

طراحی آنتن آرایه انعکاسی هدایت‌گر پرتو غیرفعال با استفاده از عناصر غیریکنواخت به منظور بهبود پهنای پرتو اصلی و سطح گلبرگ جانبی

رضا اصغریان^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ بیژن ذاکری^۲، دانشیار؛ محمد یزدی^۳، استادیار؛ ستار صمدی^۴، دانشجوی دکتری

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل- مازندران - ایران - r.t.asgharian@gmail.com

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل- مازندران - ایران - zakeri@nit.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل- مازندران - ایران - yazdi.mohammad@gmail.com

۴- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل- مازندران - ایران - samadi.sattar@gmail.com

چکیده: در این مقاله یک آنتن آرایه انعکاسی غیریکنواخت هدایت‌گر پرتو در باند X پیشنهاد شده است. پهنای پرتو توان -10 dB - آنتن پیشنهادی به حدود 17° و سطح گلبرگ جانبی اول آن به -18 dB رسیده است که نسبت به کارهای مشابه گذشته کاهش چشمگیری محسوب می‌شود. در این آنتن چرخش پرتو با استفاده از جابجایی جزئی یک عنصر بزرگ، به عنوان زمین ساختار، انجام گرفته است. متناسب بودن توزیع فاز آرایه انعکاسی با تغییرات فاز عنصر بکار گرفته شده در آن موجب شده است که جابجایی صفحه زمین در رفتار فازی آرایه انعکاسی غیریکنواخت حداقل تأثیر را داشته باشد و شیفت فاز به وجود آمده الگوی میدان راه دور آن را خراب نکند. نشان داده شده است که با جابجایی زمین در حدود $\pm 0.05\lambda$ می‌توان پرتو آنتن را در حدود $\pm 10^\circ$ نسبت به محور عمود بر آنتن چرخاند. در این آنتن چرخش پرتو بدون استفاده از ادوات فعال مایکروویوی صورت گرفته است و از این حیث بسیاری از مشکلات مدارهای فعال مانند دشواری بایاس، تلفات ادوات، توان قابل تحمل پایین و ... وجود نخواهد داشت. در پایان، جهت اعتباربخشی به طرح پیشنهادی، یک نمونه آرایه انعکاسی توسط نرم‌افزار تمام موج الکترومغناطیسی شبیه‌سازی شده است.

واژه‌های کلیدی: آرایه انعکاسی غیریکنواخت، هدایت‌گر پرتو، کاهش پهنای پرتو، کاهش سطح گلبرگ جانبی.

Design of Steerable Passive Reflectarray Using Non-uniform Elements for Main Beam and Side Lobe Level improvement

R. Asgharian¹, MSc student; B. Zakeri², Associated professor; M. Yazdi³, Assistant professor; S. Samadi⁴, Ph.D student

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Mazandaran, Iran, Email: r.t.asgharian@gmail.com

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Mazandaran, Iran, Email: zakeri@nit.ac.ir

3- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Mazandaran, Iran, Email: yazdi.mohammad@nit.ac.ir

4- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Mazandaran, Iran Email: samadi.sattar@gmail.com

Abstract: In this paper, a X-band beam steerable non-uniform reflectarray antenna is proposed. The -10 dB power beamwidth and side lobe level of the proposed antenna are respectively 17° and -18 dB which show significant improvement proportional to previous works. The beam steering is carried out with a small movement of a large element, i.e. the ground plane of the antenna. It is shown that the ground plane movement has negligible effect on the reflectarray phase characteristic, as a consequence of the proportionality between reflectarray phase distribution and element phase variation. This ensures that the distortion of far-field pattern is avoided. About $\pm 10^\circ$ tilt of antenna beam from the broadside is achieved with $\pm 0.05\lambda$ ground movement. In the proposed structure beam steering capability is provided using passive elements which eliminates the problems of using active circuits such as bias difficulties, component losses and low power handling. After describing design procedure completely, the proposed antenna is simulated with an electromagnetic full-wave software and the results are validated.

Keywords: Non-uniform reflectarray, Beam steering, Beamwidth reduction, Side lobe level suppression.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۸/۱

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۱/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۳/۶

نام نویسنده مسئول: بیژن ذاکری

نشانی نویسنده مسئول: دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۱- مقدمه

آنتن‌ها یکی از اجزای اصلی بسیاری از سیستم‌های مخابراتی و ردیابی محسوب می‌شوند [۱، ۲]. با پیدایش رادارها و سایر سیستم‌های تشعشع کننده، نیاز به آنتن‌هایی با قابلیت چرخش پرتو افزایش یافت. امروزه آنتن‌هایی با قابلیت هدایت پرتو، از نظر نحوه عملکردی در دو ساختار کلی دسته‌بندی می‌شوند: دسته اول آنتن‌هایی هستند که یک تشعشع کننده و یا یک صفحه انعکاس دهنده دارند و به صورت مکانیکی توسط یک موتور می‌چرخند و از این طریق جهت الگو را تغییر می‌دهند. دسته دوم آن‌هایی هستند که توسط آرایه‌هایی ثابت، فاز عناصر تشعشع کننده را به صورت الکترونیکی تغییر می‌دهند و از این طریق پرتو آنتن را می‌چرخانند. در هر دو روش کاستی‌هایی وجود دارد و برای انتخاب هر کدام از این آنتن‌ها در واقع باید مصالحه‌ای میان هزینه، سرعت، قابلیت اطمینان و سایر جنبه‌های عملکردی ادوات RF انجام داد [۳].

آنتن‌هایی که به روش مکانیکی کنترل می‌شوند، بسیار کم‌هزینه هستند اما حرکت اجزای آن‌ها موجب می‌شود سرعت و قابلیت اطمینان پایینی داشته باشند. همچنین چرخش آنتن‌های بزرگ به روش مکانیکی نیاز به فضای زیادی دارند. آنتن‌های آرایه فازی فعال، سریع‌تر و قابل اطمینان‌تر هستند اما هزینه پیاده‌سازی بالایی دارند و مشکلات متعددی پیرامون تغذیه و بایاس عناصر در آن‌ها مطرح می‌شود. همچنین در برخی موارد تلفات ایجاد شده در عناصر الکترونیکی آن‌ها بسیار قابل توجه خواهد بود. این تلفات را می‌توان با قرار دادن تقویت‌کننده در هر عنصر جبران کرد که البته موجب افزایش هزینه می‌شود [۳، ۴].

با وجود توسعه سیستم‌های آرایه فازی، هزینه و پیچیدگی بالا و همچنین مشکلات کالیبراسیون آن‌ها [۵] موجب شد تا کاربرد آن‌ها به برخی از صنایع نظامی محدود شود و بسیاری از سیستم‌هایی که می‌توانستند به صورت بالقوه از مزیت‌های آرایه فازی بهره‌مند شوند، از بکارگیری آن‌ها صرف‌نظر کردند [۶]. از همین رو نیاز به ایده‌های جدید برای توسعه آرایه فازی‌های مقرون به صرفه بیش از پیش احساس می‌شود تا این تکنولوژی بتواند به صورت گسترده‌تر مورد استفاده قرار گیرد. در این راستا آنتن‌های آرایه انعکاسی به عنوان یک روش امیدوارکننده برای تحقق آرایه فازی‌های ارزان قیمت معرفی شدند.

روش‌های تغییر فاز در آرایه انعکاسی‌های موجود در حال حاضر به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند. دسته اول آن‌هایی هستند که آنتن تغذیه را سوییچ می‌کنند و دسته دوم از روش‌های تنظیم اندازه عناصر استفاده می‌کنند [۳]. در روش سوییچ کردن تغذیه، مشخصه تأخیر

فضایی توسط جابجایی تغذیه روی دهانه آنتن ایجاد می‌شود. هرچند این ایده به آسانی قابل پیاده‌سازی است، اما نمی‌تواند پرتو را به صورت پیوسته اسکن کند و علاوه بر این به چند تغذیه جهت تابش به دهانه آنتن نیاز است. استفاده از چند تغذیه می‌تواند به دلیل اثر انسداد تغذیه موجب کاهش راندمان دهانه شود. در روش تنظیم اندازه عناصر در آرایه انعکاسی، به یک سیستم شیفت دهنده فاز متغیر نیاز است تا با تغییر فاز تک‌تک عناصر بتوان جهت پرتو آنتن را هدایت کرد. در طول سالیان متمادی انواع روش‌های طراحی عناصر با قابلیت تغییر فاز گزارش شده است [۷].

در [۸] یک روش مکانیکی جدید به منظور تغییر جهت پرتو ارائه شده است که بسیاری از مشکلات مکانیکی کارهای گذشته را جبران می‌کند. در این روش به جای جابجایی و اعمال تغییر فاز بر روی تک‌تک عناصر، از چرخش جزئی ساختار زمین جهت تغییر فاز روی عناصر استفاده می‌شد که این عامل به نوبه خود موجب چرخش پرتو شد. از آنجا که در این روش به طور ایده‌آل از تحریک کننده‌های الکترومکانیکی استفاده شده است، آن را سیستم‌های الکترومکانیکی بزرگ مقیاس نامیده‌اند. تغییر پرتو به این روش نیازی به استفاده از شیفت دهنده‌های فاز حالت جامد، دیودهای ورکتور و یا سوییچ‌ها ندارد. از همین رو این آنتن بسیاری از معایب موجود در آرایه فازی الکترونیکی گذشته را ندارد.

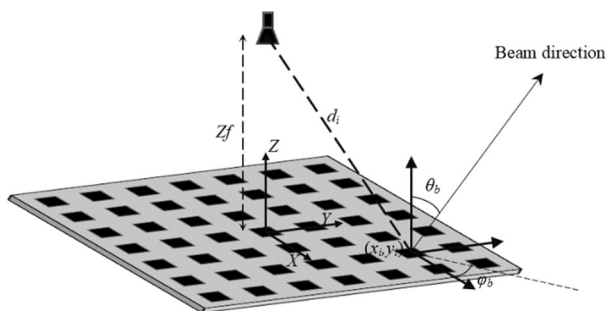
در ایده مذکور یک آرایه از پچ‌های مربعی مشابه بر روی زیرلایه در کنارهم قرار گرفتند و در زیر آن، صفحه زمینی با فاصله از دی‌الکتریک قرار داده شده است. در این روش نشان داده شد که با چرخش جزئی صفحه زمین، حدود $0.05/50^\circ$ ، پرتو آنتن می‌تواند تا 10° و حتی در حالتی که زمین چندتکه شود تا چند برابر این مقدار بچرخد. این یک دستاورد قابل توجه محسوب می‌شد زیرا با حرکت جزئی یک عنصر بزرگ به نام زمین چرخش پرتو در دو بعد محقق می‌شد. بدین وسیله از پیچیدگی ایجاد تغییر فاز به روش مکانیکی یا الکترونیکی بر روی تک‌تک عناصر جلوگیری به عمل آمد. از طرفی کوچک بودن دامنه چرخش زمین این امکان را فراهم آورد تا با استفاده از قطعات الکترومکانیکی مانند پیژوها بتوان چرخش را تأمین کرد. از آنجا که سرعت نوسان این قطعات به چندصد کیلوهرتز می‌رسد، مشکل کند بودن فرآیند چرخش پرتو که در آنتن‌های مکانیکی وجود دارد، در این آنتن‌ها رفع می‌شود.

هر چند که ایده مطرح شده دستاوردهای جالب توجهی داشت، اما در حقیقت چالش‌های بسیار مهمی نیز وجود داشت. یکی از بارزترین نواقص کار این بود که آنتنی که در مقاله ارائه و ایده مذکور بر روی آن

۲-۱- طراحی آرایه انعکاسی غیریکنواخت

یک آرایه انعکاسی، آنتنی است که از یک صفحه بازتابنده مسطح و یا کمی انحنا دار ساخته شده است و با یک آنتن دیگر تغذیه می‌شود. بر روی سطح این بازتابنده تعداد زیادی عناصر تشعشع کننده قرار می‌گیرند (عناصر می‌توانند موجبرهای انتها باز، پیچ‌های میکرواستریپی، دوقطبی‌ها و یا حلقه‌ها باشند). توان تشعشعی از آنتن تغذیه به عناصر آرایه انعکاسی می‌تابد و این عناصر می‌توانند به صورت غیریکنواخت بازطراحی شوند. در این صورت امواج تابیده شده به آرایه انعکاسی، طوری انعکاس می‌یابند که در میدان دور جلوی آنتن، یک موج مسطح و هم‌فاز تشکیل شود. به عبارت دیگر مطابق با شکل ۱ طراحی مجدد فاز تمام عناصر به نحوی انجام می‌شود که اختلاف فاز ناشی از اختلاف مسیر تغذیه تا عنصر جبران شود. این عملکرد همان اساس کار آنتن‌های انعکاسی سهموی است که ساختار هندسی آن‌ها با استفاده از یک منحنی سهموی قادر به جبران اختلاف مسیر می‌باشد. هم‌فاز شدن موج‌های بازگشتی از سطح هر کدام از آنتن‌های سهموی یا آرایه انعکاسی غیریکنواخت، موجب تیز شدن الگوی تشعشعی و افزایش سمتگرایی آن‌ها خواهد شد [۹]. از آنجا که در این مقاله به دنبال باریک کردن پهنای پرتو آنتن مورد نظر هستیم، کار خود را با طراحی یک آرایه انعکاسی آغاز می‌کنیم.

به منظور هدایت پرتو در جهت مورد نظر، لازم است تا الگوی فاز مورد نیاز روی صفحه آرایه انعکاسی محاسبه شود. مطابق با شکل ۱ اگر یک آرایه انعکاسی در چنین مختصاتی تعریف کنیم، فاز مورد نیاز هر عنصر از رابطه (۱) بدست می‌آید [۱۰].



شکل ۱: نمای کلی آنتن آرایه انعکاسی و تغذیه آن. فاصله تغذیه تا هر عنصر میزان فاز بازگشتی آن عنصر را مشخص می‌کند.

$$\varphi_R = k_0(d_i - (x_i \cos \varphi_b + y_i \sin \varphi_b) \sin \theta_b) \quad (1)$$

که در آن φ_R فاز ضریب بازگشت هر عنصر یا همان فاز مورد نیاز بوده و (θ_b, φ_b) مختصات زاویه‌ای هستند که مایل هستیم تا پرتو آنتن در آن جهت قرار گیرد. همچنین (x_i, y_i) مختصات مرکز عنصر i ، d_i فاصله مرکز فاز آنتن تغذیه تا عنصر i و k_0 نیز ثابت انتشار موج در خلأ

پیاده شده بود، پهنای پرتو زیادی داشت. به عبارت دیگر حتی در حالتی که چرخش زمین صفر و پرتو آنتن نچرخیده بود، پهنای آن به طور ذاتی آنقدر زیاد بود که عملاً قابلیت استفاده در کاربردهای عملی را نداشت. علاوه بر این، بالا بودن سطح گلبُرج جانبی از دیگر نواقصی است که در این کار وجود داشته و موجب می‌شد که روش ارائه شده نتواند حداقل نیازهای یک آنتن هدایت‌گر را فراهم کند. در این مقاله یک آنتن آرایه انعکاسی غیرفعال با قابلیت هدایت‌گری پرتو معرفی شده است. عناصر بکار رفته در این آرایه انعکاسی برخلاف کارهای مشابه گذشته به صورت غیریکنواخت در نظر گرفته شده‌اند. تناسب اندازه هر یک از این عناصر با الگوی توزیع فاز ایجاد شده روی صفحه آرایه انعکاسی، سبب کاهش قابل ملاحظه پهنای پرتوی آنتن و همچنین بهبود سطح گلبُرج جانبی آن شده است.

به علاوه فاز بازگشتی عنصر، تحت تأثیر پارامترهای اندازه عنصر و فاصله هوایی میان زیرلایه و ساختار زمین، بررسی و نشان داده شده که با کنترل این دو پارامتر می‌توان پرتوی آنتن را با گلبُرج جانبی پایین جابجا کرد.

در بخش دوم این مقاله فرآیند طراحی آنتن پیشنهادی بیان شده است که شامل دو زیربخش می‌باشد. در زیربخش اول به طراحی یک آرایه انعکاسی با عناصر غیریکنواخت پرداخته و در زیر بخش دوم، فرآیند چرخش الگوی آنتن مذکور به کمک چرخش زمین ساختار محقق شده است. به علاوه، در هر دو زیربخش نتایج حاصل از طراحی به روش تئوری نشان داده شده است. در بخش سوم، آرایه انعکاسی پیشنهاد شده در یک نرم‌افزار تمام موج شبیه سازی شده و نتایج حاصل از آن با نتایج تئوری مقایسه شده است. آخرین بخش از این مقاله نیز به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری اختصاص داده شده است.

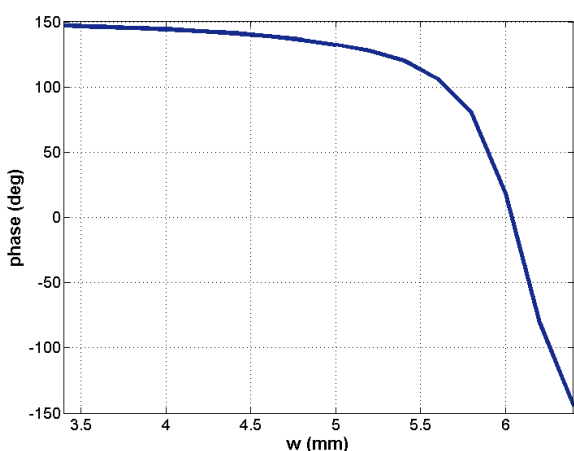
۲- روند طراحی

در این بخش مراحل طراحی آرایه انعکاسی پیشنهادی در قالب دو زیر بخش تشریح شده است. ابتدا در زیربخش اول مبانی آنتن آرایه انعکاسی غیریکنواخت را بیان کرده و در ادامه متناسب با محل تغذیه و فاصله آن تا هر عنصر، آرایه انعکاسی را طراحی می‌کنیم. این آنتن به گونه‌ای ارائه شده است که زمین ساختار با یک فاصله هوایی از زیرلایه قرار گیرد. در زیربخش دوم زمین ساختار تا حد امکان حول محور وسط آن چرخانده شده و در این حالت الگوی آرایه انعکاسی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در این زیربخش شرایط لازم جهت ارائه آرایه انعکاسی غیریکنواختی که قابلیت چرخش پرتو داشته باشد، توضیح داده شده است.

است. از روی این نمودار، محدوده فاز برای این عنصر در حدود 300° (150° تا $+150^\circ$) بدست آمده است. در این حالت محدوده فاز به اندازه 60° از حالت ایده آل فاصله دارد و این کاستی اجازه نمی دهد که حداکثر بهره را از آرایه انعکاسی دریافت کنیم [۱۱]. با این وجود، عنصر مربعی در فرکانس ۹/۵GHz نموداری را نتیجه می دهد که با کمک آن می توان به یک الگوی جهتی قابل قبول با بهره مناسب دست یافت.

نکته دیگری که در شکل ۳ مشهود می باشد، این است که شیب نمودار به ازای عرض پچ های بالا افزایش می یابد. این امر موجب می شود که در محدوده فازی مربوطه، به ازای تغییرات فاز زیاد، اندازه عرض پچ ها نزدیک به هم باشند. در ادامه در بخش ۲-۲ نشان خواهیم داد که این مشخصه برای طراحی آنتن مورد نظر مطلوب است.

اکنون که مشخص شد عنصر پچ مربعی مورد نظر در ابعاد مفروض و فرکانس انتخابی، قابلیت تولید یک آنتن آرایه انعکاسی غیریکنواخت را دارد، میتوان توزیع فاز مورد نیاز برای آنتن آرایه انعکاسی را بدست آورد. تغذیه این آنتن در مرکز بوده و با فاصله ۲۱۰mm از صفحه آنتن قرار دارد. به این ترتیب d_i برای هر عنصر محاسبه میشود. همچنین جهت پرتو الگوی تشعشعی آنتن در $0^\circ =$ تنظیم شده است. با جایگذاری این مقادیر در رابطه ۱ توزیع فاز مورد نیاز بر حسب (x_i, y_i) مطابق شکل ۴ می شود.



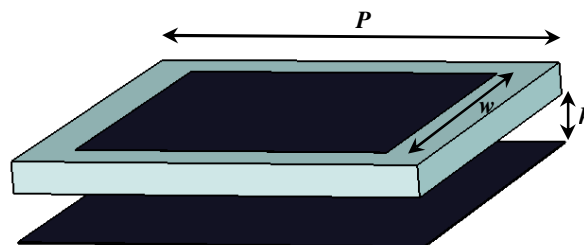
شکل ۳: نمودار فاز بر حسب ابعاد پچ مربعی در فرکانس ۹/۵ GHz.

در شکل ۴ توزیع فاز به ازای 27×27 عنصر مشخص شده است. تعداد عناصر این مقاله با عناصر [۸] یکسان در نظر گرفته شده است تا قابلیت مقایسه بین دو کار وجود داشته باشد. نقطه سفید رنگ در مرکز توزیع فاز، نشانی است که محل قرارگیری تغذیه را نشان می دهد.

است. بعد از اینکه مقدار φ_R از رابطه (۱) بدست آمد، لازم است تا این فاز را با استفاده از پچ ها تأمین کنیم.

ملاحظه کردیم که در رابطه ۱ اثری از پارامترهای فیزیکی عنصر نیست. در واقع از خروجی رابطه ۱ مشخص می شود که روی یک صفحه با ابعاد مشخص (صفحه آنتن آرایه انعکاسی) چه الگوی فازی لازم است ایجاد شود تا یک آنتن آرایه انعکاسی تحقق یابد اما فراهم آوردن این توزیع فاز برعهده پارامترهای فیزیکی عنصر قرار دارد. پارامترهای فیزیکی عنصر در حالت کلی عبارتند از: ضریب گذردهی وضخامت زیرلایه، اندازه سلول واحد یا همان دوره تناوب سلول و عرض پچ. در طراحی این آنتن زیرلایه به صورت پیش فرض در نظر گرفته شده است و سایر پارامترها با توجه به آن تنظیم شدند. دوره تناوب سلول با توجه به فرکانس کاری انتخاب می شود. به این ترتیب که با استفاده از شبیه سازی سلول واحد، اندازه ای از سلول انتخاب می شود که به ازای آن، محدوده فاز در فرکانس کاری بیشینه باشد. عرض پچ رابطه معکوس با فاز دارد و با افزایش عرض پچ فاز بازگشتی کاهش می یابد. با استفاده از همین تغییرات فاز بر حسب عرض پچ، آرایه انعکاسی با توزیع فاز مطلوب بدست خواهد آمد.

مطابق شکل ۲ در این مقاله یک آنتن آرایه انعکاسی در ساده ترین حالت ممکن، با استفاده از پچ مربعی، طراحی شده است. هر یک از این پچ ها نیز روی یک سلول واحد مربعی قرار گرفته اند. ضریب ثابت دی الکتریک برابر با $\epsilon_r = 3/4$ (Rogers RO4003C) بوده و ضخامت آن $0/5$ mm در نظر گرفته شده است. فرکانس کاری ۹/۵GHz انتخاب شده است و اندازه سلول واحد $6/5$ mm ($\approx \lambda/2$) می باشد.



شکل ۲: نمای کلی سلول واحد مربعی و پچ مربعی روی آن. تغییر پارامترهای w و h موجب تغییر در فاز بازگشتی هر سلول واحد می شود.

فاز ضریب بازگشت عنصر هم به عرض پچ (w) و هم به ارتفاع آن از صفحه زمین بستگی دارد. در اینجا h در یک مقدار خاص (۰/۷۵ mm) ثابت نگه داشته می شود و اثر تغییر طول ضلع پچ بر روی فاز ضریب بازگشت مورد بررسی قرار می گیرد.

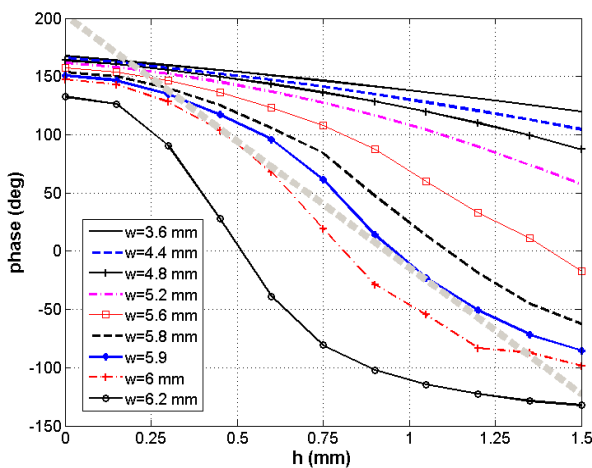
به منظور یافتن نمودار فاز بر حسب تغییر اندازه پچ، سلول واحد نشان داده شده در شکل ۲ را در شرایط مرزی متناوب قرار می دهیم. با تابش موج صفحه ای به این ساختار متناوب و در نظر گرفتن مرجع فاز روی صفحه پچ، نمودار فاز مورد نظر بدست خواهد آمد. در شکل ۳ نمودار فاز بر حسب عرض پچ در فرکانس ۹/۵GHz نشان داده شده

۲-۲- افزودن قابلیت هدایت‌گری پرتو

در طرح پیشنهادی بین زیرلایه هر عنصر و زمین آن یک فاصله هوایی (h) در نظر گرفته شده است. وجود این فاصله هوایی موجب می‌شود زمین آرایه انعکاسی چرخش به مقدار جزئی را داشته باشد. از روی تغییرات فاز بر حسب تغییر فاصله هوایی (h) میزان چرخش پرتوی آنتن قابل محاسبه است. خواهیم دید که با افزایش فاصله هوایی مقدار فاز بازگشتی کاهش می‌یابد.

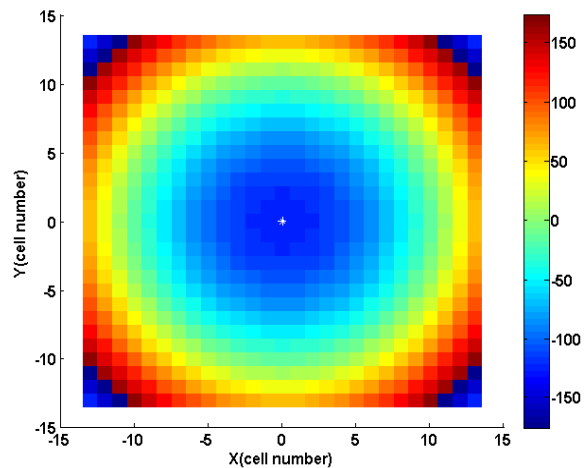
برای دستیابی به حداکثر امکان چرخش متقارن زمین، محور چرخش در وسط صفحه زمین در نظر گرفته شده است. در اثر چرخش زمین، هر عنصر با w مختلف، میزان متفاوتی فاصله هوایی خواهد داشت. وابستگی فاز برگشتی به هر دو پارامتر w و h موجب می‌شود تا مطابق با شکل ۶ به ازای هر w یک نمودار فاز- h متفاوت داشته باشیم. همین عدم وجود رفتار فازی مشابه برای تمام عناصر، موجب می‌شود تا نتوانیم تغییرات فاز در راستای کل صفحه آرایه انعکاسی را با یک نمودار واحد شبه خطی (مانند آنچه که در [۸] برای عناصر هم‌اندازه آمده است) بدست آوریم.

اگر تمامی عناصر با هم مشابه بودند و همگی از یک الگوی فاز- h متابعت می‌کردند آنگاه به آسانی اجازه داشتیم تا نتایج بدست آمده از یک سلول واحد متناوب را به مشخصه فاز کل عناصر تعمیم دهیم. حال با توجه به اینکه همه نمودارها در شکل ۶ با هم متفاوت هستند، بطور کلی نمی‌توان نمودار فاز- h را که به ازای شرایط متناوب بدست آمده است، به مشخصه فاز کل صفحه آرایه انعکاسی تعمیم داد.



شکل ۶: نمودارهای فاز بر حسب h که به ازای ابعاد مختلف پیچ (w) رسم شده‌اند. نمودار خط‌چین ضخیم طوسی رنگ تقریبی از منحنی‌هایی است که بیشترین تعداد آماری را در آرایه انعکاسی طراحی شده دارند.

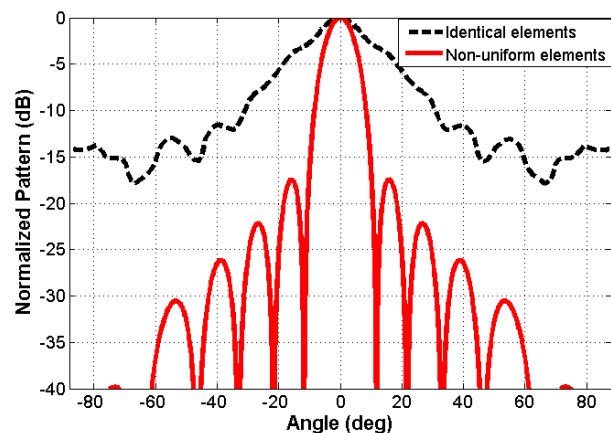
راه حل پیشنهادی ما برای حل این مشکل آن است که آرایه انعکاسی طراحی کنیم که عناصر تاثیرگذار آن تقریباً هم‌اندازه باشند تا



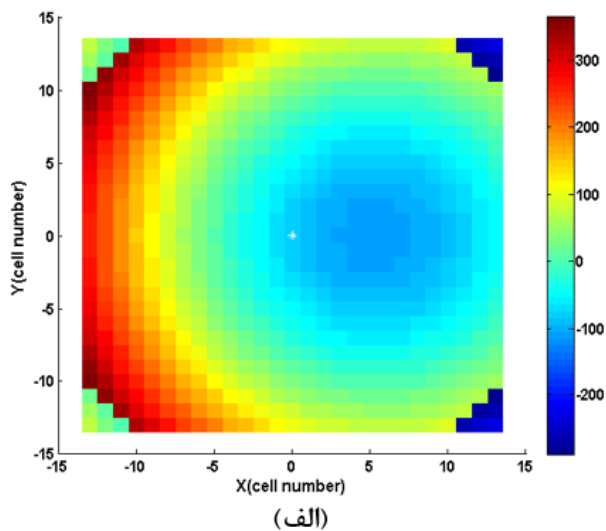
شکل ۴: الگوی توزیع فاز مورد نیاز روی صفحه آنتن آرایه انعکاسی. نقطه سفید در مرکز شکل محل تغذیه را نشان می‌دهد.

حال با توجه به این توزیع فاز و با کمک کدنویسی در نرم‌افزار MATLAB می‌توان الگوی تشعشی آرایه انعکاسی مورد نظر را بدست آورد. برای به دست آوردن الگو از روش تئوری آرایه‌ها استفاده شده است [۱۲]. شکل ۵، الگوی میدان راه دور ناشی از توزیع فاز شکل ۴ را نشان می‌دهد.

در شکل ۵ پرتو توان آرایه انعکاسی غیریکنواخت پیشنهادی، با آرایه انعکاسی که همه عناصر آن هم‌اندازه هستند [۸]، مقایسه شده است. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد در طرح جدید پهنای پرتو توان 10 dB -آنتن، حدود 48° بهبود یافته است و سطح گلبرگ جانبی آرایه انعکاسی غیریکنواخت به 18 dB -رسیده است. بنابراین به یک آنتن آرایه انعکاسی با زمین متحرک دست یافتیم که در حالت اولیه بسیار کاربردی‌تر از آنچه در [۸] ارائه شده است، می‌باشد. در قسمت بعد الگوی تشعشی آنتن طراحی شده، به ازای چرخش زمین ساختار بررسی خواهد شد.



شکل ۵: مقایسه الگوی میدان دور آنتن آرایه انعکاسی طراحی شده با آنتنی با آرایه‌های مشابه بر حسب زاویه.

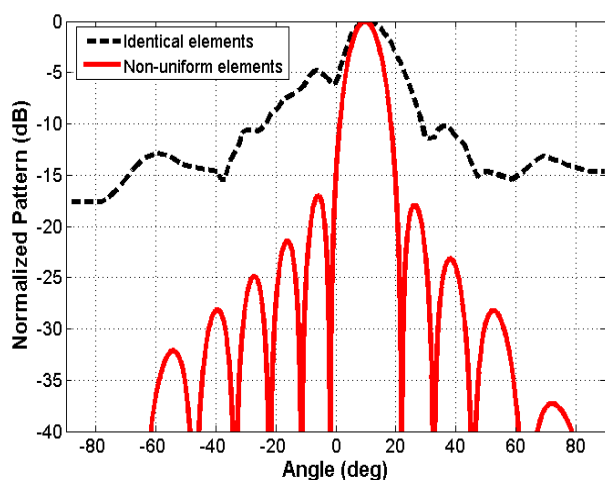


شکل ۷: الف) الگوی توزیع فاز یک آنتن آرایه انعکاسی که زمین آن چرخیده است. ب) نمای کلی چرخش زمین یک آنتن آرایه انعکاسی.

الگوی ناشی از این توزیع فاز در شکل ۸ آورده شده است که نشان می‌دهد الگو در حدود 10° چرخیده است. این میزان چرخش با توجه به شیب نمودار فاز- h و همچنین تئوری چرخش پرتوی آرایه‌ها در رابطه (۴) کاملاً قابل انتظار بود [۸].

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{D}\right) = 10^\circ \quad (4)$$

که در آن θ زاویه انحراف پرتو از محور عمود بر آنتن، D ابعاد کل صفحه آرایه انعکاسی و λ طول موج در فرکانس کاری است.



بتوان با تقریب خوبی منحنی‌های فاز- h همه عناصر موجود را مشابه دانست. به عبارت دیگر باید طراحی طوری انجام گیرد که با تغییر اندک w ، تغییر فاز قابل توجهی در فاز برگشتی رخ دهد. از این طریق، هم می‌توان به توزیع فاز مطلوب رسید و هم منحنی فاز- h را در محدوده‌ای نگاه داشت که یک منحنی واحد نماینده همه منحنی‌های فاز- h باشد و در عین حال شیب نسبتاً خطی نیز داشته باشد. این شرایط مطابق با شکل ۶ به ازای عرض پیچ‌هایی که در محدوده $5/8\text{mm}$ تا $6/2\text{mm}$ قرار دارند، محقق می‌شود. از طرفی در شکل ۴ می‌بینیم توزیع فاز حاصل، با استفاده از فرکانس کاری و فاصله تغذیه تا عناصر، به‌گونه‌ای تنظیم شده است که غالب عناصر در محدوده فاز 100° تا 80° درجه قرار گرفته‌اند. این محدوده فاز نیز تقریباً متنظر با $5/8 < w < 6/2\text{mm}$ می‌باشد (مطابق با شکل ۳). از طرفی در حالت کلی برای یک آرایه انعکاسی رابطه (۲) برقرار است.

$$\varphi_{R_i} = k_0(R_i - \vec{r}_i \cdot \hat{r}_0) + \varphi_0 \quad (2)$$

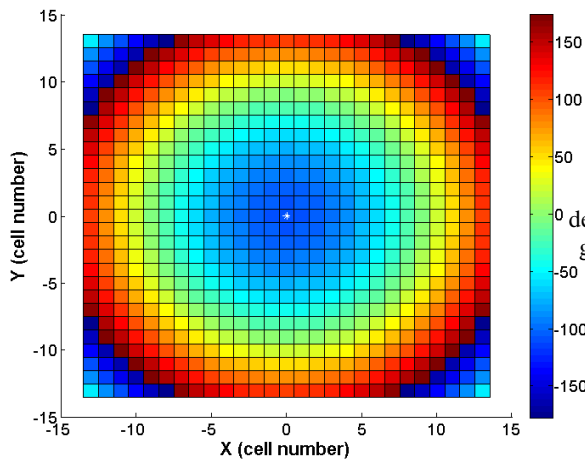
که در آن k_0 ثابت انتشار فضای آزاد، R_i فاصله آنتن تغذیه تا عنصر i ام، \vec{r}_i محل بردار عنصر i ام از مبدأ و \hat{r}_0 جهت پرتو اصلی آنتن آرایه انعکاسی است. φ_0 نیز فازی ثابت است که تأثیری بر الگوی تشعشعی ندارد و تنها به ما اجازه می‌دهد که به جای فاز مطلق از فاز نسبی عناصر استفاده کنیم.

بنابراین با توجه به چرخش زمین و رابطه (۲)، برای یک آرایه انعکاسی که زمین آن قابلیت چرخش داشته باشد، رابطه (۳) برقرار خواهد بود.

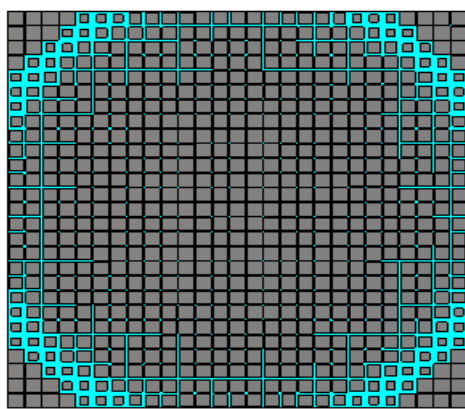
$$\varphi_{R_i}^* = k_0(R_i - \vec{r}_i \cdot \hat{r}_0) + \varphi_0 + \psi_i \quad (3)$$

که در این رابطه ψ_i فازی است که با چرخش زمین بر روی عنصر i ام ایجاد می‌شود. به عنوان مثالی از ψ_i می‌توان به هر یک از منحنی‌های شکل ۶ اشاره کرد. حال اگر توزیع فاز جدید $\varphi_{R_i}^*$ را به سطح آرایه انعکاسی اعمال کرده و الگوی میدان راه دور آن را رسم کنیم خواهیم دید که پرتو آنتن آرایه انعکاسی متناسب با شیب نمودار ψ_i خواهد چرخید.

در صورتی که خط‌چین ضخیم طوسی رنگ در شکل ۶، به عنوان نماینده‌ای تقریبی از رفتار فازی عناصر موجود در آرایه انعکاسی ($5/8 < w < 6/2\text{mm}$) در نظر گرفته شود، آنگاه می‌توان آن را به عنوان ψ_i در رابطه (۳) قرار داد و توزیع فاز آرایه انعکاسی زمین چرخیده را بدست آورد. این توزیع فاز در شکل ۷ الف) نشان داده شده است و نمای کلی چرخش زمین در زیر ساختار آرایه انعکاسی نیز در شکل ۷ ب) قابل مشاهده است.



شکل ۹: الگوی توزیع فاز آرایه انعکاسی غیریکنواخت با $Z_f = 180 \text{ mm}$



شکل ۱۰: آرایه انعکاسی پیاده‌سازی شده بر روی دی‌الکتریک در نرم‌افزار شبیه‌ساز تمام موج.

همان‌طور که در بخش قبل نشان داده شد و در شکل ۱۰ نیز مشخص است، غالب عناصر تشکیل دهنده آرایه انعکاسی غیریکنواخت پیشنهادی اندازه‌هایی نزدیک به هم دارند.

برای تغذیه این ساختار یک آنتن شیپوری استاندارد باند X روبروی صفحه آرایه انعکاسی به نحوی قرار داده شده است که مرکز فاز آنتن تا مرکز آرایه انعکاسی 180 mm فاصله داشته باشد. در شکل ۱۱ الگوی میدان دور حاصل از این شبیه‌سازی تمام موج با الگویی که به روش تئوری آرایه‌ها بدست آمده، مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود پهنای پرتو اصلی در هر دو روش با هم مطابقت داشته و این نشان می‌دهد که باریک شدن پهنای پرتو اصلی آنتن محقق شده است. در این حالت پهنای پرتو توان -10 dB به حدود 17° رسیده است. با مقایسه گلبرگ‌های جانبی در شکل ۱۱ درمی‌یابیم که میان روش تئوری آرایه و روش شبیه‌سازی تمام موج 3 dB اختلاف در سطح گلبرگ جانبی اول وجود دارد. با توجه به اینکه در روش تئوری آرایه، عناصر آرایه انعکاسی به صورت متناوب و تعداد آن‌ها بی‌نهایت در نظر گرفته می‌شود این اختلاف چندان دور از انتظار نیست.

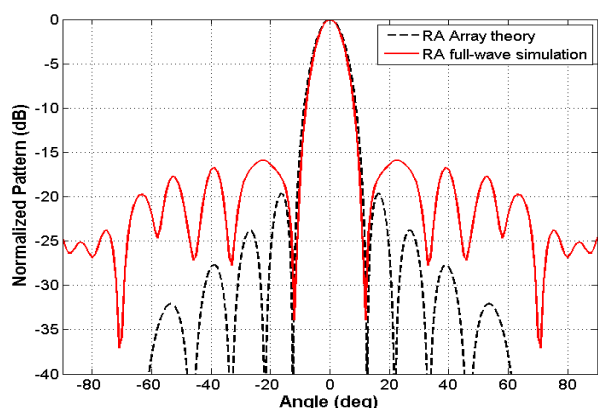
شکل ۸: مقایسه الگوی میدان دور آنتن آرایه انعکاسی طراحی شده و آنتنی با آرایه‌های مشابه بر حسب زاویه در حالتی که زمین ساختار در حدود $0/5^\circ$ چرخیده است.

در شکل ۸ الگوی تشعشعی حاصل از توزیع فاز یک آرایه انعکاسی غیریکنواخت با الگوی تشعشعی آرایه با عناصر هم‌اندازه مقایسه شده است. هر دو الگو از روی توزیع فازهای خطی ایده‌آل محاسبه شده‌اند، از این رو سطح گلبرگ‌های جانبی بسیار پایین می‌باشد. در هر دو منحنی شکل ۸ مشاهده می‌شود که با چرخش زمین در هر دو ساختار، الگوی میدان تقریباً به یک اندازه تغییر جهت می‌دهد. با این حال در آرایه انعکاسی غیریکنواخت پیشنهادی، هم پهنای پرتو و هم سطح گلبرگ جانبی مطلوب‌تر از الگوی آرایه با عناصر مشابه است.

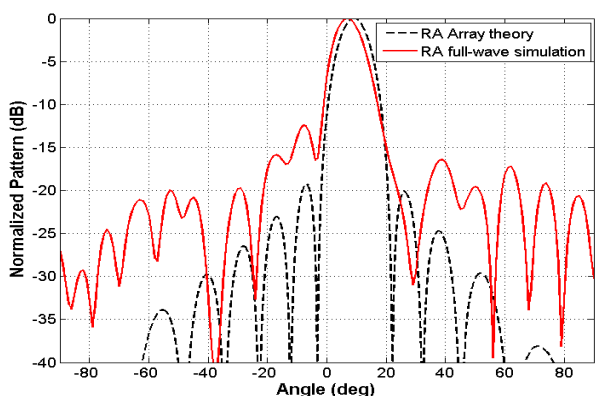
تا اینجا با استفاده از روش تئوری آرایه‌ها، الگوی میدان دور آنتن آرایه انعکاسی غیریکنواخت محاسبه شده و قابلیت هدایت‌گری پرتو آن نشان داده شده است. در تمامی این طراحی‌ها فاصله عمودی تغذیه از صفحه آرایه انعکاسی (Z_f) 210 mm در نظر گرفته شده است تا نتایج بدست آمده قابلیت مقایسه با نتایج [۸] را داشته باشند. در آرایه انعکاسی‌های غیریکنواخت این زیاد بودن Z_f موجب افزایش سطح گلبرگ‌های جانبی و افزایش پهنای پرتو می‌شود. از همین رو در قسمت بعد ایده مطرح شده در این بخش را روی آرایه انعکاسی غیریکنواختی شبیه‌سازی کردیم که به ازای $Z_f = 180 \text{ mm}$ طراحی شده است. این کار موجب کاهش بیشتر سطح گلبرگ جانبی و طراحی مطلوب‌تری شده است.

۳- شبیه‌سازی تمام موج

در این بخش به منظور اعتباربخشی به ایده مطرح شده، یک آنتن آرایه انعکاسی غیریکنواخت در نرم‌افزار تمام موج شبیه‌سازی شده و نتایج الگوی آنتن در این محیط نیز بدست آمده است. برای اینکار ابتدا فاصله عمودی تغذیه تا صفحه آرایه انعکاسی $Z_f = 180 \text{ mm}$ در نظر گرفته شده و با استفاده از نمودار شکل ۳، توزیع فاز هر یک از سلول‌ها با اندازه پچ مختص به خود پیاده‌سازی شده است. این طرح از 27×27 سلول واحد تشکیل شده است که فاصله بین مراکز دو سلول مجاور $6/5 \text{ mm}$ می‌باشد. جنس زیر لایه را Rogers RO4003C انتخاب کرده و ضخامت آن $0/5 \text{ mm}$ در نظر گرفته شده است. تمامی شبیه‌سازی‌های تمام موج در این مقاله با استفاده از روش عددی FIT⁴ در نرم‌افزار CST Microwave Studio انجام شده است. شکل ۹ توزیع فاز آرایه انعکاسی با $Z_f = 180 \text{ mm}$ را نشان می‌دهد که در آن به هر سلول فازی اختصاص داده شده است. فاز هر یک از این سلول‌ها مطابق شکل ۳ متناظر با اندازه‌ای از پچ است. به این ترتیب عرض پچ تمامی عناصر موجود در آرایه انعکاسی مشخص می‌شود که در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۱: مقایسه الگوی میدانی دور آنتن آرایه انعکاسی حاصل از روش عددی تئوری آرایه‌ها با نتایج شبیه‌سازی تمام موج.



شکل ۱۲: مقایسه الگوی میدانی دور آنتن آرایه انعکاسی حاصل از روش تئوری آرایه‌ها با نتایج شبیه‌سازی تمام موج، در حالتی که زمین ساختار در حدود 0.5° چرخیده است.

جدول ۱: مقایسه کارهای انجام شده در زمینه چرخش پرتو به روش غیرفعال

مقدار جابجایی مکانیکی	سطح گلبیگ جانبی (dB)	چرخش پرتو (درجه)	پهنای پرتوی نیم‌توان (درجه)	
$\lambda.05/0$	-۱۱/۵	$10 \pm$	۲۴	[۸]
$\lambda.01/0$	-۱۳	$8 \pm$	۱۰	[۱۴]
$\lambda.05/0$	-۱۶	$8 \pm$	۱۰	کار حاضر

۴- نتیجه

در این مقاله آنتن آرایه انعکاسی غیرفعال با قابلیت هدایت پرتو در باند X ارائه شده است. به کارگیری عناصر غیریکنواخت در این آنتن موجب شده است تا پهنای پرتو توان 10 dB به حدود 17° رسیده و گلبیگ جانبی اول آن تا 18 dB کاهش یابد که در مقایسه با آرایه انعکاسی با عناصر یکنواخت بهبود قابل ملاحظه‌ای یافته است. طراحی آنتن پیشنهادی با در نظر گرفتن فاصله هوایی که در میان زیرلایه و زمین

در مرحله بعد زمین آنتن آرایه انعکاسی کمتر از $0.5^\circ (\lambda 05/0)$ چرخانده و شبیه‌سازی مجدداً انجام شده است. مقایسه الگوی حاصل از این شبیه‌سازی با نتیجه حاصل از تئوری آرایه، در شکل ۱۲، نشان می‌دهد که پهنای پرتو با روش تئوری به درستی مطابقت داشته و پهنای توان 10 dB آن در حدود 17° است، اما چرخش پرتو با حدود 2° اختلاف از حالت ایده‌آل به 8° رسیده است.

در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که میان سطح گلبیگ جانبی اول در روش ایده‌آل تئوری آرایه و شبیه‌سازی تمام موج $8/6 \text{ dB}$ اختلاف وجود دارد. با دور شدن الگو از محور عمود بر آنتن، به‌طور کل انتظار داریم که سطح گلبیگ جانبی افزایش قابل توجهی داشته باشد [۱۳]. به علت ایده‌آل بودن شرایط در حالت تئوری این افزایش سطح گلبیگ جانبی خود را در شکل ۸ نشان نداد. از سوی دیگر غیرخطی بودن ذاتی تغییرات فاز عناصر و همچنین استفاده از آنتن شیپوری واقعی در شبیه‌سازی، برخلاف روش تئوری آرایه که فاز را خطی و آنتن شیپوری را ایده‌آل فرض می‌کردیم، همگی موجب شده‌اند تا افزایش سطح گلبیگ جانبی در شبیه‌سازی تمام موج کاملاً محسوس باشد.

در ادامه دستاوردهای کار حاضر با دو نمونه از کارهای مشابه در زمینه چرخش پرتو به روش غیرفعال مقایسه و در جدول ۱ نشان داده شده است. در این مقایسه نتایج مربوط به کار حاضر و [۸] از طریق شبیه‌سازی تمام موج بدست آمده است. همچنین از آنجا که در [۱۴] تنها نتایج اندازه‌گیری عملی آنتن گزارش شده است، همین مقادیر عملی در جدول ۱ آورده شده است. شاخص‌های پهنای پرتوی نیم‌توان و سطح گلبیگ جانبی در جدول ۱ مربوط به حالتی است که چرخش پرتو صورت نگرفته است.

مقایسه انجام شده در جدول ۱ نشان می‌دهد که وضعیت پهنای پرتوی نیم‌توان و سطح گلبیگ جانبی کار حاضر نسبت به [۸] به ترتیب 14° و $75/4 \text{ dB}$ بهبود یافته است و چرخش پرتو 2° کم شده است. همچنین این مقایسه نشان می‌دهد که سطح گلبیگ جانبی کار حاضر نسبت به [۱۴] 3 dB کاهش یافته است اما در کار حاضر جابجایی مکانیکی بیشتری نسبت به [۱۴] انجام شده است. در اینجا لازم است خاطر نشان شویم که شباهت‌های میان کار حاضر و [۸] به مراتب بیشتر از [۱۴] است، زیرا در [۱۴] زمین ساختار چرخش ندارد بلکه دو صفحه متناوب بر روی هم به‌صورت افقی می‌لغزند که این حرکت مکانیکی دشوارتر از چرخش زمین است.

مراجع

- [1] علی اکبر دسترنج، «آنتن حلزونی ارشمیدسی چهاربازویی در باند فرکانسی ۲ تا ۴ گیگاهرتز برای سیستم‌های ردگیری مونیپالس اهداف هوایی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۷، شماره ۳، صفحه ۱۰۲۵-۱۰۳۳، ۱۳۹۶.
- [2] ایمان مجیدی، حسین همتی و سید حسن صدیقی، «طراحی آنتن چهارتابی شکافی فشرده با قطبش دایروی برای به کارگیری در گیرنده GPS»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۶، شماره ۴، صفحه ۲۹۹-۳۰۶، ۱۳۹۶.
- [3] P. Nayeri, F. Yang and A. Z. Elsherbeni, "Beam-scanning reflectarray antennas: a technical overview and state of the art," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 57, no. 4, pp. 32-47, 2015.
- [4] S. V. Hum and J. Perruisseau-Carrier, "Reconfigurable reflectarrays and array lenses for dynamic antenna beam control: a review," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 1, pp. 183-198, 2014.
- [5] زهرا حبیبی، مرتضی کازرونی، حسین محسنی ارمکی و عماد حمیدی، «ارائه یک روش کاربردی جهت کالیبراسیون آنتن‌های آرایه فازی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۵، شماره ۴، صفحه ۷۹-۸۴، ۱۳۹۴.
- [6] E. Brookner, "Phased-array radars: past, astounding breakthroughs and future trends," *Microwave Journal*, vol. 51, no. 1, pp. 30-50, 2008.
- [7] M. E. Bialkowski and K. H. Sayidmarie, "Investigations into phase characteristics of a single-layer reflectarray employing patch or ring elements of variable size," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 56, no. 11, pp. 3366-3372, 2008.
- [8] S. M. A. Momeni Hasan Abadi, J. H. Booske and N. Behdad, "Macro-electro-mechanical systems (MEMS) based concept for microwave beam steering in reflectarray antennas," *Journal of Applied Physics*, vol. 120, no. 5, 2016.
- [9] J. Shaker, M. R. Chaharmir and J. Ethier, *Reflectarray Antennas: Analysis, Design, Fabrication, and Measurement*, Artech House, 2013.
- [10] J. Huang, *Reflectarray Antenna*, John Wiley & Sons, 2007.
- [11] A. K. Bhattacharyya, *Phased Array Antennas: Floquet Analysis, Synthesis, BFNs and Active Array Systems*, John Wiley & Sons, 2006.
- [12] A. H. Abdelrahman, F. Yang, A. Z. Elsherbeni and P. Nayeri. "Analysis and design of transmitarray antennas," *Synthesis Lectures on Antennas*, vol. 6, no. 1, pp. 1-175, 2017.
- [13] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, Third edition, John Wiley & Sons, 2005.
- [14] D. Sievenpiper, J. Schaffner, R. Loo, G. Tansonan, S. Ontiveros and Rick Harold, "A tunable impedance surface performing as a reconfigurable beam steering reflector," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 50, no. 3, pp. 384-390, 2002.

این آرایه انعکاسی انجام گرفته است، این امکان را فراهم می‌آورد تا زمین ساختار قابلیت چرخش داشته باشد. تأثیر پارامترهای اندازه عنصر و فاصله هوایی میان زیرلایه و ساختار زمین، بر فاز بازگشتی عناصر مورد بررسی قرار گرفته است و نشان داده شده که با کنترل این دو پارامتر می‌توان قابلیت هدایت پرتو را در آرایه انعکاسی غیریکنواخت تحقق بخشید. در این کار مشاهده شده که با جابجایی کمتر از 0.5λ زمین، پرتو می‌تواند در حدود $10 \pm$ تغییر جهت دهد.

با استفاده از ایده مطرح شده، یک نمونه از آنتن آرایه انعکاسی غیریکنواخت در نرم‌افزار تمام موج شبیه‌سازی شده و نتایج آن با حالت تئوری مقایسه شده است. در هر دو حالتی که زمین ساختار نچرخیده و یا 0.5λ چرخیده است، پهنای پرتو بدست آمده از روش تئوری و شبیه‌سازی بسیار نزدیک به هم می‌باشند. سطح گلبرگ جانبی اول در مقایسه بین دو روش اندکی با هم اختلاف دارد که با توجه به ساده‌سازی‌های انجام شده در روش تئوری قابل توجیه است. شبیه‌سازی تمام موج نشان داده است که برای حالتی که چرخش زمین 0° و 0.5° است سطح گلبرگ جانبی به ترتیب حدود -16dB و -13dB می‌باشد.

کوچک بودن دامنه جابجایی زمین و سبک بودن وزن آن، این امکان را فراهم می‌آورد تا این عمل با استفاده از قطعات الکترومکانیکی مانند پیژوالکتریک‌ها انجام شود. در این صورت می‌توان بالقوه جهت پرتو آنتن را با سرعت‌های بسیار بالا تغییر داد. عدم استفاده از ادوات RF در این ساختار موجب شده است که این ساختار غیرفعال باشد. از همین رو توان قابل تحمل آن بالا بوده و پیچیدگی طراحی و ساخت آن و بالتبع هزینه تمام شده بسیار کمتری نسبت به دیگر انواع آنتن‌های هدایت‌گر پرتو خواهد داشت. این مزایا موجب خواهد شد آنتن پیشنهاد شده برای بسیاری از کاربردهایی که نیاز به آرایه انعکاسی‌های مقرون به صرفه دارند، گزینه خوبی محسوب شود. با این حال، به‌منظور ارائه یک آنتن کاملاً عملی، بررسی چالش‌هایی نظیر تأثیرات قطعات الکترومکانیکی بر روی الگو، یافتن عنصر بهینه و ... ضروری به نظر می‌رسد. در طراحی آرایه انعکاسی پیشنهادی از عنصر ساده مربعی استفاده شده است. انتخاب یک عنصر با رفتار فازی بهینه می‌تواند در کارهای بعدی مورد توجه قرار گیرد. همچنین افزایش دامنه چرخش پرتو با استفاده از روش چند تکه کردن زمین [۱۴] در این کار قابل بررسی می‌باشد که این نیز به آینده موکول خواهد شد.

زیر نویس‌ها

¹ Spatial delay profile

² Feed blockage

³ Macro-Electro-Mechanical System (MAEMS)

⁴ Finite Integration Technique