مجله علمی- پژوهشی «الکترومغناطیس کاربردی»

سال دوم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۳؛ ص ۶-۱

طراحی و ساخت آنتن آرایه بازتابی دوقطبشی در باند X

محبوبه محمودی[1*]، سمیه چمانی[2]

۱- کارشناس ارشد مخابرات میدان‌ها و امواج، دانشگاه صنعتی خواجه نصرالدین طوسی

۲- استادیار، دانشکده برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت: ۹۲/۰٤/۲۵، تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۰/۲۱)

چکیده: در این مقاله یک تک سلول جدید برای آنتن آرایه بازتابی به‌منظور ایجاد دو قطبش خطی در باند X و فرکانس مرکزی ۱۰/۷ GHz ارائه شده‌است. این تک سلول با استفاده از تغییر طول دنباله الحاقی فاز مورد نیاز برای آنتن آرایه بازتابی را کنترل می‌کند که دارای دامنه ضریب بازتاب کمتر از ۰/۱۴ dB است. هم‌چنین سطح قطبش متعامد این عنصر برای تابش عمود کمتر از ۶۰ dB- و شیب مشخصه فاز آن در فرکانس مرکزی $0/113\ \mu m/^{\circ}$ است. در طراحی آن از مدل فلوکه در نرم افزار CST MWS استفاده شده‌است. یک آنتن آرایه بازتابی ۱۳ ×۱۳ با استفاده از تک سلول پیشنهادی در فرکانس ۱۰/۷ گیگا هرتز طراحی، ساخته و اندازه‌گیری شده‌است. این آنتن به حداکثر بهره ۲۲/۵ dB با ۴۳/۸٪ بازدهی روزنه، ۱۳٪ پهنای باند بهره ۱ dB و قطبش متعامد کمتر از ۲۲ dB- برای الگوی تشعشعی صفحه E و H در اندازه‌گیری دست یافت.

واژه‌های کلیدی: آنتن آرایه بازتابی، آنتن آرایه بازتابی دو قطبشی خطی، پهنای باند، سطح قطبش متعامد.

۱- مقدمه

آنتن آرایه بازتابی یکی از انواع آنتن با بهره بالاست که ایده اصلی آن از آنتن‌های بازتابنده و آرایه‌های فازی گرفته شده است و مزایای این دو دسته آنتن را با هم در ساختار خود دارد. این آنتن برخلاف آنتن بازتابنده دارای حجم و وزن کم و ساخت آسان است، هم‌چنین نیازی به شیفت‌دهنده‌های فاز پرهزینه آرایه‌های فازی ندارد [۱]. اما نقص عمده این آنتن پهنای باند کم آن است که به دو دلیل است:

۱- پهنای باند محدود عنصر تشعشعی که معمولاً پچ مایکرواستریپی است. ۲- اختلاف فاز فضایی بین آنتن تغذیه با هر یک از عناصر آرایه [۲]. این آنتن شامل آرایه‌ای از عناصر تشعشعی و یک آنتن تغذیه، که سطح آرایه را روشن می‌کند، است. برای داشتن یک بیم شکل یافته در میدان دور آنتن نیاز است هر یک از عناصر با توجه به موقعیت‌شان روی سطح آرایه و فاصله آن‌ها از آنتن تغذیه فاز مشخصی داشته باشند. این فاز با توجه به نوع قطبش از چندین روش مختلف تأمین می‌شود، مثلاً برای قطبش خطی از تغییر یکی از پارامترهای عنصر تشعشعی (اندازه پچ، طول دنباله الحاقی، طول دوقطبی، شعاع حلقه و ...) و برای قطبش دایروی از تغییر زاویه چرخش عنصر استفاده می‌شود [۱].

یکی از کاربردهای آرایه‌های بازتابی، آرایه بازتابی با امکان ایجاد دوقطبش است که این آنتن‌ها در سیستم‌های مخابراتی، ماهواره‌های فضایی و ایستگاه‌های زمینی به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. این آنتن‌ها به‌علت کاهش اثرات محوشدگی چند مسیری باعث افزایش در ظرفیت کانال می‌شوند. در آنتن آرایه بازتابی

* رایانامه نویسنده مسئول: mahmoodi_mahboobeh@ee.kntu.ac.ir

با دوقطبش خطی نیاز است عناصر آن بتوانند در هر دو قطبش عمودی و افقی به‌طور مستقل از یکدیگر موج دریافتی را قطبیده کنند.

در [۳] یک تک سلول دوقطبشی بر اساس پچ‌های روزنه تزویجی با دو پشته، معرفی شده‌است. این عنصر دارای پاسخ فاز خطی و سطح قطبش متعامد مناسب است که توانسته به دامنه ضریب بازتاب با میانگین ۰٫۱۵ dB- و مولفه قطبش متعامد کمتر از ۲۰ dB- برای هر دو قطبش دست یابد.

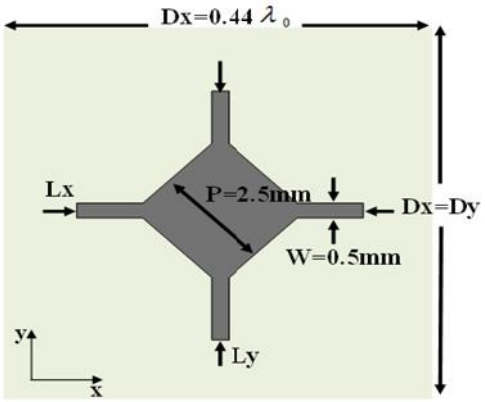
در [۴] ساختار پیشنهادی با استفاده از ایجاد تقارن در آرایه و به کار بردن عناصر با خطوط تأخیر فاز، قطبش متعامد کمتر از ۲۵ dB ایجاد شده است. [۵] یک تک سلول با خطوط تأخیر فاز پیشنهاد داده‌است که دارای قطبش متعامد کمتر از ۵۰ dB- است. سپس با استفاده از این تک سلول (که 500^{o} جابه‌جایی فاز دارد) در آرایه و با چیدمان خاص عناصر و ایجاد تقارن توانسته به سطح قطبش متعامد کمتر از ۲۰dB در بازه فرکانسی ۱۰٫۷ تا ۱۲٫۵ گیگا هرتز و همچنین پهنای باند ۱ dB در محدوده ۱۰٫۹ تا ۱۱٫۶ گیگا هرتز دست‌یابد.

در این مقاله عنصر جدیدی به‌عنوان تک سلول آنتن آرایه بازتابی دوقطبشی خطی پیشنهاد شده است. این عنصر دارای قطبش متعامد کمتر از ۶۰ dB- در کل محدوده باند X و تلفات بازتابی کمتر از ۰٫۱۴ dB- با میانگین کمتر از ۰٫۰۵ dB- برای تابش عمود است که در مقایسه با [۳]، علاوه بر سادگی ساختار و قیمت پایین‌تر، از تلفات بازتابی و قطبش متعامد کمتری برخوردار است. در مقایسه با عنصر پیشنهادی [۵] قطبش متعامد این تک سلول در سطح پایین‌تری قرار دارد.

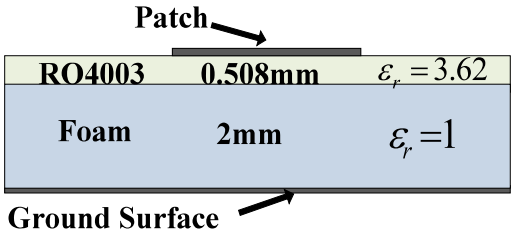
در مرحله بعد، سلول پیشنهادی در آرایه‌ای با ۱۶۹ عنصر استفاده شد. آنتن ساخته‌شده دارای حداکثر بهره اندازه‌گیری‌شده ۲۲٫۵ dB و بازدهی روزنه ۴۳٫۸٪ بوده و پهنای باند ۱ dB آن ۱۳٪ است. پهنای باند این آرایه با توجه به این که عنصر مورد استفاده در آرایه جابه‌جایی فاز کمتر از 360^{o} دارد، قابل ملاحظه است. پهنای باند این آرایه در مقایسه با پهنای باند [۶-۵] قابل قبول است. با تعریف نسبت حداکثر قطبش مطلوب به حداکثر قطبش متعامد به‌عنوان سطح قطبش متعامد [۷]، سطح قطبش متعامد اندازه‌گیری شده در صفحه E و H کمتر از ۲۲ dB است. در ادامه ساختار تک سلول و نتایج آن به‌طور کامل تشریح خواهد شد. سپس آرایه متشکل از این عنصر و عملکرد آن بررسی می‌شود.

۲- ساختار تک سلول

ساختار تک سلول پیشنهادی در شکل (۱) نمایش داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، ساختار این عنصر شامل یک پچ مربعی به اندازه ضلع p= ۲٫۵ mm است که ۴۵ درجه نسبت به محور اصلی چرخش دارد و شامل دو خط عمودی و افقی در راستای محور x (L_x) و محور y (L_y) به عرض w= ۰٫۵ mm است. با تغییر طول خط L_x می‌توان فاز مورد نیاز را برای قطبش x و با تغییر طول خط L_y فاز لازم برای قطبش y را کنترل کرد. پچ توصیف شده بر روی زیرلایه RO4003 که دارای ضریب گذردهی ۳٫۶۲ و تانژانت تلفات ۰٫۰۰۲۷ و ضخامت ۰٫۵۰۸ mm است، قرار گرفته است. همچنین یک لایه فوم بین زیرلایه RO4003 و صفحه زمین به ضخامت ۲ mm واقع شده است. ساختار مذکور در باند X و به ازای فرکانس مرکزی ۱۰٫۷ GHz طراحی شده است. ابعاد بهینه تک سلول ۰٫۴۴ λ_0 × ۰٫۴۴ λ_0 است.



الف

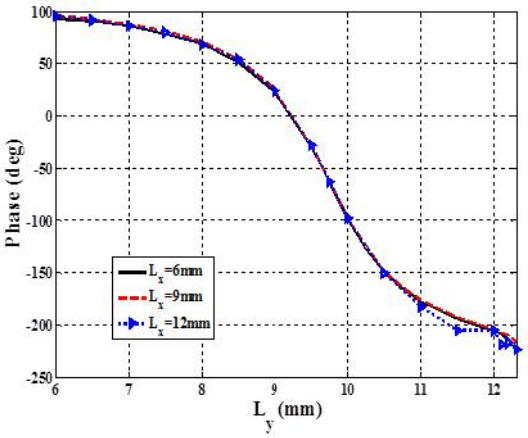


ب

شکل ۱: نمای تک سلول (الف) نمای از بالا، (ب) نمای دو بعدی

شکل (۲) مشخصه‌های فاز را برای قطبش y بر حسب L_y وقتی که L_x= ۶،۹،۱۲ mm است، نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه

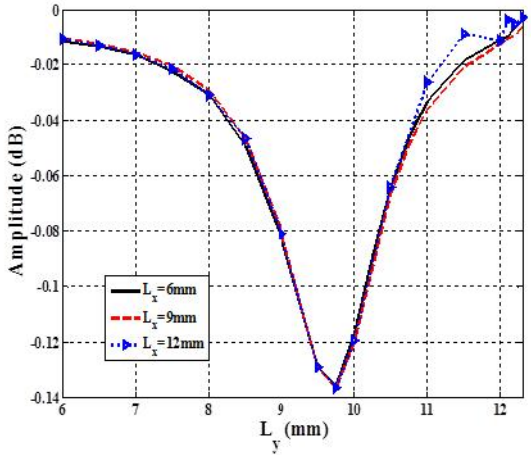
می‌شود با تغییرات L_x، مشخصه فاز بر حسب L_y بدون تغییر مانده (زیرا L_x بر میدان متعامد بوده و سهمی در میزان جذب و بازتاب قطبش y ندارد)، بنابراین کنترل فاز بر حسب برای قطبش y مستقل از اندازه L_x است. کنترل فاز برای قطبش x به کمک تغییر طول L_y صورت می‌گیرد که به‌طور مشابه اندازه L_y در آن بی‌تأثیر است و به‌دلیل تقارن ساختار نتایج مشابه به‌دست می‌آید.



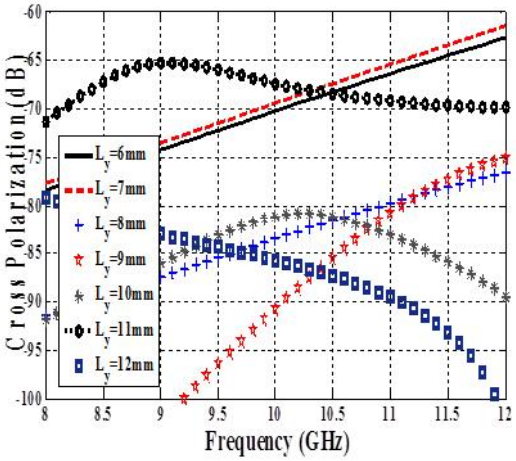
شکل ۲: مشخصه فاز برای قطبش y بر حسب L_y به‌ازای L_x = ۶،۹،۱۲ mm

بنابراین، با استفاده از این تک سلول می‌توان آرایه دوقطبشی طراحی کرد که کنترل فاز دو قطبش به‌طور مستقل از یکدیگر انجام شود. محدوده تغییرات فاز چنان‌چه انتظار می‌رود به‌دلیل ساختار یک لایه و تک رزونانسی بودن پچ کمتر از ۳۶۰° است. برای ساختارهای چند لایه، روزنه تزویجی و ساختارهای چند رزونانسی دیگر می‌توان به گستره‌ی بیشتری از فاز دست یافت که معمولاً با افزایش پیچیدگی طراحی، ساخت و هزینه همراه هستند.

عامل دیگری که برای تک سلول آرایه بازتابی مهم است، تلفات بازتابی است، که هر چقدر دامنه ضریب بازتاب به صفر دسی‌بل نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده این است که عنصر تشعشعی مقدار بیشتری از موج دریافتی را بازتاب می‌کند و تلفات کمتری دارد. در شکل (۳) تلفات بازتابی برای قطبش y بر حسب تغییرات L_y به ازای L_x= ۱۲،۹،۶ mm مشاهده می‌شود که مقدار آن کمتر از ۰٫۱۴ dB- است. تلفات بازتابی کم، ایزولاسیون خوب بین قطبش‌ها را تضمین می‌کند [۳].



شکل ۳: دامنه ضریب بازتابی برای قطبش y بر حسب L_y به‌ازای L_x = ۶،۹،۱۲ mm



شکل ۴: قطبش متعامد بر حسب فرکانس به ازای مقادیر مختلف L_y در حالی که قطبش y به سطح عنصر تابش می‌شود.

شکل (۴) مولفه قطبش متعامد را به ازای زاویه تابش θ و φ صفر درجه بر حسب فرکانس برای مقادیر مختلف از L_y درحالی‌که قطبش y به سطح عنصر می‌تابد، نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل پیداست سطح قطبش متعامد در محدوده باند x کمتر از ۶۰- dB است.

معمولاً آرایه‌هایی که با تغییر ابعاد رزونانسی فاز را کنترل می‌کنند، نسبت به آرایه‌هایی با دنباله‌هایی با طول‌های مختلف متصل به پچ، تلفات و قطبش کمتری ایجاد می‌کنند [۸-۱۰]. همان‌طور که از نتایج پیداست، این تک سلول که با تغییر طول دنباله‌ها فاز را کنترل می‌کند، دارای تلفات کم و سطح قطبش متعامد پایین برای هر یک

از قطبش‌هاست. اما عملکرد قطبش متعامد در آرایه ممکن است به ازای تمامی زوایا در سطح خیلی پایین نباشد و قطبش متعامد بیشتری را برای آرایه ایجاد کند که مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

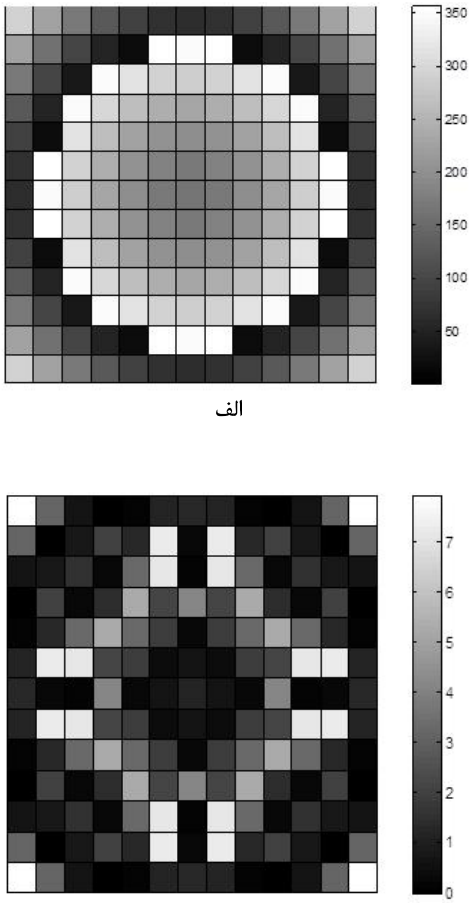
۳- آنتن آرایه بازتابی دوقطبشی

یک آرایه بازتابی مربعی ۱۳ × ۱۳ با تعداد عناصر ۱۶۹ با استفاده از عنصر تشعشعی پیشنهادشده در بخش قبل طراحی، ساخته و اندازه‌گیری شده است. تغذیه آن یک آنتن هورن قطاعی در صفحه E است و با توجه به زاویه مربوط به بهره dB ۱۰- الگوی تشعشعی نرمالیزه شده آنتن هورن در صفحه E، این آنتن به فاصله کانونی ۱۲٫۵ cm از مرکز آرایه و در مقابل آن قرار می‌گیرد. قابل ذکر است که به‌دلیل آن که آرایه به‌صورت تغذیه مرکزی طراحی شده، ساختار برای هر دو قطبش x و y دارای تقارن است. بنابراین شبیه‌سازی‌ها و اندازه‌گیری‌ها به‌دلیل تشابه نتایج برای یک قطبش صورت گرفت. از سوی دیگر، به‌دلیل استفاده از آنتن هورن قطاعی در صفحه E و طراحی بر اساس الگوی تشعشعی آن انتظار می‌رود که الگوی تشعشعی آرایه از نظر گلبرگ کناری و قطبش متعامد در صفحه E بهتر باشد.

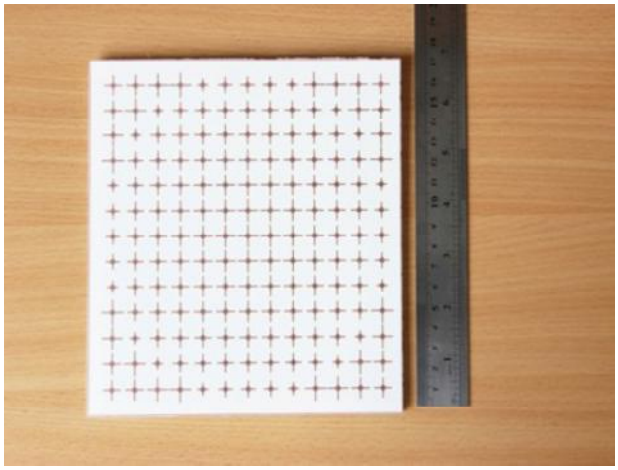
در آنتن آرایه بازتابی با توجه به موقعیت هر عنصر روی سطح آرایه و فاصله آن‌ها از آنتن تغذیه، فاز مورد نیاز برای عناصر محاسبه می‌شود [۱]. سپس با استفاده از فاز به‌دست آمده از شبیه‌سازی‌های تک سلول، اندازه مناسب برای پارامتر متغیر در ساختار (در این مقاله طول L_x و L_y) به‌منظور تأمین فاز محاسبه‌شده، تعیین می‌شود. بنابراین باید اختلاف فاز بین مقدار فاز محاسبه‌شده و فاز ایجادشده توسط پچ حداقل باشد تا آرایه عملکرد خوبی نشان دهد.

برای آرایه مورد نظر، توزیع فاز محاسبه‌شده به‌صورت شکل (۵-الف) است. شکل (۵-ب) نیز توزیع اختلاف فاز دریافتی و فاز محاسبه‌شده را نمایش می‌دهد. البته این فاز دریافتی با در نظر گرفتن محدودیت‌های ساخت است که حداکثر دقت ساخت، ۵۰ میکرون لحاظ شده‌است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود حداکثر این اختلاف فاز 8° است و میانگین خطای فاز همه عناصر $2{,}27^\circ$ است.

نمای آنتن ساخته شده در شکل (۶) مشاهده می‌شود. در شبیه‌سازی به‌دلیل آن که بازشدگی صفحه E آنتن هورن قطاعی در راستای محور x قرار گرفته، در نتیجه صفحه E هم‌راستا با محور x و

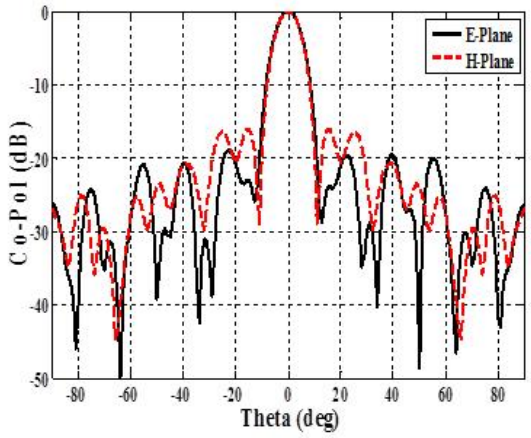


شکل ۵: (الف) توزیع فاز مورد نیاز در سطح آرایه، (ب) توزیع اختلاف بین فاز مورد نیاز و فاز دریافتی در سطح آرایه

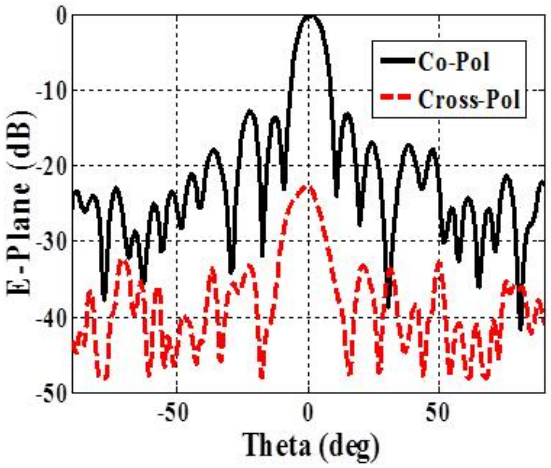


شکل ۶: نمای آرایه دوقطبشی ساخته شده

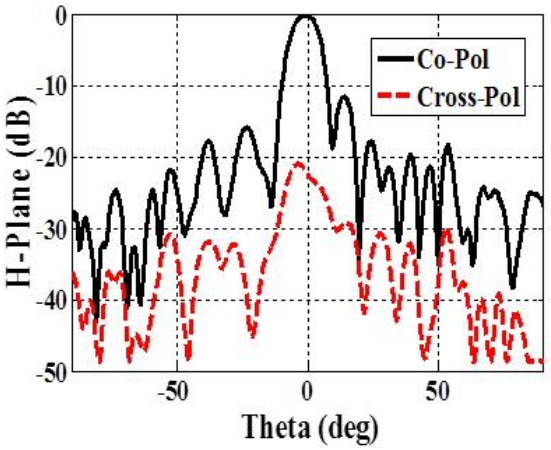
صفحه H هم‌راستا با محور y در نظر گرفته می‌شود. الگوی تشعشعی مطلوب صفحه E و H برای قطبش x در شکل (۷) ملاحظه می‌شود.



شکل ۷: بهره صفحه E و H برای قطبش y

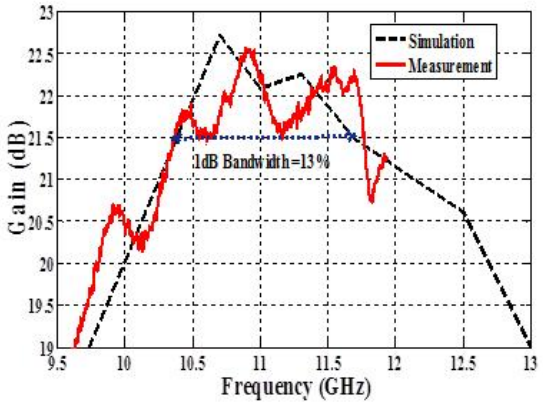


الف

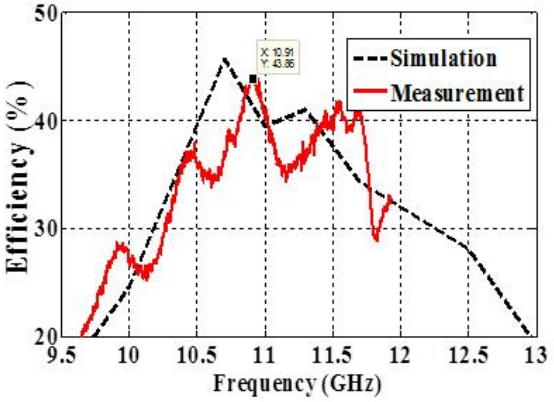


ب

شکل ۸: الگوی تشعشعی اندازه‌گیری شده برای قطبش مطلوب و متعامد از (الف) صفحه E، (ب) صفحه H



الف



ب

شکل ۹: مقایسه نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری (الف) مولفه قطبش مطلوب از بهره صفحه E برای قطبش y، (ب) بازدهی روزنه

همان‌طور که پیشتر اشاره شد به‌دلیل استفاده از آنتن تغذیه هورن قطاعی صفحه E گلبرگ کناری صفحه E بهتر است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی (شکل (۷))، مقدار گلبرگ کناری صفحه E و H به ترتیب برابر ۱۸٫۹ dB- و ۱۶٫۱ dB- است.

نتایج اندازه‌گیری الگوی تشعشعی مطلوب و متعامد صفحه E و H آنتن ساخته‌شده در شکل (۸) دیده می‌شود. برای هر دو صفحه E و H قطبش متعامد کمتر از ۲۲ dB- است و گلبرگ کناری نسبت به نتایج شبیه‌سازی مقدار بیشتری دارد.

چنان‌چه در شکل (۹-الف) مشاهده می‌شود، حداکثر بهره اندازه‌گیری شده ۲۲٫۵ dB است که در مقایسه با شبیه‌سازی کمتر از ۰٫۵ dB کاهش دارد ولی از هر دو نتیجه ۱۳٪ پهنای باند با تغییرات بهره ۱ dB حاصل شده است. سپس با استفاده از مقدار بهره مطلوب،

بازدهی روزنه برای آرایه با ابعاد $5/7\lambda_0 \times 5/7\lambda_0$ [۱۱] محاسبه شده که در شکل (۹-ب) نمایش داده شده است.

حداکثر بازدهی اندازه‌گیری شده برابر ۴۳/۸۶٪ و در پهنای باند بهره dB ۱ آن بازدهی همواره بیش از ۳۵٪ است. با توجه به ساختار ساده یک لایه آرایه و هم‌چنین عنصر تشعشعی تک رزونانسی، پهنای باند این آنتن با آرایه‌هایی متشکل از عناصر با چند رزونانس (دستیابی به محدوده فازی بیش از 360^{o}) [۶-۵] قابل مقایسه است.

۴- نتیجه‌گیری

یک عنصر تشعشعی جدید برای آرایه بازتابی ارائه شد. این عنصر دارای تلفات بازتابی کم و سطح قطبش متعامد پایین است. این عنصر توانایی کنترل فاز مستقل برای دو قطبش خطی را دارد. یک آرایه بازتابی کوچک با استفاده از این تک سلول با تغذیه مرکزی طراحی و ساخته شد. پهنای باند بهره dB ۱ اندازه‌گیری‌شده آنتن فوق، ۱۳٪ با حداکثر بهره dB ۲۲/۵ و بازدهی روزنه ۴۳/۸٪ است. همچنین قطبش متعامد آرایه برای هر دو صفحه E و H کمتر از dB ۲۲- است.

۵- مراجع

[1] J. Houng and J. A. Encinar, "Reflectarray Antennas," *IEEE press,* John Wiley & Sons, Inc., 2007.

[2] J. Huang, "Bandwidth Study of Microstrip Reflectarray and a Novel Phased Reflectarray Concept," *AP-S*, vol. 1, pp. 585-586, Jun. 1995.

[3] E. Carrasco, J. A. Encinar, M. Barba, R. Vincenti and R. Sorrentino, "Dual-Polarization Elements for Ku-Band Tx/Rx Portable Terminal Antenna," *EuCAP*, Apr. 2010, pp. 1-5.

[4] D. C. Chang and M. C. Huang, "Multiple Polarization Microstrip Reflectarray Antenna with High Efficiency and Low Cross-Polarization," *IEEE Trans. Antennas and Propaga.,* vol. 43, pp. 829– 834, Aug. 1995.

[5] H. Hasani, M. Kamyab, and A. Mirkamali, "Low Cross-Polarization Reflectarray Antenna," *IEEE, Trans. Antenna and Propaga.,* vol. 59, no. 5, May 2011.

[6] H. Hasani, M. Kamyab, and A. Mirkamali, "Broadband Reflectarray Antenna Incorporating Disk Elements With Attached Phase-Delay Lines," *IEEE AWPL*, pp. 156-158, 2010.

[7] K. F. Lee and K. M. Luk, *Microstrip Patch Antennas Imperial Colleage press*, Ch. 4, 2011.

[8] D. G. Gonzalez, G. E. Pollon, and J. F. Walker, "Microwave Phasing Structures for Electromagnetically Emulating Reflective Surfaces and Focusing Elements of Selected Geometry," Patent US 4905014, Feb. 1990.

[9] S. D. Targonski and D. M. Pozar, "Analysis and Design of a Microstrip Reflectarray using Patches of Variable Size," *IEEE, AP-S,* pp. 1820–1823, June 1994.

[10] D. M. Pozar and S. D. Targonski, "A Microstrip Reflectarray using Crossed Dipoles," *IEEE, AP-S,* pp. 1008–1011, June 1998.

[11] A. Balanis, *Antenna and Theory Analysis and Design,Third edition*, John Wiley & Sons, Inc., 2005.

Journal of Applied Electromagnetics

Vol. 2, No. 1, 2014 (Serial No. 2)

Design and Fabrication of Dual Polarized Reflectarray in X-band

M. Mahmoodi*, S. Chamaani

*K. N. Toosi University of Technology

(Received: 16/07/2013 , Accepted: 01/11/2015)

Abstract

This paper presents a novel unit cell of dual linearly polarized reflectarray antenna at X band for the center frequency of 10.7 GHz. This unit cell is able to control the phase characteristics by varying the length of delay line attached to patch along the x and y axes which results reflection coefficient of less than -0.14 dB and cross polarization beyond -60 dB for the normal incidence. Its phase characteristics slope is $0.113^{\circ}/\mu m$ at the center frequency. The simulation of unit cell is done based on floquet model in CST MWS Software. A 13×13 reflectarray antenna using proposed unit cell at the aforementioned frequency was designed, fabricated and measured. The measurement results show the maximum gain of 22.5 dB with the 43.8% aperture efficiency, 13% of 1dB gain bandwidth and the cross polarization level less than -22 dB for the E- and H-Planes.

Keyword: Reflect-array Antenna, Dual Linearly Polarized Reflect-array Antenna, Bandwidth, Cross

* Corresponding Author Email: mahmoodi_mahboobeh@ee.kntu.ac.ir