Scientific Journal of Radar
Vol. 12, No. 1, Spring and Summer2024, Serial No. 31, pp. 99- 112
ISSN: 2322-4347, E-ISSN: 2980-8979

Design and Fabrication of a high-gain broadband antenna with monopulse tracking capability in the azimuth direction and a Cosecant-Squared radiation pattern in the direction of elevation.

A. Hamidi, S.M.J. Razavi*, S.M. Hamidi
* Associate Professor, Malek Ashtar University of Technology-Tehran-Iran

(Received: 2024/05/01, Revised: 2024/07/31, Accepted: 2024/08/24, Published: 2024/10/01)
DOR: https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1402.11.2.12.0

ABSTRACT

Antennas with a cosecant-squared radiation pattern are employed in surveillance and search radars. One of the most critical features of this radiation pattern is its ability to maintain a constant received power from a target flying at a fixed altitude but varying distances from the radar. In this paper, a monopulse array antenna with a cosecant-squared fan-beam radiation pattern, wide bandwidth, low sidelobe level, and slant polarization is designed for high-precision target search and tracking. The monopulse array antenna consists of 2×8 microstrip radiating elements with a modified proximity-coupled feed. To reduce mutual coupling between the radiating elements, metallic walls are placed between them. Additionally, a second ground plane is introduced behind the radiating elements to enhance gain. For synthesizing the cosecant-squared radiation pattern, the amplitude and phase of each element are optimized using a genetic algorithm, accounting for mutual coupling effects. Asymmetric amplitude coefficients are employed to reduce sidelobe levels, and a Schiffman phase shifter is designed to achieve the desired cosecant-squared radiation pattern. A key aspect of the phase shifter design is the use of a uniform reference line. Finally, a rectangular 180° hybrid coupler is utilized to improve azimuth tracking, enabling the antenna to exhibit a monopulse radiation pattern in this direction. Simulation and measurement results show good agreement. The antenna achieves a 34% fractional bandwidth (3.8–5.4 GHz) , a gain of 13.05 dBi, a sidelobe level of 14 dB, a null depth of 24 dB, and a beamwidth of 26°. The radiation pattern closely follows the cosecant-squared curve.

Keywords: Monopulse Antenna, Cosecant-Squared Radiation Pattern, Wideband Antenna

Cite this article: Hamidi, A., razavi, S. M. J. & hamidi, S. M., "Design and Fabrication of a high-gain broadband antenna with monopulse tracking capability in the azimuth direction and a Cosecant-Squared radiation pattern in the direction of elevation." *Radar*, vol. 12, no. 1 , pp. 99- 112. 2024.

DOR: https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1402.11.2.12.0

© The Author(s). retain the copyright and full publishing rights

Publisher: Imam Hossein University

Corresponding Author Email: razavismj@mut.ac.ir

"رادار"

سال دوازدهم، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۴۰۳، ص ۹۹- ۱۱۲

شاپا الکترونیکی: ۴۰۲۴ -۲۳۴۵ شاپا چاپی: ۴۰۳۲ -۲۳۴۵

علمی – پژوهشی

طراحی و ساخت آنتن پهن باند با بهره بالا و قابلیت ردگیری مونو پالس در راستای سمت و الگوی تشعشعی مجذور کسکانت در راستای ارتفاع

سید علی حمیدی[۱]، سید محمدجواد رضوی[۲]*، سید محمد حمیدی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، ۲- دانشیار، ۳- دانش‌آموخته دکتری دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۲، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۱۰، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۳، انتشار: ۱۴۰۳/۰۷/۱۰)

DOR: https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1402.11.2.12.0

چکیده

آنتن‌های با الگوی تشعشعی مجذور کسکانت در رادارهای ناظر و جستجوگر، مورداستفاده قرار می‌گیرند. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های این الگوی تشعشعی، ثابت ماندن توان دریافت شده توسط آنتن، از هدفی که در ارتفاع ثابت اما بافاصله متفاوت نسبت به رادار پرواز می‌کند، است. در این مقاله یک آنتن آرایه مونو پالس با الگوی تشعشعی بادبزنی مجذور کسکانت، پهنای باند بالا، سطح گلبرگ فرعی پایین و قطبش مایل برای جستجو و رهگیری اهداف بادقت بالا طراحی شده است. آنتن آرایه مونو پالس شامل 8 × 2 عنصر تشعشعی ریز نوار با تغذیه روزنه مجاورتی اصلاح شده است. برای کاهش تزویج میان عناصر تشعشعی از دیواره فلزی میان عناصر تشعشعی استفاده شده است. همچنین برای افزایش بهره در پشت عناصر تشعشعی صفحه زمین دومی قرار گرفته است. برای ترکیب الگوی تشعشعی مجذور کسکانت، دامنه و فاز هر عنصر با استفاده از الگوریتم ژنتیک با درنظرگرفتن اثر تزویج میان عناصر به‌دست‌آمده است. برای کاهش سطح گلبرگ فرعی از ضرایب دامنه نامتقارن استفاده شده است و برای داشتن الگوی تشعشعی مجذور کسکانت، تغییردهنده فاز شیفمن طراحی شده است. نکته مهم در طراحی تغییردهنده‌های فاز استفاده از خط مرجع یکسان بوده است. در نهایت با استفاده از هیبرید ۱۸۰ درجه مستطیلی برای بهبود رهگیری در جهت سمت، آنتن دارای الگوی تشعشعی مجموع و تفاضل در این راستا است. نتایج شبیه‌سازی و ساخت همخوانی مناسبی دارند. آنتن دارای پهنای باند ۳۴درصدی (3.8-5.4 GHz)، بهره 13.05dBi، سطح گلبرگ فرعی 14dB، عمق صفر 24dB، پهنای پرتوی 26درجه است و الگوی تشعشعی از منحنی مجذور کسکانت پیروی می‌کند.

کلیدواژه‌ها: آنتن مونو پالس، الگوی تشعشعی مجذور کسکانت، آنتن پهن باند

۱- مقدمه

آنتن‌ها با الگوی تشعشعی مجذور کسکانت در دستگاه‌های راداری، ماهواره‌ای، نظارت هوایی و هدایت استفاده می‌شوند[1] .

الگوی تشعشعی مجذور کسکانت ابزاری برای دست‌یافتن به شدت سیگنال یکسان در ورودی به‌ازای یکسان بودن ارتفاع اهداف در فواصل متفاوت است. به عبارتی این الگوی تشعشعی توان کمتری به اهداف نزدیک نسبت به اهداف دور در ارتفاع ثابت

استناد: حمیدی، علی، رضوی، سید محمد جواد و حمیدی، سید محمد، "طراحی و ساخت آنتن پهن‌باند با بهره بالا و قابلیت ردگیری مونوپالس در راستای سمت و الگوی تشعشعی مجذور کسکانت در راستای ارتفاع." *رادار*، ۱۲(۱)، ۹۹- ۱۱۲، ۱۴۰۳.

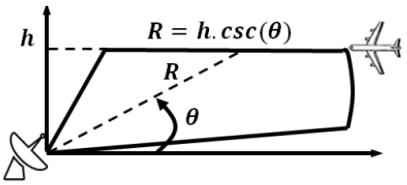
DOR: https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1402.11.2.12.0

© نویسنده(گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می‌دارند.

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین(ع).

رایانامه نویسنده مسئول: razavismj@mut.ac.ir

ارسال می‌کند. آنتن مجذور کسکانت، آنتنی است که بهره صفحه ارتفاع آن تابعی از زاویه ارتفاع است. برای ایجاد الگوی تشعشعی مجذور کسکانت، انواع مختلفی از آنتن‌ها در روش‌ها مختلف طراحی شده است[2-5] . یکی از روش‌های اولیه، آنتن‌های انعکاسی است که با تغییر شکل منعکس‌کننده و روش‌های بهینه‌سازی، منحنی مناسب جهت ایجاد الگوی تشعشعی موردنظر صورت می‌پذیرد[4] . در مرجع [5] با تغییر و بهینه‌سازی سطح مقطع آنتن شیپوری، روش طراحی الگوی تشعشعی مجذور کسکانت پیاده‌سازی شده است. عیب اصلی آنتن‌های منعکس-کننده وزن و حجم بالای آن است.



شکل (۱). موقعیت قرارگیری رادار با الگوی تشعشعی مجذور کسکانت و هدف

همچنین برای آنتن‌های صفحه‌ای در مراجع [6-9] نمونه‌های گزارش شده است. به دلیل تغییرات فاز رسیده به عناصر تشعشعی با تغییر فرکانس، معمولاً دارای پهنای باند فرکانسی محدودی هستند. الگوی تشعشعی مجذور کسکانت برای دستگاه‌های برد بلند با بهره بالا در زاویه دید افقی و بهره کم در زاویه دید عمودی کاربرد دارند[10] . شکل (۱) موقعیت هدف و هواپیما را نشان می‌دهد. در معادله رادار توان برگشتی از هدف(P_r) به‌صورت رابطه (۱) است.

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{4\pi^3 R^4} \qquad (۱)$$

که در آن، P_t توان ارسالی، G بهره آنتن، λ طول‌موج، σ سطح مقطع راداری هدف و R فاصله هدف از رادار است. اگر هدف در ارتفاع ثابتh به رادار نزدیک شود، فاصله هدف از رادار به‌صورت رابطه $R = h \times csc(\theta)$ ساده می‌شود؛ بنابراین با ثابت درنظرگرفتن σ و P_t در معادله رادار، اگر بهره آنتن متناسب با $csc^2(\theta)$ باشد، توان دریافتی در رادار ثابت می‌ماند. اصول آشکارسازی رادارها بر اساس توان انعکاسی دریافت شده از هدف است، انتظار این است که توان با افزایش فاصله کاهش یابد؛ بنابراین، الگوی تشعشعی از نوع مجذور کسکانت به‌گونه‌ای است که توان دریافتی در راستای اهداف واقع‌شده در فواصل مختلف اما با زاویه دید یکسان، تقریباً مقدار ثابتی دارد. در سال‌های اخیر از روش‌های بهینه‌سازی مثل الگوریتم ژنتیک (GA)، ازدحام ذرات (PSO) و (IWS) برای ترکیب الگوی تشعشعی مجذور کسکانت استفاده شده است[9-14] . برای کاهش سطح گلبرگ فرعی از ضرایب دامنه نامتقارن استفاده شده است و برای داشتن الگوی تشعشعی مجذور کسکانت، تغییردهنده فاز شیف‌من طراحی شده است. نکته قابل‌توجه در طراحی تغییردهنده‌های فاز استفاده از خط مرجع یکسان بوده است. در نهایت با استفاده از هیبرید ۱۸۰ درجه مستطیلی برای بهبود رهگیری در جهت سمت، آنتن دارای الگوی تشعشعی مونو پالس در این راستا است. مشخصات موردانتظار اولیه در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱) مشخصات آنتن نهایی

بهره	13 dBi
پهنای باند نسبی	3.8-5.4 GHz
پهنای پرتو در راستای ارتفاع	20°
پهنای پرتو در راستای سمت	45°
سطح گلبرگ فرعی	20 dB
لوچی	1° <
عمق صفر	-35 dB
قطبش	افقی و عمودی (مایل)

۲- طراحی آنتن مونو پالس با الگوی تشعشعی مجذور کسکانت

آنتن آرایه مونو پالس با الگوی تشعشعی مجذور کسکانت شامل 8×2 عنصر تشعشعی مایکرواستریپ با تغذیه روزنه مجاورتی است که در بازه فرکانسی 3.5GHz-5.5GHz قابلیت تشعشع دارد. برای افزایش بهره، صفحه زمین دومی در پشت آنتن، در فاصله $\lambda/4$ (در فرکانس مرکزی) از پچ تشعشعی قرار گرفته است تا امواج تشعشع یافته از خطوط و شکاف تغذیه، به‌صورت هم‌فاز با تشعشعات آنتن هم‌فاز جمع شوند. همچنین باتوجه‌به پهنای باند بالای آنتن، برای کاهش تزویج میان عناصر تشعشعی، دیواره فلزی بین عناصر تشعشعی قرار گرفته است. در ادامه با استفاده از الگوریتم ژنتیک، دامنه و فاز تحریک برای داشتن الگوی تشعشعی مجذور کسکانت با سطح گلبرگ فرعی 20dB به‌دست‌آمده است. برای پیاده‌سازی این مهم از یک مقسم توان ۱ به ۸ نامتقارن استفاده شده است و برای رسیدن به فاز متناسب به هر عنصر، تغییردهنده فاز شیف‌من طراحی شده است. علاوه بر داشتن فاز ثابت در بازه فرکانسی موردنظر، خط مرجع یکسان برای هر این ۷ تغییردهنده فاز طراحی شده است. هرکدام از این مقسم توان ۱ به ۸ در نهایت با استفاده از یک هیبرید ۱۸۰ درجه، کانال

مجموع و تفاضل را تشکیل می‌دهد. در ادامه هر قسمت به‌صورت جزئی شرح داده خواهد شد.

۲-۱- طراحی عنصر تشعشعی

عنصر تشعشعی، به‌صورت آنتن ریز نوار با تغذیه روزنه مجاورتی اصلاح شده است. برای داشتن قطبش مایل، شکاف تغذیه به‌صورت مایل (۴۵ درجه) قرار گرفته است. در این روش نیازی به چرخش فیزیکی پچ تشعشعی یا قراردادن آنتن در زاویه ۴۵ درجه برای دستیابی به قطبش مورب نیست. در نتیجه، برخلاف بسیاری از روش‌های متداول که به دلیل قرارگیری موربِ آنتن موجب افزایش فاصله بین عناصر در آرایه می‌شوند، این ساختار اجازه می‌دهد تا فاصله عناصر بدون تغییر باقی بماند. علاوه بر این، آنتن قابلیت دریافت مؤثر هر دو مؤلفه قطبش (افقی و عمودی) را داراست. خط انتقال مایکرواستریپ، با اعمال میدان الکتریکی در ناحیه زیرین شکاف پچ، موجب القای جریان‌های سطحی بر روی ساختار پچ می‌شود. این تزویج الکترومغناطیسی بین خط تغذیه و پچ، نقش مهمی در تحریک پچ ایفا می‌کند. در این سازوکار، صفحه زمین به همراه شکاف موجود در آن، رفتاری مشابه یک مبدل امپدانس از نوع کو پل‌شده داشته است[14] . برای افزایش پهنای باند، روزنه روی صفحه زمین همانند شکل (۲) در نظر گرفته شده است و انتهای خط ۵۰ اهم افزایش‌یافته است. جنس هر دو زیر لایه Rogers 4003 باضخامت 0.813mm است. مقادیر عامل‌ها در جدول (۲) آورده شده است. ابعاد اولیه پچ تشعشعی از مرجع [۱۴] بیان می‌شود.

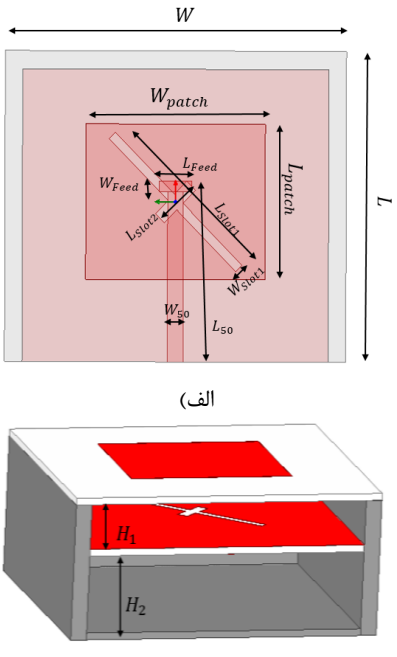
$$a = \frac{F}{\sqrt{\left\{1+\frac{2h}{\pi\varepsilon_r F}\left[\ln\left(\frac{\pi F}{2h}\right)+1.7726\right]\right\}}} \quad (۲)$$

$$F = \frac{8.791\times10^{9}}{f_r\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (۳)$$

در روابط بالا f_rفرکانس تشدید، h ضخامت زیرلایه و ε_rثابت دی-الکتریک نسبی است. فاصله میان پچ تشعشعی و خط تغذیه (H_1) شبیه به ایجاد یک حفره پشتی برای آنتن شده است. حفره باعث افزایش ارتفاع لایه آنتن و در نتیجه سبب افزایش پهنای باند آنتن شده است. طول شکاف مورب بر روی صفحه زمین در حدود $\frac{\lambda_{eff}}{2}$ موج زیرلایه در فرکانس مرکزی در نظر گرفته شده است. مطابق با نتایج شکل (۳) عامل پراکندگی S_{11} عنصر تابشی از ۳/۸ گیگاهرتز تا ۵/۴ گیگاهرتز کمتر از ۱۰ dB- است و بهره ۷/۲dBi در فرکانس ۴/۶ گیگاهرتز است. الگوهای تشعشعی شبیه‌سازی شده عنصر تشعشعی در فرکانس ۴.۷ گیگاهرتز در شکل (۴) نمایش‌داده‌شده است. یکی از ویژگی‌های مهم عنصر تابشی پایداری بهره و کم‌بودن سطح گلبرگ پشتی (۳۱dB) در فرکانس کاری است. همچنین آنتن دارای بازده تشعشعی بالای ۹۰ درصد است... رابطه (۴) بازده تشعشعی آنتن با بهره‌ی تحقق‌یافته‌ی آن را بیان می‌کند[14] .

$$\eta_r = \frac{\lambda^2 \times G_r}{4\pi \times A} \quad (۴)$$

که G_r بهره آنتن، λ طول‌موج در فضای آزاد و A سطح آنتن است.



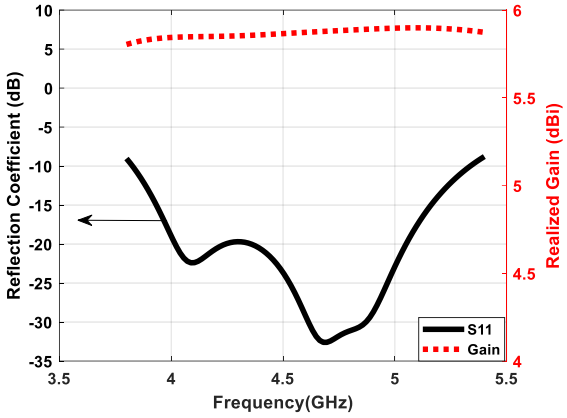
(الف)

(ب)

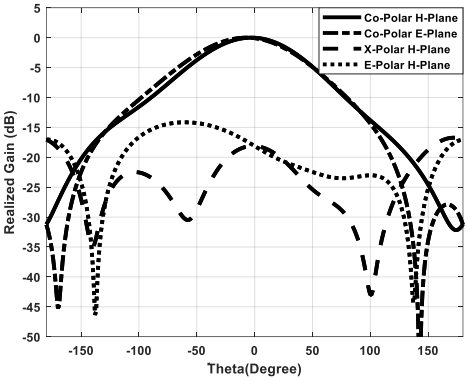
شکل (۲). (الف)، (ب) نمای از عنصر تشعشعی

جدول (۲) عامل‌های عنصر تشعشعی (ابعاد بر حسب mm)

L_{Patch}	W_{Patch}	L	W
۱۷	۲۰/۵	۳۴	۳۹
L_{Feed}	W_{Slot1}	L_{Slot2}	L_{Slot1}
۳/۸	۱	۵	۲۰/۵
H_1	W_{50}	L_{50}	W_{Feed}
۵/۳	۱/۸	۱۹/۸	۱/۲
			H_2
			۹/۲



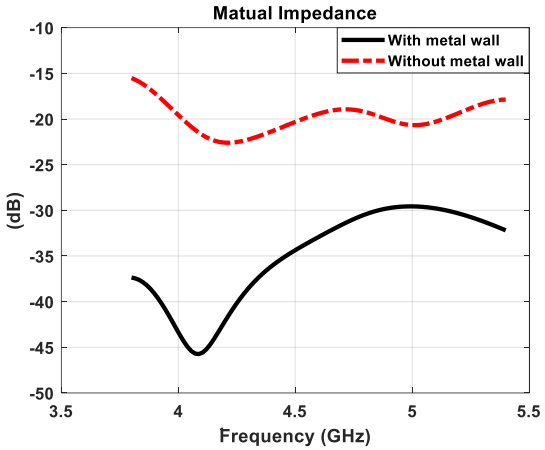
شکل (۳). نمودار کیفیت تطبیق امپدانس ورودی و بهره عنصر



شکل (۴). الگوی تشعشعی در قطبش اصلی و متعامد در فرکانس ۴/۶ گیگاهرتز

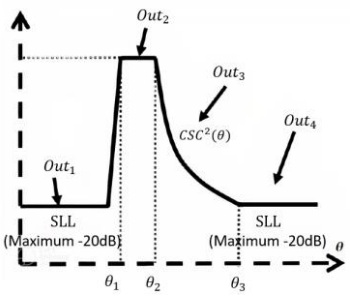
۲-۲- طراحی آرایه

عناصر به‌صورت آرایه 8×2 در کنار یکدیگر قرارگرفتن‌اند. برای داشتن بهره حداکثری، فاصله مناسب میان عناصر تشعشعی در حدود 0.6λ در فرکانس مرکزی که برابر $39mm$ است. باتوجه‌به پهنای باند بالای آنتن، این فاصله برای فرکانس‌های ابتدای باند نسبتاً کم است و سبب افزایش تزویج میان عناصر کنار هم می‌شود و برای رسیدن به مشخصات خواسته شده، طراحی پیچیده‌تر خواهد شد؛ بنابراین باید ایده‌ای برای کاهش تزویج بین عناصر، مخصوصاً برای فرکانس ابتدای باند کاری در نظر گرفت. همان‌طور که در ابتدا گفته شد، عنصر تشعشعی بر روی دیواره فلزی قرار گرفته است؛ بنابراین به شبیه‌سازی تزویج میان دو عنصر کناری در صورت حضور و عدم حضور دیواره فلزی پرداخته شده است. نتایج در شکل (۵) آورده شده است.



شکل (۵). تزویج میان عناصر در صورت وجود دیواره فلزی و بدون دیواره فلزی

همان‌طور که در شکل (۵) مشخص است در صورت استفاده از دیواره فلزی، تزویج میان دو عنصر تشعشعی در حدود ۱۰dB در تمام بازه فرکانسی بهبودیافته است. تزویج علاوه بر برهم‌زدن تطبیق امپدانس عناصر، باعث می‌شود که دامنه و فاز میدان‌های ناحیه دور آنتن تغییر کند. برای افزایش دقت سنتز نیاز است که اثر تزویج متقابل در ناحیه دور عناصر تشعشعی در نظر گرفته شود. ابعاد نهایی آرایه 72×312 میلیمتر است. با استفاده از الگوریتم ژنتیک (Multi-Objective Genetic Algorithm) در نرم‌افزار HFSS، دامنه و فاز عناصر تشعشعی برای داشتن الگوی تشعشعی مجذور کسکانت با سطح گلبرگ فرعی ۲۰dB محاسبه خواهد شد. در واقع باید تابع هدفی برای رسیدن به جواب بهینه تعریف شود و مقدار دامنه و فاز رسیده به عناصر تشعشعی، متغیرهای لازم هستند. در این مسئله ۱۵ عامل برای تغییر وجود دارد (۸ دامنه و ۷ فاز). بازه تغییرات برای دامنه 1~0.2 و برای فاز 360~0 تعریف شده است. در ابتدا مقادیر دامنه برابر با 0dB و مقادیر دامنه برابر با صفر درجه در نظر گرفته شده است (توزیع یکنواخت). حد پایین برای دامنه 0.2 در نظر گرفته شده است تا در پیاده‌سازی شبکه تغذیه، با محدودیت ساخت به دلیل کم‌شدن عرض خطوط مواجه نشود. شکل (۶) تابع هدف برای رسیدن به الگوی تشعشعی مجذور کسکانت را نمایش می‌دهد... باتوجه‌به موارد گفته شده در جدول (۱) بازه زاویه که الگوی تشعشعی به‌صورت مجذور کسکانت در نظر گرفته شود در حدود ۴۵ درجه در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۶). تابع هدف در نظر گرفته شده

جدول (۳)مقادیر دامنه و فاز به‌دست‌آمده از الگوریتم ژنتیک

شماره عنصر تشعشعی	دامنه (dB)	فاز (درجه)
۱	-۱۶/۳	-۵۳/۷
۲	-۱۳/۶	-۲۲/۵
۳	-۸/۸۳	-۳۴/۸
۴	-۵/۸۷	-۳۵/۱
۵	-۵/۴۲	-۶۰/۷
۶	-۸/۳۶	-۱۰۴/۳
۷	-۱۶/۶	۱۰۶
۸	-۱۳	۰

در ادامه روابط هر قسمت تعریف می‌شود.

$$-180^\circ < \theta < \theta_1 : Gain(\theta) \le -SLL$$
$$\rightarrow Out_1 = \max(Gain(\theta)) - SLL \quad (۳)$$

$$\theta_1 < \theta < \theta_2 : -1dB \le Gain(\theta) \le 0dB$$
$$\rightarrow Out_2 = \max(-1dB - Gain(\theta)) \quad (۴)$$

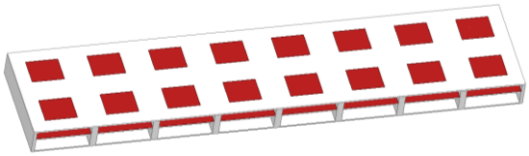
$$\theta_2 < \theta < \theta_3 : Gain(\theta) \cong c\,\mathrm{sc}^2(\theta) dB$$
$$\rightarrow Out_3 = \left| Gain(\theta) - c\,\mathrm{sc}^2(\theta) \right| \quad (۵)$$

$$\theta_3 < \theta < 180^\circ : Gain(\theta) \le SLL$$
$$\rightarrow Out_4 = \max(Gain(\theta)) - SLL \quad (۶)$$

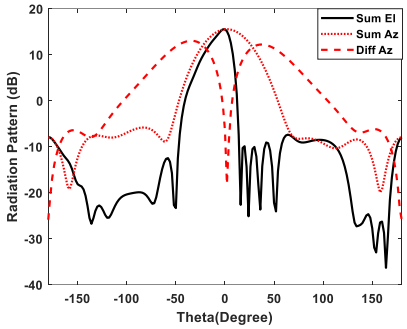
در نهایت می‌توان با دادن وزن به هرکدام قسمت، تأثیر آن بازه زاویه‌ای را افزایش داد. در معادله زیر (i=1,... 4) w_iها ضرایب وزن‌دهی در هر بازه زاویه‌ای برای بهینه‌سازی هستند.

$$Out_{Total} = \sum_{i=1}^{4} w_i Out_i \Rightarrow w_1 Out_1 + ... + w_4 Out_4 \quad (۷)$$

این ضرایب باتوجه‌به دقت موردنیاز در بهینه‌سازی تعیین می‌شود. باتوجه‌به اینکه شکل پرتوی مجذور کسکانت و سطح گلبرگ‌های فرعی در اینجا مورد بحث است، ضرایب به‌صورت w_3= $w_4 = w_1 = 1.2$ و $w_2 = 0 \cdot 5$ در نظر گرفته شده است. در نهایت نتایج حاصل از بهینه‌سازی



شکل (۷). قرارگیری 8 × 2 عنصر تشعشعی در کنار یکدیگر و تحریک به‌صورت جدول (۳)

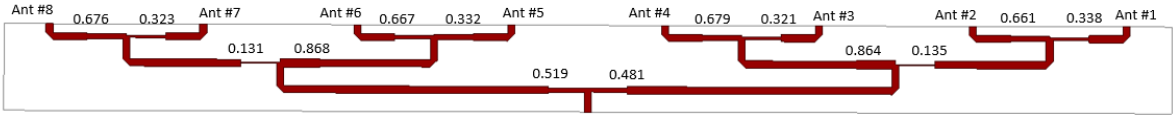


شکل (۸). الگوی تشعشعی حاصل از تحریک عناصر به‌صورت جدول (۳) در فرکانس ۴/۶ گیگاهرتز

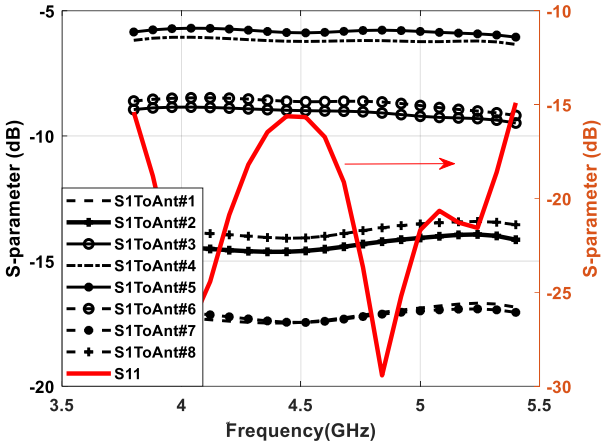
با استفاده از بهینه‌سازی خود نرم‌افزار تنها به‌یکبار شبیه‌سازی به‌صورت تمام موج نیاز است، اما مقادیر برای رسیدن به جواب مناسب حدود ۵۰۰ مرتبه عامل‌های تعریف شده، تغییر کرده‌اند و با تابع تعریف شده مقایسه شده است. آرایه‌ی ۸تایی بافاصله 39mm از یکدیگر قرار گرفته‌اند و دو ردیف در فاصله 35mm از یکدیگر هستند. مقادیر دامنه و فاز تحریک هر یک از عناصر تشعشعی در جدول (۳) آورده شده است... ساختار نهایی آرایه بدون شبکه تغذیه در شکل (۷) آورده شده است. الگوی تشعشعی به‌دست‌آمده از در شکل (۸) نمایش‌داده‌شده است. تمامی نتایج الگوی تشعشعی برای قطبش مایل است

۲-۳- طراحی شبکه تغذیه

شبکه تغذیه از سه قسمت مجزا تشکیل شده است. قسمت اول آن شامل مقسم توان ۱ به ۸ نامتقارن است که برای رسیدن به سطح گلبرگ فرعی 20dB طراحی می‌شود.



شکل (۹). نمایی از شبکه تغذیه



شکل (۱۰). نتایج شبیه‌سازی شبکه مقسم توان

در مرحله بعد ۷ تغییردهنده فاز ثابت شیفت من (به همراه یک خط مرجع یکسان) طراحی شده است تا با داشتن فاز موردنظر برای هر عنصر تشعشعی به الگوی تشعشعی مجذور کسکانت دست‌یافته شود. در آخرین قسمت با استفاده از هیبرید ۱۸۰ درجه، به هر ردیف از آنتن‌های آرایه‌ای، آنتن مونو پالس با الگوی تشعشعی مجذور کسکانت تکمیل خواهد شد.

۱-۲-۳- مقسم توان ۱ به ۸ نامتقارن

مقسم توان از ۷ عدد مقسم توان ۱ به ۲ نامتقارن در دامنه و با فاز یکسان تشکیل شده است. مقسم توان‌ها، برای تطبیق از روش $\lambda_g/4$ استفاده شده است. در واقع برای رسیدن به توان نامتقارن، باید عرض خط متفاوتی برای هر کدام از بازوهای مقسم توان در نظر گرفته شود[14-15] . طول خط $\lambda_g/4$ برای شبکه تغذیه 10mm در نظر گرفته شده است. ابعاد شبکه تغذیه $۲۲mm \times 300mm$ است. نمایی از ساختار شبکه تغذیه طراحی شده در شکل (۹) آورده شده است. همان‌طور که مشخص است عرض خطوط متفاوت است و در نهایت نسبت توان رسیده به هر آنتن متفاوت است. نسبت‌ها طوری انتخاب شده‌اند که توان رسیده به هر آنتن بر اساس مقادیر جدول (۳) است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی بعد از چندین مرحله بهینه‌سازی (تغییر عرض و طول خطوط) در شکل (۱۰) آورده شده است. کیفیت تطبیق امپدانس ورودی شبکه تغذیه نمودار قرمزرنگ است که بهتر از 15dB است. همچنین توان رسیده به آنتن‌ها نیز نمایش‌داده‌شده است که از هماهنگی بسیار خوبی با جدول (۳) برخوردار است. البته به دلیل بازه فرکانسی پهن کاری، تفاوتی با مقدار بهینه به‌دست‌آمده از الگوریتم ژنتیک دارد.

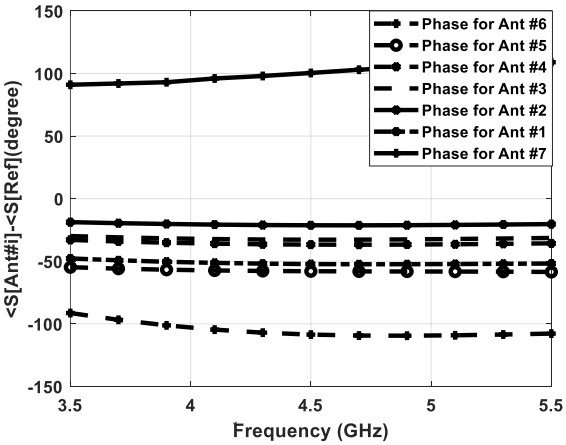
۲-۲-۳- تغییردهنده فاز ثابت

برای داشتن الگوی تشعشعی مجذور کسکانت، هر عنصر تشعشعی باید همانند جدول (۳) دارای فاز مشخصی باشد. نکته مهم پهنای باند بالای کارای آنتن است. در برخی از مقالات با استفاده از اختلاف طول به این مهم دست یافته‌اند[16-17] . اما درصورتی‌که پهنای باند کاری آنتن بالا باشد، اختلاف‌فاز رسیده به هر عنصر تشعشعی در ابتدا و انتهای باند کاری متفاوت خواهد بود و دیگر الگوی تشعشعی موردنظر به‌درستی شکل نخواهد گرفت. در اینجا از تغییردهنده فاز ثابت شیفت من[18] استفاده شده است. اما نکته متمایز در اینجا این است که به دلیل قرارگیری عناصر تشعشعی در کنار یکدیگر باید طول تمامی تغییردهنده‌های فاز با هم ثابت باشد و نکته دوم، خط مرجع برای تمامی این ۷ تغییردهنده فاز یکسان باشد.



شکل (۱۱). نمایی از شبکه تغذیه

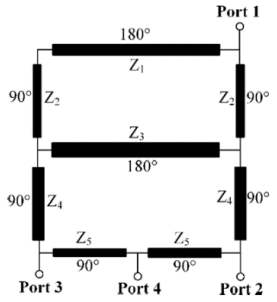
باتوجه‌به اختلاف‌فاز خواسته شده برای هر کدام طول اولیه به دست می‌آید. نمایی از ۷ تغییردهنده فاز ثابت به همراه خط مرجع در شکل (۱۱) آورده شده است. تغییردهنده فاز برای آنتن شماره ۸ به‌عنوان خط مرجع در نظر گرفته شده است و اختلاف‌فاز بقیه خطوط متصل به دیگر آنتن‌ها نسبت به این خط، باید مقادیر موجود در جدول (۳) باشد. نتایج حاصل از اختلاف‌فاز در شکل (۱۲) آورده شده است. بیشترین بازه تغییرات فاز نسبت به مقادیر جدول (۳) در حدود $\pm 10^{\circ}$ در بازه فرکانسی است.



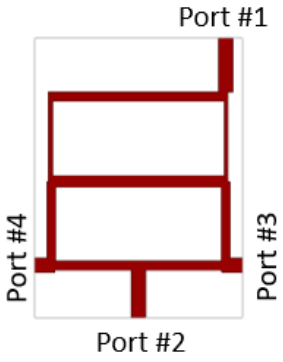
شکل (۱۲). نتایج شبیه‌سازی تغییردهنده فاز ثابت

۳-۲-۳- هیبرید ۱۸۰ درجه

شبکه مقایسه‌گر مونو پالس، وظیفه تشکیل الگوهای تشعشعی مجموع و تفاضل را در دو راستا ایجاد کند، بر عهده دارد. برای داشتن یک رهگیری دقیق، آنتن باید دارای عمق صفر بالا در ورودی‌های تفاضلی و ایزولاسیون خوب بین ورودی مجموع با ورودی تفاضل را داشته باشد. برای این منظور از حلقه هیبریدی دوبخشی مستطیلی استفاده شده است که علاوه بر موارد بالا دارای پهنای باند فرکانسی بالایی (در حدود ۳۵ درصد) است [19-20]. همانند آنچه در شکل (۱۳) آورده شده است دارای شش خط ربع طول‌موج و دو خط نصف طول‌موج است.

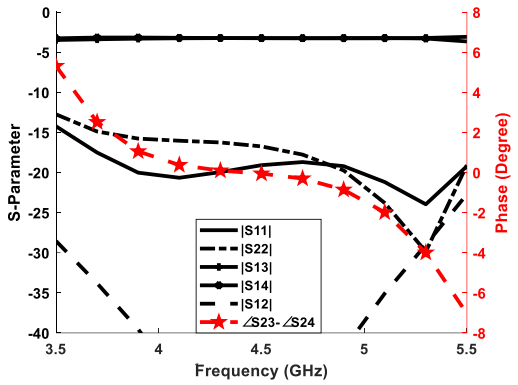


الف)



ب)

شکل (۱۳). الف) شماتیک حلقه هیبریدی ب) ساختار هیبرید ۱۸۰



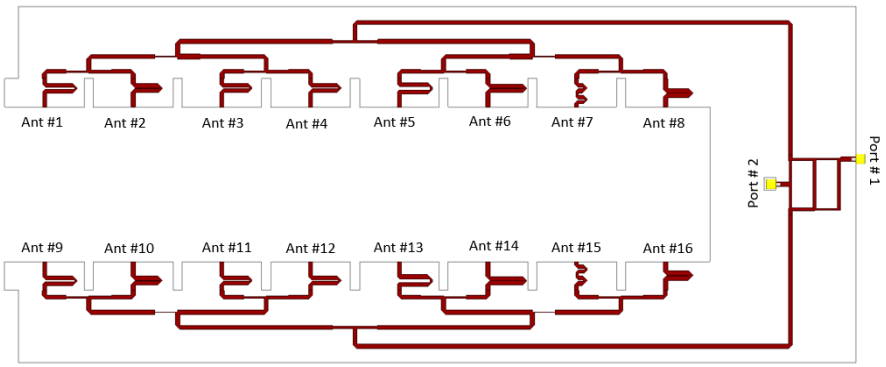
شکل (۱۴) عامل پراکندگی برای هیبرید ۱۸۰ درجه

مقادیر امپدانس‌ها نیز با استفاده از تحلیل مد زوج و فرد و در نهایت با استفاده از ابزار بهینه‌سازی نرم‌افزار ADS به‌دست‌آمده است. مقادیر Z5= 79.5Ω, Z4= 55Ω, Z1= 65.5Ω, Z2= 72.3Ω, Z3= 40.5Ω, در نهایت به‌دست‌آمده است. حلقه هیبرید دارای ابعاد نهایی 25mm*25mm است.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل (۱۴) نمایش‌داده‌شده است. حلقه هیبریدی دارای پهنای باند ۵/۵-۳/۵ گیگاهرتزاست به صورتی که در بازه فرکانسی هدف مقدار افت بازگشتی کمتر از ۱۴ دسی‌بل است و ایزولاسیون بین دو ورودی بهتر از ۳۲ دسی‌بل است. همچنین میزان خطای دامنه رسیده به دو پورت خروجی کمتر از ۰/۳ دسبیل و خطای فاز حداکثری ۲/۵ درجه در بازه فرکانس کاری است.

۳-۳- شبیه‌سازی شبکه تغذیه نهایی

شبکه تغذیه نهایی از اتصال مقسم توان، تغییردهنده فاز ثابت و هیبرید ۱۸۰ درجه تشکیل می‌شود. برای داشتن دید بهتر نتایج حاصل از شبیه‌سازی دامنه و فاز در جدول (۴) برای ۳ فرکانس ابتدا و مرکز و انتهای باند فرکانسی آورده شده است. نمایی از شبکه تغذیه در شکل (۱۵) آورده شده است. همان‌طور که گفته شده آنتن دارای دو ردیف ۸تایی از عناصر تشعشعی است.

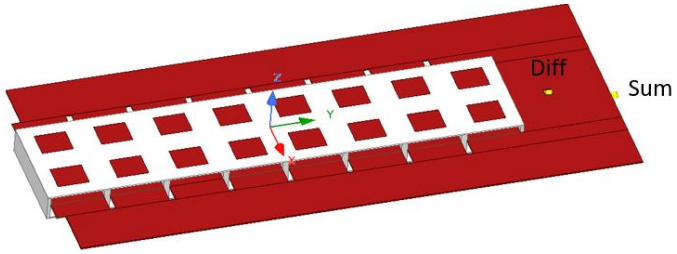


شکل (۱۵) شبکه تغذیه نهایی

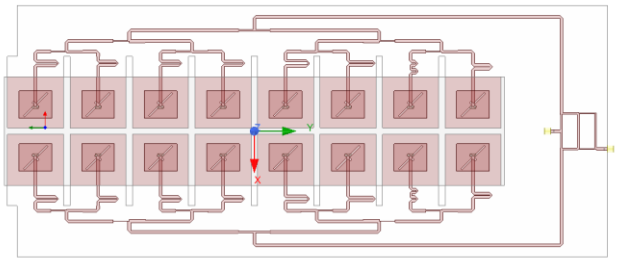
جدول (۴) مقادیر حاصل از شبیه‌سازی دامنه و فاز برای شبکه تغذیه نهایی

شماره عنصر تشعشعی	فرکانس ۳/۹ گیگاهرتز		فرکانس ۴/۶ گیگاهرتز		فرکانس ۵/۱ گیگاهرتز	
	دامنه (dB)	فاز (درجه)	دامنه (dB)	فاز (درجه)	دامنه (dB)	فاز (درجه)
۱	-۱۶/۸	-۴۸/۶	-۱۷/۳	-۶۱/۸	-۱۶/۷	-۵۲/۷
۲	-۱۳/۴	-۱۵/۱	-۱۴/۹	-۲۸/۵	-۱۴/۵	-۱۹/۵
۳	-۹/۰۶	-۲۳/۷	-۹/۰۸	-۴۲/۸	-۹/۵۳	-۳۴/۸
۴	-۵/۸۲	-۳۰/۱	-۶/۵	-۴۹/۱	-۶/۸۷	-۴۰/۱
۵	-۶/۷	-۵۲/۴	-۷/۱	-۶۶/۷	-۷/۶۲	-۶۴/۲
۶	-۱۱/۲	-۹۲/۹	-۹/۸	-۱۰۹/۳	-۹/۶	-۱۱۲/۲
۷	-۱۸	۹۴/۶	-۱۸/۳	۱۰۴	-۱۷/۶	۱۱۵/۲
۸	-۱۵/۴	۰	-۱۵/۸	۰	-۱۶/۷	۰

برای اینکه مقایسه دامنه رسیده به عناصر تشعشعی با جدول (۳) قابلیت مقایسه داشته باشد، نتایج حاصل از شبیه‌سازی را ۳ دسی‌بل بیشتر در جدول ثبت شده‌اند. با مقایسه نتایج حاصل از جدول (۴) با جدول (۳) مشخص می‌شود که تغییرات فاز اندک بوده است و مقادیر خواسته شده هم‌خوانی خوبی دارد. مقادیر دامنه هم اندکی تفاوت دارد که به دلیل این که شبیه‌سازی به‌صورت تمام موج انجام شده است و تلفات دی‌الکتریک و هادی در اینجا در نظر گرفته شده است؛ بنابراین رفتار الگوی تشعشعی مجذور کسکانت در بازه فرکانس کاری همواره ثابت است؛ اما سطح گلبرگ فرعی در فرکانس‌های مختلف ممکن است تفاوت کند.



الف



ب)

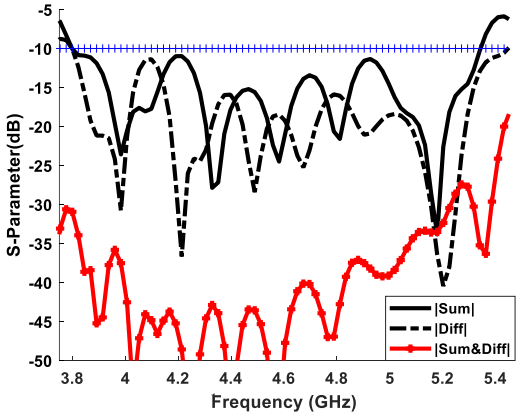
شکل (۱۶) ساختار نهایی آنتن مونو پالس با الگوی تشعشعی مجذور کسکانت

۳- شبیه‌سازی آنتن نهایی مونو پالس با الگوی تشعشعی مجذور کسکانت

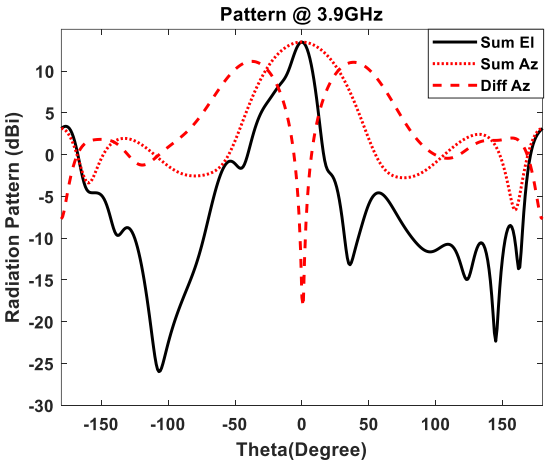
با اتصال شبکه تغذیه به عناصر تشعشعی، آنتن نهایی تکمیل می‌شود. ساختار نهایی در شکل (۱۶) آورده شده است. فاصله بین عناصر در راستای محور Y، ۳۵ میلیمتر و در راستای محور X، ۳۹ میلیمتر است. باتوجه‌به نحوه قرارگیری ۲ ردیف از آرایه‌های تشعشعی در کنار یکدیگر، درگاه شماره ۱ (شکل ۱۳) برای هیبرید ۱۸۰ درجه، الگوی تشعشعی مجموع را تشکیل می‌دهد. در ابتدا عامل پراکندگی آنتن در شکل (۱۷) آورده شده است. برای هر دو

ورودی مجموع و تفاضل، در بازه فرکانسی 3.8GHz-5.4GHz بهتر از 10dB است که در حدود ۳۴ درصد است. تزویج میان دو ورودی نیز در بازه فرکانسی بهتر از 26dB است. در ادامه الگوی تشعشعی آنتن در ۳ فرکانس اصلی در شکل (۱۸) آورده شده است. در فرکانس 4.6GHz آنتن دارای بهره 13.9dBi است. پهنای پرتوی آنتن در راستای ارتفاع ۲۳ درجه و در راستای سمت ۵۴ درجه و سطح گلبرگ فرعی در حدود 17dB و عمق صفر 37dB است. آنتن در بازه زاویه ۰~۴۵ درجه همخوانی مناسبی با الگوی تشعشعی مجذور کسکانت دارد.

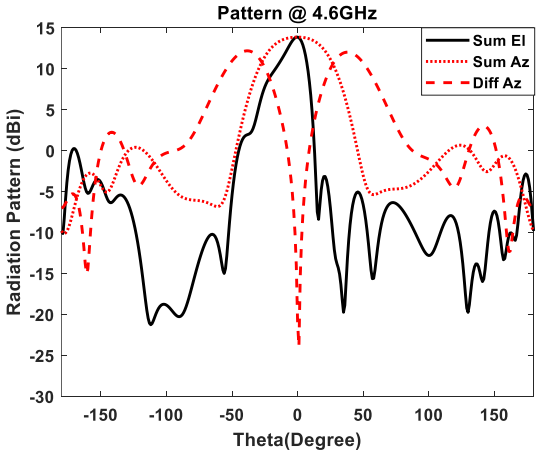
برای اطمینان از عملکرد ردگیر مونو پالس در زوایای مختلف ارتفاع (۰،۱۰،۲۰،۳۰ درجه) الگوی تشعشعی مجموع و تفاضل در راستای سمت در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ رسم شده است. نتایج نشان می‌دهد که عمق صفر الگوی تشعشعی تفاضل از زاویه صفر تا ۳۰ درجه در ارتفاع از ۲۵ تا ۲۰ دسی‌بل تغییر می‌کند.



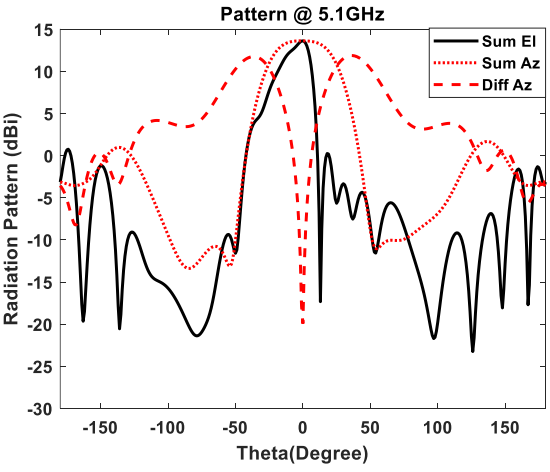
شکل (۱۷) پهنای باند و ایزولاسیون میان ورودی‌های آنتن



(الف)

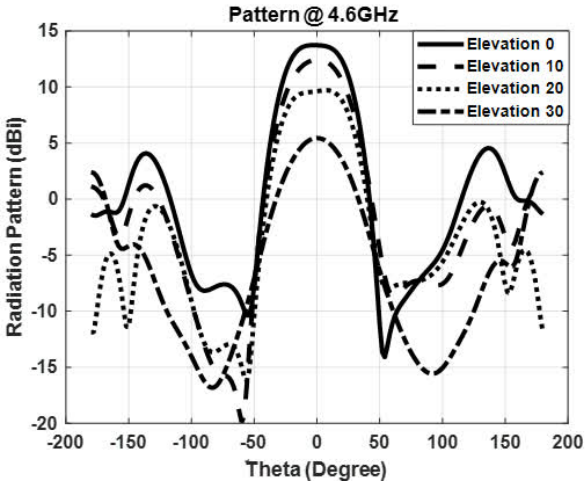


(ب)

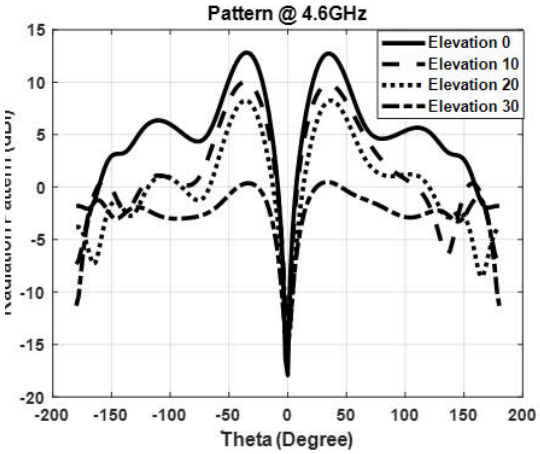


(ج)

شکل (۱۸) الگوی تشعشعی مجموع و تفاضل در ۳ فرکانس الف)3.9GHz ب)4.6GHz ج)5.1GHz



شکل (۱۹) الگوی تشعشعی مجموع مونو پالس در زوایای ارتفاع مختلف

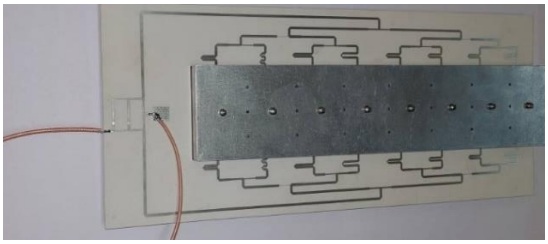


شکل (۲۰) الگوی تشعشعی تفاضل در راستای سمت مونو پالس در زوایای ارتفاع مختلف

۴- اندازه‌گیری و ساخت

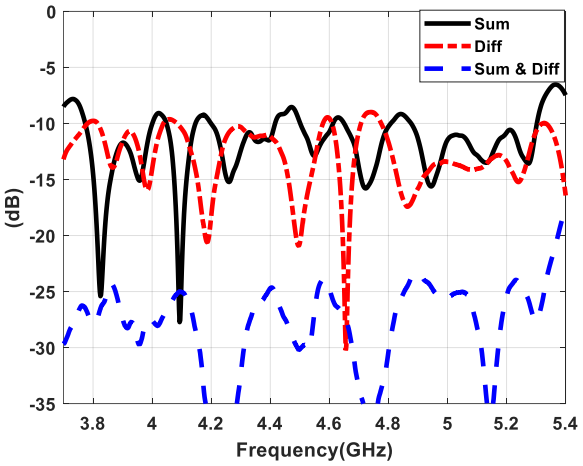
آنتن از ۴ قطعه جداگانه تشکیل شده است که با استفاده از پیچ به یکدیگر متصل شده‌اند. همانند آنچه در شکل (۲۱) آمده است دارای ۲ قطعه ریز نوار است که شامل شبکه تغذیه و پچ تشعشعی است که پچ‌های تشعشعی در بالای قطعه صلیبی و شبکه تغذیه در پایین آن قرار می‌گیرد. ابتدا تست عامل پراکندگی آنتن انجام شده است. با استفاده از دستگاه تحلیل‌گر شبکه Agilent E8364B عامل پراکندگی به‌دست‌آمده است. با مقایسه شکل (۱۷) با شکل (۲۲) به این نتیجه می‌توان رسید که آنتن دارای ساخت مناسبی است؛ چون حداکثر تفاوت میان شبیه‌سازی و اندازه‌گیری در حدود ۲ دسی‌بل بوده است و دارای خطای RMS کمتر از ۱.۱ دسی‌بل است.





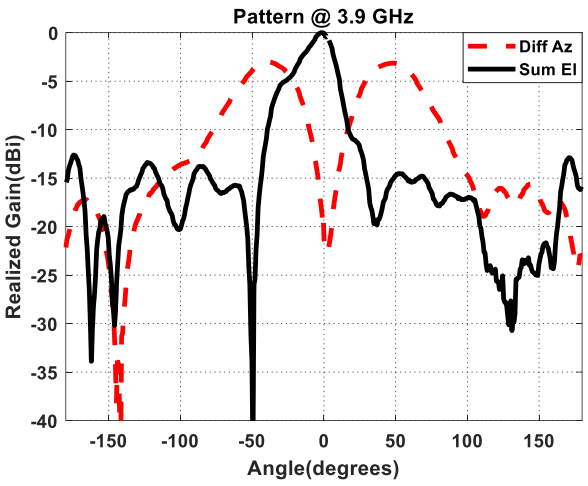


شکل (۲۱) تصویر آنتن

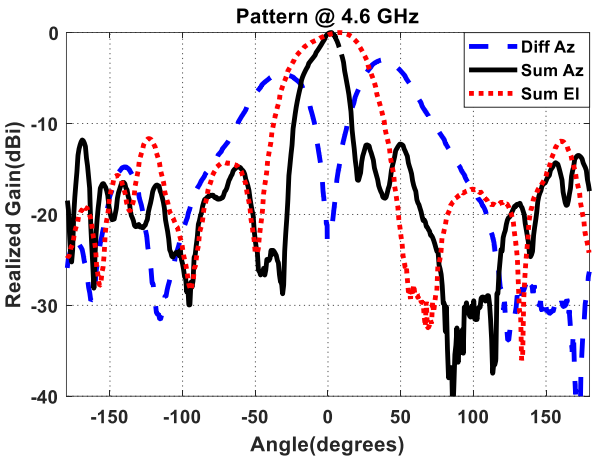


شکل (۲۲) نتایج پهنای باند و ایزولاسیون میان ورودی‌های آنتن ساخته شده

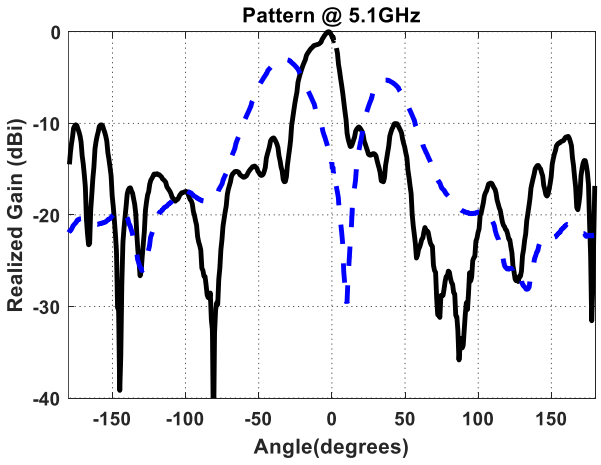
اختلاف میان نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری به دلیل عواملی مانند خطاهای ساخت و مونتاژ، تلورانس ابعادی، تفاوت در مقدار واقعی گذردهی نسبی زیرلایه نسبت به مقدار اسمی، اثر کانکتورها و کابل‌های و خطای اندازه‌گیری بوده است. بااین‌حال دارای همخوانی نسبتاً خوبی میان مشخصات ساخت و شبیه‌سازی است. میزان جداسازی میان ورودی‌ها بهتر از ۲۴- دسی‌بل است. در ادامه به نتایج اندازه‌گیری الگوی تشعشعی در اتاق آنتن پرداخته شده است. الگوی تشعشعی آنتن در ۳ فرکانس ۳/۹، ۴/۶ و ۵/۱ گیگاهرتز اندازه‌گیری شده است. آنتن دارای بهره ۱۳/۰۵ دسی‌بل و عمق صفر ۲۴- دسی‌بل و پهنای پرتوی در راستای ارتفاع ۲۶ درجه و در راستای سمت ۵۱ درجه است. حداکثر مقدار گلبرگ‌های فرعی در این فرکانس ۱۴- دسی‌بل است.



الف)



ب)



ج)

شکل (۲۳) الگوی تشعشعی آنتن اندازه‌گیری‌شده در فرکانس‌های 3.8GHz ،4.6GHz و 5.3GHz

با مقایسه نتایج آنتن اندازه‌گیری‌شده (شکل‌های (۲۳)) با نتایج شبیه‌سازی (شکل‌های شماره (۱۸)) می‌توان نتیجه گرفت که هم‌خوانی مناسبی بین این نتایج برقرار است. تفاوت اندکی اما وجود دارد که همانند قسمت قبل می‌تواند به دلیل خطاهای ساخت و مونتاژ باشد. همچنین نتایج اندازه‌گیری الگوی تشعشعی در اتاق آنتن دانشگاه مالک‌اشتر انجام گرفت که دارای حداقل دقت ۰/۸ درجه است. برای مقایسه بهتر نتایج ساخت در جدول (۲) آورده شده است. باتوجه‌به نتایج به‌دست‌آمده از ساخت و فرمول (۴) راندمان تشعشعی آنتن در فرکانس مرکزی در حدود ۵۷ درصد است.

جدول (۵) مقایسه با کارهای مشابه

مراجع	نوع آنتن	تعداد عناصر	پهنای باند	بهره (dBi)	سطح گلبرگ فرعی	الگوی تشعشعی مونو پالس
۲۱	موجبر مجتمع شده در زیرلایه	15×22	6.5	> 27.4	> 20	–
۲۲	موجبر مجتمع شده در زیرلایه	12	1.4	> 17.4	> 16.5	–
۲۳	آرایه پچ با تغذیه موجبر دی‌الکتریک	6×12	5	< 20.4	> 14	–
۲۴	موجبر توخالی شکاف‌دار	40*1	20.9	> 16.5	> 17.5	–
آنتن پیشنهادی	آنتن ریز نوار	2*8	34	> 12.7	> 14	☑

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک آنتن آرایه مونو پالس با الگوی تشعشعی مجذور کسکانت، پهنای باند بالا، سطح گلبرگ فرعی پایین و قطبش مایل برای جستجو و رهگیری اهداف بادقت بالا طراحی شده است. آنتن آرایه مونو پالس شامل 2×8 عنصر تشعشعی مایکرواستریپ با تغذیه روزنه مجاورتی اصلاح شده است و برای

کاهش تزویج میان عناصر تشعشعی از دیواره فلزی میان عناصر تشعشعی استفاده شده است. همچنین برای افزایش بهره در پشت عناصر تشعشعی صفحه زمین دومی قرار گرفته است.

جدول (۶) نتایج اندازه‌گیری آنتن مونو پالس آرایه‌ای با الگوی تشعشعی مجذور کسکانت

عامل	3.9GHz	4.6GHz	5.2GHz
بهره (dB)	۱۲/۷	۱۳/۰۵	۱۳/۳
عرض پرتو در راستای ارتفاع (°)	۲۸	۲۶	۲۳
عرض پرتو در راستای سمت (°)	-	۵۱	-
عمق صفر (dB)	۲۲	۲۴	۲۸
گلبرگ فرعی سمت راست پرتوی تشعشعی (dB)	۱۶	۲۵	۱۳
گلبرگ فرعی سمت راست پرتوی تشعشعی (dB)	۱۶	۱۴	۱۱

برای سنتز الگوی تشعشعی مجذور کسکانت، دامنه و فاز هر عنصر با استفاده از الگوریتم ژنتیک با درنظرگرفتن اثر تزویج میان عناصر به‌دست‌آمده است. برای کاهش سطح گلبرگ فرعی از ضرایب دامنه نامتقارن استفاده شده است و برای داشتن الگوی تشعشعی مجذور کسکانت، تغییردهنده فاز شیف‌من طراحی شده است. نکته قابل مهم در طراحی تغییردهنده‌های فاز استفاده از خط مرجع یکسان بوده است. در نهایت با استفاده از هیبرید ۱۸۰ درجه مستطیلی برای بهبود رهگیری در جهت سمت، آنتن دارای الگوی تشعشعی مونو پالس در این راستا است. در جدول شماره (۵) مقایسه‌ای میان آنتن پیشنهادی و مقالات سال‌های اخیر انجام شده است. بیشتر آنتن‌های موجود از ساختارهای تغذیه سری مبتنی بر مایکرواستریپ یا SIW استفاده می‌کنند که به طور ذاتی پهنای باند محدودی دارند. در مقابل، آنتن پیشنهادی از یک شبکه تغذیه موازی پهن باند بهره می‌برد که به‌صورت مجتمع با فازشیفترهای پهن باند طراحی شده است؛ این ساختار نه‌تنها دقت کنترل پرتو را افزایش می‌دهد، بلکه موجب افزایش قابل‌توجه پهنای باند کلی آنتن نیز می‌گردد. علاوه بر این، از الگوریتم ژنتیک چندهدفه (MOGA) برای بهینه‌سازی هم‌زمان چندین شاخص عملکردی از جمله سرکوب گلبرگ‌های جانبی و شکل‌دهی الگوی تابش استفاده شده است. نکته قابل‌توجه آن است که این آنتن از عملکرد مونو پالس پشتیبانی می‌کند و ازاین‌رو، گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای ردیابی با تفکیک بالا و سامانه‌های راداری به شمار می‌رود. نتایج شبیه‌سازی و ساخت دارای هم‌خوانی متناسبی هستند. آنتن دارای پهنای باند ۳۴درصدی (3.8-5.4 GHz)، بهره 13dBi، سطح گلبرگ فرعی 20dB، عمق صفر 35dB، پهنای پرتوی ۲۵ درجه است و الگوی تشعشعی از منحنی مجذور کسکانت پیروی می‌کند.

۶- مراجع

[1] Buckley MJ. "Synthesis of shaped beam antenna patterns using implicitly constrained current elements". IEEE Transactions on antennas and propagation. 1996 Feb;44(2):192-7.

[2] Carberry T. Analysis theory for the shaped-beam doubly curved reflector antenna. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1969 Mar 31;17(2):131-8.

[3] Winter C. Dual vertical beam properties of doubly curved reflectors. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1971 Mar;19(2):174-80.

[4] Ahmadabadi H, Mallahzadeh S, Torabi A. Wide beam reflector antenna with cosecant-squared pattern. AEU-International Journal of Electronics and Communications. 2020 Mar 1;116:153064.

[5] Sha K, Suzuki M, Nakata W, Adachi S. Design of E-plane cosecant square beam horn antennas based on ray theory and their radiation characteristics. Electronics and Communications in Japan (Part I: Communications). 1981 May;64(5):100-7.

[6] Abdolahi M, Askari G, Sadeghi HM. A new microstrip array antenna with cosecant-squared beam shaping as a radiating column for SSR. In2014 22nd Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE) 2014 May 20 (pp. 1781-1785). IEEE.

[7] Zhengxing H, Yingzheng R. A method of csc 2 pattern synthesis for planar phased arrays. In1985 Antennas and Propagation Society International Symposium 1985 Jun 17 (Vol. 23, pp. 479-482). IEEE.

[8] Puskely J, Mikulasek T, Aslan Y, Roederer A, Yarovoy A. 5G SIW-based phased antenna array with cosecant-squared shaped pattern. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2021 Jul 26;70(1):250-9.

[9] Lu Y, Huang M, You Q, Xu L, Wang Y, Huang J. Full metal wideband cosecant squared pattern antenna with a highly compact hybrid feed network. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2022 Apr 25;70(9):7885-95.

[10] Zhang XM, Luk KM, Wu QF, Ying T, Bai X, Pu L. Cosecant-square pattern synthesis with particle swarm optimization for nonuniformly spaced linear array antennas. In2008 8th International Symposium

on Antennas, Propagation and EM Theory 2008 Nov 2 (pp. 193-196). IEEE.

[11] Ares-Pena FJ, Rodriguez-Gonzalez JA, Villanueva-Lopez E, Rengarajan SR. Genetic algorithms in the design and optimization of antenna array patterns. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1999 Mar;47(3):506-10.

[12] Kurup DG, Himdi M, Rydberg A. Synthesis of uniform amplitude unequally spaced antenna arrays using the differential evolution algorithm. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2003 Sep;51(9):2210-7.

[13] Boeringer DW, Werner DH. Particle swarm optimization versus genetic algorithms for phased array synthesis. IEEE Transactions on antennas and propagation. 2004 Mar;52(3):771-9.

[14] Bhartia, P., Bahl, I., Garg, R., et al.: 'Microstrip antenna design handbook' (Artech House, Norwood, MA, USA, 2001)

[15] Trinh-Ngoc A, Dinh CK, Nguyen TB, Nguyen ML, Nguyen TM. Cosecant Squared Pattern for Wide-Band Dual-polarized Antenna Array using Orthogonal Feeding Technique. In2021 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC) 2021 Nov 28 (pp. 311-313). IEEE.

[16] Chen K, Yang Z, Bao Z, Li Y. Novel Millimeter-Wave Microstrip Comb-Line Antenna with Cosecant-Squared Pattern. In2022 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP) 2022 Nov 27 (pp. 1-3). IEEE.

[17] Kaboutari K, Zabihi A, Virdee B, Salmasi MP. Microstrip patch antenna array with cosecant-squared radiation pattern profile. AEU-International Journal of Electronics and Communications. 2019 Jul 1;106:82-8.

[18] Quirarte JR, Starski JP. Synthesis of Schiffman phase shifters. IEEE transactions on microwave theory and techniques. 1991 Nov;39(11):1885-9.

[19] Caillet, Mathieu, Michel Clenet, Ala Sharaiha, and Yahia MM Antar. "A compact wide-band rat-race hybrid using microstrip lines." IEEE Microwave and Wireless Components Letters 19, no. 4 (2009): 191-193.

[20] Khanmohamadi, Sara, and Ahmadreza Eskandari. "A compact and wideband rat-race coupler using two-section ring and artificial transmission lines." Analog Integrated Circuits and Signal Processing 108 (2021): 1-6.

[21] Chu, H., Li, P., & Guo, Y.-X. A beam-shaping feeding network in series configuration for antenna array with cosecant-square pattern and low sidelobes. IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett., 18(4), 742–746 (2019).

[22] Hao, Z.-C., & He, M. Developing millimeter-wave planar antenna with a cosecant squared pattern. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **65**(10), 5565–5570 (2017).

[23] Yu, Y., Jiang, Z. H., Zhang, H., Zhang, Z., & Hong, W. A low-profile beamforming patch array with a cosecant fourth power pattern for millimeter-wave synthetic aperture radar applications. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **68**(9), 6486–6496 (Sept.2020).

[24] Lu, Y., Huang, M., You, Q., Xu, L., Wang, Y., & Huang, J. Full metal wideband cosecant squared pattern antenna with a highly compact hybrid feed network. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **70**(9), 7885–7895 (2022)...