

طراحی و شبیه‌سازی آنتن آرایه ای در باند Ku با بهره بالا و سطح گلبرگ جانبی بسیار کم برای کاربردهای فضایی و راداری

محمد آبهت^۱، نیما آزادی طینت^{۲*}، همایون عریضی^۳

۱- کارشناسی ارشد برق مخابرات ۲- استادیار، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۳- استاد، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

(دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۲۳، پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۰۳)

چکیده

تمرکز این مقاله بر طراحی و توسعه یک آنتن میکرواستریپ آرایه‌ای با تغذیه تزویج روزنه‌ای با بهره بالا، پهنای باند زیاد، سطح گلبرگ جانبی بسیار کم است. این مشخصات و ویژگی‌ها از آنتن، کاربرد گسترده‌ای در صنایع نظامی و راداری و همچنین پروژه‌های فضایی دارد. شروع کار با طراحی تک عنصر به صورت بهینه آغاز شده و سپس آرایه کامل ۵۱۲ عنصری با تغذیه و توزیع یکسان توان بین همه عناصر انجام شد و بهره بیش از ۳۰ dB به دست آمد. برای کاهش سطح گلبرگ جانبی، شبکه تغذیه با استفاده از توزیع تیلور، طوری طراحی شده تا دامنه توان مشخص مورد نیاز هر عنصر که متفاوت با سایر عناصر است، به دست آید و همچنین تمام عناصر آرایه به صورت هم فاز تغذیه شده‌اند. عناصری که در میان آرایه هستند، بیشترین توان و عناصر کناری، توان کمتری را دریافت می‌کنند. این ساختار با ۵۱۲ عنصر به صورت آرایه ۱۶×۳۲ طراحی شده و فرکانس کاری این آنتن از ۱۲/۵ GHz تا ۱۴/۹ GHz، معادل ۱۷ درصد پهنای باند در باند Ku است. بهره این آنتن ۲۹ dB و تغییرات بهره در تمام طول بازه فرکانسی اندک بوده که مطلوب ما است و همچنین سطح گلبرگ جانبی بین ۲۲ dB تا ۲۹ dB در دو صفحه E و H است. در نهایت برای کاهش سطح گلبرگ پشتی از یک صفحه بازتابنده فلزی استفاده شد که سطح F/B به بیش از ۳۵ dB رسید. ابعاد کلی آنتن $۲۸۷ \text{ mm} \times ۵۷۶ \text{ mm}$ است.

کلید واژه‌ها: آنتن‌های آرایه‌ای، رادار، پهن باند، بهره بالا، سطح گلبرگ جانبی، توزیع غیر یکنواخت

هشدار، رادارهای ناوبری دریایی، رادارهای FMCW، رادارهای SAR، سامانه‌های ارتباط فضایی که عمدتاً در باند X/Ku کار می‌کنند، استفاده نمود [۶]. آنتن‌های میکرواستریپ می‌توانند یک جایگزین مناسب برای آنتن‌هایی نظیر آنتن‌های موجبری شکافی و یا آنتن‌های سهموی باشند.

رادارها و به تبع آن، بخش آنتن رادار همواره یکی از مهمترین بخش‌های تجهیزات دفاعی کشور به شمار می‌رود، زیرا این امکان را به ما می‌دهد که، بتوان تهدیدات را رصد کرد. امروزه برای کاربردهای راداری، طراحی آنتن‌هایی با بهره بالا، پهنای باند مطلوب، سطح گلبرگ فرعی جانبی پایین، عرض پرتوی نیم‌توان باریک و... امری ضروری به شمار می‌رود. آنتن‌های میکرواستریپ با داشتن ویژگی‌هایی همچون سطح مقطع راداری کم، سبک بودن، هزینه کمتر، شکل‌پذیر بودن و قابلیت انعطاف بالا، جایگاه ویژه‌ای در کاربردهای راداری دارند [۷].

امروزه بسیاری از کاربردهای سامانه‌های مخابراتی کارآمد و قابل اطمینان در باندهای فرکانسی بالا و باندهای فرکانسی میلی‌متری و زیر میلی‌متری مانند باند فرکانسی Ku هستند. در این محدوده فرکانسی، نسبت ابعاد فیزیکی آنتن و وزن برای

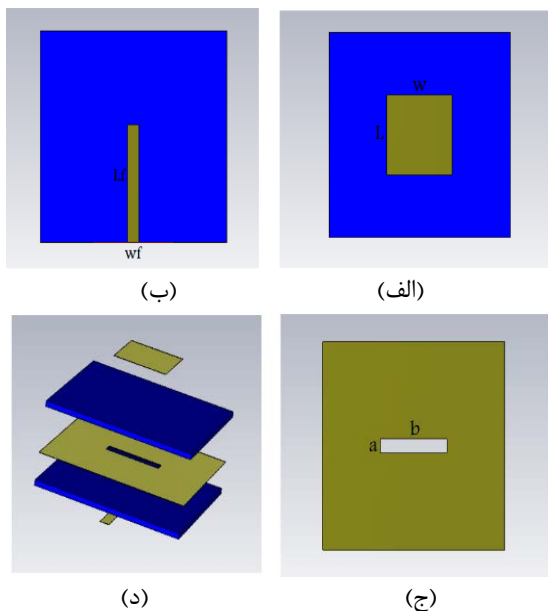
۱- مقدمه

آنتن‌های میکرواستریپ به خاطر کاربردهای فراوان در سال‌های اخیر بسیار مورد استفاده قرار گرفتند. توانایی ایجاد انواع پلاریزاسیون از جمله پلاریزاسیون خطی و دایروی، دو بانده و یا چند بانده شدن فرکانسی، جزء ویژگی‌های این نوع از آنتن‌ها است. به همین دلیل گزینه مناسبی برای کاربردهای صنعتی و نظامی هستند. در کنار این ویژگی‌ها، این آنتن‌ها دارای چالش‌هایی نظیر میزان بهره کم، توان قابل استفاده کم، بازده پایین، پهنای باند کم در حدود ۱ تا ۵ درصد هستند. هر چند در سال‌های اخیر این مسائل تا حد مناسبی حل شده‌اند. همین باعث شد تا بتوان آنتن‌های میکرواستریپ را در کاربردهای متنوعی از ساختارهای باند باریک تا سامانه‌های فراپهن باند مورد استفاده قرار داد [۱-۳].

همچنین قابلیت استفاده از فرکانس پایین تا فرکانس‌های زیر میلی‌متری را دارند [۴]. از این آنتن‌ها می‌توان در رادارهای

۲- طراحی یک عنصر آنتن مایکرواستریپ پیوند روزنه‌ای

در شکل (۱) نماهای مختلف آنتن تک عنصر طراحی شده، مشخص شده است. آنتن از دو زیر لایه تشکیل شده است که، در فاصله معینی نسبت به هم قرار گرفته‌اند. در یک زیر لایه عناصر پیچ و در زیر لایه دیگر خطوط تغذیه قرار گرفته است که از طریق شکاف ایجاد شده بر روی صفحه زمین، توان و انرژی را به پیچ جهت تشعشع منتقل می‌کنند. طول و عرض پیچ به‌طور تحلیلی محاسبه شدند [۱۱]. یک مولفه که نقش مهمی در طراحی دارد، میزان استاب اتصال باز است. چرا که باید طوری تنظیم شود تا بیشترین میزان پیوند بین خط تغذیه و پیچ ایجاد شود.



شکل (۱): آنتن تک عنصر پیوند روزنه‌ای (الف) صفحه پیچ (ب) صفحه تغذیه (ج) صفحه زمین (د) نمای جانبی.

تمام ابعاد ساختار اعم از طول و عرض پیچ، طول استاب، طول و عرض روزنه و ... طوری محاسبه شده‌اند که بهترین عملکرد و پاسخ حاصل شود. در جدول (۱) ابعاد ساختار آنتن آمده است.

جدول (۱): ابعاد ساختار آنتن. (ابعاد بر حسب میلی‌متر هستند):

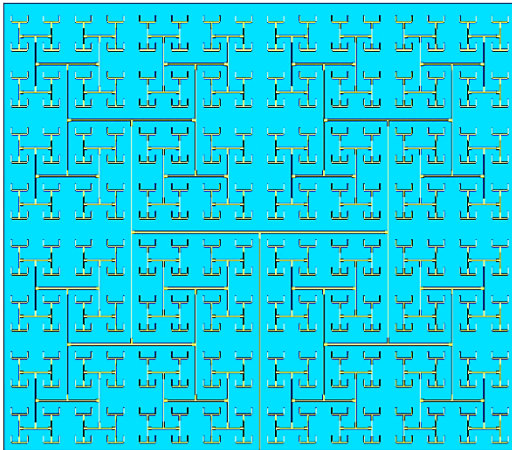
$w = 6/5$	$L = 7/1$
$wf = 1/1$	$Lf = 9$
$a = 1/2$	$b = 6/3$

نمودار تلفات بازگشتی و اثر تزویج بین دو پیچ مجاور افقی و عمودی در شکل (۲) نشان داده شده است:

بردهای متوسط و کوتاه بسیار ایده‌آل است. رادارها در این باند دارای دقت و وضوح بالایی هستند و همچنین سرعت جستجو، کشف و رهگیری بالایی دارند. این باند به شکل گسترده‌ای بر روی جنگنده‌ها، پدافند و ... برای هدایت موشک (رادار درگیری) استفاده می‌شوند (اکثر رادارها که موشکی را هدایت می‌کنند، از باند فرکانسی Ku و X استفاده می‌کنند، با این تفاوت که در شرایط یکسان، یعنی بهره و توان یکسان، باند Ku دارای برد کمتر نسبت به باند X می‌باشد ولی دقیق‌تر است). در [۸] ساختار یک آنتن آرایه مایکرواستریپ شامل ۴۲۰ پیچ با بهره بالا و SLL پایین برای رادار FMCW در باند Ku بررسی شد. پهنای پرتو نصف توان در این آرایه در صفحات E و H به ترتیب ۱۰ و ۲ درجه است. سطح گلبرگ جانبی بهتر از ۲۰ dB و بهره آنتن حدود ۳۰ dB و پهنای باند بین ۱۷/۳۵ GHz تا ۱۷/۶ GHz معادل ۱٪ پهنای باند می‌باشد و از شیوه تغذیه سری برای تغذیه آنتن‌ها استفاده شده است. در این ساختار برای کاهش سطح گلبرگ جانبی از ساختار موج نشی برای ایجاد توزیع غیر یکسان در دامنه استفاده شده است تا به سطح پایینی از سطح گلبرگ جانبی برسند. در [۹] ساختار یک آنتن آرایه مایکرواستریپ با بهره بالا و سطح گلبرگ کناری کم مورد ملاحظه قرار گرفته است. در این ساختار، برای افزایش پهنای باند، در بالای پیچ اصلی یک پیچ پارازیتی هم قرار گرفته است. این آنتن از ۶۴ عنصر به‌صورت آرایه ۸ × ۸ تشکیل شده است. برای ایجاد سطح گلبرگ جانبی پایین در صفحه H از توزیع چبی شف برای توزیع دامنه استفاده شده است. این آرایه در باند Ku و با فرکانس مرکزی ۱۷/۵ GHz پهنای باند ۹/۳٪ کار می‌کند. بهره آنتن در حدود ۲۰ dB و سطح گلبرگ کناری هم همچنین در حدود ۲۰ dB است. در [۱۰] یک آنتن آرایه‌ای با سطح گلبرگ جانبی پایین، بهره بالا و پهنای پرتو نصف توان بهینه شده مورد بررسی قرار گرفته است. این آنتن با سطح گلبرگ کناری در حدود ۲۷ dB - بهره بالا در فرکانس ۱۰ GHz طراحی شده است. برای رسیدن به سطح گلبرگ کناری پایین در ساختار آرایه، از پیچ‌هایی با ابعاد و امپدانس‌های متفاوت برای ایجاد باریک شونده‌گی استفاده شده است. ساختار آنتن به‌صورت ۷ × ۷ معادل ۴۹ عنصر به آرایه تبدیل شده است. در این مقاله به طراحی و توسعه آنتن مایکرواستریپ آرایه‌ای با پیوند روزنه‌ای با بهره بالا و سطح گلبرگ جانبی بسیار پایین و پهن باند پرداخته شده است. به‌طور خاص برای رسیدن به سطح گلبرگ جانبی پایین، از توزیع تیلور استفاده شده است، که برای تحقق آن با محاسبات تحلیلی و همچنین ایجاد نسبت توزیع توان از طریق خطوط انتقال، در بین عناصر آرایه در مراحل شبیه‌سازی، به‌هدف مورد نظر، می‌توان دست یافت.

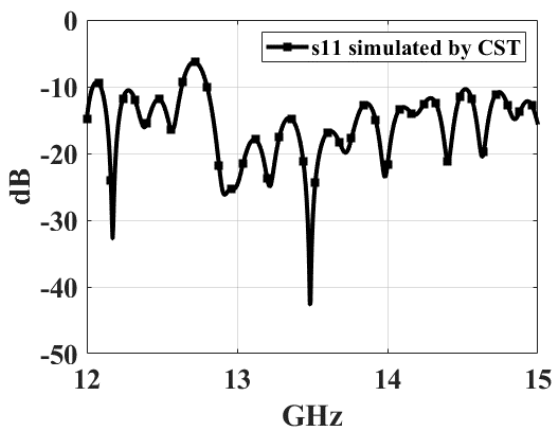
۳-۱- طراحی آرایه و شبکه تغذیه مشترک پیوند روزنه‌ای با توزیع یکنواخت و هم فاز

با استفاده از شبکه تغذیه مشترک می‌توان تمام عناصر آرایه را با دامنه و فاز یکنواخت تغذیه نمود. در طراحی باید به جریان‌های سطحی و تشعشع خطوط تغذیه توجه نمود و این محدودیت‌ها را در طراحی لحاظ کرد. طراحی شبکه تغذیه مشترک برای آرایه 16×32 در شکل (۳) نشان داده شده است. توان به‌طور مساوی بین همه عناصر تقسیم شده است. بنابراین هر پیچ، $\frac{1}{512}$ توان ابتدایی ورودی را دریافت می‌کند. طول خط از ورودی تا به کلیه پیچ‌ها برابر است و این یعنی این‌که، فاز تمام عناصر تقریباً با هم برابر است. برای تطبیق شبکه تغذیه از خط مبدل ربع طول موج استفاده شده است.

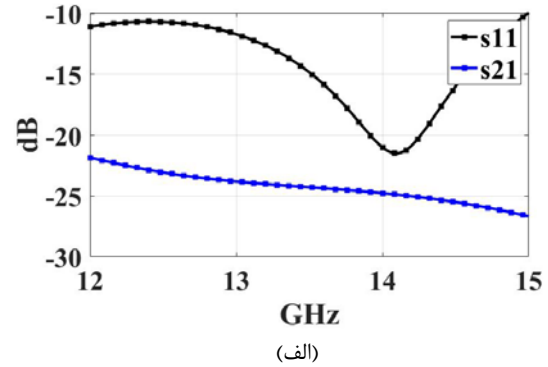


شکل (۳): شبکه تغذیه و تقسیم‌کننده توان مشترک و هم فاز.

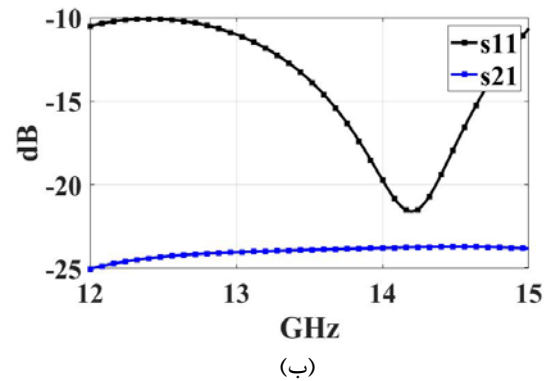
نتایج شبیه‌سازی و پارامتر S11 در شکل (۴) نشان داده شده است. همانطور که مشخص است، فرکانس کاری ساختار آرایه از فرکانس ۱۲/۷ GHz تا ۱۵/۱ GHz، که معادل ۱۷٪ پهنای باند است.



شکل (۴): تلفات بازگشتی ساختار آنتن آرایه ۵۱۲ عنصری پیوند روزنه‌ای با تغذیه یکنواخت و هم فاز عناصر.



(الف)



(ب)

شکل (۲): نمودار تلفات بازگشتی آنتن تک عنصر پیوند روزنه‌ای (الف) تزویج افقی (ب) تزویج عمودی.

پهنای باند امپدانس تقریباً از فرکانس ۱۲ GHz تا ۱۵ GHz که معادل ۲۲٪ پهنای باند است.

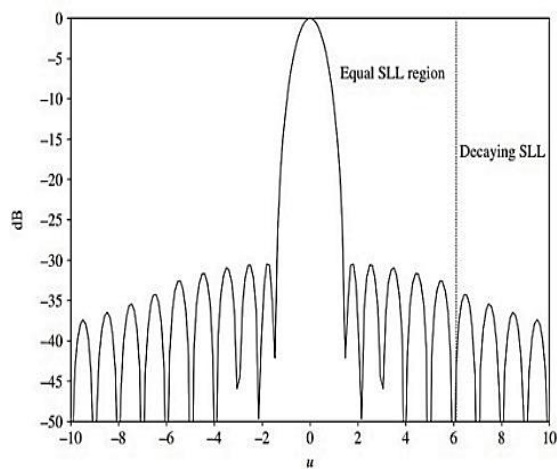
۳- طراحی آنتن آرایه پیوند روزنه صفحه‌ای با توزیع یکنواخت

برای رسیدن به بهره ۳۰ dB نیاز به آرایه‌ای با تعداد عناصر بالا داریم. می‌دانیم که به‌طور ایده‌آل و بدون در نظر گرفتن تلفات ساختار، با دو برابر شدن تعداد عناصر آرایه، بهره آنتن تقریباً ۳ dB اضافه می‌شود. در نتیجه با در نظر گرفتن این نکته و همچنین لحاظ کردن تلفات ساختار از جمله تلفات زیرلایه، تلفات خط تغذیه و ... در ابتدا آرایه‌ای با ۵۱۲ عنصر را شبیه‌سازی می‌کنیم. بدین صورت که دامنه و فاز تمام عناصر آن با هم برابر است. مشاهده می‌شود هنگامی که دامنه و فاز تمام عناصر برابر است به حداکثر بهره می‌رسیم. البته در این حالت با سطح گلبرگ جانبی مطلوب فاصله خواهیم داشت. فاصله بین عناصر در حدود 0.78λ در نظر گرفته شده است. این فاصله اگر خیلی بیشتر از این مقدار باشد، شاهد افزایش سطح گلبرگ جانبی خواهیم بود و اگر کمتر از این مقدار باشد، بهره نهایی آنتن کمتر از این مقدار خواهد شد.

۴- طراحی آرایه و شبکه تغذیه مشترک پیوند روزنه‌ای با توزیع غیر یکنواخت و هم فاز

تا بدین جای کار به مواردی مثل، بهره بیش از ۳۰ dB، پهنای باند ۱۷٪ و ... رسیدیم. در این قسمت باید به کاهش سطح گلبرگ جانبی اقدام کنیم. بدین منظور توان ورودی، به‌طور غیر یکنواخت و نامساوی ولی هم فاز، بین عنصر آرایه تقسیم می‌گردد. برای رسیدن به سطح گلبرگ جانبی پایین، مرکزی‌ترین عنصر، بیشترین توان را دریافت می‌کند و هر چه به سمت طرفین ساختار آرایه پیش‌روی کرد، میزان تغذیه و توان دریافتی کمتر خواهد شد. برای این‌که بدانیم به هر عنصر چه میزان توانی باید برسد، توزیع دامنه‌های مختلفی از جمله چبی شف، تیلور و ... وجود دارد. بسته به نوع کاربرد و نیاز ما، اعم از میزان سطح گلبرگ جانبی، بهره، پهنای پرتو نصف توان و ... می‌توان از توزیع‌های مختلفی استفاده کرد و باید یک توازن را بین مولفه‌ها و خواسته‌های مختلف ایجاد کرد. به‌طور مثال برای ساختارهای بزرگ و میزان سطح گلبرگ جانبی پایین، توزیع تیلور نسبت به توزیع چبی شف کارکرد بهتری دارد. به‌عنوان مثال در توزیع تیلور هرچه مرتبه گلبرگ جانبی بیشتر می‌شود، سطح آن هم کمتر می‌شود، در حالی که در توزیع چبی شف، سطح تمام گلبرگ‌های جانبی تقریباً یکسان است.

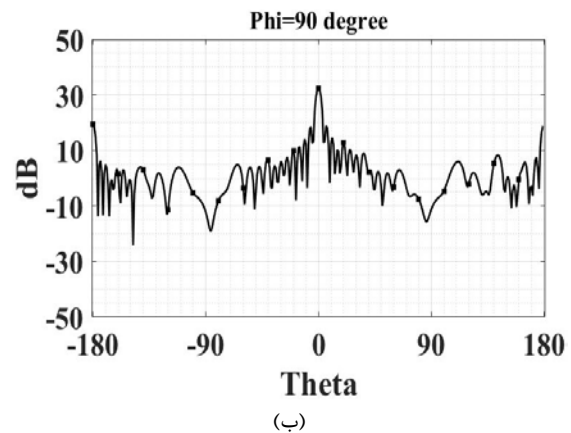
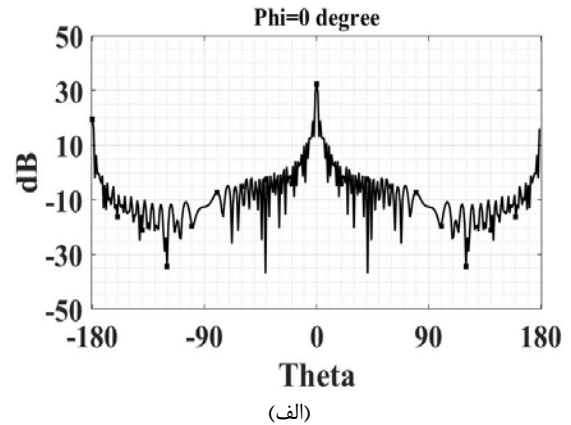
در شکل (۷) الگوی تشعشی برای توزیع تیلور با SLL برابر ۳۰ dB رسم شده است [۱۱]. همانطور که در شکل مشخص است در سنتز تیلور میزان کاهش بیشتری در گلبرگ‌های انتهایی خواهیم داشت.



شکل (۷): الگوی تیلور با $\bar{n} = 6$ و $SLR = 30$ dB [11].

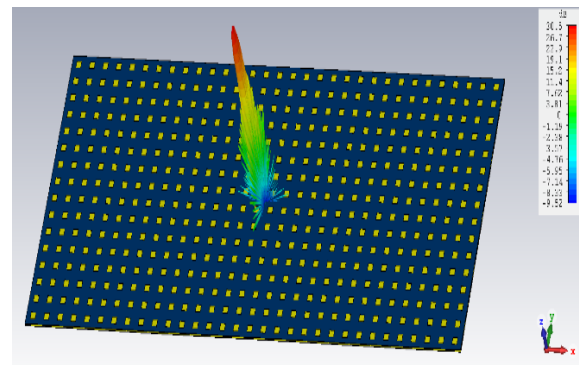
در شکل (۸) توزیع دو بعدی جریان آنتن‌ها بر اساس سنتز توزیع ۳۵ dB- تیلور برای یک آرایه 16×32 رسم گردیده است.

بهره آنتن در فرکانس ۱۳/۵ GHz حدوداً برابر است با ۳۰ dB و سطح گلبرگ جانبی (SLL) برابر با ۱۳/۷ dB- است. در شکل (۵) نمودار پرتو تشعشی آنتن در صفحات $\Phi = 0$ و $\Phi = 90$ و به‌صورت دو بعدی در فرکانس‌های ۱۳/۵ GHz رسم شده است.

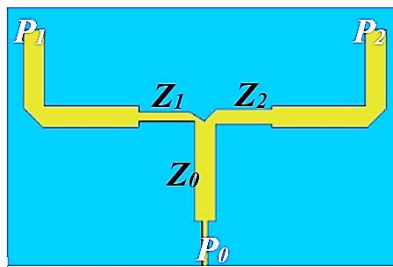


شکل (۵): پرتو تشعشی آنتن آرایه ۵۱۲ عنصری با توزیع یکنواخت دامنه و هم فاز به‌صورت دو بعدی (الف) فرکانس ۱۳/۵ GHz و صفحه $\Phi = 0$ و (ب) فرکانس ۱۳/۵ GHz و صفحه $\Phi = 90$.

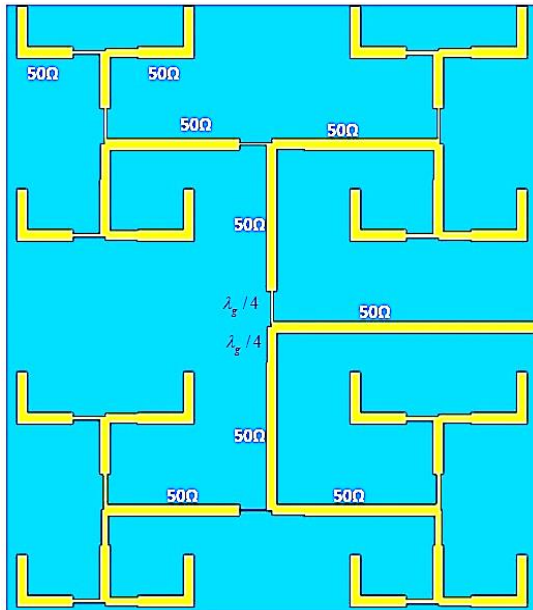
در شکل (۶) نمودار پرتو تشعشی آنتن ۵۱۲ عنصری با توزیع یکنواخت دامنه و فاز به‌صورت سه بعدی در فرکانس ۱۳/۷۵ GHz رسم شده است و بهره آنتن ۳۰/۵ dB است.



شکل (۶): پرتو تشعشی آنتن آرایه ۵۱۲ عنصری با توزیع یکنواخت دامنه و هم فاز به‌صورت سه بعدی در فرکانس ۱۳/۷۵ GHz.



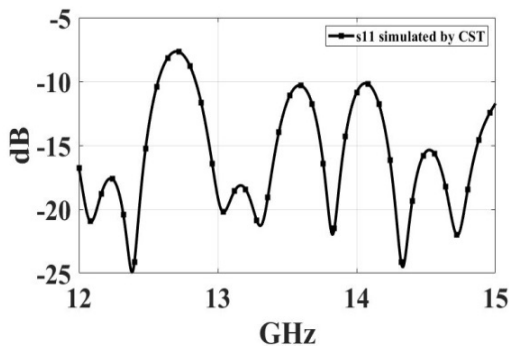
(الف)



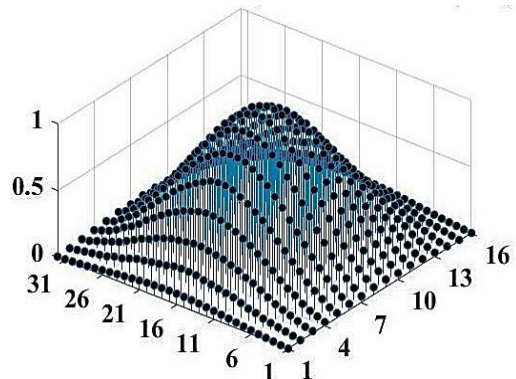
(ب)

شکل (۹): مقسم توان به‌کار گرفته شده در شبکه تغذیه آرایه آنتن (الف) مقسم دو تایی (ب) مقسم آرایه ۱۶ تایی که قسمتی از مقسم توان آرایه کل طراحی شده می‌باشد.

با توجه به تقارن ضرایب توزیع توان تیلور، تنها ربع ساختار و شبکه تغذیه را می‌توان تحلیل و طراحی کرد. بنابراین ساختار شبکه تغذیه زیر را برای رسیدن به ضرایب توزیع توان تیلور طراحی می‌کنیم. در شکل (۱۰) نمودار تلفات بازگشتی شبکه تغذیه رسم شده است و به امپدانس 50Ω تطبیق داده شده است.



شکل (۱۰): نمودار تلفات بازگشتی شبکه تغذیه تقسیم‌کننده توان نامتقارن برای توزیع تیلور -35 dB .

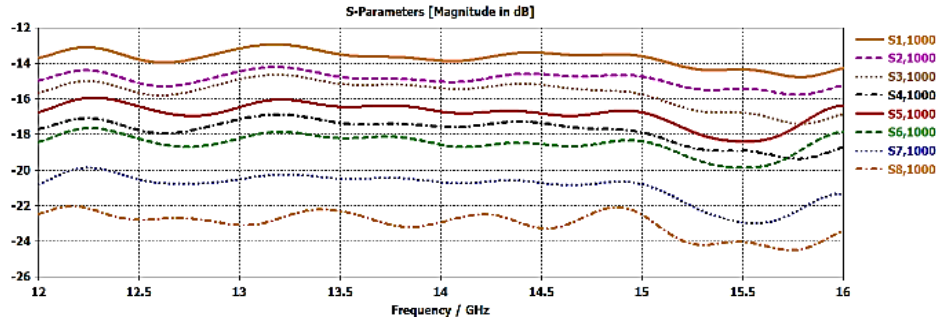


شکل (۸): توزیع جریان آرایه 32×16 بر اساس سنتز تیلور -35 dB .

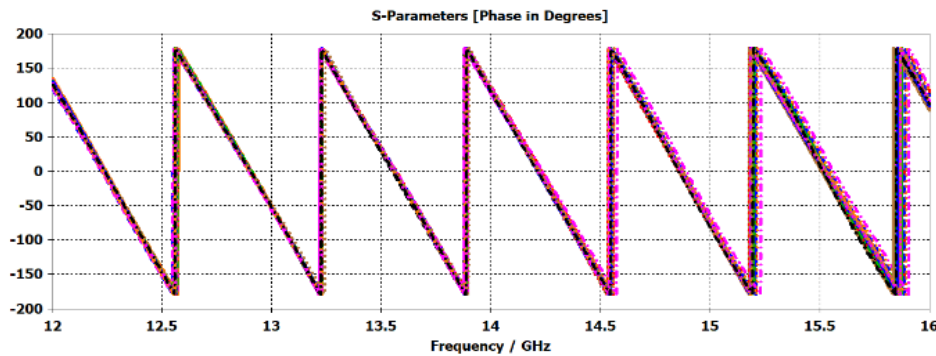
بنابراین با توجه به این که ساختار ما یک آرایه بزرگ می‌باشد و همچنین در نظر گرفتن سایر شرایط، در نتیجه از توزیع تیلور استفاده خواهد شد. برای تحقق این ضرایب در ساختار آرایه، مقسم‌های توان را طوری طراحی می‌کنیم که توان را با توجه به نسبت‌های به‌دست آمده و به‌صورت غیر یکسان تقسیم کنند. یکی از راه‌ها، استفاده از تضعیف‌کننده‌ها در هر شاخه و خط تغذیه منتهی به هر پیچ است تا میزان توان هر عنصر به میزان مشخصی به آن برسد، اما تلفات آن برای یک ساختار بزرگ زیاد خواهد شد و به تبع مولفه‌های دیگری را از دست خواهیم داد. در این ساختار از مبدل‌های ربع طول موجی استفاده می‌کنیم که علاوه بر تطبیق آرایه، نسبت مدنظر برای ضرایب توزیع توان تیلور را ایجاد کنند. همانطور که در شکل (۹) مشخص است، با ایجاد امپدانس‌های متفاوت در ورودی مقسم‌های توان، همزمان با ایجاد تطبیق، می‌توان به توزیع توان مدنظر رسید. بدین منظور ابتدا زوج مرتبی از امپدانس‌های مبدل ربع طول موجی که شرایط تطبیق 50Ω را در ورودی مقسم‌های توان فراهم می‌کنند را محاسبه نموده، سپس این زوج امپدانس‌ها که دو بازوی مقسم توان هستند (Z_1 و Z_2) را شبیه‌سازی نموده و نسبت توانی که ایجاد می‌کنند (نسبت P_1/P_2) که خود این نسبت قبلاً از نسبت جریان‌ها در توزیع تیلور محاسبه می‌گردد، در شبیه‌سازی مشخص خواهد شد (البته می‌توان به‌صورت یک معادله تطبیق، نسبت توان را نوشت ولی شبیه‌سازی جواب‌های دقیق‌تری فراهم می‌کند). به‌طور مثال، زوج امپدانس‌های (79Ω و 62Ω) که مبدل ربع طول موج هستند و شرایط تطبیق 50Ω مهم را در ورودی مقسم توان فراهم می‌کنند، با توجه به شبیه‌سازی، توان را به نسبت $1:0.186$ تقسیم می‌کنند و یا زوج امپدانس (53Ω و 134Ω)، نسبت تقسیم توان $1:0.46$ را ایجاد می‌کنند. سایر نسبت‌ها هم به همین روش به‌دست خواهند آمد. نهایتاً با داشتن مجموعه‌ای از زوج مرتب امپدانس‌ها که همزمان با ایجاد شرایط تطبیق، نسبت تقسیم توان متفاوتی ایجاد می‌کنند، ضرایب توزیع توان را برای ساختار آرایه تحقق خواهند بخشید. شکل (۹-ب) شکل کلی یک مقسم توان ۱۶ تایی است.

طول بازه فرکانسی و پهنای باند امپدانسی، مقداری ثابت است و این یعنی این که ساختار آرایه از نظر سطح گلبیگ جانبی در تمام پهنای باند رفتاری مشخص و تقریباً یکسان دارد.

در شکل (۱۱) توان‌های مختلف تعدادی از عناصر آرایه با یکدیگر مقایسه شده‌اند و نسبت آن‌ها بررسی شده است (همین کار را برای سایر عناصر آرایه انجام می‌دهیم). نکته مهمی که وجود دارد این است که نسبت توان برای تمام عناصر در تمام



شکل (۱۱): نسبت توان عناصر در توزیع تیلور برای سطح گلبیگ جانبی -35 dB.

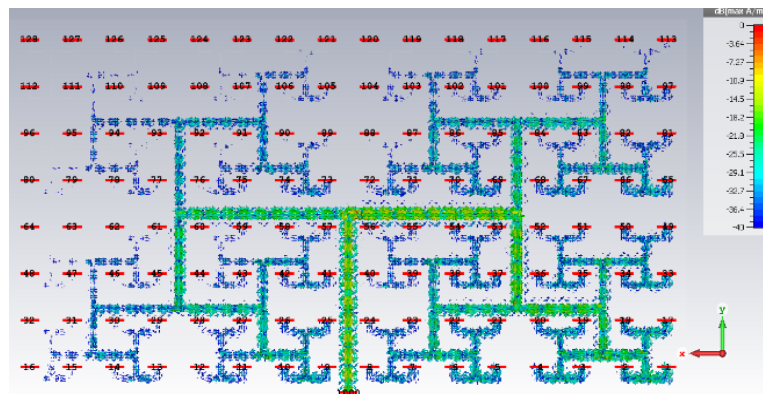


شکل (۱۲): فاز عناصر آرایه با توزیع غیر یکنواخت.

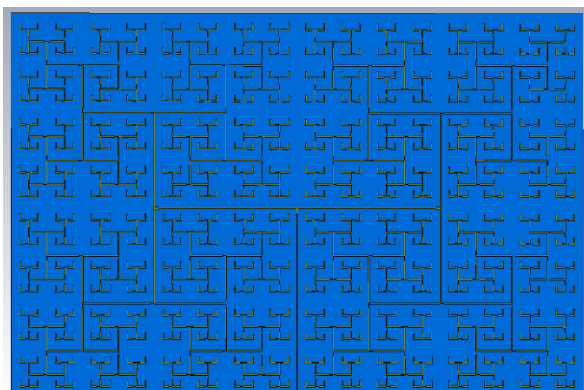
پرتو تشعشعی آرایه کامل حاصل از توزیع توان تیلور در شکل (۱۴) در فرکانس $13/5$ GHz در صفحات E و H رسم شده است. بهره آرایه در این حالت در حدود 29 dB است. میزان بهره آرایه با توزیع تیلور، کمتر از ساختار با توزیع یکنواخت است. تغییرات بهره آرایه در کل پهنای باند امپدانسی اندک است که امری مطلوب است. همانطور که مشخص است سطح گلبیگ جانبی در این ساختار بسیار پایین‌تر از ساختار آرایه با توزیع یکنواخت و در حدود $-22/5$ dB تا -29 dB در صفحات مختلف متغیر است.

برای این که پرتو اصلی آرایه بدون چرخش باشد، می‌بایست فاز تمام عناصر با یکدیگر برابر باشند. حال با توجه به این که در ساختار خط تغذیه، فاصله ورودی توان تا تمام عناصر آرایه به صورت یکسان است، بنابراین فاز تمام عناصر هم تقریباً با هم برابر خواهند بود. این موضوع در شکل (۱۲) مشخص است.

در شکل (۱۳) نمودار توزیع جریان نشان داده شده است. با توجه به نمودار و متناسب با ضرایب توزیع توان تیلور، بیش‌ترین توان و جریان به عناصر پچ مرکزی رسیده و هر چه به سمت کناره‌های ساختار آرایه برویم، میزان توان عناصر پچ کاهش پیدا می‌کند.

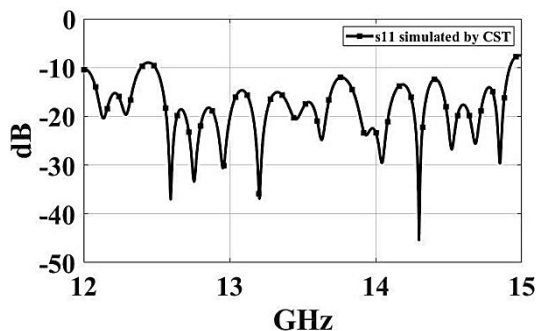


شکل (۱۳): توزیع جریان در ساختار آرایه با توزیع توان غیر یکنواخت.



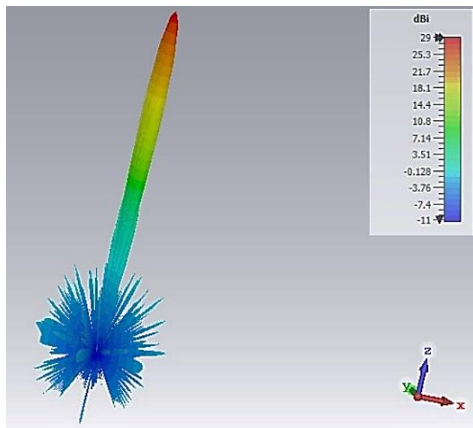
شکل (۱۵): ساختار شبکه تغذیه آنتن آرایه‌ای توزیع روزه‌ای با ۵۱۲ عنصر با تغذیه غیر یکنواخت.

نمودار S11 ساختار کامل و نهایی آرایه ۵۱۲ عنصری در شکل (۱۶) رسم شده است. پهنای باند امیدانسی آنتن از فرکانس ۱۲/۵ GHz تا ۱۴/۹ GHz که معادل ۱۷٪ پهنای باند امیدانسی است.

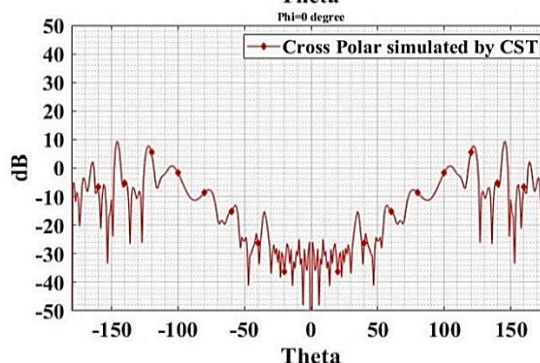
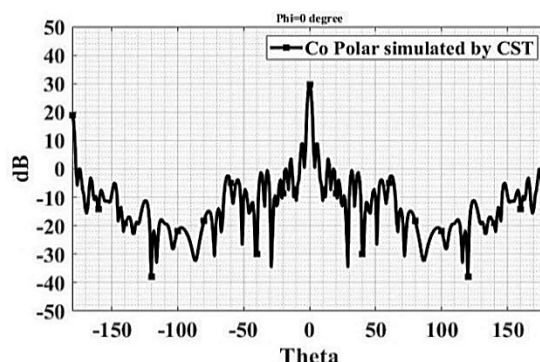


شکل (۱۶): نمودار S11 ساختار آرایه ۵۱۲ عنصری با توزیع غیر یکنواخت.

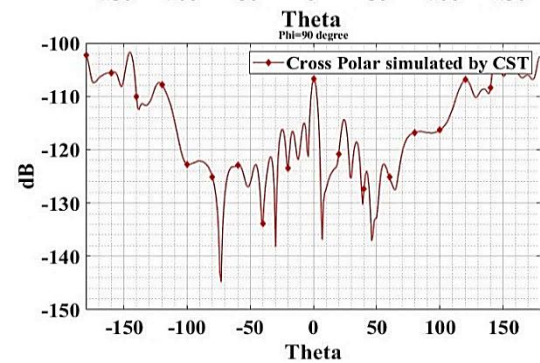
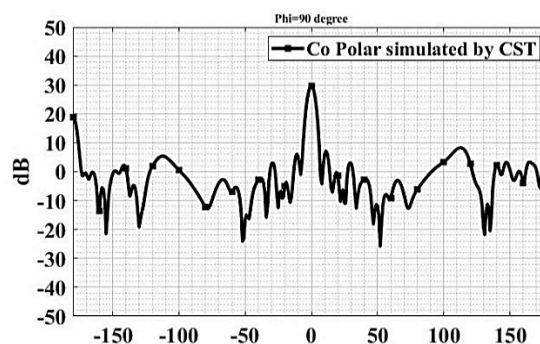
و نهایتاً در شکل (۱۷) پرتو سه بعدی آرایه ۳۲×۱۶ عنصری با توزیع غیر یکنواخت توان در فرکانس ۱۴ GHz رسم شده است که بهره آنتن در این فرکانس ۲۹ dB است:



شکل (۱۷): پرتو تشعشعی آنتن آرایه ۵۱۲ عنصری با توزیع غیر یکنواخت دامنه به صورت سه بعدی در فرکانس ۱۴ GHz.



Phi = ۹۰ (الف)



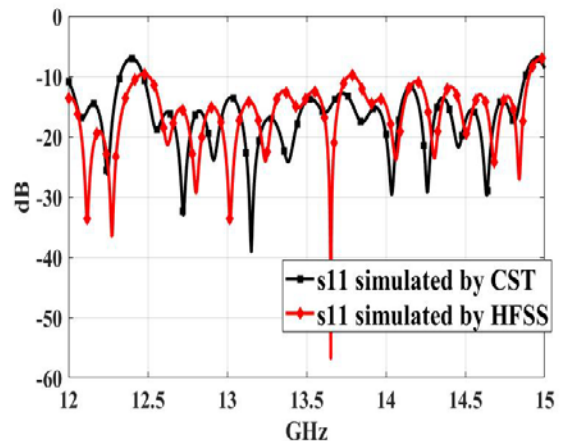
(ب)

شکل (۱۴): پرتو تشعشعی آنتن آرایه ۵۱۲ عنصری با توزیع غیر یکنواخت و هم فاز به صورت دو بعدی (الف) فرکانس ۱۳/۵ GHz و صفحه Phi = ۰ (ب) فرکانس ۱۳/۵ GHz و صفحه Phi = ۹۰

ساختار کامل زیرلایه همراه با پیچ آرایه ۵۱۲ عنصری دارای ابعاد کلی ۲۸۸ mm × ۵۷۶ mm است. در شکل (۱۵) ساختار خط تغذیه آرایه کامل ۵۱۲ عنصری با توزیع غیر یکنواخت نشان داده است.

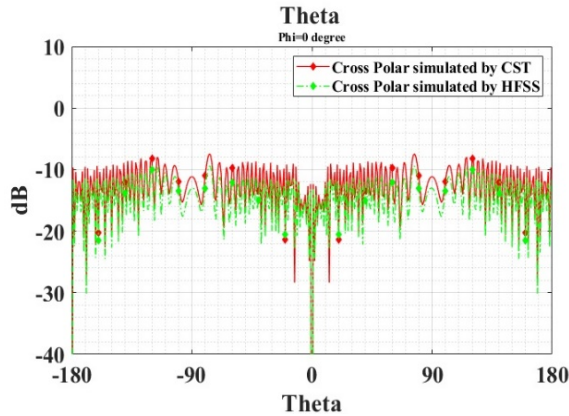
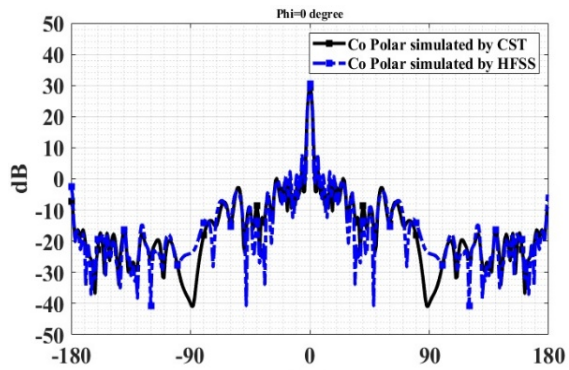
۵- کاهش تشعشعات گلبرگ پشتی

توجه به کاهش تشعشعات گلبرگ پشتی در طراحی اکثر آنتن‌ها مسئله‌ای است که باید به آن توجه شود. چرا که به غیر از اتلاف انرژی تشعشعی و کاهش بازده آنتن، در کاربردهای مختلف دفاعی، تجاری و فضایی در زمینه سطح گلبرگ پشتی محدودیت وجود دارد. به‌عنوان مثال در کاربردهای تجاری و سامانه‌های ارتباطی این مسئله از آن جهت مهم است که در زمینه نرخ جذب ویژه و بحث امن و سالم بودن آنتن، به حداقل رساندن گلبرگ پشتی موضوعی بسیار مهم است. به‌طور مشابه برای آنتن‌های راداری و فضایی که نزدیک سطح زمین قرار می‌گیرند، اگر سطح گلبرگ پشتی زیاد باشد، نتیجه این می‌شود که این تشعشعات از سطح زمین بازتاب می‌شوند و با سیگنال ورودی آنتن تداخل پیدا می‌کنند و عملکرد آنتن را پایین می‌آورند. در اینجا، برای کاهش سطح گلبرگ پشتی از یک صفحه بازتابنده استفاده شده، که به‌عنوان زمین دوم محسوب می‌شود. برای این که بهترین عملکرد و بهترین کاهش گلبرگ پشتی را در عین ثابت ماندن گلبرگ اصلی داشته باشیم، این صفحه تقریباً در فاصله ربع طول موج نسبت به زیرلایه تغذیه آنتن قرار می‌گیرد، زیرا هم پهنای باند امیدانسی ثابت بماند و تغییر نکند و هم بهره آنتن مقداری افزایش یابد. که در اینجا این فاصله تقریباً برابر است با $5/5 \text{ mm}$. همانطور که نتایج آنتن در شکل (۱۸) نشان داده شده است، پهنای باند آنتن از $12/5 \text{ GHz}$ تا $14/85 \text{ GHz}$ است.

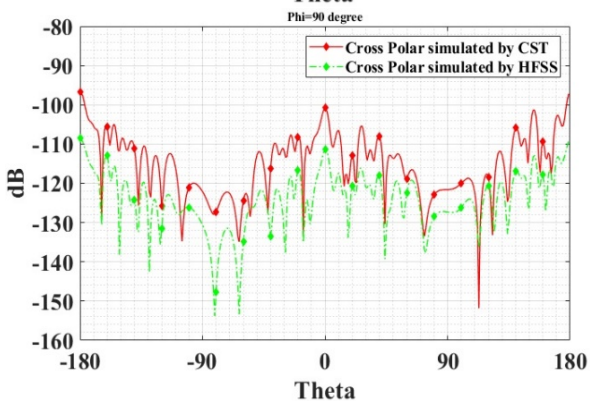
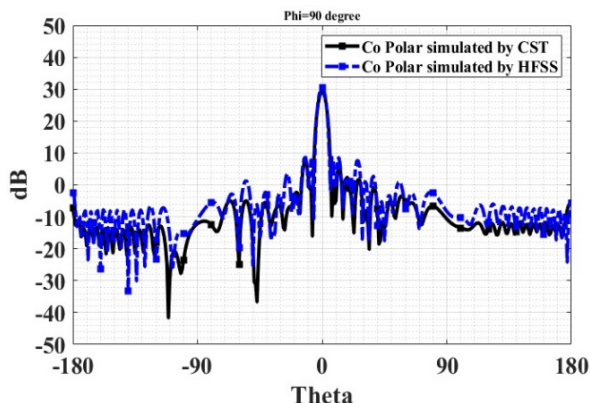


شکل (۱۸): نمودار S11 ساختار کامل آرایه ۵۱۲ عنصری همراه با صفحه بازتابنده با توزیع غیریکسان و غیر یکنواخت.

بهره آنتن مقداری افزایش پیدا کرده و سطح گلبرگ پشتی به‌میزان زیادی کاهش پیدا کرده است. در شکل (۱۹) پرتو تشعشعی آنتن در صفحات مختلف در فرکانس $13/5 \text{ GHz}$ رسم شده است.



(الف)



(ب)

شکل (۱۹): پرتو تشعشعی آنتن آرایه ۵۱۲ عنصری با صفحه بازتابنده و

توزیع غیریکنواخت و هم فاز به‌صورت دو بعدی

(الف) فرکانس $13/5 \text{ GHz}$ و صفحه $\text{Phi} = 0$

(ب) فرکانس $13/5 \text{ GHz}$ و صفحه $\text{Phi} = 90$.

جدول (۲): نتایج شبیه‌سازی آنتن آرایه ۵۱۲ عنصری با پیوند روزنه‌ای و صفحه بازتابنده با توزیع غیر یکنواخت و هم فاز.

فرکانس (GHz)	۱۲/۷۵	۱۳/۵	۱۴/۵
بهره (dBi)	۲۹	۲۹/۳	۲۹/۱
SLL E-plane (dB)	-۲۱/۲	-۲۱/۷	-۲۵/۵
SLL H-plane (dB)	-۲۳/۷	-۲۶/۲	-۲۹/۳
F/B (dB)	۴۱/۷	۳۶/۵	۳۹/۸
HPBW E-plane (deg)	۵/۳	۵	۴/۸
HPBW H-plane (deg)	۲/۶	۲/۴	۲/۳

در جدول (۳) به مقایسه آنتن طراحی شده در این مقاله با سایر کارهای انجام شده در این زمینه پرداخته می‌شود. (لازم به ذکر است مقایسه‌های انجام شده فقط بر اساس نتایج شبیه‌سازی آنتن ارائه شده با مقالات فوق الذکر می‌باشد)

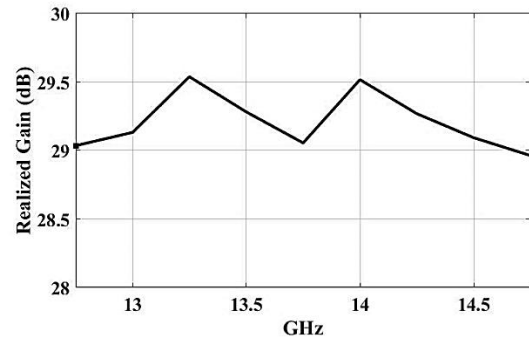
جدول (۳): مقایسه آنتن پیشنهادی با کارهای قبلی

مرجع	[1]	[5]	[6]	[7]	[8]	آنتن پیشنهادی
ابعاد (mm × mm)	۲۰۰ × ۲۰۰	۱۳۰ × ۱۳۰	۴۳۰ × ۳۵۰	۵۳۰ × ۱۲۰	۷۴۰ × ۳۱۰	۵۷۶ × ۲۸۷
فرکانس (GHz)	۵/۸	۱۰/۵	۲/۷	۱۷/۴	۱۷/۵	۱۳/۶
Bandwidth (%)	۲	۴۴	۹	۱	۹	۱۷
Gain (dBi)	۱۹/۵	۲۰	۱۷	۲۹	۲۰	۲۹
Min SLL (dB)	-۱۲	-۱۲	-۶	-۲۵	-۲۱	-۲۹
Max F/B (dB)	۳۴	۲۱	۲۳	۳۸	۲۶	۴۱

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک آنتن آرایه‌ای تزویج روزنه‌ای صفحه‌ای با ۵۱۲ عنصر ۳۲×۱۶ برای بازه فرکانسی ۱۲/۵ GHz تا ۱۴/۸۵ GHz در باند Ku که معادل ۱۷٪ پهنای باند است، تحلیل و شبیه‌سازی شده است. ساختاری که طراحی شده دارای بهره بالا و در حدود ۳۰ dB، سطح گلبرگ جانبی بسیار پایین که بین -۲۲ dB تا

شکل‌های (۲۰ و ۲۱) به ترتیب نمودارهای بهره بر حسب فرکانس و F/B بر حسب فرکانس است. همانطور که مشخص است، سطح گلبرگ پشتی به میزان زیادی کاهش پیدا کرده است.

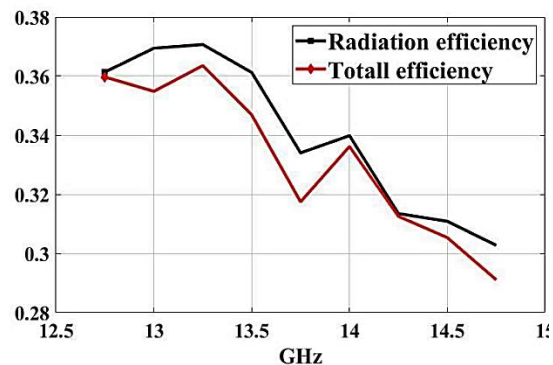


شکل (۲۰): نمودار بهره بر حسب فرکانس.



شکل (۲۱): نمودار F/B بر حسب فرکانس.

در شکل (۲۲) میزان راندمان تشعشی و راندمان کلی آنتن نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشهود است راندمان آنتن در ابتدای باند بازه فرکانسی بازدهی در حدود ۰/۳۶ دارد که با افزایش فرکانس در انتهای باند مقدار به حدود ۰/۳ کاهش پیدا می‌کند.



شکل (۲۲): میزان راندمان تشعشی و راندمان کلی آنتن.

پارامترهای پرتو تشعشی در جدول (۲) آمده است.

¹ Front to Back Ratio

- [4] M. Mosalanejad, S. Brebels and I. Ocket, "Millimeter wave cavity backed aperture coupled microstrip patch antenna," 10th European Conf. Antennas and Propagation (EuCAP), Davos, pp. 1-5, 2016
- [5] M.M. Bilgic and K. Yegin, "Wideband offset slot-coupled patch antenna array for X/Ku-band multimode radars," IEEE Antennas Wireless Propagation Letter, vol. 13, pp. 157-160, 2014.
- [6] A. K. Sahu, M. R. Das, "4x4 rectangular patch array antenna for bore sight application of conical scan S-band tracking radar," Antenna Week (IAW), pp. 1 - 4, 2011.
- [7] N. Boskovic, "High Gain Printed Antenna Array for FMCW Radar at 17 GHz," 12th International Conference on Telecommunication in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services (TELSIKS) Serbia, Nis, October, 2015.
- [8] Z. Y. Wei, "The Simulation Design of a Low-Side Lobe Level High Gain and Broadband Microstrip Patch Antenna Array," Proceedings of ISAP, Okinawa, Japan, 2016.
- [9] G. C. Kang, H. Y. Lee, J. K. Kim, "Ku-Band High Efficiency Antenna with Corporate-Series-Fed Microstrip Array," IEEE Antenna and Propagation Society International Symposium, August, 2003.
- [10] C. A. Balanis, "Antenna Theory: Analysis and Design, 3rd Edition," John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, 2005.
- [11] R. C. Hansen, "Phased Array Antennas," Wiley, 1998.

۲۹ dB- در دو صفحه E و H متغیر بوده و برای کاهش سطح گلبرگ پشتی از یک صفحه بازتابنده فلزی استفاده شد که F/B به بیش از ۳۵ dB رسید. پهنای پرتو نصف توان در دو صفحه باریک است. ابعاد کلی آنتن پیشنهادی مقاله $287 \text{ mm} \times 576 \text{ mm}$ است. این آنتن گزینه بسیار مناسبی برای کاربردهای نظامی و راداری از جمله رادارهای FMCW و ردیاب و همچنین کاربردهای فضایی است.

۷- مراجع

- [1] S. Thakur, S.S. Narkhede, T. Bhuiya and T. Bhuiya, "Microstrip patch antenna array for Rainfall RADAR," Fourth International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies (ICCCNT), pp. 1-4, July 2013.
- [2] M.N. Shakib, M.T. Islam and N. Misran "Stacked patch antenna with folded patch feed for ultra-wideband application," IET Microwave Antennas Propagation, vol. 4, no. 10, pp. 1456-1461, 2010.
- [3] R. Azim, M.T. Islam and N. Misran, "Ground modified double-sided printed compact UWB antenna", Electronic Letter, vol. 47, no. 1, pp. 9-11, 2011.