

طراحی، شبیه‌سازی و ساخت آنتن آرایه‌ای ریزنوار با قطبش دایروی در باند S

یعقوب حقیان^۱، سیدحسین محسنی ارمکی^{۲*}، مرتضی کازرونی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۲ و ۳- استادیار، مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(تاریخ دریافت: ۹۳/۱۰/۲۵، تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۲/۱۵)

چکیده: در این مقاله، طراحی، شبیه‌سازی و ساخت یک آرایه آنتن با قطبش دایروی در باند S مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. ویژگی آرایه طراحی شده، افزایش پهنای باند امپدانسی و نسبت محوری با استفاده از ساختار گردشی ترتیبی عناصر است. ساختار مذکور علاوه بر مزیت فوق باعث کاهش تزویج متقابل بین عناصر آرایه و تقارن الگوی تشعشعی می‌گردد. عناصر استفاده شده در آرایه، تکه‌های ریزنوار بیضوی شکل می‌باشند که روی زیر لایه RO4003C قرار گرفته است. بهره مدنظر ۱۵ dB بوده که جهت تحقق آن، آرایه آنتن به صورت ۴×۴ طراحی می‌گردد. آنتن مورد نظر پس از طراحی و شبیه‌سازی مورد ساخت واقع شده و نتایج آن با نتایج شبیه‌سازی مقایسه گردیده است. نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری تطابق خوبی با منحنی‌های به دست آمده از شبیه‌سازی دارد.

واژه‌های کلیدی: آرایه آنتن ریزنوار، قطبش دایروی، چرخش ترتیبی.

۱- مقدمه

مشکلات آرایه آنتن‌های ریزنوار تک لایه یا نازک، ضمن پهنای باند اندک امپدانسی، عدم تطبیق دو بازه فرکانسی پهنای باند امپدانسی و نسبت محوری است. جهت رفع این نقیصه در مراجع مختلف چند راه پیشنهاد شده است که عمده‌ترین آن‌ها استفاده از چندلایه به صورت زیرلایه یا رولایه، ساختار تغذیه دوگانه، افزایش ضخامت دی‌الکتریک و ساختارهای فرامواد است [۱۰-۱]. روش‌های فوق اگرچه دارای ویژگی‌های جذابی است، اما سهولت پیاده‌سازی، تک‌لایه بودن آنتن و بعضاً بازدهی آنتن را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

موضوع این مقاله طراحی و ساخت یک آنتن آرایه‌ای با قطبش دایروی می‌باشد. طراحی، شبیه‌سازی و ساخت یک آنتن آرایه‌ای با قطبش دایروی نیاز به اجرای چند مرحله دارد. ابتدا می‌بایست عنصری طراحی گردد که در فرکانس مورد نظر تشعشع نماید. در مرحله دوم می‌بایست قطبش دایروی تولید گردد که این کار از طریق ایجاد بخش‌های آشفتگی^۱ بر روی یک آنتن ریزنوار پایه صورت

با توجه به این که قطبش دایروی، باعث حذف تاثیر جهت‌گیری آنتن در صفحه عمود بر راستای انتشار و بالطبع ایجاد انعطاف در کاربری پیوندهای مخابراتی می‌گردد، از اقبال بسیاری در سامانه‌های مخابراتی برخوردار است. همچنین ویژگی مذکور باعث کاهش تاثیر پذیری ارتباطات متحرک ناشی از شرایط آب و هوایی است. بدین لحاظ آنتن‌های با قطبش دایروی امروزه در کاربردهای مختلف نظامی و صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از طرف دیگر آرایه آنتن‌های مبتنی بر ساختار ریزنوار به دلیل سبکی وزن و سهولت پیاده‌سازی، گزینه مناسبی علی‌الخصوص در سامانه‌های مخابراتی متحرک می‌باشند. در این میان، نکته قابل توجه پهنای باند بسیار اندک عناصر تشعشعی ریز نوار تک‌لایه است.

پهنای باند در آنتن‌های با قابلیت قطبش دایروی دارای دو مفهوم پهنای باند امپدانسی و پهنای باند نسبت محوری می‌باشد. یکی از

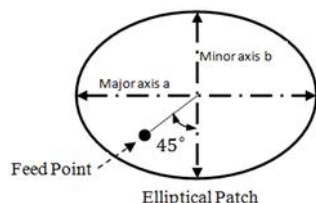
فرض بر آن است که لبه آن به صورت پله‌ای بریده شده است در حالی که در عملیات شیمیایی لبه آنتن به صورت غیر یکنواخت لایه برداری می‌گردد. این نقیصه در لبه‌های تکه مستطیل شکل بیشتر به چشم می‌خورد. بدین لحاظ عنصر تشعشی با محیط خمیده یا منحنی، حساسیت کمتری نسبت به خطاهای پیاده‌سازی، از نقطه نظر اندازه دارد.

۲-۱- آنتن تکه‌ای بیضوی

شکل (۱) یک تکه بیضوی شکل را نشان می‌دهد که خط تغذیه آن با محور فرعی بیضی زاویه ۴۵ درجه می‌سازد. تکه بیضوی را می‌توان به صورت یک تکه دایروی با آشفستگی در نظر گرفت. تحریک دو مود متعامد با اختلاف فاز ۹۰ درجه ناشی از آشفستگی شکل تکه است. یک تقریب خوب برای شعاع تکه دایروی شکل، عبارت است از [۳]:

$$a \approx \frac{F}{\sqrt{1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \left[\ln \left(\frac{\pi F}{2h} \right) + 1.7726 \right]}} \quad (1)$$

$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{f_0 \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$



شکل ۱: آنتن تکه‌ای بیضوی شکل به عنوان عنصر تشعشی [۱۰]

که در آن a شعاع تکه دایروی می‌باشد. برای طراحی آنتن با قطبش دایروی با استفاده از تکه بیضوی با تغذیه تکی، از رابطه ذیل برای محاسبه نسبت بین محور اصلی و محور فرعی استفاده می‌شود [۱۰]:

$$\frac{a}{b} = 1 + \frac{1.0887}{Q} \quad (3)$$

مقدار ضریب کیفیت آنتن Q با استفاده از مدل حفره^۳ قابل محاسبه است. همچنین می‌توان ضریب Q را به صورت تجربی اندازه گیری کرد یا این که برای تخمین Q از نتایج تحلیل الکترومغناطیسی تمام موج استفاده کرد.

$$Q = \frac{f_0 \text{ VSWR} - 1}{\Delta f \sqrt{\text{VSWR}}} \quad (4)$$

خواهد گرفت. همچنین، شکل و ابعاد بخش‌های آشفستگی می‌بایست بهینه شده تا مقدار نسبت محوری کمتر از سه دسی‌بل باشد. در مرحله سوم می‌بایست با استفاده از عنصر ریزنوار طراحی شده، آرایه و شبکه تغذیه مناسب آن طراحی گردد.

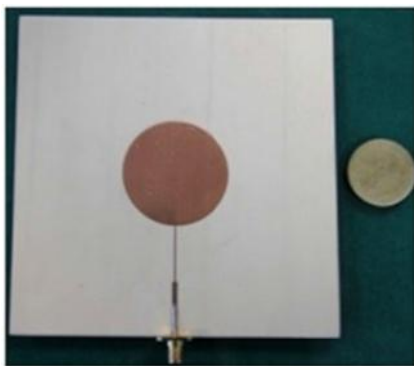
با توجه به معیار بهره بالاتر از ۱۵ dB، آرایه آنتن از چهار زیر آرایه چهار عنصره تشکیل شده که در نهایت یک آرایه 4×4 حاصل می‌گردد. عنصر آرایه یک تکه^۱ بیضوی شکل است. به منظور افزایش پهنای باند در هردو مفهوم و بهبود نسبت محوری از روش چرخش ترتیبی^۲ استفاده می‌شود. روش فوق هم در زیر آرایه و هم در آرایه نهایی مورد تحقق واقع شده است. بدین لحاظ روش چرخش عناصر و زیر آرایه به صورت ترتیبی باعث کاهش تشعشع ناخواسته از شبکه تغذیه، خلوص قطبش دایروی و تقارن الگوی تشعشی می‌گردد.

۲- انتخاب عنصر تشعشی

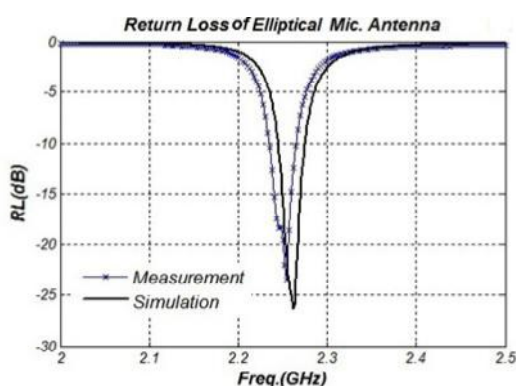
انتخاب عنصر تشعشی تابع عوامل زیادی از جمله پهنای باند، سهولت ساخت و ساختار فیزیکی می‌باشد. از آنجایی که هدف غایی، ساخت آرایه آنتن صفحه‌ای نازک است، عناصر تشعشی بر پایه ریز نوار انتخاب مناسبی هستند. به طور کلی جهت ایجاد قطبش دایروی در عناصر تشعشی تکه‌ای مبتنی بر ساختار ریزنوار، بایستی از تحریک دو مود با اختلاف فاز نود درجه استفاده نمود. تحریک دو مود از دو روش امکان‌پذیر است.

در روش اول آنتن تکه‌ای از دو نقطه مجزا تغذیه می‌شود که این نوع تغذیه باعث پیچیدگی ساختار تحریک، علی‌الخصوص در ساختارهای آرایه‌ای است. روش دوم مبتنی بر آنتن تکه‌ای با تغذیه تک‌نقطه‌ای است. این روش نیازمند آشفستگی در شکل آنتن تکه‌ای می‌باشد. اگرچه تاکنون شکل‌های مختلفی از آنتن تکه‌ای که جهت ایجاد قطبش دایروی به صورت تک تغذیه مورد استفاده قرار گرفته‌اند، ارائه گردیده است اما اساس عملکرد همگی آن‌ها مشابه می‌باشد. مبنای تمامی این روش‌ها، تنظیم مودهای تخریب شده از یک تکه متقارن به وسیله بخش‌های آشفستگی است [۱۰].

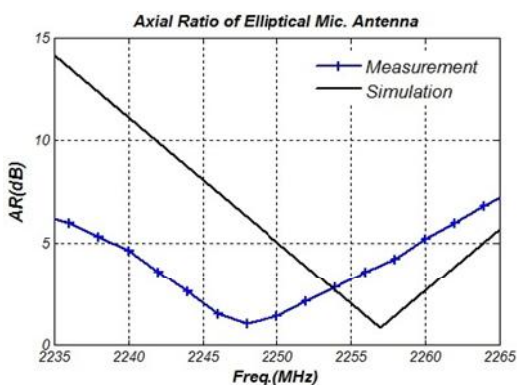
نکته مهم دیگر در انتخاب عنصر تشعشی، سادگی ساخت و حساسیت کم نسبت به خطای پیاده سازی علی‌الخصوص در عملیات لایه‌برداری به صورت شیمیایی می‌باشد. در مدل‌سازی تکه ریزنوار



شکل ۳: آنتن تکه‌ای ریزنوار بیضوی شکل ساخته شده به‌عنوان یک عنصر آرایه



شکل ۴: افت بازگشتی آنتن تکه‌ای بیضوی شکل

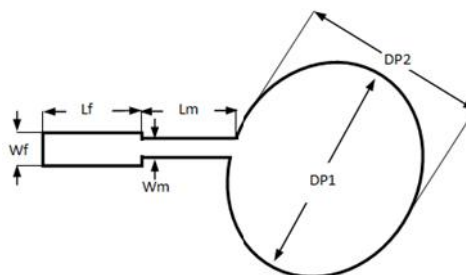


شکل ۵: نسبت محوری آنتن تکه‌ای بیضوی شکل

می‌شود. اما در تحقق آنتن با استفاده از عملیات لایه‌برداری شیمیایی، لبه تکه ریزنوار شیب‌دار شده و باعث خطا در شعاع تکه بیضوی شکل می‌گردد. این خطا دلیل اصلی تفاوت فرکانس مرکزی نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری است.

که در آن F_0 فرکانس تشدید آنتن و ΔF پهنای باند آنتن می‌باشد.

برای دست‌یابی به نسبت محوری مناسب و پهنای پرتو وسیع، ضمن حفظ بازدهی، یک زیر لایه با ثابت دی‌الکتریک پایین ترجیح داده می‌شود. در این طرح زیر لایه RO4003C از شرکت Rogers انتخاب شده‌است که ضخامت آن 0.813 mm و ثابت دی‌الکتریک آن 3.55 می‌باشد. شکل هندسی آنتن تکه بیضوی مطابق مدل نشان‌داده شده در شکل (۲) است.



شکل ۲: مدل آنتن تکه‌ای بیضوی شکل

جدول ۱: پارامترهای بهینه شده آنتن پچ بیضوی

| Dp1 | Dp2 | Wm | Lm | Wf | Lf |
|---------------|---------------|--------------|----------|-------------|---------------|
| 40.1406 mm | 40.6014 mm | 0.4146 mm | 22 mm | 1.776 mm | 19.94 64mm |

ابعاد هندسی نهایی تکه ریزنوار که در فرکانس 2260 مگاهرتز

طراحی و در نرم افزار شبیه‌سازی، بهینه شده است در جدول (۱) ارائه شده است.

به‌منظور صحت آزمایشی شبیه‌سازی و طراحی، یک نمونه عنصر

تشعشی تکه‌ای مطابق مشخصات هندسی جدول (۱) ساخته شده

که شمای فیزیکی آن در شکل (۳) نشان داده شده است. شکل (۴)

منحنی افت بازگشتی و شکل (۵) نسبت محوری را در دو حالت شبیه

سازی و اندازه‌گیری نشان می‌دهد. مطابق نتایج ارائه‌شده، پهنای باند

امپدانسی $1/8$ درصد و پهنای باند نسبت محوری 0.8 درصد محقق

گردیده است. مستند به نتایج شبیه‌سازی، بازده آنتن 70 درصد است

که متعاقب آن بهره 6 dB حاصل می‌شود. فرکانس مرکزی نتایج

شبیه‌سازی و اندازه‌گیری به اندازه 0.4 درصد متفاوت است که این

ناشی از خطای حاصله از عملیات لایه‌برداری شیمیایی می‌باشد. نتایج

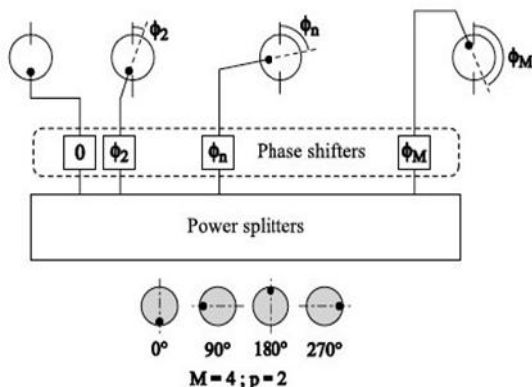
مذکور برای تکه‌های ریزنوار تک لایه مقداری متعارف است [۵-۶].

لازم به‌ذکر است که در شبیه‌سازی لبه‌های تکه ریزنوار به‌صورت

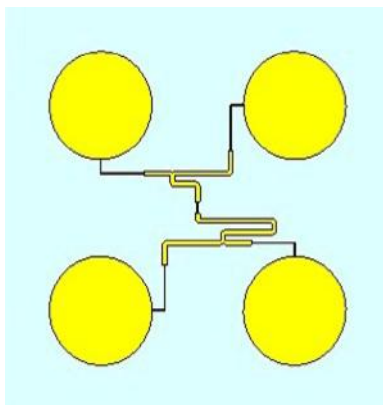
پله، به ارتفاعی در اندازه ضخامت لایه مسی (معمولاً $70 \mu\text{m}$) مدل

۳- آرایه آنتن با قطبش دایروی

توزیع فازها و توزیع توان‌ها با استفاده از خطوط تغذیه و میدل‌های ربع طول موج و تقسیم‌کننده‌های توان حاصل می‌شود. بدین لحاظ با ایجاد تقارن تشعشی، مودهای ناخواسته مرتبه بالاتر حذف شده و قطبشی با خلوص بالاتری به دست می‌آید [۱۳].



شکل ۶: ساختار عمومی چرخش ترتیبی [۱۲]



شکل ۷: زیرآرایه آنتن پیشنهادی به روش چرخش ترتیبی

۳-۱- طراحی آرایه با استفاده از تکنیک چرخش ترتیبی

دوگانه

آرایه نهایی با استفاده از تکنیک چرخش ترتیبی بر روی زیر آرایه چهار عنصره به دست می‌آید. به عبارت دیگر، تکنیک چرخش ترتیبی دوبار استفاده می‌شود. یک‌بار بر روی چهار تکه بیضوی شکل به‌گونه‌ای که زیر آرایه چهار عنصره شکل گیرد و بار دیگر بر روی چهار عدد زیر آرایه چهار عنصره، تا آرایه کلی 4×4 حاصل گردد. آرایه ۱۶ عنصری نهایی در شکل (۸) نشان داده شده است.

نقطه تغذیه، در مرکز آرایه متصل به کانکتور ۵۰ اهم است.

جهت طراحی آرایه با قطبش دایروی دو روش استفاده می‌گردد. روش اول از آرایه‌ی عناصر تشعشی با ویژگی قطبش دایروی استفاده می‌نماید که نقص اصلی آن محدودیت‌های عناصر تشعشی همچون اندک بودن پهنای باند امپدانس و نسبت محوری است. در روش دوم با استفاده از عناصر تشعشی با قطبش دایروی یا حتی خطی می‌توان آرایه‌ای با قطبش دایروی ایجاد کرد. بدین لحاظ هر عنصر آنتن می‌تواند به صورت تکی تغذیه شده و با استفاده از یک شبکه توزیع توان تحریک مناسب را در هر عنصر ایجاد نمود.

اساس این روش مطابق شکل (۶) گردش فیزیکی عناصر و افزایش فاز تحریک آنها در یک روند ترتیبی است. ساختار گردش ترتیبی عناصر توسط حال معرفی شده است [۱۲]. مطابق شکل مذکور هر عنصر ضمن اینکه چرخش فیزیکی دارد با فازهای ترتیبی تغذیه می‌گردد. بدین لحاظ ایجاد قطبش دایروی با عناصر تشعشی حتی دارای قطبش خطی به‌طور حسی قابل تشخیص است.

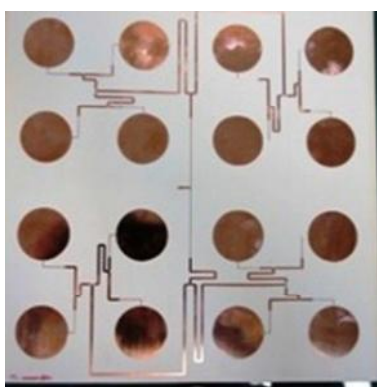
ایشان ثابت نموده است که این ساختار افزایش قابل توجهی در پهنای باند امپدانس و محوری ایجاد می‌کند. در یک نگاه ساده افزایش پهنای باند امپدانس اینگونه قابل توجیه است که سیگنال برگشتی هر عنصر دارای اختلاف فاز 180° درجه با سیگنال اعمالی می‌باشد. بدین لحاظ در نقطه توزیع توان یک آرایه M تایی، جمع سیگنال‌های برگشتی مطابق شکل (۶) از رابطه (۵) تبعیت می‌نماید.

$$V_r = V_i \rho \sum_{n=1}^M \exp(j2\phi_n) \quad (5)$$

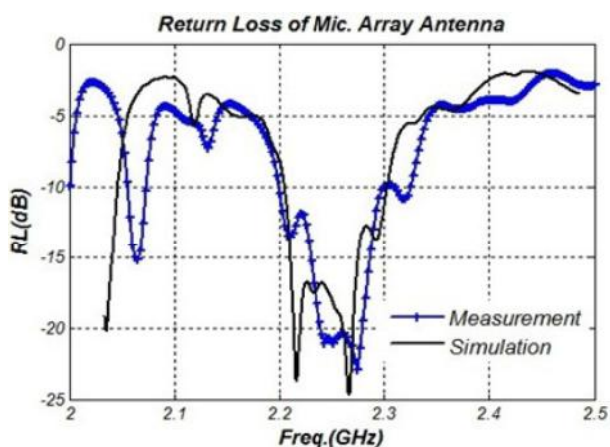
که مقدار آن صفر می‌باشد. این روش باعث کاهش موثر اندازه، پیچیدگی، وزن و تلفات RF شبکه تغذیه آرایه می‌گردد که برای آرایه‌های بزرگ بسیار جذاب است. بدین لحاظ ما جهت ریزآرایه از ساختار پیشنهادی شکل (۷) استفاده نموده‌ایم با این تفاوت که قطبش عناصر، دایروی می‌باشد. در طرح پیشنهادی فاصله بین عناصر 0.5λ طول موج در نظر گرفته شده است. چهار عنصر تشعشی همان تکه‌های بیضوی شکل بخش قبل هستند که با توزیع فاز ترتیبی تغذیه شده‌اند.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک آرایه آنتن ریزنوار مسطح با قطبش دایروی مورد طراحی، شبیه‌سازی و ساخت واقع شد. ویژگی این آنتن افزایش پهنای باند امپدانسی و نسبت محوری در مقایسه با عنصر تشعشعی مطابق نتایج مندرج در جداول (۱) و (۲) است. این ویژگی با استفاده از چرخش ترتیبی دو گانه در عناصر و زیر آرایه حاصل شده است. اثرات دیگر چرخش دو گانه، خلوص قطبش و تقارن الگوی تشعشعی در دو صفحه آنتن است. نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری برهم منطبق بوده و اختلاف بسیار اندک آن ناشی از خطاهای ساخت می‌باشد.



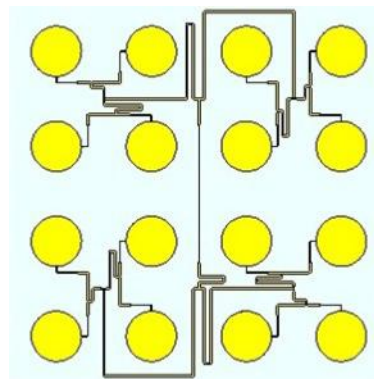
شکل ۹: آرایه آنتن ۴×۴ با چرخش ترتیبی دوگانه تحقق یافته



شکل ۱۰: افت بازگشتی اندازه‌گیری شده آرایه در مقایسه با مقدار شبیه‌سازی

جدول ۲: مشخصات نهایی آرایه آنتن ساخته شده

| fc | BW (RI) | BW (AR) | Gain | HPBW | SLL | Eff. |
|------|---------|---------|------|------|-----|------|
| 2260 | 100 | 67 | 15.5 | 22.5 | 12 | %65 |



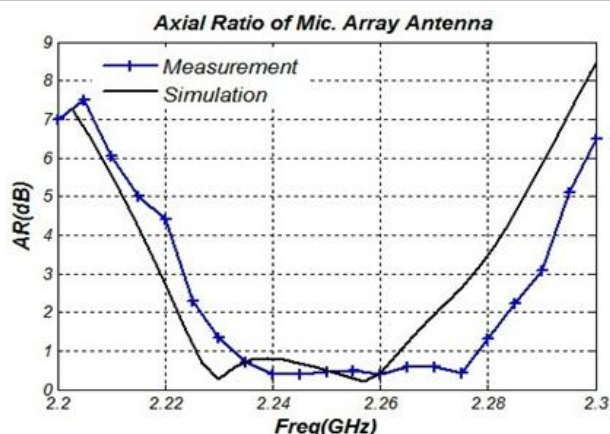
شکل ۸: آرایه آنتن ۴×۴ به روش چرخش ترتیبی دوگانه

متعاقب این نقطه شبکه تغذیه قرار دارد که شامل تقسیم‌کننده‌های توان و مبدل‌های ربع طول موج می‌باشد. ساختار توزیع توان به گونه‌ای است که هم عناصر و هم زیر آرایه‌ها به صورت تریبلی تغذیه می‌شوند.

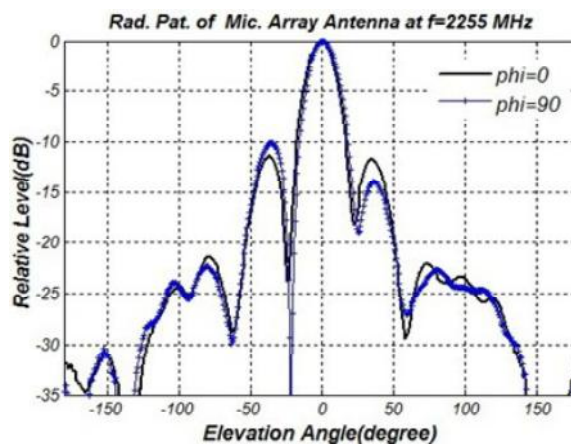
۴- ساخت و ارزیابی آرایه آنتن

پس از شبیه‌سازی و بهینه‌سازی با استفاده از نرم افزار CST Studio Suite، آرایه آنتن ریزنوار ۱۶ عنصره ساخته شد و مورد ارزیابی قرار گرفت. شمای فیزیکی آنتن ساخته شده در شکل (۹) ارائه شده است. شکل (۱۰) نتیجه افت بازگشتی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی و شکل (۱۱) همین نتیجه را برای نسبت محوری نشان می‌دهد. مطابق این دو شکل پهنای باند امپدانسی ۱۰۰ MHz یعنی ۴/۴ درصد و پهنای باند نسبت محوری ۳ درصد حاصل شده است. شکل (۱۲) الگوی تشعشعی اندازه‌گیری شده در صفحات E و H را نشان می‌دهد که کاملاً هر دو الگو با هم متوافق هستند. پهنای پرتو نیم توان، ۲۲/۵ درجه و بهره به دست آمده dB ۱۵/۵ با سطح گلبرگ فرعی dB ۱۰ از مشخصات این آرایه است. تلفات آنتن که مبین ضریب بازدهی آنتن است از دو تلف ناشی از تشعشع گلبرگ‌های فرعی و تلف ناشی از خطوط تغذیه تشکیل می‌شود. مطابق نتایج شبیه‌سازی، مقدار تلف اول dB ۱/۹ و تلف دوم dB ۰/۵ حاصل شده است. با احتساب تلفات فوق، ضریب بازدهی آنتن %۶۵ محاسبه می‌گردد. مشخصه مهم دیگر آرایه سبکی وزن، سهولت پیاده‌سازی و ضخامت بسیار اندک می‌باشد.

- [7] Amritesh and K. M. Singh, "Design of Square Patch Microstrip Antenna for Circular polarization Using IE3D Software," *Bachelor of technology in Electronics and Instrumentation*, India, National Institute of Technology Rourkela, 2002.
- [8] Nasimuddin, "Microstrip Antennas," *InTech.*, April 2011.
- [9] E. G. Lim, "Circular Polarized Microstrip Antenna Design Using Segmental Methods," Degree of Doctor of Philosophy, *Electrical and Electronic Engineering*, University of Northumbria at Newcastle, U.K., 2002.
- [10] S. Gao, Q. Luo, F. Zhu, "Circularly Polarized Antennas," *John Wiley & Sons*, 2014.
- [11] J. Huang, "A Technique for an Array to Generate Circular Polarization with Linearly Polarized Elements," *Antennas and Propagation*, IEEE Transactions on, vol. 34, no. 9, pp. 1113-1124, Sep. 1986.
- [12] P. S. Hall, "Application of Sequential Feeding to Wide Bandwidth Circularly Polarized Microstrip Patch Arrays," *Micro-waves, Antennas and Propagation*, IEE Proceedings, vol. 136, no. 5, pp. 390-398, Oct. 1989.
- [13] A. Chen, Y. Zhang, Z. Chen, and C. Yang, "Development of a Ka Band Wideband Circularly Polarized 64-Element Microstrip Antenna Array With Double Application of the Sequential Rotation Feeding Technique," *Antennas and Wireless Propagation Letters*, IEEE, vol. 10, pp. 1270-1273, 2011.



شکل ۱۱: نسبت محوری اندازه‌گیری شده آرایه در مقایسه با مقدار شبیه‌سازی



شکل ۱۲: الگوی تشعشعی اندازه‌گیری شده آرایه در صفحات E و H

۶- مراجع

- [1] D. Pozar, "Microwave Engineering," *John Wiley and Sons*, New York, 1998.
- [2] R. Garg, P. Bhartia, I. Bahl, and A. Ittipiboon, "Microstrip Antenna Design Handbook," *Artech House*, 2000.
- [3] C. A. Balanis, "Modern Antenna Handbook," Hoboken, NJ, *John Wiley & Sons, Inc.*, 2008.
- [4] M. Shakeeb, "Circularly Polarized Microstrip Antenna," *Master of Applied Science (Electrical Engineering)*, Canada, Concordia University, 2010.
- [5] M. Baharuddin, V. Wissan, J. Sumantyo, H. Kuze, "Elliptical Microstrip Antenna for Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar," *Int. J. Electronic and Communication. (AEU)*, vol. 65, pp. 62-67, Jan. 2011.
- [6] J. Huang, "A Ka-band Circularly Polarized High-gain Microstrip Array Antenna," *Antennas and Propagation*, IEEE Transactions on, vol. 43, no. 1, pp. 113-116, Jan 1995.

**Design, Simulation and Realization of S band Circular Polarization
Microstrip Array Antenna**

Y. Haghian, S. H. Mohseni Armaki*, M. Kazerooni

*Malek Ashtar University of Technology

(Received: 05/01/2015 , Accepted: 05/05/2015)

Abstract

*In this paper, a circular polarization single layer microstrip array antenna is proposed and the performances of the array antenna are confirmed experimentally. Sequential rotation technique has been applied on the array to obtain broad bandwidth in return loss and axial ratio performance. In addition to the above advantage, mutual coupling between elements has been reduced. Elements in array are elliptical shape patch that was implemented on a low loss RT duroid RO4003C substrate. The maximum gain of 4*4 antenna array is achieved about 15 dB. The microstrip array antenna was realized. Measurement result was compared with simulation results. The measured results demonstrate good agreement with simulated results.*

Keywords: Microstrip Array Antenna, Circular Polarization, Sequential Rotation