



Design and Fabrication of ISM band Dielectric Rod Antenna with simultaneous dual circular polarization

R.Toreinia^{1*} , H.Mohseni Aramaki², M. Tohidloo³

*Professor, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

(Received:2023 /05/16, Revised: 2023/07/07, Accepted: 2023/07/28, Published: 2023/08/24)

DOR:<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1402.11.1.6.2>

Abstract

In this article, based on theoretical and experimental expressions, a dielectric rod antenna with dual circular polarization in ISM band is designed, simulated and fabricated. In order to improve the radiation parameters, the plan of creating a groove on the dielectric rod has been implemented for the first time. Creation of dual circular polarization in the designed antenna is done by two orthogonal probes, which can provide left-circular and right-circular polarizations by making a 90-degree phase difference between the two ports by using a 90° hybrid. The dielectric constant of the material used in the rod with respect to the fabricated antenna results has been estimated at 2.4. Due to the limitation in the diameter of the dielectric rod and to improve the radiation parameters, a new design has been introduced and, also two grooves have been created on the dielectric rod. The simulation results show that the use of the new design results in a reduction of 4dB in the side lobe level. According to the measured results, the fabricated antenna has a reflection coefficient of less than -10dB for each port and an isolation of less than -16.4dB between the two ports. Also, the HPBW is 29.2 degrees and the SLL is 13.8dB in the center frequency. The axial ratio of the antenna is less than 3dB in the desired frequency range for LHCP and RHCP.

Keywords: : Dielectric rod antenna, Dual circular polarization, ISM band, Satellite communication.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

Authors



*Corresponding Author Email: reza_toreinia@mut.ac.ir

طراحی و ساخت آنتن میله دی الکتریک باند ISM با قطبش دوگانه دایروی همزمان

رضا ترینیا^۱، سید حسین محسنی ارمکی^۲، مجید توحیدلو^۳

۱- دکتری، ۲- استاد، ۳- کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۶، بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۱۶، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۰۶، انتشار: ۱۴۰۲/۰۶/۰۲)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1402.11.1.6.2>



* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.

نویسندگان



ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

چکیده

در این مقاله، بر اساس روابط تئوری و تجربی، یک نمونه آنتن میله دی الکتریک با قطبش دوگانه دایروی همزمان در باند ISM طراحی، شبیه سازی و ساخته شده است. به منظور بهبود پارامترهای تشعشعی برای اولین بار طرح ایجاد شیار روی میله دی الکتریک پیاده شده است. ایجاد قطبش دایروی دوگانه در آنتن طراحی شده، توسط دو پروب متعامد صورت می گیرد که با تولید اختلاف فاز ۹۰ درجه بین دو درگاه توسط یک هیبرید ۹۰ درجه، می تواند قطبش های چپ گرد و راست گرد دایروی را فراهم نماید. ضریب دی الکتریک ماده استفاده شده در میله با توجه به نتایج ساخت برابر ۲/۴ تخمین زده شده است. با توجه به محدودیت در قطر میله دی الکتریک و به منظور بهبود پارامترهای تشعشعی طرح جدیدی معرفی و همچنین دو شیار روی میله دی الکتریک ایجاد شده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که استفاده از طرح جدید در مجموع موجب کاهش ۴dB در اندازه گلبرگ فرعی می شود. مطابق نتایج اندازه گیری، آنتن ساخته شده دارای بازگشتی کمتر از ۱۰dB- برای هر دو درگاه و ایزولاسیون کمتر از ۱۶/۴dB- بین دو درگاه است. همچنین، در فرکانس مرکزی پهنای پرتو نیم توان برابر ۲۹/۲ درجه و سطح گلبرگ فرعی ۱۳/۸dB اندازه گیری شد. نسبت محوری آنتن برای هر دو قطبش چپ گرد و راست گرد در محدوده فرکانسی مورد نظر کمتر از ۳dB است.

کلیدواژه ها: آنتن میله دی الکتریک، قطبش دایروی دوگانه، باند ISM، مخابرات ماهواره

۱- مقدمه

آنتن با قطبش دوگانه می تواند خواسته مطلوب را با صرف هزینه کمتر و ذخیره مکان فیزیکی بیشتر، پاسخگو باشد [۵]. میله های دی الکتریک سال هاست که به عنوان موج بر و آنتن استفاده می شوند. تلفات پایین آنها به عنوان یک خط انتقال و تابش موج در ناپیوستگی های آنها در کاربردهای مختلف از فیبر نوری تا رادار کنترل آتش دریایی استفاده می شود. اگرچه این فناوری به خوبی جا افتاده است، اما پیشرفت در روش های تولید مواد دی الکتریک و فراگیر شدن ارتباطات بی سیم فرکانس بالا، علاقه زیادی را به حوزه تحقیقاتی آنتن های میله دی الکتریک ایجاد کرده است که این امر موجب ایجاد نوآوری های جدیدی در این حوزه شده است. آنتن های میله دی الکتریک دارای بهره متوسط و تلفات رسانایی کم به دلیل عدم استفاده از فلز در ساختار تشعشعی در فرکانس های بالا بوده و مشابه دیگر آنتن های موج سطحی، پهنای باند بالایی دارند.

آنتن های با قطبش دوگانه به طور گسترده در ایستگاه های پایه ارتباطات سیار و سامانه های ارتباطی بی سیم استفاده می شوند، زیرا با بهره گیری از چندگانگی قطبش می توان بازدهی کانال و پهنای باند مورد استفاده را افزایش داد. [۱ و ۲]. همچنین استفاده از آنتن های با قطبش های دوگانه در جنگ الکترونیک (EW) و رادارهای روزنه مصنوعی^۲ موجب افزایش قابلیت سامانه ها می شود [۳ و ۴]. سامانه های مخابرات ماهواره و ایستگاه زمینی دارای لینک داده ارسال و دریافت با پهنای باند بالا نیاز به یک آنتن دو بانده و یا دو آنتن با قطبش متفاوت (دایروی چپ گرد و راست گرد) دارند. بنابراین، یک

reza_toreinia@mut.ac.ir

* رایانامه نویسنده مسئول:

² Synthetic Aperture Radar

این طرح با پر کردن موجبر با ماده دی‌الکتریک (حذف زائده مخروطی تطبیق) قطر دهانه موجبر کاهش می‌یابد و به تبع ابعاد فیزیکی آنتن نیز کوچک خواهد شد.

در بخش ۱، پیرامون روش‌های طراحی آنتن میله دی‌الکتریک از جمله، انتخاب میله دی‌الکتریک و محاسبه ابعاد بخش‌های مختلف آن، محاسبه فرکانس قطع موجبر تحریک و اثر تغییر اندازه و شکل میله بر پارامترهای تشعشی، بحث می‌شود. در بخش ۲، به شبیه‌سازی ساختار طراحی شده پرداخته شده است. در بخش ۳ نتایج ساخت و اندازه‌گیری آنتن میله دی‌الکتریک باند ISM با قطبش دوگانه دایروی هم‌زمان آورده شده است.

۲- تئوری، ساختار، پارامترها و طراحی آنتن میله دی‌الکتریک

۲-۱. تئوری و ساختار آنتن میله دی‌الکتریک

آنتن میله‌ای دی‌الکتریک (DRA^۶) یک حالت خاص از یک موجبر میله دی‌الکتریک است. موجبر میله دی‌الکتریک یک موجبر کم تلفات است که از یک یا چند لایه ماده دی‌الکتریک ساخته شده است. در صورت عدم وجود ناپیوستگی در طول میله، مانند خم‌ها، پله‌ها و مخروط‌ها، موجبر میله دی‌الکتریک تابش نمی‌کند. هدف از طراحی آنتن میله دی‌الکتریک، ایجاد عمدی ناپیوستگی برای تولید مشخصه‌های تشعشی مطلوب از میله است [۱۱].

آنتن میله دی‌الکتریک متشکل از یک موجبر دایره‌ای است که به‌عنوان تغذیه برای میله دی‌الکتریک عمل می‌کند. به دنبال آن یک زائده مخروطی به‌منظور تطبیق موج تحریک شده با میله دی‌الکتریک و یک مخروطی تغذیه‌ی ۷ (پایه) قرار داده می‌شود که عمدتاً برای تطبیق بخش تغذیه با میله دی‌الکتریک است. بدنه اصلی آنتن (مرکزی) پس از بخش مخروطی تغذیه قرار گرفته و همان‌طور که در شکل ۱(الف) نشان داده شده است به یک دماغه مخروطی انتشار (دماغه) ۸ ختم می‌شود [۱۱].

نمونه‌ای دیگر نیز از آنتن‌های میله دی‌الکتریک نیز وجود دارد که تنها تفاوت آن با ساختار شکل ۱(الف)، پر بودن موجبر تغذیه از ماده دی‌الکتریک است. این امر سبب می‌شود که به جای فضای آزاد،

آنتن دی‌الکتریک با قطبش خطی دوگانه برای باند ISM^۱ ۲۴ گیگاهرتز ارائه شده است [۶]. عملکرد دو قطبش آنتن با استفاده از یک موجبر مستطیلی فلزی و یک شیپور مخروطی برای تحریک موج سطحی روی یک میله دی‌الکتریک، ایجاد می‌شود. به‌منظور توزیع سیگنال به موجبر مربعی، از یک پیچ ریزنوری استفاده شده است. این آنتن پهنای باند ۱۰dB، ۱/۷ گیگاهرتز و بهره ۱۱/۵dB را ارائه می‌دهد. میزان SLL^۲ و قطبش متقاطع به ترتیب کمتر از ۲۵dB- و ۲۶dB- هستند. یک آنتن تغذیه بازتاب‌دهنده از نوع میله دی‌الکتریک با قطبش خطی دوگانه ارائه شده است [۷]. این آنتن توسط یک موجبر استوانه و پرت‌کننده شیپوری مخروطی^۳ به همراه دو پروب متعام تغذیه می‌شود، آنتن پیشنهادی در باند X عمل می‌کند. آنتن مذکور با استفاده از فناوری چاپگر سه‌بعدی طراحی و چاپ شده است. طراحان به‌منظور کوچک شدن ابعاد آنتن میله دی‌الکتریک، موجبر را از نوع توپر^۴ طراحی کرده‌اند. یک آنتن میله دی‌الکتریک باند S با قطبش دوگانه دایروی معرفی شده است، که به‌صورت مونوپالس و به‌عنوان تغذیه بازتابنده ۱۱ متری استفاده می‌شود [۸]. یک آنتن آرایه‌ای چهارتایی با قطبش دایروی با استفاده از شبکه تغذیه شامل هیبرید ۹۰ درجه پیاده‌سازی شده است [۹]. شبکه هیبرید و عناصر تشعشع‌کننده روی یک صفحه مدار چاپی قرار دارند.

یک آنتن میله دی‌الکتریک با بازدهی بالا برای کاربرد ایستگاه زمینی در باند Ka در محدوده فرکانس ۲۵/۵ تا ۲۷ گیگاهرتز توسعه یافته است [۱۰]. آنتن میله دی‌الکتریک برای کار در سیستم ردیابی مونوپالس^۵ طراحی، توسعه و آزمایش شده است. آنتن طراحی شده دارای قطبش دایروی با نسبت محوری اندازه‌گیری شده ۱dB روی باند فرکانسی ۲۵ گیگاهرتز تا ۲۷/۵ گیگاهرتز است. این آنتن از ماده دی‌الکتریک Rexolite با ضریب گذردهی ۲/۵۳ به‌منظور ارائه تلفات کم و بازدهی الکتریکی بالا ساخته شده است. موجبر استاندارد استفاده‌شده برای تغذیه WR-34 و در محدوده فرکانسی ۲۲ تا ۳۳ گیگاهرتز است.

یکی از مشکلات طراحی آنتن‌های میله دی‌الکتریک، افزایش ابعاد دهانه موجبر و قطر اصلی میله دی‌الکتریک در فرکانس‌های پایین است. هدف از این مقاله، طراحی و ساخت آنتن میله دی‌الکتریک در باند ISM با قطبش دوگانه دایروی هم‌زمان است. در

^۱ Industrial, Scientific and Medical band

^۲ Side Lobe Level

^۳ Conical Horn Launcher

^۴ Dielectric Filled Waveguide

^۵ Monopulse

^۶ Dielectric Rod Antenna

^۷ Feed Taper

^۸ Terminal Taper

دی الکتریک است. ثابت انتشار مود HE_{11} در جهت محوری میله نقش اصلی را در طراحی آنتن میله ایفا می کند. طراحی آنتن دی الکتریک باید در بالاترین فرکانس کاری در باند انجام شود، زیرا موجب تحریک مدهای مرتبه بالاتر TE_{01} و TM_{01} می شود که میدان ناشی از این مدها در جهت محور میله دارای صفر هستند و موجب ایجاد اعوجاج در الگوی تشعشعی می شود.

افزایش طول میله بیشتر از حداقل طول مورد نیاز به منظور تبدیل موج سطحی به موج تابشی، انجام می شود. رابطه فاز دقیق مورد نیاز برای حداکثر بهره آنتن به تعدادی از عوامل مانند بازده تغذیه در حالت تحریک مد HE_{11} ، ابعاد مخروط تغذیه و طول کلی میله بستگی دارد. در نتیجه، انتخاب های طراحی برای طول کل میله ماهیتی تجربی دارند مانند رابطه ۳ [۱۲]:

$$\frac{\lambda_0}{\lambda_z} = 1 + \frac{\lambda_0}{pl} \quad (3)$$

که در آن λ_0 طول موج فضای آزاد، λ_z طول موج، موج سطحی در دی الکتریک، p ضریب بهینه سازی^۱ تجربی و l طول کلی آنتن میله دی الکتریک است. برای آنتن هایی با طول های مورد انتظار بین سه تا هشت طول موج فضای آزاد، مقدار پیشنهادی p برابر با ۳ است.

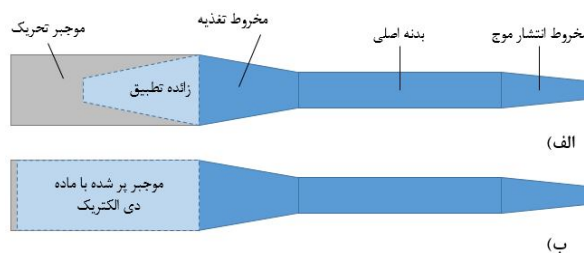
طبق [۱۲] مخروط تغذیه باید 0.2 برابر طول کل آنتن باشد. قطر شروع مخروط تغذیه در لبه تغذیه باید به گونه ای باشد که نسبت $\frac{\lambda_0}{\lambda_z}$ بین $1/2$ و $1/3$ باشد. برای تعیین قطر صحیحی که به این محدوده می رسد، ثابت انتشار مد HE_{11} در میله برای قطرهای مختلف، محاسبه و در رابطه ۴ استفاده شد [۱۲]:

$$\frac{\lambda_0}{\lambda_z} = \frac{\beta}{k_0} \quad (4)$$

که در آن $\beta = k_z$ ثابت انتشار موج سطحی هیبریدی در جهت محوری میله دی الکتریک است. به منظور کاهش سطح گلبرگ فرعی نیز نسبت طول موج در شروع تغذیه برابر $1/3.5$ در نظر گرفته می شود که در انتهای آن به $1/2$ می رسد. سپس باریک شوندگی در طول قابل توجهی از آنتن در مخروط دیگری ادامه دارد تا به قطر طراحی شده بدنه اصلی برسد.

قطر میله دی الکتریک در انتهای مخروط انتشار باید به گونه ای باشد که انرژی در مد HE_{11} دیگر مهار نشده و تابش انرژی رخ دهد. بهترین مهار انرژی در میله در بالاترین فرکانس است. در نتیجه، این قطر باید در بالاترین فرکانس در باند طراحی شود تا اطمینان حاصل شود که مهار انرژی به پایان می رسد. در این قطر، ثابت انتشار موج

ϵ_r ماده دی الکتریک جایگزین شده و به تبع ابعاد موج بر (قطر دهانه) تا حد زیادی، کاهش یابد (شکل ۱-ب) [۱۲].



شکل ۱- آنتن میله دی الکتریک تغذیه شده موج بر دایروی (الف) با زائده تطبیق، (ب) پر شده با ماده دی الکتریک [۱۱]

طراحی آنتن شامل محاسبه پارامترهایی از جمله طول و قطر بخش های مختلف است (شکل ۱). پدیده هایی که بر عملکرد آنتن حاکم هستند را می توان به عنوان دو نوع موج انتشاری و سطحی تعریف کرد [۱۲]. آنتن توسط مود غالب موج بر دایروی یعنی TE_{11} در قسمت پر شده با دی الکتریک تغذیه می شود. در ناپیوستگی لبه تغذیه، درست جایی که موج بر دایروی فلزی به پایان می رسد، یک موج سطحی با مود ترکیبی HE_{11} تولید می شود که عمدتاً توسط میله دی الکتریک مهار شده و در امتداد آن منتشر می شود. دومین موج انتشاری که در ناپیوستگی لبه تغذیه ایجاد می شود، یک موج تابشی است که در فضای آزاد منتشر می شود. بخش بدنه اصلی میله برای پشتیبانی از مود HE_{11} طراحی شده است [۱۱]. در حالتی انتشار تک مود HE_{11} برای میله دی الکتریک ممکن می شود که رابطه ۱ برقرار باشد [۱۱]:

$$\frac{d}{\lambda_0} < \frac{0.626}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

که در آن d قطر میله دی الکتریک λ_0 طول موج فضای آزاد در فرکانس عملکرد و ϵ_r گذردهی نسبی ماده به کاررفته در دی الکتریک است. رابطه فوق حداکثر قطر بدنه اصلی دی الکتریک را تعیین می کند. رعایت این دستورالعمل در بالاترین حد فرکانس کاری، عملکرد تک مد را برای کل محدوده باند عملیاتی تضمین می کند. حداقل قطر بدنه اصلی دی الکتریک باید به گونه ای باشد که در پایانه آن مقدار مود HE_{11} ناچیز شود. حداقل طول دی الکتریک مورد نیاز برای اینکه موج سطحی هیبریدی به خوبی منتشر شود، توسط رابطه ۲ مشخص می شود [۱۲]:

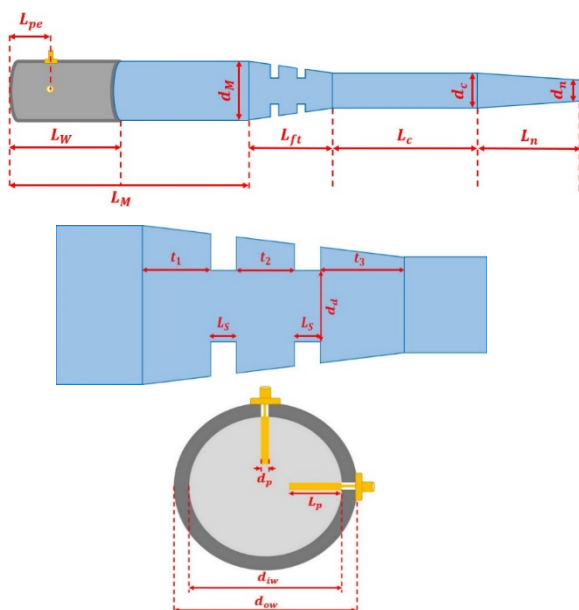
$$l_{min} k_z - l_{min} k_0 = \frac{\pi}{3} \quad (2)$$

که در آن l_{min} حداقل طول مورد نیاز در واحد متر، k_0 ثابت انتشار فضای آزاد و k_z ثابت انتشار موج سطحی هیبریدی در جهت محوری

¹ Optimization factor

۳- شبیه‌سازی

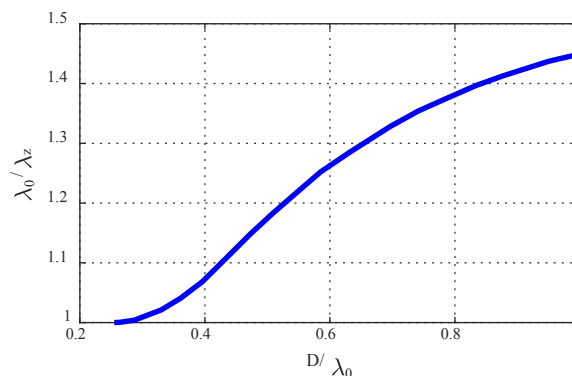
در این بخش به منظور امکان‌سنجی ساخت آنتن میله دی‌الکتریک، به شبیه‌سازی با نرم‌افزار CST پرداخته می‌شود. آنتن مذکور از ماده دی‌الکتریک پلی‌آمید با $\epsilon_r = 2.5$ ، موج‌بر دایروی فلزی و دو پروب هم‌محور متعامد به منظور ایجاد قطبش دایروی دوگانه با تغییر فاز 0° و 90° درجه، تشکیل شده است. با توجه به اینکه حداکثر قطر مجاز میله دی‌الکتریک $52/5\text{mm}$ معادل $0.42\lambda_0$ طول موج فضای آزاد است و از نمودار شکل (۲) حداکثر نسبت طول موج‌ها برابر 1.09 محاسبه می‌شود و امکان طراحی مطابق دستورالعمل مراجع وجود ندارد. برای طراحی مطابق دستورالعمل مراجع نسبت طول موج در شروع تغذیه بین $1/2$ تا $1/3$ در نظر گرفته می‌شود که معادل قطر دی‌الکتریک از $65/9$ تا $81/7$ است. باین‌حال در ابتدا برحسب طرح شکل (۱) طراحی انجام شد که در آن قطر بخش اصلی $42/5\text{mm}$ معادل نسبت طول موج 1.027 و طول آنتن هم معادل $7/2$ برابر طول موج فضای آزاد است. در این حالت سطح گلبیگ فرعی برابر $-9/81\text{dB}$ به دست آمد که اندازه آن زیاد است. به منظور کاهش سطح گلبیگ فرعی طرح شکل (۳) پیشنهاد می‌شود که در آن بخش تغذیه فاقد ساختار مخروطی است همچنین دو شکاف به منظور کاهش سطح گلبیگ فرعی در ساختار باریک شونده اضافه شده‌اند. زیرا ناپیوستگی موجب ایجاد تشعشع و به‌نوعی وزن دهی در عنصر تشعشعی و کاهش سطح گلبیگ فرعی می‌شود. مقدار عددی پارامترهای مشخص‌شده، در جدول (۱) آورده شده است. به منظور بررسی خطاهای ساخت، پارامتر ϵ_r آنالیز حساسیت خواهد شد.



شکل ۳- ابعاد و پارامترهای ساختاری آنتن طراحی شده

سطحی تقریباً برابر با ثابت انتشار فضای آزاد است $\beta = k_0$ که نشان‌دهنده خروج از محدوده عملیاتی موج آهسته^۱ است.

در شکل (۲) نمودار نسبت $\frac{\lambda_0}{\lambda_z}$ برحسب قطر میله دی‌الکتریک برای $\epsilon_r = 2.5$ آمده است.



شکل ۲- نسبت طول موج فضای آزاد به طول موج سطحی برحسب قطر میله دی‌الکتریک برای $\epsilon_r = 2.5$ [۱۱].

از آنجاکه الزامات عملیاتی آنتنی که قصد طراحی آن وجود دارد، حجم فیزیکی و پارامترهای مدنظر را از پیش تعیین کرده است روش تحریک با موج‌بر پرشده از ماده دی‌الکتریک، برگزیده شد. حداکثر قطر مجاز برای میله دی‌الکتریک $52/5\text{mm}$ تعیین شده است. حداکثر بهره آنتن میله دی‌الکتریک از رابطه ۶ و پهنای پرتو نیم توان^۲ (3dB) توسط رابطه ۷ به دست می‌آیند [۱۱].

$$\text{Gain} = \frac{10l}{\lambda_0} \quad (6)$$

$$\text{HPBW} \approx 55 \sqrt{\frac{\lambda_0}{l}} \quad (7)$$

۲-۲- طراحی بخش موج‌بری

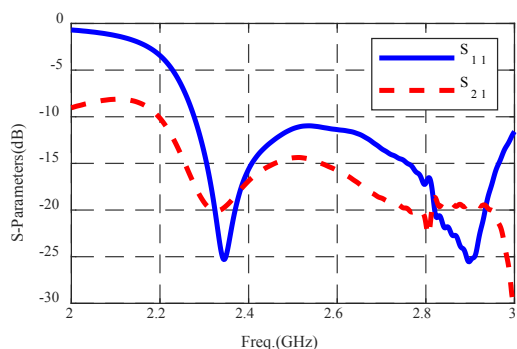
مطابق رابطه ۵ شعاع دهانه موج‌بر پرشده با ماده دی‌الکتریک از جنس پلی‌آمید با $\epsilon_r = 2.5$ و فرکانس قطع $2/12$ گیگاهرتز، برابر با $26/2\text{mm}$ به دست می‌آید. در ادامه طول موج هدایتی موج‌بر (λ_g) از روابط موج‌بر دایروی قابل محاسبه است [۱۳]. بدین ترتیب، طول موج‌بر برابر با λ_g طول پروب‌ها برابر با $\frac{\lambda_d}{4}$ و فاصله پروب از انتهای موج‌بر $\frac{\lambda_g}{4}$ در نظر گرفته می‌شود.

¹ Slow Wave

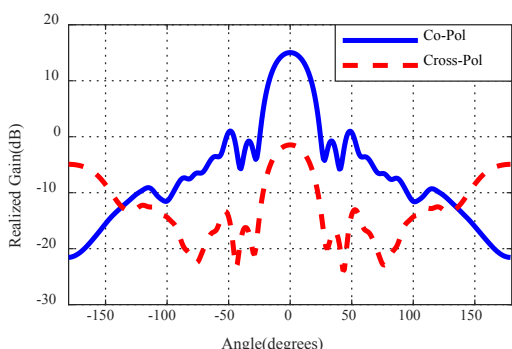
² Half Power Beam Width

به طرح موجود در مراجع موجب کاهش $4/01$ dB در سطح گلبرگ فرعی شده است. نسبت قطبش متعامد نیز برابر $16/8$ dB است.

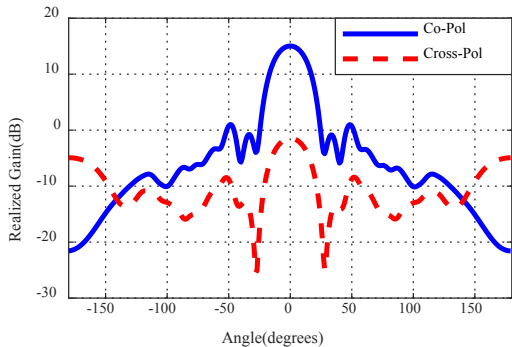
نسبت محوری آنتن شبیه‌سازی شده در شکل‌های (۷) و (۸) برحسب زاویه (در فرکانس مرکزی) و فرکانس رسم شده است. نسبت محوری در زوایای بین $26-27$ درجه در فرکانس مرکزی و در بازه فرکانسی $2/26$ GHz تا $2/86$ GHz کمتر از 3 dB است. بنابراین، در محدوده پهنای پرتو نصف توان ($14/5-14/5$ درجه) و همچنین بازه فرکانسی موردنظر ($2/4$ GHz تا $2/5$ GHz) نسبت محوری کمتر از 3 dB است.



شکل ۵- پارامترهای پراکندگی آنتن میله دی الکترونیک شبیه‌سازی شده.



(الف)



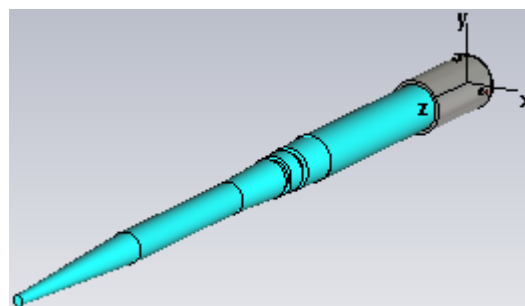
(ب)

شکل ۶- الگوی تشعشعی شبیه‌سازی شده آنتن در فرکانس $2/45$ GHz

(الف) زاویه سمت 0 درجه (ب) زاویه سمت 45 درجه

جدول ۱- مقدار عددی ابعاد و پارامترهای ساختاری آنتن طراحی شده

اندازه (mm)	پارامتر	اندازه (mm)	پارامتر
۱۸	L_p	۲۱	L_{pe}
۲/۲	d_p	۱۰۸/۸	L_w
۵۲/۵	d_{tw}	۳۱۴	L_M
۶۰/۵	d_{ow}	۱۶۰	L_{ft}
۱۰	L_s	۲۰۰	L_c
۳۶	d_d	۲۱۰	L_n
۴۲	t_1	۵۲/۵	d_M
۲۰	t_2	۳۶	d_c
۷۸	t_3	۱۴	d_n



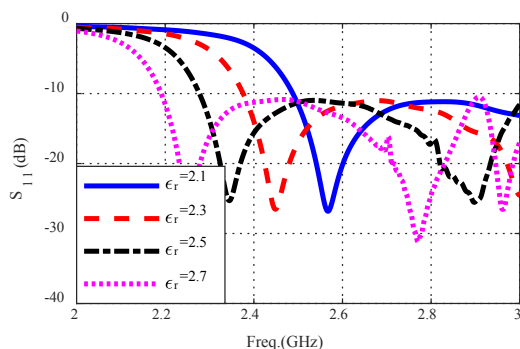
شکل ۴- نمای ساختار شبیه‌سازی شده آنتن

همان گونه که در شکل (۴) قابل مشاهده است، آنتن میله دی الکترونیک فوق متشکل از: میله دی الکترونیک تغذیه و تطبیق، مخروط تغذیه، میله دی الکترونیک مرکزی و مخروط انتشار است. پارامترهای پراکندگی آنتن شبیه‌سازی شده در شکل (۵) آمده است. همان طور که مشخص است آنتن شبیه‌سازی شده پهنای باندی بیش از 700 MHz دارد. پهنای باند مطلوب طراحی 100 MHz و با فرکانس مرکزی $2/45$ GHz است. همچنین میزان ایزولاسیون بین دو درگاه در پهنای باند آنتن کمتر از $14/3$ dB است. تطبیق آنتن در فرکانس‌های بالاتر از $2/64$ GHz به علت تحریک مدهای مرتبه بالاتر ساختار میله دی الکترونیک است. به علت تقارن ساختار و یکسان بودن نتایج پارامترهای پراکندگی برای درگاه ۲، نتایج در نمودار شکل (۵) آورده نشده است.

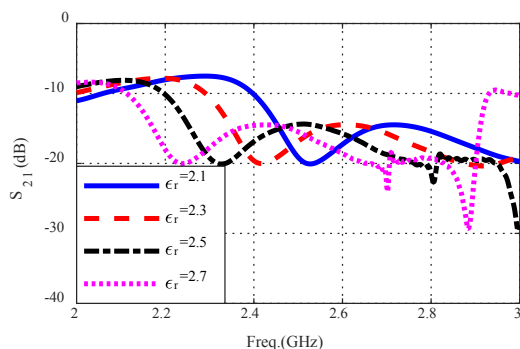
الگوی تشعشعی شبیه‌سازی شده آنتن در شکل (۶) برای دو زاویه سمت 0 و 45 درجه قابل مشاهده است. آنتن در فرکانس مرکزی خود ($2/45$ GHz) بهره $14/8$ dB، پهنای پرتو نیم توان 29 درجه و سطح گلبرگ فرعی $13/82$ dB دارد. این در حالی است که سطح گلبرگ فرعی آنتن میله دی الکترونیک بدون شکاف در شبیه‌سازی برابر $13/59$ dB به دست آمده است که فقط به اندازه $0/23$ dB بیشتر است. بنابراین، استفاده از طرح جدید با وجود شکاف‌ها نسبت

بررسی اثر تغییر مقدار ϵ_r بر پارامترهای تشعشی آنتن، نتایج تحلیل حساسیت در قالب جدول (۲) آورده شده است.

۴- اندازه‌گیری پارامترهای آنتن



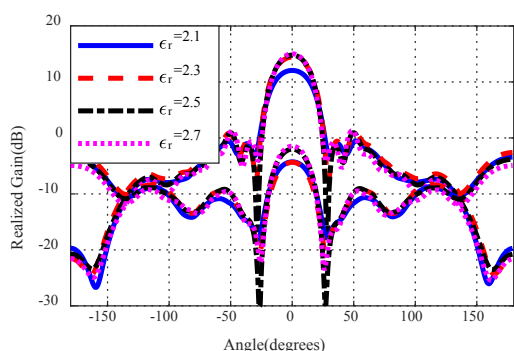
(الف)



(ب)

شکل ۹- نمودار پارامتر پراکندگی آنتن شبیه‌سازی شده به ازای مقادیر

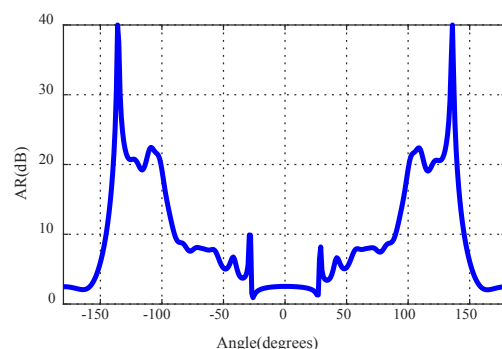
ϵ_r مختلف. الف) S_{11} ، ب) S_{21}



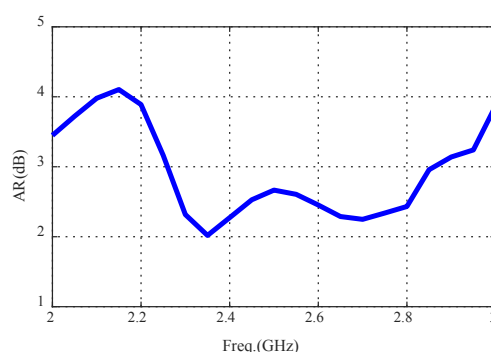
شکل ۱۰- الگوی تشعشی قطبش اصلی و متقاطع شبیه‌سازی شده

آنتن به ازای مقادیر ϵ_r مختلف

پس از طی مراحل طراحی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی آنتن میله دی الکتریک به منظور بررسی عملکرد نمونه آنتن ساخته شد. این آنتن از یک موج‌بر فلزی از جنس آلومینیوم، میله دی الکتریک از جنس تفلون و دو عدد اتصال SMA تشکیل شده است. به منظور ایجاد



شکل ۷- نمودار نسبت محوری برحسب زاویه در فرکانس ۲/۴۵GHz



شکل ۸- نمودار نسبت محوری برحسب فرکانس

۳-۱- تحلیل حساسیت

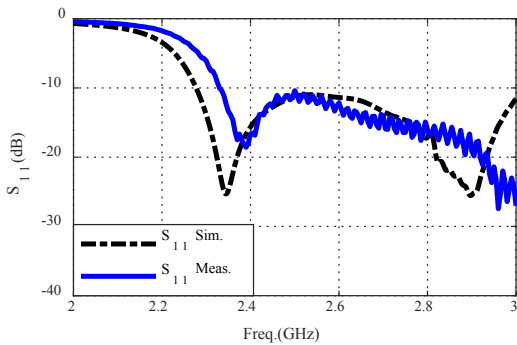
یکی از پارامترهای بسیار مهم در طراحی و شبیه‌سازی آنتن‌های میله دی الکتریک مقدار ϵ_r ماده دی الکتریک به کاررفته در آن است. به منظور تحلیل حساسیت، شبیه‌سازی به ازای ضریب گذردهی‌های نسبی ماده دی الکتریک برابر با مقادیر ۲/۱، ۲/۳، ۲/۵ و ۲/۷ انجام شده است. شکل (۹) نمایانگر اثر تغییر مقدار ϵ_r بر پارامترهای S_{11} و S_{21} است.

همان‌طور که از نتایج برمی‌آید، افزایش مقدار گذردهی نسبی ماده دی الکتریک، سبب جابه‌جایی باند فرکانسی آنتن به فرکانس‌های کمتر و افزایش تطبیق می‌شود. شکل (۱۰) نمایانگر اثر تغییر مقدار ϵ_r بر الگوی تشعشی آنتن در دو قطبش اصلی و متقاطع است.

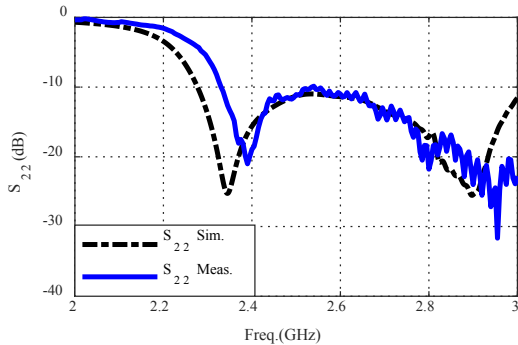
همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش مقدار ϵ_r ، پهنای پرتو و سطح گلبرگ فرعی کاهش یافته و بهره افزایش می‌یابد. علت این تغییر، احتباس بیشتر موج درون دی الکتریک است. همچنین نسبت قطبش متقاطع تغییر معناداری نکرده است.

شکل (۱۱) نمایانگر اثر تغییر مقدار ϵ_r بر مقدار نسبت محوری آنتن شبیه‌سازی شده است. مطابق نتایج افزایش مقدار ϵ_r موجب افزایش پهنای باند و جابه‌جایی محدوده فرکانسی زیر ۳dB نسبت محوری به سمت فرکانس‌های کمتر می‌شود. به منظور سهولت در

درجه و SLL در حدود $-12/9\text{dB}$ است. در فرکانس $2/45\text{GHz}$ نیز، در هر دو قطبش چپ‌گرد و راست‌گرد بهره $14/6\text{dB}$ ، پهنای پرتو $29/2$ درجه و SLL برابر $-13/8\text{dB}$ دارد. آنتن در فرکانس $2/5\text{GHz}$ در هر دو قطبش چپ‌گرد و راست‌گرد بهره 15dB ، پهنای پرتو 28 درجه و SLL برابر $-14/1\text{dB}$ دارد.

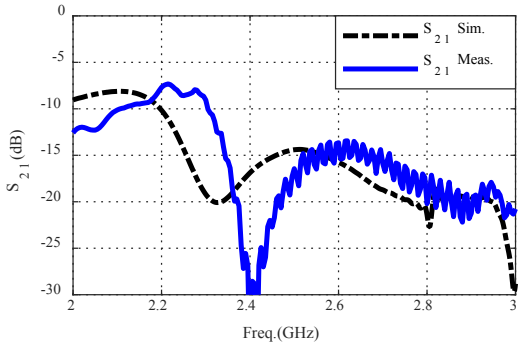


(الف)



(ب)

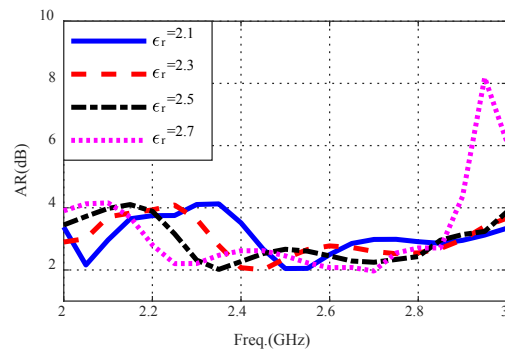
شکل ۱۲- مقایسه پارامتر الف) S_{11} ، ب) S_{22} اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده آنتن میله دی الکترونیک



شکل ۱۳- مقایسه ایزولاسیون اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده آنتن میله دی الکترونیک

قطبش دایروی از یک مقسم توان با اخلاف فاز 90 درجه استفاده شده است. نتایج اندازه‌گیری پارامترهای پراکندگی و مقایسه آن با نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) قابل مشاهده است. همان‌گونه که از نتایج برمی‌آید، آنتن ساخته‌شده دارای تطبیق حدود -10dB در بازه $2/33\text{GHz}$ تا 3GHz بوده و میزان ایزولاسیون در محدوده باند فرکانسی موردنظر، بهتر از $-16/4\text{dB}$ است. با توجه به جابه‌جایی فرکانسی به سمت فرکانس‌های بالاتر و مقایسه با نتایج شبیه‌سازی می‌توان حدس زد که ضریب دی‌الکترونیک میله حدود $2/4$ است.

شکل (۱۴) نمایانگر مراحل اندازه‌گیری و نحوه اتصالات موردبحث است. نتایج اندازه‌گیری پارامترهای تشعشی و تطبیق آن با نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های (۱۵) تا (۱۷) قابل مشاهده است.



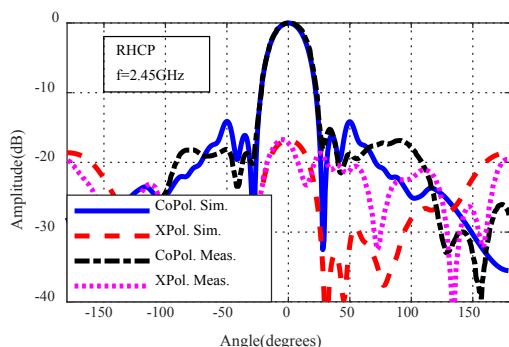
شکل ۱۱- نمودار نسبت محوری آنتن به ازای مقادیر ϵ_r مختلف برحسب فرکانس

جدول ۲- نتایج تحلیل حساسیت اثر تغییر مقدار ϵ_r بر پارامترهای تشعشی آنتن

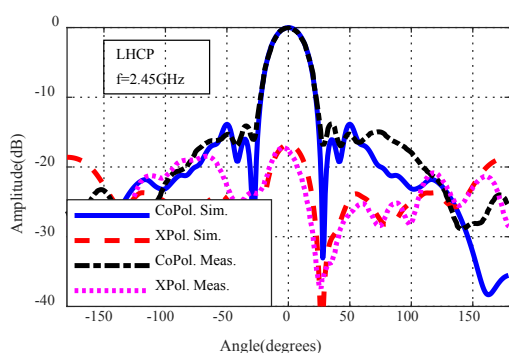
پارامتر	پارامتر پراکندگی	پهنای پرتو	بهره	سطح گلبرگ فرعی	نسبت محوری	قطبش متعامد
افزایش ϵ_r	جابه‌جایی باند فرکانسی (کمتر)	کاهش	افزایش	کاهش	جابه‌جایی باند فرکانسی (کمتر)	ثابت

اندازه‌گیری الگوهای تشعشی در فرکانس‌های $2/4\text{GHz}$ ، $2/45\text{GHz}$ و $2/5\text{GHz}$ برای هر دو قطبش دایروی (راست‌گرد و چپ‌گرد) انجام شده است.

آنتن میله دی الکترونیک در فرکانس $2/4\text{GHz}$ ، در هر دو قطبش چپ‌گرد و راست‌گرد دارای بهره در حدود $14/2\text{dB}$ ، پهنای پرتو $30/1$



(الف)



(ب)

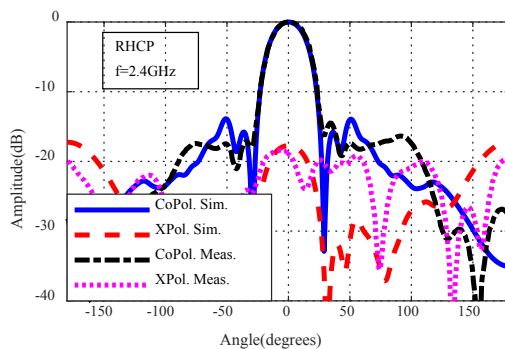
شکل ۱۶- الگوی تشعشعی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده آنتن میله دی‌الکتریک در فرکانس ۲/۴۵GHz

بازده تشعشعی و بازدهی کلی شبیه‌سازی شده در فرکانس مرکزی به ترتیب برابر ۸۹ و ۸۸/۶ درصد است. این مقادیر در اندازه‌گیری نیز به ترتیب برابر ۷۶/۹ و ۷۵/۹ درصد به دست آمده است. دلیل اختلاف هم می‌تواند تلفات ناشی از شبکه تقسیم توان باشد که تلفات آن در شبیه‌سازی لحاظ نشده است.

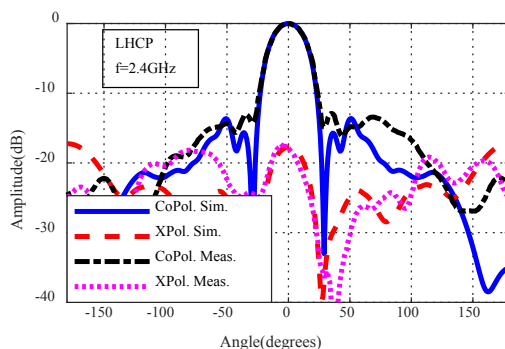
در شکل‌های (۱۵) تا (۱۷) بین الگوهای تشعشعی قطبش متعامد چه در شبیه‌سازی و چه در اندازه‌گیری اختلاف وجود دارد. در شبیه‌سازی که هر دو درگاه مشابه هم هستند الگوی تشعشعی متقاطع یک قطبش در صفحه X-Z کاملاً برابر با الگوی تشعشعی متقاطع قطبش مخالف در صفحه Y-Z است. یعنی مثلاً در حالتی که قطبش راست‌گرد غالب است الگوی تشعشعی متقاطع چپ‌گرد در صفحه X-Z با الگوی تشعشعی راست‌گرد متقاطع در صفحه Y-Z در حالتی که قطبش چپ‌گرد غالب است برابر می‌شود. این به دلیل برابری ساختار در هر دو درگاه است و غالب بودن هر قطبش از طریق اختلاف فاز ۹۰ درجه دو درگاه تعیین می‌شود که در واقع این اختلاف فاز در دو قطبش بین دو درگاه جابه‌جا شده است. اما در اندازه‌گیری به دلیل خطاهای احتمالی ساخت و همچنین گیره نگه‌دارنده و میز چرخان اتاق جاذب اختلاف بیشتری به وجود آمده است.



شکل ۱۴- اندازه‌گیری پارامترهای تشعشعی آنتن در اتاق بدون بازتاب



(الف)



(ب)

شکل ۱۵- الگوی تشعشعی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده آنتن میله دی‌الکتریک در فرکانس ۲/۴GHz

نتایج اندازه‌گیری نسبت محوری برای دو قطبش چپ‌گرد و راست‌گرد و تطبیق آن با نتایج شبیه‌سازی در شکل (۱۸) قابل مشاهده است. در شبیه‌سازی به دلیل وجود مشابهت ساختار نسبت محوری هر دو قطبش یکسان است. در سطح قطبش متعامد بین نتایج شکل‌های (۱۵) تا (۱۷) و شکل (۱۸) اختلاف وجود دارد که دلیل آن استفاده از آنتن مارپیچی در اندازه‌گیری الگوی تشعشعی دایروی است. زیرا سطح قطبش متعامد آن بیشتر از آنتن بوقی با قطبش خطی است که در اندازه‌گیری نسبت محوری در شکل (۱۸) استفاده شده است. بنابراین نمودار شکل (۱۸) دقت بالاتری دارد.

جدول ۳- مقایسه نتایج این مقاله با کارهای مشابه قبلی

پارامتر	۶	۷	۸	۱۰	۱۱	این کار
پهنای باند نسبی	۰/۰۷	۰/۳۷	۰/۱۴	۰/۲	۰/۲۲	۰/۲۵
بهره (dB)	۱۱/۵	-	۱۶/۵	۱۶	۱۶/۵	۱۴/۸
سطح گلبرگ فرعی (dB)	-۲۵	-۲۰	-۱۸/۲	-۱۳/۵	-۱۶	-۱۳/۲
قطر	۲λ ₀	۱/۲λ ₀	۰/۷۶λ ₀	۰/۸۸λ ₀	۰/۶۲λ ₀	۰/۴۹λ ₀
طول	>۷/۸λ ₀	۳/۶۷λ ₀	>۷/۷λ ₀	۷λ ₀	۶/۵λ ₀	۷/۲λ ₀
نسبت محوری (dB)	-	-	۰/۵	۱	-	۲

۵- نتیجه گیری

در این مقاله طراحی، شبیه سازی و ساخت آنتن میله دی الکترونیک باند ISM با قطبش دایروی دوگانه همزمان انجام شده است. آنتن میله دی الکترونیک بررسی شده دارای بخش های مختلفی همچون، موجر فلزی، بخش تطبیق و تغذیه، میله دی الکترونیک مرکزی و مخروط انتشار است. تأثیر تغییر ابعاد فیزیکی آنتن بر ویژگی های آنتن مانند الگوی تشعشعی، بهره و پارامترهای پراکندگی آن شبیه سازی شده است. به منظور ایجاد قطبش دایروی از یک هیبرید ۹۰ درجه که دو خروجی آن با هم اختلاف فاز ۹۰ درجه دارند استفاده شده است که با توجه به دو ورودی آن موجب ایجاد اختلاف فاز ۹۰ و ۹۰- درجه بین دو درگاه و تولید قطبش های دوگانه دایروی می شود. آنتن میله دی الکترونیک ساخته شده پارامترهای تشعشعی مناسبی مانند بهره و الگوی تشعشعی با سمت گرایی بالا دارد. با تغییر ساختار میله دی الکترونیک ویژگی هایی از جمله سطح گلبرگ فرعی و پهنای پرتو نیم توان بهبود پیدا کرده اند. این نوع از آنتن نسبت به آنتن های شیپوری که به عنوان تغذیه متداول آنتن های بازتابی هستند، دارای ابعاد و وزن کمتری است. مزیت اصلی این آنتن می تواند وجود سطح مقطع کم آن باشد هر چند که طول آن نسبتاً زیاد است.

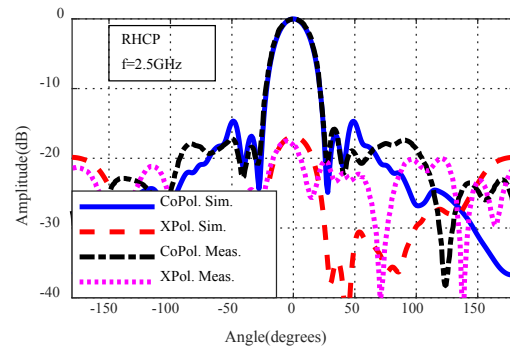
۶- مراجع

[1] Liolis, K.; Gómez-Vilardebó, J.; Casini, E.; Pérez-Neira, A. "Statistical Modeling of Dual-Polarized MIMO Land Mobile Satellite Channels"; IEEE T Commun. 2010, 58, pp.3077-3083. doi:10.1109/TCOMM.2010.091710.090507.

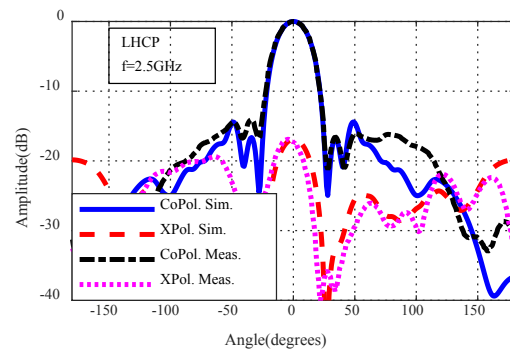
[2] Cui, Y.; Gao, X.; Fu, H.; Chu, Q.; Li, R. "Broadband Dual-Polarized Dual-Dipole Planar Antennas: Analysis, Design, and

همان طور که از نتایج مشهود است، آنتن در محدوده باند فرکانسی ۲/۳۴GHz تا ۲/۷GHz در قطبش چپ گرد دارای نسبت محوری زیر ۳dB است. در قطبش راست گرد نیز در محدوده فرکانسی ۲/۳۱GHz تا ۲/۷GHz نسبت محوری زیر ۳dB است. رفتار و اندازه نسبت محوری چپ گرد و راست گرد مشابه هم هستند.

مقایسه نتایج حاصل از این مقاله با کارهای مشابه قبلی در جدول (۳) آمده است. مزیت اصلی آنتن میله دی الکترونیک این مقاله کم بودن سطح مقطع فیزیکی آن در مقایسه با سایر مقالات مشابه است.

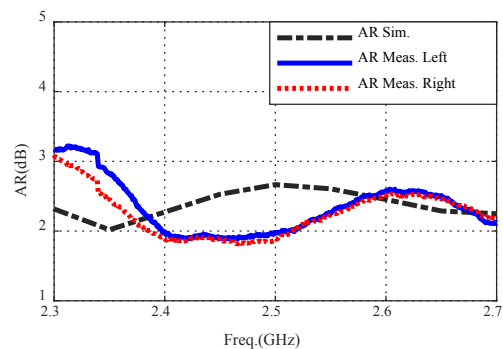


(الف)



(ب)

شکل ۱۷- الگوی تشعشعی اندازه گیری و شبیه سازی شده آنتن میله دی الکترونیک در فرکانس ۲/۵GHz



شکل ۱۸- مقایسه نسبت محوری اندازه گیری و شبیه سازی شده آنتن میله دی الکترونیک

Application for Base Stations”; IEEE Antenn Propag M. 2017, 59, 77-87. doi: 10.1109/MAP.2017.2753038.

[3] Mello, R.; Junqueira, C. “Polarization Diversity on ESM Systems”; Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications. 2017, 16, 273-283. doi: 10.1590/2179-10742017v16i1888.

[4] Wang, K.; Liang, X.; Zhu, W.; Geng, J.; Li, J.; Ding, Z.; Jin, R. “A Dual-Wideband Dual-Polarized Aperture-Shared Patch Antenna with High Isolation”; IEEE Antenn Wirel Pr. 2018, 17, 735-738. doi: 10.1109/LAWP.2018.2812699.

[5] Luo, N.; Yu, X.; Mishra, G.; Sharma, S. “A Millimeter-Wave (V-band) Dual-Circular-Polarized Horn Antenna Based on an Inbuilt Monogroove Polarizer”; IEEE Antenn Wirel Pr. 2020, 19, pp.1933-1937. doi: 10.1109/LAWP.2020.3015745.

[6] Sporer, M.; Weigel, R.; Koelpin, A. “A 24 GHz Dual-Polarized and Robust Dielectric Rod Antenna”; IEEE T Antenn Propag. 2017, 65, 6952-6959. doi: 10.1109/TAP.2017.2764530.

[7] Rivera-Lavado, A.; Garcia-Munoz, L.; Botello, G.; Segovia-Vargas, D. “Low-Cost and Low-Weight Horn and Reflector Antennas Through 3D Printing”; arXiv preprint arXiv:1807.08569, 2018. doi: 10.48550/arXiv.1807.08569.

[8] Kumar, P.; Kumar, V.; Subramanyam, A.; Srinivasan, V.; Lakshmeesha, V.; FIEEE, S. “High Performance Dual Circularly Polarized S-Band Feed”; Proc. URSI General Assembly. 2005, 566-568.

[9] Rezaei, P.; Mousavi Razi, Z. “Broadband and High Gain Circularly Polarized Slot Array Antenna with Hybrid Coupler Feed Network”; Journal of Applied Electromagnetics. 2016, 4, 45-52 (In Persian).
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455153.1395.4.1.6.8>

[10] Kumar, V.; Kurup, D. “Design of Dielectric Rod Antenna for Ground Station Applications”; IEEE International Conference on Antenna Innovations & Modern Technologies for Ground, Aircraft and Satellite Applications (iAIM). 2017, 1-4. doi: 10.1109/IAIM.2017.8402629.

[11] Saffold, G. “Theory and Application of Dielectric Rod Antennas and Arrays”; 2021, Doctoral Dissertation, University of South Florida.

[12] Volakis, J. “Antenna Engineering Handbook”; 2007, 10-1-10-32, Fourth Edition, McGraw Hill.

[13] Pozar, D. “Microwave engineering”; 2011, Fourth Edition, John Wiley & Sons.