

Vol. 13/ No.52/Summer 2024

Research Article

The Crossed-Dipole Antenna with Torang-shaped Parasitic Elements and Circular Polarization for GPS Application

Amir Siahcheshm, Assistant Professor* 

¹Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Salmas Branch, Islamic Azad University, Salmas, Iran,
amir.siahcheshm@iau.ac.ir

Correspondence

Amir Siahcheshm, Assistant Professor,
Department of Electrical Engineering, Salmas Branch, Islamic Azad University, Salmas, Iran,
amir.siahcheshm@iau.ac.ir

Received: 26 November 2023

Revised: 22 December 2023

Accepted: 20 January 2024

Abstract

This paper presents a circularly polarized (CP) printed crossed-dipole antenna for Global Positioning System (GPS) receptions in the L1 (1575 MHz) band. Its structure consists of two orthogonally printed dipoles, two integrated baluns to feed the dipoles, and a feed network connected to the baluns. The feeding network comprises a Branch-Line Coupler with two quadrature outputs. Accordingly, providing two orthogonal dipoles with a 90-degree phase difference leads to right-handed circular polarization (RHCP), a must for GPS applications. Four Torang-shaped parasitic elements have been used in the upper part of the dipole arms to improve the circular polarization of the antenna. Based on the practical results obtained with the technique, the antenna's Axial Ratio (AR) bandwidth is increased by about 21%. At the same time, the purity of the circular polarization can also be seen. The experimental results show that the proposed GPS antenna has an impedance bandwidth of 46.28% (from 1.327 to 2.126 GHz), an axial ratio bandwidth of 41.36% (from 1.329 to 2.022 GHz), and a maximum gain of 6.40 dB. The dimensions of the proposed antenna are compact, and this antenna has a stable radiation pattern. In the last step, the proposed GPS antenna is fabricated and tested in the antenna laboratory.


Keywords: Crossed Dipole Antenna, Parasitic Element, Circular Polarization, GPS.

Highlights

- In this research, a new design of orthogonal printed dipole antennas with circular polarization is presented.
- This antenna is useful for use in global positioning system receivers in the 1575 MHz band.
- In this design, four Torang-shaped parasitic elements are used to improve the circular polarization of the antenna.
- According to the practical results obtained with the used technique, the bandwidth of the axial ratio of the antenna has increased by about 21%.
- The purity of circular polarization of antenna has been improved by using Torang-shaped parasitic elements.

Citation: A. Siahcheshm, "The Crossed-Dipole Antenna with Torang-shaped Parasitic Elements and Circular Polarization for GPS Application," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 13, no. 52, pp. 65–80, 2024, doi: 10.30495/jce.2024.2002047.1239, [in Persian].

آنتن دوقطبی متعامد دارای المان‌های پارازیتیک ترنج شکل با قابلیت قطبش دایروی و کاربرد در سیستم موقعیت‌یاب جهانی

امیر سیاه‌چشم*^۱ 

چکیده:

این مقاله یک آنتن دوقطبی چایی متعامد با قطبش دایروی برای گیرنده های سیستم موقعیت‌یاب جهانی (Global Positioning System) در باند L1 (۱۵۷۵ مگاهرتز) را ارائه می‌دهد. ساختار آنتن متشکل از دو عدد دوقطبی چایی است که بصورت متعامد نسبت به یکدیگر قرار گرفته‌اند و شامل دو بالن یکپارچه برای تغذیه دوقطبی‌ها و یک شبکه تغذیه متصل به بالن‌ها است. در این طراحی، شبکه تغذیه از یک تزویجگر شاخه‌ای (Branch-Line Coupler) با دو خروجی مربعی (Quadrature Outputs) تشکیل یافته است. بر این اساس، تغذیه دو دوقطبی متعامد با اختلاف فاز ۹۰ درجه منجر به قطبش دایروی راست‌گرد می‌شود که برای کاربردهای سیستم موقعیت‌یاب جهانی امری الزامی است. با هدف بهبود قطبش دایروی آنتن، از چهار عدد المان پارازیتیک ترنج شکل در قسمت فوقانی بازوهای دوقطبی استفاده شده است. طبق نتایج عملی به دست آمده با تکنیک بکار گرفته‌شده، پهنای باند نسبت محوری (Axial Ratio) آنتن در حدود ۲۱٪ افزایش یافته و هم‌زمان خلوص قطبش دایروی آنتن نیز بهبود قابل ملاحظه‌ای داشته است. نتایج تجربی تأیید می‌کنند که آنتن پیشنهادی برای سیستم موقعیت‌یاب جهانی دارای پهنای باند امیدانسی ۴۶/۲۸٪ (از ۱/۳۲۷ تا ۲/۱۲۶ گیگاهرتز)، پهنای باند نسبت محوری ۴۱/۳۶٪ (از ۱/۳۲۹ تا ۲/۰۲۲ گیگاهرتز) و حداکثر بهره ۶/۴۰ دسی‌بل است. ابعاد آنتن پیشنهادی کوچک بوده و این آنتن دارای الگوی تشعشعی پایدار است. در گام آخر آنتن پیشنهادی برای سیستم موقعیت‌یاب جهانی در آزمایشگاه آنتن ساخت و تست شده است.

کلیدواژه‌ها: آنتن دوقطبی متعامد، المان پارازیتیک، سیستم موقعیت‌یاب جهانی، قطبش دایروی.

^{۱*} استادیار، گروه مهندسی برق، واحد سلماس، دانشگاه آزاد اسلامی، سلماس، ایران،
amir.siahcheshm@iau.ac.ir

نویسنده مسئول

^{۱*} استادیار، گروه مهندسی برق، واحد سلماس، دانشگاه آزاد اسلامی، سلماس، ایران،
amir.siahcheshm@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۵ آذر ۱۴۰۲

تاریخ بازنگری: ۱ دی ۱۴۰۲

تاریخ پذیرش: ۳۰ دی ۱۴۰۲

<https://doi.org/10.30495/jce.2024.2002047.1239>

۱-مقدمه

امروزه آنتن‌های دارای قطبش دایروی^۱ طیف وسیعی از کاربردهای ماهواره‌ای را در محدوده فرکانسی باند L دارا می‌باشند [۱-۳]. در سال‌های اخیر، طرح‌های متنوعی از آنتن‌های با قطبش دایروی باند L معرفی و بررسی شده‌اند بطوری که در آنها از تکنیک‌های مختلفی استفاده شده و هر کدام دارای کاربردهای متعددی هستند [۴-۸]. در مرجع [۴]، یک آنتن با قطبش دایروی

¹ Circular Polarization (CP)

دوگانه (دایروی راستگرد و چپگرد) که بر اساس دوقطبی‌های متعامد طراحی شده است، برای کاربردهای ماهواره‌ای باند L (۱-۶ گیگاهرتز) پیشنهاد شده است. در منبع [۵] نیز یک آنتن پچ^۱ آرایه‌ای دارای قطبش دایروی معرفی شده است که در ۱/۲۱-۱/۴۰ گیگاهرتز برای کاربردهای راداری باند L کار می‌کند. در این طرح، آرایه شامل ۱۶ المان پچ مستطیلی است که یک آرایه ۴×۴ را تشکیل می‌دهد. اما طرح دیگری که در مرجع [۶] ارائه شده است شامل یک آنتن با قطبش دایروی است که از طریق خط انتقال با ساختاری ساده دارای چیدمان تشعشی راستگرد/چپگرد برای کاربردهای ماهواره‌ای قابل حمل در باند L (۱/۶۲۹-۱/۶۴۱ گیگاهرتز) استفاده می‌شود. همچنین یک آنتن قطبش دایروی جدید در باند L برای استفاده در کاربردهای راداری با سطح مقطع راداری^۲ پایین در منبع [۷] ارائه شده است که از ساختارهای میکرواستریپ^۳ استفاده کرده و دارای پهنای باند امیدانسی^۴ ۱/۹۷-۲/۰۶ گیگاهرتز است. علاوه بر این، یک آنتن قطبش دایروی با قابلیت تنظیم مجدد فرکانس در مرجع [۸] پیشنهاد شده است به طوری که می‌تواند در سیستم‌های ناوبری و دریافت لینک ماهواره‌ای به ترتیب در باند فرکانسی (۱۵۷۰-۱۶۵۰ مگاهرتز) و (۲۰۵۰-۲۲۲۵ مگاهرتز، ۲۶۳۰-۲۷۳۰ مگاهرتز) با کنترل و تنظیم بایاس جریان مستقیم^۵ دیودها استفاده شود. از آنجایی که سیگنال آنتن در کاربردهای ماهواره‌ای از لایه یونیسفر عبور می‌کند و هم‌زمان به دلیل تأثیر پدیده چرخش فارادی بر امواج رادیویی در قطبش خطی^۶، ویژگی قطبش دایروی آنتن به گزینه‌ای محبوب در سیستم‌های ارتباطی بی‌سیم به ویژه برای لینک‌های رادیویی بین ایستگاه‌های زمینی و ماهواره‌ها تبدیل شده است [۹]. علاوه بر این، آنتن‌های با قطبش دایروی در مقایسه با آنتن‌های دارای قطبش خطی مزایای زیادی دارند، مانند قابلیت غلبه بر مشکل محو شونده‌گی چند مسیری که منجر به افزایش کیفیت لینک رادیویی می‌شود و همچنین تحمل شرایط نامساعد جوی در کاربردهای ماهواره‌ای با استفاده از قطبش دایروی ممکن خواهد بود [۱۰، ۱۱]. تکنیک‌ها و ساختارهای مختلفی برای آنتن‌های قطبش دایروی طراحی و گزارش شده است، از جمله آنتن قطبش دایروی شکافدار مربعی با پچ حلقوی^۷ [۱۲]، آنتن شکافی دارای قطبش دایروی متشکل از دو اسلات بیضی^۸ [۱۳]، آنتن قطبش دایروی آرایه‌ای با شبکه تغذیه دارای تزویج کننده‌های جهت‌دار [۱۴] و آنتن قطبش دایروی با قابلیت تنظیم مجدد پرتو که توسط تغییر حالت شبکه تغذیه انجام می‌گیرد [۱۵]. یک تکنیک متفاوت برای تولید عملیات قطبش دایروی استفاده از دو عدد دوقطبی متعامد با بکارگیری رویکرد تغذیه دوگانه است [۱۶]. عموماً در این روش برای تولید دو سیگنال تغذیه مربعی، از تزویج کننده‌های شاخه‌ای استفاده شده و بدین ترتیب دو سیگنال خروجی دارای فازهای متعامد می‌شوند [۱۷].

در حال حاضر، آنتن‌های دوقطبی قطبش دایروی در سیستم‌های ناوبری بی‌سیم مانند سیستم موقعیت‌یاب جهانی بسیار مورد توجه هستند [۱۸-۲۱]. عملاً سیستم موقعیت‌یاب جهانی یک سامانه ناوبری است که از چندین ماهواره تشکیل شده که در مدار متوسط زمین^۹ قرار دارند و موقعیت جغرافیایی یک کاربر را با سیگنال‌های میکروویو فراهم می‌کنند [۲۲]. سه باند فرکانسی عملیاتی محبوب برای سیستم موقعیت‌یاب جهانی به نام‌های L1 (۱/۵۷۵ گیگاهرتز)، L2 (۱/۲۲۷ گیگاهرتز) و L5 (۱/۱۷۶ گیگاهرتز) تعریف شده‌اند. در مرجع [۲۳] برای گیرنده‌های سیستم موقعیت‌یاب جهانی باند L1 یک آنتن قطبش دایروی از نوع دوقطبی که شامل دو عدد دوقطبی متعامد، دو بالن یکپارچه و یک تزویج کننده هیبریدی ۹۰ درجه می‌باشد، ارائه شده است. تزویج کننده با استفاده از خروجی‌های مربعی، دوقطبی‌ها را تحریک نموده و عملیات قطبش دایروی را در این طرح پیاده می‌کند. به‌طور مشابه، یک آنتن GPS میکرواستریپ کوچک برای باند فرکانسی L1 در منبع [۲۴] پیشنهاد شده است، با این تفاوت که این آنتن دارای یک تغذیه منفرد بوده و عملکرد قطبش دایروی آن با تنظیم اندازه ساختار زمین ناقص فراکتالی^{۱۰} بدست می‌آید. علاوه بر این، همکاری باندهای مختلف فرکانسی در سیستم موقعیت‌یاب جهانی، باعث بهبود پایداری سرویس ناوبری، افزایش کیفیت موقعیت‌یابی و دقت بالای آن می‌گردد. در مرجع [۲۵] یک آنتن قطبش دایروی از نوع پچ انباشته برای گیرنده‌های

¹ Patch antenna

² Radar Cross Section (RCS)

³ Microstrip

⁴ Impedance Bandwidth (IBW)

⁵ Direct Current (DC)

⁶ Linear Polarization (LP)

⁷ Circular Polarization Square Slot Antenna (CPSSA)

⁸ Circular Polarization Elliptical Slot Antenna (CPESA)

⁹ Medium Earth Orbit (MEO)

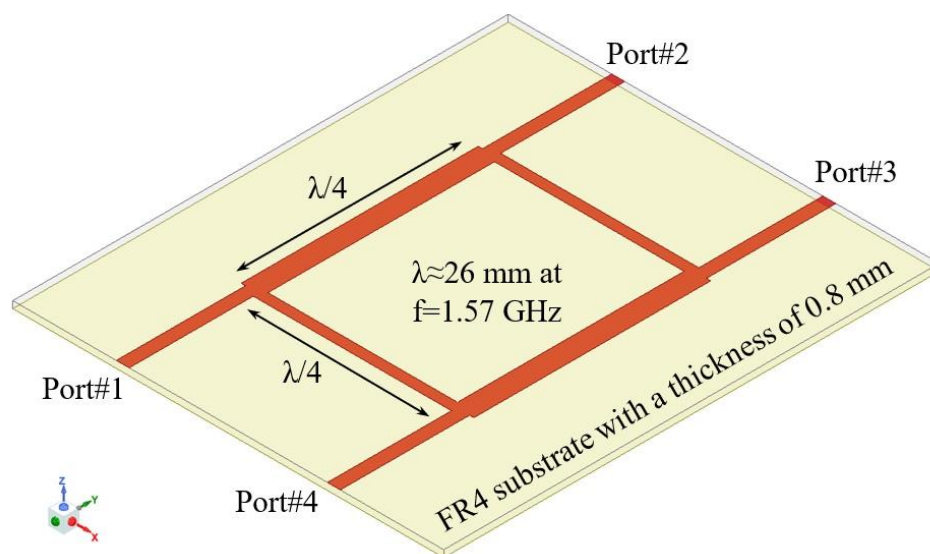
¹⁰ Fractal Defected Ground Structure (FDGS)

سیستم موقعیت‌یاب جهانی شامل باندهای فرکانسی L1، L2 و L5 بررسی شده است. این مقاله طراحی جدیدی از یک آنتن دوقطبی متعامد با قطبش دایروی را برای کاربردهای باند L (۹۱۳/۷-۱۵۱۳/۱ مگاهرتز) ارائه می‌کند. همچنین در سال‌های اخیر، مطالعات زیادی در خصوص سیستم‌های موقعیت‌یاب جهانی و طرز عملکرد آن‌ها و نیز بررسی روش‌های مبتنی بر بهینه‌سازی آن‌ها انجام گرفته است [۲۶-۲۸].

آنتن پیشنهادی در این مقاله با بکارگیری دوقطبی‌های متعامد به همراه یک تزویج‌کننده مربعی برای دستیابی به عملکرد قطبش دایروی توسعه یافته است. دوقطبی‌ها توسط دو عدد بالن متصل به یک تزویج‌کننده، تغذیه می‌شوند تا الگوی تشعشعی را پایدار نمایند. همچنین عملکرد قطبش دایروی آنتن با بکارگیری المان‌های پارازیتیک بهبود قابل توجهی در حدود ۳۷۹ مگاهرتز از خود به نمایش می‌گزارد. آنتن با قطبش دایروی پیشنهادی در این تحقیق دارای حداکثر بهره ۴۰/۶ دسی‌بل و ابعاد ۱۱۰×۱۱۳×۴۲/۲۵ میلی‌متر مکعب است. آنتن پیشنهادی را می‌توان در سیستم‌های موقعیت‌یاب جهانی باند L1 (۱۵۷۵ گیگاهرتز) و رادار هواشناسی در باند فرکانسی ۲/۱۲۶-۱/۳۲۷ گیگاهرتز استفاده کرد.

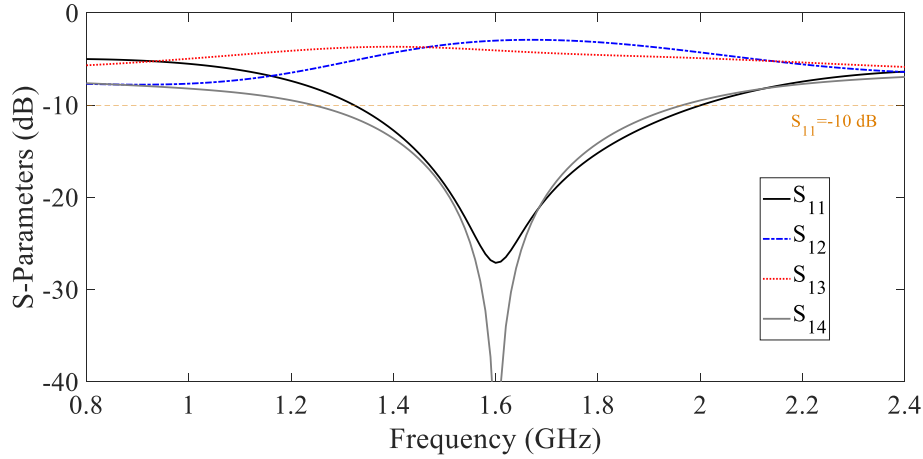
۲- آنتن دوقطبی متعامد با تغذیه تزویج‌گر شاخه‌ای

از اهداف اصلی این مطالعه، دستیابی به تطبیق امپدانس خوب و ویژگی‌های تشعشعی عالی در طراحی آنتن دوقطبی با قطبش دایروی می‌باشد. در این ساختار از دو عدد دوقطبی متعامد که توسط یک شبکه تغذیه تحریک می‌شوند، برای تولید تشعشع به صورت قطبش دایروی استفاده می‌شود. شبکه تغذیه دارای یک تزویج‌کننده ۳ دسی‌بل از نوع شاخه‌ای است که شامل دو خروجی با دامنه مساوی و اختلاف فاز ۹۰ درجه می‌باشد. شکل و ابعاد مرتبط با تزویج‌کننده در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید یک زیرلایه از جنس FR4 و ابعاد ۶۰×۶۰ میلی‌متر مربع و ضخامت ۰/۸ میلی‌متر در پیکربندی تزویج‌کننده استفاده شده است.

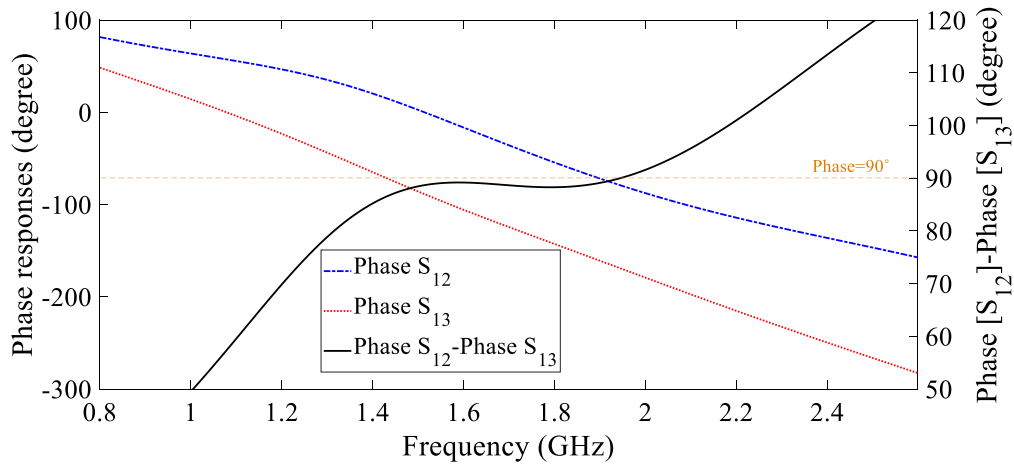


شکل ۱: پیکربندی تزویج‌کننده شاخه‌ای
Figure 1. Branch-line coupler configuration

نتایج شبیه‌سازی مربوط به تزویج‌کننده شاخه‌ای در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده‌اند، بطوری که این نمودارها دامنه افت انتقالی، افت بازگشتی و اختلاف فاز بین دو خروجی مربعی را به ترتیب ۳/۵۲- دسی‌بل، ۴۵- دسی‌بل و ۸۹/۰۶ درجه در فرکانس کاری سیستم موقعیت‌یاب جهانی نمایش می‌دهند.



شکل ۲: نتایج شبیه‌سازی شده پارامترهای پراکندگی مربوط به تزویج‌کننده شاخه‌ای
Figure 2. Simulated S-parameters of the branch-line coupler



شکل ۳: نتایج شبیه‌سازی شده پاسخ فاز مربوط به تزویج‌کننده شاخه‌ای
Figure 3. Simulated phase response of the branch-line coupler

همان‌طوری که در شکل ۱ قابل مشاهده است، ساختار تزویج‌کننده در بخش تحتانی صفحه زمین قرار گرفته است به طوری که خروجی‌های آن از طریق دو سوراخ بر روی صفحه زمین و دو هادی در درون سوراخ‌ها مستقیماً به بازوهای گاما^۱ شکل بال‌های یکپارچه لحیم‌کاری شده‌اند. هندسه آنتن دوقطبی متعامد پیشنهادی دارای تشعشع قطبش دایروی در شکل ۴ مشاهده می‌شود. آنتن از دو عدد دوقطبی و دو بال متصل به آن‌ها که به‌صورت متعامد نسبت به هم قرار گرفته‌اند، تشکیل می‌شود. همچنین زیرلایه اصلی آنتن شامل صفحه زمین و یک شبکه تغذیه در قسمت تحتانی آن می‌باشد. دوقطبی‌های متعامد در بخش تحتانی ۴ عدد زیرلایه قرار دارند. این زیرلایه‌ها در قسمت بالایی بال‌ها واقع شده و دوقطبی‌ها به آن‌ها لحیم می‌شوند. نهایتاً همه قسمت‌ها بر روی زیرلایه اصلی نصب می‌شوند. قطبش دایروی در تشعشع آنتن با چیدمان دوقطبی‌ها به‌صورت متعامد و همچنین تغذیه آن‌ها با دامنه یکسان و اختلاف فاز ۹۰ درجه فراهم می‌گردد. تمامی زیرلایه‌های استفاده شده از جنس FR4 با ضخامت ۰/۸ میلی‌متر و ثابت دی‌الکتریک نسبی ۴/۴ هستند. بریدگی‌های مستطیلی شکلی که دارای طول‌های مختلف و مناسبی هستند در بخش‌های تحتانی و فوقانی ساختار بال‌ها ایجاد شده‌اند تا به‌صورت متعامد در داخل یکدیگر قرار بگیرند. در نهایت یک صفحه زمین به ابعاد ۱۱۳×۱۱۰ میلی‌متر مربع در بخش تحتانی دوقطبی‌ها و در فاصله‌ای حدود ربع طول موج فرکانس مرکزی آنتن، به‌عنوان منعکس‌کننده قرار گرفته است. در واقع فاصله یک آنتن دوقطبی متعامد چاپی با تغذیه بال‌های یکپارچه از سطح زمین،

^۱Γ

یک پارامتر حیاتی است که می‌تواند بر عملکرد آنتن تأثیر فراوانی بگذارد. اغلب فواصل بهینه بر اساس اهداف طراحی‌ها و کاربردهای مورد نظر، تعیین می‌شوند. برخی ملاحظات برای انتخاب پارامتر فاصله وجود دارند که عبارت‌اند از:

(۱) بکارگیری مناسب بالن:

بالن یکپارچه با هدف تبدیل یک خط انتقال نامتعادل به متعادل و همچنین تطبیق امپدانس طراحی شده است. فاصله بین دوقطبی متعامد و صفحه زمین باید به گونه‌ای انتخاب شود که ساختار بالن و اتصال آن به بازوهای دوقطبی به صورت مناسبی انجام شده و تطبیق امپدانس مطلوب حاصل شود.

(۲) دستیابی به پترن تشعشی مناسب:

فاصله دوقطبی‌ها از سطح زمین می‌تواند بر روی پترن تشعشی آنتن تأثیر بگذارد. لذا در تعیین این فاصله، پترن تشعشی آنتن لحاظ گردیده و یک انتخاب ایده‌آل برای آن انجام می‌شود.

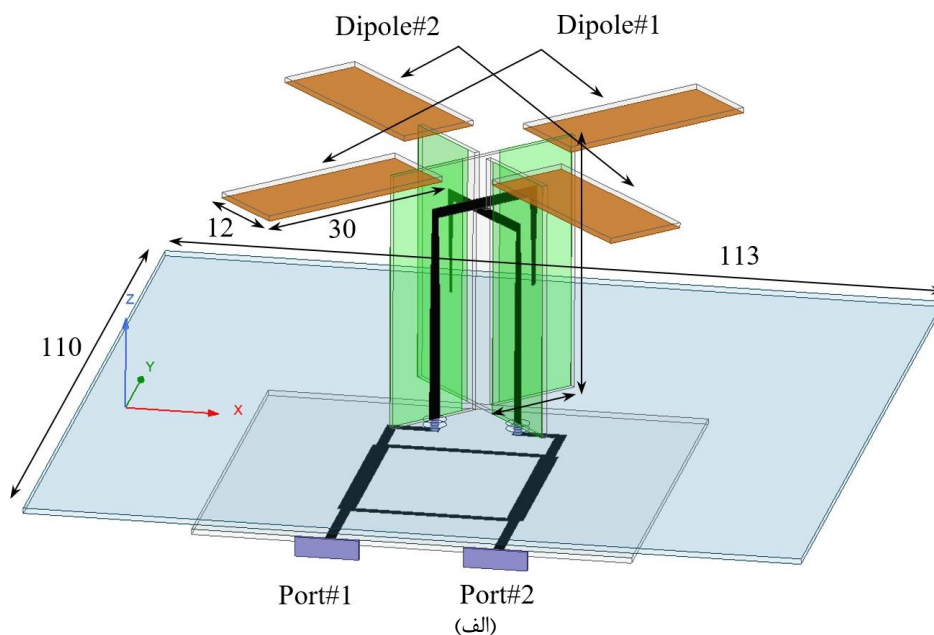
(۳) تطبیق امپدانس آنتن:

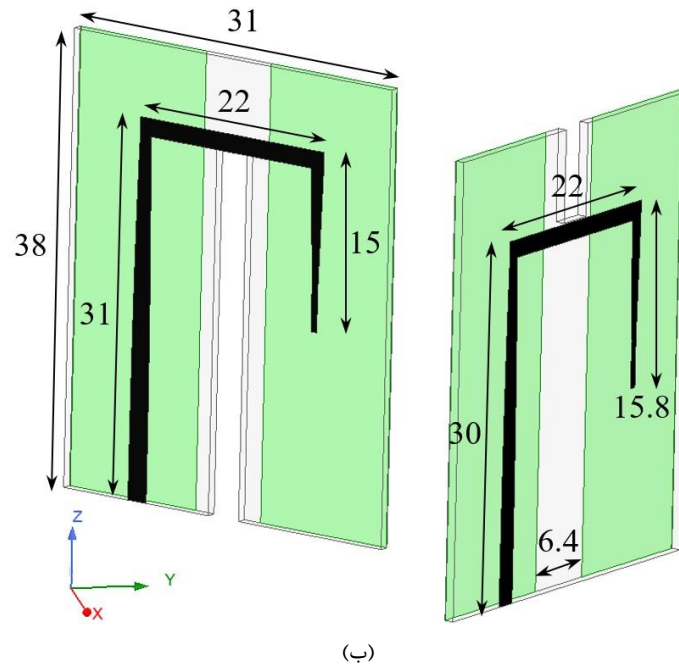
فاصله بین دوقطبی‌ها و صفحه زمین غالباً می‌تواند بر تطبیق امپدانس آنتن تأثیر بگذارد. لذا برخی از فواصل ممکن است منجر به تطبیق امپدانس بهتری شود که به طبع آن باعث بهبود عملکرد آنتن نیز خواهد شد. از سوی دیگر، اجزای آنتن ممکن است تحت تأثیر نزدیکی به صفحه زمین قرار بگیرند و جهت دستیابی به تطبیق امپدانس مورد نظر، تنظیماتی روی آن‌ها لازم‌الاجرا شود.

(۴) کنترل پترن تشعشی آنتن:

فاصله از سطح زمین می‌تواند برای کنترل پترن تشعشی آنتن دوقطبی متعامد استفاده شود. برای مثال، افزایش فاصله ممکن است به کاهش اثرات زمین و تغییر شکل پترن در زاویه ارتفاع تأثیرگذار باشد.

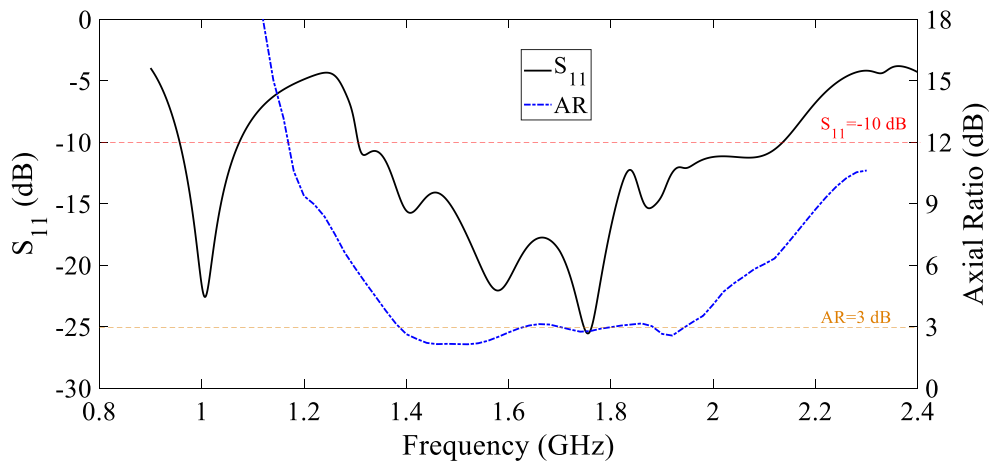
همان‌طور که توضیح داده شد، توجه به این نکته ضروری است که فاصله بهینه ممکن است برای طرح‌ها و کاربردهای مختلف، متفاوت باشد. بنابراین، ترکیبی از شبیه‌سازی، آزمایش و طراحی ممکن است برای تنظیم دقیق فاصله آنتن دوقطبی متعامد چایی با تغذیه بالن یکپارچه از سطح زمین ضروری باشد. اما آنچه که بیشتر از همه مد نظر می‌باشد و در این نوع از طراحی آنتن‌ها استفاده می‌شود، انتخاب فاصله در حدود ربع طول موج می‌باشد. لذا در طراحی ارائه شده برای این مقاله نیز، انتخاب اولیه برای فاصله بین دوقطبی‌ها و صفحه زمین در حدود ربع طول موج در فرکانس مرکزی آنتن می‌باشد (حدوداً ۳۲ میلی‌متر). با انتخاب اولیه فاصله و انجام شبیه‌سازی‌های متعدد و تحلیل‌های پارامتریک و همچنین بررسی تأثیر فواصل مختلف بر روی عملکرد بهینه آنتن، در نهایت این فاصله برابر با ۳۸ میلی‌متر انتخاب گردید.





شکل ۴: (الف) پیکربندی آنتن دوقطبی متعامد پیشنهادی (ب) ساختار بالن‌ها
Figure 4. (a) Configuration of the proposed crossed-dipole, and (b) configuration of the baluns

نتایج شبیه‌سازی آنتن با بکارگیری نرم افزار HFSS Ver. 15 و بر اساس روش اجزای محدود انجام گرفته است. در شکل ۵، افت بازگشتی و نسبت محوری شبیه‌سازی شده آنتن دوقطبی متعامد پیشنهادی نمایش داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که آنتن باند فرکانسی ۱/۳۰۴-۲/۱۳۵ گیگاهرتز را با معیار افت بازگشتی کوچکتر از -۱۰ دسی‌بل ($S_{11} \leq -10$ dB) به راحتی پوشش می‌دهد. علاوه بر این، پهنای باند نسبت محوری شبیه‌سازی شده آنتن در این شکل قابل مشاهده است. در واقع، پهنای باند نسبت محوری شبیه‌سازی شده تقریباً به اندازه ۳۱۴ مگاهرتز از فرکانس ۱/۳۸۴ گیگاهرتز تا ۱/۶۹۸ گیگاهرتز را پوشش می‌دهد. با توجه به نتایج، آنتن پیشنهادی باند L1 سیستم موقعیت‌یاب جهانی را به‌طور کامل با قطبش دایروی پوشش می‌دهد.



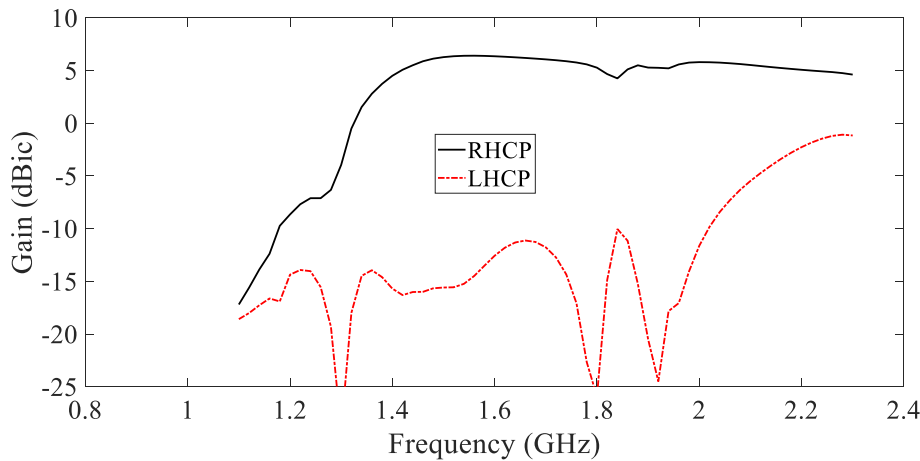
شکل ۵: افت بازگشتی و نسبت محوری آنتن دوقطبی متعامد پیشنهادی
Figure 5. Simulated return loss and AR of the proposed crossed-dipole antenna

در شکل ۶ نتایج مربوط به بهره‌های با قطبش دایروی راستگرد^۲ و قطبش دایروی چپگرد^۳ آنتن دوقطبی متعامد پیشنهادی نمایش داده شده‌اند. با توجه به این منحنی، پیک بهره آنتن ۶/۴۱ دسی‌بل در فرکانس ۱/۵۵۵ گیگاهرتز است.

¹ High-Frequency Structure Simulator

² Right-Hand Circular Polarization (RHCP)

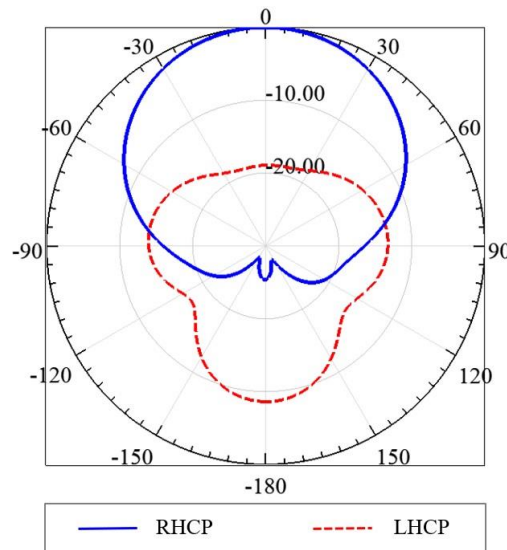
³ Left-Hand Circular Polarization (LHCP)



شکل ۶: بهره‌های با قطبش دایروی راستگرد و چپگرد شبیه‌سازی شده آنتن دوقطبی متعامد پیشنهادی

Figure 6. Simulated RHCP and LHCP gains of the proposed crossed-dipole antenna

علاوه بر این، در شکل ۷ الگوهای شبیه‌سازی شده نرمالیزه شده مربوط به قطبش دایروی راستگرد و چپگرد آنتن دوقطبی متعامد پیشنهادی نشان داده شده‌اند. با توجه به الگوها، آنتن دوقطبی متعامد پیشنهادی دارای تشعشع قطبش دایروی راستگرد بوده و نتایج الگوی پایداری از آنتن را نمایش می‌دهند. همچنین، در فرکانس مرکزی باند L1 سیستم‌های موقعیت‌یاب جهانی اختلاف بیش از ۱۹ دسی‌بل بین الگوهای تشعشعی راستگرد (تشعشع اصلی) و چپگرد (تشعشع متعامد) مشاهده می‌شود.



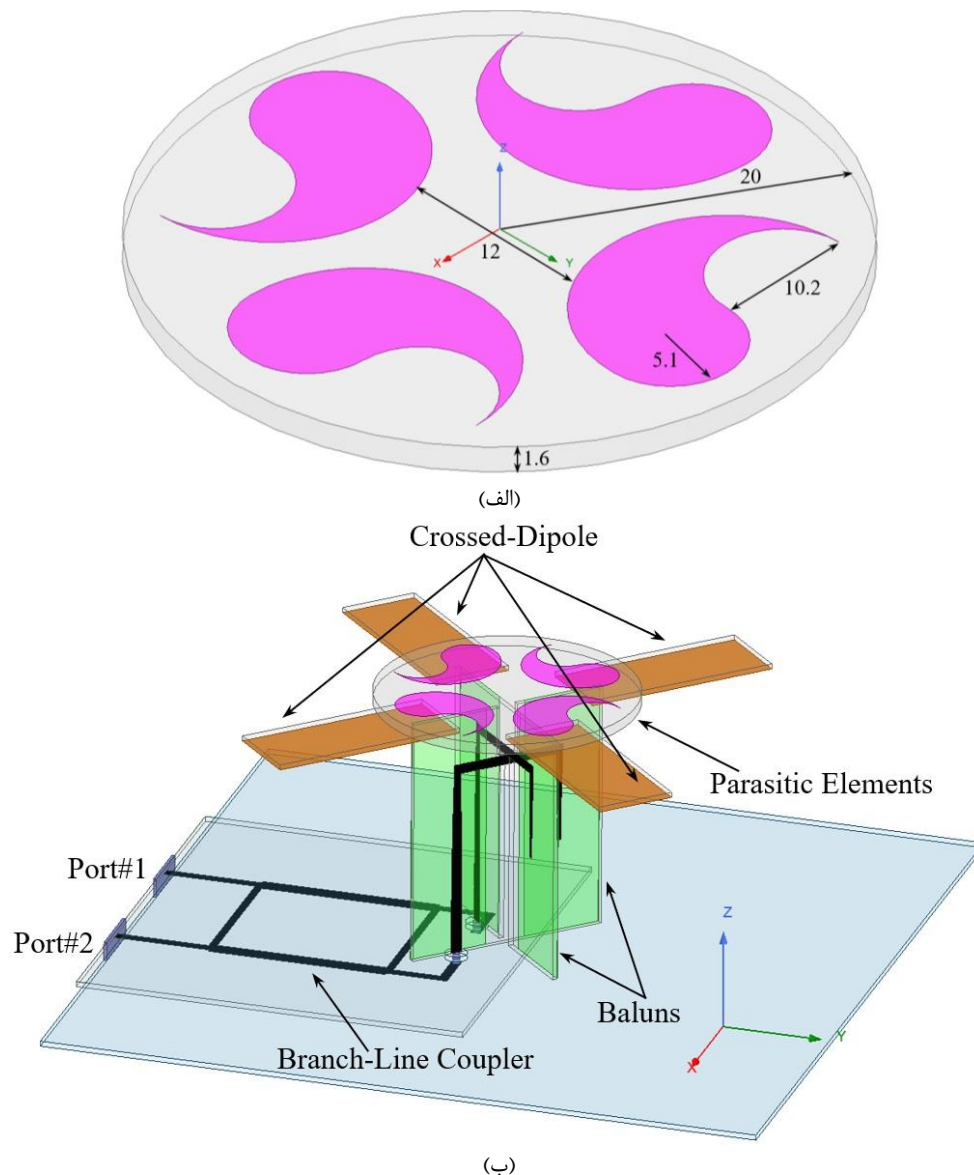
شکل ۷: الگوهای نرمالیزه شبیه‌سازی شده مربوط به قطبش دایروی راستگرد و چپگرد آنتن دوقطبی متعامد پیشنهادی در فرکانس ۱/۵۷۵ گیگاهرتز

Figure 7. Simulated normalized RHCP and LHCP radiation patterns of the proposed crossed-dipole antenna at 1.575 GHz frequency

۳- آنتن دوقطبی متعامد با استفاده از المان‌های پارازیتیک

نتایج آنتن دوقطبی متعامد در بخش قبل نشان می‌دهند که ساختار آنتن نیاز به بهینه‌سازی دارد. با اینکه در مرحله قبل، فرایند تولید قطبش دایروی با موفقیت انجام شد، ولی منحنی مربوط به نسبت محوری آنتن بسیار نزدیک به خط ۳- دسی‌بل بوده و ساختار آنتن با توجه به نتایج، این پتانسیل را از خود نشان می‌دهد که نتایج رضایت بخش‌تری به نمایش بگذارد. لذا جهت بهبود قطبش دایروی آنتن، از چهار عدد المان پارازیتیک ترنج شکل در بالای بازوهای دوقطبی استفاده شده است. در حقیقت، با ساختار ارائه شده، جریان‌هایی در المان‌های پارازیتیک توسط بازوهای دوقطبی، القا می‌شود. با توجه به ساختار دایروی المان‌های پارازیتیک، جریان‌های القا شده در المان‌های پارازیتیک ترنج شکل، به صورت چرخشی عمل کرده و این موضوع باعث بهبود عملکرد قطبش دایروی آنتن می‌گردد. باید توجه کرد که برای دستیابی به بهترین عملکرد قطبش دایروی، ابعاد المان‌های پارازیتیک توسط یک سری تحلیل‌های پارامتریک تنظیم می‌شوند. اشکال ترنج شکل به سادگی توسط یک دایره با شعاع $10/2$

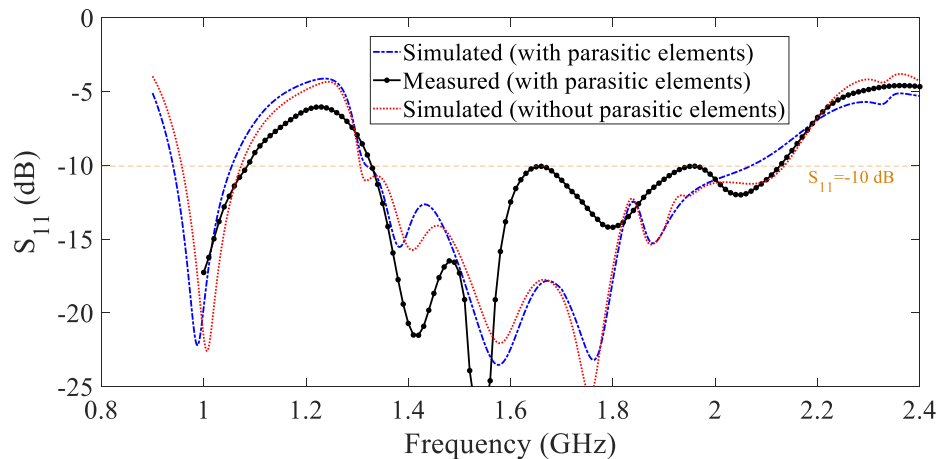
میلی‌متر و دو دایره با شعاع ۵/۱ میلی‌متر ایجاد می‌شوند. در شکل ۸ ساختار المان‌های پارازیتیک و پیکربندی آنتن دوقطبی متعامد به همراه المان‌های پارازیتیک نمایش داده شده است. زیرلایه مورد استفاده در ساختار المان‌های پارازیتیک از نوع FR4 با ضخامت ۱/۶ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۸: (الف) ساختار المان‌های پارازیتیک (ب) پیکربندی آنتن دوقطبی متعامد پیشنهادی با المان پارازیتیک

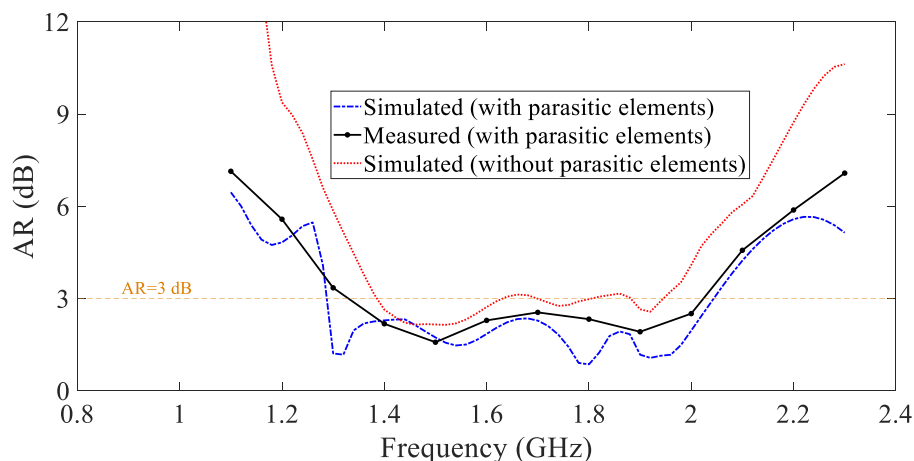
Figure 8. (a) Configuration of the parasitic elements, and (b) configuration of the proposed crossed-dipole antenna with parasitic elements

در شکل‌های ۹ تا ۱۱ نتایج آنتن دوقطبی متعامد پیشنهادی با المان‌های پارازیتیک نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۹، آنتن پیشنهادی با المان‌های پارازیتیک دارای پهنای باند امیدانسی شبیه‌سازی شده ۴۴/۴۹٪ (۱/۳۱۶-۲/۰۶۹ گیگاهرتز) است که تقریباً با پهنای باند امیدانسی آنتن بدون المان‌های پارازیتیک همخوانی دارد. این بدان معنی است که حضور المان‌های پارازیتیک بر روی پهنای باند امیدانسی آنتن تأثیر چشمگیری نمی‌گذارد. برای اثبات عملکرد آنتن، یک نمونه‌ی اولیه از آنتن دوقطبی متعامد پیشنهادی با المان‌های پارازیتیک، پیاده‌سازی و آزمایش شده است. در این تحقیق یک تحلیلگر شبکه Agilent (E8363C) برای استخراج نتایج اندازه‌گیری استفاده شده است. همچنین شکل ۹ مقایسه بین پهنای باند امیدانسی شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده آنتن پیشنهادی با المان‌های پارازیتیک را نمایش می‌دهد.



شکل ۹: افت بازگشتی شبیه‌سازی شده و تست شده آنتن دوقطبی متعامد پیشنهادی با/بدون المان‌های پارازیتیک
Figure 9. Simulated and measured return loss for the proposed crossed-dipole antenna with/without parasitic elements

با توجه به نتایج آزمایشگاهی، پهنای باند امپدانسی آنتن ۷۹۹ مگاهرتز اندازه‌گیری شده است که از فرکانس ۱/۳۲۷ گیگاهرتز تا ۲/۱۲۶ گیگاهرتز را با معیار افت بازگشتی کوچک‌تر از -10 دسی‌بل شامل می‌شود. همچنین در شکل ۱۰ مقایسه بین پهنای باند قطبش دایروی شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده آنتن پیشنهادی با المان‌های پارازیتیک را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج آزمایشگاهی، پهنای باند قطبش دایروی آنتن ۶۹۳ مگاهرتز اندازه‌گیری شده است که از فرکانس ۱/۳۲۹ گیگاهرتز تا ۲/۰۲۲ گیگاهرتز را با معیار نسبت محوری کوچکتر از ۳ دسی‌بل شامل می‌شود. این در حالی است که پهنای باند قطبش دایروی آنتن بدون المان‌های پارازیتیک ۳۱۴ مگاهرتز بود و با افزودن المان‌های پارازیتیک، افزایشی در حدود ۲۱٪ در پهنای باند قطبش دایروی آنتن مشاهده می‌گردد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که خلوص قطبش دایروی آنتن با افزودن المان‌های پارازیتیک بصورت قابل توجهی افزایش یافته است.

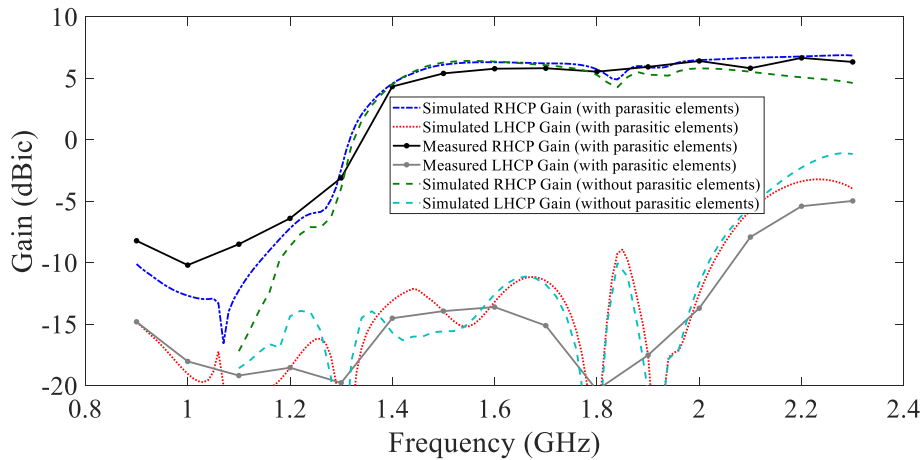


شکل ۱۰: پهنای باند قطبش دایروی شبیه‌سازی شده و تست شده آنتن دوقطبی متعامد پیشنهادی با/بدون المان‌های پارازیتیک
Figure 10. Simulated and measured AR bandwidth for the proposed crossed-dipole antenna with/without parasitic elements

در شکل ۱۱، بهره شبیه‌سازی شده مربوط به قطبش دایروی راستگرد و چپگرد آنتن دوقطبی متعامد پیشنهادی در دو حالت با و بدون المان‌های پارازیتیک و همچنین بهره اندازه‌گیری شده این آنتن در جهت حداکثر تشعشع (زاویه‌های سمتی و ارتفاعی مساوی صفر^۱) نمایش داده شده است. با توجه به نتایج آزمایشگاهی، بیشینه بهره قطبش دایروی راستگرد آنتن دوقطبی پیشنهادی با المان‌های پارازیتیک ۶/۴۰ دسی‌بل در فرکانس ۲ گیگاهرتز گزارش شده است. این مقدار بهره برای آنتن گیرنده

^۱ $\phi=0^\circ$ & $\theta=0^\circ$

سیستم موقعیت‌یاب جهانی بسیار مناسب و قابل قبول است و به ویژه در شرایط بد آب و هوایی می‌تواند سیگنال مورد نیاز سیستم برای موقعیت‌یابی را فراهم نماید.



شکل ۱۱: بهره‌های قطبش دایروی راستگرد و چپگرد شبیه‌سازی شده و تست شده آنتن دوقطبی متعامد پیشنهادی با/بدون المان‌های پارازیتیک

Figure 11. Simulated and measured RHCP and LHCP gains of the proposed crossed-dipole antenna with/without parasitic elements

همچنین الگوهای تشعشی نرمالیزه شده مربوط به قطبش دایروی راستگرد و چپگرد شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در فرکانس ۱/۵۷۵ گیگاهرتز در شکل ۱۲ (الف) ارائه شده است که نشان می‌دهد آنتن دوقطبی پیشنهادی به همراه المان‌های پارازیتیک، دارای تشعشع قطبش دایروی راستگرد یک طرفه در باند فرکانسی کاری سیستم موقعیت‌یاب جهانی است. همچنین اختلاف بین بیشینه مقدار دامنه الگوی تشعشی راستگرد و چپگرد آنتن در جهت حداکثر تشعشع (زاویه‌های سمتی و ارتفاعی مساوی صفر) برابر با ۱۴/۷۱ دسی‌بل گزارش شده است. هر گونه اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده ممکن است به خطاهای تجربی در فرآیند ساخت و اندازه‌گیری آنتن مربوط شود. همچنین الگوهای تشعشی E-plane و H-plane آنتن پیشنهادی در فرکانس ۱/۵۷۵ گیگاهرتز در شکل ۱۲ (ب) نمایش داده شده‌اند. با توجه به شکل، مشاهده می‌گردد که الگوهای Co و Cross آنتن در این فرکانس به دلیل وجود قطبش دایروی بر روی هم منطبق شده‌اند.

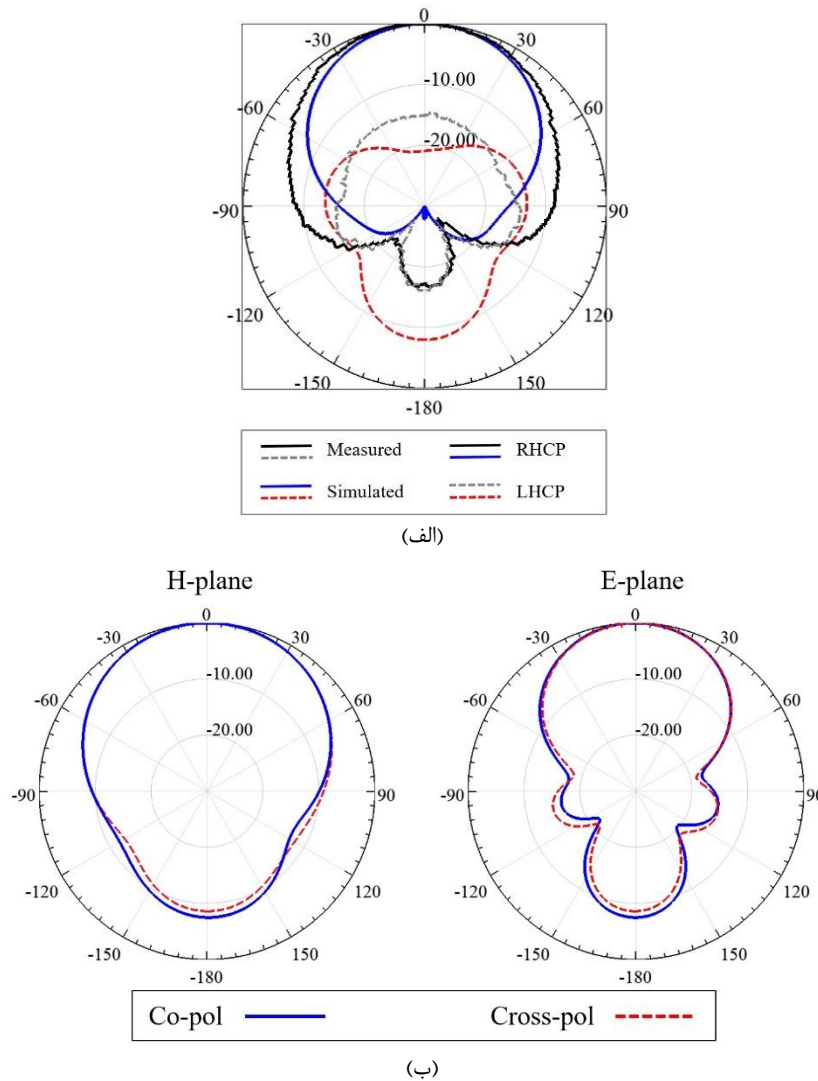
المان‌های پارازیتیک، عناصر مضاعفی هستند که به ساختار آنتن الحاق می‌شوند تا ویژگی‌های تشعشی آن را اصلاح کرده و عملکردش را از نظر بهره، الگوی تشعشی و قطبش بهبود بخشند. هنگامی که المان‌های پارازیتیک برای بهبود قطبش دایروی به یک آنتن دوقطبی متعامد با تغذیه مربعی اضافه می‌شوند، نقش مهمی در شکل دادن به الگوی تشعشی و دستیابی به ویژگی‌های قطبش مطلوب، ایفا می‌کنند. موارد ذیل را می‌توان جهت تشریح عملکرد المان‌های پارازیتیک بر روی دوقطبی‌ها لحاظ نمود:

(۱) بهبود قطبش دایروی:

افزودن المان‌های پارازیتیک، ویژگی‌های مطلوب مرتبط با قطبش دایروی آنتن را افزایش می‌دهد. در واقع قطبش دایروی از ایجاد اختلاف فاز ۹۰ درجه بین دو جزء متعامد (افقی و عمودی) موج الکترومغناطیسی به دست می‌آید. به این ترتیب المان‌های پارازیتیک به دستیابی و حفظ این اختلاف فاز کمک شایانی می‌نمایند.

(۲) تعامل با عناصر آنتن:

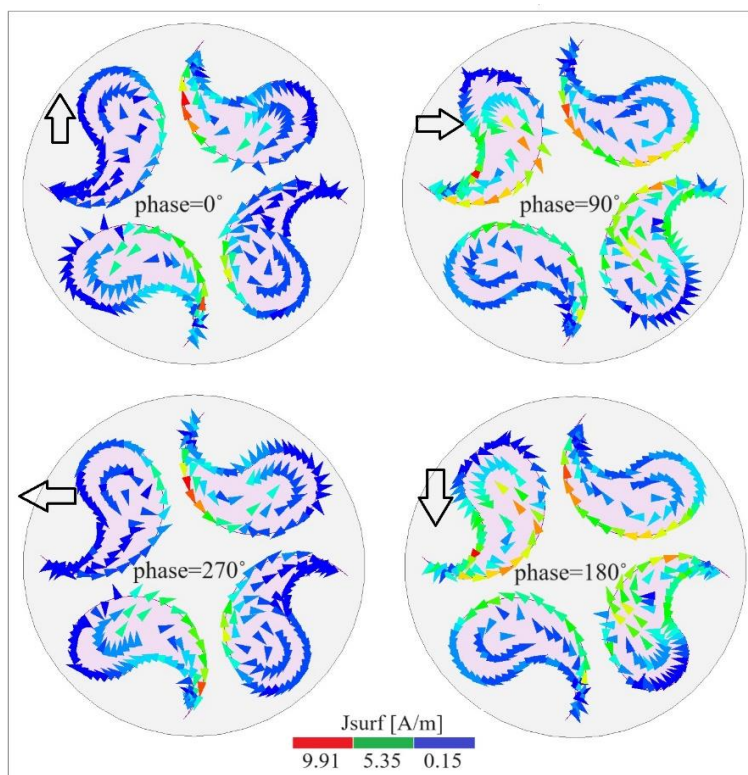
المان‌های پارازیتیک با دوقطبی‌های متعامد برهمکنش کرده و باعث می‌شوند جریان‌ها و ولتاژهای روی دوقطبی‌ها تغییر نمایند. این تعامل در جهت دستیابی به قطبش دایروی مطلوب و الگوی تشعشی مناسب کمک می‌کند.



شکل ۱۲: الگوهای تشعشعی نرمالیزه شده، (الف) قطبش دایروی راستگرد و چپگرد و (ب) H-plane و E-plane آنتن پیشنهادی در فرکانس ۱/۵۷۵ گیگاهرتز

Figure 12. (a) the RHCP and LHCP, and (b) E-plane and H-plane normalized radiation patterns of the proposed antenna at 1.575 GHz frequency

در طراحی ارائه شده از چهار عدد المان پارازیتیک ترنج شکل در بالای دوقطبی‌های متعامد استفاده شده است. همان‌طور که در توزیع جریان‌های سطحی بر روی المان‌های پارازیتیک در شکل ۱۳ نشان داده شده است، پیکربندی ویژه و منحصر به فردی که المان‌های ترنج شکل دارند، باعث چرخش مناسب جریان بر روی این المان‌ها شده است. چرخش جریان‌های سطحی روی این المان‌ها و چیدمان مناسب آن‌ها به صورت دایروی در بخش فوقانی دوقطبی‌های متعامد، قطبش دایروی آنتن را بهبود داده و خلوص قطبش را نیز افزایش می‌دهد. ساختار المان‌های ترنج شکل طوری هستند که از یک بخش پهن و یک بخش باریک تشکیل می‌شوند. این موضوع باعث جهت‌گیری بهینه جریان‌های سطحی بر روی این المان‌ها شده و باعث ایجاد چرخش مورد نظر برای جریان‌های سطحی می‌گردد. به این ترتیب دو عامل جداگانه در ایجاد و تقویت قطبش دایروی آنتن تشکیل می‌شود. عامل اول و اصلی، استفاده از دوقطبی‌های متعامد دارای تغذیه مربعی که اساس ایجاد قطبش دایروی در این طراحی به حساب می‌آید. عامل دوم، چرخش جریان‌های سطحی بر روی المان‌های پارازیتیک در بالای دوقطبی‌های متعامد می‌باشد. با این توضیحات، عامل دوم بیشتر وظیفه تقویت و افزایش خلوص قطبش دایروی آنتن را بر عهده داشته و نتیجه آن به صورت افزایش پهنای باند قطبش دایروی آنتن نمایان می‌گردد.

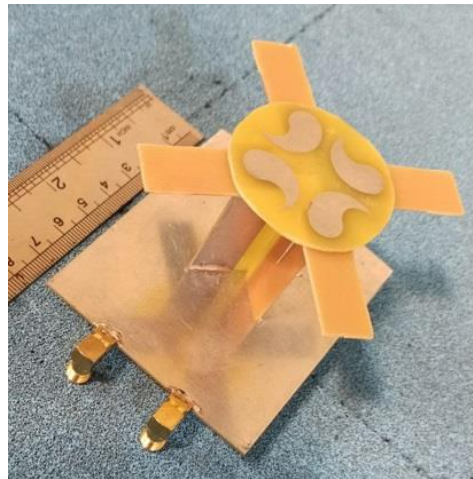


شکل ۱۳: توزیع جریان‌های سطحی بر روی المان‌های پارازیتیک در فرکانس ۱/۵۷۵ گیگاهرتز و در فازهای مختلف
 Figure 13. Distribution of surface currents on parasitic elements at a frequency of 1.575 GHz and in different phases

۴- پیاده‌سازی و اندازه‌گیری آنتن در آزمایشگاه

آنتن دوقطبی متعامد با المان‌های پارازیتیک پیشنهادی پس از طی مراحل بهینه‌سازی و استخراج پارامترهای فیزیکی نهایی، ساخته شد و در آزمایشگاه آنتن و میکروویو دانشگاه ارومیه تحت تست و اندازه‌گیری قرار گرفت. سه تصویر در شکل ۱۴ نمایش داده شده‌اند که اولی مربوط به ساختار نهایی نمونه اولیه از آنتن مونتاژ شده پیشنهادی می‌باشد. برای مونتاژ و اتصال قسمت‌های مختلف این آنتن، زیرلایه‌های بالن‌ها که به صورت عمودی کنار هم قرار دارند، عمود بر سطح زمین قرار گرفته و زیرلایه‌های بالایی حاوی بازوهای دوقطبی به آن‌ها لحیم شده‌اند. همچنین یک زیرلایه شامل المان‌های پارازیتیک نیز در بالای دوقطبی‌ها قرار دارد. دو عدد کانکتور از نوع SMA به دو پورت تزویجگر شاخه‌ای لحیم‌کاری می‌شوند تا کابل کوکسیال به پورت یک و ۵۰ اهمی به پورت دوم اتصال یابند. در تصاویر دوم و سوم شکل ۱۴، به ترتیب فرایند تست پهنای باند امپدانس آنتن توسط دستگاه تحلیل گر شبکه و فرایند اندازه‌گیری پارامترهای تشعشی آنتن در اتاق ضد انعکاس آزمایشگاه آنتن نشان داده شده است.

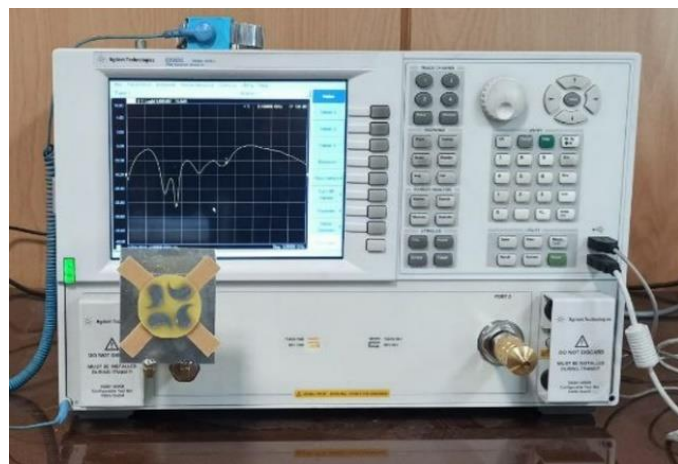
به عنوان آخرین بخش از مقاله، نتایج به دست آمده از طراحی ارائه شده در این مقاله با کارهای مشابه که در سال‌های اخیر معرفی شده‌اند [۱۸]، [۲۳]، [۲۴] و [۲۹] مورد مقایسه قرار گرفت. به همین منظور در جدول ۱، خلاصه‌ای از عملکرد آنتن‌های مشابه با عملکرد آنتن پیشنهادی مقایسه و بررسی شده است. نتایج حاکی از آن هستند که آنتن پیشنهادی در این مقاله، با در نظر گرفتن ویژگی‌های مرتبط با ابعاد، پهنای باند امپدانس و قطبش دایروی، بیشترین بهره را ارائه می‌دهد.



(الف)



(ج)



(ب)

شکل ۱۴: (الف) عکس آنتن ساخته شده، (ب) آنتن متصل به تحلیل‌گر شبکه و (ج) آنتن در اتاق ضد انعکاس
Figure 13. (a) Photograph of the fabricated antenna, (b) antenna connected to the VNA and (c) antenna in the anechoic chamber

جدول ۱: مقایسه آنتن پیشنهادی با آنتن‌های مشابه

Table 1. Comparison of the proposed antenna with similar antennas

نوع آنتن	پهنای باند امیدانسی [مگا هرتز]	پهنای باند قطبش دایروی [مگا هرتز]	بیشینه بهره [دسی بل]	ابعاد [میلی متر مکعب]	مرجع
آنتن دو قطبی متقاطع با شبکه تغذیه نابرابر	۲۰۱۰-۱۰۱۰	۱۹۷۰-۱۲۱۰	۶	۱۴۰×۱۴۰×۵۰	[۱۸]
آنتن دوقطبی متقاطع با کوپلر شاخه ای	۲۲۱۰-۱۲۶۰	۱۹۳۸-۱۳۰۷	۵/۷۲	۱۱۳×۱۱۳×۴۰	[۲۳]
آنتن میکرواستریپ با ساختار فراکتالی در زمین	۱۵۸۸-۱۵۵۸	۱۵۷۸-۱۵۷۲	۲/۲	۴۵×۴۵×۳/۱۸	[۲۴]
آنتن دوقطبی متقاطع با صفحه زمین جعبه‌ای شکل	۱۴۹۵-۹۰۷	۱۴۳۹-۱۰۷۸	۳/۱	۱۴۰×۱۴۰×۳۸/۸	[۲۹]
آنتن دوقطبی متعامد با المان‌های پارازیتیک ترنج شکل	۲۱۳۵-۱۳۰۴	۱۶۹۸-۱۳۸۴	۶/۴	۱۱۰×۱۱۳×۴۲/۲۵	این مقاله

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، شبیه‌سازی و ساخت یک آنتن دوقطبی چاپی متعامد دارای تغذیه از نوع تزویجگر شاخه‌ای برای گیرنده‌های سیستم موقعیت‌یاب جهانی در باند فرکانسی L1 (۱۵۷۵ مگاهرتز) ارائه شده است. با قرار دادن دوقطبی‌ها به صورت متعامد و استفاده از تکنیک تغذیه مربعی و همچنین بکارگیری یک صفحه زمین به عنوان بازتابنده، آنتن پیشنهادی به تشعشع قطبش دایروی راستگرد یک طرفه در باند فرکانس کاری دست یافته است. طبق نتایج، آنتن دوقطبی چاپی متعامد پیشنهادی دارای پهنای باند امپدانس $1/304-2/135$ گیگاهرتز با معیار افت بازگشتی کوچک‌تر از -10 دسی‌بل و پهنای باند نسبت محوری به بزرگی 314 مگاهرتز ($1/698-1/384$ گیگاهرتز) با معیار نسبت محوری کوچک‌تر از 3 دسی‌بل است. منحنی قطبش دایروی آنتن بسیار نزدیک به خط 3 دسی‌بل بوده و خلوص پایینی دارد که این مشکل با اضافه کردن چهار عدد المان پارازیتیک ترنج شکل به قسمت فوقانی دوقطبی‌ها حل می‌شود. با توجه به نتایج آزمایشگاهی، استفاده از المان‌های پارازیتیک در بالای دوقطبی‌های متعامد، پهنای باند قطبش دایروی 693 مگاهرتز از فرکانس $1/329$ گیگاهرتز تا $2/022$ گیگاهرتز را با معیار نسبت محوری کوچک‌تر از 3 دسی‌بل برای آنتن نتیجه می‌دهد. یعنی با افزودن المان‌های پارازیتیک، افزایشی در حدود 21% در پهنای باند قطبش دایروی آنتن مشاهده می‌شود. الگوی آنتن پیشنهادی پایدار بوده و این آنتن با بیشینه بهره‌ای معادل $6/40$ دسی‌بل برای کاربردهای موقعیت‌یابی جهانی در باند فرکانسی $1/575$ گیگاهرتز مناسب است. آنتن دوقطبی متعامد دارای المان‌های پارازیتیک پیشنهادی ساخته شد و در آزمایشگاه آنتن تحت تست و اندازه‌گیری قرار گرفت. نتایج تست و شبیه‌سازی همخوانی خوبی را با هم به نمایش گذاشتند.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از آزمایشگاه تحقیقاتی آنتن و میکروویو شمال غرب^۱ در دانشگاه ارومیه برای حمایت‌های فنی تشکر می‌کنند.

مراجع

- [1] R. Xu, J.-Y. Li and J. Liu, "A design of broadband circularly polarized C-shaped slot antenna with sword-shaped radiator and its array for L/S-band applications," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 5891–5896, 2018, doi:10.1109/access.2017.2788008
- [2] A. Siahcheshm, J. Nourinia, Ch. Ghobadi and M. Shokri, "Circularly polarized printed helix antenna for L- and S-bands applications," *Radioengineering*, vol. 29, no. 1, pp. 67–73, 2020, doi:10.13164/re.2020.0067.
- [3] S. Fu, S. Fang, Z. Wang and X. Li, "Broadband circularly polarized slot antenna array fed by asymmetric CPW for L-band applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, pp. 1014–1016, 2009, doi:10.1109/lawp.2009.2031662.
- [4] H. Govindarajan *et al.*, "Design of a compact dual circular-polarized antenna for L-band Satellite Applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 4, pp. 547–551, 2020, doi:10.1109/lawp.2020.2971322.
- [5] M. Sekhar, E. K. Kumari and A. N. V. R. Kumar, "Wideband high-gain circularly polarized planar antenna array for L band Radar," *IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICIC)*, 2017, pp. 1-4, doi:10.1109/iccic.2017.8524447.
- [6] M. Ameen and R. K. Chaudhary, "Electrically small circularly polarized antenna using vialess CRLH-TL and fractals for L-band Mobile Satellite Applications," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 62, no. 4, pp. 1686–1696, 2019, doi:10.1002/mop.32213.
- [7] T. Hong, W. Jiang, S. X. Gong and Y. Liu, "Research on the L-band circularly polarized antenna with low RCS level," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 26, no. 14–15, pp. 1947–1955, 2012,

¹ Northwest Antenna & Microwave Research Laboratory (NAMRL)

- doi:10.1080/09205071.2012.722751.
- [8] M. Sun, Z. Zhang, F. Zhang and A. Chen, "L/S Multiband Frequency-reconfigurable antenna for satellite applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 12, pp. 2617–2621, 2019, doi:10.1109/lawp.2019.2945624.
- [9] E. Brookner, W. Hall and R. Westlake, "Faraday loss for L-band Radar and communications systems," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-21, no. 4, pp. 459–469, 1985, doi:10.1109/taes.1985.310634.
- [10] M. Shokri V. Rafii, S. Karamzadeh, Z. Amiri and B. Virdee, "Miniaturised ultra-wideband circularly polarised antenna with modified ground plane," *Electronics Letters*, vol. 50, no. 24, pp. 1786–1788, 2014, doi:10.1049/el.2014.3278.
- [11] R. Xu *et al.*, "Analysis and design of Ultrawideband circularly polarized antenna and array," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 12, pp. 7842–7853, 2020, doi:10.1109/tap.2020.2998922.
- [12] H. Shirzad, M. Shokri, Z. Amiri, S. Asiaban and B. Virdee, "Wideband circularly polarized square slot antenna with an annular patch," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 56, no. 1, pp. 229–233, 2013, doi:10.1002/mop.28016.
- [13] S. Mohammadi, J. Nourinia, C. Ghobadi, J. Pourahmadazar and M. Shokri, "Compact broadband circularly polarized slot antenna using two linked elliptical slots for C-band applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 12, pp. 1094–1097, 2013, doi:10.1109/lawp.2013.2280457.
- [14] A. Siahcheshm, J. Nourinia and Ch. Ghobadi, "Circularly polarized antenna array with a new sequential phase feed network utilizing directional coupler," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 93, pp. 75–82, 2018, doi:10.1016/j.aeue.2018.06.006.
- [15] W. Lin, H. Wong and R. W. Ziolkowski, "Circularly polarized antenna with reconfigurable broadside and conical beams facilitated by a mode switchable feed network," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 2, pp. 996–1001, 2018, doi:10.1109/tap.2017.2784452.
- [16] W.-J. Yang, Y.-M. Pan and S.-Y. Zheng, "A compact broadband circularly polarized crossed-dipole antenna with a very low profile," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 10, pp. 2130–2134, 2019, doi:10.1109/lawp.2019.2938597.
- [17] R.-Y. Sun and Q.-H. Chen, "Quadrature feed wideband circularly polarized cylindrical dielectric resonator antenna," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 28, no. 8, pp. 1011–1017, 2014, doi:10.1080/09205071.2014.902339.
- [18] R. Tripathy, S. R. Patre, S. Sravan Kumar and S. P. "High Gain Cylindrical Cavity-Backed Crossed Dipole Antenna," *IEEE Wireless Antenna and Microwave Symposium (WAMS)*, Ahmedabad, India, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/WAMS57261.2023.10242859.
- [19] Z. Su, K. Klionovski, H. Liao, Y. Chen, A. Z. Elsherbeni and A. Shamim, "Antenna-on-Package Design: Achieving Near-Isotropic Radiation Pattern and Wide CP Coverage Simultaneously," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 7, pp. 3740-3749, July 2021, doi: 10.1109/TAP.2020.3044134.
- [20] P. Shah and S. Kumar, "Compact Dual Circularly Polarized Swastika Shaped Antenna for L-band Small Satellite Applications," *12th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, Kharagpur, India, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICCCNT51525.2021.9579943.
- [21] A. Christodoulides and A. Feresidis, "3D Printed Anisotropic Metamaterial Substrates for Antenna Applications," *Antenna Measurement Techniques Association Symposium (AMTA)*, Daytona Beach, FL, USA, 2021, pp. 1-4, doi: 10.23919/AMTA52830.2021.9620598.

- [22] Z. N. Chen, *Handbook of Antenna Technologies*. Singapore: Springer Singapore, 2020.
- [23] M. Pourbagher, J. Nourinia and Ch. Ghobadi, "Circularly polarized printed crossed-dipole antenna using branch-line feed network for GPS applications," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 120, p. 153226, 2020, doi:10.1016/j.aeue.2020.153226.
- [24] K. Wei, J. Y. Li, L. Wang, R. Xu and Z. J. Xing, "A new technique to design circularly polarized microstrip antenna by fractal defected ground structure," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 7, pp. 3721–3725, 2017, doi:10.1109/tap.2017.2700226.
- [25] O. P. Falade, M. U. Rehman, Y. Gao, X. Chen and C. G. Parini, "Single feed stacked patch circular polarized antenna for triple band GPS receivers," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 10, pp. 4479–4484, 2012. doi:10.1109/tap.2012.2207354.
- [26] X. Tian and Z. Du, "Dual-Feed Shared-Radiator Metal-Frame Full-Screen Mobile Phone Antenna for GPS and LTE Bands With a Dual-Function Capacitor," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 71, no. 10, pp. 8314-8319, Oct. 2023, doi: 10.1109/TAP.2023.3294750.
- [27] R. Sadiq, M. B. Qureshi and M. M. Khan, "De-convolution and De-noising of SAR Based GPS Images Using Hybrid Particle Swarm Optimization," in *Chinese Journal of Electronics*, vol. 32, no. 1, pp. 166-176, January 2023, doi: 10.23919/cje.2021.00.138.
- [28] H. Zhang, H. Xiong, S. Hao, G. Yang, M. Wang and Q. Chen, "A Novel Multidimensional Hybrid Position Compensation Method for INS/GPS Integrated Navigation Systems During GPS Outages," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 24, no. 1, pp. 962-974, 1 Jan.1, 2024, doi: 10.1109/JSEN.2023.3324019.
- [29] M. Pourbagher, Ch. Ghobadi, J. Nourinia and R. Naderali, "Wideband Circularly Polarized Antenna with Metallic Walls for L-Band Applications," *Circuit World*, vol. 48, no. 4, pp. 502-510, 2022. doi: 10.1108/CW-10-2020-0271.

COPYRIGHTS

©2024 by the authors. Published by the Islamic Azad University Bushehr Branch. 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>

