در واقع کالیبراسیون آرایه قبل از ردگیری و در جهات افقی و عمودی متنوع انجام می‌گیرد و توزیع فاز مناسب برای آنتن‌ها در یک کامپیوتر مرکزی ذخیره می‌گردد تا در هنگام ردگیری از آن‌ها استفاده گردد.

همان‌طور که در شکل (۳-ب) مشاهده می‌گردد در طول یک شبانه‌روز ۶ موقعیت برای کالیبراسیون آرایه فازی در زوایای مختلف ایجاد می‌گردد. برای کالیبراسیون در سایر زوایای افقی و عمودی بایستی از اهداف LEO بیشتر با مشخصات مداری متنوع استفاده

شامل دو آنتن و سپس آرایه N آنتنی تحلیل گردیده‌اند. شکل ۲ مراحل فوق را به‌صورت فلوچارت نشان می‌دهد.



شکل ۲. منابع خطا در کالیبراسیون با استفاده از اهداف LEO

۲. کالیبراسیون فاز با استفاده از اهداف مداری زمین

اهداف مداری زمین و به‌طور مشخص LEOها در فاصله‌ی چند صد تا چند هزار کیلومتری سطح زمین قرار دارند و بنابراین اهداف راه دور برای هر یک از آنتن‌های آرایه محسوب می‌شوند. برای کالیبراسیون فاز در حالت ارسال، تمام آنتن‌های آرایه به‌طور هم‌زمان به سمت هدف LEO ارسال می‌نمایند و سپس یکی از آنتن‌های آرایه سیگنال منعکس‌شده از LEO را دریافت می‌کند. سیگنال هر آنتن قبل از ارسال به نوعی مدولاسیون نیاز دارد تا گیرنده بتواند سیگنال‌های آنتن‌های مختلف را از یکدیگر جدا کرده و فاز هر یک را اندازه‌گیری کند. متداول‌ترین روش برای مدولاسیون سیگنال‌های ارسال، به‌کارگیری دنباله‌ای از کدهای شبه‌تصادفی^۱ است، به‌طوری‌که مدولاسیون فاز هر آنتن با آنتن دیگر متفاوت باشد. مدولاسیون به‌کار رفته در هر آنتن، برای گیرنده معلوم است و لذا گیرنده می‌تواند سیگنال آنتن‌های مختلف را از سیگنال مخلوط استخراج کرده و فاز هر یک را اندازه‌گیری نماید. متداول‌ترین کدهای شبه‌تصادفی کدهای هادامارد^۲، طول بیشینه^۳، گلد^۴ و کاسامی^۵ هستند. ویژگی اساسی کدهای شبه‌تصادفی همبستگی کناری پایین آن‌ها با یکدیگر است که سبب می‌شود گیرنده بتواند با ضرب سیگنال مخلوط دریافتی در هر یک از این کدها سیگنال مربوط به آنتن‌های مختلف را شناسایی کند.

کالیبراسیون فاز در حالت دریافت ساده‌تر از حالت ارسال می‌باشد. برای این منظور تنها یک آنتن اقدام به ارسال نموده و سپس سیگنال منعکس‌شده از LEO توسط همه آنتن‌ها دریافت می‌گردد و اختلاف فاز سیگنال‌های دریافتی اندازه‌گیری می‌شود. واضح است که در این حالت نیازی به مدولاسیون برای جداسازی سیگنال‌های مختلف نخواهد بود. همان‌طور که اشاره شد در این

- 1- Pseudo Random Sequence (PRS)
- 2- Hadamard
- 3- Maximal Length
- 4- Gold
- 5- Kasami

6- Orbital Inclination

7- Longitude of Ascending Node

نسبت توان سیگنال به توان نویز در حالت استفاده از انتگرالگیری همدوس در گیرنده از رابطه ۲ محاسبه می‌گردد:

$$SNR = \frac{P_T \times A_{eff}^2 \times \sigma \times PRF \times t_0}{4\pi \times R^4 \times \lambda^2 \times kTB} \quad (2)$$

در رابطه فوق P_T توان ارسالی، A_{eff} سطح موثر آنتن، سطح مقطع راداری هدف LEO، PRF فرکانس تکرار پالس، زمان انتگرالگیری، R فاصله تا هدف LEO، λ طول موج، T دمای نویز موثر (با در نظر گرفتن عدد نویز) برای گیرنده، B پهنای باند و K ثابت بولتزمان است.

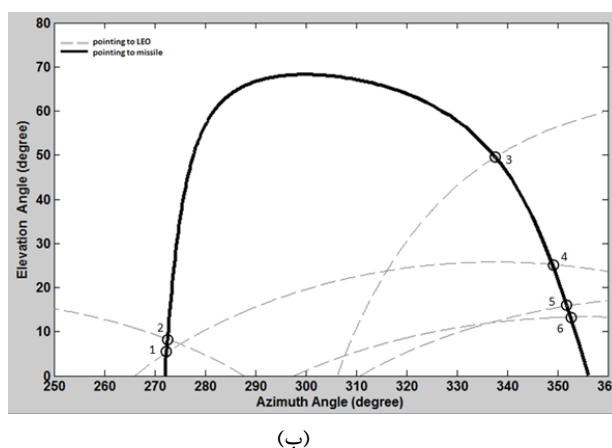
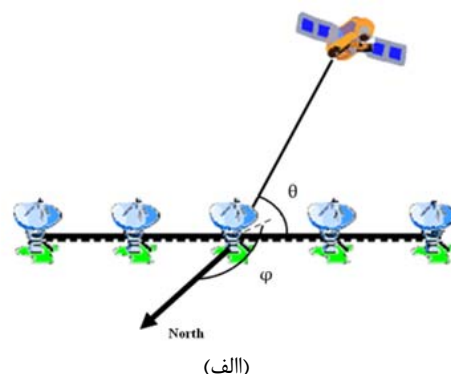
فرض کنید آنتن‌های آرایه دارای قطر ۴ m و راندمان پنجره ۶۰٪ بوده و از لامپ کلایسترون با توان خروجی ۵۰۰ kW بهره می‌برند. همچنین فرض کنید فرکانس تکرار پالس برابر با ۵۰، عرض پالس برابر با ۱ ms، سطح مقطع راداری هدف ۱ m² و دمای نویز سیستم ۶۰ کلوین باشد. زمان انتگرالگیری توسط سرعت زاویه‌ای اهداف LEO و پهنای بیم ۳ dB آنتن‌ها تعیین می‌گردد. در عمل، ردگیری موشک بایستی با فاصله‌ی زمانی مناسب قبل از برخورد موشک به هدف انجام گیرد. از طرفی از ۶ فرصت کالیبراسیون نشان داده شده در شکل ۱، فرصت‌های ۴ و ۵ و ۶ در فاصله زمانی کمتر از ۳۰ ثانیه قبل از برخورد قرار دارند و لذا قابل استفاده نمی‌باشند. جدول ۱ در زمان انتگرالگیری، متوسط فاصله هدف LEO از آرایه، SNR و در نهایت خطای اندازه‌گیری فاز را برای سه فرصت اول کالیبراسیون در شکل ۱ نشان می‌دهد.

جدول ۱. مشخصات دسترسی آرایه با موقعیت جغرافیایی اصفهان به هدف LEO

| شماره دسترسی | زمان انتگرالگیری (ثانیه) | متوسط فاصله از آرایه (کیلومتر) | SNR (dB) | خطای اندازه‌گیری فاز (درجه) |
|--------------|--------------------------|--------------------------------|----------|-----------------------------|
| ۱ | ۵/۱۲ | ۲۱۱۹/۸ | ۲۶/۷ | ۲/۶۵ |
| ۲ | ۵/۱۲ | ۱۸۵۵/۵ | ۲۹/۰ | ۲/۰۳ |
| ۳ | ۳/۱ | ۶۵۵/۷ | ۴۴/۹ | ۰/۳۲ |

با توجه به این‌که ماهواره‌های LEO اهدافی متحرک هستند، بایستی اثر سرعت حرکت آن‌ها و نیز تغییرات سطح مقطع راداری اهداف LEO در کالیبراسیون لحاظ گردند. بر این اساس دو عامل مذکور حد بالایی را برای زمان انتگرالگیری تعیین می‌نمایند که باید برای استفاده عملی از ماهواره‌های LEO مورد توجه قرار گیرد. می‌دانیم مولفه شعاعی سرعت ماهواره‌ها نسبت به آرایه سبب ایجاد شیفت داپلر در سیگنال‌های دریافتی می‌گردد. اگر مولفه فوق در

کرد. از طرفی پایداری فازی کل آرایه تعیین می‌کند که کالیبراسیون در یک جهت خاص با چه فاصله‌ی زمانی باید تکرار گردد.



شکل ۳. تعریف زوایای افقی و عمودی (ب) فرصت‌های کالیبراسیون با استفاده از هدف LEO

۳. خطای اندازه‌گیری فاز

همان‌طور که پیش از این اشاره شد برای کالیبراسیون فاز آرایه با استفاده از اهداف LEO، همه آنتن‌ها به سمت هدف ارسال کرده و سپس یک آنتن سیگنال منعکس شده از LEO را دریافت می‌نماید. آنتن گیرنده بایستی سیگنال‌های مربوط به آنتن‌های مختلف را از یکدیگر جدا کرده و فاز هر یک را اندازه‌گیری نماید. از طرفی می‌توان اثبات نمود در حضور نویز گاوسی و سفید، خطای اندازه‌گیری فاز سیگنال برحسب رادیان از رابطه زیر به دست می‌آید [۱]:

$$\sigma_{\Delta\varphi} = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot SNR}} \quad (1)$$

در این صورت با فرض پذیرش حداکثر ۱ درجه خطا در اندازه‌گیری فاز، حداقل مقدار SNR مورد نیاز برابر با ۳۵ dB می‌باشد. در ادامه به نحوه محاسبه SNR در فرکانس ۳ GHz برای یک آرایه فرضی و هدف LEO شبیه‌سازی شده در بخش قبل، می‌پردازیم.

المان تعمیم داد [۱۱]:

$$E(r, \theta, \varnothing) = \left[\left(\frac{\eta P}{2\pi r^2} \right)^{1/2} e^{-jkr} \sum_{i=1}^N [G_0]^{1/2} \right] \quad (5)$$

$$\exp\{j[\Psi_i - k(|\mathbf{R}_i - \mathbf{R}|)]\}$$

در رابطه فوق فرض شده توان ورودی و بهره تمامی آنتن‌های آرایه مشابه و به ترتیب برابر با P و G₀ بوده و فاز سیگنال ارسالی از آنتن iام با Ψ_i نشان داده شده است. همچنین \mathbf{R}_i و \mathbf{R} به ترتیب بردار مکان هدف و مرکز فاز آنتن iام می‌باشند. در این صورت بهره موثر آرایه عبارت است از:

$$G_{array} = \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N [G_0]^{1/2} \exp\{j[\Psi_i - k(|\mathbf{R}_i - \mathbf{R}|)]\} \right|^2 \quad (6)$$

اگر برای فاز هر آنتن رابطه $\Psi_i = k(|\mathbf{R}_i - \mathbf{R}|)$ برقرار باشد، خواهیم داشت:

$$G_{array}(\theta, \varnothing) = N G_0 \quad (7)$$

در این صورت توان دریافتی به‌وسیله گیرنده برابر است با:

$$P_{rec} = (NP) \times (N G_0) = N^2 \times (P G_0) \quad (8)$$

که در این شرایط همدوسی کامل در محل هدف ایجاد شده و راندمان آرایه برابر با یک می‌باشد. بنابراین برای دستیابی به این مهم بایستی بردار مکان مرکز فاز هر آنتن (\mathbf{R}_i) و بردار مکان هدف کالیبراسیون (\mathbf{R}) معلوم باشند.

در حالتی که هدف در راه دور کل آرایه قرار داشته باشد برای محاسبه $k(|\mathbf{R}_i - \mathbf{R}|)$ می‌توان از تقریب زیر استفاده کرد:

$$k(|\mathbf{R}_i - \mathbf{R}|) \approx k(r - \mathbf{R}_i \cdot \mathbf{u}_{\theta, \varnothing}) \quad (9)$$

که $\mathbf{u}_{\theta, \varnothing}$ بردار یکه در جهت هدف است. مزیت استفاده از تقریب فوق آن است که دیگر نیازی به دانستن موقعیت مکانی هدف کالیبراسیون (در اینجا LEO) نخواهیم داشت.

برای بررسی دقت تقریب ارائه شده در رابطه (۹) بایستی راه دور کل آرایه را به‌دست آوریم. توجه به این نکته ضروری است که در اینجا راه دور آرایه بر طبق معیار $\frac{2D^2}{\lambda}$ که D بیشترین بعد آرایه و λ طول موج است، تعیین نمی‌گردد؛ زیرا این معیار برای تقریب اندازه میدان الکتریکی در راه دور کاربرد دارد و این در حالی است که ما به دنبال دقت در فاز میدان الکتریکی می‌باشیم. در اینجا برای تعیین راه دور یک آرایه مشخص، بایستی خطای فاز ایجاد شده بر اثر

طول زمان انتگرال‌گیری ثابت باشد، سیگنال دریافتی در طول زمان انتگرال‌گیری شیف‌ت داپلر و در نتیجه شیف‌ت فاز ثابتی را تجربه می‌کند که با توجه به نسبی بودن فاز، منجر به بروز خطای فازی نمی‌گردد؛ اما از آنجایی که مولفه شعاعی سرعت ماهواره‌ها پارامتری متغیر با زمان است، این عامل سبب می‌شود سیگنال منعکس شده از ماهواره LEO در طول زمان انتگرال‌گیری شیف‌ت فاز متغیری را تجربه نماید که این امر منجر به افت بهره انتگرال‌گیری همدوس در گیرنده می‌گردد. اگر شیف‌ت داپلر سیگنال دریافتی را به‌صورت $f_D \pm \delta f_D$ نشان دهیم، حد بالای زمان انتگرال‌گیری از رابطه زیر تعیین می‌گردد [۵]:

$$t_0 \leq 1 / (2\delta f_D) \quad (3)$$

همچنین حرکت ماهواره در طول انتگرال‌گیری سبب تغییر سطح مقطع راداری و در نتیجه خطای فاز می‌گردد؛ به‌طوری‌که برای هدفی با ساختار پیچیده که بیشترین اندازه آن برابر با D_t است، تغییر در زاویه تابش به اندازه $\delta\theta = \lambda / (2D_t)$ می‌تواند ۱۸۰ درجه شیف‌ت فاز در میدان پراکنده شده ایجاد نماید. اگر ماهواره LEO در فاصله R از زمین قرار داشته و با سرعت مماسی u در حال حرکت باشد، زمان انتگرال‌گیری به‌صورت زیر محدود می‌گردد [۵]:

$$t_0 \leq R\lambda / (2D_t u) \quad (4)$$

بنابراین با توجه به روابط (۳) و (۴)، حد بالای زمان انتگرال‌گیری را می‌توان کمینه اعداد به‌دست‌آمده از این دو رابطه در نظر گرفت.

۴. خطای تعیین مرکز فاز آنتن‌ها و موقعیت اهداف

کالیبراسیون

در بخش قبل ملاحظه گردید که فرایند کالیبراسیون فاز آرایه همواره با خطا همراه خواهد بود. از این رو ترجیح می‌دهیم منابع خطای فاز را شناسایی کرده و در صورت امکان پیش از انجام کالیبراسیون تصحیح نماییم. می‌دانیم خطایی که در فاز سیگنال ارسالی بر اثر رفتار فازی زیر سیستم هر آنتن، اثرات جوی و جابه‌جایی مکانیکی آنتن‌ها ایجاد می‌گردد، ماهیتی تصادفی دارد و بنابراین نمی‌تواند به‌طور کامل پیش از کالیبراسیون تصحیح شود. از طرفی یکی دیگر از منابع خطای فاز، اختلاف فاصله آنتن‌های آرایه از اهداف کالیبراسیون می‌باشد که برای تعیین آن بایستی مکان مرکز فاز آنتن‌های آرایه و اهداف کالیبراسیون با دقت کافی تعیین گردند. برای تجزیه و تحلیل این موضوع آرایه‌ای از دو آنتن را در نظر بگیرید که به سمت هدفی در راه دور هر یک از آنتن‌ها جهت‌گیری کرده‌اند. این آرایه در شکل ۴ نشان داده شده است. در این حالت میدان الکتریکی در راه دور هر آنتن را می‌توان محاسبه کرده و به آرایه با N

قطر ۱۲ m برای خطای فاز کمتر از ۵ درجه بایستی فاصله هدف مداری از آرایه بیش از ۱۵۰۰ km باشد. با استفاده از رابطه مرسوم، راه دور آرایه‌های مذکور در فرکانس ۳ GHz به ترتیب برابر با ۱۱/۵۲ km و ۱۰۳/۶۸ km به دست می‌آیند که با توجه به نمودار شکل ۵ این فواصل را نمی‌توان به‌عنوان راه دور کل آرایه در نظر گرفت. توجه کنید که در صورتی که هدف مداری در راه دور آرایه قرار نداشته باشد، خطای تقریب رابطه (۹) قابل قبول نخواهد بود و لذا بایستی از موقعیت دقیق هدف اطلاع داشته باشیم. از طرفی در [۵] نشان داده شده است که اطلاعات کنونی از موقعیت مکانی اهداف مداری، دقت مورد نیاز را بر آورده نمی‌کنند و بنابراین برای استفاده از اهداف مداری لازم است که ابتدا سیستم‌های موقعیت‌یاب دقیق برای آن‌ها طراحی و ساخته شوند.

مقایسه انجام شده بین آرایه‌ای شامل دو آنتن با قطر ۴ m و آرایه‌ای شامل دو آنتن با قطر ۱۲ m، نشان داد که با افزایش قطر آنتن و در نتیجه افزایش فاصله آنتن‌ها از یکدیگر، خطای فاز بر اثر استفاده از تقریب رابطه ۹ افزایش می‌یابد. حال فرض کنید آرایه شامل N آنتن با قطر D باشد. برای مقایسه بین حالات مختلف N و D، فرض می‌کنیم توان ایزوتروپیک موثر کل آرایه مقدار ثابتی باشد؛ از طرفی می‌دانیم توان ایزوتروپیک موثر کل آرایه مطابق با رابطه زیر به توان پیک هر آنتن، قطر هر آنتن و تعداد کل آنتن‌ها وابسته است:

$$EIRP = N^2 \times P \times G = N^2 \times P \times \eta \times \frac{\pi^2}{\lambda^2} \times D^2 \quad (10)$$

که در رابطه فوق η راندمان پنجره آنتن‌ها است. به‌عنوان مثال اگر فرض کنیم EIRP مورد نظر برای آرایه برابر با ۱ TW باشد، بی‌نهایت ترکیب ممکن به صورت (N,P,D) می‌توان در نظر گرفت که توان فوق را برآورده کنند. از آنجایی که ابعاد کل آرایه تنها به N و D وابسته است، برای سادگی P را مقدار ثابتی مثل ۱ MW فرض می‌کنیم؛ با مفروضات فوق و برای راندمان پنجره ۶۰٪ و فرکانس ۳ GHz، مطابق با معادله ۱۰ می‌توان نتیجه گرفت رابطه زیر باید بین N و D برقرار باشد:

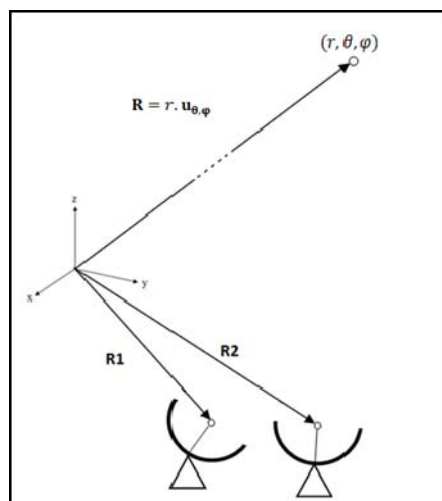
$$N * D = \sqrt{EIRP / (P \times \eta \times \pi^2 / (\lambda^2))} = 41.1 \quad (11)$$

اگر آنتن‌های آرایه دارای قطر D بوده و حداقل زاویه عمودی آن‌ها را θ_{min} نشان دهیم، حداقل فاصله بین هر دو آنتن آرایه از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۲]:

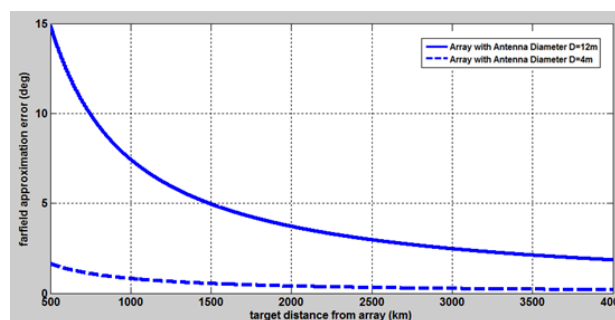
$$d_{min} = D / \sin(\theta_{min}) \quad (12)$$

محدودیت فوق برای اجتناب از مسدود شدن امواج یک آنتن به‌وسیله آنتن‌های مجاور تعیین می‌گردد. با توجه به بهره بالای آنتن‌ها اثر گلبرگ‌های کناری آنتن‌ها روی الگوی تشعشعی یکدیگر

استفاده از رابطه (۹) را بر حسب فاصله هدف کالیبراسیون از آرایه رسم نمود. سپس به‌ازای خطای فاز کمتر از یک مقدار معین (مثلاً ۵ درجه)، راه دور آرایه تعیین می‌گردد. البته واضح است که با افزایش ابعاد آرایه، راه دور آرایه نیز افزایش می‌یابد و بایستی از اهداف با ارتفاع مداری بیشتر برای کالیبراسیون استفاده گردد. به‌عنوان مثال آرایه‌ای شامل دو آنتن هریک به قطر ۴ m را در نظر بگیرید که آنتن مرجع در مبدأ قرار گرفته و آنتن دیگر در مکان $R_1 = (24m, 0, 0)$ قرار دارد. همچنین آرایه دیگری را در نظر بگیرید که شامل دو آنتن به قطر ۱۲ m باشد به‌طوری‌که آنتن مرجع در مبدأ قرار گرفته و آنتن دیگر در مکان $R_1 = (72m, 0, 0)$ قرار دارد. خطای فاز ایجاد شده بر اثر استفاده از تقریب رابطه ۹ در فرکانس ۳ GHz بر حسب فاصله هدف کالیبراسیون برای دو آرایه مذکور در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۴. آرایه‌ای از دو آنتن بشقابی که به سوی هدفی در راه دور هر آنتن جهت‌گیری کرده‌اند.



شکل ۵. مقایسه خطای فاز ایجاد شده بر اثر استفاده از رابطه ۷ برای دو آرایه مختلف

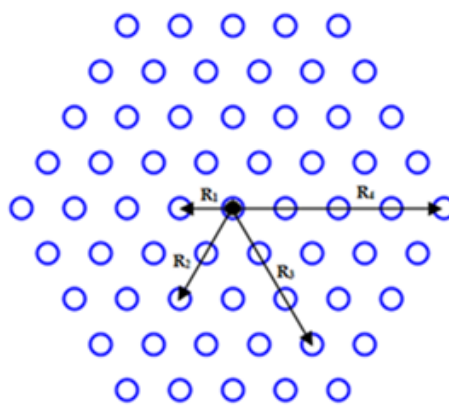
مطابق با شکل ۵، برای آرایه متشکل از دو آنتن با قطر ۴ m در فرکانس ۳ GHz، هدف LEO با فاصله ۵۰۰ km را می‌توان به‌عنوان هدف راه دور در نظر گرفت؛ از طرفی برای آرایه شامل دو آنتن با

مطابق با رابطه (۹) حتی اگر هدف LEO در راه دور آرایه قرار داشته باشد، باز هم خطای تعیین موقعیت مکانی آنتن‌ها (R_i) به صورت مستقیم بر خطای فاز اثر می‌گذارد و لذا صرف نظر از ابعاد آرایه، مکان مرکز فاز آنتن‌های آرایه بایستی با دقت کسری از طول موج تعیین گردند. در این مقاله با استفاده از نرم‌افزارهای Antenna Magus و CST Microwave Studio، آنتن بشقابی آفستی با قطر $1/2$ m در فرکانس ۳ GHz و بهره ۳۰ dB طراحی گردید. به منظور این‌که مرکز فاز آنتن در دو صفحه E-plane و H-plane تطابق داشته باشد، برای تغذیه آن دو نوع آنتن هورن که دارای بهره مشابه در صفحات E-plan و H-plane هستند پیشنهاد می‌گردند. نوع اول گونه‌ای آنتن هورن دایروی موسوم به پاتر^۱ است که دو مد TM_{11} و TE_{11} را منتشر می‌کند [۱۳] و نوع دوم آنتن هورن موجدار^۲ می‌باشد [۱۴]. در اینجا برای تغذیه آنتن از هورن پاتر که با استفاده از نرم‌افزار Antenna Magus در فرکانس ۳ GHz طراحی شده استفاده نموده‌ایم. شکل ۸ آنتن بشقابی آفستی طراحی شده را همراه با بهره آن در دو صفحه E-plane و H-plane نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۸ ملاحظه می‌گردد بهره آنتن در دو صفحه E-plane و H-plane در محدوده گلبیگ اصلی تطابق خوبی دارد. پهنای پرتو ۳ dB در هر دو صفحه برابر با $6/1$ درجه می‌باشد.

در نرم‌افزار CST این امکان وجود دارد که با استفاده از میدان راه دور، مرکز فاز آنتن را تعیین کرد. در این حالت CST در هر یک از صفحات E-plane و H-plane یک مرکز فاز به ما خواهد داد که در حالت کلی انطباق ندارند. از طرفی می‌توان مبنای محاسبه مرکز فاز را به جای کل پترن تنها بخشی از پترن راه دور آنتن قرار داد که ما ناحیه پهنای پرتو ۳ dB را برای این منظور انتخاب کردیم. بر این اساس CST نقطه‌ای را به عنوان مرکز فاز انتخاب می‌کند که به‌ازای آن فاز میدان الکتریکی کم‌ترین تغییرات را در محدوده پهنای پرتو ۳ dB داشته باشد. با توجه به انطباق پترن راه دور در این محدوده در دو صفحه E-plane و H-plane، مرکز فاز محاسبه شده در این دو صفحه نیز اختلاف اندکی خواهند داشت.

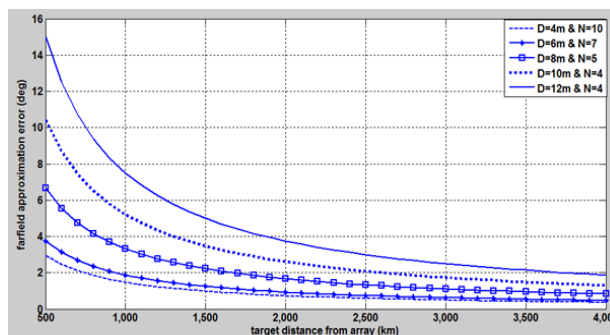
برای بررسی صحت مرکز فاز به‌دست‌آمده در CST، می‌توان مبدأ مختصات را به مکان مرکز فاز منتقل کرد و فاز میدان الکتریکی را بر حسب θ در دو صفحه E-plane و H-plane ($\phi=90^0$) رسم نمود. شکل ۹ فاز میدان الکتریکی را پس از انتقال مبدأ مختصات به مرکز فاز نشان می‌دهد. مطابق شکل ۹ فاز در صفحات E-plane و H-plane در محدوده پهنای پرتو ۳ dB تقریباً یکنواخت است. به‌عنوان معیاری از یک‌نواختی فاز می‌توان انحراف از معیار فاز میدان الکتریکی را در محدوده پهنای پرتو ۳ dB و در

در نظر گرفته نمی‌شود. می‌توان فرض نمود θ_{min} برابر با 10 درجه است. آنتن‌های آرایه می‌توانند در آرایش‌های متنوعی از جمله خطی و یا مسطح قرار گیرند. از آنجایی‌که هر چه ابعاد کل آرایه کمتر باشد، خطای تقریب راه دور نیز کمتر خواهد بود، استفاده از آرایش ۶ ضلعی منتظم برای آنتن‌های آرایه بهترین گزینه است؛ زیرا با تعداد آنتن مشخص و فاصله حداقلی بین دو آنتن که از رابطه (۱۲) محاسبه می‌گردد، آرایش مذکور فشردده‌ترین حالت ممکن را به‌دست خواهد داد. شکل ۶ چیدمان آنتن‌های آرایه به صورت ۶ ضلعی منتظم را نشان می‌دهد که آنتن مرجع در مرکز آرایه قرار گرفته است؛ ضمن این‌که برای کاهش ابعاد کل آرایه، R_i برابر با $i \times d_{min}$ خواهد بود.



شکل ۶. آرایش ۶ ضلعی منتظم برای آنتن‌های آرایه

شکل ۷ خطای فاز تقریب راه دور (رابطه ۹) را برای آرایه‌هایی با قطر آنتن، $4m \leq D \leq 12m$ آرایش ۶ ضلعی منتظم و با شرط برقراری رابطه (۱۱) نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودار شکل ۷ ملاحظه می‌گردد، با افزایش قطر آنتن‌های آرایه، خطا نیز افزایش پیدا می‌کند؛ لذا با استفاده از شکل ۷، می‌توان خطای فاز ناشی از ابهام در موقعیت مکانی ماهواره‌های LEO را بر اساس ارتفاع مداری ماهواره و مشخصات آرایه (D و N)، به‌دست آورده و با در نظر گرفتن یک مقدار قابل قبول برای خطای فاز، اقدام به طراحی آرایه نمود.



شکل ۷. خطای فاز تقریب راه دور برای آرایه‌هایی با ابعاد مختلف

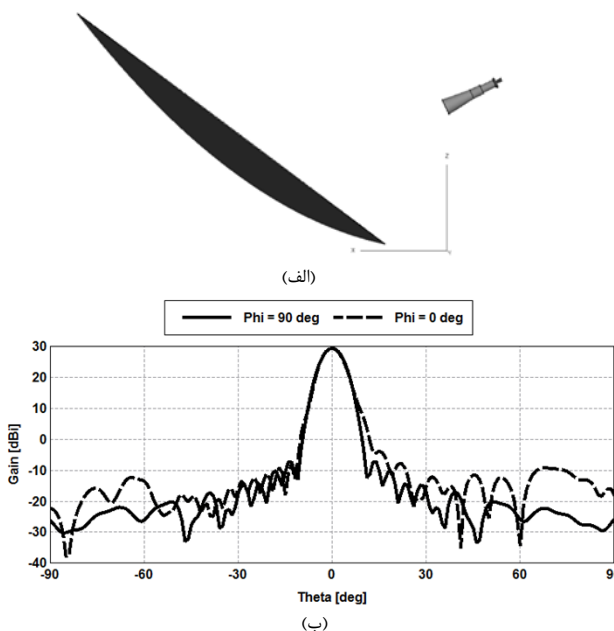
1- Potter Horn
2- Corrugated Horn

کرد. در ادامه روشی برای تعیین راه دور کل آرایه با معیار خطای فاز ارائه گردید و نتیجه گرفته شد که در اینجا راه دور آرایه با استفاده از معیار $\frac{2D^2}{\lambda}$ به دست نمی آید. نشان داده شد، در صورتی که هدف کالیبراسیون در راه دور آرایه قرار داشته باشد، نیازی به دانستن موقعیت آن نداریم؛ ولی تعیین موقعیت مرکز فاز آنتن های آرایه ضروری است. از طرفی با توجه به این که آنتن بشقابی در حالت کلی دو مرکز فاز متفاوت در صفحات E-plane و H-plane دارد، تعیین مرکز فاز همواره با ابهام همراه خواهد بود. برای کاهش این ابهام، استفاده از آنتن هورن پاتر که دارای بهره مشابه در صفحات E-plane و H-plane است پیشنهاد گردید. سپس مرکز فاز آنتن طراحی شده با به کارگیری نرم افزار CST به دست آمد و صحت آن با استفاده از معیار تخت بودن فاز تأیید گردید.

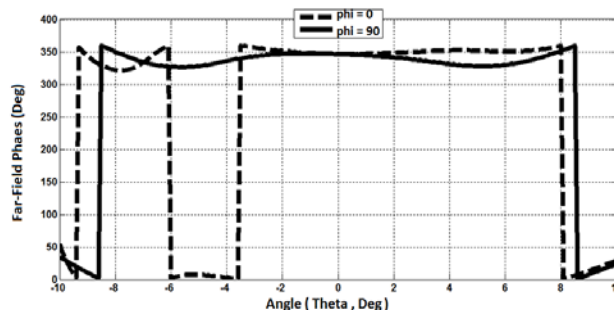
۵. مراجع

- [1] K. M. Cuomo, S. D. Coutts, J. C. Mcharg, N. B. Pulsone, and F. C. Robey, "Wideband Aperture Coherence Processing for Next Generation Radar (NexGen)," MIT Lincoln Laboratory, 2004.
- [2] <http://eis.jpl.nasa.gov/deepspace/dsndocs/810-005/document101A>.
- [3] W. Feinian and K. Sarabandi, "Ground Array Calibration using Lunar InSAR Imagery," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 46, no. 2, pp. 1589-1608, 2010.
- [4] F. Davarian, "Uplink Arrays for the Deep Space Network," Proceedings of the IEEE, vol. 95, no. 10, pp. 1923-1930, 2007.
- [5] K. Sarabandi and W. Feinian, "Phased Array of Large Reflectors for Deep-Space Communication," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 43, no. 2, pp. 251-261, 2007.
- [6] J. Nessel and R. Acosta, "Predicting Sparse Array Performance from Two-Element Interferometer Data," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 60, no. 2, pp. 886-894, 2012.
- [7] Y. Shang and X. Feng, "MLC-SUMPLE Algorithm for Aligning Antenna Arrays in Deep Space Communication," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 60, no. 4, pp. 2828-2834, 2013.
- [8] L. D'Addario, R. Proctor, J. Trinh, E. Sigman, and C. Yamamoto, "Uplink Array Demonstration with Ground Based Calibration," IPN Progress Report, pp. 42-176, 2009.
- [9] W. J. Hurd, "System concepts for transmit arrays of parabolic antennas for deep space uplinks," IEEE Aerospace Conference, pp. 1228-1234, 2005.
- [10] <http://www.stk.com>.

هر دو صفحه $\phi=0^\circ$ و $\phi=90^\circ$ محاسبه نمود. بر این اساس انحراف از معیار فاز در صفحات E-plane و H-plane به ترتیب برابر با ۰/۵۴ درجه و ۰/۶۱ درجه خواهد بود که مقادیر قابل قبولی هستند.



شکل ۸. الف) آنتن بشقابی آفستی همراه با هورن دایروی (ب) بهره آنتن بشقابی آفستی



شکل ۹. فاز میدان الکتریکی پس از انتقال مبدأ

۴. نتیجه گیری

در این مقاله استفاده از اهداف مداری زمین برای کالیبراسیون آرایه فازی از آنتن های بشقابی مورد بررسی قرار گرفت و فرصت های در دسترس کالیبراسیون با استفاده از یک هدف LEO و نرم افزار STK شبیه سازی گردید. بر این اساس نتیجه گرفته شد که برای کالیبراسیون آرایه در جهات مختلف می توان از اهداف مداری با ارتفاع و زوایای مداری متنوع استفاده کرد که زمان دسترسی و طول بازه دسترسی برای هر یک از اهداف مداری با استفاده از شبیه سازی به دست می آیند. همچنین با توجه به اطلاعات به دست آمده از شبیه سازی می توان SNR و از آنجا خطای اندازه گیری فاز را تعیین

- [11] P. A. Stadter, B. L. Kantsiper, and D. G. Jablonski, "Uplink Arraying Analysis for NASA's Deep Space Network," IEEE Aerospace Conference, pp. 1-6, 2010.
- [12] V. Jamnejad, J. Huang, and R. J. Cesarone, "A Study of Phased Array Antennas for NASA's Deep Space Network," 2001.
- [13] L. Shafai, K. S. Sharma, B. Balaji, A. Damini, and G. Haslam, "Multiple Phase Center Performance of Reflector Antennas Using a Dual Mode Horn," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 54, no. 11, pp. 3407-3417, 2006.
- [14] W. A. Imbriale, "Large Antennas of the Deep Space Network," John Wiley & Sons, 2005.