

طراحی و ساخت آنتن چوک حلقه پله‌ای با پوشش‌دهی وسیع جهت کاربرد در محموله‌های مخابراتی باند X ماهواره‌های LEO

مجتبی فلاح‌زاده^۱، هادی علی اکبریان^{۲*}، ابوالفضل حدادی^۳، سهیل رادیوم^۴

۱- کارشناسی ارشد، مرکز تحقیقات فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، ۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۳ و ۴- دکتری، مرکز تحقیقات فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران (دریافت: ۹۶/۰۱/۲۷، پذیرش: ۹۶/۱۲/۱۹)

چکیده: در بین آنتن‌هایی که برای لینک‌های ارتباط اطلاعات در ماهواره‌های LEO در محدوده فرکانسی ریزموج به کار گرفته می‌شوند، آنتن‌های چوک حلقه یکی از بهترین گزینه‌ها محسوب می‌شوند. در این مقاله یک آنتن چوک حلقه با چهار حلقه هم‌محور با پروفایل پله‌ای نزولی از مرکز فاز آنتن طراحی و بهینه‌سازی شده و پس از ساخت مورد آزمایش قرار گرفته است. مشخصات مورد نیاز آنتن بر اساس نیازهای ماهواره‌های مخابراتی در مدار LEO محاسبه شده است. قطبش دایروی آنتن توسط تیغه سپتوم تعبیه‌شده در داخل موج‌بر دایره‌ای متصل به آنتن تامین می‌شود. الگوی تشعشعی وسیع آنتن محدوده 125° را در راستای زاویه فراز در فرکانس 10/46 GHz با بهره‌ای بهتر از 3 dB پوشش می‌دهد. به منظور کاهش اثرات بدنه ماهواره و صفحات خورشیدی بر الگوی تشعشعی آنتن، با نصب آنتن بر روی ماکت ماهواره تمامی اثرات آن بر روی آنتن از طریق اندازه‌گیری و هم‌شبه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت برای کاهش اثرات مخرب صفحات خورشیدی بر روی آنتن، ارتفاع آن از سطح ماهواره مقداری افزایش یافته است.

کلید واژه‌ها: آنتن چوک حلقه پله‌ای نزولی، ماهواره‌ی LEO، اثر بدنه ماهواره، لینک باند X

۱- مقدمه

صورت مشکلات جهت‌گیری ماهواره احتمال قطعی لینک آن کاهش یابد. برای دستیابی به الگوی تشعشعی مطلوب مورد نظر، می‌توان از آنتن‌های زیادی نظیر هلیکس‌های سیم لوله‌ای مانند بایفیلار^۵ و کوادریفیلار^۶، آنتن‌های آرایه، نوعی از آنتن‌های روزنه با ساختاری شبه بوقی به نام آنتن‌های حلقه‌های انسداد^۷ و با نام دیگر آنتن‌های چند مودی^۸ و ... بهره گرفت. قطبش این آنتن‌ها در محدوده پوشش‌دهی آنها به صورت بیضوی با نسبت محوری معین است.

برای دستیابی به آنتنی که شرایط مذکور را دارا باشد و علاوه بر آن از نظر مکانیک قابل ساخت بوده و همچنین بودجه وزنی مطلوب سیستم را برآورده سازد، نمی‌توان از آنتن‌های آرایه‌ای استفاده کرد. آنتن‌های هلیکس سیم لوله‌ای را می‌توان در باندهای فرکانسی S و C به کار گرفت، ولی از آنجایی که در باندهای فرکانسی بالاتر نظیر X و Ku از لحاظ مکانیکی غیر قابل ساخت می‌شوند و نمی‌توان آنها را با روش‌های معمول تغذیه کرد.

ماهواره‌های مخابراتی کوچک که در مدار چرخشی پایین LEO به دور زمین می‌چرخند اغلب در فاصله کمتر از 1400 Km قرار دارند. به منظور ارسال اطلاعات تله‌متری^۱ این ماهواره‌ها و همچنین دریافت فرمان^۲ از طریق ایستگاه زمینی در بازه طلوع تا غروب، آنتن‌های نصب‌شده بر روی این ماهواره‌ها باید دارای الگوی تشعشعی وسیعی باشند. به منظور جبران افت توان ارسال فرستنده برای دو حالت ماهواره در طلوع و ماهواره بالای سر، باید بهره آنتن در کناره‌های الگوی تشعشعی به بیشترین مقدار خود برسد. به این ترتیب در حالت ایده‌آل الگوی تشعشعی زین‌اسبی^۳ یا ایزوفلاکس^۴ مطابق شکل (۱) معرفی می‌شود. با این وجود زمانی که گیرنده لینک مخابراتی دارای رنج دینامیکی بزرگتری نسبت به تغییرات توان مسیر باشد، به جای اضافه کردن یک فرورفتگی در زاویه برودساید آنتن، ترجیح داده می‌شود الگوی تشعشعی آنتن ماهواره در کل زوایای پوشش‌دهی یکنواخت باشد تا در

* نویسنده پاسخگو: aliakbarian@eed.kntu.ac.ir

5- Bifilar Helix Antenna (BHA)
6- Quadrifilar Helix Antenna (QHA)
7- Choke Ring Antenna (CRA)
8- MultiMode Antenna (MMA)

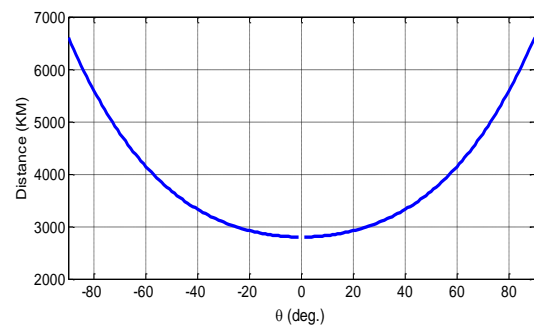
1 - Telemetry
2 - Command
3 - Saddle Radiation Pattern
4 - Isoflux

جهت کاربرد ماهواره مدار LEO با ارتفاع پایین‌نگر^۱ حدود ۶۰۰ Km از سطح زمین تا ارتفاع ۲۸۰۰ Km در زاویه 65° از محور آنتن، به منظور دریافت داده‌های تله‌متری ماهواره، رهگیری و ارسال فرمان به ماهواره^۲ به کار می‌رود. در مرجع [۲] یک آنتن هلیکس با ساختار کوادریفیلار در محدوده فرکانسی باند S جهت کاربرد به عنوان آنتن ایستگاه زمینی ثابت (بدون تعقیب‌کننده^۳) در دریافت داده تله‌متری ماهواره معرفی شده است. در ساختارهای هلیکال می‌توان با تنظیم شعاع مناسب، گام و تعداد حلقه‌ها به الگوی زینی مطلوب در محدوده فرکانسی مورد نظر دست یافت. در مرجع [۳] از ساختار چوک حلقه با پروفایل پله‌ای صعودی متشکل از دو حلقه هم‌محور برای دست‌یابی به الگوی تشعشعی زینی جهت کاربرد در ماهواره‌ی LEO استفاده شده است. در این مرجع به‌منظور تحریک قطبش دایروی، در تغذیه آنتن از یک پروب حلقوی استفاده شده است. با به کارگیری این نوع تغذیه برای آنتن، نسبت محوری آنتن در صفحات ϕ ثابت در محدوده زاویه‌ای $\pm 70^\circ$ به مقداری کمتر از ۷ dB رسیده است. مرجع [۴] از ساختار چوک حلقه با پروفایل مسطح متشکل از پنج حلقه هم‌محور به منظور ارسال اطلاعات SAR^۴ به ایستگاه زمینی با بهره‌گیری از الگوی تشعشعی زینی در ماهواره LEO استفاده کرده است. با به کارگیری این نوع آنتن، بهره آنتن در صفحات ϕ ثابت در محدوده زاویه‌ای $\pm 60^\circ$ پس از بهینه‌سازی به مقداری بهتر از ۶ dB رسیده است.

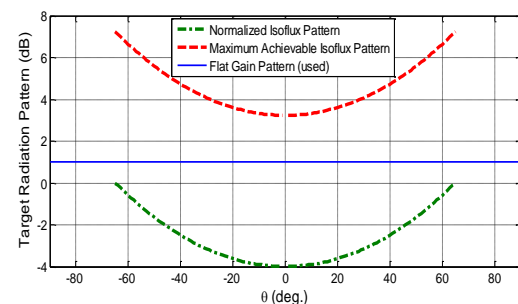
در این مقاله از ساختار آنتن چوک حلقه یا حلقه‌های انسداد استفاده شده است با این تفاوت که علی‌رغم آنتن‌های معمول که تمامی حلقه‌های به‌صورت هم‌مرکز در یک صفحه واقع شده‌اند در طراحی این آنتن از حلقه‌های هم‌مرکز با پروفایل کاهشی به‌منظور دست‌یابی به الگوی تشعشعی وسیع با قطبش دایروی و نسبت محوری کوچک‌تر از ۹ dB و بهره بهتر از ۳ dB در محدوده $\theta = \pm 62/5^\circ$ استفاده شده است. برای تحقق قطبش دایروی، در قسمت تغذیه موج‌بری آنتن یک تیغه قطبنده^۵ تعبیه شده که با توجه به پهنای باند کاری مورد نیاز آنتن طراحی شده است.

در قسمت ۲ مقاله، محاسبات بودجه لینک ماهواره و تعیین میزان گین آنتن انجام می‌شود. در قسمت ۳ به طراحی و بهینه‌سازی آنتن پرداخته شده است و در قسمت ۴ نتایج اندازه‌گیری آنتن ارائه شده است. در نهایت در قسمت ۵ مقاله نتیجه‌گیری شده است.

منطقی‌ترین گزینه برای باندهای فرکانسی بالا آنتن‌های چوک حلقه یا همان حلقه‌های انسداد محسوب می‌شوند. دلیل انتخاب چنین نامی این است که صفحه زمین متشکل از حلقه‌های هم‌محور، مانع از انتشار امواج سطحی بر روی صفحه زمین شده و جریان‌های سطحی بر صفحه زمین را محدود کرده و به حداقل می‌رسانند. بدین ترتیب تشعشعات ناخواسته و کنترل‌نشده به حداقل رسیده و الگوی تشعشعی آنتن به کمک حلقه‌های هم‌محور به‌صورت مطلوب شکل‌دهی خواهد شد. دلیل اینکه نام دیگر آنتن‌های چند مودی را نیز برای آنها به کار می‌برند؛ این است که امواج پس از رسیدن به دهانه و قبل از تشعشع جریان‌هایی را بر صفحه زمین ایجاد می‌کنند، این جریان‌های القاء‌شده می‌توانند مودهای دیگری را تحریک کرده که با مود اولیه تشعشع کنند. البته طراحان آنتن سعی می‌کنند از طریق همین حلقه‌ها، امکان تشعشع مودهای ناخواسته را به حداقل برسانند.



(الف)



(ب)

شکل (۱): (الف) فاصله ماهواره از زمین به ازای زوایای مختلف نسبت به ورودساید، (ب) الگوی تشعشعی ایده‌آل زین اسبی برای ماهواره در ارتفاع ۲۸۰۰ کیلومتر به همراه الگوی تشعشعی تخت استفاده شده.

در مرجع [۱] مهندسیین برای دست‌یابی به الگوی زینی در محدوده فرکانس ۲ GHz تا ۲/۳ GHz در باند S از ساختار بایفیلار آنتن‌های هلیکس سیم‌لوله‌ای بهره گرفته‌اند. این آنتن

- 1- Nadir-looking
- 2- Telemetry Tracking and Command (TT&C)
- 3- Tracker
- 4- Synthetic Aperture Radar
- 5- Polarizer

به اندازه‌ای بین ربع طول موج تا نصف طول موج کاری آنتن انتخاب می‌شود؛ یعنی برای شکل‌دهی الگوی تشعشعی آنتن و دستیابی به الگوی چپ‌گرد یا راست‌گرد مطلوب، با حذف انتشار امواج سطحی روی صفحه زمین، در باند فرکانسی مورد نظر صورت می‌پذیرد [۵].

جدول (۱): مقادیر مشخصه‌های موثر در محاسبه بودجه لینک

مقدار	مشخصه
۱ W	توان ارسالی فرستنده
۳۹ dB	بهره آنتن زمینی
۳ dB	بهره آنتن فضایی
۱۲۷/۴ dB	تلفات انتشار در فضای آزاد
۳/۵ dB	تلفات اتمسفر و باران
۲ dB	تلفات قسمت انتهایی
۱ dB	تلفات قطبش
۱ dB	تلفات نشانه‌روی آنتن
۲ dB	تلفات چندمسیرگی
۶ dB	حاشیه امنیت
-۱۳۰ dB	توان دریافتی گیرنده

استفاده از چنین آنتنی برای لینک‌های باند X ماهواره‌های LEO سابق بر این نیز گزارش شده است [۳]. در این مرجع، یک آنتن حلقه‌های انسداد با دوحلقه در باند ۸/۴ GHz با تغذیه پروب طراحی و ساخته شده است. با توجه به این که طراحی الگوی تشعشعی این آنتن برای الگوی ایزوفلاکس با زاویه $\pm 40^\circ$ است، از حلقه‌های انسداد به صورت صعودی طراحی شده‌اند.

با توجه به نیازهای لینک مخابراتی ماهواره مورد نظر، یک آنتن با پهنای باند حدود ۲۰۰ MHz در محدوده فرکانسی ۱۰/۴ GHz تا ۱۰/۶ GHz و نسبت محوری کوچک‌تر از ۹ dB، با استفاده از روابط تئوری موجود در مرجع [۵] طراحی می‌شود. الگوهای تشعشعی و نسبت‌های محوری در فرکانس مرکزی ۱۰/۴۶ GHz شبیه‌سازی شده و نتایج اندازه‌گیری در این فرکانس بررسی می‌شود. از آنجایی که در ماهواره‌های LEO لینک‌های مخابراتی متعددی در باندهای فرکانسی مختلف از جمله VHF، UHF، باند S و باند Ku به منظور انتقال اطلاعات با پهنای باندهای متفاوت استفاده می‌شود، باید اثرات متقابل تشعشعی آنها بر یکدیگر را مدنظر قرار داد. با توجه به این که لینک‌های به کار گرفته شده در این ماهواره دارای پهنای باند محدود بود و محدوده فرکانسی مشترکی ندارند اثر متقابل آنها بر یکدیگر قابل صرف نظر

۲- محاسبه بودجه لینک مخابراتی

براساس محاسبات بودجه لینک انجام شده برای لینک مخابراتی باند X ماهواره مخابراتی، به منظور برقراری لینک مخابراتی پایین‌رو با حاشیه امنیت تقریبی ۶ dB و آنتن رفلکتور زمینی با بهره ۳۹ dB به آنتنی با بهره حداقل ۳ dB در زاویه فراز $\pm 62/5^\circ$ نسبت به مرکز فاز آنتن نیاز است. در محاسبات انجام شده با توجه به محدودیت توان مصرفی، توان فرستنده لینک پایین‌رو برابر با ۱ وات در نظر گرفته شده است.

با در نظر گرفتن تلفات مربوط به اتمسفر و باران در باند فرکانسی X، تلفات قسمت انتهایی^۱، تلفات قطبش^۲، تلفات نشانه‌روی و تلفات چند مسیرگی، توان دریافتی در گیرنده زمینی در فاصله تقریبی ۹۵۰ Km کیلومتر برابر ۱۴۰- dB بوده که حدود ۷ dB بیش از سطح حساسیت گیرنده با مدولاسیون 2FSK (۱۴۷ dB-) می‌باشد. تلفات انتشار که شامل تلفات هوای خشک، بخار آب موجود در مسیر و تلفات ابر می‌باشد برای لینک پایین‌رو حدود ۳/۵ dB مطابق با شرایط آب و هوایی متوسط ایران در نظر گرفته شده است.

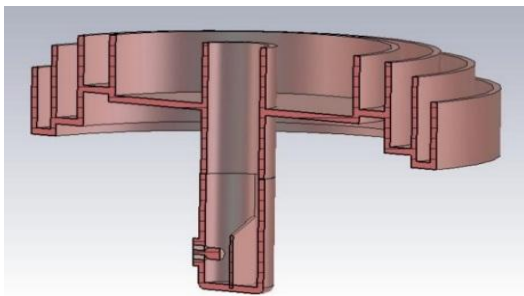
تلفات بخش‌های قسمت انتهایی برای فرستنده و گیرنده برابر با ۲ dB و تلفات قطبش فرستندگی و گیرندگی نیز برابر با ۱ dB در حالت عدم تطبیق و یکسان بودن قطبش آنتن‌های فرستنده و گیرنده در نظر گرفته شده است که این مقدار تلفات به‌ازای نسبت محوری کمتر از ۹ dB در آنتن با قطبش دایروی قابل دسترس خواهد بود. مقدار ۱ dB برای تلفات نشانه‌روی یا فرم‌دهی پرتو^۳ آنتن زمینی در نظر گرفته شده که به دلیل عدم انطباق آنتن زمینی به صورت دقیق (و با بیشترین بهره) بر روی ماهواره می‌باشد. مقدار ۲ dB نیز تلفات چند مسیرگی برای گیرنده در نظر گرفته شده که با توجه به حضور ساختمان و یا درختان در کنار آنتن زمینی می‌باشد. مقادیر مشخصه‌های موثر در محاسبه بودجه لینک به صورت مجزا در جدول (۱) آورده شده است.

۳- طراحی آنتن

حلقه‌های انسداد کلاسیک از حلقه‌های متمرکز بزرگی بر یک صفحه زمین فلزی مدور صاف تشکیل می‌شوند. حلقه‌های انسداد به صورت سطوح شیاردار فلزی با عمق d مدل می‌شوند که برای عمل در قطع^۴ یا جلوگیری از چند مسیرگی^۵ عمق هر یک از آنها

- 1- Front End
- 2- Polarization
- 3- Beam-Shaping Loss
- 4- Cutoff
- 5- Multipath Suppression

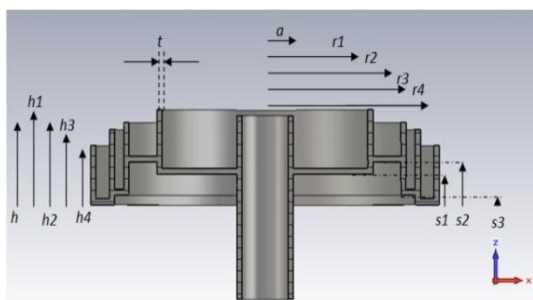
که تاثیرات فوق برای فرکانس طراحی بهینه باشد. برای عملکردهای باند وسیع از تغییر ارتفاع به صورت پله‌ای استفاده می‌شود. از آنجا که در طراحی حاضر پهنای باند وسیع مد نظر نیست، از تغییر ارتفاع خطی استفاده شده است که در این حالت تیغه قطبیده به صورت یک دوزنقه خواهد بود. در شکل (۳) نمونه‌ای از این ساختار آمده است. اتصال کانکتور کوکسیال به موجر نیز در این شکل مشخص است. در این ساختار پس از بهینه‌سازی کلی، قاعده کوچک دوزنقه برابر ۱۰ mm و قاعده بزرگ برابر ۲۲ mm به دست آمده و ضخامت تیغه ۱ mm در نظر گرفته شده است.



شکل (۴): قرارگیری پروب کوکسیال در مجاورت تیغه قطبیده به منظور تحقق قطبش دایروی.

۳-۲- طراحی آنتن چوک حلقه پله‌ای

در شکل (۵) نمایی از آنتن چوک حلقه پیشنهادی با چهار چوک رینگ آمده است. ملاحظه می‌شود که با ۵ مشخصه شعاعی و ۸ مشخصه ارتفاعی به همراه یک مشخصه عرضی (در مجموع ۱۳ مشخصه) می‌توان توصیفی کامل از کل ساختار آنتن مورد طراحی ارائه نمود. به جهت سادگی در کار و بهبود همگرایی بهینه‌سازی، عرض تمامی رینگ‌ها (مشخصه t) برابر با یکدیگر در نظر گرفته شده‌اند که البته متغیر بودن آنها نیز تغییر چندانی در نتایج ایجاد نخواهد کرد. به منظور محاسبه نقاط اولیه مشخصه‌های طراحی می‌توان از روابط موجود در مرجع [۴] بهره گرفت، فقط باید این نکته را در نظر گرفت که با توجه به کاهش بودن پروفایل آنتن، میزان تغییرات این مقادیر اولیه ممکن است چشم‌گیر باشد.

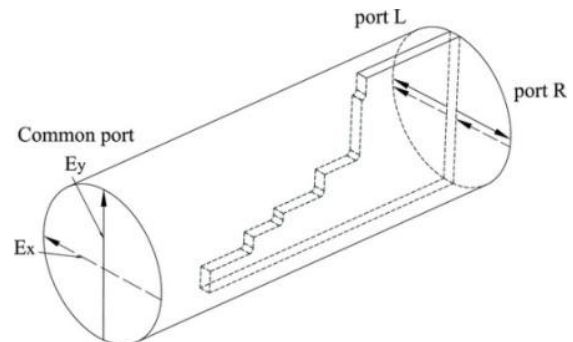


شکل (۵): آنتن چوک رینگ پله‌ای و مشخصه‌های هندسی مرتبط با آن.

بوده و ایزولاسیون بین آنها در حد مطلوب است.

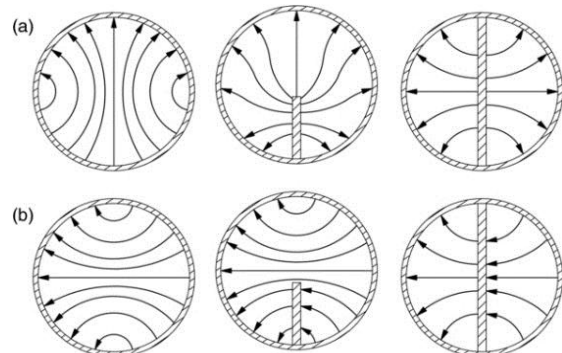
۳-۱- تحقق قطبش دایروی با استفاده از تیغه قطبیده

در شکل (۲) یک موجر دایره‌ای نوعی به همراه یک تیغه قطبیده نمایش داده شده است. ملاحظه می‌شود که دو درگاه^۱ در چپ و راست تیغه مذکور قابل تعبیه است که هر کدام قطبش چپ‌گرد یا راست‌گرد را در اختیار قرار می‌دهند. وقتی از روبرو به این ساختار نگاه کنیم درگاه راست‌گرد در سمت راست و درگاه چپ‌گرد در سمت چپ قرار گرفته است.



شکل (۲): قرارگیری تیغه قطبیده داخل موجر دایروی به منظور استخراج قطبش دایروی راست‌گرد و یا چپ‌گرد [۶].

اصول کارکرد این تیغه بر اساس مرجع [۶] در شکل (۳) آمده است. در حالت اول، موج با مود عمودی پس از مواجهه با تیغه در نهایت دو مود افقی غیر هم‌سو را ایجاد می‌کند. همچنین در حالت دوم مشاهده می‌شود که در نهایت دو مود هم‌سو افقی ایجاد خواهد شد. با ترکیب حالت نهایی این دو مود هائیرید، تنها در نیمه سمت چپ موجر همپوشانی سازنده و تشکیل موج انتشاری خواهیم داشت و در نیمه دیگر شاهد حذف شدن توان خواهیم بود. بدین ترتیب از دو مود خطی می‌توان به یک مود دایروی رسید.



شکل (۳): رفتار موج در برخورد با تیغه قطبیده و تشکیل قطبش دایروی [۶].

تغییر ارتفاع تیغه از صفر تا قطر موجر باید به گونه‌ای باشد

جدول (۲): محدوده تغییرات برای مشخصه‌های طراحی

توصیف مشخصه	نماد	مقدار اولیه		مقدار نهایی	
		mm	نسبت به طول موج	mm	نسبت به طول موج
شعاع داخلی موج‌بر تغذیه	a	۹	۹	۹	۰/۳۱۵
ارتفاع موج‌بر تغذیه از کف آنتن	h	۳۲	۳۲	۳۰	۱/۰۵
ضخامت هر چوک حلقه	t	۲	۲	۲	۰/۰۷
شعاع داخلی چوک حلقه اول	r_1	۴۰	۴۰	۳۹/۹۶	۱/۴۰
شعاع داخلی چوک حلقه دوم	r_2	۵۰	۵۰	۵۲/۸۵	۱/۸۵
شعاع داخلی چوک حلقه سوم	r_3	۶۰	۶۰	۵۸/۳۳	۲/۰۴
شعاع داخلی چوک حلقه چهارم	r_4	۷۰	۷۰	۶۵/۶۰	۲/۲۹
ارتفاع چوک حلقه اول از کف هورن	h_1	۲۰	۲۰	۶۵/۱۶	۲/۲۸
ارتفاع چوک حلقه دوم از کف هورن	h_2	۲۰	۲۰	۲۷/۷۸	۰/۹۷
ارتفاع چوک حلقه سوم از کف هورن	h_3	۲۰	۲۰	۲۵/۳۹	۰/۸۹
ارتفاع چوک حلقه چهارم از کف هورن	h_4	۲۰	۲۰	۲۰/۰۲	۰/۷۰
ارتفاع شکاف اول از کف آنتن	s_1	۰	۰	۱۰/۳۱	۰/۳۶
ارتفاع شکاف دوم از کف آنتن	s_2	۰	۰	۱۴/۳۶	۰/۵۰
ارتفاع شکاف سوم از کف آنتن	s_3	۰	۰	۳/۲۲	۰/۱۱
طول موج‌بر تغذیه تا کف آنتن	H	۷۰	۷۰	۶۷/۱۶	۲/۳۵
قاعده‌ی کوچک قطبیده	d_1	۱۰	۱۰	۱۰/۰۰	۰/۳۵
قاعده‌ی بزرگ قطبیده	d_2	۲۲	۲۲	۲۲/۰۰	۰/۷۷
فاصله‌ی مرکز کانکتور تا انتهای موج‌بر	D	۱۲	۱۲	۱۱/۰۵	۰/۳۹
شعاع داخلی کانکتور	R_{in}	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۰/۰۴
شعاع خارجی کانکتور	R_{out}	۴/۱	۴/۱	۴/۱	۰/۱۴

نحوه اتصال این آنتن به مجموعه قطبیده و کانکتور کواکسیال در شکل (۴) آمده است. در مجموع ۲۰ مشخصه اصلی دخیل در طراحی این آنتن در جدول (۲) به همراه توصیف آنها اشاره شده اند. بدین ترتیب همه ۲۰ مشخصه طراحی باید با دقت انتخاب شده و مورد بهینه‌سازی قرار گیرند در شکل (۵) که نمایش‌دهنده جزئیات ساختار آنتن از مقطع برش داده شده است، ۱۴ مشخصه از مشخصه‌های طراحی نشان داده شده‌اند.

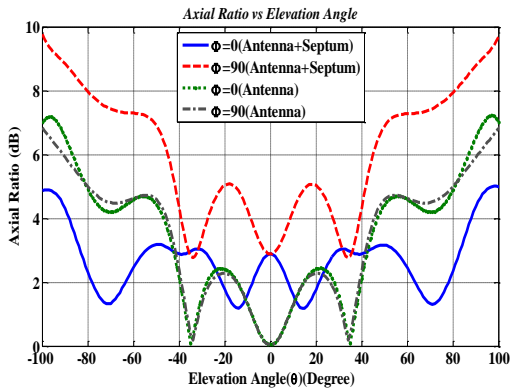
۳-۳- بهینه‌سازی آنتن

اهداف اصلی در این طراحی پنج مورد است که به ترتیب در ادامه عنوان شده است:

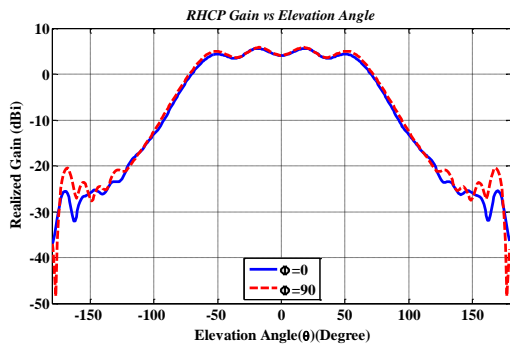
۱. رسیدن به کمینه تلفات بازگشتی (S_{11}) در فرکانس ۱۰/۴۶ GHz (حد هدف: کوچک‌تر از -۲۰ dB)
۲. تحقق بیشینه بهره در $\theta=62/5^\circ$ در صفحه‌ی $\varphi=0^\circ$ (حد هدف: بزرگ‌تر از ۶ dB)
۳. تحقق بیشینه بهره در $\theta=62/5^\circ$ در صفحه $\varphi=90^\circ$ (حد هدف: بزرگ‌تر از ۶ dB)
۴. تحقق کمینه نسبت محوری در محدوده $0^\circ < \theta < 62/5^\circ$ در صفحه $\varphi=0^\circ$ (حد هدف: کوچک‌تر از ۵ dB)
۵. تحقق کمینه نسبت محوری در محدوده $0^\circ < \theta < 62/5^\circ$ در صفحه $\varphi=90^\circ$ (حد هدف: کوچک‌تر از ۵ dB)

روال طراحی به‌گونه‌ای پیش برده شده است که هر ۵ هدف فوق به‌صورت همزمان برآورده گردد. از آنجا که در روش‌های بهینه‌سازی معمول به‌صورت تک‌هدفی، یک عدد به‌صورت هدف مطرح می‌شود، جمع وزنی تفاوت اهداف فوق با نتایج هر شبیه‌سازی را به‌عنوان تابع شایستگی تعریف می‌نماییم. روش بهینه‌سازی مورد استفاده Covariance Matrix Adaptation Evolutionary Algorithm است که در نرم‌افزار CST تعبیه شده و بر اساس یک مدل آماری برای نمونه‌گیری از فضای جستجو بهره می‌گیرد. توزیع مذکور بر اساس یک مدل نرمال چند متغیره با یک ماتریس کوواریانس وفقی صورت می‌پذیرد. این روش در اغلب موارد از همگرایی مناسبی برخوردار است. در نهایت و بعد از چندین بار بهینه‌سازی، بهترین پاسخ به‌دست‌آمده انتخاب گردید که مشخصه‌های آن در ستون چهارم جدول (۲) به‌صورت دقیق ارائه شده است. ابعاد این مشخصه‌ها بر حسب طول موج نیز در ستون کنار آن مشخص شده است.

در شکل (۶) نتایج اولیه شبیه‌سازی تلفات بازگشتی آنتن در دو حالت ارائه شده است. با توجه به حساسیت تطبیق ورودی آنتن به پروب واردشده در موج‌بر، با افزایش ضخامت پروب، وضعیت تطبیق و عرض باند آن مقداری بهبود یافته است. همان‌طور که دیده می‌شود تلفات بازگشتی آنتن حالت پروب



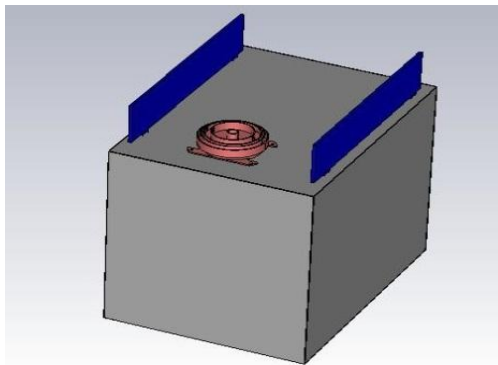
شکل (۸): نسبت محوری شبیه‌سازی شده آنتن و آنتن به همراه سپتوم در دو صفحه $\phi=0^\circ$ و $\phi=90^\circ$ در فرکانس ۱۰/۴۶ GHz.



شکل (۹): بهره تشعشی شبیه‌سازی شده آنتن در دو $\phi=0^\circ$ و $\phi=90^\circ$ در فرکانس ۱۰/۴۶ GHz.

۳-۴- اثرات بدنه ماهواره

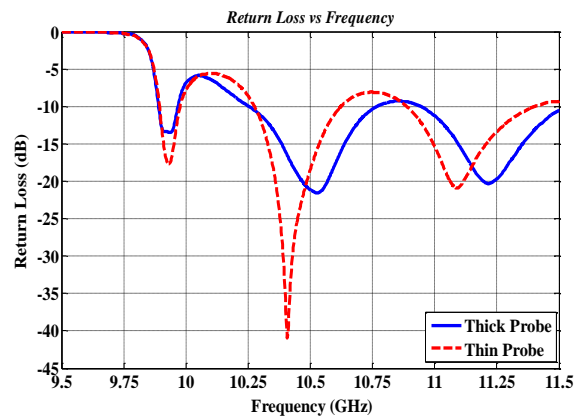
همان‌طور که انتظار می‌رود توزیع جریان سطحی بر روی بدنه ماهواره و سایر ادوات نصب‌شده بر روی آن، مشخصات تشعشی آنتن را تحت تاثیر قرار داده و باعث ایجاد تغییراتی در الگوی تشعشی آنتن خواهد شد. ساختار نهایی با در نظر گرفتن اتصالات آن روی بدنه ماهواره در شکل (۱۰) نمایش داده شده است.



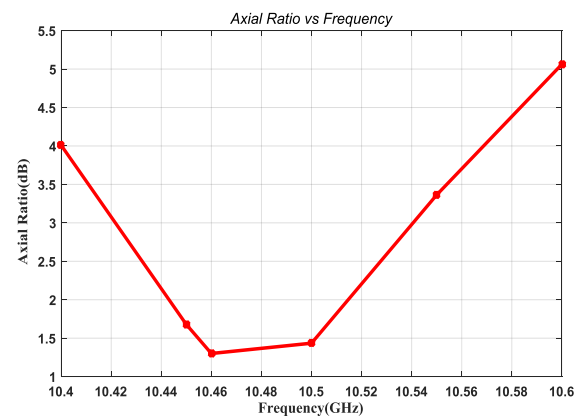
شکل (۱۰): ساختار نهایی آنتن با در نظر گرفتن اتصالات آن روی بدنه ماهواره.

نازک در بازه فرکانسی ۱۰/۲۷ GHz الی ۱۰/۶ GHz قابل قبول می‌باشد، در حالی‌که با افزایش ضخامت پروب، که در شکل (۴) نیز دیده می‌شود، عرض باند ورودی از ۱۰/۲۴۶ GHz الی ۱۰/۸ GHz قابل قبول بوده و حتی در فرکانس‌های بالاتر نیز با اندکی اغماض مناسب است.

نتیجه شبیه‌سازی نسبت محوری شبیه‌سازی شده آنتن نهایی در بازه فرکانسی ۱۰/۴ GHz الی ۱۰/۶ GHz در شکل (۷) ارائه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، نسبت محوری در جهت برودساید در این بازه فرکانسی کمتر از ۵ می‌باشد که معادل تلفات لینک کمتر از ۰/۳۵ dB می‌باشد.



شکل (۶): تلفات بازگشتی شبیه‌سازی شده آنتن برای دو شعاع متفاوت پروب تغذیه.

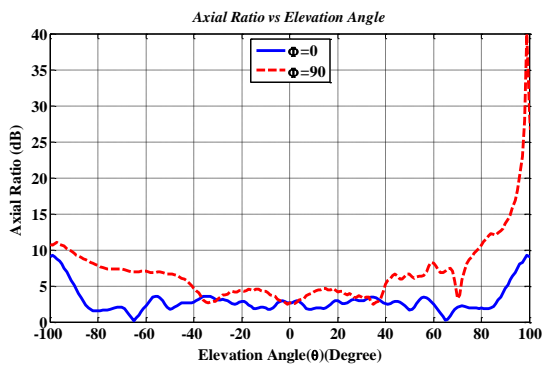


شکل (۷): میزان نسبت محوری (AR) شبیه‌سازی شده آنتن در جهت برودساید بر حسب فرکانس (در بازه فرکانس کاری).

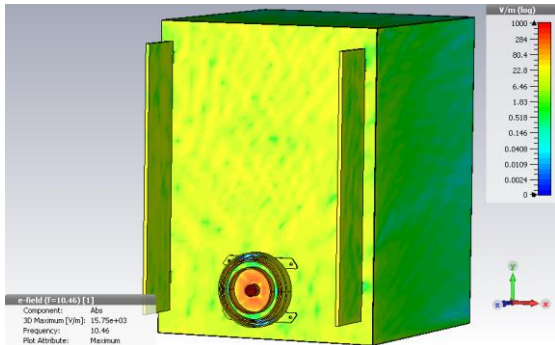
نسبت محوری آنتن بهینه‌سازی شده در دو صفحه $\phi=0^\circ$ و $\phi=90^\circ$ در فرکانس مرکزی ۱۰/۴۶ GHz در شکل (۸) آمده است. بهره تشعشی آنتن بهینه‌سازی شده در دو صفحه $\phi=0^\circ$ و $\phi=90^\circ$ در فرکانس مرکزی ۱۰/۴۶ GHz در شکل (۹) آمده است.

صفحه $\phi=0^\circ$ و $\phi=90^\circ$ کاملاً مشهود بوده ولی در محدوده زوایای کمتر از $\pm 62/5^\circ$ در حدود قابل قبولی (کوچکتر از ۹ dB) باقی می‌ماند.

شبیه‌سازی جریان توزیع شده بر روی سطح ماهواره ناشی از تحریک آنتن در شکل (۱۴) ارائه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، با خروج از آنتن سطح جریان‌های ناشی از تحریک تا حدود ۱۵ dB (یک پنجم) کاهش می‌یابد. با این وجود جریان، مخصوصاً قسمتی که بر روی پنل‌های خورشیدی جاری شده است، باعث نوساناتی در الگوی تشعشعی می‌شود.



شکل (۱۳): نسبت محوری شبیه‌سازی شده آنتن در دو صفحه $\phi=0^\circ$ و $\phi=90^\circ$ در مجاورت بدنه در حالت بسته بودن پنل‌های خورشیدی در فرکانس ۱۰/۴۶ GHz.

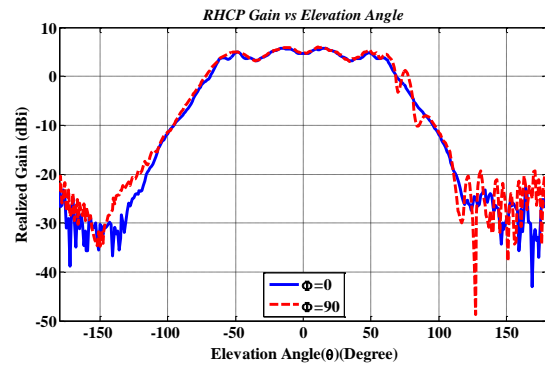


شکل (۱۴): شبیه‌سازی توزیع میدان الکتریکی روی آنتن و بدنه ماهواره در فرکانس مرکزی تشعشع آنتن.

۴- نتایج اندازه‌گیری

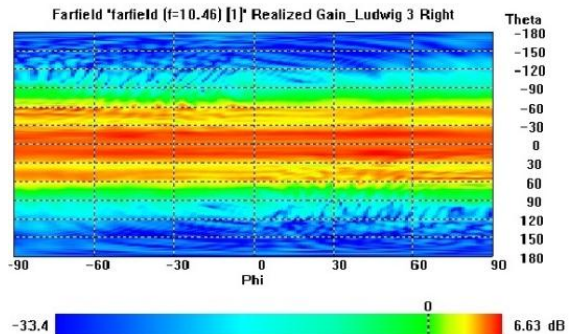
آزمون آنتن ساخته‌شده در اتاق آزمون آنتن دانشگاه تهران صورت پذیرفته است. نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی نسبت موج ایستا (VSWR) در شکل (۱۵) آورده شده است. ملاحظه می‌شود که همخوانی مناسبی بین رفتار دو نمودار یعنی شبیه‌سازی و اندازه‌گیری وجود دارد. نسبت موج کمتر از ۲ نشان‌دهنده‌ی تطبیقی مناسب بوده که پهنای باند تقریبی ۳۰۰ MHz را پوشش می‌دهد.

در شکل (۱۱) الگوی بهره برای آنتن در مجاورت بدنه در حالت بسته بودن پنل‌های خورشیدی در دو صفحه اصلی و در فرکانس مرکزی نمایش داده شده است. ملاحظه می‌شود که در زاویه $62/5^\circ$ از محور، بهره در دو صفحه $\phi=0^\circ$ و $\phi=90^\circ$ به ترتیب ۴/۹dB و ۱/۴ dB می‌باشد. این دو صفحه به ترتیب عمود بر طول پنل‌های خورشیدی و موازی با آنها هستند. در صفحه $\phi=90^\circ$ ، نوعی عدم تقارن در رفتار الگوی مشاهده می‌شود که دلیل آن نزدیکی بودن آنتن به یک لبه ماهواره و دور بودن از لبه دیگر آن است.



شکل (۱۱): بهره تشعشعی شبیه‌سازی شده آنتن در دو صفحه $\phi=0^\circ$ و $\phi=90^\circ$ در مجاورت بدنه در حالت بسته بودن پنل‌های خورشیدی در فرکانس ۱۰/۴۶ GHz.

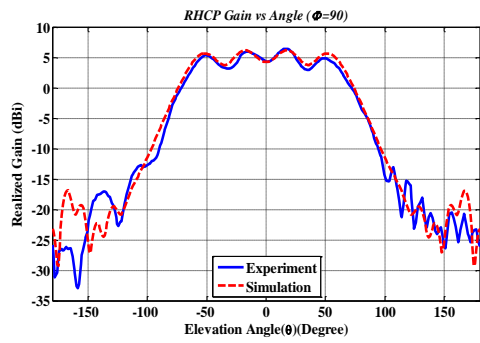
اثرات بدنه بر الگوی تشعشعی از روی شکل سه‌بعدی مشخص است. در فرکانس بالایی مانند ۱۰/۴۶ GHz، با توجه به بزرگی بودن ساختار و بدنه ماهواره، شاهد مکانیزم‌های پراکندگی متعدد و بازتاب‌های چندگانه هستیم که این عوامل سبب ظاهر شدن نوساناتی در رفتار الگو خواهد شد. این نوسانات در الگوی تشعشعی دوبعدی آنتن که در شکل (۱۲) نمایش داده شده به خوبی قابل مشاهده هستند.



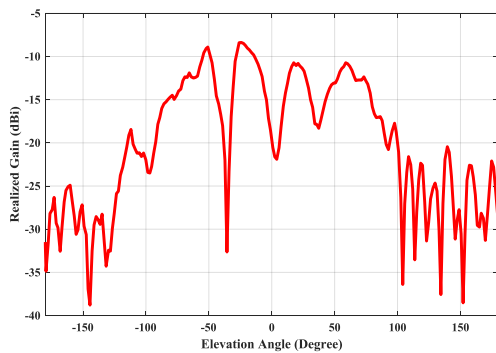
شکل (۱۲): اثرات بدنه بر الگوی تشعشعی آنتن در نمای دوبعدی در فرکانس ۱۰/۴۶ GHz.

مطابق شکل (۱۳) تغییرات شدید در رفتار نسبت محوری در دو

همچنین در صفحه $\varphi=90^\circ$ الگوی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی در شکل (۱۷- الف) ترسیم شده است. هم‌خوانی میان داده‌های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری در این شکل نیز مشهود می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۱۷- ب) نیز دیده می‌شود، سطح قطبش چپ‌گرد (مقاطع) اندازه‌گیری‌شده نیز در زوایای مختلف کمتر از ۸ dB می‌باشد که نشان از مناسب بودن مقدار آن است.



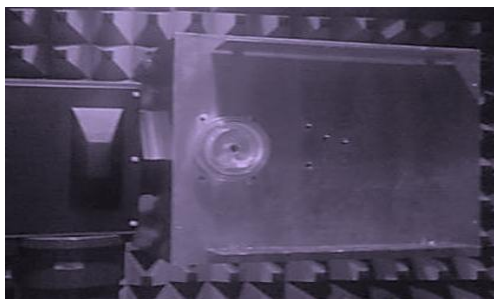
(الف)



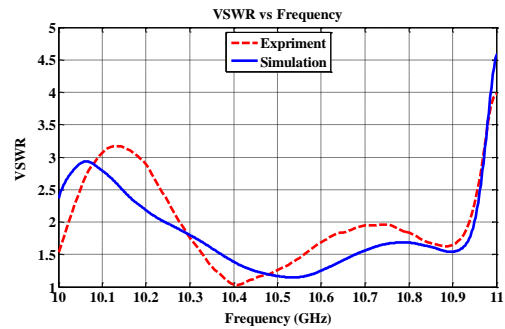
(ب)

شکل (۱۷): (الف) الگوی تشعشعی راست‌گرد (مطلوب) آنتن در صفحه $\varphi=90^\circ$ در دو حالت اندازه‌گیری و شبیه‌سازی در فرکانس ۱۰/۴۶ GHz (ب) الگوی تشعشعی چپ‌گرد (مقاطع) اندازه‌گیری شده آنتن در صفحه $\varphi=90^\circ$ در فرکانس ۱۰/۴۶ GHz.

در شکل (۱۸) نمایی از آنتن نصب‌شده روی بدنه ماهواره و قرار گرفتن آنها روی چرخاننده آمده است. در این حالت نیز اندازه‌گیری‌ها در دو صفحه اصلی $\varphi=0^\circ$ (عمود بر طول پنل‌های خورشیدی) و $\varphi=90^\circ$ (موازی طول پنل‌های خورشیدی) صورت پذیرفته است.

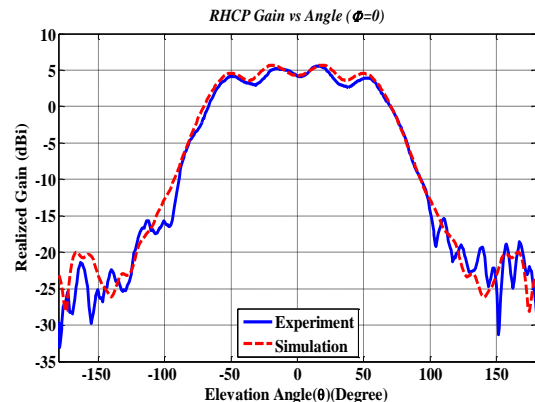


شکل (۱۸): نمای آنتن در مجاورت بدنه روی چرخاننده آنتن.

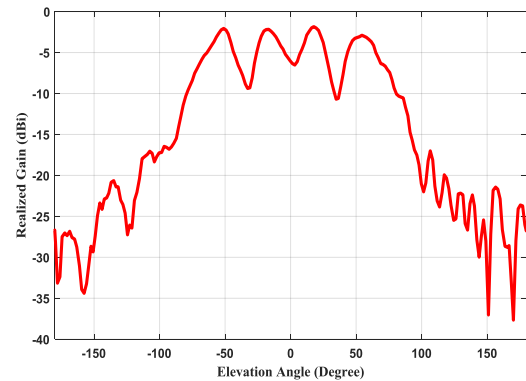


شکل (۱۵): مقایسه نسبت موج ایستای آنتن نهایی در دو حالت اندازه‌گیری و شبیه‌سازی.

الگوی تشعشعی راست‌گرد آنتن در صفحه $\varphi=0^\circ$ اندازه‌گیری شده و در شکل (۱۶- الف) با نتایج شبیه‌سازی مقایسه شده است. هم‌خوانی مناسب میان دو نمودار، گواه صحت روال شبیه‌سازی و آزمون می‌باشد. همچنین الگوی تشعشعی چپ‌گرد آنتن، قطبش متقاطع (Xpol)، نیز در شکل (۱۶- ب) رسم شده است که در زوایای مختلف همواره کمتر از ۲ dB می‌باشد. با توجه به این که ارتباط به‌صورت تک قطبش است و قطبش دیگر استفاده نخواهد شد، اهمیت نسبت محوری کمتر شده و اثر آن تنها در کاهش بهره قطبش اصلی می‌باشد.

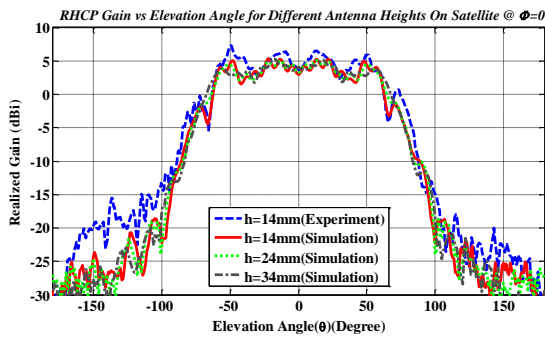


(الف)



(ب)

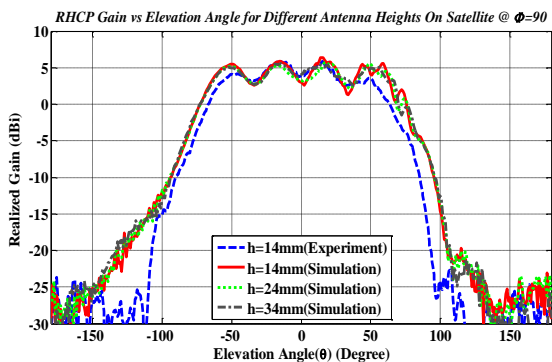
شکل (۱۶): (الف) الگوی تشعشعی راست‌گرد (هم قطبش) آنتن در صفحه $\varphi=0^\circ$ در دو حالت اندازه‌گیری و شبیه‌سازی در فرکانس ۱۰/۴۶ GHz (ب) الگوی تشعشعی چپ‌گرد اندازه‌گیری شده (قطبش متقاطع (Xpol)) آنتن در صفحه $\varphi=0^\circ$ در فرکانس ۱۰/۴۶ GHz.



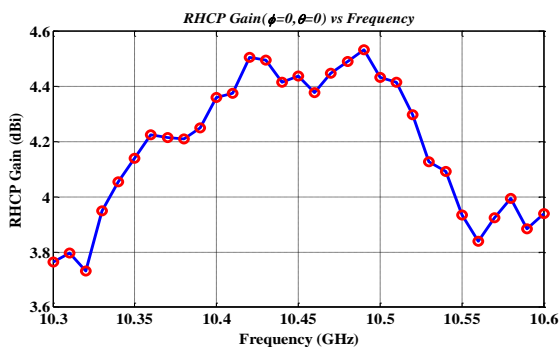
شکل (۲۱): نتایج آزمون و شبیه‌سازی برای آنتن در سه ارتفاع از بدنه در صفحه $\phi=0^\circ$ در فرکانس $10/46$ GHz.

در صفحه $\phi=90^\circ$ الگوی در سه حالت ارتفاعی مذکور بصورت شکل (۲۲) است. ملاحظه می‌شود که تغییر ارتفاع در این صفحه اثرات چندانی ندارد. در شکل (۲۳) منحنی اندازه‌گیری شده تغییرات بهره آنتن بر حسب فرکانس در محدوده فرکانس کاری فرستنده نمایش داده شده است.

با توجه به این که آنتن مذکور، که از تطبیق مناسبی برخوردار است، از جنس آلومینیوم ساخته شده و در ساخت آن به جز در کانکتور تغذیه از دی‌الکتریک استفاده نشده است، بازده آن بسیار مناسب و نزدیک به ۱ می‌باشد. البته با توجه به قرار گرفتن پوشش رایدم در هنگام استفاده نهایی، این مقدار حتما کاهش خواهد یافت.

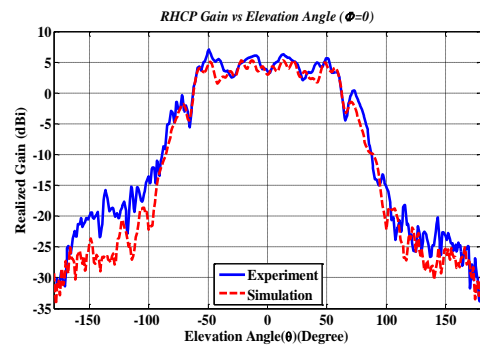


شکل (۲۲): نتایج آزمون و شبیه‌سازی برای آنتن در سه ارتفاع از بدنه در صفحه $\phi=90^\circ$ در فرکانس $10/46$ GHz.

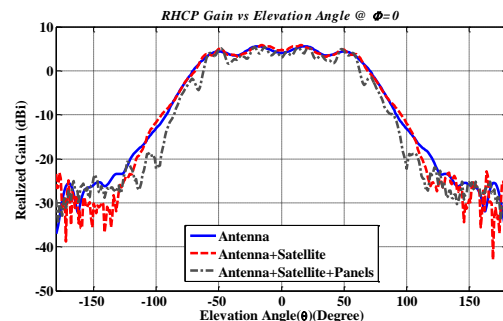


شکل (۲۳): نتایج آزمون بهره راست‌گرد آنتن در پهنای باند کاری آنتن.

نتایج مربوط به اندازه‌گیری و شبیه‌سازی برای الگوی صفحه $\phi=0^\circ$ در شکل (۱۹) نمایش داده شده است. ملاحظه می‌شود که رفتار این دو نمودار همخوانی و مطابقت بسیار بالایی با هم دارند. چنین تطابقی تاییدکننده صحت شبیه‌سازی‌ها بوده و لذا می‌توان تا حدود زیادی بر نتایج شبیه‌سازی‌ها تکیه نمود. نکته قابل توجه در این نمودارها افت قابل ملاحظه بهره آنتن در زاویه 66° است. سطح بهره در $62/5^\circ$ در حالت شبیه‌سازی و اندازه‌گیری حدود $0/5$ dB می‌باشد. این کاهش در سطح بهره احتمالاً به دلیل وجود پنل‌ها در این صفحه است.



شکل (۱۹): الگوی آنتن در مجاورت بدنه در صفحه $\phi=0^\circ$ در دو حالت اندازه‌گیری و شبیه‌سازی در فرکانس $10/46$ GHz.



شکل (۲۰): مقایسه داده‌های اندازه‌گیری آنتن مجزا، آنتن در مجاورت بدنه در حضور پنل‌ها و آنتن در مجاورت بدنه در غیاب پنل‌ها در صفحه $\phi=0^\circ$ در فرکانس $10/46$ GHz.

در شکل (۲۰) مقایسه‌ای بین داده‌های اندازه‌گیری آنتن مجزا، آنتن در مجاورت بدنه در حضور پنل‌ها و آنتن در مجاورت بدنه در غیاب پنل‌ها آمده است. اثرگذاری پنل‌ها در کاهش بهره در زوایای حول 66° کاملاً مشهود می‌باشد. با ارتفاع آنتن از سطح بدنه، می‌توان چنین رفتاری را مهار نمود. تا به اینجا شبیه‌سازی‌ها و اندازه‌گیری‌ها برای ارتفاع 14 mm کف هورن از سطح بدنه بود. در شکل (۲۱) نتایج شبیه‌سازی مربوط به افزایش ارتفاع 10 و 20 میلی‌متری (ارتفاع هورن برابر 24 mm و 34 mm) از سطح بدنه ملاحظه می‌گردد. رفع افت در زاویه حول 66° از نکات مشهود این شکل است. با افزایش ارتفاع 20 mm، دیگر اثری از افت مذکور نخواهیم داشت.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله آنتن چوک حلقه یا حلقه‌های انسداد حلقه‌های هم‌مرکز با پروفایل کاهشی به منظور دست‌یابی به الگوی تشعشی توزیع‌شده تخت با قطبش دایروی و نسبت محوری کوچک‌تر از ۹ dB در پهنای باند 125° استفاده شده است. برای تحقق قطبش دایروی در قسمت تغذیه موج‌بری آنتن یک تیغه قطبیده تعبیه شده که با توجه به پهنای باند کاری مورد نیاز آنتن طراحی شده است. در ادامه، آنتن طراحی و ساخته شده بر روی ماکت ماهواره به همراه پنل‌های سلول خورشیدی، شبیه‌سازی و سپس اندازه‌گیری شده است. با تنظیم ارتفاع آنتن از سطح بدنه، اثرات نامطلوب آن کاهش یافته است.

۶- مراجع

- [1] D. Colantonio and C. Rosito, "A Spaceborne Telemetry Loaded Bifilar Helical Antenna for LEO Satellites," Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), pp. 741-745, 2009.
- [2] H. Fraser, "Parametrisation and Design of Quadrifilar Helices for use in S-band Satellite Communications," A Dissertation Submitted to the Faculty of Engineering and the Built Environment, University of the Witwatersrand, Johannesburg, in fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science in Engineering, Johannesburg, 2010.
- [3] M. Hosseinmardi, S. Fallahzadeh, and A. Cheldavi, "X-Band Circularly Polarized Saddle Radiation Pattern Satellite Antenna," Taylor & Francis, Electromagnetics, pp. 508-525, 2015.
- [4] J. M. Yim, J. K. Son, T. K. Lee, J. W. Lee, and W. K. Lee, "X-Band Isoflux Pattern Antenna For SAR Data Transmission," 3rd International Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR), 2011.
- [5] C. Rocken, C. Meertens, B. Stephens, J. Braun, T. VanHove, S. Perry, O. Ruud, M. McCallum, and J. Richardson, "UNAVCO Academic Research Infrastructure (ARI) Receiver and Antenna Test Report," Choke Ring Antenna Radiation Patterns from UNAVCO ARI Test Report.
- [6] Y. Chen, T. Chiueh, and H. F. Teng, "A 77-118 Ghz Resonance-Free Septum Polarizer," The American Astronomical Society, The Astrophysical Journal Supplement Series, vol. 211, no. 1, 2014.

Design and Fabrication of a Wide Beam Stepped Choke Ring Antenna for X band Links of LEO Satellites

M. Fallahzadeh, H. Aliakbarian^{*}, A. Haddadi, S. Radiom

K. N. Toosi University of Technology

(Received: 16/04/2017, Accepted: 10/03/2018)

Abstract

Choke ring antenna is one of the best options among many types of antennas being used for LEO satellites operating in microwave frequencies. In this paper, a four-ring stepped choke ring antenna with a descending profile has been designed, optimized, fabricated and tested. This cylindrical waveguide fed antenna produces circular polarization by using a septum. The wide radiation pattern of this antenna covers 125 degrees in 10.5 GHz with a gain better than 3dB. To minimize the effects of the satellite body and solar panels on the radiation pattern, the antenna has been mounted on a satellite mock-up whose effects have been fully investigated in simulation and measurement..

Keywords: Stepped Choke Ring Antenna, LEO Satellite, Parasitic Effect of Body, Antenna Installation, X Band Link

^{*} Corresponding author E-mail: aliakbarian@eetd.kntu.ac.ir