

آنتن متناوب لگاریتمی با عرض دندان‌های مدوله شده برای سیستم مونوپالس با قطبش دایروی دوگانه

الهه مهبودی^۱، مسعود موحدی^۲ و عباسعلی حیدری^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه یزد، e.mehboudi@gmail.com

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه یزد، movahhedi@yazd.ac.ir

^۳ دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه یزد، aheidari@yazd.ac.ir

چکیده - سیستم مونوپالس از جمله سیستم‌های جهت‌یابی کارآمد است که در آن با استفاده از دو مد مجموع و اختلاف، زاویه ورود سیگنال مشخص می‌شود. عمدتاً به دلیل نامشخص بودن قطبش امواج دریافتی در سیستم‌های جهت‌یابی، استفاده از آنتنی که قابلیت دریافت امواجی با قطبش دایروی راستگرد و چپگرد (قطبش دایروی دوگانه) را داشته باشد، مزیت بزرگی محسوب می‌شود. آنتن متناوب لگاریتمی (LP) از جمله آنتن‌های پهن‌بند محسوب می‌شود که می‌تواند قطبش دایروی دوگانه (راستگرد و چپگرد) نیز داشته باشد. استفاده از آنتن متناوب لگاریتمی چهار بازو در سیستم مونوپالس، توانایی ایجاد دو مد مجموع با قطبش دایروی دوگانه را دارد اما، مد اختلاف با قطبش راستگرد و چپگرد در این آنتن تشکیل نمی‌شود. در این مقاله، با استفاده از مدولاسیون عرض دندان‌های آنتن لگاریتمی این مشکل حل شده است. علاوه بر این، با اضافه نمودن یک رینگ پیرامون آنتن LP، پهنای باند آنتن افزایش یافته و در نتیجه، آنتن متناوب لگاریتمی چهار بازو با عرض دندان‌های مدوله شده، به عنوان آنتنی مناسب برای استفاده در سیستم مونوپالس با قطبش دایروی دوگانه معرفی شده است.

کلید واژه - آنتن متناوب لگاریتمی (LP)، قطبش دایروی دوگانه، مونوپالس

سیستم مونوپالس، قطبش دو مد مجموع و اختلاف تنها در جهت پیچش بازو (راستگرد و یا چپگرد) وجود خواهد داشت. لذا آنتن مونوپالس حلزونی، آنتنی با قطبش دایروی یگانه می‌باشد. در [۲-۳] برای حل این مشکل و رسیدن به قطبش دایروی دوگانه در آنتن مونوپالس حلزونی، از تکنیک مدولاسیون پهنای بازوهای این آنتن استفاده شده است. این روش باعث ایجاد مد مجموع و اختلاف در جهت عکس پیچش بازوها و در نتیجه، ایجاد قطبش دایروی دوگانه در آنتن حلزونی چهار بازو می‌شود.

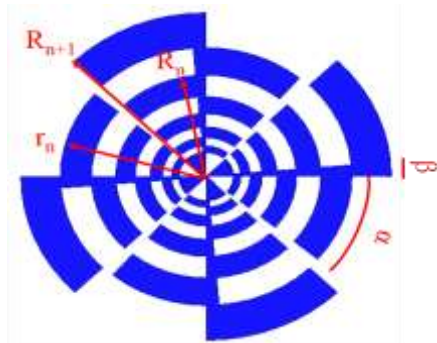
در آنتن‌های سینوسی و متناوب لگاریتمی معمولی، به دلیل شکل خاص بازوهای آنها، جریان می‌تواند در دو سمت راست و چپ منتشر شود؛ در نتیجه، این آنتن‌ها دارای قطبش دایروی دوگانه هستند. در سیستم مونوپالس، آنتن‌های مذکور حداقل با چهار بازو مورد استفاده قرار گرفته و دارای دو مد مجموع با قطبش‌های چپگرد و راستگرد می‌باشند. اما آنتن چهار بازوی سینوسی یا متناوب لگاریتمی در مد اختلاف، به دلیل روی هم قرار گرفتن و هم‌شکلی پترن چپگرد و راستگرد و بهره منفی در بهره ماکزیمم، مد اختلاف ندارند. برای تشکیل مد اختلاف و در نتیجه امکان استفاده از این آنتن‌ها در سیستم مونوپالس با قطبش دایروی دوگانه، باید آنتنی با حداقل ۵ بازو مورد استفاده قرار گیرد. افزایش بازوها باعث پیچیدگی سیستم تغذیه آنتن می‌شود. هم‌چنین استفاده از آرایه‌ای از این آنتن‌ها در کنار هم

۱- مقدمه

سیستم مونوپالس از جمله سیستم‌های جهت‌یابی است که در رادارها و سیستم‌های مختلف نظامی کاربرد فراوانی دارد. جهت‌یابی در این سیستم با تشکیل مدهای مجموع و اختلاف در دو راستا صورت می‌گیرد [۱].

به دلیل نامشخص بودن قطبش امواج دریافتی در اکثر سیستم‌های جهت‌یابی، از آنتن‌هایی با قطبش دایروی استفاده می‌شود. اما چون در بسیاری از موارد، راستگرد یا چپگرد بودن قطبش موج ارسالی مشخص نیست، اگر آنتن مونوپالس مورد استفاده، دارای قطبش دایروی راستگرد بوده، ولی موج ارسالی دارای قطبش دایروی چپگرد باشد یا برعکس، سیگنالی در گیرنده دریافت نخواهد شد. برای رفع این مشکل، طراحی آنتنی با قطبش دایروی راستگرد (RHCP) و چپگرد (LHCP) یا به عبارت دیگر، دوگانه، می‌تواند بسیار مفید واقع شود. استفاده از آنتن‌هایی با قابلیت چند بازو شدن از جمله روش‌های تحقق این ویژگی است. آنتن حلزونی (spiral antenna) و آنتن سینوسی از جمله آنتن‌های پرکاربرد در سیستم مونوپالس هستند.

قطبش آنتن حلزونی با توجه به جهت پیچش بازوهای آن تعیین می‌شود. برای استفاده از آنتن حلزونی چهار بازو در



شکل ۱: ساختار آنتن متناوب لگاریتمی چهار بازو نه و پارامترهای آن.

آن توانایی ایجاد قطبش دایروی دوگانه چپگرد و راستگرد را دارد.

در هر آنتن متناوب لگاریتمی با N بازو، $(N-1)/2$ مد هم قطبش وجود خواهد داشت. بنابراین برای داشتن مد مجموع مناسب به تعداد حداقل ۳ بازو نیاز است، که برای ایجاد تقارن از آنتن ۴ بازو استفاده می شود. برای داشتن هر دو مد مجموع و اختلاف مناسب حداقل به ۵ بازو نیاز است، که برای تقارن از ۶ و یا ۸ بازو استفاده می شود [۶]. تحریک آنتن توسط روشهای متفاوتی انجام می شود. برای ایجاد مدهای مختلف در آنتن، بازوهای آن باید طبق رابطه (۳) تحریک شوند:

$$v_m^n = e^{-\frac{i2\pi m(n-1)}{N}} \quad (3)$$

در فرمول بالا N تعداد بازوها، m شماره مد مورد نظر و n شماره بازو است. جدول شماره (۱) مدهای انتشار یافته و فاز تحریک بازوها را در آنتن ۴ بازو متناوب لگاریتمی نشان می دهد [۷].

شکل (۲) پترن تشعشی آنتن در مدهای مختلف نشان می دهد. همان گونه که از این شکل پیداست، $m = \pm 1$ در راستای جدول ۱: فازهای تحریک آنتن ۴ بازو متناوب لگاریتمی و مدهای آن.

پترن تشعشی	بازو ۱	بازو ۲	بازو ۳	بازو ۴	مد
مجموع (چپگرد)	۰	۹۰	۱۸۰	۲۷۰	۱
مجموع (راستگرد)	۰	۲۷۰	۱۸۰	۹۰	-۱
مد اختلاف LP در مدوله شده (چپگرد)	۰	۱۸۰	۰	۱۸۰	۲

باعث افزایش سطح آنتن و پیچیدگی ساختار تغذیه می شود. در این مقاله آنتن مونوپالسی نوین بر پایه آنتن متناوب لگاریتمی (LP) ۴ بازوئه برای ایجاد قطبش دایروی دوگانه با مد اختلاف و مد مجموع راستگرد و چپگرد معرفی شده است. در این ساختار جدید، نشان داده خواهد شد که اصلاح آنتن LP چهار بازوئه با استفاده از روش مدولاسیون عرض دندانه‌ها، شرایط ایجاد یک آنتن مونوپالسی با قطبش دایروی را فراهم می آورد. در آنتن پیشنهادی، از آنجاییکه تعداد بازوهای آنتن افزایش نیافته و از ۴ بازو استفاده می شود، لذا تحقق تغذیه آنتن مذکور نیز به سادگی امکان پذیر است.

به این منظور، آنتن متناوب لگاریتمی معمولی بررسی و مدهای ایجاد شده در این آنتن تحلیل می شود. سپس آنتن LP با عرض دندانه‌های مدوله شده معرفی و هم چنین مشخصات آن با آنتن متناوب لگاریتمی معمولی مقایسه می شود.

۲- اصول آنتن متناوب لگاریتمی

۲-۱- ساختار آنتن LP

آنتن متناوب لگاریتمی اولین بار توسط دوهمال معرفی شد [۴]. این آنتن از جمله آنتن‌های شبه مستقل از فرکانس است که، مشخصات آن به صورت متناوب با لگاریتم فرکانس تکرار می شود.

شکل (۱) آنتن متناوب لگاریتمی را نمایش می دهد. در این شکل σ و τ به ترتیب نسبت هندسی ساختار و پهنای شکاف می باشد و مطابق روابط (۱) و (۲) تعریف می شوند:

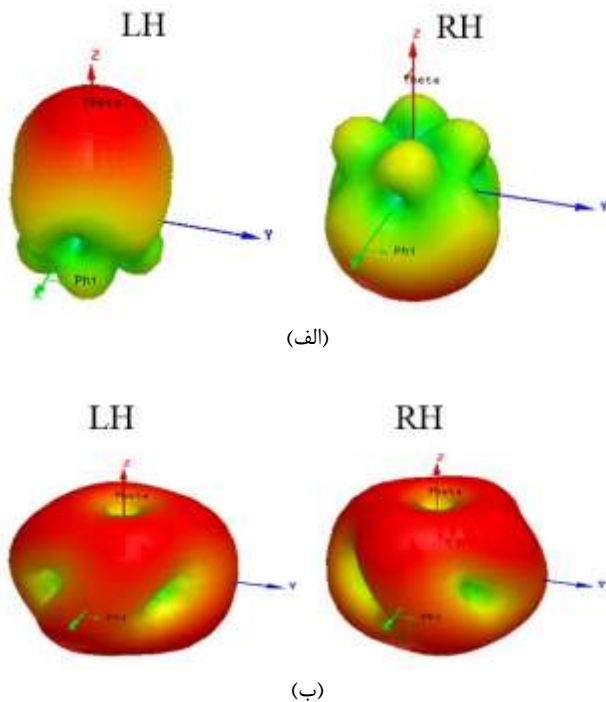
$$\sigma = \frac{R(n)}{r(n)} \quad (1)$$

$$\tau = \frac{R(n)}{R(n+1)} \quad (2)$$

آنتن متناوب لگاریتمی شکل (۱) دارای مشخصات $R_1 = 7 \text{ mm}$ ، $\sigma = 0.78$ ، $\tau = 0.62$ و $\beta = 5$ و $\alpha = 40$ است. هر کدام از دندانه های آنتن LP در فرکانس‌های متفاوتی تحریک شده و تشعشع می نمایند. دندانه‌های کوچکتر در فرکانس‌های بالاتر و دندانه‌های بزرگتر در فرکانس‌های کمتر تشعشع خواهند نمود [۵].

۲-۲- تحلیل مدهای آنتن LP

مدهای ایجاد شده در آنتن متناوب لگاریتمی، وابسته به تعداد بازو های این آنتن و فاز تحریک آنها است. آنتن مذکور به دلیل انتشار جریان در دو راستای راستگرد و چپگرد در بازوهای



شکل ۴: پترن سه بعدی آنتن LP: (الف) $m=1$, (ب) $m=2$

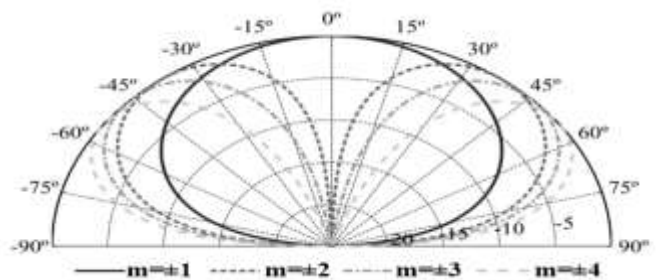
پترن آنتن در $m=-1$ مشابه $m=1$ است با این تفاوت که، بهره مناسب در حالت راستگرد است. شکل (۴-ب) پترن آنتن در مد اختلاف را نشان می‌دهد که مشکل موجود در آن مشابه بودن پترن راستگرد و چپگرد آنتن می‌باشد. با توجه به این موضوع، در این مقاله راه کاری برای حل این مشکل پیشنهاد گردیده است.

در [۲-۳] از تکنیک مدولاسیون پهنای بازوها در آنتن حلزونی استفاده شده است. این روش باعث ایجاد مد مجموع در جهت عکس پیچش بازوها و در نتیجه ایجاد قطبش دوگانه در این آنتن می‌شود. در این مقاله از روش مدولاسیون دندان‌های هر بازوی آنتن LP استفاده می‌شود. مدولاسیون به معنای ایجاد ناپیوستگی مناسب برای بازگشت جریان از مسیر اصلی است که این ناپیوستگی توسط پهن و باریک شدن متناوب دندان‌های هر بازو صورت می‌گیرد. شکل (۵) آنتن متناوب لگاریتمی مدوله شده را نشان می‌دهد. برای ایجاد جریان نابرابر در دو سمت راستگرد و چپگرد و در نتیجه تشکیل پترن اختلاف با ایزولاسیون، از مدولاسیون دندان‌های یک سمت آنتن استفاده می‌شود. m نسبت پهنای قسمت عریض در هر دندان به قسمت باریکتر است که نسبت مدولاسیون نامیده می‌شود. نسبت مدولاسیون بر مشخصات تشعشعی آنتن بسیار تاثیر گذار است. کلیه شبیه‌سازی‌های موجود در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار سه بعدی HFSS انجام شده است. با استفاده از شبیه‌سازی‌های انجام‌شده مقدار بهینه $M=4.5$ برای آنتن مدوله شده در نظر

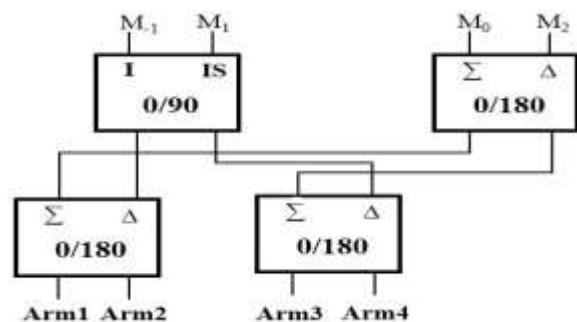
جلو تشعشع دارد و معادل پترن مجموع راستگرد و چپگرد در سیستم مونوپالس است. از $m=\pm 2$ به بعد، صفر به وجود آمده در زاویه $\theta=0$ ، مشابه پترن اختلاف در سیستم مونوپالس می‌باشد. شکل (۳) سیستم تغذیه آنتن متناوب لگاریتمی چهار بازو را نشان می‌دهد. این سیستم ماتریس باتلر 4×4 (Butler matrix) نامیده موجود در شکل (۳) از ترکیب سه هیبرید 180° و یک هیبرید 90° درجه برای ایجاد فازهای مناسب در بازوها تشکیل شده است. این ساختار تغذیه، به دلیل عدم استفاده از شیفت دهنده فاز و استفاده از تعداد کمی هیبرید بسیار مناسب و ساده است [۸]. در صورت تحریک ساختار تغذیه از پورت‌های ورودی مختلف، اختلاف فازهایی مطابق جدول (۱) بین بازوهای آنتن ایجاد می‌شود. آنتن LP از طریق کابل کواکسیال به ساختار تغذیه متصل می‌شود.

۳- ساختار آنتن پیشنهادی

برای درک بهتر از سیستم مونوپالس، مدهای مجموع و اختلاف و مشکل موجود در شکل‌گیری مد اختلاف در آنتن LP پترن سه بعدی آنتن در مدهای مختلف در شکل (۴) رسم شده است. در هر شکل هم بهره قطبش چپگرد (LH) و هم بهره قطبش راستگرد (RH) ارایه شده است. همان طور که مشخص است آنتن در $m=1$ دارای بهره مجموع چپگرد است و در راستای جلو تشعشع دارد.

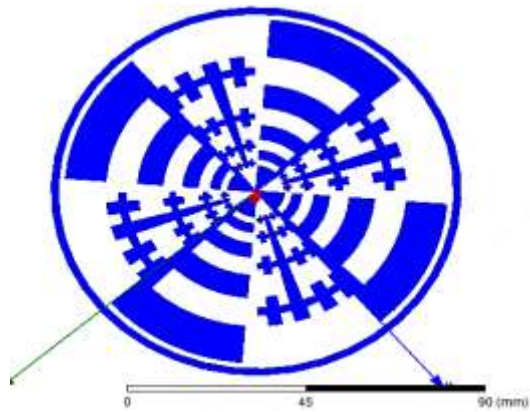


شکل ۵: پترن تشعشعی آنتن متناوب لگاریتمی در مدهای مختلف.



شکل ۶: ساختار کلی تغذیه آنتن LP چهار بازو [۸].

گرفته شده است.



شکل ۷: ساختار آنتن متناوب لگاریتمی مدوله شده نهایی با رینگ.

شکل های (۸) و (۹) به ترتیب نمودارهای بهره بر حسب زاویه θ در آنتن متناوب لگاریتمی معمولی و مدوله شده در مدهای ± 1 و ۲ را نشان می دهد. نمودارها در فرکانس 5 GHz رسم شده اند. برای اطمینان از تشکیل پترن مناسب در همه زاویه ها، پترن تشعشی در 36° زاویه مختلف (p) رسم شده است. همان طور که مشخص است بر اثر تغییر ایجاد شده در ساختار، تغییراتی در پترن تشعشی آنتن در مدهای مختلف ایجاد شده است. شکل های (۹-الف) و (۹-ب)، ایجاد یک گلبرگ کناری در آنتن پیشنهادی دیده می شود. این موضوع ناشی از تغییر مسیر جریان و بازگشت جریان در سمت مخالف است. اما، در حالت کلی می توان پترن مجموع راستگرد و چپگرد قابل قبول برای جهت یابی و استفاده در سیستم مونوپالس بدست آورد. همان گونه که در شکل (۸-ج) دیده می شود، بهره چپگرد و راستگرد در $m=2$ آنتن متناوب لگاریتمی معمولی روی هم قرار گرفته و به همین دلیل باعث ابهام در تعیین راستگرد و یا چپگرد بودن قطبش موج می شود. هم چنین، بهره آنتن در بسیاری از زاویه ها منفی است. لذا به دلیل نداشتن مد اختلاف مناسب نمی توان از این آنتن برای سیستم مونوپالس با قطبش دایروی دوگانه استفاده کرد. اما در $m=2$ آنتن متناوب لگاریتمی مدوله شده (پیشنهادی) بین بهره راستگرد و چپگرد ایزولاسیون مناسبی ناشی از نابرابری ایجاد شده، در انتشار جریان در یک سمت آنتن نسبت به سمت دیگر، به وجود می آید (شکل ۹-ج).

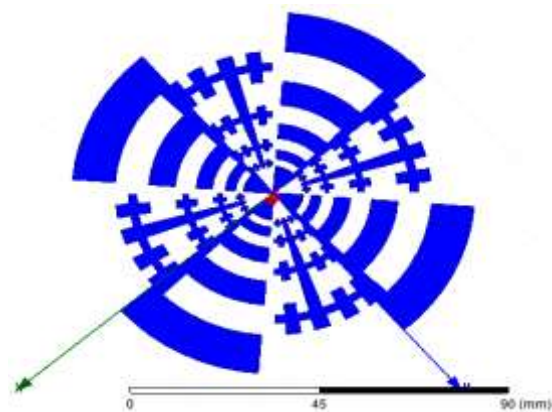
برای نمایش واضح تر تغییر ایجاد شده در آنتن پیشنهادی و مقایسه بهتر با حالت قبل، پترن سه بعدی آنتن در شکل (۱۰) رسم شده است. ایزولاسیون ایجاد شده در مد اختلاف به وضوح دیده می شود. به عبارت دیگر اختلاف چشمگیری بین بهره قطبش راستگرد و چپگرد آنتن در مد اختلاف دیده می شود.

در آنتن پیشنهادی شکل (۵)، به دلیل کوتاه بودن مسیر بازگشت جریان، ایزولاسیون ایجاد شده بین بهره چپگرد و راستگرد در پترن اختلاف مناسب نبوده و کم می باشد. برای رفع این مشکل و ایجاد ناپیوستگی بیشتر و در نتیجه ایزولاسیون بهتر بین پترن چپگرد و راستگرد در مد اختلاف، آنتن اصلاح شده شکل (۶) پیشنهاد می گردد؛ که در آن دندانها در راستای عمودی به هم متصل شده اند.

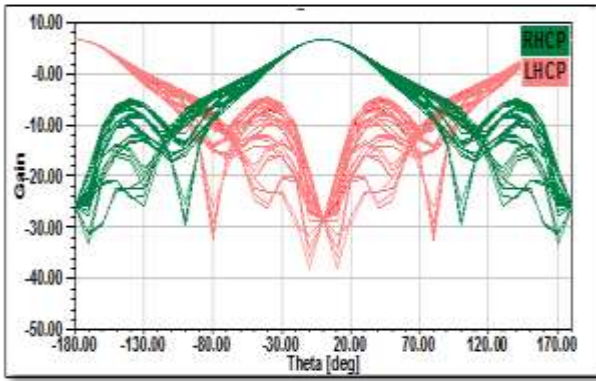
سرانجام در ساختار نهایی که در شکل (۷) ارایه شده است، از یک رینگ پیرامون آنتن متناوب لگاریتمی برای افزایش پهنای باند استفاده شده است. استفاده از این روش در این مقاله، باعث افزایش 10% پهنای باند شده است. w پهنای رینگ و s فاصله بین رینگ و آنتن پارامترهای مهم برای رسم رینگ می باشند. پس از شبیه سازیهای مختلف مقادیر بهینه $w = 2 \text{ mm}$ و $s = 1.7 \text{ mm}$ برای آنتن انتخاب شده است.



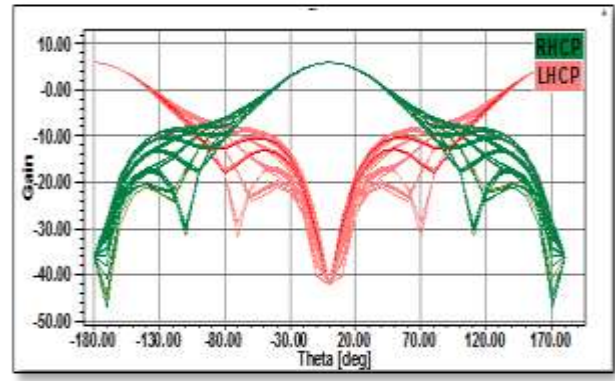
شکل ۵: ساختار آنتن متناوب لگاریتمی مدوله شده.



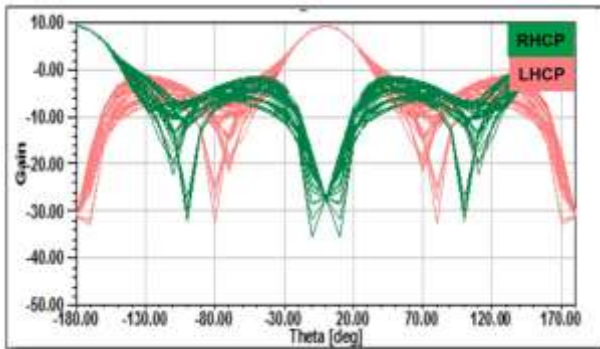
شکل ۶: ساختار آنتن متناوب لگاریتمی مدوله شده اصلاح شده با دندانهای متصل.



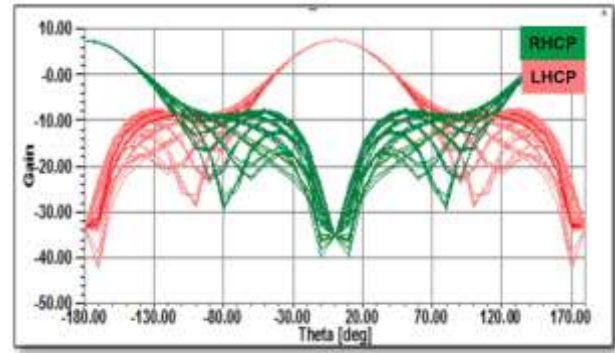
(الف)



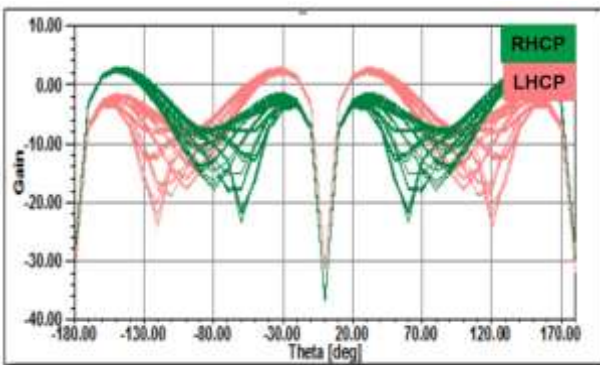
(الف)



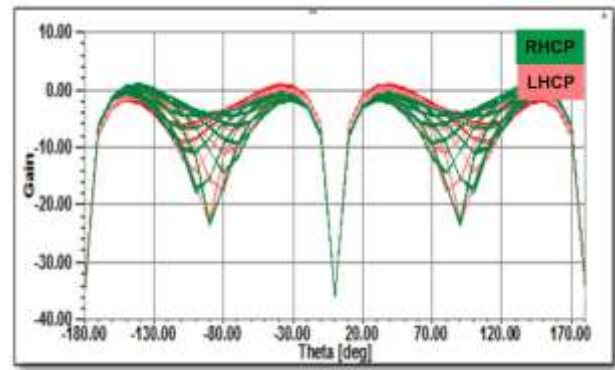
(ب)



(ب)



(ج)

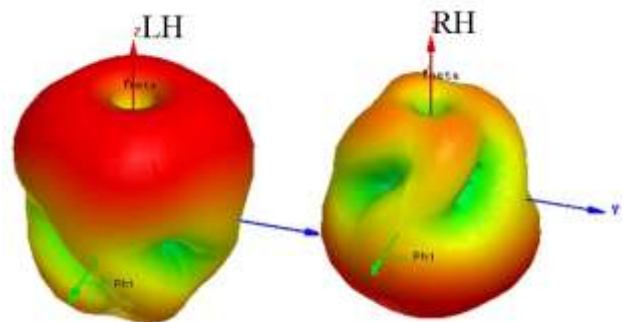


(ج)

شکل ۹: نمودار بهره بر حسب زاویه θ ساختار آنتن متناوب لگاریتمی مدوله شده (الف) $m=-1$ ، (ب) $m=1$ ، (ج) $m=2$.

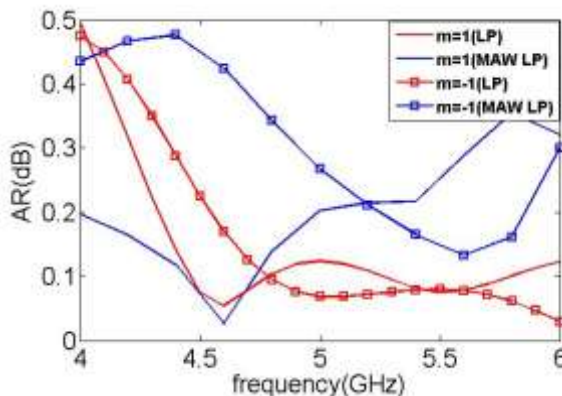
شکل ۸: نمودار بهره بر حسب زاویه θ ساختار آنتن متناوب لگاریتمی معمولی (الف) $m=-1$ ، (ب) $m=1$ ، (ج) $m=2$.

شکل (۱۱) نمودار بهره بر حسب فرکانس مد اختلاف را نشان می‌دهد. نمودارها در زاویه‌ای که بهره آنتن ماکزیمم می‌شود یعنی $\theta=30^\circ$ برای ρ های مختلف رسم شده است. همان گونه که در شکل (۱۱-الف) دیده می‌شود، در آنتن لگاریتمی معمولی، بهره چپگرد و راستگرد تداخل دارند؛ اما در آنتن پیشنهادی، بین بهره راستگرد و چپگرد ایزولاسیون مناسبی ایجاد شده است (شکل (۱۱-ب)). شکل (۱۱-ج) نیز آنتن LP مدوله شده با رینگ است که افزایش پهنای باند در فرکانس بالا در آنتن، قابل رویت است.



شکل ۱۰: پترن سه بعدی آنتن LP مدوله شده در مد ۲.

قابل قبولی برخوردار است. شکل (۱۲) نسبت محوری دو آنتن LP معمولی و مدوله شده در مدهای مختلف را نمایش می‌دهد.



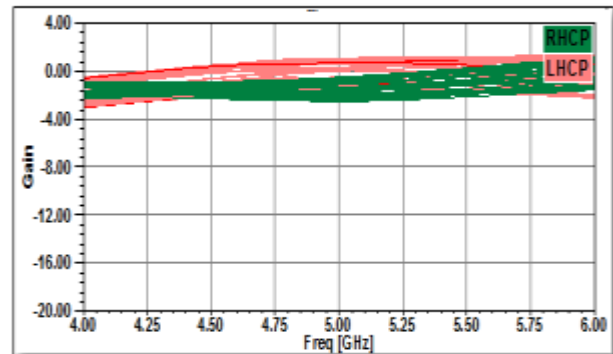
شکل ۱۲: مقایسه نسبت محوری در دو آنتن LP معمولی و مدوله شده.

۴- نتیجه‌گیری

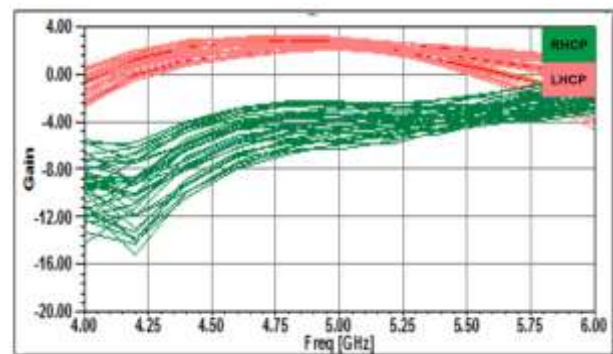
در این مقاله آنتن مونوپالس جدیدی، بر اساس ساختار آنتن متناوب لگاریتمی (LP) با قطبش دایروی دوگانه ارائه شده است. در این ساختار، با استفاده از روش ایجاد ناپیوستگی به صورت تغییر در پهنای دندان‌های یک سمت آنتن متناوب لگاریتمی، مد اختلاف در آنتن LP با ۴ بازو تشکیل و مشخصات آن مورد بررسی قرار گرفته است. در این آنتن با استفاده از یک شبکه تغذیه مناسب می‌توان دو مد مجموع با قطبشهای دایروی راستگرد و چپگرد، همچنین یک مد اختلاف با یکی از قطبشهای راستگرد یا چپگرد بدست آورد.

مراجع

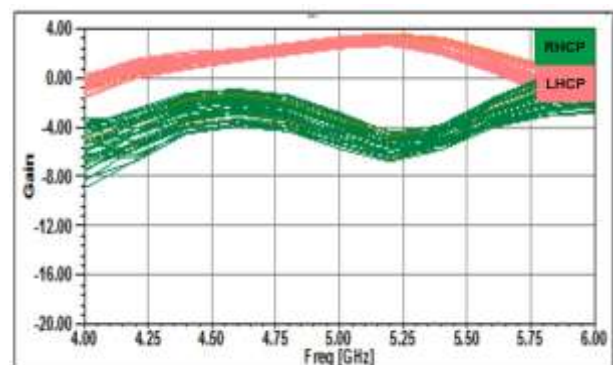
- [1] S. E. Lipsky, *Microwave Passive Direction Finding*. New York: SciTech Publishing, 2004.
- [2] P. G. Ingerson, "Modulated Arm Width Spiral Antenna," U.S. patent 3,681,772, Aug. 1, 1972.
- [3] W. Kefauver, T. Cencich, and D. Filipovic, "Modulated arm width (MAW) spiral: theory, modeling, design and measurements", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 58, no. 11, pp. 3515–3523, Nov. 2010.
- [4] R. H. DuHamel and D. E. Isbell, "Broadband Logarithmically Periodic Antenna Structures," *IRE National Convention Record*, pt. 1, pp. 119–128, 1957.
- [5] Balanis, *Antenna Theory*, 3rd Ed. J. Wiley & Sons, Inc, Hoboken, NJ 2005.
- [6] M. Charles, "Multifunctional, multipolarized sinuous and spiral antennas", *Ph.D. dissertation*, Dept. Elect. Colorado University., Boulder., Colorado, 2007.
- [7] M. J. Radway, "Mode theory of multi-armed spiral antennas and its application to electronic warfare antennas", *Ph.D. dissertation*, Dept. Elect. Colorado University, Boulder, Colorado, 2011.
- [8] W. N. Kefauver and T. P. Cencich and D. S. Filipovic, "On the frequency-independent modes of a four-arm modulated arm Width spiral", *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, Vol. 61, no. 9, pp. 4467–4475, 2013.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۱: نمودار بهره بر حسب فرکانس در مد ۲ (برای $\theta=30^\circ$)
 (الف) آنتن لگاریتمی معمولی، (ب) آنتن لگاریتمی پیشنهادی، (ج) آنتن لگاریتمی مدوله شده به همراه رینگ.

جهت یابی در سیستم مونوپالس با تشکیل نسبت مجموع به اختلاف صورت می‌گیرد. اندازه نسبت فوق زاویه عمودی و فاز مربوط به آن، زاویه افقی را مشخص می‌کند. به دلیل استفاده از نسبت دو مد پهنای باند پترن در این آنتن بسیار مهم است. امپدانس ورودی آنتن LP زیاد است، در نتیجه آنتن پیشنهادی با استفاده از شبکه تطبیق امپدانس و تغذیه مناسب در بازه فرکانسی که پترن تشعشعی مناسب است، از تطبیق امپدانس