

## طراحی و ساخت آنتن پهن باند با قابلیت تنظیم پذیری در قطبش دایروی برای استفاده در لینک‌های ارتباطی در باندهای L و S

مرتضی محمدی شیرکلایی<sup>۱</sup>، مجید جعفری<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده مهندسی برق، دانشگاه هوایی شهید ستاری، m.mohammadi@ssau.ac.ir

<sup>۲</sup>دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شاهد

### چکیده

در این مقاله، آنتن‌های پهن باند با قابلیت تنظیم پذیری در قطبش دایروی برای استفاده در لینک‌های ارتباطی پیشنهاد شده است. برای دستیابی به پهنای باند امیدانسی و قطبش دایروی نسبتاً خوب، المانی پیشنهاد شده است که دارای یک پیچ هلالی شکل و دو خط تغذیه L-شکل می‌باشد. آنتن‌های پیشنهادی این قابلیت را دارند که می‌توانند با استفاده از یک سوئیچ RF که در شبکه تغذیه قرار می‌گیرد، قطبش دایروی چپ-گرد یا راست-گرد ایجاد کنند. دو ساختار تحلیل و شبیه سازی شده‌اند. ساختار اول که یک آنتن منفرد می‌باشد و یک نمونه از آن نیز ساخته شد، دارای پهنای باند اندازه گیری شده امیدانسی ۶۲٪ ( $S_{11} < -10\text{dB}$ ) و نسبت محوری ۴۹٪ ( $AR < 3\text{dB}$ ) می‌باشد. ساختار دوم یک آنتن آرایه‌ای ۲ عنصره با پیچ هلالی شکل و تغذیه L-شکل می‌باشد. در این آرایه از روش تغذیه چرخش متوالی استفاده شده است. با توجه به نتایج شبیه سازی شده ارائه شده، پهنای باند امیدانسی و AR آنتن آرایه‌ای به ترتیب ۶۷٪ ( $1.31-2.62\text{GHz}$ ) و ۶۰٪ ( $1.3-2.4\text{GHz}$ ) بدست آمده که نسبت به آنتن واحد بیشتر است. ماکزیمم گین آنتن آرایه‌ای حدود 10dB در پهنای باند موثر می‌باشد. این آنتن‌ها می‌توانند در لینک‌های ارتباطی، سیستم‌های شنود و فریب باندهای L و S استفاده شوند.

### کلیدواژه

آنتن پیچ هلالی شکل، تغذیه L-شکل، قطبش دایروی، تنظیم پذیری.

### مقدمه

هیبریدهای چهارگانه<sup>۵</sup> نیاز می‌باشد که فضای زیادی را اشغال خواهد کرد. اگر در طراحی و ساخت آنتن محدودیت مکانی وجود داشته باشد، مانند طراحی آرایه، این می‌تواند یک اشکال باشد.

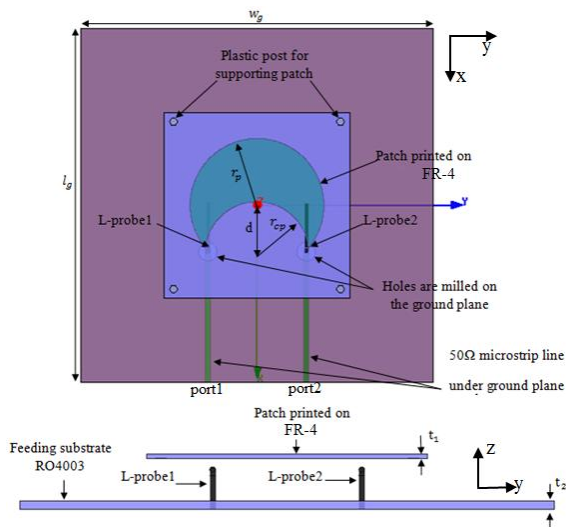
از طرف دیگر در سال‌های اخیر، طراحی آنتن تنظیم پذیر<sup>۶</sup> بین قطبش دایروی چپ-گرد<sup>۷</sup> (LHCP) و راست-گرد<sup>۸</sup> (RHCP) مورد توجه اکثر مهندسين مخابرات قرار گرفته است [۵]-[۸]. آنتن‌ها با قطبش تنظیم‌پذیر معمولاً با استفاده از PIN-دیودهای فرکانس بالا در ساختار تشعشع کننده یا شبکه تغذیه با یک مدار بایاس DC مناسب، طراحی می‌شوند. تمام این آنتن‌ها نیاز به یک منبع تغذیه دقیق DC و موقعیت یابی دقیق دیودها بر روی سطح پیچ یا شبکه تغذیه دارند. همه این موارد

آنتن‌ها با قطبش دایروی<sup>۱</sup> (CP) در بسیاری از کاربردهای مخابراتی مانند ارتباطات ماهواره‌ای و موبایل بی سیم به دلیل امکان انعطاف پذیری بیشتر در زاویه جهت‌یابی بین آنتن‌های فرستنده و گیرنده، تحرک و نفوذ بهتر در شرایط جوی نامناسب، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. محدودیت‌های کلی آنتن‌های پیچ CP، پهنای باند امیدانسی و نسبت محوری<sup>۲</sup> (AR) قابل دستیابی آن‌ها می‌باشد. به طور کلی، تشعشع پهن باند CP آنتن‌ها با روش‌های مختلف تغذیه مانند تغذیه روزنه-ای<sup>۳</sup> و تغذیه پراب L-شکل<sup>۴</sup> ایجاد می‌شود. ساختار این آنتن‌ها بر اساس چندین منبع تغذیه متعامد یا روزنه‌های متعامد ساخته شده است [۱]-[۴]. در این ساختارها، پهنای باند AR افزایش یافته اما به طراحی شبکه تغذیه پهن باند مانند

<sup>۵</sup> Quadrature hybride  
<sup>۶</sup> Reconfigurable antenna  
<sup>۷</sup> Left-hand circular polarization  
<sup>۸</sup> Right-hand circular polarization

<sup>۱</sup> Circular polarization  
<sup>۲</sup> Axial ratio  
<sup>۳</sup> Aperture couple  
<sup>۴</sup> L-shaped probe

زیرلایه توسط چهار نگهدارنده از جنس چوب در ارتفاع ۱۵ میلی‌متری بالاتر از سطح زمین مربعی شکل با ابعاد  $160 \times 160 \text{ mm}^2$  قرار می‌گیرد. زیر لایه شبکه تغذیه از جنس Rogers 4003 با ضخامت  $t_2 = 1.6 \text{ mm}$  می‌باشد. با توجه به مطالب ارائه شده در [۹]، طول و ارتفاع پراب‌های L-شکل به ترتیب ۲۴ میلی‌متر و ۱۱ میلی‌متر است. این پراب‌ها از از سوراخ‌های که روی صفحه زمین ایجاد شده، عبور می‌کنند و به خطوط تغذیه ریزنواری<sup>۱۱</sup> لحیم می‌شوند. به منظور جلوگیری از تماس پراب‌ها به صفحه زمین، دو سوراخ روی فلز صفحه زمین با شعاع  $r_{cg} = 4 \text{ mm}$  ایجاد می‌شود. با تحریک پراب ۱ وقتی که پراب ۲ به بار تطبیق بارگذاری شده است، قطبش LHCP می‌تواند ایجاد شود. از طرف دیگر، قطبش RHCP می‌تواند با تحریک پراب ۲ در حالی که پراب ۱ تطبیق شده است، ایجاد شود. بنابراین، تنظیم‌پذیری قطبش به سادگی با تغذیه به پراب‌های تعیین شده می‌تواند به دست آید. در نتیجه آنتن پیشنهادی می‌تواند به همراه یک سوئیچ RF که برای تغییر مسیر تغذیه طراحی می‌شود، قابلیت تنظیم‌پذیری قطبش داشته باشد. شکل ۲ شماتیک یک RF سوئیچی را نشان می‌دهد که می‌تواند جهت تنظیم‌پذیری قطبش آنتن استفاده شود.



شکل ۱ شماتیک آنتن پیشنهادی با قطبش دایروی

الگوی تشعشعی<sup>۹</sup> و قطبش میدان را خراب می‌کند و همچنین به شبکه پیچیده بایاس نیاز دارد. با این وجود، پهنای باند با  $S_{11} < -10 \text{ dB}$  و  $AR < 3 \text{ dB}$  به طور معمول کمتر از ۱۰٪ می‌باشد. در این مقاله، در ابتدا یک آنتن پهن باندی شکل<sup>۱۱</sup> پهن باند با قطبش دایروی که می‌تواند بین قطبش LHCP و RHCP قابل تنظیم باشد ارائه شده است. دو پراب L-شکل برای تحریک یک پهن باندی شکل استفاده شده است. با تحریک یکی از این دو پراب L-شکل در حالی که پراب دیگر به بار تطبیق بارگذاری باشد، الگوی تشعشعی LHCP یا RHCP حاصل می‌شود. برای طراحی یک آنتن که بتواند در پهنای باند فرکانس زیادی کار کند، به ساختاری نیاز می‌باشد که در آن چند رزونانس ایجاد شود. یک پهن باند با سطح تابشی خمیده مانند پهن باندی شکل پیشنهادی می‌تواند چنین نیاز را برآورده سازد. هنگامی که دو پراب L-شکل موازی با یکدیگر قرار می‌گیرند با تحریک یک پورت مقداری از انرژی به پورت دوم که به اصلاح جریان توزیع شده روی پهن باند می‌کند انتقال می‌یابد و قطبش دایروی با پهنای باند AR نسبتاً خوب تولید می‌کند. یک نمونه از این آنتن ساخته شده و نتایج اندازه گیری آن با نتایج شبیه سازی بدست آمده از طریق نرم افزار HFSS مقایسه شده است. در انتها برای دستیابی به پهنای باند AR بیشتر، آنتن آرایه‌ای  $2 \times 1$  که از روش تغذیه چرخش متوالی استفاده می‌کند، طراحی شده است. با توجه به نتایج شبیه سازی، پهنای باند AR آنتن آرایه  $3 \times 1$  ۶۰٪ برای حالت LHCP و ۶۴٪ برای حالت RHCP بدست آمده که نسبت به آنتن واحد بیشتر است.

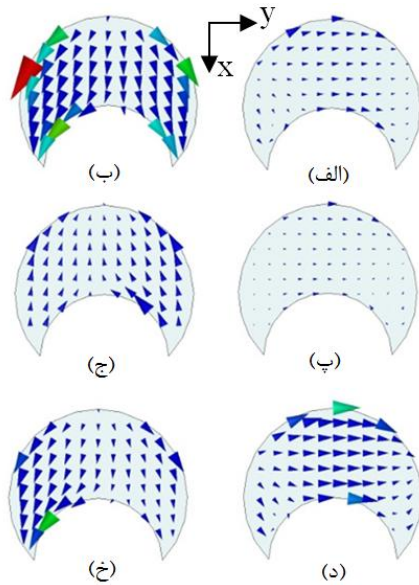
## طراحی آنتن

شکل ۱ هندسه آنتن پیشنهادی را نشان می‌دهد. معمولاً برای طراحی یک آنتن با تغذیه L-شکل همانگونه که در مراجع [۵] و [۹] ارائه شده، ارتفاع پهن باند از صفحه زمین حدود  $0.1\lambda_0$ ، طول افقی تغذیه L-شکل حدود  $0.18\lambda_0$ ، طول عمودی آن  $0.08\lambda_0$  و قطر پهن باند حدود  $0.45\lambda_0$  می‌باشد. با در نظر گرفتن فرکانس رزونانس  $2.14 \text{ GHz}$  ( $\lambda_0 = 140 \text{ mm}$ ) یک مقادیر حدودی برای ابعاد آنتن طراحی شده بدست می‌آید. با جایگذاری اولیه این مقادیر و سپس بهینه سازی پارامترهای آنتن براساس روش تمام موج، ابعاد نهایی آنتن به شرح زیر بدست می‌آید:

پهن باندی شکل دارای شعاع  $r_p = 36 \text{ mm}$  است و توسط یک دایره دیگر با شعاع  $r_{cp} = 26 \text{ mm}$  با فاصله بین مراکز دایره  $d = 26 \text{ mm}$  مختل می‌شود. پهن باندی شکل روی زیر لایه FR4 با ضخامت  $t_1 = 0.8 \text{ mm}$  و ثابت دی الکتریک  $\epsilon_r = 4.4$  چاپ شده است. این

<sup>۹</sup> Radiation pattern  
<sup>۱۱</sup> Falcate patch

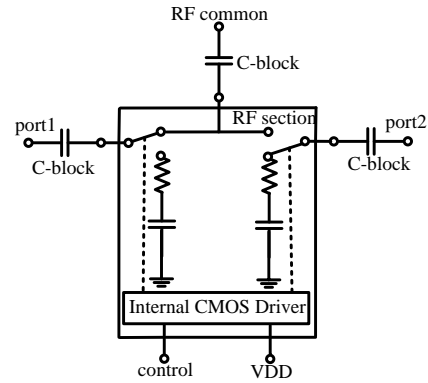
<sup>۱۱</sup> Microstrip



شکل ۳ تاثیر پراب‌ها روی توزیع جریان پج (الف) تحریک پراب ۱ در  $t=0$  (ب) تحریک پراب ۱ در  $t=T/4$  (پ) تحریک پراب ۲ در  $t=T/4$  (ج) تحریک پراب ۱ در  $t=T/2$  (د) تحریک پراب ۱ موقعی که پراب ۲ تطبیق شده است در  $t=0$  (خ) تحریک پراب ۱ موقعی که پراب ۲ تطبیق شده است در  $t=T/4$

### نتایج اندازه گیری و شبیه سازی

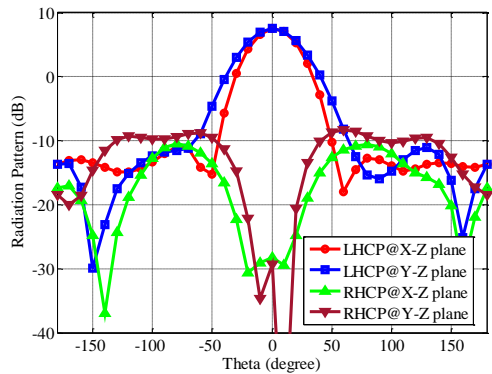
عملکرد آنتن توسط نرم افزار شبیه سازی تجاری Ansoft HFSS مورد بررسی قرار گرفت. یک نمونه از آنتن طراحی شده جهت تایید نتایج شبیه سازی ساخته شده است. عکس آنتن ساخته شده در شکل ۴ نشان داده شده است. در این مقاله نتایج اندازه گیری شده برای حالتی هست که پورت ۱ (پورت سمت چپ) تحریک و پورت ۲ (پورت سمت راست) به بار ۵۰ اهم تطبیق شده است. این شرایط برای حالتی هست که تشعشع LHCP ایجاد می شود. از آنجائیکه ساختار آنتن پیشنهادی نسبت به صفحه  $\phi = 0^\circ$  متقارن می باشد در نتیجه تشعشع RHCP از نظر پهنای باند مشابه LHCP می شود. تلفات برگشتی اندازه گیری شده و شبیه سازی شده در شکل ۵ با هم مقایسه شده اند. پهنای باند امپدانس اندازه گیری شده، در حالت LHCP، ۶۲٪ (1.4-2.67GHz) می باشد. پهنای باند اندازه گیری شده AR، در این حالت نیز ۴۹٪ (1.45-2.4GHz) است (شکل ۶). شکل ۷ الگوهای تشعشعی اندازه گیری شده در صفحات X-Z و Y-Z را در فرکانس 2.1GHz برای حالت LHCP نشان می دهد. همانگونه که مشاهده می شود گین این آنتن در این فرکانس برابر 7.75dB می باشد.



شکل ۲ شماتیک RF سوئیچ قابل استفاده در آنتن پیشنهادی جهت دستیابی به تنظیم پذیری قطبش

در صورتیکه پج هلالی شکل با یک پراب تحریک شود، جریان القایی بر روی پج به گونه ای است که در پهنای باند فرکانسی وسیع، دارای مولفه های نابرابری بوده و قطبش خطی<sup>۱۲</sup> حاصل می شود. با افزودن پراب دوم در حالی که به بار تطبیق بارگذاری شود، به دلیل تغذیه موازی، مقداری توان از پراب تحریک شده به پراب تطبیق منتقل می شود. به عنوان مثال در شکل ۳ اثر هر پراب در فرکانس 2.1GHz ترسیم شده است. شکل ۳ (الف) و (ب) توزیع جریان را به ترتیب در  $T=0$  و  $t=T/4$  روی پج موقعی که پراب سمت چپ تحریک شده است، نشان می دهد. جایی که  $T$  دوره زمانی را نشان می دهد. با توجه به شکل، هنگامی که فاز منبع تحریک برابر با صفر درجه باشد، بردار جریان با اندازه کوچک در جهت  $y$  می باشد (شکل ۳ (الف))، در حالی که فاز برابر ۹۰ درجه باشد بردار جریان بزرگتری در جهت  $x$  ایجاد می کند (شکل ۳ (ب)). با تحریک پراب سمت راست در  $t=0$ ، بردار جریان با اندازه کوچک در جهت  $y$  تولید می شود (شکل ۳ (پ))، در حالی که در  $t=T/4$ ، بردار جریان بزرگتری در خلاف جهت  $x$  ایجاد می کند (شکل ۳ (ج)). توزیع جریان روی پج هنگامی که پراب ۱ تحریک و پراب ۲ به بار تطبیق شده است در لحظات  $t=0$  و  $t=T/4$  به ترتیب در شکل ۳ (د) و (خ) نشان داده شده است. توزیع جریان در این دو حالت با هم برابر، عمود بر هم، اختلاف فاز ۹۰ درجه می باشد. در نتیجه تحت این شرایط، تشعشع LHCP ایجاد خواهد شد. به همین صورت در صورتیکه پراب ۲ تحریک و پراب ۱ به بار تطبیق شود، تشعشع RHCP ایجاد خواهد شد. بنابراین با مونتاژ یک RF سوئیچ روی شبکه تغذیه آنتن پیشنهادی که شماتیک آن در شکل ۲ نشان داده شده است برآحتی می توان از ساختار ارائه شده یک آنتن پهن باند تنظیم پذیر در قطبش دایروی طراحی کرد.

<sup>۱۲</sup> Linearize polarization

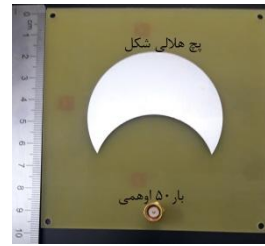


شکل ۷ الگوی تشعشی اندازه گیری شده آنتن پیشنهادی در حالت LHCP و فرکانس 2.1GHz

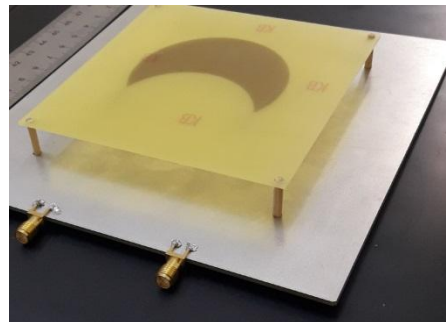
### طراحی آنتن آرایه‌ای ۱\*۲

با توجه به بخش قبل، از آنجائیکه آنتن واحد پیشنهادی دارای پهنای باند امپدانسی (۶۲٪) بیشتری نسبت به پهنای باند AR (۴۹٪) می‌باشد، این قابلیت وجود دارد که از این آنتن پهنای باند بیشتری با قطبش دایروی گرفت. یکی از روش‌ها برای افزایش پهنای باند قطبش دایروی، استفاده از روش تغذیه چرخش متوالی بصورت آرایه‌ای است [۱۰]-[۱۱]. در این روش عناصر آنتن نسبت به یکدیگر از نظر فیزیکی چرخانده شده و با تغییر طول خطوط تغذیه تأخیر فاز در هر پیچ ایجاد می‌شود. یک آنتن آرایه‌ای ۱\*۲ با چرخش متوالی بهینه در شکل ۸ نشان داده شده است. مشخصات زیر لایه و ابعاد مشابه با آنتن هلالی شکل تکی می‌باشد که در بخش‌های قبل به طراحی و بررسی نتایج اندازه‌گیری آن پرداختیم. در آنتن آرایه‌ای در صورتیکه پورت ۱ تحریک شده و پورت ۲ به بار ۵۰ اهم بارگذاری شود قطبش LHCP و برعکس اگر پورت ۲ تحریک شده و پورت ۱ به بار ۵۰ اهم بارگذاری شود قطبش RHCP حاصل می‌شود. بنابراین این آنتن آرایه نیز این قابلیت را دارد که دارای قطبش تنظیم‌پذیر باشد.

تلفات برگشتی آنتن آرایه‌ای ۱\*۲ در شکل ۹ برای حالت‌های LHCP و RHCP نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود این آنتن آرایه‌ای دارای پهنای باند امپدانسی ۷۰٪ (1.33-2.76GHz) برای حالت LHCP و ۶۷٪ (1.31-2.62GHz) برای حالت RHCP می‌باشد. پهنای باند AR آنتن آرایه در حالت LHCP برابر ۶۰٪ (1.3-2.4GHz) و در حالت RHCP برابر ۶۴٪ (1.35-2.63GHz) می‌باشد که دز شکل ۱۰ با آنتن واحد مقایسه شده است. در انتها گین آنتن‌های آرایه‌ای و واحد طراحی شده بر حسب فرکانس در شکل ۱۱ نشان داده شده که به ترتیب دارای بیشینه گین 10dB و 7.75dB در پهنای باند مورد نظر می‌باشد.



(الف)

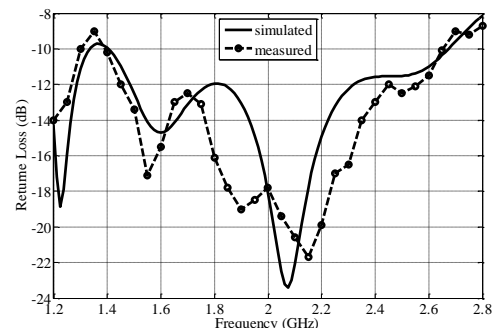


(ب)

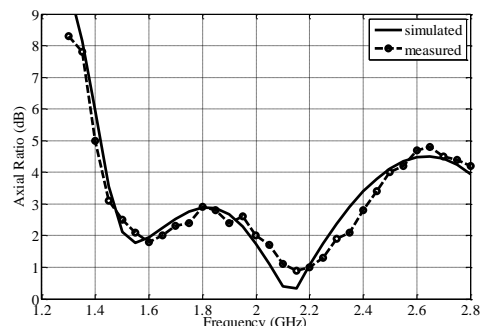


(ج)

شکل ۴ عکس آنتن پهن باند ساخته شده با قطبش دایروی (الف) پیچ هلالی شکل و بار تطبیق استفاده شده (ب) دید سه بعدی آنتن ساخته شده (ج) دید از پهلو آنتن



شکل ۵ تلفات برگشتی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده آنتن پیشنهادی در حالت LHCP



شکل ۶ نسبت محوری اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده آنتن پیشنهادی در حالت LHCP

جدول ۱ یک مقایسه‌ای بین آنتن‌های قطبش دایروی تنظیم-پذیر که در مقالات گذشته چاپ شده است با آنتن‌های طراحی شده در این مقاله را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود آنتن‌های پیشنهادی هم از نظر پهنای باند امیدانسی و هم از نظر پهنای باند AR به مراتب بهتر از کارهای قبلی می‌باشند.

جدول ۱. مقایسه نتایج آنتن‌های پیشنهادی با آنتن‌های قبلی

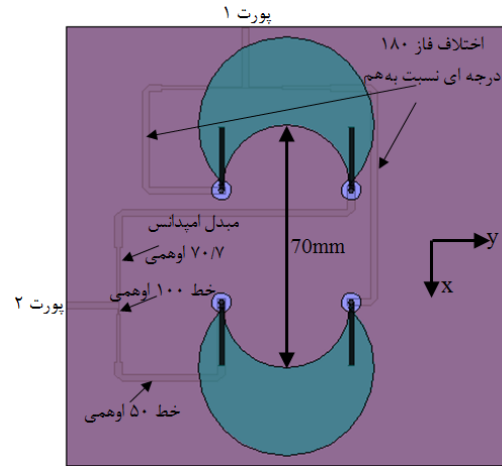
مراجع	فرکانس مرکزی (GHz)	پهنای باند امیدانسی	پهنای باند 3dB-AR
[۱۲]	۱.۵	٪۳۱.۶	٪۲۰.۸
[۱۳]	۱.۶	٪۴۷	٪۲۱.۸
[۱۴]	۲.۵۵	٪۲۲	٪۲۲
آنتن واحد پیشنهادی	۲.۰۴	٪۶۲	٪۴۹
آنتن آرایه در حالت LHCP	۲.۰۴	٪۷۰	٪۶۰
آنتن آرایه در حالت RHCP	۱.۹۷	٪۶۷	٪۶۴

### نتیجه‌گیری

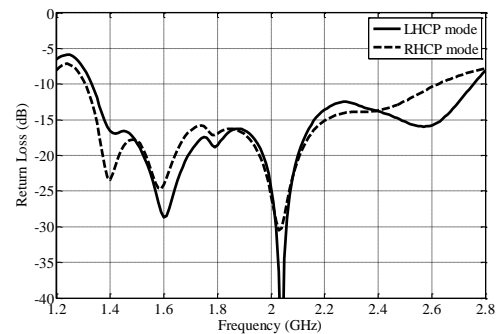
در این مقاله، در ابتدا یک آنتن واحد پهن باند با قابلیت تنظیم پذیری در قطبش دایروی طراحی و ساخته شده است. با توجه به پوشش بیشتر پهنای باند امیدانسی این آنتن نسبت به پهنای باند AR یک آنتن آرایه ۱\*۲ با چرخش متوالی طراحی شده است که از پهنای باند AR بهتری برخوردار است. هر یک از این آنتن‌ها این قابلیت را دارند که می‌توانند با استفاده از یک سوئیچ RF که در شبکه تغذیه قرار می‌گیرد، قطبش دایروی چپ-گرد یا راست-گرد ایجاد کنند. آنتن واحد که یک نمونه از آن ساخته شد، دارای پهنای باند اندازه‌گیری شده امیدانسی ۶۲٪ ( $S_{11} < -10\text{dB}$ ) و نسبت محوری ۴۹٪ ( $AR < 3\text{dB}$ ) می‌باشد. آنتن آرایه ۱\*۲ دارای پهنای باند امیدانسی ۶۷٪ (-1.31-2.62GHz) و پهنای AR ۶۰٪ (1.3-2.4GHz) می‌باشد که نسبت به مقالات گزارش شده قبلی به مراتب بهتر می‌باشد. آنتن‌های پیشنهادی در این مقاله می‌توانند جهت اختلال روی پهپادهای که از GPS استفاده می‌کنند و شنود لینک‌های ارتباطی استفاده شوند.

### مراجع

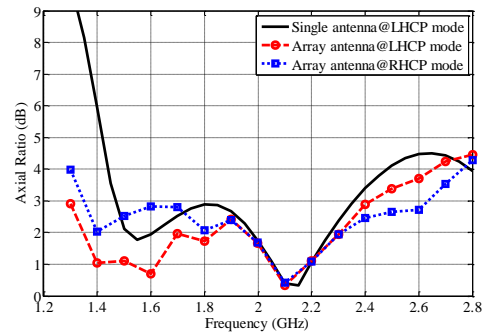
- [1] Y. X. Geo, L. Bian, X. Q. Shi, "Broadband circularly polarized annular-ring microstrip antenna," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 57, no. 8, Aug. 2009.
- [2] S. D. Targonski, and D. M. Pozar, "Design of wideband circularly polarized aperture-coupled microstrip antennas," IEEE Trans.



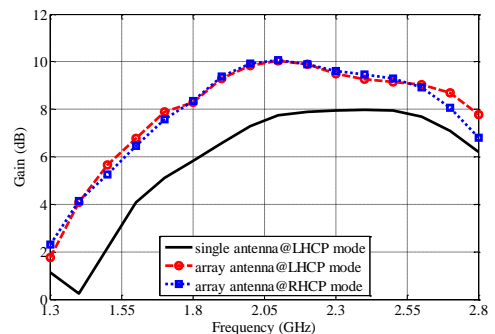
شکل ۸ شماتیک آنتن آرایه ۱\*۲ با چرخش متوالی برای افزایش پهنای باند AR



شکل ۹ تلفات برگشتی آنتن آرایه‌ای ۱\*۲ برای حالت‌های LHCP و RHCP



شکل ۱۰ نسبت محوری شبیه سازی شده آنتن آرایه‌ای ۱\*۲ و آنتن واحد طراحی شده



شکل ۱۱ گین آنتن آرایه‌ای ۱\*۲ و آنتن واحد طراحی شده

- Antennas Propag., vol. 49, pp. 145–149, Feb. 2001.
- [10] T. Fukusako, N. Kitamura, and N. Mita, “Circularly polarized reconfigurable patch antenna using Y-branched feed circuit,” in Proc. IEEE APS Int. Symp., vol. 2B, pp. 597–600, Jul. 2005.
- [11] C.S. Ong, M.F. Karim, L.C. Ong, T.M. Chiam, A. Alphones” A Compact 2x2 Circularly Polarized Antenna Array for Energy Harvesting” Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference 2010.
- [12] W. Lin and H. Wong, “Wideband circular-polarization reconfigurable antenna with L-shaped feeding probes,” IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol. 16, pp. 2114–2117, 2017.
- [13] Lin, S. Chen, R.W. Ziolkowski, and Y. J. Guo, “Reconfigurable, wideband, low-profile, circularly polarized antenna and array enabled by an artificial magnetic conductor ground,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 66, no. 3, pp. 1564–1569, Mar. 2018.
- [14] M. Wang and Q. Chu, “A Wideband Polarization-Reconfigurable Water Dielectric Resonator Antenna,” IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol. 18, no. 2, pp. 402-406, Feb. 2019.
- Antennas Propag., vol. 41, no. 2, pp. 214–220, Feb. 1993.
- [3] L. Bian, Y. X. Guo, L. C. Ong, and X. Q. Shi, “Wideband circularly polarized patch antenna,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 54, pp. 2682–2686, Sep. 2006.
- [4] Yi-Fan Wu, Chun-Hsien Wu, Don-Yen Lai, and Fu-Chiang Chen, “A reconfigurable quadri-polarization diversity aperture-coupled patch antenna,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 55, no. 3, March 2007.
- [5] Ali Khaleghi and M. Kamyab, “Reconfigurable single port antenna with circular polarization diversity” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 57, no. 2, Feb. 2009.
- [6] M. Boti, L. Dussopt, and J. M. Laheurte, “Circularly polarized antenna with switchable polarization sense,” Electron. Lett., vol. 36, no. 18, pp. 1518–1519, Aug. 2000.
- [7] F. Yang and Y. Rahmat-Samii, “A reconfigurable patch antenna using switchable slots for circular polarization diversity,” IEEE microwireless Compon. Lett., vol. 12, no. 3, pp. 96–98, Mar. 2002.
- [8] S. Long, S. Yang, K. M. Luk, “A wideband L-probes fed circularly-polarized reconfigurable microstrip patch antenna,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 56, no. 2, Feb. 2008.
- [9] Y. X. Guo, C. L. Mak, K. M. Luk, and K. F. Lee, “Analysis and design of L-probe proximity fed patch antennas,” IEEE Trans.