

Design of a Broadband Dual-Beam Reflect-array Antenna with a Single Feed

F. Etsami, S. Khorshidi^{*}, H. Abiri

^{*} Assistant Professor, Hawadaria University Complex, Malik Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 18/11/2021, Accepted: 17/01/2022)

Abstract

This paper proposes a new method for the design of a broadband dual-beam reflect-array antenna with a single feed. This method realizes the appearance of two beams based on producing a null in the antenna radiation pattern. The reflection phase distribution on the aperture of the antenna has been studied to achieve this null. A multi-resonance single layer subwavelength element is used as the phase shifting unit cell due to its wide linear phase range. Comprehensive theoretical analysis and full-wave simulations are accomplished and their results are in good agreement with each other. Two dual beam reflect-array antennas operating at X band are designed, one using the proposed method and the other by the geometrical method. The designed reflect-array using our proposed method improves the gain bandwidth and the beam squint compared to the other method. The simulation results show 1.1% improvement in the -1dB gain bandwidth and $0.12 \times \theta_{3dB}$ improvement in the beam squint for the proposed design method compared with the other one.

Keywords: Reflect-array antenna, broadband, dual beam antenna, single layer, subwavelength element

^{*} Corresponding author E-mail: khorshidi@mut.ac.ir

طراحی یک آنتن آرایه انعکاسی پهن باند دو گلبگی با یک آنتن تغذیه

فاطمه اعتصامی^۱، شاپور خورشیدی^{۲*}، حبیب اله عبیری^۳

۱- دانشجوی دکتری، ۲- استادیار، مجتمع دانشگاهی هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ۳- استاد، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۷، پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۲۷)

چکیده

در این مقاله، یک روش جدید جهت طراحی یک آنتن آرایه انعکاسی پهن باند شامل دو گلبگ و تغذیه شده فقط با یک تک آنتن مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته شده است. در این طراحی پیدایش دو گلبگ بر مبنای تولید یک صفر در الگوی تشعشعی آنتن تحقق می یابد. به منظور دستیابی به این صفر، توزیع فازهای برگشتی از سطح آنتن مورد مطالعه قرار گرفته است. از یک المان کوچک تر از طول موج تک لایه حاوی چندین تشدید به عنوان المان ایجادکننده فازهای مورد نیاز استفاده شده است. فاز این المان دارای رنج خطی وسیعی است که نهایتاً منجر به رفتار پهن باندی آنتن می گردد. یک تحلیل نظری و نیز یک شبیه سازی موج کامل برای روش پیشنهادی انجام شده است که نتایج حاصل شده از آن ها به میزان قابل قبولی به هم نزدیک است. در ادامه، دو آنتن آرایه انعکاسی شامل دو گلبگ در باند فرکانسی X طراحی شده است؛ یکی با به کارگیری روش طراحی پیشنهادی و دیگری بر مبنای روش هندسی. مشخصه های پهنای باند فرکانسی و حساسیت جهت گلبگ- های تولیدی نسبت به تغییر فرکانس، در نتایج آنتن طراحی شده با استفاده از روش پیشنهادی در مقایسه با روش دیگر بهبود مطلوبی داشته است. نتایج شبیه سازی، بهبود ۱،۱% در پهنای باند 1-dB و بهبودی به اندازه $0.12 \times \theta_{3dB}$ در انحراف گلبگ آنتن در روش پیشنهادی نسبت به روش دیگر را نشان می دهد.

کلید واژه ها: آنتن آرایه انعکاسی، پهن باندی، آنتن دو گلبگی، تک لایه، المان کوچک تر از طول موج

۱- مقدمه

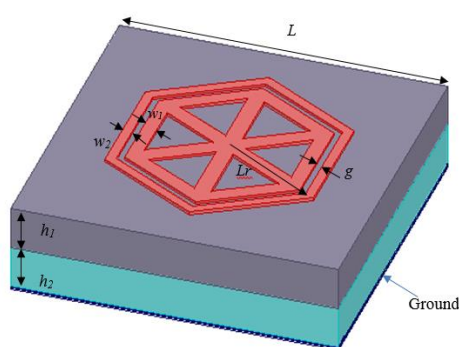
یک آنتن با چندین گلبگ^۳ هم زمان را می توان با استفاده از یک آنتن بازتابنده^۴، یک عدسی^۵ با آنتن شیپوری^۶ و یا با کمک یک آرایه فازی بزرگ تحقق بخشید [۱۷]. اما ایراد این ساختارها، قیمت، اندازه و وزن بالای آن هاست. این در حالی است که آنتن های آرایه انعکاسی می توانند با وزن و حجم کم تر، کنترل روی تعداد گلبگ ها را نیز فراهم کنند [۱۸]. در حقیقت با کنترل توزیع فاز المان ها روی سطح آنتن می توان به الگوی تشعشعی تک گلبگی [۲-۶] و یا چند گلبگی [۱۹ و ۲۰] دست یافت. در کارهای پیشین روش های طراحی مختلفی جهت دستیابی به عملکرد چند گلبگی برای آنتن آرایه انعکاسی پیشنهاد شده است [۱۰]. در مراجع [۱۹ و ۲۱] دو روش طراحی مستقیم، روش هندسی و روش جمع آثار برای دستیابی به آنتن آرایه انعکاسی چند گلبگی بررسی گردیده است. روش طراحی دیگر روش سنتز است که در مراجع [۱۹ و ۲۰] نیز به کار رفته است. در مرجع [۱۹] از روش بهینه سازی تصویر سازی متناوب^۷ و در مرجع [۲۰] از روش بهینه سازی گروه ذره^۸ استفاده شده است. در مقاله ای دیگر از ویژگی انحراف گلبگ ها با تغییر فرکانس

آنتن های آرایه انعکاسی چایی از گروه آنتن های دارای بهره بالا، به دلیل فوایدی مانند سطح صاف، قیمت پایین و راحتی ساخت در دو دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته اند [۱-۳]. این آنتن ها از تعدادی المان تشعشعی جهت تولید فازهای مناسب برای همگرا کردن موج برخوردی از آنتن تغذیه^۲ تشکیل شده اند [۱، ۴ و ۵]. ایراد اصلی این آنتن ها، پهنای باند باریک ذاتی آن ها است [۶ و ۸]. دو عامل اصلی محدود کننده پهنای باند این دسته آنتن ها عبارت است از طبیعت باریک باندی پچ های میکرواستریپ و تفاوت در تأخیر فضایی بین آنتن تغذیه و المان های مختلف در آرایه [۱ و ۹]. طراحی یک آنتن آرایه انعکاسی که در عین پهن باندی بتواند دو یا چند ناحیه را به صورت هم زمان روشن کند می تواند برای کاربردهای جنگ الکترونیک، رادار و مخابرات ماهواره ای مفید باشد [۱۰]. در سال های اخیر، روش های بسیاری برای افزایش پهنای باند این نوع آنتن پیشنهاد شده است که اکثر آن ها روی بهبود پهنای باند المان تشعشعی کار کرده اند [۱۱-۱۶].

³ Lobe⁴ Reflector antenna⁵ Lenz⁶ Horn antenna⁷ Alternating Projection Method⁸ Particle Swarm Optimization Method

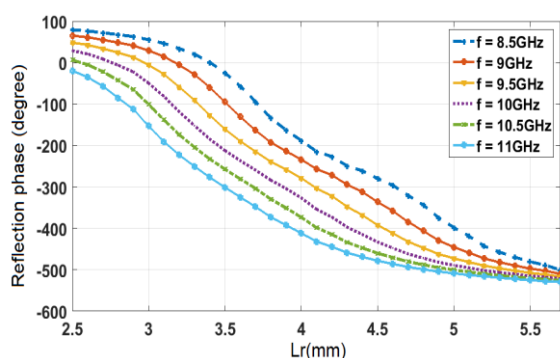
* رایانامه نویسنده مسئول: Khorshidi@mut.ac.ir

به‌عنوان تک المان استفاده شده است [۲]. دوره تناوب المان $0.36\lambda_0$ معادل ۱۲ میلی‌متر است که λ_0 طول موج در فضای آزاد برای فرکانس ۹ گیگاهرتز می‌باشد. المان روی زیرلایه RO4003 با ضخامت $h_1 = 1.524\text{mm}$ (معادل $0.45\lambda_0$) و ثابت دی‌الکتریک ۳٫۵۵ چاپ شده است. یک فاصله هوایی با ارتفاع $h_2 = 1.524\text{mm}$ بین زیرلایه و صفحه زمین به‌منظور بهبود عملکرد المان در نظر گرفته شده است. اندازه بهینه بقیه قسمت‌های المان در مرجع [۲] تعیین شده است.



شکل (۱). شمایی از ساختار المان انتخابی [۲]

شکل (۲) نمودار فاز برگشتی المان برحسب شعاع داخلی حلقه بیرونی (L_r) به ازای فرکانس‌های مختلف را نمایش می‌دهد. این المان بیش از ۵۷۵ درجه رنج فاز خطی فراهم می‌کند. منحنی‌های فاز نمایش داده شده برای فرکانس‌های ۸٫۵، ۹، ۹٫۵، ۱۰، ۱۰٫۵ و ۱۱ گیگاهرتز تقریباً خطی و موازی هستند. این رفتار المان می‌تواند منجر به طراحی یک آرایه‌انعکاسی پهن‌بند شود.



شکل (۲). فازهای برگشتی برحسب شعاع حلقه خارجی المان (L_r) برای فرکانس‌های مختلف

پاسخ فاز المان برحسب شعاع حلقه خارجی (L_r) به ازای زوایای تابش متفاوت و در فرکانس ۹ گیگاهرتز در شکل (۳) نمایش داده شده است. از نتایج استنباط می‌شود که افزایش زاویه تابش تا ۴۰ درجه اثر قابل‌ملاحظه‌ای روی تغییرات فاز موج برگشتی ندارد.

کاری جهت دستیابی به آنتن چندگلبگی بهره‌برده‌اند [۲۲]. علی‌رغم مطالعات بسیاری که در حوزه آنتن‌های آرایه‌انعکاسی چندگلبگی و بهبود آن‌ها انجام شده، اما به بهبود پهنای باند آن‌ها زیاد پرداخته نشده است و اکثر کارها باریک باند هستند.

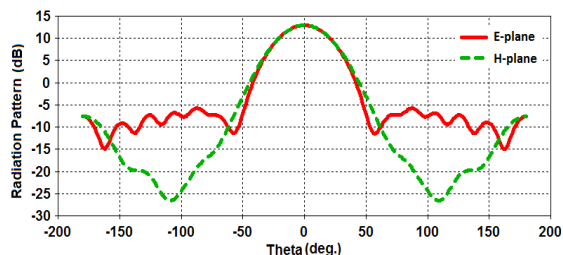
در مقاله حاضر، یک آنتن آرایه‌انعکاسی دوگلبگی با تک آنتن تغذیه طراحی شده است و درعین حال به پهن‌بند کردن آن نیز توجه شده است که از این بابت کار حاضر ارزشمند است. از آنتن‌های آرایه‌انعکاسی دوگلبگی به دلیل حجم و وزن مناسب می‌توان در کاربردهای هواپایه به‌منظور روشن کردن هم‌زمان دو ناحیه در دو جهت مختلف استفاده نمود. به‌منظور تولید دو گلبگ، یک روش جدید طراحی بر اساس تولید یک صفر^۱ در الگوی تشعشعی آنتن پیشنهاد شده است. در این روش از کنترل توزیع فاز سطح آنتن جهت پیاده‌سازی ایده استفاده گردیده است. مزیت روش پیشنهادی نسبت به اکثر کارهای انجام‌شده قبلی، ایده ساده و درعین حال کاربردی آن است که باعث می‌شود شبیه‌سازی آن نیاز به زمان اجرایی زیادی نداشته باشد. برای دستیابی به مشخصه پهن‌بندی، از یک المان میکرواستریپ کوچک‌تر از طول موج تک‌لایه با ویژگی چند تشدیدی بهره‌برده شده است که به‌صورت کامل در کار قبلی ما (مرجع [۲]) بررسی و ارزیابی شده است. در حقیقت، در مرجع [۲] تلاش شده تا با توجه به مزایای بسیار آنتن آرایه‌انعکاسی، عیب ذاتی این آنتن؛ یعنی پهنای باند کم آن اصلاح شود و یک آنتن آرایه‌انعکاسی پهن‌بند طراحی گردد. اما در کار حاضر، با بهره‌گیری از دستاوردهای این مرجع سعی شده تا یک کاربرد جدید که همان دوگلبگی کردن آنتن هست به‌ساختار اضافه شود. به‌منظور انجام راستی‌آزمایی و ارزیابی ایده داده شده، هم از طریق تحلیل کامل تئوری و هم با کمک نرم‌افزار شبیه‌ساز CST طراحی آنتن پیشنهادی بررسی شده است که نتایج آن‌ها به یکدیگر نزدیک شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی‌ها، بهبود عملکرد آنتن طراحی شده هم به لحاظ پهنای باند و هم حساسیت جهت گلبگ‌های تولیدی نسبت به تغییر فرکانس در مقایسه با کارهای قبلی را نشان می‌دهد. در ادامه در بخش ۲ المان انتخابی معرفی و در بخش ۳ روند طراحی آنتن دوگلبگی پهن‌بند شرح داده خواهد شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها و تحلیل آن‌ها در قسمت ۴ خواهد آمد و در نهایت، نتیجه‌گیری نهایی انجام خواهد شد.

۲- مشخصات تک المان

در پژوهش حاضر، مطابق شکل (۱)، از یک ساختار شامل دو حلقه شش‌ضلعی تودرتو و شش تک‌قطبی درون حلقه داخلی

^۱ Null

داده شده است. الگوی تشعشی نرمالیزه شده این آنتن را می‌توان به وسیله تابع $\cos^n \theta$ با $n = 10$ مدل کرد. بر اساس منحنی‌های بازدهی دهانه که در مرجع [۲] آورده شده است، نصف زاویه بازدهی بهینه برای $n = 10$ برابر با $\theta_0 = 36^\circ$ است که بر اساس رابطه (۱) معادل $F/D = 0.65$ است.



شکل (۶). الگوهای تشعشی آنتن تغذیه در صفحات E- و H-

فاز برگشتی برای هر المان آنتن آرایه انعکاسی به گونه‌ای تعیین می‌گردد که طول مسیریهای متفاوت از آنتن تغذیه تا هر المان جبران شود. میزان جابجایی فاز مورد نیاز در هر المان برای داشتن یک گلبگ اصلی در جهت (θ_b, φ_b) به صورت زیر است [۴]:

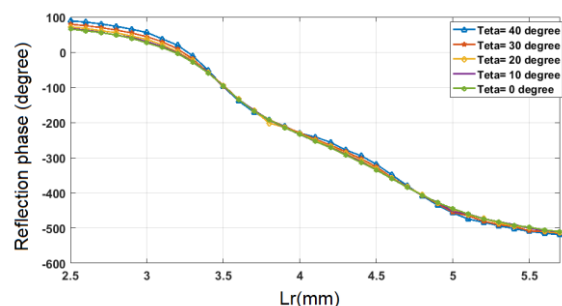
$$\varphi(x_p, y_q) = k_0(d_{p,q} - (x_p \cos \varphi_b + y_q \sin \varphi_b) \sin \theta_b) \quad (2)$$

که k_0 ثابت انتشار در فضای آزاد، (x_p, y_q) موقعیت المان و $d_{p,q}$ فاصله بین المان (p, q) ام و محل تغذیه است.

۳-۱- آنتن آرایه انعکاسی دوگلبگی

در روش پیشنهادی مطابق شکل (۷-الف) تلاش می‌شود تا جلوی جبهه موج رسیده از آنتن تغذیه یک صفر ایجاد شود. در صورتی که بیشینه الگوی تشعشی آنتن آرایه انعکاسی قبل از اعمال روش پیشنهادی در راستای $\theta = 0^\circ$ ایجاد شود، جهت دو گلبگ ایجاد شده پس از تولید صفر، تقریباً در راستای $\pm \theta_{3dB}/2$ است که پهنای گلبگ آنتن آرایه انعکاسی تک گلبگی قبل از اعمال روش پیشنهادی است؛ بنابراین جهت گلبگ‌های ایجاد شده به ابعاد دهانه آنتن و الگوی تشعشی آنتن تغذیه وابسته است.

به منظور تحقق ایده مذکور، توزیع فاز روی سطح آنتن را به گونه‌ای تنظیم می‌کنیم که یک اختلاف فاز ۹۰ ایی بین پرتوهای رسیده از آنتن تغذیه به نقاطی از سطح آنتن با فاصله شعاعی و زاویه نسبت به افق یکسان ایجاد شود. در عمل به منظور پیاده‌سازی این ایده مطابق شکل (۷-ب) سطح دایره‌ای آنتن به چهار ربع دایره تقسیم می‌شود، سپس توزیع فاز یک ربع روی



شکل (۳). فاز برگشتی المان در فرکانس ۹ گیگاهرتز به ازای زوایای برخورد متفاوت

شبیه‌ساز موج‌بری می‌تواند یک ابزار مفید جهت ارزیابی المان باشد [۲۳-۲۴]. این ابزار برای المان انتخابی در مرجع [۲] مطابق شکل (۴) استفاده شده است و نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی برای این المان به صورت قابل قبولی یکدیگر را دنبال می‌کنند.



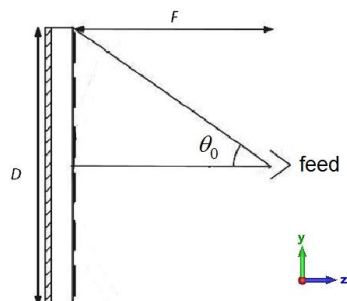
شکل (۴). نمایش چیدمان تست المان با ابزار شبیه‌ساز موج‌بری [۲]

۳- روند طراحی آنتن آرایه انعکاسی

دستگاه مختصات استفاده شده برای طراحی آنتن آرایه انعکاسی با تغذیه مرکزی در شکل (۵) نمایش داده شده است. بر اساس این شکل، نصف زاویه بازدهی آنتن (θ_0) خواهد بود:

$$\theta_0 = \tan^{-1}(D/2F) \quad (1)$$

که D قطر آنتن و F طول کانونی است.

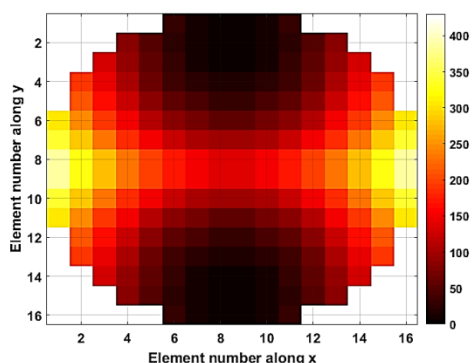


شکل (۵). نمای کنار از آنتن آرایه انعکاسی و دستگاه مختصات استفاده شده

یک آنتن شیبوری مستطیلی با ابعاد دهانه $50.8\text{mm} \times 39.51\text{mm}$ به عنوان آنتن تغذیه در نظر گرفته شده است. الگوی تشعشی صفحات E- و H- در شکل (۶) نمایش

لازم به ذکر است که با کمک این روش امکان تغییر مکان صفر ایجاد شده در الگوی تشعشعی آنتن و در نتیجه تغییر جهت گلبرگ‌های تولیدی وجود دارد. بدین صورت که کافی است فاز نقاط ربع دایره اول برای جهتی که می‌خواهیم صفر ایجاد شود، محاسبه کنیم.

در روش هندسی [۱۰] برای داشتن دو گلبرگ، سطح آنتن آرایه‌انعکاسی به دو نیم‌دایره تقسیم می‌شود، به طوری که المان‌های واقع روی هر نیم‌دایره یکی از گلبرگ‌ها را تولید می‌کنند. محدوده $0^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$ ناحیه ۱ و محدوده $180^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$ به عنوان ناحیه ۲ در نظر گرفته می‌شود. به دلیل اثرات متقابل المان‌های واقع در دو ناحیه، جهت گلبرگ‌های تولیدی ممکن است دقیقاً در راستاهای موردنظر قرار نگیرند و دستیابی به گلبرگ‌هایی در جهات موردنظر نیاز به بهینه‌سازی طراحی اولیه دارد. توزیع فاز روی سطح آنتن برای یک آنتن آرایه‌انعکاسی طراحی شده با روش هندسی و دارای دو گلبرگ در جهات $(\theta_{b(1,2)} = 20^\circ, \varphi_{b1} = 90^\circ, \varphi_{b2} = 270^\circ)$ و در فرکانس ۹ گیگاهرتز، در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل (۹). توزیع فاز موردنیاز برای یک آنتن آرایه‌انعکاسی دوگلبرگی با اعمال روش هندسی

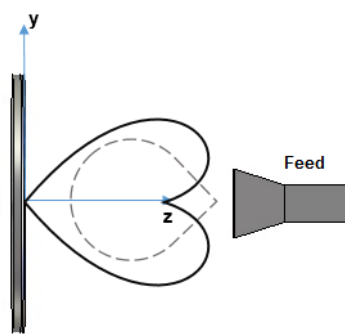
۳-۲- تحلیل تئوری

چگالی میدان الکتریکی دور یک آنتن آرایه‌انعکاسی بر اساس روش سنتز فقط فاز^۱ به صورت زیر می‌باشد [۲۵]:

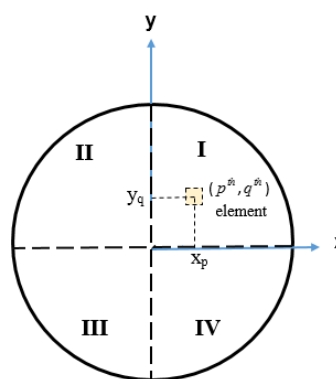
$$\vec{E}(u, v) = \frac{jk_0 e^{-jk_0 r}}{2\pi r} (\hat{a}_\theta [\cos \varphi \vec{E}_x(u, v) + \sin \varphi \vec{E}_y(u, v)] + \hat{a}_\varphi \cos \theta [-\sin \varphi \vec{E}_x(u, v) + \cos \varphi \vec{E}_y(u, v)]) \quad (3)$$

که $v = \sin \theta \sin \varphi$ و $u = \sin \theta \cos \varphi$ و (r, θ, φ) مختصات دستگاه کروی می‌باشد. \vec{E}_x و \vec{E}_y مؤلفه‌های مماسی میدان الکتریکی روی سطح آنتن هستند که به صورت زیر تقریب

سطح آنتن با کمک رابطه (۲) برای $(\theta_b = 0^\circ, \varphi_b = 0^\circ)$ محاسبه می‌گردد. فازهای نقاط ربع دایره‌های دیگر بر اساس ۹۰ درجه اختلاف فاز بین ربع دایره‌های مجاور تعیین می‌شود. این اختلاف فازهای موردنیاز توسط المان‌های پچ واقع روی سطح آنتن ایجاد می‌شود. تحلیل تئوری روش پیشنهادی در ادامه شرح داده خواهد شد.



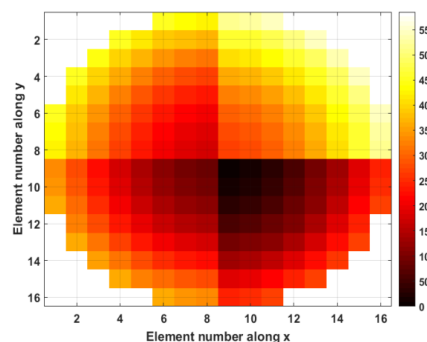
(الف)



(ب)

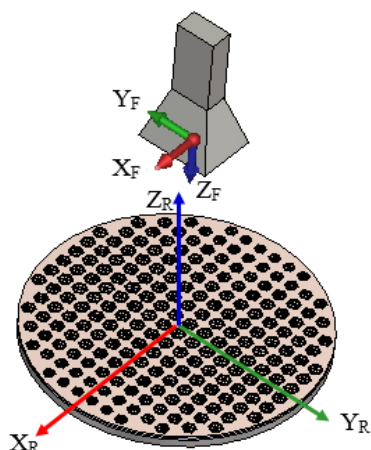
شکل (۷). شمایی از ساختار آنتن آرایه‌انعکاسی دوگلبرگی به همراه الگوی تشعشعی آن و (ب) تقسیمات سطح آنتن در روش پیشنهادی

شکل (۸) توزیع فاز روی سطح یک آنتن آرایه‌انعکاسی دوگلبرگی طراحی شده در فرکانس ۹ گیگاهرتز با استفاده از روش پیشنهادی را نمایش می‌دهد.



شکل (۸). توزیع فاز موردنیاز برای یک آنتن آرایه‌انعکاسی دوگلبرگی با اعمال روش پیشنهادی

¹ Phase-only synthesis approach



شکل (۱۰). دستگاه مختصات آنتن تغذیه و آرایه انعکاسی

مؤلفه‌های میدان آنتن تغذیه به وسیله عبارت زیر از کروی به دکارتی تبدیل می‌شود:

$$\begin{bmatrix} E_x^F \\ E_y^F \\ E_z^F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta \cos \varphi & \cos \theta \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \theta \sin \varphi & \cos \theta \sin \varphi & \cos \varphi \\ \cos \theta & -\sin \theta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_R^F \\ E_\theta^F \\ E_\varphi^F \end{bmatrix} \quad (۸)$$

که بر اساس رابطه (۷)، مؤلفه E_R^F برابر یا صفر است. سپس این مؤلفه‌های دکارتی میدان با استفاده از روابط مرجع [۲۶] از دستگاه F به R تبدیل می‌شود. پس از انجام تبدیلات ضروری، مؤلفه‌های $E_{feed,x}^{p,q}$ و $E_{feed,y}^{p,q}$ به صورت زیر حاصل خواهند شد:

$$E_{feed,x}^{p,q} = \left(\frac{F}{\sqrt{x_p^2 + y_q^2 + F^2}} \right)^n \quad (۹)$$

$$\left(\left(\frac{-F}{\sqrt{x_p^2 + y_q^2 + F^2}} \right) \left(\frac{x_p^2}{x_p^2 + y_q^2} \right) + \frac{y_q^2}{x_p^2 + y_q^2} \right)$$

$$E_{feed,y}^{p,q} = - \left(\frac{F}{\sqrt{x_p^2 + y_q^2 + F^2}} \right)^n \left(\frac{x_p y_q}{x_p^2 + y_q^2} \right) \quad (۱۰)$$

$$\left(\frac{F}{\sqrt{x_p^2 + y_q^2 + F^2}} + 1 \right)$$

حال برای اثبات روش پیشنهادی، فاز المان‌های هر ربع دایره از سطح آنتن، به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\varphi_{R,x(y)}^{New,p,q} = \varphi_{R,x(y)}^{p,q} + \frac{\pi(m-1)}{2}, \quad (۱۱)$$

for $m=1,2,3,4$

زده می‌شوند [۲۵]:

$$\tilde{E}_{x(y)}(u, v) = \zeta \sum_q \sum_p \Gamma_{x(y)}^{p,q} \frac{E_{feed,x(y)}^{p,q}}{\sqrt{F^2 + x_p^2 + y_q^2}} e^{j\psi} \quad (۴)$$

که

$$\zeta = \frac{4\pi^2}{k_0^2 uv} \sin\left(\frac{k_0 u d_x}{2}\right) \sin\left(\frac{k_0 v d_y}{2}\right) \quad (۵)$$

$$\psi = -k_0 \sqrt{F^2 + x_p^2 + y_q^2} + \varphi_{R,x(y)}^{p,q} + \quad (۶)$$

$$k_0 (u p d_x + v q d_y)$$

در این روابط، d_x و d_y دوره تناوب المان‌ها در راستای x و y می‌باشد. $\Gamma_{x(y)}^{p,q}$ و $\varphi_{R,x(y)}^{p,q}$ دامنه و فاز ضریب بازگشتی^۱ از المان در آرایه نامحدود برای برخورد موج صفحه‌ای به صورت عمودی است. اندیس $x(y)$ معرف مؤلفه میدان الکتریکی می‌باشد. در این تحلیل به دلیل وجود صفحه زمین پشت ساختار آنتنی، فرض $\Gamma_{x(y)}^{p,q} \approx 1$ یک فرض قابل قبول است. $E_{feed,x(y)}^{p,q}$ میدان الکتریکی ناشی از آنتن تغذیه و ضرایب $-k_0 \sqrt{F^2 + x_p^2 + y_q^2}$ و $1/\sqrt{F^2 + x_p^2 + y_q^2}$ به ترتیب معرف میزان تنزل دامنه و میزان جابجایی فاز ناشی از انتشار موج در فضای آزاد در محل المان (p, q) است؛ بنابراین چگالی میدان برخوردی در محل هر المان توسط موقعیت آن المان و الگوی تشعشی آنتن تغذیه تعیین می‌گردد. در ادامه مراحل محاسبه میدان الکتریکی $E_{feed,x(y)}^{p,q}$ به تفصیل شرح داده خواهد شد.

با فرض پلاریزاسیون x برای یک آنتن تغذیه ایده‌آل، میدان تشعشی آن به صورت زیر خواهد بود [۴]:

$$\vec{E}^F(\theta, \varphi) = \frac{jk_0 e^{-jk_0 r}}{2\pi r} [\hat{a}_\theta \cos^n(\theta) \cos(\varphi) - \hat{a}_\varphi \cos^n(\theta) \sin(\varphi)] \quad (۷)$$

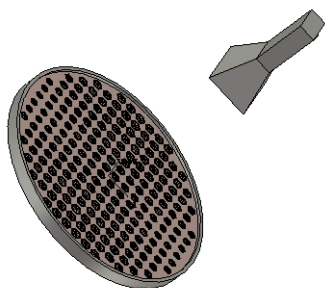
که بر اساس الگوی تشعشی آنتن تغذیه طراحی شده ما، n برابر با ۱۰ می‌باشد. رابطه (۷) میدان تشعشع شده آنتن تغذیه در دستگاه مختصات این آنتن (F) را بیان می‌کند، درحالی‌که الگوی تشعشی آنتن تغذیه در رابطه (۴) باید به صورت مؤلفه‌های دکارتی و در دستگاه مختصات آنتن آرایه انعکاسی (R) باشد. دستگاه مختصات آنتن تغذیه با محورهای X_F, Y_F, Z_F و دستگاه مختصات آرایه انعکاسی با محورهای X_R, Y_R, Z_R در شکل (۱۰) نمایش داده شده است.

^۱ Reflection coefficient

با جایگذاری روابط (۱۳) و (۱۴) در رابطه (۳)، ایجاد صفر در راستای محور الگوی تشعشعی آنتن با توزیع فاز جدید قابل مشاهده است که این امر منجر به پیدایش دو گلبرگ می شود.

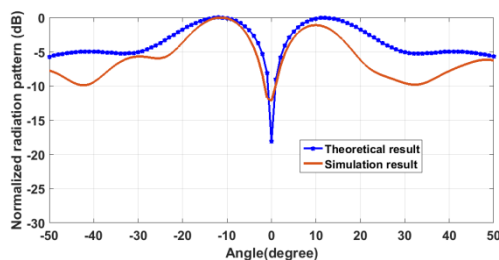
۴- نتایج شبیه سازی

در این قسمت، دو ساختار آنتن آرایه انعکاسی، هر یک با یک منبع تغذیه و دو گلبرگ با استفاده از دو روش طراحی بررسی می شود. از نرم افزار موج کامل CST Microwave Studio برای ارزیابی بازدهی تشعشعی این دو آنتن استفاده می گردد. شمایی از یک آنتن آرایه انعکاسی دایره ای در شکل (۱۱) نمایش داده شده است. در این مقاله، برای بهبود سطح گلبرگ های کناری، یک کمربند فلزی به لبه بیرونی آنتن متصل شده است تا انکسار را کاهش دهد [۲۸].



شکل (۱۱). نمایی از آنتن آرایه انعکاسی طراحی شده

طراحی آنتن آرایه انعکاسی اول بر اساس روش پیشنهادی ما می باشد. شکل (۱۲) یک مقایسه از نتایج تئوری و شبیه سازی شده الگوی تشعشعی آنتن در صفحه E- و برای فرکانس ۹ گیگاهرتز را نمایش می دهد. مشاهده می گردد که نتایج در نزدیکی گلبرگ های اصلی به صورت قابل قبولی یکدیگر را دنبال می کنند. در عمل، چیدمان المان ها روی سطح آنتن بر اساس فازهای مورد نیاز به گونه ای است که طول المان های ربع اول و دوم بیش تر از دو ربع دیگر است. این امر به دلیل ایجاد تفاوت اندک در دامنه موج برگشتی، منجر به اختلاف کمی بین بهره دو گلبرگ تولید شده می گردد.



شکل (۱۲). مقایسه بین نتایج الگوی تشعشعی تئوری و شبیه سازی بر اساس روش پیشنهادی در صفحه E- و برای فرکانس ۹ گیگاهرتز

که $\varphi_{R,x(y)}^{p,q}$ فاز المان محاسبه شده با استفاده از رابطه (۲) است. این تغییر در فاز المان های آنتن، معادل با یک افزایش ۹۰ درجه ای جابجایی فاز المان ها از یک ربع به ربع دیگر می باشد. از طرف دیگر، در حالت معمول در طراحی آرایه انعکاسی ها، فاز تأمین شده توسط هر المان به گونه ای در نظر گرفته می شود که کل تأخیر فاز از مرکز فاز منبع تشعشع کننده تا یک صفحه ثابت در جلوی آرایه انعکاسی برای همه المان ها یک مقدار ثابت باشد [۲۷]:

$$-k_0 \sqrt{F^2 + x_p^2 + y_q^2} + \varphi_{R,x(y)}^{p,q} = 2k\pi \quad (12)$$

که k یک عدد صحیح است. با جایگذاری رابطه (۱۲) در رابطه (۱۱) و سپس (۱۱) در (۶) برای حالت $\theta = 0$ ، مؤلفه های مماسی میدان الکتریکی روی سطح آنتن آرایه انعکاسی به صورت زیر حاصل خواهد شد:

$$\begin{aligned} \tilde{E}_x(0,0) &= \zeta \sum_q \sum_p \frac{E_{feed,x}^{p,q}}{\sqrt{F^2 + x_p^2 + y_q^2}} e^{j\frac{\pi(m-1)}{2}} = \\ & \zeta [\sum_{q(Q1)} \sum_{p(Q1)} I'_1 + \sum_{q(Q2)} \sum_{p(Q2)} I'_1 e^{j\frac{\pi}{2}} + \\ & \sum_{q(Q3)} \sum_{p(Q3)} I'_1 e^{j\pi} + \sum_{q(Q4)} \sum_{p(Q4)} I'_1 e^{j\frac{3\pi}{2}}] = \\ & \zeta I_1 (1 + j - 1 - j) = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \tilde{E}_y(0,0) &= \zeta \sum_q \sum_p \frac{E_{feed,y}^{p,q}}{\sqrt{F^2 + x_p^2 + y_q^2}} e^{j\frac{\pi(m-1)}{2}} = \\ & \zeta [\sum_{q(Q1)} \sum_{p(Q1)} I'_2 + \sum_{q(Q2)} \sum_{p(Q2)} (-I'_2) e^{j\frac{\pi}{2}} + \\ & \sum_{q(Q3)} \sum_{p(Q3)} I'_2 e^{j\pi} + \sum_{q(Q4)} \sum_{p(Q4)} (-I'_2) e^{j\frac{3\pi}{2}}] = \\ & \zeta I_2 (1 - j - 1 + j) = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

که Q_m معرف ربع m ام و I'_1 و I'_2 به ترتیب

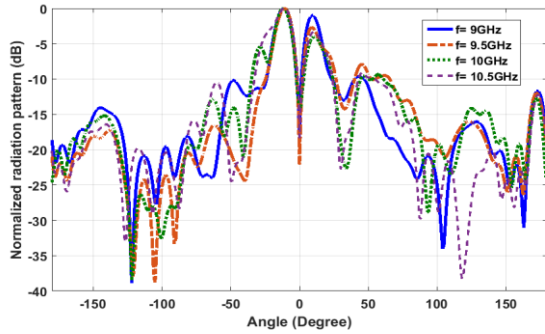
$$\text{مربوط به ربع اول و} \quad \frac{E_{feed,y}^{p,q}}{\sqrt{F^2 + x_p^2 + y_q^2}} \quad \text{و} \quad \frac{E_{feed,x}^{p,q}}{\sqrt{F^2 + x_p^2 + y_q^2}}$$

I_2 و I_1 به صورت زیر می باشند:

$$I_1 = \sum_{q(Q1)} \sum_{p(Q1)} I'_1 \quad (15)$$

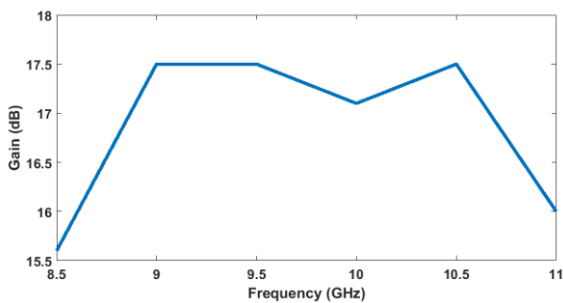
$$I_2 = \sum_{q(Q1)} \sum_{p(Q1)} I'_2 \quad (16)$$

الگوی تشعشعی نرمالیزه شده این آنتن برای قطر 192mm به ازای چندین فرکانس، در صفحه E- و با هدف تحقق صفر در راستای $\theta = 0^\circ$ در شکل (۱۵) نشان داده شده است. دیده می‌شود که به ازای تمام فرکانس‌های کاری، یک صفر در راستای $\theta = 0^\circ$ و دو گلبی در راستای $\pm 9^\circ$ محقق می‌گردد.



شکل (۱۵). الگوهای تشعشعی نرمالیزه شده آنتن آرایه‌انعکاسی با قطر 192mm طراحی شده با استفاده از روش پیشنهادی در صفحه E- برای چند فرکانس مختلف

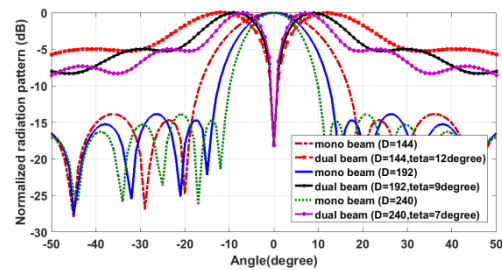
شکل (۱۶) نمودار بهره گلبی بزرگ‌تر برحسب فرکانس برای یک آنتن آرایه‌انعکاسی طراحی شده با روش پیشنهادی را نمایش می‌دهد. بر اساس نتایج حاصل شده، بیشینه بهره 17.6dB در فرکانس ۹ گیگاهرتز و پهنای باند فرکانسی 1dB برابر با 19.4% برای یک آنتن طراحی شده با قطر 192mm خواهیم داشت. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، میزان انحراف گلبی در پهنای باند آنتن، حدود ۱ درجه است که معادل 0.8% از پهنای گلبی آنتن ($\theta_{3\text{dB},m}$) در فرکانس ۹ گیگاهرتز بوده و قابل چشم‌پوشی است.



شکل (۱۶). بهره گلبی بزرگ‌تر برحسب فرکانس برای آنتن آرایه‌انعکاسی طراحی شده با استفاده از روش پیشنهادی

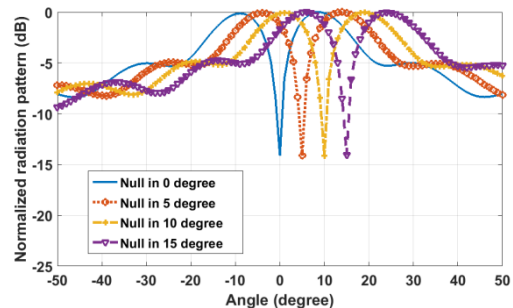
آنتن آرایه‌انعکاسی دوم بر اساس روش هندسی طراحی شده است. شکل (۱۷) الگوهای تشعشعی نرمالیزه شده این آنتن برای قطر 192mm در صفحه E- و در فرکانس‌های ۹، $9/5$ و ۱۰ گیگاهرتز را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که در همه فرکانس‌ها، دو گلبی اصلی متقارن و در جهات $\pm 20^\circ$ خواهیم داشت. در این طراحی نیز با تغییر فرکانس، انحراف اندکی در جهت دو گلبی رخ می‌دهد.

شکل (۱۳) الگوهای تشعشعی نرمالیزه شده آنتن آرایه انعکاسی دوگلبی طراحی شده با روش پیشنهادی و الگوی تشعشعی آنتن‌های تک‌گلبی معادل آن‌ها برای قطرهای $D = 144\text{mm}$ ، $D = 192\text{mm}$ و $D = 240\text{mm}$ در فرکانس ۹ گیگاهرتز را نمایش می‌دهد. از نتایج دیده می‌شود که جهت دو گلبی تولید شده تقریباً در راستای $\pm \theta_{3\text{dB}}/2$ قرار دارد که $\theta_{3\text{dB}}$ پهنای 3dB گلبی آنتن تک‌گلبی با قطر یکسان نسبت به آنتن دوگلبی است. برای مثال، آرایه‌انعکاسی تک‌گلبی با قطر 192mm دارای $\theta_{3\text{dB}} = 17^\circ$ است، درحالی‌که آنتن دوگلبی معادل آن، دو گلبی در راستای $\pm 9^\circ$ درجه فراهم می‌کند.

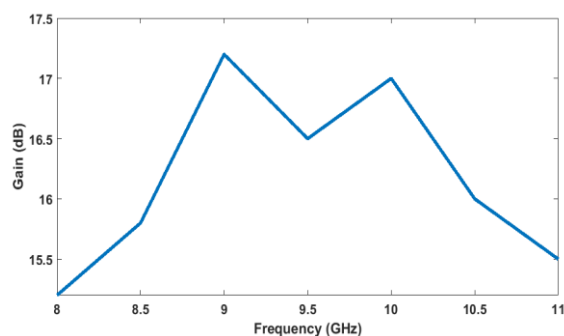


شکل (۱۳). الگوهای تشعشعی نرمالیزه شده آنتن آرایه‌انعکاسی دوگلبی طراحی شده با روش پیشنهادی و معادل تک‌گلبی آن‌ها در فرکانس ۹ گیگاهرتز و برای سه قطر $D = 192\text{mm}$ ، $D = 144\text{mm}$ و $D = 240\text{mm}$

با تنظیم فاز المان‌های روی سطح آنتن می‌توان مکان صفر تولیدی در الگوی تشعشعی و در نتیجه جهت گلبی‌های ایجاد شده را کنترل نمود. در شکل (۱۴) الگوهای تشعشعی نرمالیزه شده آنتن با قطر 192mm و با صفر ایجادی در جهات $\theta = 0^\circ$ ، $\theta = 5^\circ$ ، $\theta = 10^\circ$ و $\theta = 15^\circ$ نمایش داده شده است. قابل‌مشاهده است که با تغییر مکان صفر محل گلبی‌های تولیدی به ترتیب $(\theta_1 = -9^\circ, \theta_2 = +9^\circ)$ ، $(\theta_1 = -4^\circ, \theta_2 = +14^\circ)$ و $(\theta_1 = +1^\circ, \theta_2 = +19^\circ)$ و $(\theta_1 = +6^\circ, \theta_2 = +24^\circ)$ خواهد شد.



شکل (۱۴). الگوهای تشعشعی نرمالیزه شده آنتن آرایه‌انعکاسی دوگلبی طراحی شده با روش پیشنهادی برای صفر ایجادی در چهار جهت $\theta = 15^\circ$ و $\theta = 10^\circ$ ، $\theta = 5^\circ$ ، $\theta = 0^\circ$



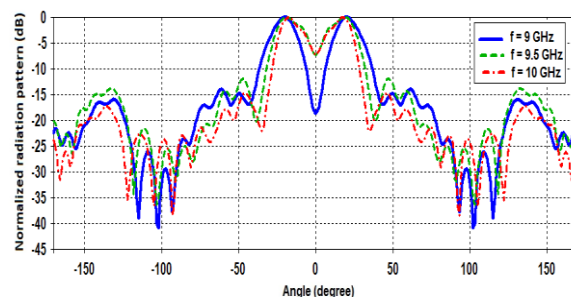
شکل (۱۸). بهره گلبرگ‌های تولید شده برحسب فرکانس برای آنتن آرایه‌انعکاسی طراحی شده با استفاده از روش هندسی

جدول (۱) پارامترهای آنتن آرایه‌انعکاسی طراحی شده با روش پیشنهادی را با آنتن طراحی شده با روش هندسی و دو کار چندگلبرگی دیگر در باند فرکانسی X مقایسه می‌کند. مقادیر موجود در این جدول، بهبود پهنای باند 1dB و نیز بهبود میزان انحراف گلبرگ آنتن در پهنای باند کاری در روش پیشنهادی نسبت به دیگر کارهای تک تغذیه‌ای را تصدیق می‌کند.

جدول (۱). مقایسه پارامترهای آنتن آرایه‌انعکاسی دوگلبرگی طراحی شده با کمک روش پیشنهادی و آنتن طراحی شده با روش هندسی و دو آنتن از دو مقاله دیگر

مرجع	آنتن طراحی شده با روش پیشنهادی	آنتن طراحی شده با روش هندسی	[۱۹]	[۲۰]
فرکانس	9 GHz	9 GHz	32 GHz	32 GHz
پهنای باند 1-dB	19.4%	18.3%	8.6%	6.49%
پلاریزاسیون	خطی	خطی	دایروی	-
تعداد گلبرگ‌ها	۲	۲	۴	۴
جهت گلبرگ‌ها	$\theta=9^\circ, \varphi=90^\circ, \varphi=270^\circ$	$\theta=20^\circ, \varphi=90^\circ, \varphi=270^\circ$	$\theta=30^\circ, \varphi=\pm 45^\circ, \pm 135^\circ$	$\theta=31.5^\circ, \varphi=0.7^\circ, \theta=24.9^\circ, \varphi=98.5^\circ, \theta=42.9^\circ, \varphi=199.2^\circ, \theta=32.4^\circ, \varphi=280.7^\circ$
انحراف گلبرگ روی پهنای باند 1dB	1° ($=0.08 \times \theta_{3dB,m}$)	2° ($=0.1 \times \theta_{3dB,m}$)	2.5° ($=0.6 \times \theta_{3dB,m}$)	4° ($=0.87 \times \theta_{3dB,m}$)

باندی، یک المان تک‌لایه کوچک‌تر از طول موج با بیش از ۵۷۵ درجه رنج خطی فاز در باند فرکانسی ۱۱-۸٫۵ گیگاهرتز به‌عنوان المان آنتن آرایه‌انعکاسی استفاده شده است. دو آنتن آرایه‌انعکاسی دوگلبرگی با استفاده از روش پیشنهادی و روش هندسی با به‌کارگیری یک نوع المان، طراحی و شبیه‌سازی شده است. آنتن طراحی شده با روش پیشنهادی، دارای پهنای باند 1dB به مقدار ۱۹/۴٪، بیشینه بهره ۱۷/۶ dB و انحراف گلبرگ به میزان ۰/۸ از پهنای گلبرگ آنتن می‌باشد. این در حالی است



شکل (۱۷). الگوهای تشعشعی نرمالیزه شده آنتن آرایه‌انعکاسی با قطر 192mm طراحی شده با استفاده از روش هندسی در صفحه E- برای چند فرکانس مختلف

برای این طراحی نیز نمودار بهره گلبرگ‌های تولیدی برحسب فرکانس در شکل (۱۸) آورده شده است. از نتایج، بیشینه بهره 17.2dB در فرکانس ۹ گیگاهرتز با پهنای باند 1dB برابر با ۱۸/۳٪ حاصل می‌شود. این آنتن در باند فرکانس کاری خود حدود ۲ درجه انحراف دارد که معادل ۰/۱ از پهنای گلبرگ آنتن ($\theta_{3dB,m}$) در فرکانس ۹ گیگاهرتز است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش جدید برای دستیابی به یک آنتن آرایه انعکاسی دوگلبرگی پهن‌بند به‌صورت تک‌تغذیه‌ای مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. در این روش، تولید دو گلبرگ بر اساس ایجاد یک صفر در الگوی تشعشعی آنتن از طریق کنترل توزیع فاز سطح آنتن می‌باشد. به‌منظور اثبات ایده ارائه‌شده، یک تحلیل تئوری کامل نیز انجام شده است. برای دستیابی به ویژگی پهن

- [12] L. Moustafa, R. Gillard, F. Peris, et al., "The phoenix cell: a new reflectarray cell with large bandwidth and rebirth capabilities," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 10, pp. 71–74, 2011.
- [13] J. Gómez Pérez, A. Tayebi Tayebi, I. González Diego, et al. "Broadband reflectarray antenna composed of single-layer concentric rings," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 27, no. 17, pp. 2166–2175, Nov. 2013.
- [14] F. Xue, H. J. Wang, M. Yi & G. Liu, "A broadband Ku-band microstrip reflectarray antenna using single-layer fractal elements," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 58, no. 3, pp. 658–662, 2016.
- [15] G. Kong, X. Li, Q. Wang & J. Zhang, "A wideband reconfigurable dual-branch helical reflectarray antenna for high-power microwave applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 2, pp. 825–833, 2021.
- [16] D. R. Prado, M. Arrebola, M. R. Pino & G. Goussetis, "Broadband reflectarray with high polarization purity for 4K and 8K UHDTV DVB-S2," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 100712–100720, 2020.
- [17] A. Aziz, F. Yang, Sh. Xu & M. Li, "A low-profile quad-beam transmitarray," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 8, pp. 1–5, Aug. 2020.
- [18] A. H. Abdelrahman, P. Nayeri, A. Z. Elsherbeni & F. Yang, "Single-Feed Quad-Beam Transmitarray Antenna Design," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 3, pp. 953–959, 2016.
- [19] P. Nayeri, F. Yang & A. Z. Elsherbeni, "Design and experiment of a single-feed quad-beam reflectarray antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 2, pp. 1166–1171, 2012.
- [20] P. Nayeri, F. Yang & A. Z. Elsherbeni, "Design of Single-Feed Reflectarray Antennas With Asymmetric Multiple Beams Using the Particle Swarm Optimization Method," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 9, pp. 4598–4605, 2013.
- [21] P. Nayeri, F. Yang & A. Z. Elsherbeni, "Single-feed multi-beam reflectarray Antennas," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Toronto, Canada, 2010.
- [22] D. Martinez-de-Rioja, E. Martinez-de-Rioja & J. A. Encinar, "Multibeam Reflectarray for Transmit Satellite Antennas in Ka Band Using Beam-Squint," *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, pp. 1421–1422, 2016.

که برای آنتن طراحی شده با روش دیگر پهنای باند 1dB معادل ۱۸/۳٪، بیشینه بهره ۱۷/۲ dB و انحراف گلبیگ به میزان ۰/۱ از پهنای گلبیگ آنتن حاصل شده است. از مقایسه نتایج آنتن دوگلبیگی پیشنهادی با نتایج چند آنتن دیگر، بهبود رفتار تشعشی آنتن در کار حاضر مشهود می‌باشد.

۶- مراجع

- [1] J. Shaker, MR. Chaharmir & J. Ethier, "Reflectarray antennas: analysis, design, fabrication and measurement," Boston/London, United State/England: Artech House Antennas and Propagation, pp. 1–24, 119–121, 2014.
- [2] F. Etesami, H. Abiri & Sh. Khorshidi, "Design of a broadband single layer reflectarray antenna using double hexagonal rings and a hexapole," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 34, no. 18, pp. 1–14, Aug. 2020.
- [3] S. Abdi Tazehabadi & Sh. Jam, "A high-power microwave reflectarray antenna based on perforated dielectric substrate," *Advanced Electromagnetics*, vol. 8, no. 1, pp. 16–22, 2019.
- [4] J. Huang & J. A. Encinar, "Reflectarray antennas," Hoboken (NJ): John Wiley & Sons Inc., pp. 1–6, 2008.
- [5] H. M. Yamani, A. M. Attiya & A. K. Abdelmageed, "Approximate analytical technique to design reflectarray antenna," *Advanced Electromagnetics*, vol. 5, no. 1, pp. 41–45, Apr. 2016.
- [6] L. Guo, H. Yu, W. Che & W. Yang, "A broadband reflectarray antenna using single-layer rectangular patches embedded with inverted I-shaped slots," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 5, pp. 3132–3139, 2019.
- [7] D. M. Pozar, "Bandwidth of reflectarrays," *Electronics Letters*, vol. 39, no. 21, pp. 1490–1491, 2003.
- [8] M. E. Bialkowski & K. H. Sayidmarie, "Bandwidth considerations for a microstrip reflectarray," *Progress in Electromagnetics research B*, vol. 3, pp. 173–187, 2008.
- [9] J. Huang, "Bandwidth study of microstrip reflectarray and a novel phased reflectarray concept," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Newport Beach, CA, USA, pp. 582–585, 1995.
- [10] P. Nayeri, F. Yang & A. Z. Elsherbeni, "Reflectarray antennas: theory, designs, and applications," United States: John Wiley & Sons Ltd, pp. 267–281, 2018.
- [11] M. H. Dahri, M. H. Jamaluddin, M. I. Abbasi, et al., "A review of wideband reflectarray antennas for 5g communication systems," *IEEE Access*. Vol. 5, pp. 17803–17815, 2017.

- [26] Y. Rahmat-Samii, "Useful coordinate transformations for antenna applications," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, pp. 571-574. July. 1979.
- [27] D. M. Pozar, D. M. Targonski & H. D. Syrigos, "Design of millimeter wave microstrip reflectarrays," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 45, no. 2, pp. 287-296, 1997.
- [28] S. M. Hosseini, S. M. Hashemi & P. Hasani, "Suppression of sidelobes level for parabolic reflector antenna", Journal of Radar, vol. 8, no. 2, pp. 89-96, 1399. (in Persian)
- [23] M. I. Abbasi & M. Y. Ismail, "Reflection loss and bandwidth performance of X-band infinite reflectarrays: Simulations and measurements," Microwave and Optical Technology Letters, vol. 53, no. 1, pp. 77-80, Jan. 2011.
- [24] M. Y. Ismail, M Inam & A. M. A. Zaidi, "Reflectivity of reflectarrays based on dielectric substrates," American Journal of Engineering and Applied Sciences, vol. 3, no. 1, pp. 180-185, 2010.
- [25] J. A. Zornoza & J. A. Encinar, "Efficient phase-only synthesis of contoured-beam patterns for very large reflectarrays," International journal of RF and Microwave Computer-aided Engineering, vol. 14, no. 5, pp. 415-423, 2004.