

# آنتن حلزونی ارشمیدسی چهاربازویی در باند فرکانسی ۲ تا ۴ گیگاهرتز برای سیستم‌های ردگیری مونوپالس اهداف هوایی

علی‌اکبر دسترنج<sup>۱</sup>، استادیار

۱- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه یاسوج - یاسوج - ایران - dastranj@yu.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله، یک آنتن حلزونی چهاربازویی در باند فرکانسی ۲ تا ۴GHz با ویژگی‌های تشعشی مطلوب برای استفاده در سیستم‌های جهت‌یابی و ردگیری مونوپالس اهداف هوایی ارائه شده است. آنتن طراحی شده، از سه بخش اصلی تشعشع‌کننده حلزونی ارشمیدسی چهاربازویی، بالن چهاربازویی و محفظه فلزی استوانه‌ای تشکیل شده است. بالن چهاربازویی شامل چهار خط ریزنوار با باریک‌شوندگی خطی است و امپدانس ورودی تشعشع‌کننده حلزونی را به صورت خطی به امپدانس استاندارد  $50\Omega$  در پورت‌های تغذیه آنتن تبدیل می‌کند. نقش محفظه فلزی استوانه‌ای، تک‌جهته نمودن پرتو تشعشی و در نتیجه افزایش بهره آنتن است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی آنتن با نرم‌افزارهای HFSS و CST نشان می‌دهند که با استفاده از امواج دریافتی از چهار پورت این آنتن، الگوهای تشعشی مجموع و تفاضل بسیار مناسب با قطبی‌شدگی دایروی ایجاد می‌شوند. مقدار متوسط ایزولاسیون بین پورت‌های مختلف آنتن تقریباً ۲۸dB و میزان تلفات بازگشتی هر چهار پورت ورودی در کل باند فرکانسی کمتر از ۱۰dB است. همچنین بهره آنتن در حالت مجموع و عمق صفر ایجادشده در حالت تفاضل در فرکانس مرکزی ۳GHz، به ترتیب ۶/۵۸dB و ۳۵/۱۸dB است.

**واژه‌های کلیدی:** الگوهای تشعشی مجموع و تفاضل، آنتن حلزونی ارشمیدسی، بالن چهاربازویی، ردگیری مونوپالس.

## Four-Arm Archimedean Spiral Antenna at 2-4 GHz Frequency Band for Airborne Targets Mono-pulse Tracking Systems

A. A. Dastranj<sup>1</sup>, Assistant Professor

1- Faculty of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran, Email: dastranj@yu.ac.ir

**Abstract:** In this paper, a four-arm spiral antenna at 2-4 GHz frequency band with desirable radiation characteristics for use in direction finder and airborne targets mono-pulse tracking systems is presented. The designed antenna consists of three main parts, four-arm Archimedean spiral radiator, four-arm balun, and cylindrical metallic cavity. The four-arm balun contains four microstrip lines with linear tapering, and convert the input impedance of the spiral radiator to the  $50\Omega$  standard impedance at the antenna feeding ports, linearly. Role of the cylindrical metallic cavity is uni-directing, and consequently increasing the antenna gain. The simulation results of the antenna obtained via HFSS and CST software packages show that by using the received waves from the four ports of this antenna, much appropriate sum and difference radiation patterns with circular polarization are achieved. The average value of the isolation between the different ports of the antenna is nearly 28dB and the return loss of the four input ports at the entire frequency band is lower than 10dB. Also, the antenna gain of sum mode and null depth of difference mode at the center frequency, 3GHz, are 6.58 and 35.18dB, respectively

**Keywords:** Sum and difference radiation patterns, archimedean spiral antenna, four-arm balun, mono-pulse tracking.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۰۴

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۰۴

نام نویسنده مسئول: علی‌اکبر دسترنج

نشانی نویسنده مسئول: ایران - یاسوج - میدان معلم - خیابان دانشجو - دانشگاه یاسوج - دانشکده فنی و مهندسی.

## ۱- مقدمه

بازه‌های ۲-۲/۵ و ۲/۵-۴GHz به ترتیب کم‌تر از ۰/۸۴dB و ۰/۳۶dB است که به قطبی‌شدگی دایروی ایده‌آل بسیار نزدیک است. مقدار متوسط ایزولاسیون بین پورت‌های مختلف آنتن نیز حدود ۲۸dB و حداقل مقدار ایزولاسیون در بدترین شرایط در ابتدای باند فرکانسی ۱۵dB است. میزان تلفات بازگشتی برای هر چهار پورت ورودی در کل باند فرکانسی کم‌تر از ۱۰dB است. بهره آنتن در حالت<sup>۱۲</sup> مجموع و عمق صفر<sup>۱۳</sup> ایجادشده در حالت تفاضل در فرکانس مرکزی ۳GHz به ترتیب ۶/۵۸dB و ۳۵/۱۸dB است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، این آنتن یک گزینه بسیار مناسب برای استفاده در سیستم‌های جنگ الکترونیک به‌ویژه سیستم‌های ردگیر مونیپالس است. روند طراحی آنتن و جزئیات کامل آن در بخش‌های بعد ارائه و بحث شده است.

## ۲- طراحی آنتن

آنتن‌های حلزونی مسطح به دو دسته اصلی ارشمیدسی و لگاریتمی تقسیم می‌شوند. در آنتن ارشمیدسی پهنای بازوها ثابت بوده و فاصله بین بازوها در تمام طول مسیر بدون تغییر باقی می‌ماند؛ درحالی‌که در آنتن لگاریتمی با دور شدن از مرکز به انتهای بازوها، پهنای بازوها و فاصله بین آن‌ها افزایش می‌یابد. همان‌طور که در بخش قبل ذکر شد، آنتن‌های حلزونی رفتار امپدانس مختلط دارند. در این نوع آنتن‌ها در فرکانس‌های پایین به دلیل بازتاب انرژی از انتهای بازوها به سمت مرکز آنتن، امپدانس نوسانی ایجاد می‌گردد. از طرفی در آنتن‌های حلزونی ارشمیدسی با پیچش زیاد در فرکانس‌های بالاتر، جایی که بیشینه محیط آنتن بزرگ‌تر از طول موج است، امپدانس به یک مقدار مقاومتی ثابت همگرا می‌گردد و این نکته یک ویژگی کلیدی برای آنتن حلزونی ارشمیدسی است. همچنین آنتن ارشمیدسی با پیچش زیاد و پهنای بازوی کم، نسبت به آنتن لگاریتمی ابعاد کم‌تری را اشغال می‌کند. بنا بر دلایل فوق، در این مقاله، آنتن حلزونی ارشمیدسی چهاربازویی انتخاب و طراحی شده است. در شکل ۱ هندسه تشعشع‌کننده‌های مسطح حلزونی ارشمیدسی دوبازویی و چهاربازویی نشان داده شده است. بازوی آنتن ارشمیدسی از رابطه  $r = a\varphi + r_1$  طراحی می‌شود که  $r_1$ ،  $a$  و  $\varphi$  به ترتیب شعاع داخلی، نرخ رشد و زاویه در حال چرخش بازوها هستند [۹، ۱۰].

با توجه به روابط موجود برای طراحی آنتن ارشمیدسی دو بازویی، جهت محاسبه پارامترهای طراحی آنتن چهاربازویی از معادلات زیر استفاده می‌شود [۶]:

$$a_{(4-arm)} = 2 \times \frac{W_A + S_A}{\pi} \quad (1)$$

$$W_{A(4-arm)} = \frac{r_o - r_i}{4N} = S_A \quad (2)$$

در روابط فوق،  $S_A$  و  $W_A$  به ترتیب پهنا و فاصله بازوها هستند و  $N$  تعداد دور بازوها است. برای حالتی که نرخ رشد کوچک‌تر از ۲ باشد شعاع داخلی و خارجی از روابط زیر به دست می‌آیند:

آنتن‌ها یکی از مهم‌ترین اجزای سیستم‌های مخابراتی نظامی و تجاری هستند [۱-۳]. آنتن‌های حلزونی<sup>۱</sup> به دلیل دارا بودن ویژگی‌های منحصر به فرد از جمله پهنای باند وسیع، قطبی‌شدگی دایروی<sup>۲</sup>، حجم کم، وزن سبک، سهولت در مجتمع‌سازی و ثابت بودن الگوی تشعشعی، امپدانس، قطبی‌شدگی و مرکز فاز در سرتاسر یک باند فرکانسی وسیع، کاربرد زیادی در سیستم‌های مخابراتی، هشداردهنده، جنگ الکترونیک و سیستم‌های ردگیری دارند [۴]. این نوع آنتن‌ها رفتار امپدانس مختلطی در کل باند فرکانسی از خود نشان می‌دهند [۵]. همچنین، این دسته از آنتن‌ها امپدانس ورودی بالایی دارند و از طرفی باید با امپدانس استاندارد  $50\Omega$  تغذیه شوند. برای برطرف کردن این عدم تطبیق امپدانس، از ساختار بالن<sup>۳</sup> جهت تطبیق امپدانس استفاده می‌شود. تحقق بالن پهن‌بند از مهم‌ترین مراحل طراحی آنتن حلزونی بوده و در بخش طراحی آنتن به آن پرداخته می‌شود. آنتن حلزونی مسطح، میدان‌هایی با قطبی‌شدگی دایروی در دو جهت صفحه ایجاد می‌کند و از آنجایی که در اکثر کاربردها نیاز به پرتو تک‌جهته<sup>۴</sup> است، تبدیل پرتو دو جهته<sup>۵</sup> به پرتو تک‌جهته در این آنتن‌ها لازم و ضروری است. این تبدیل می‌تواند با قرار دادن یک صفحه زمین، یا یک محفظه فلزی و یا یک صفحه زمین شکافدار در پشت آنتن تحقق پذیرد [۶-۸].

در سیستم‌های ردگیری مونیپالس کلاسیک، ردگیری اهداف با استفاده از چهار آنتن مجزا صورت می‌گیرد. با استفاده از امواج دریافتی توسط این چهار آنتن، الگوهای تشعشعی مجموع و تفاضل برای ردگیری هدف ساخته می‌شوند و از مقایسه دامنه و فاز حالت‌های مجموع و تفاضل، جهت موج دریافتی از هدف به دست می‌آید. لازم به ذکر است استفاده از چهار آنتن در این سیستم‌ها، باعث بالا رفتن هزینه سیستم خواهد شد. در این مقاله به جای استفاده از چهار آنتن مجزا، یک آنتن حلزونی چهاربازویی طراحی شده است و با تحریک همزمان و همچنین فازدهی مناسب چهار پورت آنتن، الگوهای تشعشعی مجموع و تفاضل ایجاد شده‌اند. آنتن ارائه‌شده نسبت به آنتن‌های مونیپالس آرایه‌ای از سادگی و صرفه اقتصادی خوبی برخوردار است. آنتن ارائه‌شده، از سه بخش اصلی تشعشع‌کننده حلزونی ارشمیدسی چهاربازویی<sup>۶</sup>، بالن چهاربازویی و محفظه فلزی استوانه‌ای تشکیل شده است. بالن چهاربازویی شامل چهار خط ریزنوار<sup>۷</sup> با باریک‌شوندگی خطی<sup>۸</sup> است و امپدانس ورودی تشعشع‌کننده حلزونی را به صورت خطی به امپدانس استاندارد  $50\Omega$  در پورت‌های ورودی آنتن تبدیل می‌کند. نقش محفظه فلزی استوانه‌ای، تک‌جهته نمودن پرتو تشعشعی و در نتیجه افزایش بهره آنتن است. آنتن با استفاده از نرم‌افزارهای HFSS و CST شبیه‌سازی شده است. الگوهای تشعشعی مجموع و تفاضل<sup>۹</sup> به دست آمده در صفحات E و H در کل باند فرکانسی ۲ تا ۴GHz (باند راداری S) کاملاً متقارن و فاقد هرگونه گلبرگ فرعی<sup>۱۰</sup> هستند. نسبت محوری<sup>۱۱</sup> آنتن در راستای حداکثر تشعشع در

محفظه فلزی مستطیلی توخالی برای تعبیه خط ریزنوار به همراهِ زیرلایه‌اش نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ساختار پیشنهادی مانند یک موجبر نیمه‌پر شامل یک هادی مرکزی واقع در امتداد تقاطع هوا و دی‌الکتریک عمل می‌کند و بدنه محفظه نقش صفحه زمین را برای خط ریزنوار ایفا می‌کند. پهنای اولیه خط ریزنوار از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۱]:

$$\begin{cases} \frac{8e^A}{2e^A - 2} & \frac{w}{d} < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[ \begin{aligned} & B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \times \\ & \left( \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right) \end{aligned} \right] & \frac{w}{d} > 2 \end{cases} \quad (5)$$

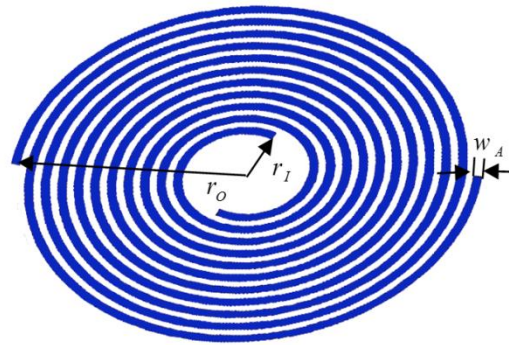
که  $w$  و  $d$  به ترتیب عرض ریزنوار و ارتفاع زیرلایه می‌باشند و  $\epsilon_r$  ثابت دی‌الکتریک زیرلایه است. همچنین پارامترهای  $A$  و  $B$  از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left( 0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right)} \quad (6)$$

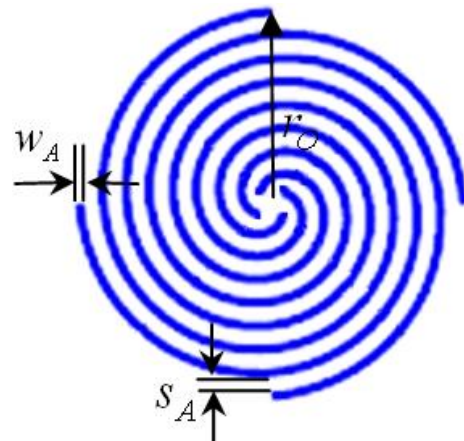
$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (7)$$

در روابط فوق،  $Z_0$  امپدانس مشخصه استاندارد ( $50\Omega$ ) خط ریزنوار است.

پس از تعیین ابعاد اولیه خط ریزنوار از روابط فوق، ساختار در محیط نرم‌افزار ترسیم و شبیه‌سازی شده و در نهایت پس از بهینه‌سازی،  $w_1 = 1/3\text{mm}$  و  $w_2 = 2/56\text{mm}$  به دست آمده‌اند که به ترتیب پهنای خط میکرواستریب در محل اتصال به بازوهای آنتن با امپدانس  $200\Omega$  و تغذیه با امپدانس  $50\Omega$  می‌باشند. طول این خطوط برابر با نصف طول موج در فرکانس مرکزی آنتن است که مقدار  $50\text{mm}$  را به خود اختصاص داده است. مقادیر به دست آمده از شبیه‌سازی برای ساختار فلزی مستطیلی عبارت‌اند از:  $b = 3\text{mm}$ ،  $a = 6\text{mm}$ ،  $h = 0.788\text{mm}$  و با اتصال چهار ساختار فلزی مستطیلی به یکدیگر ساختار نهایی بالن به دست می‌آید. جهت اتصال بالن به تشعشع‌کننده حلزونی چهاربازویی، انتهای هر یک از خطوط ریزنوار باریک‌شونده به ابتدای بازوهای بخش حلزونی متصل می‌شوند. در شکل ۳ ساختار بالن چهاربازویی و نحوه اتصال آن به بازوهای آنتن نشان داده شده است. همان‌طور که در مقدمه بیان شد، آنتن حلزونی مسطح میدان‌هایی با قطبی‌شدگی دایروی در دو جهت صفحه ایجاد می‌کند. از آنجایی که در اکثر کاربردها نیاز به پرتو تک‌جهته است، یکی از مهم‌ترین مراحل در طراحی این نوع آنتن‌ها، ارائه روشی برای تبدیل پرتو دوجته به پرتو تک‌جهته است. در این مقاله جهت یکسو نمودن پرتو، از یک محفظه فلزی استوانه‌ای در پشت تشعشع‌کننده حلزونی استفاده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱: (الف) آنتن ارشمیدسی دوبازویی، (ب) آنتن ارشمیدسی چهاربازویی

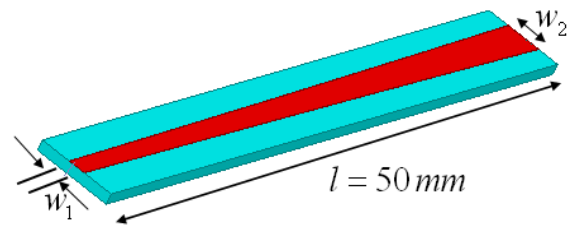
$$r_{in} = \frac{\lambda_{high} \times m_{lowest}}{6\pi} \quad (3)$$

$$r_o \geq \frac{(m_{highest} + 0.5)\lambda_{low}}{2\pi} \quad (4)$$

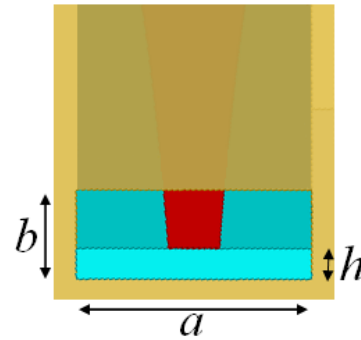
که  $\lambda_{low}$  و  $\lambda_{high}$  به ترتیب طول موج فرکانس بالا و پایین است و  $m_{highest}$  و  $m_{lowest}$  بالاترین و پایین‌ترین مود (حالت) کاری موردنظر است. با استفاده از روابط فوق و پس از محاسبه و چندین بار شبیه‌سازی در نرم‌افزار HFSS مقادیر بهینه پارامترهای هندسی آنتن حلزونی ارشمیدسی چهاربازویی به صورت زیر به دست آمده‌اند:  $S_A = 1/0.94\text{mm}$ ،  $\alpha = 1/5$ ،  $w_A = 1/26\text{mm}$ ،  $r_O = 80/17\text{mm}$ ،  $r_I = 4/8\text{mm}$  و  $N = 8$ . این عنصر روی زیرلایه‌ای از جنس Rogers RO5880 با ثابت دی‌الکتریک  $2/2$  و ضخامت  $31\text{mil}$  طراحی شده است.

در مرحله بعد، به طراحی بالن چهاربازویی پرداخته می‌شود. بالن چهاربازویی شامل چهار خط ریزنوار مشابه و با باریک‌شوندگی خطی است و امپدانس ورودی  $200\Omega$  تشعشع‌کننده حلزونی را به صورت خطی به امپدانس استاندارد  $50\Omega$  در پورت‌های تغذیه آنتن تبدیل می‌کند. در شکل ۲ ساختار یک خط ریزنوار با باریک‌شوندگی خطی و

از طرفی وجود محفظه فلزی تطبیق امپدانس آنتن را تحت تأثیر قرار داده و در نتیجه باعث افزایش تلفات بازگشتی آنتن می‌شود. برای حل این مشکل از یک ماده جاذب میکروویوی درون محفظه استفاده شده است. در واقع حضور ماده جاذب باعث می‌شود اثرات ناشی از امواج بازتابی از دیواره‌های محفظه تا حد امکان کاهش یابد و مشخصات پهن‌بند آنتن را بهبود می‌بخشد. با استفاده از بهینه‌سازی نرم‌افزاری، ماده جاذب کاسیتريت<sup>۱۴</sup> با ضریب دی‌الکتریک  $\epsilon = 23/4$  و تانژانت تلفات  $\tan \delta_e = 0/06$  مورد استفاده قرار گرفته است. لازم به ذکر است محفظه فلزی کاملاً از ماده جاذب پر نشده بلکه بین ماده جاذب و آنتن حلزونی، ماده‌ای از جنس فوم با ثابت دی‌الکتریک  $1/03$  قرار گرفته است. ارتفاع محفظه برابر با ارتفاع بالن است که نیمه بالایی آن را فوم و نیمه پایینی آن را ماده جاذب پر کرده است. هدف از به کار بردن فوم، ایجاد یک بستر مناسب برای قرارگیری تشعشع‌کننده حلزونی بر روی آن است و این ماده تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای در کاهش اثرات تشعشعی ندارد. نمای سه‌بعدی و جانبی ساختار نهایی در شکل ۴ نشان داده شده است.

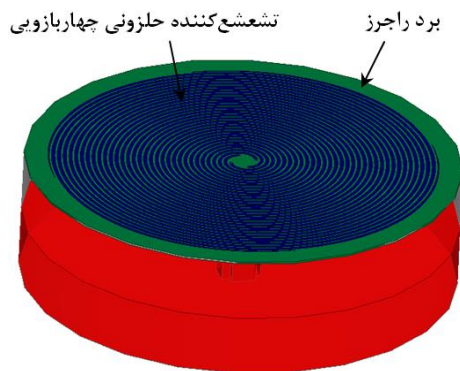


(الف)

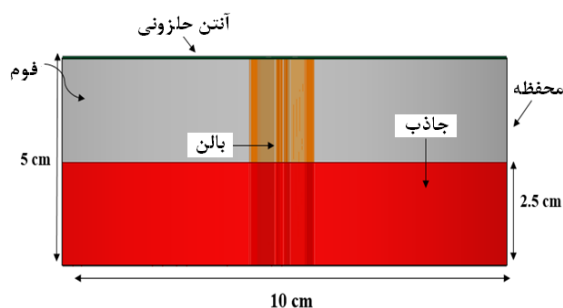


(ب)

شکل ۲: (الف) خط ریزنوار با باریک‌شوندگی خطی، (ب) ساختار محفظه مستطیلی و ابعاد هندسی آن

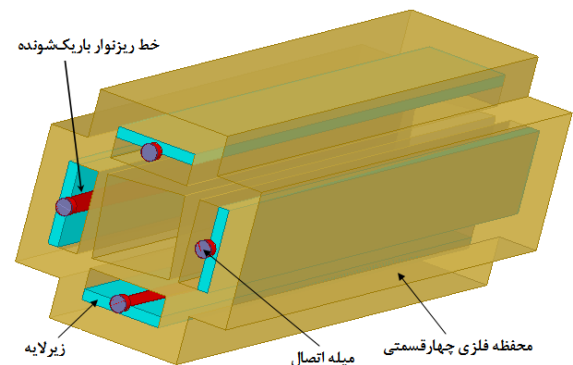


(الف)

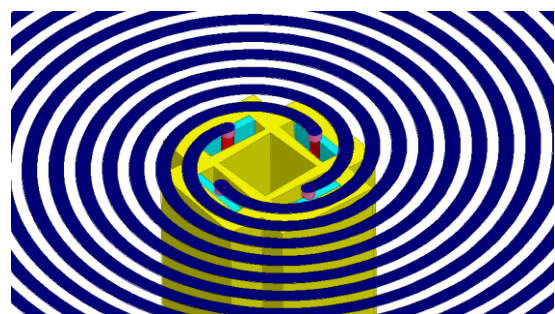


(ب)

شکل ۴: (الف) نمای سه‌بعدی و (ب) نمای جانبی آنتن حلزونی چهاربازویی به همراه محفظه و بالن



(الف)



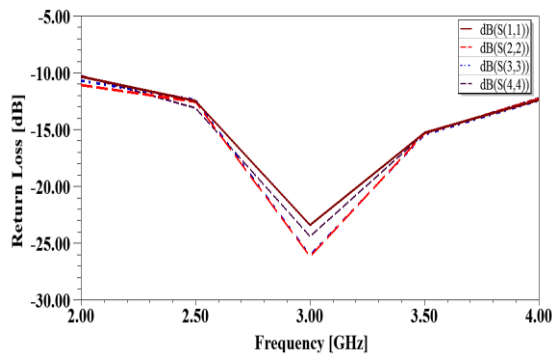
(ب)

شکل ۳: (الف) ساختار بالن چهاربازویی (ب) نحوه اتصال بالن به بازوهای آنتن

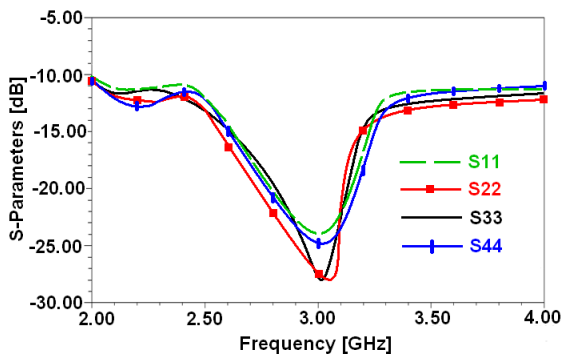
### ۳- نتایج شبیه‌سازی

آنتن طراحی شده در بخش قبل، در محیط نرم‌افزار HFSS پیاده و شبیه‌سازی شده است. همچنین به منظور تأیید (راستی‌آزمایی) نتایج

مجموع و عمق صفر ایجاد شده در حالت تفاضل در فرکانس مرکزی ۳GHz به ترتیب ۶/۵۸dB و ۳۵/۱۸dB است. در شکل ۱۲ نیز الگوهای

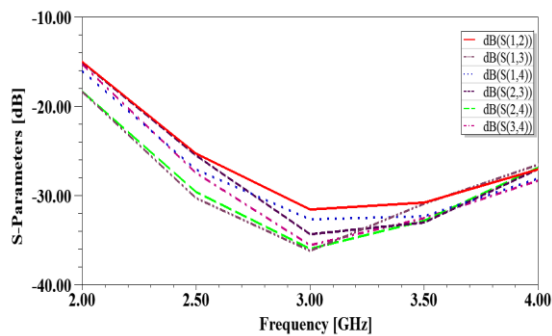


(الف)

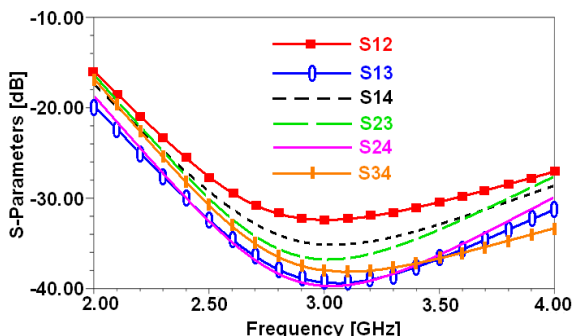


(ب)

شکل ۵: تلفات بازگشتی پورت‌های مختلف آنتن، (الف) HFSS، (ب) CST



(الف)



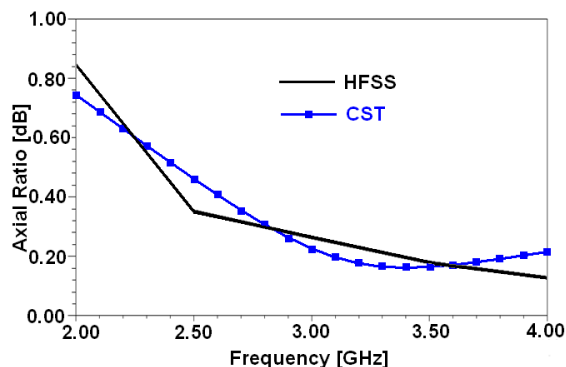
(ب)

شکل ۶: ایزولاسیون بین پورت‌های مختلف آنتن، (الف) HFSS، (ب) CST

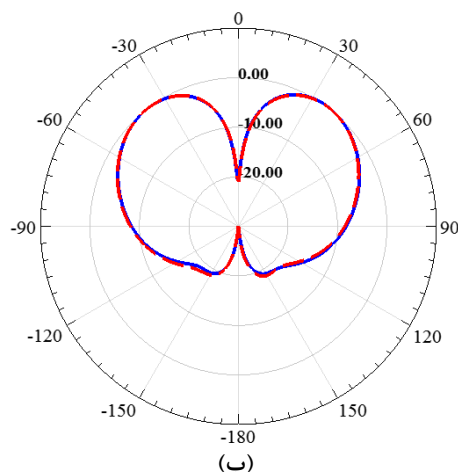
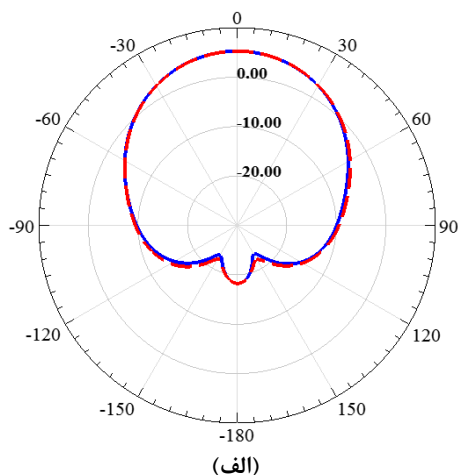
شبه‌سازی، آنتن مجدداً با نرم‌افزار CST شبیه‌سازی شده است. تطابق خوبی بین نتایج حاصل از دو نرم‌افزار HFSS و CST وجود دارد. این تطابق صحت نتایج شبیه‌سازی را تأیید می‌کند. شکل ۵ ضرایب انعکاس را در چهار پورت ورودی نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود مقدار پارامترهای  $S_{11}$ ،  $S_{22}$ ،  $S_{33}$  و  $S_{44}$  در کل باند فرکانسی ۲ تا ۴GHz، کم‌تر از -۱۰dB هستند؛ بنابراین تطبیق امپدانس مناسب ایجاد شده است. همچنین میزان تزویج<sup>۱۵</sup> بین پورت‌ها در نمودار شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار متوسط ایزولاسیون بین پورت‌های مختلف آنتن حدود ۲۸dB و حداقل مقدار ایزولاسیون در بدترین شرایط در ابتدای باند فرکانسی ۱۵dB است. این نتیجه نشان‌دهنده ایزوله‌بودن پورت‌های ورودی نسبت به یکدیگر می‌باشد. لازم به ذکر است که در شکل‌های ۵ و ۶ تطابق بسیار خوبی بین نتایج ناشی از دو نرم‌افزار مشاهده می‌شود.

شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب بهره و نسبت محوری آنتن را برحسب فرکانس در جهت حداکثر تشعشع ( $\theta=0$ ) نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود بهره آنتن پیشنهادی در ابتدا و انتهای باند فرکانسی به ترتیب بیش‌تر از ۵ و ۳/۸dB است. با توجه به شکل ۸ نسبت محوری آنتن در راستای حداکثر تشعشع در بازه‌های ۲/۵-۲ و ۴GHz-۲/۵ به ترتیب کم‌تر از ۰/۸۴dB و ۰/۳۶dB است. این مقادیر نشان می‌دهند که قطبی‌شدگی آنتن حلزونی طراحی شده به قطبی‌شدگی دایروی ایده‌آل بسیار نزدیک است. در اینجا نیز نتایج ناشی از دو نرم‌افزار مطابقت خوبی با یکدیگر دارند. در شکل‌های ۵ الی ۸، در نتایج مربوط به نرم‌افزار HFSS تعدادی نقطه شکست دیده می‌شود. این پدیده به دلیل زمان شبیه‌سازی بالا است که باعث شده است نقاط شبیه‌سازی کم انتخاب گردد، در حالی که در نتایج به دست آمده توسط CST به دلیل زمان شبیه‌سازی کم‌تر، نقاط شکست وجود ندارند. شکل‌های ۹-۱۱ الگوهای تشعشعی مجموع و تفاضل را با استفاده از نرم‌افزار HFSS در فرکانس‌های ۲، ۳ و ۴GHz در صفحات  $E$  ( $\phi=0$ ) و  $H$  ( $\phi=90$ ) نشان می‌دهند. برای ایجاد الگوی تشعشعی مجموع، بازوهای مجاور با دامنه یکسان و با ۹۰ درجه اختلاف فاز تغذیه شده‌اند و برای ایجاد الگوی تشعشعی تفاضل، بازوهای مجاور نسبت به یکدیگر ۱۸۰ درجه اختلاف فاز دارند و با بازوی روبرو هم‌فاز می‌باشند. با مراجعه به شکل‌های ۹-۱۱ مشاهده می‌شود که الگوهای تشعشعی آنتن کاملاً متقارن و فاقد هرگونه گلبرگ فرعی هستند. لازم به ذکر است که چرخش پرتو نسبت به جهت اصلی تشعشع، یکی از مهم‌ترین و رایج‌ترین معایب آنتن‌های حلزونی است و با افزایش فرکانس نیز زیاد می‌شود. این انحراف پرتو برای بان‌های خوب تقریباً ۳ درجه و تا ۱۰ درجه برای بان‌های ضعیف افزایش می‌یابد [۱۲]. با توجه به شکل‌های ۹-۱۱، میزان چرخش پرتو آنتن طراحی شده نسبت به جهت اصلی تشعشع صفر درجه است. این ویژگی مهم با بهینه‌سازی پارامترهای هندسی آنتن فراهم شده است. جدول ۱ نیز مقادیر بهره و عمق صفر آنتن را در سه فرکانس مختلف ارائه می‌دهد. بهره آنتن در حالت

بنابراین، در رابطه با هزینه نهایی آنتن گلوگاه خاصی وجود ندارد. ساخت این آنتن در باند موردنظر یا باندهای بالاتر می‌تواند به‌عنوان پیشنهادی برای پژوهش‌های آینده مطرح گردد. به‌منظور بررسی صحت نتایج، آنتن با دو نرم‌افزار HFSS و CST شبیه‌سازی شده است. تطابق بین نتایج ناشی از دو نرم‌افزار، درستی نتایج را تأیید می‌کند.



شکل ۸: نسبت محوری آنتن برحسب فرکانس در دو نرم‌افزار HFSS و CST

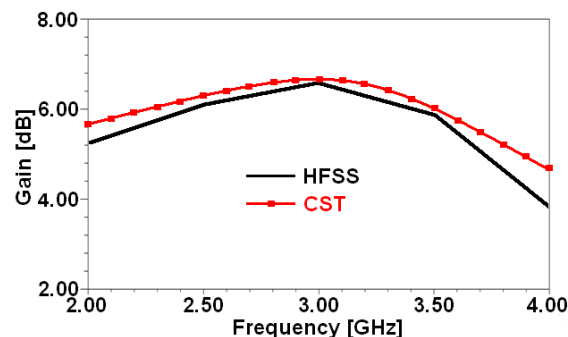


شکل ۹: الگوهای تشعشی آنتن در فرکانس ۲ GHz. (الف) حالت مجموع، (ب) حالت تفاضل، (خطوط پیوسته صفحه E و خطوط گسسته صفحه H)

تشعشی حالت مجموع با استفاده از نرم‌افزار CST در فرکانس‌های ۲ و ۳ GHz در صفحه E ( $\phi=0$ ) ارائه شده است. نتایج ارائه‌شده در این شکل نیز تطابق قابل‌قبولی با نتایج شکل‌های ۹ (الف) و ۱۰ (الف) دارند. سایر نتایج ناشی از نرم‌افزار CST نیز مطابق انتظار به‌دست آمدند که به‌دلیل زیاد بودن تعداد نمودارها در اینجا ارائه نشده‌اند.

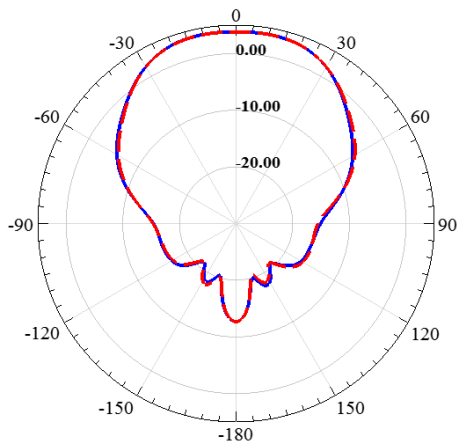
با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، کلیه پارامترهای تشعشی آنتن دارای مقادیر بسیار مطلوب در سراسر باند فرکانسی ۲ تا ۴ GHz هستند؛ بنابراین این آنتن یک گزینه بسیار مناسب برای استفاده در سیستم‌های جنگ الکترونیک به‌ویژه سیستم‌های ردگیر مونیوپالس است. یک مدار ساده با به‌کارگیری آنتن حلزونی چهاربازویی برای ایجاد الگوهای مجموع و تفاضل جهت استفاده سیستم‌های جهت‌یابی مونیوپالس در شکل ۱۳ نشان داده شده است [۱۳]. شکل ۱۴ نیز یک دیگرام جهت‌یابی مونیوپالس با استفاده از این آنتن را نشان می‌دهد. این سیستم هم قادر به تشخیص زاویه سمت و هم قادر به تشخیص زاویه ارتفاع در هر برخورد پالس است. خروجی‌های این ترکیب سیگنال‌های مجموع ( $\Sigma$ ) و تفاضل ( $\Delta$ ) می‌باشد که حاوی تمامی اطلاعات برای استخراج زاویه سمت و ارتفاع است. نسبت دامنه  $\Sigma$  به  $\Delta$  مقدار زاویه ارتفاع،  $\theta$ ، را نشان می‌دهد و اختلاف فاز بین  $\Sigma$  و  $\Delta$  حاوی اطلاعات زاویه سمت ( $\phi$ ) است.

لازم به ذکر است با توجه به اینکه هزینه‌های مربوط به ساخت (با کیفیت بالا) و تست اولین نمونه از این آنتن تا حدودی بالا بوده و به‌دلیل عدم تأمین هزینه‌ها، در این مرحله از تحقیق امکان ساخت فراهم نگردید. برای ساخت اولین نمونه ممکن است که فرایند ساخت هرکدام از بخش‌های آنتن چند مرتبه تکرار شود. همچنین برای ساخت اولین نمونه باید نقشه‌های مکانیکی دوبعدی و سه‌بعدی تهیه گردند. به‌طور کلی ساخت اولین نمونه همواره ممکن است نیاز به انجام اصلاحات مکانیکی و تکرار مراحل ساخت داشته باشد. در صورتی که پس از ساخت نمونه اول، هزینه نمونه‌های بعد بسیار کاهش می‌یابند (زیرا لازم نیست نقشه مکانیکی تهیه گردد و یا اصلاحات مکانیکی انجام شود) و هرچه تعداد بالاتر باشد معمولاً هزینه‌ها کم‌تر می‌شوند.

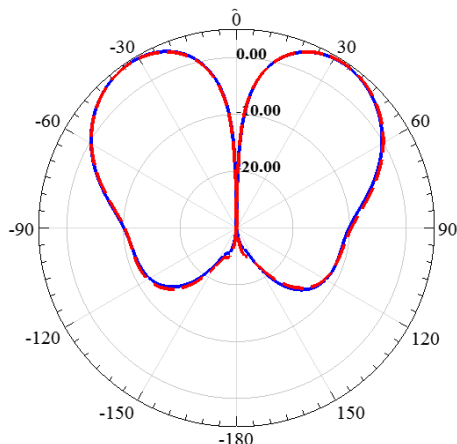


شکل ۷: بهره آنتن در جهت حداکثر تشعشع ( $\theta=0$ ) در دو نرم‌افزار HFSS و CST

زمان هر بار شبیه‌سازی آنتن با استفاده از یک سیستم با پردازنده چهارهسته‌ای ۳/۳GHz و حافظه (RAM) ۱۶GB، حدود ۱۲ ساعت است. وزن تقریبی آنتن نیز به ضخامت محفظه و بالن چهاربازویی وابسته است. با در نظر گرفتن ضخامت‌های استاندارد، وزن کل آنتن حدود ۴۰۰ گرم پیش‌بینی می‌گردد. البته این مقدار برای کاربردهای خاص مانند استفاده در سیستم‌های پرنده تا ۲۵۰ گرم قابل کاهش است. در جدول ۲ ویژگی‌های این آنتن با آنتن مورد استفاده در سیستم‌های مونوپالس کلاسیک مقایسه شده است. با مراجعه به این جدول، مزایای آنتن طراحی شده نسبت به موارد مشابه دیده می‌شوند.



(الف)

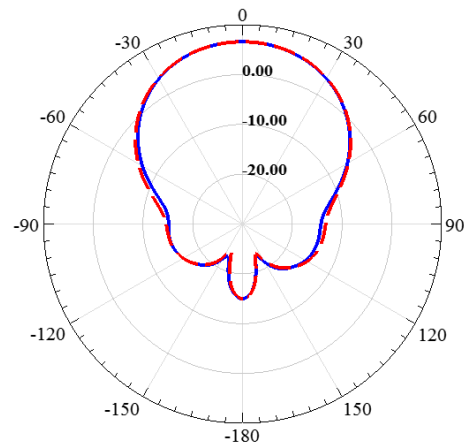


(ب)

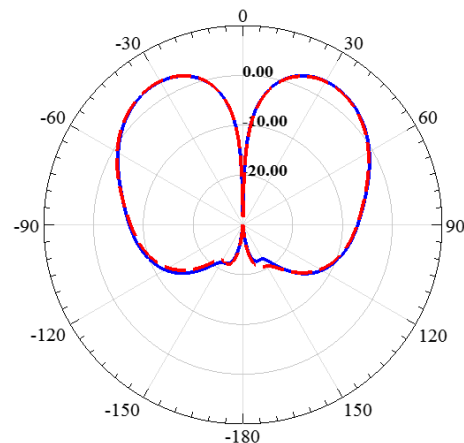
شکل ۱۱: الگوهای تشعشعی آنتن در فرکانس ۴ GHz، (الف) حالت مجموع، (ب) حالت تفاضل، (خطوط پیوسته صفحه E و خطوط گسسته صفحه H)

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک آنتن حلزونی چهاربازویی در باند فرکانسی ۲ تا ۴GHz جهت به‌کارگیری در سیستم‌های جهت‌یابی و ردگیری مونوپالس طراحی شده است. برای ایجاد تطبیق امپدانس بین تشعشع‌کننده حلزونی و پورت‌های تغذیه آنتن، یک بالن چهاربازویی شامل چهار خط ریزنوار با باریک‌شوندگی خطی طراحی شده است. همچنین به‌منظور تک‌جهته نمودن پرتو آنتن، یک محفظه فلزی استوانه‌ای، در پشت بخش حلزونی قرار گرفته است. با فزندی مناسب به پورت‌های ورودی آنتن، الگوهای تشعشعی دو حالت مجموع و تفاضل ایجاد شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که آنتن در کل باند دارای الگوهای پایدار و بدون گلبرگ فرعی است. سایر ویژگی‌های تشعشعی از جمله بهره، عمق صفر، ایزولاسیون، تلفات بازگشتی و نسبت محوری نیز کاملاً مطلوب هستند. علاوه بر این، یکی از برجسته‌ترین ویژگی‌های آنتن طراحی شده، عدم چرخش الگو و انحراف از جهت اصلی تشعشع است. این ویژگی در کاربردهای مختلف به‌ویژه



(الف)

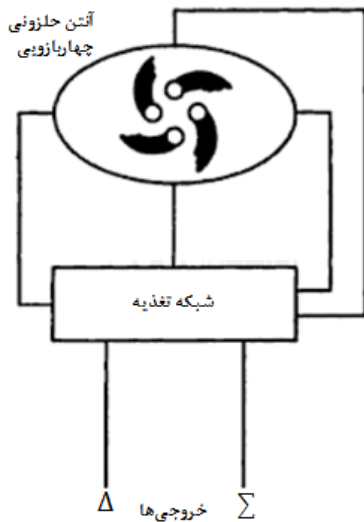


(ب)

شکل ۱۰: الگوهای تشعشعی آنتن در فرکانس ۳ GHz، (الف) حالت مجموع، (ب) حالت تفاضل، (خطوط پیوسته صفحه E و خطوط گسسته صفحه H)

جدول ۱: مقادیر بهره و عمق صفر در صفحه  $\phi=0$

فرکانس	۲	۳	۴
بهره در حالت مجموع (dB)	۵/۲۳	۶/۵۸	۳/۸۴
عمق صفر در حالت تفاضل (dB)	۲۶/۲۷	۳۵/۱۸	۴۰/۰۷

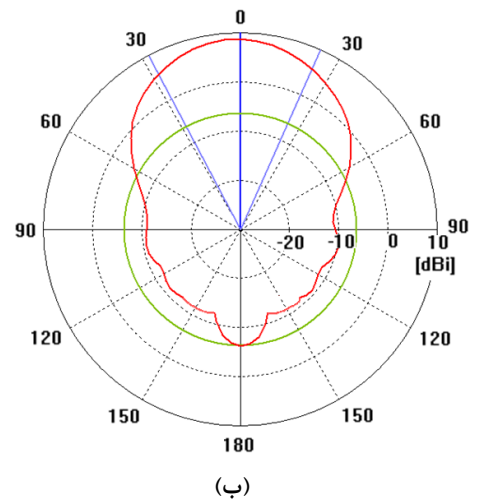
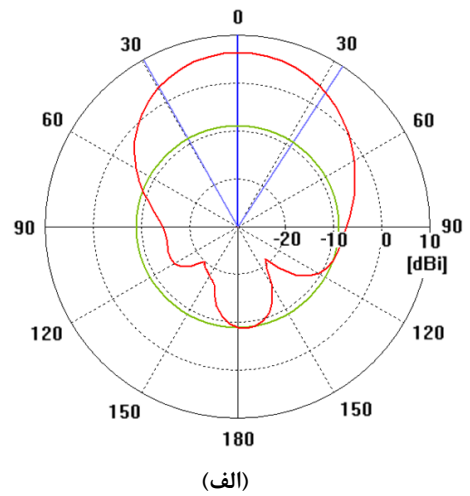


شکل ۱۴: آنتن حلزونی چهاربازویی در یک سیستم جهت یاب مونوپالس [۱۳]

جدول ۲: مقایسه ویژگی‌های آنتن طراحی شده با آنتن مورد استفاده در سیستم‌های مونوپالس کلاسیک

پارامتر	آنتن پیشنهادی	آنتن مورد استفاده در سیستم‌های کلاسیک
نوع آنتن	حلزونی چهاربازویی	حلزونی دوبازویی
تعداد مورد نیاز در یک سیستم	یک دستگاه	چهار دستگاه (به صورت آرایه‌ای)
ایجاد پیچیدگی در سیستم	ایجاد نمی‌کند	ایجاد می‌کند (به دلیل آرایه بودن)
وزن تقریبی	۴۰۰ گرم	۱۲۰۰ گرم
حجم اشغال شده در سیستم توسط آنتن	$5 \times 20 \times 20 \text{ cm}^3$	$5 \times 50 \times 50 \text{ cm}^3$
زمان شبیه‌سازی هزینه	۱۲ ساعت	۴۰ ساعت
	معادل یک دستگاه	معادل چهار دستگاه

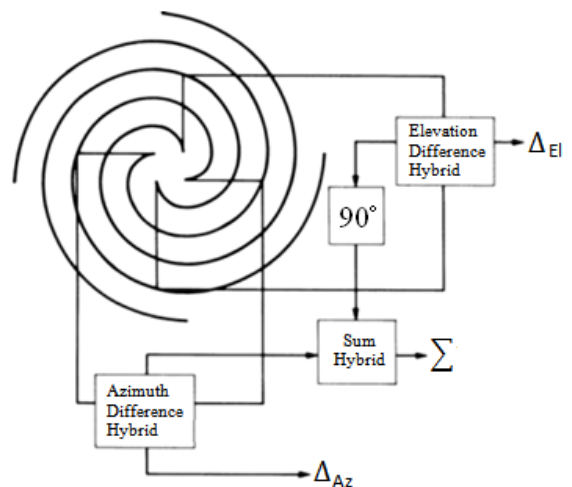
جهت‌یابی و ردگیری، از اهمیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار است.



شکل ۱۲: الگوهای تشعشعی حالت مجموع با استفاده از نرم‌افزار CST در صفحه E، (الف) در فرکانس ۲GHz، (ب) در فرکانس ۳GHz

## مراجع

- [۱] آزاده ایمانی، جواد نوری‌نیا و چنگیز قبادی، «آنتن دایورسیتی مسطح جدید پهن‌بند جهت استفاده در ارتباطات سیار»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۰، شماره ۲، صفحه ۱۹-۱۳، ۱۳۸۹.
- [۲] ایمان مجیدی، حسین همتی و سیدحسین صدیق، «طراحی آنتن چهارتایی شکافی فشرده با قطبش دایروی برای به‌کارگیری در گیرنده GPS»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۶، شماره ۴، صفحه ۳۰۶-۲۹۹، ۱۳۹۵.
- [۳] داود بصائری، سیدمحمدجواد رضوی و سیدحسین محسنی ارمکی، «تحلیل اثرات صفحه زمین دایروی محدود در آنتن‌های تک‌قطبی سیمی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۷، شماره ۱، صفحه ۲۸-۲۱، ۱۳۹۶.



شکل ۱۳: کاربرد آنتن طراحی شده در یک مدار مونوپالس [۱۳]



- [8] Jodie M. Bell and Magdy F. Iskander, "A Low-Profile Archimedean Spiral Antenna Using an EBG Ground Plane," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 3, pp. 223-226, 2004.
- [9] R. G. Corzine and J. A. Mosko, *Four-Arm Spiral Antennas*, Boston: Artech House, 1990.
- [10] J. Volakis, *Antenna Engineering Handbook*, fourth ed., McGraw-Hill, 2007.
- [11] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, John Wiley & Sons, 2005.
- [12] I. Yildiz, *Design and Construction of Reduced Size Planar Spiral Antenna in the 0.5-18 GHz Frequency Range*, M.Sc. Thesis, Middle East Technical University, October 2004.
- [13] K. F. A.I. Leonov, *Monopulse Radar*, Artech House, 1986.
- [4] T.-Y. Shih and N. Behdad, "A compact, broadband spiral antenna with unidirectional circularly polarized radiation patterns," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 6, pp. 2776 – 2781, 2015.
- [5] John L. Volakis, *Small Antenna: Miniaturization Techniques & Applications*, McGraw Hill, 2010.
- [6] H. Nakano, K. Nogami, S. Arai, and H. Mimaki, "A spiral antenna backed by a conducting plane reflector," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 34, no. 6, pp. 791-796, 1986.
- [7] H. Nakano, K. Kikkawa, Y. Iitsuka, and J. Yamauchi, "Equiangular Spiral Antenna Backed by a Shallow Cavity," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 56, no. 8, pp. 2742-2747, 2008.

## زیر نویس ها

- 
- <sup>1</sup>Spiral Antennas  
<sup>2</sup>Circular Polarization  
<sup>3</sup>Balun  
<sup>4</sup>Uni-directional Beam  
<sup>5</sup>Bi-directional Beam  
<sup>6</sup>Four-arm Archimedean Spiral Radiator  
<sup>7</sup>Microstrip  
<sup>8</sup>Linear Tapering  
<sup>9</sup>Sum and Difference Radiation Patterns  
<sup>10</sup>Side Lobe  
<sup>11</sup>Axial Ratio  
<sup>12</sup>Mode  
<sup>13</sup>Null Depth  
<sup>14</sup>Cassiterite  
<sup>15</sup>Coupling