



Available in:  
Journal.isrc.ac.ir

Journal of  
Space Science, Technology  
& Applications (Persian)

Vol. 3, No. 1, pp.: 105-113  
2023

DOI:  
10.22034/jssta.2023.378625.1107

### Article Info

Received: 2022-12-28  
Accepted: 2023-06-18

### Keywords

Antenna, Satellite, Circular  
polarization, Saddle shape  
pattern, Circular probe

### How to Cite this article

Hossein Eskandari, Razieh Narimani, Elham Hosseini,"  
Design, and Fabrication of  
X-band Antenna for  
Sensing Satellite with the  
Use of Circular Probe and  
Radiation Pattern  
Directing Blades",  
*Journal of Space Science,  
Technology and  
Applications*, vol 3 (1), p.:  
105-113, 2023.

## Design, and Fabrication of X-band Antenna for Sensing Satellite with the Use of Circular Probe and Radiation Pattern Directing Blades

Hossein Eskandari<sup>1\*</sup>, Razieh Narimani<sup>2</sup>, Elham Hosseini<sup>3</sup>

- 1 \*South Zagros Oil and Gas Production Company, Shiraz, Iran (Corresponding Author) h.eskandari@szogpc.com  
2 Satellite Research Institute, Tehran, Iran  
r.narimani@isrc.ac.ir  
3 Satellite Research Institute, Tehran, Iran  
e.hosseini@isrc.ac.ir

### Abstract

In this paper a waveguide antenna to create a saddle shaped pattern for remote sensing satellite applications has been introduced, and a method to excite a waveguide as feeding X-band antenna with the aim of achieving circular polarization has been presented. With the use of a circular microstrip probe, the mode inside the cylindrical waveguide is stimulated in such a way that the antenna has circular polarization with only one feeding input, and in addition, the input impedance of the antenna is fifty ohms. To achieve the saddle-shaped pattern, plus-shaped guides have been used. These guides are printed as microstrips on the Rogers 5880 substrate. The innovation of this article is in the simultaneous use of directional elements to create a saddle-shaped pattern and a circular probe to create circular polarization in order to design a suitable antenna for LEO remote sensing satellites. After simulation, the antenna was fabricated and tested. The test results show that the antenna has a real gain of more than 3 dBi at angles of  $\theta = \pm 65$ . The axial ratio of the antenna is less than 3 dB in the working frequency for  $\theta$  values between  $\pm 50$ , which shows that the antenna has a desired circular polarization in this  $\theta$  angle range.



## طراحی، و ساخت آنتن باند X ماهواره سنجشی با کمک پروب تغذیه حلقوی و تیغه‌های جهت دهنده الگوی تشعشی

دسترس پذیر در نشانی:  
Journal.isrc.ac.ir

حسین اسکندری\*<sup>۱</sup>، راضیه نریمانی<sup>۲</sup>، الهام حسینی<sup>۳</sup>

دو فصلنامه

علوم، فناوری و

کاربردهای فضایی

\*<sup>۱</sup> - شرکت بهره برداری نفت و گاز زاگرس جنوبی، شیراز، ایران (نویسنده مسئول) h.eskandari@szogpc.com

<sup>۲</sup> - پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، تهران، ایران r.narimani@isrc.ac.ir

<sup>۳</sup> - پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، تهران، ایران e.hosseini@isrc.ac.ir

سال سوم، شماره ۱، صفحه ۱۱۳-۱۰۵

بهار و تابستان ۱۴۰۲

### چکیده

DOI:

10.22034/jsssta.2023.378625.1107

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۷

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۸

واژه‌های کلیدی

آنتن، ماهواره، قطبش دایروی، پترن

زینی‌شکل، پروب حلقوی

این مقاله، آنتن موج‌بری برای ایجاد پترن زینی شکل معرفی و روشی برای تحریک یک موج‌بر به عنوان تغذیه آنتن باند ایکس با هدف دستیابی به قطبش دایروی برای یک ماهواره سنجشی، ارائه می‌شود. به کمک یک پروب میکرواستریپی حلقوی، موج‌بر استوانه به گونه‌ای تحریک شده که آنتن تنها با یک ورودی تغذیه دارای قطبش دایروی بوده و علاوه بر این، امیدانس ورودی آنتن نیز پنجاه اهم باشد. برای دستیابی به پترن زینی شکل، از جهت‌دهنده‌هایی به شکل پلاس استفاده شد. این جهت‌دهنده‌ها به صورت ریزنوارهایی چاپ شده بر روی زیرلایه راجرز ۵۸۸۰ هستند. نوآوری مقاله در استفاده هم‌زمان از عناصر جهت دهنده برای ایجاد پترن زینی شکل و پروب حلقوی برای ایجاد پلاریزاسیون دایروی به منظور طراحی آنتنی مناسب برای ماهواره‌های سنجش از دور LEO است. آنتن بعد از شبیه‌سازی، ساخته و تست شد. نتایج تست نشان می‌دهد که آنتن در زوایای  $\theta = \pm 65^\circ$  دارای بهره واقعی بیش از 3 dBi است. نسبت محوری آنتن نیز در فرکانس کاری برای مقادیر  $\theta$  بین  $\pm 50^\circ$ ، کم‌تر از 3 dB است که نشان می‌دهد آنتن در این بازه زاویه  $\theta$  دارای قطبش دایروی مطلوبی است.

نحوه استناد به این مقاله

حسین اسکندری، راضیه نریمانی، الهام حسینی. "طراحی، و ساخت آنتن باند X ماهواره سنجشی با کمک پروب تغذیه حلقوی و تیغه‌های جهت دهنده الگوی تشعشی"، دو فصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای فضایی، جلد سوم، شماره اول، صفحات ۱۱۳-۱۰۵، ۱۴۰۲.

حلقوی بر روی زیرلایه مناسب منجر به تشعشع امواج به صورت قطبش دایروی می‌شود [۴].

در این مقاله، یک پروب حلقوی چاپ شده بر روی زیرلایه راجرز<sup>۴</sup> ۵۸۸۰ برای تغذیه یک موج‌بر استوانه‌ای پیشنهاد شده است. امواج قطبی شده به صورت دایروی در داخل موج‌بر شکل گرفته و در نهایت از دریچه آن موجی با قطبش دایروی در میدان دور تشعشع می‌کند. این روش ایجاد قطبش دایروی در مقایسه با دو روش ذکر شده در پاراگراف قبلی، دارای حجم و طول آنتنی کم‌تر است و با توجه به محدودیت‌های مکانیکی سازه ماهواره، این روش تغذیه برای آنتن صرفاً برای این سازه ماهواره بهینه است و باید به آن توجه شود.

لازم به ذکر است که آنتن پیشنهادی برای هر قطبش چپ‌گرد و راست‌گرد قابل طراحی است. در دید از بالا، اگر جهت حلقه ساعت‌گرد باشد، قطبش دایروی چپ‌گرد و اگر پادساعت‌گرد باشد، قطبش دایروی راست‌گرد می‌شود. برای دستیابی به تطبیق امپدانس مناسب، امپدانس پروب حلقوی باید در هنگام عملکرد حالت مود غالب داخل موج‌بر دایروی محاسبه شود. محاسبه امپدانس آنتن‌های موج‌بر مستطیلی با تغذیه پروب سیمی مستقیم و همین‌طور آنتن‌های موج‌بر مستطیلی با تغذیه پروب حلقوی توسط آقای کالین<sup>۵</sup> در [۵] آورده شده است. همان‌طور که اشاره شد، با توجه به این‌که تعیین امپدانس پروب حلقوی در یک موج‌بر استوانه‌ای از نظر تحلیلی پیچیده است، باید امپدانس را برای مود غالب تعیین نمود زیرا پیچیدگی تحلیل برای یک مود واحد (مود غالب) کاهش می‌یابد. پیش از این، در مورد تغذیه آنتن شیپوری پژوهش‌های زیادی صورت گرفته توسط اولور<sup>۶</sup> [۶] و انواع آنتن دریچه‌ای نیز توسط لیوت<sup>۷</sup> [۷] به طور کامل بررسی شده است. به دلیل به کارگیری آنتن مورد بحث در ماهواره، علاوه بر داشتن قطبش دایروی، آنتن باید الگوی تشعشعی زینی شکل داشته باشد. به کمک روش‌هایی که توسط براچات<sup>۸</sup> [۲] و اسکاپوزو<sup>۹</sup> و مولر<sup>۱۰</sup> [۸، ۹] می‌توان به راحتی به الگوهای تشعشعی دلخواه رسید. در پژوهش انجام شده توسط براچارت [۲]، روش

سرعت بالای پیشرفت ماهواره‌های کوچک به عنوان یکی از بخش‌های زنجیره فضایی، اهمیت پرداختن به زیرسیستم‌ها و ارائه طراحی جدید برای اجزای آن را بیش از پیش نشان می‌دهد. از آن‌جا که آنتن‌ها امکان ارسال و دریافت سیگنال را فراهم می‌نمایند، یکی از اجزای مهم ماهواره‌های کوچک به شمار می‌روند. آنتن‌های ماهواره‌ای دارای مشخصات و عملکرد متفاوتی هستند و بسیاری از آن‌ها باید قطبش دایروی<sup>۱</sup> و الگوی تشعشعی زینی شکل<sup>۲</sup> داشته باشند. قطبش دایروی کیفیت ارسال و دریافت داده‌های ارتباطی بین ماهواره و ایستگاه را افزایش داده و افت ناشی از عدم تطابق قطبش به کمک آن کاهش می‌یابد. به طور کلی، در یک لینک ارتباطی فارغ از تنظیم مناسب مستقیم فرستنده و گیرنده، می‌توان کیفیت داده‌های ارسال شده را با استفاده از قطبش دایروی بهبود داد. امروزه روش‌های زیادی برای ایجاد قطبش دایروی در یک موج‌بر وجود دارد که یکی از این روش‌ها، استفاده از دو تغذیه عمود بر هم با شیفیت فازی ۹۰ درجه است. در این روش، برای ایجاد شیفیت فازی ۹۰ درجه، به یک کوپلر نود درجه نیاز است که استفاده از آن منجر به حجیم و سنگین شدن آنتن می‌شود. روش مشهور دیگر، استفاده از تیغه فلزی پله‌ای موسوم به سیتوم<sup>۳</sup> است [۱]، [۲]. در این روش، تیغه فلزی پله‌ای در داخل موج‌بر جاسازی شده و با دست‌کاری مودهای موج‌بر، میدانی با قطبش دایروی ایجاد می‌شود. مشکل این روش، بزرگ شدن طول موج‌بر است. با توجه به اینکه در صفحه سازه ماهواره محدودیت‌های ابعاد و وزن وجود دارد، استفاده از دو روش بالا در تولید قطبش دایروی برای سازه ماهواره‌های کوچک زیاد کاربردی نیست و باید برای ایجاد قطبش دایروی راه‌حلی ارائه شود که آنتن ساخته شده در نهایت دارای ابعادی کوچک و حداقل حجم و وزن باشد. به صورت کلی، وجود دو شرط به صورت هم‌زمان برای ایجاد قطبش دایروی ضروری است: عمود بودن هر دو بردار میدان الکتریکی بر هم و وجود یک اختلاف فاز ۹۰ درجه بین آن‌ها. در مراجع، درباره آنالیز و طراحی اجزای موج‌بر دایروی اطلاعات کاملی جمع‌آوری شده است [۳]. علاوه بر مطالب عنوان شده، یک پروب حلقوی نیز می‌تواند موج انتشاری را به قطبش دایروی تبدیل کند. به عنوان نمونه، آنتن پچ

<sup>6</sup> Olver

<sup>7</sup> Elliott

<sup>8</sup> Brachat

<sup>9</sup> Scappuzo

<sup>10</sup> Muller

<sup>1</sup> Circular Polarisation

<sup>2</sup> Saddle Pattern

<sup>3</sup> Septum

<sup>4</sup> Rogers substrate

<sup>5</sup> Collin

## ۲- تئوری، طراحی و شبیه‌سازی آنتن

### ۱-۳- روش ایجاد قطبش دایروی

عنوان مقاله در عین کوتاهی باید تمام ویژگی‌های کار پژوهشی را نشان دهد. عنوان مقاله را در یک یا دو سطر بنویسید. در صورت تحریک موج‌بر استوانه‌ای با پروب حلقوی، مود غالب موج‌بر TE<sub>11</sub> است. شکل ۱، نمایی از پروب حلقوی تغذیه را در داخل موج‌بر استوانه‌ای و توزیع جریان سطحی بر روی پروب را نشان می‌دهد. با توجه به شکل و ساختار پروب، E<sub>φ</sub> با TE<sub>11</sub> مطابقت دارد. اگر طول کل مقطع حلقوی پروب یک طول موج λ باشد، بین E<sub>φ</sub> و E<sub>r</sub> اختلاف فاز ۹۰ درجه ایجاد می‌شود، زیرا یک چهارم مقطع حلقوی پروب معادل لاندن چهارم یا اختلاف فاز ۹۰ درجه است. بنابراین، یک موج ایستاروی قسمت حلقوی پروب فقط از E<sub>φ</sub> تشکیل شده است. در دو نقطه فرضی روی پروب با فاصله یک چهارم از یکدیگر، E<sub>φ</sub> برای نقطه دوم نقش E<sub>r</sub> را بازی کرده و دو میدان الکتریکی عمود برهم با اختلاف فاز نود درجه خواهیم داشت که یکی از شروط ایجاد قطبش دایروی است. در این شرایط، اختلاف فاز ۹۰ درجه نیز بین H<sub>r</sub> و H<sub>φ</sub> وجود خواهد داشت. همان‌طور که از شکل ۱ نیز مشخص است، توزیع جریان سطحی در کل مسیر پروب تقریباً یکسان است. از این‌رو، با طراحی صحیح و دقیق موج‌بر استوانه‌ای و پروب تغذیه می‌توان قطبش دایروی با نسبت محوری ۳ عالی تنها با یک ورودی تغذیه در موج‌بر استوانه‌ای ایجاد کرد. از آنجایی که در دید از بالا جهت حلقه پاد ساعت‌گرد است، بنابراین نوع قطبش آنتن دایروی راست‌گرد است.

در شروع طراحی، شعاع موج‌بر استوانه‌ای برای کار در مود فعال TE<sub>11</sub> مشخص می‌شود. از آنجایی که این طراحی برای فرکانس مرکزی ۸/۲۳ GHz انجام شده است، از این‌رو، قطر موج‌بر استوانه‌ای mm ۲۴/۶ و طول آن  $D = ۵۴/۵$  mm انتخاب می‌شود. برای به دست آوردن فرکانس قطع برای موج‌بر استوانه‌ای با مود فعال TE<sub>np</sub> روابط زیر را داریم [۱۴]:

$$k_c = \frac{X'_{np}}{a} = 2\pi f_c \sqrt{\mu\epsilon} \quad (1)$$

ایجاد الگوی تشعشعی قطاع<sup>۱</sup> به کمک تغییر در نوع تغذیه ارائه شده است. آقای اسکاپزو در [۸]، با تغییر در صفحه زمین آنتن، باعث حذف امواج سطحی می‌شود و همین روش باعث شکل‌پذیری الگوی تشعشعی آنتن می‌شود. در مقاله [۹]، آقای مولر به کمک الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک، اندازه پستی و بلندی‌های صفحه زمین دندانه‌دار برای ایجاد الگوی تشعشعی دلخواه مشخص شده است. این روش‌ها، ساده، مقیاس‌پذیر با فرکانس‌های مختلف و قابل فهم هستند.

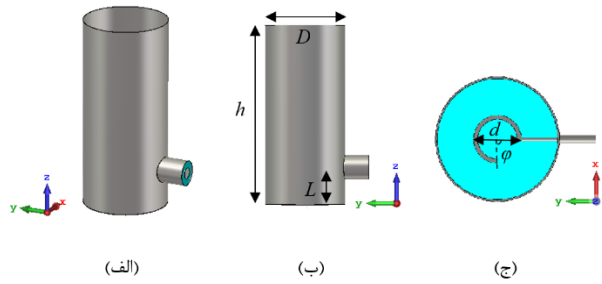
آقای تایل<sup>۲</sup> در [۱۳] از عناصر جهت دهنده برای شکل‌دهی پترن استفاده شده است. در این مرجع، عنصر اصلی تشعشع میدان‌هایی را ساطع می‌کند که جریان‌هایی را در عناصر جهت دهنده ایجاد می‌کند و عناصر جهت دهنده در نقش منبع تشعشعی دوم، آن را دوباره ساطع می‌کنند. این تعامل بین عنصر اصلی تشعشع و عناصر جهت دهنده در آنتن به دلیل کوپلینگ متقابل است که برای شکل‌دهی پترن مورد نیاز است.

در این مقاله، آنتن انتخاب شده، آنتن موج‌بر دایروی با سطح زمینی دایروی و مسطح است و به خاطر اهداف پروژه، باید آنتنی انتخاب شود که توانایی ایجاد پترن زینی شکل را داشته باشد و با توجه به موج‌بری بودن آنتن، باید روشی مناسب برای ایجاد پلاریزاسیون دایروی نیز ارائه شود. برای این منظور، برای ایجاد الگوی تشعشعی زینی، از عناصر جهت دهنده و برای ایجاد قطبش دایروی از مدار تغذیه میکروستریپی حلقوی شکل استفاده شده و در نهایت آنتنی با قطبش دایروی و با الگوی تشعشعی زینی در فرکانس ۸/۲۳ GHz برای یک ماهواره سنجشی طراحی و ساخته شده است. الزامات مربوط به آنتن ماهواره‌ای، ایجاد قطبش دایروی و الگوی تشعشعی زینی شکل، با این آنتن پیشنهادی برآورده می‌شود. قابل ذکر است که الزامات مکلنیک، محل استقرار، وزن و ارتفاع آنتن نیز از دیگر محدودیت‌های طراحی بود که در این مقاله به آن‌ها پرداخته نشده است.

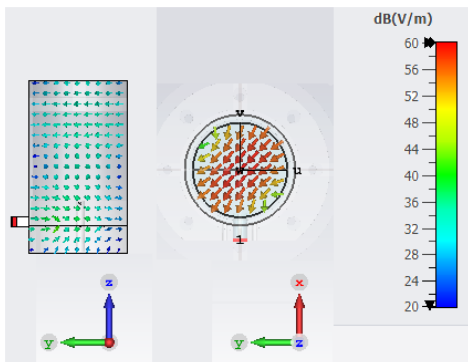
<sup>2</sup> Thiel

<sup>3</sup> Axial Ratio

<sup>۱</sup> الگوی تشعشعی قطاع (Sectoral pattern)، دارای عرض پرتو 3-dB در راستای افق با زوایای ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه است و بیش‌تر برای ایستگاه ثابت تلفن همراه استفاده می‌شوند.



شکل (۲). (الف) نمای سه بعدی، (ب) دید از پهلو و (ج) دید از بالا مربوط به قسمت تغذیه آنتن



شکل (۳). جهت و دامنه بردار میدان الکتریکی در سطح مقطع عرضی و طولی موج بر استوانه‌ای.

موج بر استوانه‌ای به کمک یک پروب حلقوی از طریق حفره دیواره جانبی موج بر تغذیه شده و به همین سبب، تغذیه شامل یک خط راست و یک حلقه است. جهت حلقه، تعیین کننده جهت قطبش دایروی است. مهم ترین پارامترهای موج بر استوانه‌ای همراه با پروب در شکل ۲ نشان داده شده است. ابعاد محاسبه شده برای دست یافتن به تطبیق امپدانسی ۵۰ اهم و قطبش دایروی در جدول ۱ آمده است. در شکل ۳، جهت و دامنه بردار میدان الکتریکی در سطح مقطع عرضی و طولی موج بر استوانه‌ای نشان داده شده است. جهت و دامنه بردار میدان‌های الکتریکی به خوبی مود غالب TE<sub>11</sub> را نشان می‌دهد.

## ۲-۲- طراحی آنتن با الگوی زینی شکل

اولین نیاز برای آنتن ماهواره پیشنهادی ایجاد قطبش دایروی بود که با پروب تغذیه حلقوی در داخل یک موج بر استوانه‌ای محقق شد. در گام بعد، با توجه به کاربرد آنتن در ماهواره LEO، الگوی

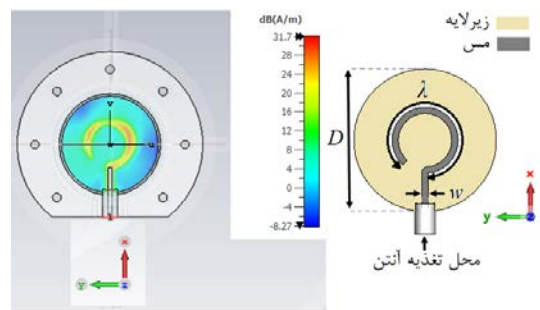
که برای مود TE<sub>11</sub> مقدار  $X'_{11}$  برابر 1.841 می‌شود. در این رابطه،  $a$  شعاع موج بر است. با جای گذاری و اندکی ساده سازی به رابطه (۲) می‌رسیم که برای به دست آوردن قطر موج بر استوانه‌ای با مود فعال TE<sub>11</sub> استفاده می‌شود.

$$(۲) \quad f_c = \frac{1.8412 \times c_0}{\pi \times D}$$

که در آن،  $c_0$  سرعت نور،  $D$  قطر داخلی موج بر استوانه‌ای و  $f_c$  فرکانس قطع موج بر استوانه‌ای است. با جای گذاری مقادیر در رابطه (۲)، فرکانس قطع ۷/۱۵ GHz به دست می‌آید که ۰/۸۶ برابر فرکانس کار آنتن یعنی ۸/۲۳ GHz است. وقتی فرکانس کار آنتن ۰/۸۶ برابر فرکانس قطع موج بر انتخاب می‌شود، این اطمینان حاصل می‌شود که مود غالب موج بر در فرکانس ۸/۲۳ GHz تغییر نمی‌یابد و در روند طراحی، شکل پترن دچار به هم ریختگی نمی‌شود.

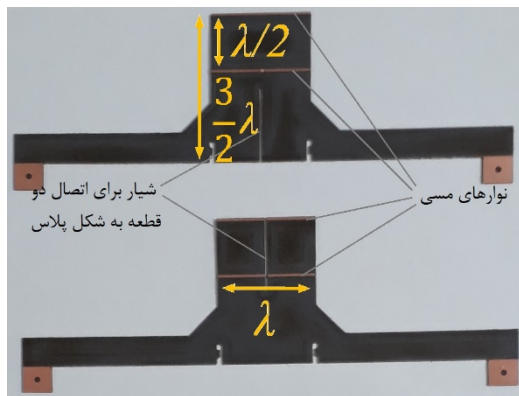
جدول (۱). مشخصات فیزیکی آنتن

$d$ (mm)	$\phi$ (deg)	$L$ (mm)	$W$ (mm)	$P$ (mm)	$Z$ (mm)	$h$ (mm)	$D$ (mm)
۶	۴۲	۵	۳	۱۵۰	۵/۷	۵/۵	۲/۶
					۴	۴	۴

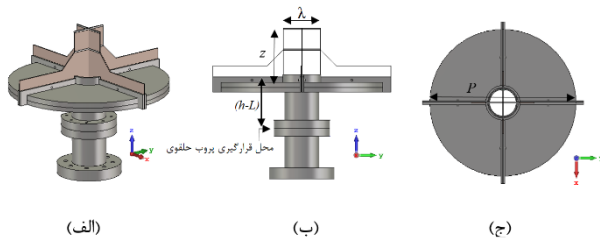


شکل (۱). ابعاد پروب تغذیه و توزیع جریان سطحی بر روی آن

نشان داده شده است. ابعاد مطلوب این آنتن در جدول ۱ ارائه شده است. منحنی پارامتر تلفات انعکاسی ( $S_{11}$ ) برحسب فرکانس در شکل ۶ دیده می‌شود. در نمودار شبیه‌سازی شده پهنای باند منفی ده دسیبل از 7.6 GHz تا 8.38 GHz است. تفاوت دیده شده در پهنای باند امیدانسی نتایج شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده مربوط به خطای ساخت است. حساس‌ترین پارامتر در این آنتن، مربوط به ابعاد پروب تغذیه است. با تغییر شعاع و ضخامت عرض نوار پروب تغذیه، تمامی خصوصیات تشعشی پروب از جمله امیدانس، امیدانس فاز و مقاومت تغییر می‌یابد، بنابراین، برای تعیین بهترین مقادیر پارامترهای پروب تغذیه، منحنی‌های امیدانس پروب مانند مقاومت ورودی بر حسب تغییرات شعاع و ضخامت پروب باید مورد ارزیابی قرار گرفته و سپس با استفاده از توان بهینه‌سازی نرم‌افزار CST، بهترین انتخاب برای شعاع پروب تغذیه و ارتفاع تعیین شود.



شکل (۴). مدار چاپی عناصر جهت دهنده برای تغییر در الگوی تشعشی آنتن بر روی زیرلایه راجرز ۵۸۸۰.



شکل (۵). نمایی از آنتن طراحی شده. (الف) نمای سه بعدی، (ب) نمای دید از پهلو، (ج) نمای دید از بالا.

تشعشی زینی شکل بر اساس انحناى سطح زمین باید برآورده شود زیرا از طلوع تا غروب ماهواره فضایی، حداکثر پوشش‌دهی را برای کاربران زمینی فراهم می‌نماید.

تاکنون، برخی روش‌های مبتنی بر استفاده از سطح دنداندار<sup>۱</sup> برای ایجاد الگوی تشعشی زینی شکل در فرکانس‌های بالا پیشنهاد شده است [۸، ۹]. در مورد سطوح دنداندار، مطالعات زیادی صورت گرفته که می‌توان به مراجع [۱۰-۱۲] که توسط آقایان هورد<sup>۲</sup>، گلدستین<sup>۳</sup> و بریلوین<sup>۴</sup> اشاره کرد. شکل‌دهی الگوی تشعشی با استفاده از یک سطح دنداندار ممکن است بر قطبش دایروی آنتن تأثیر منفی بگذارد. جریان سطحی در عبور از این سطوح دنداندار دچار تغییر و تحول شده و این سطوح همانند یک سطح امیدانس بالا عمل نموده و به کمک همین امیدانس بالایی که در سطح دارند، جریان سطحی روی سطوح را کنترل می‌کنند. با کنترل جریان سطحی زمین آنتن، الگوی تشعشی آنتن تغییر کرده و می‌تواند یک الگوی تشعشی جهت‌دار را به یک الگوی تشعشی زینی تبدیل نماید. در آنتن طراحی شده در این مقاله، از عناصر جهت‌دهنده برای شکل‌دهی الگوی تشعشی آنتن استفاده می‌شود که در شکل ۴ آمده است. در این آنتن، برای پهن کردن شکل الگوی زینی، از عناصر جهت‌دهنده به شکل پلاس استفاده شده است. این دو قطعه از زیرلایه راجرز ۵۸۸۰ است که نوارهای مسی با فناوری مدار چاپی بر روی آن تعبیه شده است. همان‌طور که از شکل مشخص است، این دو قطعه توسط شیارهایی که بر روی زیرلایه ایجاد شده، به صورت پلاس به هم وصل می‌شوند. تمامی ابعاد نیز برحسب طول موج فرکانس طراحی در شکل آورده شده است. با تشکیل جریان‌های القایی بر روی این نوارهای مسی، الگوی تشعشی آنتن به صورت زینی در می‌آید.

در روند طراحی، یک موج‌بر استوانه‌ای ساده شبیه‌سازی و بهینه شده و در ادامه به صفحه زمینی دایروی شکل متصل می‌شود. الگوریتم بهینه‌سازی استفاده شده، الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار CST است. برای شروع بهینه‌سازی، مقدار اولیه برای طول حلقه پروب، برای یک طول موج و فاصله عناصر جهت‌دهنده از دهانه موج‌بر، برای ایجاد کوپلینگ متقابل مناسب، نسبت فردی از نصف طول موج در نظر گرفته شده است. نمایی کلی از آنتن طراحی شده در شکل ۵

<sup>3</sup> Goldstein  
<sup>4</sup> Brillouin

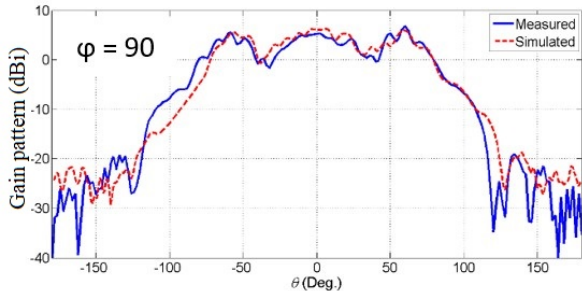
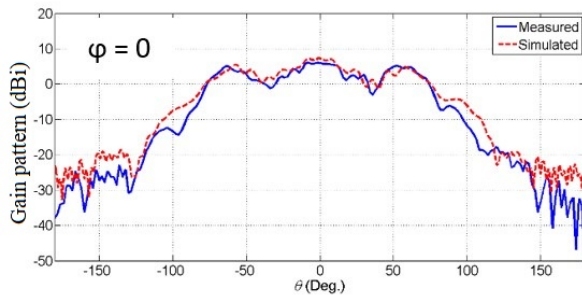
<sup>1</sup> Corrugated plane  
<sup>2</sup> Hurd



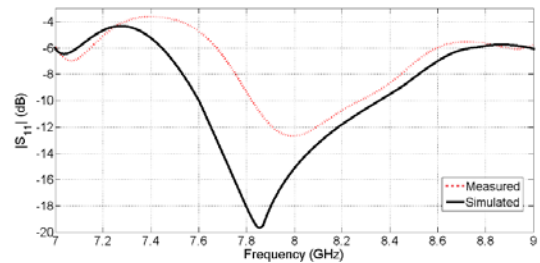


شکل (۸). نمایی از آنتن ساخته شده نصب شده بر روی صفحه آنتن ماهواره.

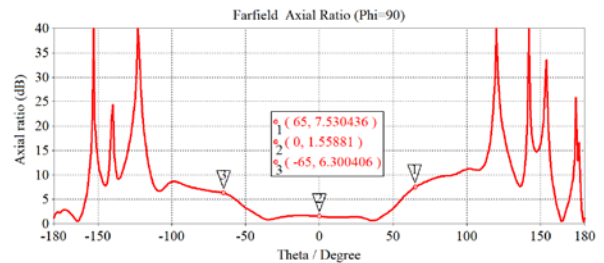
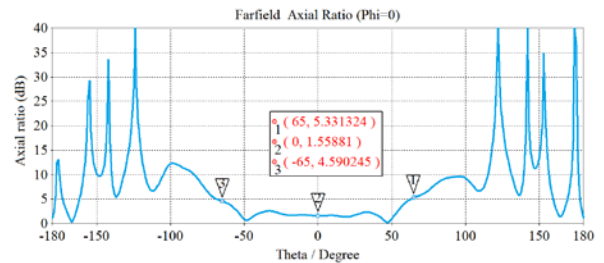
در این آنتن، شعاع و ارتفاع پروب از کف موج بر به ترتیب mm ۶ و mm ۵ به دست آمده است. شکل ۷، نمودار نسبت محوری شبیه‌سازی شده بر حسب زاویه  $\theta$  و برای دو زاویه  $\varphi = 0^\circ$  و  $\varphi = 90^\circ$  در فرکانس 8.23 GHz را نشان می‌دهد. همان طور که از نمودار مشخص است، آنتن در  $\theta = \pm 65^\circ$  نسبت محوری بالای dB ۶ دارد و این نشان می‌دهد که هر چقدر الگوی تشعشعی آنتن پهن‌تر می‌شود، قطبش دایروی به هم می‌ریزد که علت آن نیز به خاطر فاصله گرفتن از شرایط ایجاد قطبش دایروی یعنی عمود بودن هر دو بردار هم‌اندازه میدان الکتریکی با اختلاف فاز  $90^\circ$  درجه است. همان طور که می‌دانیم، برای رسیدن قطبش دایروی شرط نسبت محوری کم‌تر از dB ۳ الزامی است که این شرط برای زوایای بیش‌تر از  $\theta = \pm 50^\circ$  برآورده نمی‌شود اما افزایش بهره در این زوایا عدم تطبیق قطبش را در این زوایا تا حدودی جبران می‌کند.



شکل (۹). نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده الگوهای تشعشعی آنتن در زوایای  $\varphi = 0^\circ$  و  $\varphi = 90^\circ$  در فرکانس GHz ۸/۱۳.



شکل (۶). نمودار تلفات انعکاسی آنتن شبیه‌سازی و ساخته شده.

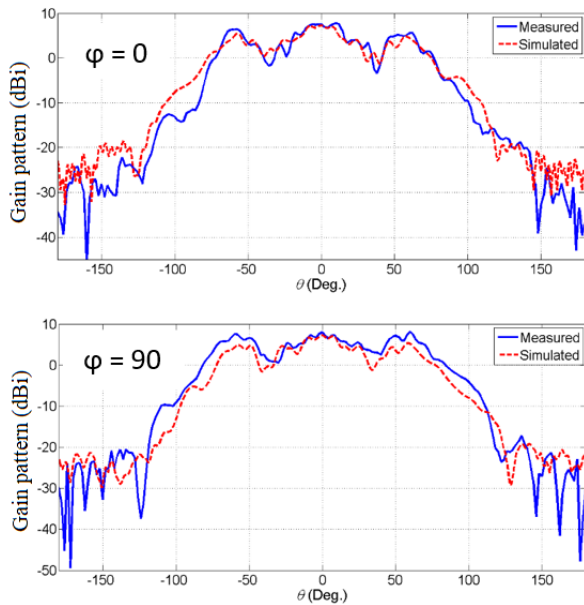


شکل (۷). نتایج شبیه‌سازی شده نمودار نسبت محوری بر حسب  $\theta = 0^\circ$ ،  $90^\circ$  و  $\varphi = 0^\circ$  در فرکانس GHz 8.23.

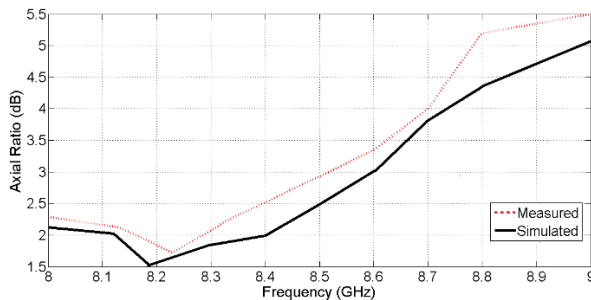
### ۳- ساخت و تست آنتن

آنتن ماهواره‌ای باند X در فرکانس مرکزی GHz ۸/۲۳ بعد از شبیه‌سازی و بهینه‌سازی در نرم‌افزار CST ساخته شده است (شکل ۸). این آنتن دارای دو بخش جداگانه است که بخش اول یک مدار تغذیه به شکل پروب حلقوی با حفره زیرین بوده و بخش دوم مربوط به صفحه زمین دایره‌ای شکل با عناصر جهت‌دهنده‌هایی به شکل ریز نوار چاپ شده بر روی زیر لایه راجرز ۵۸۸۰ است (شکل

شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، در فرکانس کاری مورد نظر، شرط قطبش دایروی کاملاً برآورده می‌شود.



شکل (۱۱). نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده الگوهای تشعشی آنتن در زوایای  $90^\circ$  و  $0^\circ$  در فرکانس ۸/۲۳ GHz.

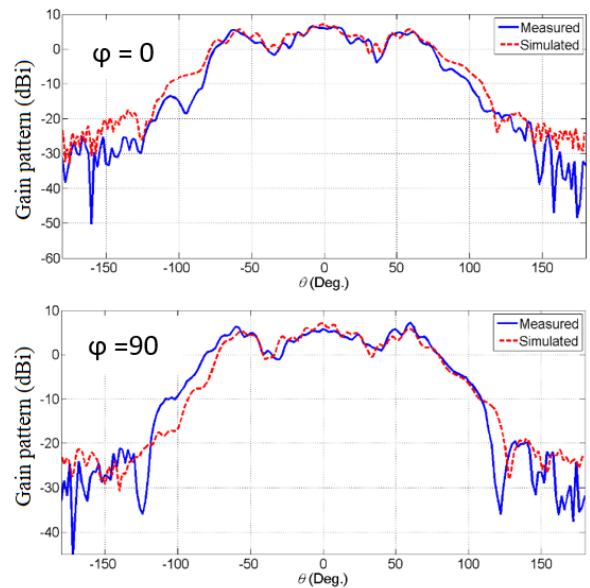


شکل (۱۲). نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده نمودار نسبت محوری آنتن در راستای  $0^\circ$  و  $0^\circ$   $\theta$

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، آنتن ماهواره‌ای باند X با قطبش دایروی و الگوی تشعشی زینی شکل برای یک ماهواره LEO طراحی و ساخته شده است. نوآوری مقاله، در استفاده هم‌زمان از عناصر جهت دهنده برای ایجاد پترن زینی شکل و پروب حلقوی برای ایجاد پلاریزاسیون دایروی به منظور طراحی آنتنی مناسب برای ماهواره‌های سنجش از دور LEO

(۴). همان طور که در بخش قبل اشاره شده، بخش دوم آنتن برای شکل‌دهی الگوی تشعشی آنتن مورد استفاده قرار گرفته است. آنتن در آزمایشگاه آنتن دانشگاه تهران تست شد و آنتن استاندارد سری ۳۱۶۰ آنتن مرجع است و پلاریزاسیون آنتن مرجع با پلاریزاسیون آنتن مورد تست مشابه است. در گام نخست، به منظور حصول اطمینان اولیه از ساخت، تلفات انعکاسی آنتن مورد تست قرار گرفته است. شکل ۶، ضریب تلفات انعکاسی اندازه‌گیری شده را در مقایسه با شبیه‌سازی نشان می‌دهد.



شکل (۱۰). نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده الگوهای تشعشی آنتن در زوایای  $90^\circ$  و  $0^\circ$  در فرکانس ۸/۲۳ GHz.

همان طور که مشاهده می‌شود، ضرایب بازتاب اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در فرکانس ۸/۲۳ GHz کمتر از ۱۰ dB است و محدوده فرکانسی 7.82 GHz تا 8.28 GHz زیر منفی ده دسیبل قرار دارد و پهنای باند امیدداری مطلوب آنتن 0.46GHz است.

در گام دوم، الگوی تشعشی در اتاق تست آنتن دانشگاه تهران مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل‌های ۹ تا ۱۱ الگوهای تشعشی آنتن ساخته شده را در صفحات  $0^\circ$  و  $90^\circ$  درجه و  $0^\circ$  درجه نشان می‌دهد. الگوهای تشعشی شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده شباهت خوبی نشان می‌دهند. همان طور که از شکل‌ها مشخص است، آنتن در زوایای  $\theta = \pm 65^\circ$  دارای بهره بالای ۳ dBi است. نسبت محوری آنتن برحسب فرکانس نیز در شکل ۱۲ نشان داده



- [11] H. Goldstein, "The Theory of Corrugated Transmission Lines and Waveguides," Report 494, April, 1944.
- [12] L. Brillouin, "Waveguides for slow waves," *Jour. Appl. Phys.*, vol. 19, p. 1023; November, 1948.
- [13] D. Thiel and S. Smith, "Switched parasitic antennas for cellular communications". Artech House Publishers, 2001.
- [14] A. B. Constantine and E. Holzman . "Circular waveguides. In Encyclopedia of RF and Microwave Engineering". John Wiley & Sons, Inc., 2005.

است. یک پروب حلقوی به عنوان تغذیه موج بر استوانه‌ای قطبش دایروی را ایجاد نموده و از جهت‌دهنده‌های ریزنوار عمود برهم، برای شکل‌دهی یک الگوی تشعشعی زینی شکل، استفاده شده است. آنتن طراحی شده ابتدا به کمک شبیه‌سازی در نرم‌افزار CST تأیید شده و در نهایت نمونه اولیه ساخته و در اتاق آنتن تست شده است. نمونه ساخته شده نشان داد که نتایج تست، هم‌خوانی مطلوبی با شبیه‌سازی دارد. با استناد به نتایج تست، آنتن ماهواره باند X ساخته شده در فرکانس مرکزی 8/23 GHz دارای خاصیت تشعشعی با قطبش دایروی و با الگوی تشعشعی زینی شکل است. این آنتن قابلیت چند بانده شدن با پورت‌های تغذیه مجزا برای قطبش‌های دایروی را دارد.

### تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

### مراجع

- [1] R. Beheand, P. Brachat, "Compact duplexer-polarizer with semicircular waveguide," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 39:1222–1224, 1991.
- [2] P. Brachat, "Sectoral pattern synthesis with primary feeds," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 4-42:1, 1994.
- [3] J. Bornemann, S. Amari, J. Uher and R. Vahldieck, "Analysis and design of circular ridged waveguide components," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 47:330–335, 1999.
- [4] R. Li, V. F. Fusco and H. Nakano. "Circularly polarized open-loop antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.* 51:2475–2477, 2003.
- [5] R. E. Collin, "Excitation of waveguides In Field theory of guided waves", chap. 7. New York: McGraw-Hill, 1960.
- [6] A. D. Oliver, P. J. B. Clarricoats, A. A. Kishk, and L. Shafai, "Microwave horns and feeds," *New York: IEEE Press.* Chaps. 8 & 9, 1994.
- [7] R. S. Elliott, "The open-ended waveguide," *Antenna theory and design*, revised ed., chap. 83-79, 3 NJ: Wiley, 2003.
- [8] F. Sciré-Scappuzzo and S. N. Makarov, "A low-multipath wideband GPS antenna with cutoff or non-cutoff corrugated ground plane," *IEEE Trans. Antennas Propag.* 57:33–46, 2009.
- [9] P. L. Garcia-Muller, "Optimization of compact horn with broad sectoral radiation pattern," *Electron. Lett.* 37:337–338, 2001.
- [10] R. A. Hurd, "The propagation of an electromagnetic wave along an infinite corrugated surface," *Can. J. Phys.*, 32, pp. 727-734, 1954.



### COPYRIGHTS

© 2023 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)