

طراحی و ساخت یک آنتن آرایه‌ای بازتابنده دو قطبشی برای کاربردهای ماهواره‌ای

علی‌رضا حشمتی معز^۱، سیدحسین صدیقی^{۲*}، محمد سلیمانی^۳ و محمد خلیج امیرحسینی^۴

۱، ۲، ۳ - گروه فناوری ماهواره، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه علم و صنعت ایران

*تهران: کدپستی: ۱۶۸۴۶۱۳۱۱۴

Sedighy@iust.ac.ir

در این مقاله طراحی ساختار آنتن آرایه‌ای بازتابنده‌ای با یک زیر لایه و استفاده از فاصله هوایی در باند فرکانسی Ku و فرکانسی که به دریافت و ارسال سیگنال مخابراتی مدار زمین آهنگ اختصاص یافته مطرح شده است. طراحی آنتن براساس سلول واحد معرفی شده به صورت آرایه 21×21 (هر سلول $11mm \times 11mm$) در نظر گرفته شده است. این آنتن دو پرتو در دو جهت دلخواه مختلف با دو قطبش خطی متعامد در یک فرکانس به دست می‌دهد. در سلول واحد ارائه شده، اضلاع افقی و عمودی سلول در ایجاد پرتو اصلی در دو جهت مستقل و قطبش‌های متعامد مؤثر هستند. به منظور تأیید طراحی ارائه شده، یک نمونه آنتن با قابلیت ایجاد دو پرتو در راستای $(\theta = 30^\circ$ و $\phi = 0^\circ)$ با قطبش افقی و راستای $(\theta = 30^\circ$ و $\phi = 90^\circ)$ با قطبش عمودی طراحی و ساخته شده است.

واژه‌های کلیدی: آنتن آرایه‌ای بازتابنده، قطبش خطی متعامد، پهنای باند مضاعف

علائم و اختصارات

k_0
 (x_i, y_i)

معرف ثابت انتشار در خلاء
بیانگر محل سلول آم

مقدمه

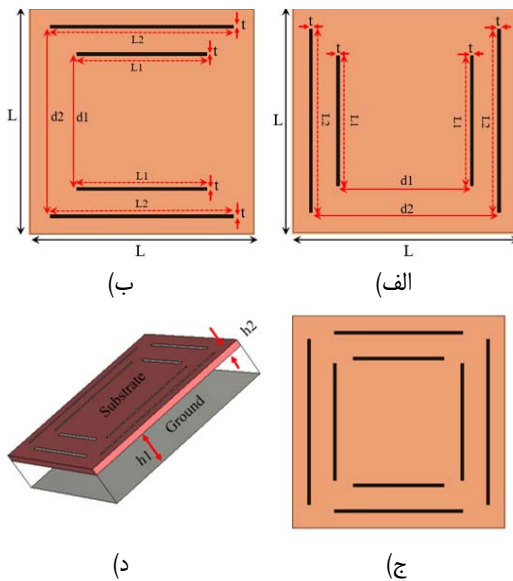
قابلیت‌های خوبی نظیر امکان هدایت پرتو در جهت دلخواه را از خود نشان می‌دهند. در این آنتن‌ها طراحی شبکه تغذیه مناسب برای رساندن فاز مناسب به هر المان و رسیدن به هدف طراحی کار پیچیده‌ای بوده و همچنین شبکه تغذیه از جهت ایجاد تلفات نیز مشکل‌ساز است. با توجه به سطح صاف آنتن‌های آرایه بازتابی پیچیدگی ساخت آنتن‌های بازتابی سهموی را ندارند و همچنین به دلیل استفاده از یک تغذیه فضایی (در اغلب موارد هورن) پیچیدگی طراحی و تلفات بالای شبکه تغذیه در آنتن‌های آرایه‌فازی را ندارند و هزینه ساخت این آنتن‌ها در مقایسه با دو آنتن دیگر نیز بسیار پایین‌تر است. البته از معایب این آنتن‌ها پهنای باند کم آن‌ها است چرا که عناصر تشکیل دهنده آن‌ها پیچ‌های ریزنوری‌اند که ماهیت تشدیدی دارند و پهن باند نیستند [۱، ۲]. از ویژگی‌های خوب آنتن‌های آرایه‌ای بازتابنده که این آنتن‌ها را برای کاربرد فضایی جذاب می‌کند امکان ایجاد دو قطبش خطی متعامد است [۳]. به عبارتی با استفاده از این ویژگی می‌توان از یک پهنای باند دو بار

آنتن‌های آرایه‌ای بازتابنده با استفاده همزمان از ویژگی‌های دو ساختار آنتن‌های بازتابنده سهموی متعارف و آنتن‌های آرایه‌فازی، قابلیت‌های خوبی را از خود نشان می‌دهند. آنتن‌های بازتابی سهموی به دلیل بهره بالا و بازدهی خوبشان بصورت گسترده در سیستم‌های مخابراتی ماهواره‌ای استفاده می‌شوند. اما غیر مسطح بودن این آنتن‌ها باعث افزایش حجم و جرم آنتن و پیچیدگی ساختار مکانیکی آن می‌شود که در نتیجه کاربرد آن در فضا را محدود می‌نماید. آنتن‌های آرایه‌فازی با استفاده از تغذیه مناسب هر المان

۳. استاد
۴. استاد

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد
۲. استادیار (نویسنده مخاطب)

از فاصله هوایی سبب کاهش وزن نسبت به سلول واحدهای داری چند زیرلایه می‌شود. در ساختار پیشنهادی همان طور که در شکل (۱) مشخص است از دو جفت دو قطبی در هر قطبش استفاده شده تا بتوان ۳۶۰ درجه فاز بازگشتی را با شیب مناسب در هر قطبش داشت. هر جفت دو قطبی‌ها به ازای طول $\lambda/2$ رزونانس می‌کنند.



شکل ۱- الف) بخش موثر در قطبش عمودی ب) بخش موثر در قطبش افقی ج) سلول کامل پیشنهادی د) نمای سه بعدی سلول واحد

مقادیر بهینه پارامترهای سلول واحد در جدول ۱ آورده شده است. نمودار دامنه و فاز بازگشتی از سطح سلول واحد به ازای تغییر طول دو قطبی‌ها (L_2) در شکل (۲) آورده شده است. محور عمودی سمت چپ مقدار فاز بازگشتی و محور عمودی سمت راست مقدار دامنه بازگشتی از سطح سلول واحد را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌گردد سلول پیشنهادی محدوده زاویه وسیع مورد نیاز برای طراحی آنتن آرایه بازتابی را پوشش می‌دهد. مقدار تغییر فاز بازگشتی از سطح سلول واحد برحسب تغییر طول دو قطبی‌ها نسبت به مرجع [۸] بهبود یافته و باعث کاهش خطای ساخت می‌شود.

جدول ۱- پارامتر های سلول واحد پیشنهاد شده

| نام پارامتر | معرفی | مقدار (میلی‌متر) |
|-------------|---|-------------------|
| L | طول و عرض سلول | ۱۴ |
| L1 | طول دو قطبی‌های با طول کوچک‌تر روی سلول | $0.7353 \times L$ |
| L2 | طول دو قطبی‌های با طول بزرگ‌تر روی سلول | $0.15 \times L$ |
| T | ضخامت دو قطبی‌های روی | ۰/۲ |

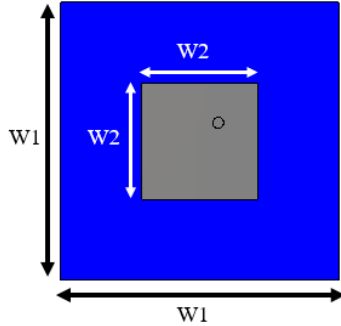
استفاده کرد. برای طراحی آنتن با این ویژگی باید از سلول‌هایی استفاده کرد که توانایی تحت تاثیر قرار دادن مستقل دو قطبش خطی متعامد را داشته باشند. در مرجع [۴] این کار توسط یک سلول واحد یک لایه انجام شده است، اما نقطه ضعف این ساختار نسبت به ساختار مطرح شده در این مقاله عدم پوشش ۳۶۰ درجه فاز بازگشتی از سطح سلول واحد است که قابلیت آنتن برای ایجاد پرتو در راستای دلخواه را محدود می‌نماید. این مسئله در طراحی آنتن‌های با ابعاد بزرگ اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. برای افزایش پهنای باند در آنتن‌های آرایه بازتابی روش‌های مختلفی وجود دارد. به عنوان مثال چند لایه کردن سلول واحد [۵] که مستلزم هزینه بیشتر نسبت به ساختار ارائه شده است، استفاده از چند المان رزونانسی [۶] که در این آرایه از این روش استفاده شده و استفاده از المان‌های القایی [۷] که باعث افزایش هزینه و پیچیدگی ساخت می‌شود از جمله این روش‌ها هستند.

در این مقاله یک سلول واحد با قابلیت ایجاد دو قطبش خطی متعامد برای کاربردهای ماهواره‌ای آرایه شده است. این سلول واحد قابلیت ایجاد دو پرتو اصلی با دو قطبش خطی متعامد در دو جهت دلخواه را دارد. یک آنتن آرایه‌ای بازتابنده نمونه با استفاده از این سلول واحد ساخته و نتایج تست و شبیه سازی آن با هم مقایسه و آرایه شده است. این آنتن یک پرتو با بهره ۲۴/۲dB با قطبش عمودی در جهت $(\theta=30^\circ, \phi=0^\circ)$ و یک پرتو با بهره ۲۳/۷dB با قطبش افقی در جهت $(\theta=30^\circ, \phi=90^\circ)$ ایجاد می‌کند. با توجه به ساختار ساده و یک لایه آنتن در کنار قابلیت آن برای ایجاد دو پرتو همزمان، این آنتن گزینه مناسبی برای بکارگیری در ماهواره‌های مدار زمین آهنگ می‌باشد. همچنین استفاده از یک لایه هوا باعث سبکی آنتن برای بکارگیری آن در کاربردهای ماهواره‌ای می‌گردد. علت استفاده از فرکانس مرکزی ۱۱/۴ GHz در طراحی آنتن این است که این فرکانس در پهنای باند اختصاص داده شده به سرویس ماهواره‌ای ثابت (FSS) برای برقرار ارتباط داده در شبکه‌های VSAT می‌باشد. در شبکه VSAT، ماهواره‌های زمین آهنگ برای برقراری ارتباط مخابراتی با سطح زمین به بهره بالایی با توجه به فاصله آنتن از سطح زمین و اندازه‌ی معمول آنتن‌های گیرنده‌های زمینی احتیاج دارند. آنتن ساخته شده و ارائه شده دارای بهره‌ی بالای حدوداً ۲۴dB می‌باشد که برای اثبات عملکرد سلول واحد در ایجاد دو قطبش متعامد آورده شده است.

معرفی سلول پیشنهادی

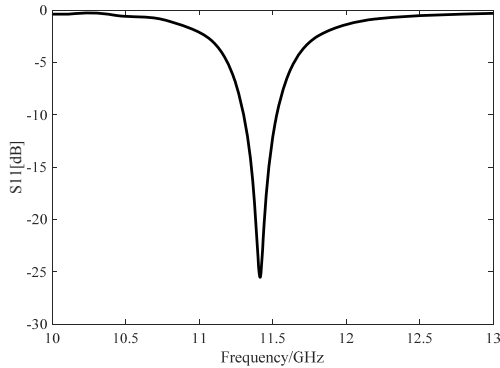
در این آرایه سلول واحدی معرفی می‌شود که قابلیت موثر واقع شدن در دو قطبش خطی متعامد را به طور مستقل داراست. در شکل (۱) سلول پیشنهادی آورده شده است. زیر لایه به کار گرفته شده در این سلول واحد Rogers-Ro4003 با ضخامت 0.508 میلی‌متر است که با یک فاصله هوایی بر روی یک صفحه زمین قرار گرفته است. استفاده

که ϵ_f آن برابر با $3/55$ است و محل تغذیه نیز روی قطر آنتن است استفاده شده تا هر دو قطبش عمودی و افقی تحریک شوند. آنتن تغذیه در شکل (۳) آورده شده است. در این شکل $w_1=15$ mm و $w_2=6/25$ mm و ضخامت زیر لایه $0/508$ میلی متر است.

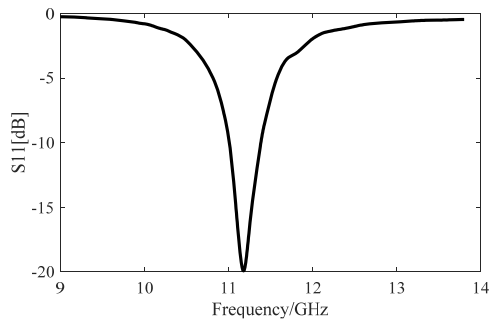


شکل ۳- آنتن تغذیه آنتن آرایه‌ای بازتابنده.

منحنی پارامتر $|S_{11}|$ مربوط به منبع تغذیه در شکل (۴) آورده شده که نشانگر تطبیق خوب امپدانس آنتن در فرکانس مدنظر است. منحنی پارامتر $|S_{11}|$ در حالتی که آنتن تغذیه روبروی بازتابنده قرار داده می شود در شکل (۵) نشان داده شده است و همانطور که مشخص است کمی تغییر در محل رزونانس داشته است.

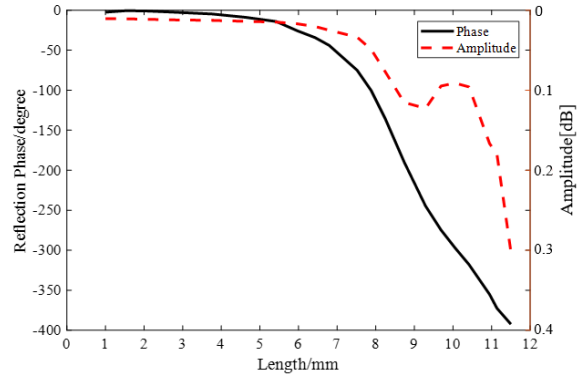


شکل ۴- منحنی مربوط به $|S_{11}|$ تغذیه آنتن آرایه‌ای بازتابنده



شکل ۵- منحنی مربوط به $|S_{11}|$ تغذیه آنتن آرایه‌ای بازتابنده در حالتیکه روبروی بازتابنده قرار دارد

| نام پارامتر | معرفی | مقدار (میلی متر) |
|-------------|--------------------------|------------------|
| | سلول | |
| d1 | فاصله دو قطبی‌های داخلی | ۸/۲ |
| d2 | فاصله دو قطبی‌های بیرونی | ۱۱/۶ |
| h1 | ضخامت دی الکتریک | ۰/۵۰۸ |
| h2 | ضخامت لایه هوا | ۲/۵ |



شکل ۲- منحنی فاز و دامنه بازگشتی از سطح سلول برحسب طول دو قطبی‌های عمودی.

عامل دیگری که برای سلول واحد به کار گرفته شده برای دو قطبش متعامد خطی مهم است تلفات بازتابی است. هرچه دامنه مقدار بازتاب شده از سطح سلول به یک (۰dB) نزدیک تر باشد به این معنی است که مقدار بیشتری از موج ارسال شده به سطح سلول بازتاب شده و مقدار کمی از موج تلف می شود [۹]. به طور کلی ما در آنتن آرایه‌ای بازتابنده به دنبال بازتابش حداکثری هستیم. آرایه‌های دارای عناصر رزونانسی مانند سلول‌های دارای دو قطبی نسبت به سلول‌هایی که به صورت پیج های دارای دنباله اند تلفات کمتری ایجاد می کنند [۱۰، ۱۱]. در شکل (۲) منحنی دامنه بازتابی بر حسب تغییر طول آورده شده است. همانطور که ملاحظه می شود، میزان تلفات بازتاب به ازای طول‌های مختلف دو قطبی (L_2) تغییرات اندکی داشته و نزدیک به ۰dB می باشد.

آنتن آرایه‌ای بازتابی با دو قطبش خطی متعامد

یک آنتن آرایه‌ای بازتابی مربعی 21×21 با تعداد ۴۴۱ سلول برای ایجاد دو پرتو با دو قطبش خطی متعامد که یکی در جهت $\phi = 0^\circ$ و $\theta = 30^\circ$ و دیگری در جهت $\phi = 90^\circ$ و $\theta = 30^\circ$ در فرکانس $11/4$ گیگا هرتز که تلفات محیط هوا برای کاربردهای ماهواره‌ای زیاد نیست و با $f/D = 0/7$ طراحی کرده‌ایم. برای تشکیل ساختار آنتن از متصل کردن نرم افزار MATLAB و CST استفاده شده است. برای تغذیه آنتن آرایه‌ای بازتابی نیز از یک آنتن پیج مربعی ساده با زیر لایه Rogers-Ro4003

محاسبه‌ی توزیع فاز در سطح آنتن آرایه بازتابی

پس از طراحی سلول واحد با امکان ایجاد دو قطبش متعامد در فرکانس موردنظر و طراحی آنتن تغذیه با مشخصات مورد نیاز، بایستی توزیع فازی مناسب برای طراحی آرایه استخراج شود.

با توجه به تئوری آرایه‌ها، مقدار فاز مورد نیاز برای ایجاد پرتو در جهت دلخواه (θ_0, ϕ_0) برای هر المان از رابطه (۱) به دست می‌آید.

$$\phi(x_i, y_i) = -k_0 \sin \theta_0 \cos \phi_0 x_i - k_0 \sin \theta_0 \sin \phi_0 y_i \quad (1)$$

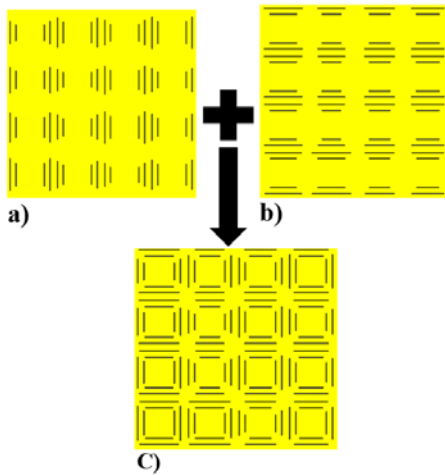
در رابطه (۱) k_0 معرف ثابت انتشار در خلأ و (x_i, y_i) بیانگر محل سلول i ام می‌باشد. فاز موج بازتاب شده از سطح هر سلول برابر است با مجموع فاز موج دریافتی هر سلول واحد و مقدار شیفت فاز اعمال شده توسط هر سلول واحد که این مفهوم با رابطه (۱) بیان شده است.

$$\phi(x_i, y_i) = -k_0 d_i + \phi_R(x_i, y_i) \quad (2)$$

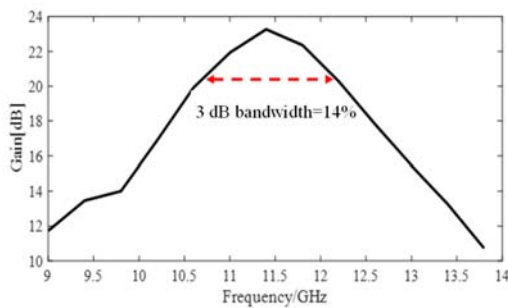
آنتن‌های آرایه بازتابی توسط یک آنتن تغذیه به صورت فضایی تغذیه می‌شوند. بنابراین اختلاف فاز ناشی از تفاوت مسیرهای مرکز فازی آنتن تغذیه تا المان‌های تشعشی روی سطح آنتن آرایه بازتابی باید جبران شود. در رابطه (۲) مقدار d_i فاصله هر سلول واحد روی سطح آرایه بازتابی از مرکز فازی آنتن تغذیه و $\phi_R(x_i, y_i)$ فاز ضریب بازتابی عنصر i ام است. از روابط (۲) و (۳) میزان جابجایی فاز اعمال شده توسط هر سلول واحد به منظور ایجاد پرتو در جهت دلخواه (θ_0, ϕ_0) به دست می‌آید و رابطه (۳) نشان‌دهنده‌ی این مقدار است. توزیع فاز داده شده در این رابطه را می‌توان با تغییر یکی از پارامترهای سلول واحد (چرخش، تغییر طول و ...) به دست آورد.

$$\phi_R(x_i, y_i) = -k_0 (d_i - (\cos \phi_0 x_i + k_0 \sin \phi_0 y_i) \sin \theta_0) \quad (3)$$

به عبارت دیگر در آنتن آرایه‌ای بازتابی با توجه به موقعیت هر سلول یک فاز برای آن سلول به دست می‌آید تا اختلاف فاز ناشی از اختلاف مسیر جبران شود. با توجه به این فاز به دست آمده و با استفاده از شکل (۲) اندازه L_2 را می‌توان به دست آورد. در شکل (۶) این شیوه طراحی برای دو قطبش خطی متعامد با توجه به استقلال عملکرد دو قطبسی‌های عمودی و افقی در ایجاد پرتوهای مختلف ارائه شده است. بعد از آن که هر دو جفت دو قطبسی مربوط به قطبش عمودی و افقی با هم در یک سلول قرار داده شد، آنتن تغذیه در فاصله‌ای که از رابطه $F/D = 0.7$ بدست می‌آید از مرکز آرایه قرار گرفته و شبیه‌سازی انجام می‌شود. شایان ذکر است که با توجه به تزویج متقابل بین المان‌های آرایه، بایستی تنظیمات جزئی برای رسیدن به مشخصات مطلوب انجام شود. نمودار پهنای باند آنتن شبیه‌سازی شده در شکل (۷) نمایش داده شده است که نشانگر پهنای باند ۱۴٪ در فرکانس مرکزی ۱۱/۴ گیگا هرتز است.

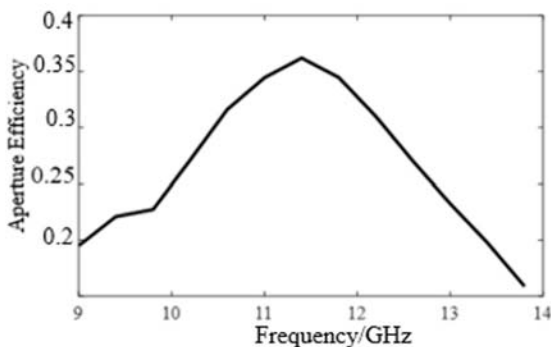


شکل ۶- (a) طراحی مولفه‌ی عمودی برای پرتو در جهت $\theta = 30^\circ$ و $\phi = 0^\circ$ (b) طراحی مولفه‌ی افقی برای پرتو در جهت $\theta = 30^\circ$ و $\phi = 90^\circ$ (c) ساختار کامل متشکل از عناصر مؤثر در قطبش عمودی و قطبش افقی

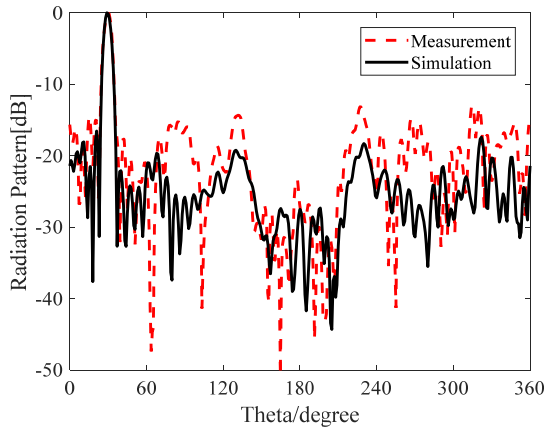


شکل ۷- پهنای باند آنتن آرایه ای بازتابی ارایه شده

نمودار بازدهی این آنتن در شکل (۸) نمایش داده شده است. مقدار راندمان در فرکانس مرکزی طراحی آنتن همانطور که مشاهده می‌شود ۳۶٪ است و این مقدار راندمان با دور شدن از فرکانس طراحی آنتن به تدریج کاهش می‌یابد. از مقایسه شکل (۸) و شکل (۷) که نمودار بهره‌ی آنتن در آن رسم شده است می‌توان مشاهده کرد که دور شدن از فرکانس طراحی باعث کاهش بهره و راندمان به یک نسبت شده است.



شکل ۸- نمودار بازدهی برحسب فرکانس (فرکانس طراحی ۱۱/۴ GHz)



(ب)

(ادامه) شکل ۱۰- مقایسه نتایج شبیه سازی و ساخت پرتو میدان دور نرمالیزه (الف) در جهت $(\theta=0^\circ, \phi=90^\circ)$ و (ب) در جهت $(\theta=30^\circ, \phi=90^\circ)$ و $(\theta=30^\circ)$ با قطبش افقی.

نتیجه گیری

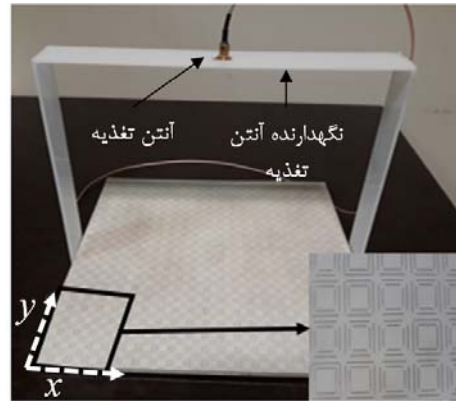
در طرح ارائه شده با استفاده از استقلال بخشیدن اضلاع سلول واحد دو رینگه دو قطبش خطی متعامد ایجاد شده است. با استفاده از سلول واحد پیشنهادی یک آنتن آرایه‌ای بازتابنده با دو قطبش خطی متعامد با دو پرتو در دو جهت در فرکانس ۱۱/۴ گیگا هرتز طراحی و ساخته شد. مقدار بهره در شبیه‌سازی برای هر دو قطبش ۲۴/۲ dB بوده که در نمونه تست شده این مقدار در قطبش عمودی ۲۴/۲ dB و در قطبش افقی ۲۳/۷ dB به دست آمد. نتایج تست و شبیه سازی تطابق خوبی را نشان دادند. این آنتن در کاربردهای فضایی برای استفاده از دو قطبش خطی متعامد در یک پهنای باند فرکانسی به منظور استفاده مجدد از پهنای باند دارای مزیت می‌باشد.

مراجع

- [1] Huang, J. and Antonio Encinar, J., *Reflectarray antennas*. 13th Ed., Vol. 30. John Wiley & Sons, 2007.
- [2] Huang, J., "Bandwidth study of microstrip reflectarray and a novel phased reflectarray concept." In: *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. 1995 Digest*. IEEE, 1995. p. 582-585.
- [3] Florencio, R. and et al. "Reflectarray antennas for dual polarization and broadband telecom satellite applications," *IEEE Transactions on antennas and propagation*, Vol. 63, No. 4, 2015, pp.1234-1246.
- [4] Guo, L., Tan, P. Kh. and Chio, T.H., "Single-layered broadband dual-band reflectarray with linear orthogonal polarizations." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 64. No. 9, 2016, pp. 4064-4068.

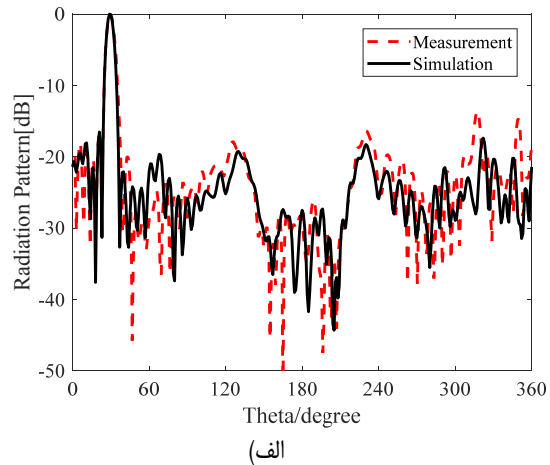
ساخت و تست

آنتن ساخته شده در شکل (۹) آورده شده است. از یک پایه از جنس پلی اتیلن که دارای ϵ_r کمی است برای نگه داشتن آنتن تغذیه استفاده شده و برای ایجاد فاصله هوایی از حلقه‌های تفلون نازک بین لایه زمین و برد Ro4003 استفاده شده است.



شکل ۹- آنتن ساخته شده

شبیه‌سازی و طراحی برای آنتن آرایه‌ای بازتابی در فرکانس مرکزی ۱۱/۴GHz و ابعاد ۰/۳ m جهت ایجاد قطبش عمودی در جهت $(\theta=0^\circ, \phi=90^\circ)$ و ایجاد قطبش افقی در جهت $(\theta=30^\circ, \phi=90^\circ)$ انجام شده است و آنتن ساخته شده تست نیز شده است و نتایج مقایسه شبیه‌سازی و تست آنتن در شکل (۱۰) ارائه شده که هم‌خوانی خوبی را با هم نشان می‌دهند.



(الف)

شکل ۱۰- مقایسه نتایج شبیه سازی و ساخت پرتو میدان دور نرمالیزه (الف) در جهت $(\theta=0^\circ, \phi=90^\circ)$ و (ب) در جهت $(\theta=30^\circ, \phi=90^\circ)$ با قطبش افقی.

- dipole elements,” *Progress in Electromagnetics Research*, Vol. 66, 2016, pp. 11-20.
- [9] Chang, D.Ch. and Huang, M. Ch., “Multiple-polarization microstrip reflectarray antenna with high efficiency and low cross-polarization.” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 43, No. 8, 1995, pp. 829-834.
- [10] Gonzalez, D., Gerald, G., Pollon, E. and F. Walker, J., "Microwave phasing structures for electromagnetically emulating reflective surfaces and focusing elements of selected geometry." U.S. Patent No. 4,905,014. 27 Feb. 1990.
- [11] Targonski, S. D. and Pozar, D. M., “Analysis and design of a microstrip reflectarray using patches of variable size,” In: *Proceedings of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium and URSI National Radio Science Meeting. IEEE*, 1994, pp. 1820-1823.
- [5] Encinar, J. A. “Design of two-layer printed reflectarrays using patches of variable size,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 49, No. 10, 2001, pp. 1403-1410.
- [6] Florencio, R., Encinar, J., R. Boix, R. and Perez-Palomino, G., “Dual-polarisation reflectarray made of cells with two orthogonal sets of parallel dipoles for bandwidth and cross-polarisation improvement.” *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, Vol. 8, No. 15, 2014, pp. 1389-1397.
- [7] Carrasco, E., Barba, M., and A. Encinar, J., “Reflectarray element based on aperture-coupled patches with slots and lines of variable length.” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 55, No. 3, 2007, pp. 820-825.
- [8] Fei, X., Wang, H. and Yi, M., “Design of X/Ku dual-band dual-linear polarization reflectarray using double parallel