

طراحی، شبیه سازی و ساخت آنتن آرایه بازتابی دو بانده با دوقطبی متعامد در باندهای X و Ku

سجاد فرجی قطلو^۱، حمید رضا حسنی^۲، محمد ناصر مقدسی^۳^۱دانشجوی دکتری - گروه برق و مخابرات - دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران، S.Faraji_Telecom@yahoo.com^۲استاد دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه شاهد^۳دانشیار دانشکده فنی و مهندسی - گروه برق و مخابرات، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله یک آنتن آرایه بازتابی دوبانده با قطبی شدگی متعامد، جهت کاربرد در سرویس‌های ثابت مخابرات ماهواره‌ای در باندهای X و Ku ارائه شده است. آنتن مورد نظر پس از طراحی، ساخته شد و در باندهای فرکانسی مذکور تست شده و نتایج بحث گردیده است. در طراحی سلول برای آنتن آرایه بازتابی، از دو عنصر جدید بهره برده شده است. عنصر طراحی شده برای باند پایین در فرکانس مرکزی ۱۱/۵ گیگاهرتز، متشکل از حلقه‌های مستطیلی شکافدار است و عنصر پیشنهادی برای باند بالاتر، در فرکانس مرکزی ۱۴ گیگاهرتز، از دوقطبی‌های خطی با طول‌های متفاوت طراحی شده است. تغییرات فاز موج بازگشتی عناصر، با تغییر طول آنها در فرکانس مورد نظر حاصل می‌شود که پاسخ فازی بیشتر از ۶۰۰ درجه را برای هر کدام از باندها بدست می‌دهد. عناصر آنتن آرایه بازتابی که روی یک زیرلایه نازک به ضخامت ۰/۸ میلی‌متر چاپ شده‌اند، توسط یک آنتن شیبوری بصورت تغذیه از مرکز روشن می‌شوند. پهنای باند ۱dB بهره در باند X در حدود ۱۷/۴٪ و برای باند Ku در حدود ۱۳٪ را شامل می‌شود. بهره اندازه‌گیری شده آنتن برای باند X در فرکانس مرکزی ۱۱/۵ گیگاهرتز، ۲۳/۹ dB است و برای باند Ku، در فرکانس مرکزی ۱۴ گیگاهرتز در حدود ۲۶/۱ dB می‌باشد که بازدهی دهانه به ترتیب در حدود ۴۱٪ و ۴۵٪ را نشان می‌دهد.

کلیدواژه

آنتن آرایه بازتابی ریزنواری، تغییرات شیفت فازی، قطبی شدگی متعامد.

مقدمه

متمرکز کرده و پترن مورد نظر را شکل داد. یکی از نقص‌های عمده آنتن‌های آرایه بازتابی ریزنواری، محدود بودن پهنای باند آنها در مقایسه با بازتاب‌کننده‌های سهموی است [۳]. کم بودن پهنای باند این آنتن‌ها را می‌توان با دودلیل عمده توجیه کرد. اول، طبیعت باریک باند بودن پچ‌های تشعشعی، که روی ساختارهای ریزنواری چاپ می‌شوند. دوم، تفاوت در تاخیر فازهای مختلف بین تغذیه آنتن شیبوری و عناصر متفاوت در ساختار آرایه بازتابی است. در سال‌های اخیر نهایتاً توانسته‌اند ۱۵٪ پهنای باند آنها را افزایش دهند. لذا طراحی آنتنی پهن باند و یا استفاده از دو یا چند باند مستقل نزدیک یا دور از هم [۴ و ۵]، می‌تواند تسکینی به محدودیت پهنای باند این نوع از آنتن‌های آرایه بازتابی ریزنواری در باندهای میکروویوی باشد. عملکرد دو بانده در طراحی آنتن‌های آرایه بازتابی موضوع مهمی می‌باشد. چندین روش برای طراحی آرایه‌های چند بانده معرفی شده‌اند. در این مقاله سعی شده است که به طراحی نوعی از آنتن آرایه بازتابی برای عملکرد در دو باند مستقل

در طی دو دهه اخیر طراحان آنتن در زمینه فناوری آنتن‌های آرایه فازی و بازتاب‌کننده‌های سهموی، به نوآوری‌های جدیدی دست یافته‌اند. آنتن‌های آرایه بازتابی، گزینه مناسب و خوبی برای جایگزینی با آنتن‌های سهموی و آرایه‌های فازی می‌باشند [۱]. تلاش برای سبک‌سازی با حفظ مشخصات تشعشعی، بدست آوردن بهره‌ای بالا، کاهش ابعاد آنتن و کم کردن هزینه‌های ساخت از جمله ویژگی‌هایی است که در آنتن‌های آرایه بازتابی ریزنواری مورد تحقیق و بررسی بوده است [۲]. یک آنتن آرایه بازتابی می‌تواند یک پرتو مدادی یا پرتو شکل یافته را جهت پوشش یک منطقه جغرافیایی خاص، در ناحیه دور آنتن شکل بدهد. عناصر تشعشعی آنتن آرایه‌ای توسط تغذیه‌ای که معمولاً یک آنتن شیبوری یا آنتن بهره بالا می‌باشد، روشن می‌شوند. با طراحی دقیق هر کدام از عناصر، که بر روی صفحه مسطح دی‌الکتریک چاپ می‌شوند، می‌توان فاز دریافتی از آنتن شیبوری را در یک نقطه خاص

بررسی می شود. کل ساختار به همراه آنتن تغذیه شیپوری ساخته و تست شده که نتایج در بخشهای بعدی ارائه گردیده است. فرکانسهای طراحی شده آنتن آرایه بازتابی برای کاربرد در باند گیرندگی X و باند فرستندگی Ku، در سرویس های ثابت مخابرات ماهواره رادیو و تلویزیونی [۱۱] در نظر گرفته شده است.

طراحی عناصر آرایه بازتابی

در طراحی آنتن آرایه بازتابی، گام اول این است که شیفت فازی مورد نیاز برای هر کدام از عناصر در فرکانس مطلوب در باندهای X و Ku محاسبه گردد. شیفت فازی مورد نظر، باید اختلاف فازی که به واسطه تاخیر فاز در فاصله بین آنتن شیپوری و عناصر آرایه بازتابی ایجاد می شود را جبران کند. عناصر طراحی شده برای تشعشع در هر کدام از باندهای X و Ku تا حد ممکن، هم از لحاظ شکل ظاهری و هم از لحاظ قطبی شدگی متفاوت از هم هستند تا تزویج متقابل بین عناصر به حداقل برسد. همان طوری که در شکل ۱ (الف، ب) نشان داده شده است، عناصر مورد نظر برای عملکرد در دو باند مجزا، از دو حلقه متقاطع مستطیلی شکل برای تشعشع در باند X تشکیل یافته است. برای پاسخ دادن به قطبش افقی آنتن شیپوری، شکافی در راستای محور x در وسط آن به وجود آمده است تا هدایت الکتریکی آنرا در راستای عمودی از بین برده و تشعشعی نداشته باشد.

عناصر طراحی شده برای تشعشع در باند Ku، متشکل از ۱۷ عدد دو قطبی خطی هستند که اندازه آنها از مرکز، رفته رفته کاهش می یابد و راستای طولی آنها، جهت پاسخ به قطبش عمودی آنتن شیپوری، عمود بر جهت شکاف حلقه های متقاطع است. عناصر طراحی شده در هر فرکانس دارای پلاریزاسیون واحد هستند. دو قطبی های خطی به دلیل اشغال فضای کمتر نسبت به دو قطبی های متقاطع و یا عناصر دایروی شکل، مزیت بهتری دارند. دلیل استفاده از این نوع عناصر، معمولا برای کم کردن قطبش متفاوت در پترن راه دور آنتن آرایه بازتابی است. متفاوت بودن عناصر با طولهای مختلف، که به منظور جبران اختلاف فاز ناشی از اختلاف مسیر است باعث می شود که جریان سطحی متعامد از بین برود و موجب کاهش قطبی شدگی متعامد شود. فاصله عنصرهای طراحی شده در آنتن آرایه بازتابی، از عناصر مجاور باید مناسب باشد تا از ایجاد گلبرگ های کناری جلوگیری کند. این فاصله همان طوری که در مرجع [۱] نیز آمده است به صورت زیر است:

$$d \leq \frac{\lambda_0}{1 + \sin \theta} \quad (1)$$

پرداخته شود. برای استفاده از یک آنتن آرایه بازتابی در دو باند مجزا، لازم است که ایزولاسیون کافی بین باندها ایجاد شود تا عنصرهای تشعشعی کمترین تاثیرگذاری را از لحاظ تزویج مجاورتی بر روی هم داشته باشند. لذا اثر متقابل بین عناصر، به دلیل نزدیکی دو باند و کم بودن فاصله بین آنها، که باعث کاهش پهنای باند آنتن و نیز افزایش حساسیت عملکرد فرکانسی به فواصل بین عناصر می شود، از جمله چالش هایی است که باید در نظر گرفته شود. برای این منظور در طراحی سعی می شود که ساختار هندسی عنصرهای هر کدام از باندها و قطبی شدگی آنها، متفاوت از هم باشد. چراکه اگر پلاریزاسیون یکی از باندها در حالت قطبی شدگی افقی باشد و باند دیگر با قطبی شدگی عمودی تحریک شود، عدم تطبیق پلاریزاسیون موجها در دو باند متفاوت، باعث تضعیف سیگنال-های ارسال و دریافت می شود که تا حدودی باعث کاهش سطح سیگنال ارسالی از فرستنده در مسیر ورودی گیرنده خواهد شد. برای کاهش هزینه ساخت و سبک کردن وزن آنتن، سعی می شود که از ساختاری با تعداد لایه های کم استفاده شود [۶]. در کارهای گذشته، برای دو عنصر که تقریبا از لحاظ شکل هندسی مشابه به یکدیگر بودند و شرایط تقریبا متناوبی برای کل ساختار آرایه ها حاکم بود، تزویج عنصرها را ناچیز در نظر گرفته و صرف نظر می کردند [۷]. در طراحی آنتن های دو بانده در آرایه های بازتابی ریزنواری، باید به این نکته نیز توجه کرد که عناصر فرکانس پایین باید ساختاری داشته باشند که از وقوع تشدید در فرکانس های بالاتر، که می تواند برابر با فرکانس کار عناصر باند بالا باشد، جلوگیری نمایند. از اینرو برای عملکرد یک آنتن آرایه بازتابی در دو باند مجزا، عنصرهای پیشنهادی می توانند شبکه ای از حلقه های مربعی و یا دایروی شکل، ساختارهای T شکل [۸]، برای عملکرد در یک باند و نیز دو قطبی های خطی [۹]، یا متقاطع شکل چرخان [۱۰]، عنصرهای باند دیگر باشند. در این مقاله، طراحی و شبیه سازی و ساخت یک آنتن آرایه بازتابی دو بانده با قطبی شدگی متعامد، ارائه می شود که رسیدن به پاسخ فاز خطی و یکنواخت، پهنای باند مطلوب و دستیابی به کمترین سطح قطبی شدگی متعامد (Cross Polar) از اهدافی است که دنبال می شود. عملکرد عناصر طراحی شده، در دو باند مجزای X و Ku، با تحریک دو مد متعامد TE₁₀ و TE₀₁ در تابش عمودی درگاه فلوکه که برای تحلیل آرایه های متناوب در نرم افزار HFSS و یا CST استفاده می شود، بدست می آید. در فرآیند تست آنتن آرایه بازتابی نیز ایندو مد متعامد با تغییر ۹۰ درجه ای آنتن تغذیه شیپوری با دهانه مستطیلی، حاصل می شود. تغییرات پاسخ فازی، برای هر کدام از عناصر، به صورت تکی و در حالت آرایه ای، توسط نرم افزارهای تحلیل تمام موج، شبیه سازی و

ضریب دی الکتریک $\epsilon_r = 2$ به ضخامت 0.8mm که با (ts) نشان داده شده، چاپ شده است. عنصرها بر روی یک لایه فاصله هوایی (t_h) به اندازه 2mm ، جهت بدست آوردن فاز خطی و نیز افزایش پهنای باند آنتن، قرار گرفته‌اند. برای بهینه کردن اندازه‌های استفاده شده در طراحی از الگوریتم ژنتیک در نرم افزار HFSS استفاده شده است. که در آن تابع هدف بدست آوردن بیشترین فاز مورد نیاز با متغیرهای L_1 ، L_2 ، ضخامت زیرلایه و فاصله هوایی در باندهای X و Ku خواهد بود. از آنجا که مسیرهای بین آنتن تغذیه و عناصر همگی باهم تفاوت دارند که تاخیرهای فازی متفاوتی را موجب می‌شود. برای جبران این تاخیرهای فازی، عناصر باید فاز مشخصی را اعمال کنند که پاسخ این فاز برحسب ابعاد عناصر، S شکل خواهد بود. این پاسخ فاز برای عناصر گوناگون، متفاوت خواهد بود. برای یک آنتن آرایه بازتابی مسطح با بیم عمود بر صفحه آنتن، تاخیر فاز مورد نیاز برای هر عنصر با استفاده از روش گفته شده در مرجع [۱] محاسبه می‌گردد. اختلاف طول مسیر برای هر عنصر برابر است با:

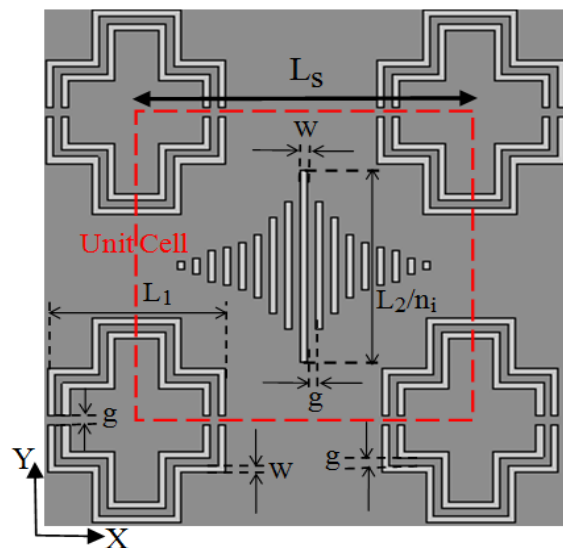
$$\Delta L_{m,n} = L_{m,n} - L_{0,0} \quad (2)$$

که در آن $L_{m,n}$ طول مسیر بین آنتن تغذیه تا عنصر m,n است. $L_{0,0}$ فاصله بین آنتن تغذیه تا مرکز صفحه به عنوان یک نقطه مرجع و $\Delta L_{m,n}$ اختلاف مسیر برای عنصر m,n است. برای ایجاد یک پترن متمرکز اختلاف فاز $\Delta\Phi_{m,n}$ برای عنصر m,n برابر است با:

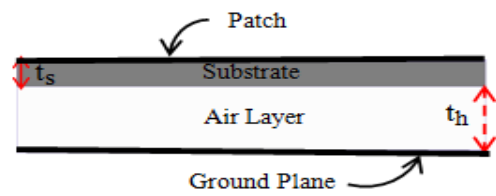
$$\Delta\Phi_{m,n} \text{ in degrees} = \left[\frac{\Delta L_{m,n}}{\lambda_0} - \text{integer of} \left(\frac{\Delta L_{m,n}}{\lambda_0} \right) \right] \times 360 \quad (3)$$

هر چقدر که فاز بیشتری در فرآیند طراحی بتوان بدست آورد، در نتیجه درجه آزادی برای تحقق یک فاز با طول‌های متفاوت-تری از عناصر را می‌توان بدست آورد. یعنی به ازای هر فاز، چندین طول از پارامتر L را می‌توان انتخاب کرد. با تغییر طول پارامتر L_1 در باند X، که با کم و زیاد شدن طول حلقه‌های مستطیلی شکافدار همراه است، محدوده فاز خطی بیشتر از 60° در بازه فرکانسی $12 \sim 10$ گیگاهرتز بدست می‌آید. همچنین تغییر در اندازه پارامتر L_2 یعنی تغییر در طول دوقطبی‌های خطی باعث بدست آوردن شیفت فاز نزدیک به 60° در باند Ku محدوده فرکانسی $15 \sim 13$ گیگاهرتز می‌شود. شکل ۲ (الف، ب، ج، د) منحنی‌های تغییرات دامنه و فاز ضریب انعکاس بازگشتی را نسبت به تغییرات طول ابعاد عناصر، در هر کدام از باندهای ذکر شده را نشان می‌دهند. تغییر طول ابعاد عناصر، باعث به هم خوردن جریان سطحی شده و موجب تغییر فاز موج برگشتی می‌شود. منحنی‌های تغییرات فاز

که در آن d فاصله بین عناصر و θ زاویه بین پرتو تابش از فید و یا زاویه بیم اصلی از جهت عمود است. ابعاد سلول مورد نظر نیز برای جلوگیری از ایجاد گلبرگهای اضافی و کاهش تزویج متقابل بین عناصر، به اندازه $12 \times 12\text{mm}^2$ طراحی شده است. که در باند X در فرکانس مرکزی 11.5 گیگاهرتز به صورت $0.51\lambda_0 \times 0.51\lambda_0$ و در باند Ku، به صورت $0.56\lambda_0 \times 0.56\lambda_0$ در فرکانس مرکزی 14 گیگاهرتز قابل بیان است.



الف



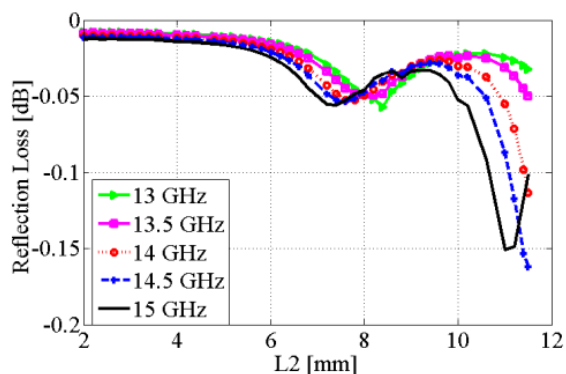
ب

شکل ۱. ساختار هندسی عناصر طراحی شده برای عملکرد در دو باند X، Ku الف: دید از بالا، حلقه‌های مستطیلی شکافدار برای تشعشع در باند X و دوقطبی‌های خطی عمودی به تعداد ۱۷ عدد. ب: دید از بغل، عناصر پچ تشعشعی، زیرلایه و فاصله هوایی استفاده شده بین زمین و زیرلایه.

L_s (mm)	t_s (mm)	t_h (mm)	w (mm)	g (mm)
۱۲	۰/۸	۲	۰/۲۵	۰/۳

جدول ۱. اندازه فیزیکی پارامترهای استفاده شده.

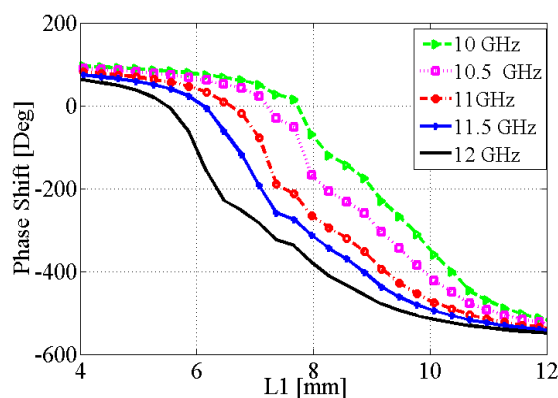
اندازه فیزیکی ابعاد استفاده شده برای هر کدام از پارامترهای عناصر تشعشعی در جدول ۱ آورده شده است. دو پارامتر طراحی شده از جمله w پهنای خط و g فاصله خالی بین عنصرها، به اندازه 0.25mm و 0.3mm جهت بدست آوردن بیشترین فاز مورد نیاز در فرآیند طراحی، ثابت در نظر گرفته شده است. عناصر آنتن آرایه بازتابی بر روی زیر لایه‌های با



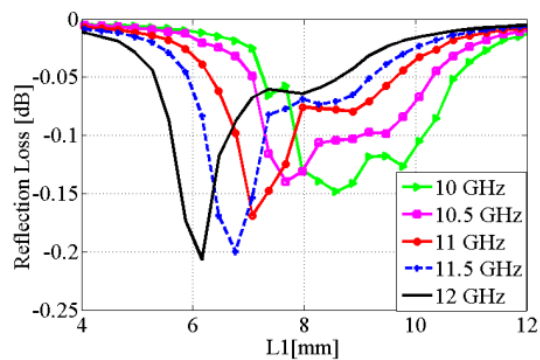
شکل ۲. تغییرات دامنه و فاز ضریب انعکاس بازگشتی نسبت به ابعاد عناصر، حلقه های مستطیلی شکافدار شکل به طول (L₁) و دوقطبی های خطی یافته به طول (L₂).
الف و ب: بانده X، ج و د: باند Ku

در طراحی عنصر مستطیلی شکل شکافدار، اضافه کردن یک حلقه دیگر و نیز متقاطع کردن طول ابعاد حلقه ها (L₂)، در محدوده فرکانسی باند X، برای بدست آوردن فاز بیشتر است. چراکه به ازای حلقه های بیشتر و وجود ناپیوستگی ها و لبه های تیزتر، تجمع بارالکتریکی در این نقاط زیاد شده و باعث ایجاد فرکانس تشدید شده و نهایتاً می توان فاز بیشتری را بدست آورد. شکاف ایجاد شده در وسط حلقه ها در راستای محور X، نیز جهت تحریک به موجی با قطبی شدگی افقی است که از آنتن تغذیه شیپوری ساطع می شود. چون در راستای محور Y، حلقه ها، اتصال فیزیکی نداشته و هدایت الکتریکی صورت نمی گیرد. برای استفاده آنتن آرایه بازتابی در باند Ku، مجموعه ای از دو قطبی های خطی یافته از مرکز آنتن، به تعداد ۱۷ عدد طراحی شده است. طول دوقطبی واقع در مرکز به اندازه L₂ می باشد و ۸ عدد نیز در دو طرف آن جای گرفته اند که راستای آنها عمود بر شکاف حلقه های مستطیلی شکل می باشد. نحوه تغذیه دوقطبی ها نیز با استفاده از موج ساطع شده با قطبی شدگی قائم، از آنتن شیپوری می باشد. جهت بدست آوردن شیفت فازی مناسب و نیز افزایش پهنای باند آنتن آرایه بازتابی، ترتیب کاهش یافتن دوقطبی ها، به صورت L₂/n_i طراحی گردیده است، که n_i اعداد ۱/۵، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۱۲ و ۲۴ را شامل می شود. کاهش یافتن اندازه دوقطبی ها (L₂) باید با آهنگ ملایم باشد تا از ایجاد شیب تند در منحنی تغییرات فاز که باعث خطاهای ساخت می شود، جلوگیری به عمل آید. از آنجا که فرکانس های انتخاب شده برای طراحی در باندهای Ku و X، خیلی نزدیک به هم هستند، بنابراین باید ایزولاسیون خوب و کافی بین باندها برقرار باشد تا تشعشع عناصر، کمترین تاثیرگذاری را از لحاظ هارمونیکی و سیگنال های تداخلی، روی هم داشته باشند. برای رسیدن به این مهم، همان طور که در بالا

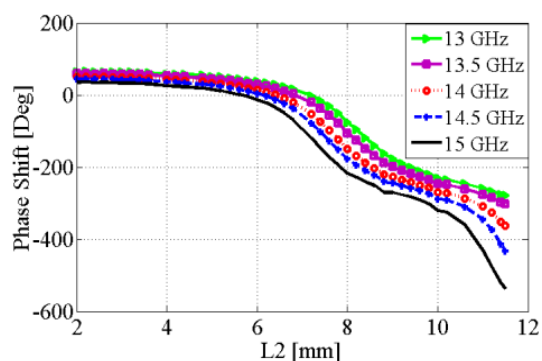
شکل ۲ (الف، ج) نشان می دهد که شکست فاز عناصر طراحی شده برای هر دو پارامتر L₁ و L₂ تقریباً در محدوده طول ۷ میلی متر در هر دو باند اتفاق می افتد و این حاکی از فرکانس تشدید عناصر، در این محدوده فرکانسی است. در نقاطی که شیب منحنی فازی بیشتر است، بیشترین تلفات موج برگشتی را با توجه به نمودارهای شکل ۲ (ب، د) در این بازه از طول های L₁ و L₂ خواهیم داشت. نتایج نمودارها نشان دهنده یک منحنی فاز تقریباً خطی و یکنواخت در هر دو عنصر طراحی شده است. داشتن شیب ملایم و یکنواخت در منحنی فاز، باعث می شود که خطاهای حاصل از فرآیند ساخت آنتن آرایه بازتابی که ناشی از دقت کم در ساخت اندازه های آنتن است، به حداقل برسد و قابلیت اطمینان طراحی افزایش یابد.



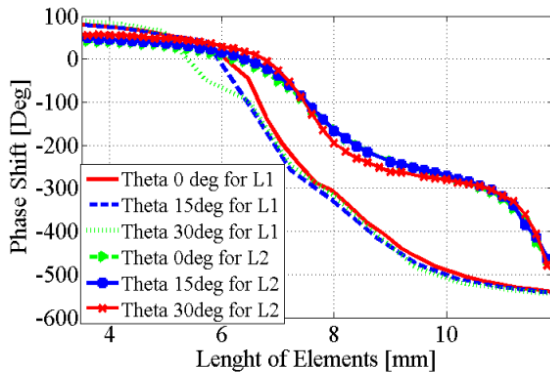
الف



ب



ج

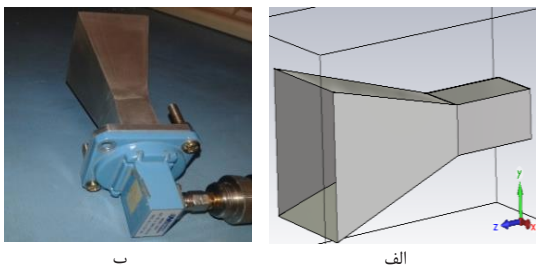


شکل ۴. منحنی شیفت فاز نسبت به تغییرات ابعاد عناصر L1, L2 در زوایای مختلف تابشی (۰ و ۱۵ و ۳۰ درجه).

شکل ۴ منحنی شیفت فاز را نسبت به ابعاد عناصر هردو باند پایین و بالا را در زوایای مختلف تابشی (۰ و ۱۵ و ۳۰) درجه را نشان می دهد. با توجه به نمودار مشاهده می شود که در تمامی زوایای مختلف تابشی، پاسخ شیفت فازی عناصر طراحی شده، تقریباً ثابت بوده و کمترین تاثیر را در زوایای مختلف تابشی دارند. این نتیجه خطای ناشی از تست آنتن آرایه بازتابی را در صورت دقیق نبودن زاویه تابشی از آنتن شیپوری را به حداقل خواهد رساند.

طراحی آنتن آرایه بازتابی دو بانده با قطبی شدگی متعامد

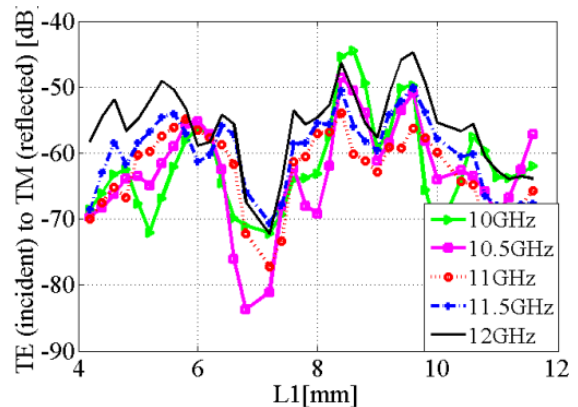
آنتن آرایه بازتابی طراحی شده با عناصر توضیح داده شده در بخش قبلی، از 15×15 عنصر مستقل برای تشعشع در دو باند X و Ku تشکیل یافته است. این مجموعه آرایه در حالت کلی 450 عنصر قابل تشعشع را تشکیل می دهد که روی زیر لایه-ای به اندازه $18 \times 18 \text{ cm}^2$ چاپ شده است و به صورت تغذیه از مرکز می باشد که توسط یک آنتن بوقی یا شیپوری با دهانه مستطیلی روشن می شود. شکل ۵ آنتن شیپوری شبیه سازی و ساخته شده را نشان می دهد که منحنی تلفات برگشتی آن در کل بازه فرکانسی استفاده شده برای آنتن آرایه بازتابی بالاتر از 20 dB طراحی شده است.



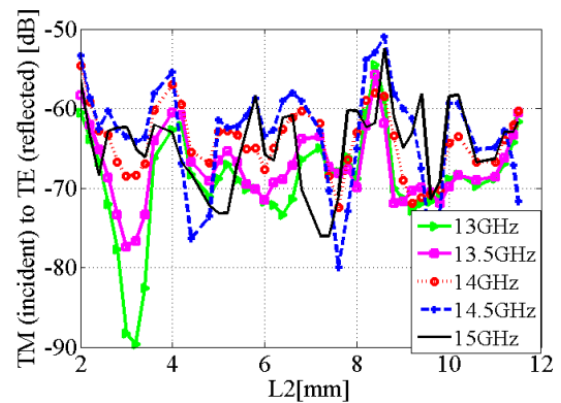
ب

الف

نیز اشاره شد، شکل عناصر و قطبی شدگی آنها مستقل از هم طراحی شده است. نمودارهای شکل ۳ (الف، ب)، ایزولاسیون بین موجهای ارسال و دریافت را برای هر کدام از عناصر باند X و Ku را نشان می دهند. هدف از این دو نمودار بررسی تاثیرپذیری عناصر طراحی شده باند پایین و بالا، از قطبی شدگی موجها در باندهای همدیگر است. شکل ۳ (الف)، دامنه موج برگشتی با مد TM را نشان می دهد، زمانی که موج تابیده شده از پورت فلوک به صورت TE تحریک شده است. شکل ۳ (ب)، نیز نشان دهنده ایزولاسیون برای عناصر باند Ku، دو قطبی های خطی است. مشاهده می شود که اختلاف موج تابیده شده TM و موج برگشتی TE که پلاریزاسیون موج در باند پایین است، به کمتر از 50 dB می رسد. با توجه به نمودارها، ملاحظه می گردد که اختلاف امواج تابشی و برگشتی در تابش پورت فلوک برای هر دو باند X و Ku، بسیار ضعیف بوده و زیر 45 dB می باشد، که این خود حاکی از ایزولاسیون خوب بین عناصر باند X و Ku است. در نتیجه هر کدام از این عناصر کمترین تاثیرپذیری را از موج تابیده شده باند دیگری را خواهند داشت.



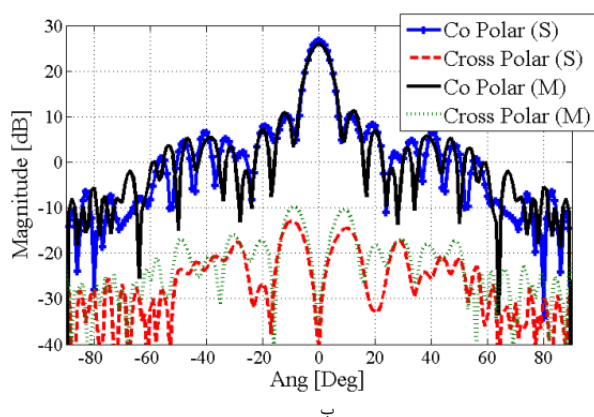
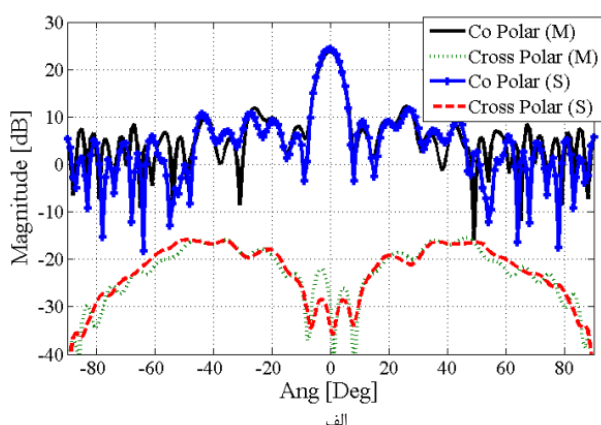
الف



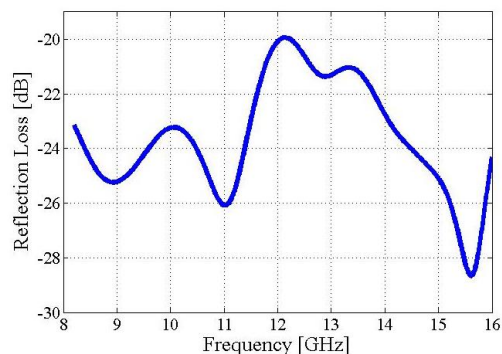
ب

شکل ۳. پاسخ دامنه موج برگشتی الف: TE مد تابیده شده و TM مد برگشتی در باند X ب: TM مد تابیده شده و TE مد برگشتی در باند Ku.

آنتن آرایه بازتابی به دلیل اینکه به صورت تغذیه از مرکز است باید فاصله کانونی آن F ، در مرکز فاز آنتن شیپوری قرار بگیرد. مرکز فاز آنتن شیپوری نقطه‌ای است که مرکز تمام امواج کروی ساطع شده از آنتن را شامل می‌شود. مرکز فاز آنتن بوقی در فاصله $Z_f = 140\text{mm}$ نسبت به آنتن آرایه‌ای که همان فاصله کانونی یا F است در موقیت $\theta = 0, \Phi = 0$ قرار گرفته است. اندازه طول ضلع آنتن آرایه بازتابی نیز $D = 160\text{mm}$ است که نسبت F/D آنتن تقریباً برابر با 0.78 بدست می‌آید که با $q = 6/7$ برای آنتن هورن جهت استفاده در هر دو باند X و Ku طراحی شده است. q اندیسی است که برای تعریف آنتن بوقی، با توجه به اینکه پترن آن به صورت $\cos^q(\theta)$ است، استفاده می‌شود. برای تغییر پلاریزاسیون موج تابشی، جهت تحریک عناصر تشعشعی آنتن آرایه بازتابی که پلاریزاسیون متعامد و واحدی دارند، کافی است که آنتن شیپوری 90° درجه در جهت عقربه‌های ساعت چرخانده شود. تا پلاریزاسیون موج تابیده شده از حالت افقی به حالت عمودی عوض شود. شکل ۷ (الف)، (ب) پترن شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده میدان الکتریکی را در فرکانس‌های مرکزی $11/5$ و 14 گیگاهرتز را نشان می‌دهد.

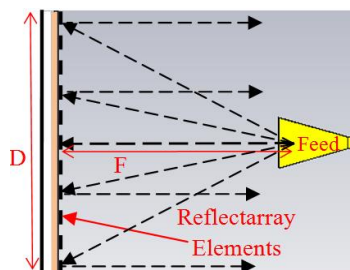
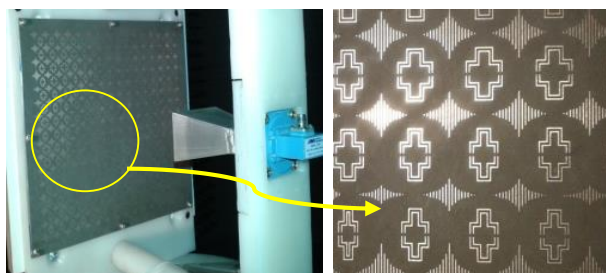


شکل ۷. پترن تشعشعی مولفه‌های هم راستا و متقاطع میدان الکتریکی در فرکانس‌های الف: $11/5\text{GHz}$ ، ب: 14GHz .



شکل ۵. آنتن شیپوری الف: طراحی شده در نرم افزار CST، ب: اندازه‌گیری شده توسط تحلیل گر شبکه، ج: منحنی تلفات بازگشتی آنتن در بازه ۸ تا ۱۶ گیگاهرتز.

پترن تشعشعی میدان های E و H آنتن شیپوری، برای روشن کردن آنتن آرایه بازتابی به صورت یکنواخت، تا زاویه 30° درجه به صورت متقارن طراحی شده است. در طراحی آنتن شیپوری و با در نظر گرفتن نسبت F/D آنتن، باید به این نکته توجه شود که قدرت میدان در لبه های آنتن آرایه بازتابی باید به اندازه 10dB کمتر از مرکز آن باشد، تا بتوان آنتن آرایه ای را به درستی روشن نموده و نیز میدان های تشعشع یافته از کناره‌های رفلکتور به بیرون متصاعد نشوند. تا بدین ترتیب بتوان بازدهی روشنایی و بازدهی دهانه را به حدکثر رساند. شکل ۶ ساختار کلی آنتن آرایه بازتابی دو بانده، همراه با تغذیه آنتن شیپوری با قطبی شدگی خطی و نیز موقعیت قرارگیری آنها را نشان می‌دهد. جنس ساختار نگهدارنده آنتن آرایه بازتابی و آنتن بوقی، برای بی‌اثر بودن در پترن تشعشعی میدان راه دور آن، از جنس دی‌الکتریک فایبرگلس ساخته شده است.

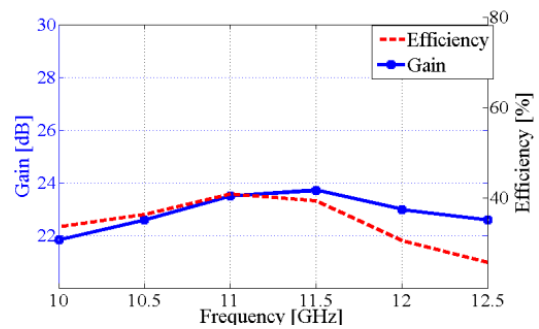


شکل ۶. ساختار کلی عناصر آنتن آرایه بازتابی ریزنواری و آنتن شیپوری ساخته شده و موقعیت قرارگیری آن.

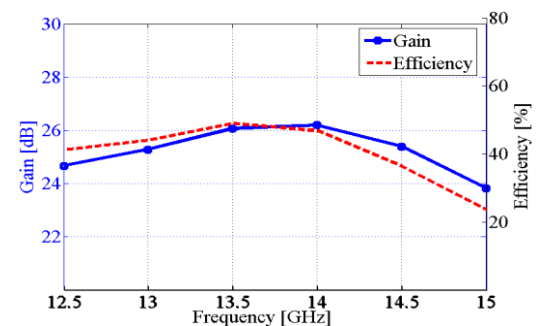
که در آن q اندیسی است که برای تعریف آنتن شیپوری با توجه به اینکه پترن آن به صورت $\text{Cos}^q(\theta)$ است، استفاده می‌شود و برابر با $6/7$ برای آنتن شیپوری جهت استفاده در هر دو باند X و Ku طراحی شده است. بهره اندازه‌گیری شده در فرکانس $11/5$ گیگاهرتز در حدود $23/9$ dB و در فرکانس 14 گیگاهرتز در حدود $26/1$ dB می‌باشد که بازدهی دهانه آنتن تقریباً به ترتیب برابر با 41% و 45% را در باندهای X و Ku بدست آمده است. علت افت بهره و بازدهی دهانه به دلیل تغذیه از مرکز آنتن آرایه بازتابی است که تلفات انسداد حاصل از آنتن هورن را بالا می‌برد. ولی مزیتی که این نوع تغذیه، دارد این است که باعث می‌شود مقدار SLL یا نسبت گلبرگ‌های کناری آنتن کاهش یابد. از دیگر عوامل تاثیرگذار بر کاهش بهره آنتن آرایه بازتابی و کاهش بازدهی تنویر، خطاهای حاصل از اندازه‌گیری در اتاق آنتن، خطاهای حاصل از ساخت به دلیل فاصله

References	[4]	[7]	[9]	Current work
Center Frequency (GHz)	7.3/31.75	10.2/22	20/30	11.5/14
Relative Bandwidth (%)	7/6	16/9	--	17.4/13
Polarization	Circular	Linear	Circular	Linear Vertical/Horizontal
Number of Layers	2	1	1	1
Element Phase Range	360/360	500/800	360/180	600/700
Measured Gain (dBi)	28/30	26/29	Directivity 39.8/43.2	23.9/26.1
Cross-Pol. Level(dB)	---	< -25	< -30	< -30
Side Lobe Level (dB)	< -17	< -16	---	< -15
Aperture Efficiency (%)	46/38	47/25	56	41/45

جدول ۲. مقایسه آنتن پیشنهادی و مقالات ارائه شده.



الف



ب

شکل ۸. نمودارهای بهره و بازدهی آنتن آرایه بازتابی بر حسب فرکانس
الف: $11/5$ GHz، ب: 14 GHz.

با توجه به شکل ۷، مقدار قطبی‌شدگی متعامد (Cross-Polar) در ناحیه برودساید آنتن آرایه بازتابی به مقداری کمتر از -30 dB رسیده است. با توجه به منحنی‌های شیفیت فازی تلفات بازگشتی در زوایای مختلف تابشی، برای هر دو عنصر طراحی شده در فرکانس‌های مرکزی $11/5$ و 14 گیگاهرتز که تقریباً ثابت می‌باشد، و نیز با توجه به مقدار کم قطبی‌شدگی متعامد پترن آنتن آرایه بازتابی، می‌توان گفت که پایداری تقریباً خوبی برای الگوی تشعشی در فرکانس‌های مورد نظر برقرار است. نمودارهای (الف، ب) در شکل ۸، بهره شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده را به ترتیب در باندهای X و Ku را نشان می‌دهند. بهره‌جهتی آنتن را می‌توان با استفاده از میدان دور تشعشع شده از آنتن، محاسبه کرد. بهره آنتن را نیز می‌توان با استفاده از توان ورودی فید با رابطه (۴) محاسبه کرد: [۱]

$$G(\theta, \varphi) = \frac{|\mathbf{E}(\theta, \varphi)|^2 4\pi^2}{2\eta_0 P_F} \quad (4)$$

که در آن $\eta_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$ امپدانس داخلی فضای آزاد است و $\mathbf{E}^F(\theta, \varphi)$ میدان حاصل از آنتن شیپوری می‌باشد. با صرف نظر از تلفات مقاومتی در فید، که معمولاً در حدود 0.5 dB است. توان کل تشعشی فید برابر است با: [۱]

$$P_F = \frac{\pi}{\eta_0 \lambda^2 (2q + 1)} \quad (5)$$

- [4]. Chulmin Han, Christopher Rodenbeck, John Huang, Fellow, IEEE, and Kai Chang, Fellow IEEE, "A C/Ka Dual Frequency Dual Layer Circularly Polarized Reflectarray Antenna With Microstrip Ring Elements", IEEE Transaction and Antennas Propagation, Vol. 52, No.11, November 2004.
- [5]. Chaharmir M.R., Shaker J., Gagnon N., "Broadband dual-band linear orthogonal polarisation reflectarray", Electronics Letters, Vol. 45, 13 - 14, 2009.
- [6]. M.R. Chaharmir., N. Gagnon, "Design of broadband, Single layer dual-band large reflectarray using multi open loop elements". IEEE Trans. On Antennas and Propagation, Vol. 58, No. 9, September 2010.
- [7]. Reza Shamsaee Malfajani, and Zahra Atlasbaf, "Design and Malfajation of a Dual-band Single Layer Reflectarray in X and K Bands", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 12, March 12, 2013.
- [8]. L.-S. Ren, Y.-C. Jiao, F. Li, J.-J. Zhao, and G. Zhao, "A dual-layer T-shaped element for broadband circularly polarized reflectarray with linearly polarized feed", IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol. 10, pp. 407-410, 2011.
- [9]. Smith T., Gothelf U., Kim O.S., Breinbjerg O., "Design, Manufacturing, and Testing of a 20/30-GHz Dual-Band Circularly Polarized Reflectarray Antenna", Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE, Vol. 12, 1480-2013.
- [10]. Rafael Florencio, Rafael R. Boix, Eduardo Carrasco, Jose A. Encinar, Mariano Barba, and Gerardo Perez-Palomino, "Broadband reflectarrays made of cells with three coplanar parallel dipoles". Microwave and Optical Technology Letters, vol. 56, No. 3, March 2014.
- [11]. Smith T., Gothelf U., Kim O.S., Breinbjerg O., "An FSS-Backed 20/30 GHz Circularly Polarized Reflectarray for a Shared Aperture L- and Ka-Band Satellite Communication Antenna", IEEE Trans. Antennas and Propagation, Vol. 62, 661-668, 2014.

هوایی ایجاد شده بین زمین و زیرلایه، غیر مسطح بودن سطح زمین و تشعشع از آن را می توان ذکر کرد. در جدول ۲ مقایسه-ای بین مقاله طراحی شده و مقالات مشابه آورده شده است با این توضیح که در مقاله ارائه شده، باندهای فرکانسی مورد نظر، نزدیکی بیشتری نسبت به مقالات دیگر دارند که این خود چالش هایی را در طراحی به همراه داشت. مقایسه پارامترها حاکی از نتایج قابل قبول برای آنتن آرایه بازتابی طراحی شده می باشد.

نتیجه گیری

در این مقاله یک آنتن آرایه بازتابی ریزنواری دو بانده با پلاریزاسیون متعامد، قابل استفاده در باندهای X و Ku ارائه شد. سلول پیشنهادی شامل دو حلقه مستطیلی شکافدار، برای باند پایین و دوقطبی های خطی به تدریج کاهش یافته، به تعداد ۱۷ عدد برای باند بالا می باشد. تغییرات فاز ضریب انعکاس بازگشتی عناصر نزدیک به ۶۰۰ درجه طراحی گردید. آنتن آرایه بازتابی شامل ۲۲۵ عنصر در هر باند است که توسط یک آنتن شیپوری با دهانه مستطیلی و قطبی شدگی خطی روشن می شود. جهت کاهش تزویج مجاورتی بین عناصر و ایجاد ایزولاسیون خوب بین باندهای ارسال و دریافت، ساختار هندسی و نوع قطبی شدگی عناصر در هر کدام از باندها متفاوت از هم طراحی شده است. در مقایسه با آنتن های آرایه بازتابی تک لایه، آنتن پیشنهادی، دارای پلاریزاسیون متعامد کمتر از -۳۰dB در ناحیه برودساید آنتن می باشد و تزویج مجاورتی بین عناصر، کمتر از ۴۵dB را دارد. با توجه به نتایج بدست آمده، بهره کلی آنتن مورد نظر ۲۳/۹dB در باند X و ۲۶/۱dB در باند Ku است که می تواند برای کاربرد در سرویس های ثابت مخابرات ماهواره ای مورد استفاده واقع شود.

مراجع

- [1]. Huang and J.A. Encinar, "Reflectarray Antennas. Piscataway", NJ, USA: IEEE Press-Wiley-Interscience, 2008.
- [2]. J. Huang, "Bandwidth study of microstrip reflectarray and a novel phased reflectarray concept", in Proc. IEEE Int. Symp. Antennas Propagat. Newport Beach, CA, June 1995, pp. 585.
- [3]. Shih-Hsun Hsu, Chulmin Han, Huang J., Kai chang, "An offset linear-Array-Fed Ku/Ka Dual-Band Reflectarray for Planet Cloud/Precipitation radar" IEEE Trans. Antennas and Propagation, Vol. 55, 3114-3122, 2007.