

Design and Simulation of a Lightweight X-Band Transmit Phased Array Antenna Integrated with a Phase Shifter and a Proposed Beam Improvement Method to Reduce Gain Loss

Nima Beiranvand *

MSc in Electrical Engineering, Department of Field and Wave Communications, Faculty of Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran.

Mohammadreza Shahkhah

BSc in Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Tehran Branch, Tehran, Iran.

Abstract

Until now, only phased array antennas have been used for identifying targets, scanning telecommunication systems, and rotating the beam in military systems because it rotates the beam at a desired angle. As a result, no signal is detected. In this research, the simulation of the phased array antenna was carried out with mutual requirements that the total angle covered (+45, -45), half power beam width 18 degrees, angle change step 5 degrees and polarization to be linear. To do that, several elements were combined to rotate the beam in an angle and phase instead of placing all the pin diodes on a single cell and rotating the pattern as desired, which is not economical at all and it is not possible to replace the pin bar of the diodes every time. In addition, it is also very complicated in terms of construction. For this purpose, a solution called quantization of phases is used where pin diodes with two states 0 (off) and 180 (on), are placed on a single-bit unit cell in 7 x 7 dimensions, which rotate the beam as desired. Also, when the beams of the phased array scan larger angles, the gain of the main beam of the array is reduced, so at the end of the report, an instruction is included that can reduce the gain loss in the amount of beam rotation.

Keywords: electronic beam rotation, phase array antenna, phase shifter, pin diode, unit cell

Received: 01/December/2024

Accepted: 18/February/2025

eISSN: 3060-6144

ISSN: 2980-8936

طراحی و شبیه‌سازی آنتن آرایه فازی انتقالی سبک‌وزن باند X تجمیع‌یافته با شیفت‌دهنده فاز و ارائه پیشنهادی در جهت بهبود پرتو برای کاهش افت بهره

نیما بیرانوند*

کارشناسی ارشد مهندسی برق، گروه مخابرات میدان و موج، دانشکده فنی و مهندسی،
دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران.

محمدرضا شهخواه

کارشناسی مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران،
تهران، ایران.

چکیده

تا به امروز برای شناسایی اهداف، اسکن سامانه‌های مخابراتی و چرخش پرتو در سیستم‌های نظامی، تنها از آنتن‌های آرایه فاز استفاده شده است؛ به این سبب که پرتو در زاویه دلخواه را می‌چرخاند. در غیر این صورت، شاهد چرخش پرتو نبوده و پرتو در راستای عمود باقی می‌ماند. در نتیجه، سیگنالی شناسایی نمی‌شود. در این پژوهش، شبیه‌سازی آنتن آرایه فازی با نیازمندی‌های متقابل انجام شده؛ به نحوی که کل زاویه تحت پوشش $(+45, -45)$ ، پهنای پرتو نیم توان ۱۸ درجه، گام تغییر زاویه ۵ درجه و پلاریزاسیون خطی باشد. برای انجام آن، چندین المان جهت چرخیدن پرتو در زاویه و فاز با همدیگر تجمیع شدند؛ به جای اینکه تمام پین دیودها روی سلول واحد قرار داده شوند و الگو به میزان دلخواه چرخش کند که اصلاً صرفه اقتصادی ندارد و نمی‌توان هر بار پین دیودها را تعویض نمود. علاوه بر آن، از نظر ساخت نیز بسیار پیچیده است. برای این منظور از راهکاری به نام کوانتیزه کردن فازهای پین دیود با دو وضعیت 0 (خاموش) و 180° (روشن) استفاده شده که روی سلول واحد تک‌بیتی در ابعاد 7×7 قرار گرفته و پرتو به میزان دلخواه چرخیده است. همچنین، هنگامی که پرتوهای آرایه فازی زوایای بزرگ‌تری را اسکن کنند، بهره پرتو اصلی آرایه کاهش می‌یابد. بدین ترتیب، دستورالعملی در انتهای گزارش تعبیه شده که سبب کاهش افت گین در میزان چرخش پرتو می‌شود.

کلیدواژه‌ها: چرخش الکترونیکی پرتو، آنتن آرایه فاز، شیفت‌دهنده فاز، پین دیود، سلول واحد

مقدمه

رادارها برای پوشش فضای اطراف خود از دو روش مکانیکی و الکترونیکی استفاده می‌کنند. سرعت کم و محدودیت‌های مکانیکی، ازجمله معایب چرخش پرتو به‌صورت مکانیکی است. روش چرخش پرتو به‌صورت الکترونیکی، یکی از راه‌حل‌های برطرف کردن این نقص است. البته باید یادآوری کرد که استفاده از روش الکترونیکی هزینه بیشتری نسبت به روش مکانیکی دارد؛ زیرا در این روش به‌جای استفاده از اهرم مکانیکی، از شیفتهنده‌های فاز جهت چرخش پرتو استفاده شده است.

یکی از مزیت‌های چرخش پرتو به روش الکترونیکی، سرعت چرخش پرتو در شناسایی اهداف است. چرخش پرتو، قابلیت تغییر زاویه تابش و پوشش سیگنال را فراهم می‌کند. با تنظیم زاویه به‌طور مناسب، می‌توان زاویه تابش سیگنال را تغییر داد و محدوده پوشش سیگنال را تنظیم کرد. این مزیت در کاربردهایی که نیاز به تغییر پوشش سیگنال در طول زمان وجود دارد، بسیار مهم است. چرخش پرتو اجازه می‌دهد الگوی تابش پرتو تغییر کند و پرتو در زوایای مختلفی منتشر شود. چرخش الکترونیکی پرتو فقط با آنتن‌های آرایه فازی (انتقالی و بازتابنده^۱) امکان‌پذیر است.

تقاضای استفاده از آنتن‌های آرایه‌ای فازی انتقالی به دلیل توانایی در چرخش پرتو، امکان چرخش پرتو و بهبود زاویه دید، در سیستم‌های مخابراتی، رادارها و ایستگاه‌های ماهواره‌ای رو به افزایش است؛ چراکه می‌توانند چندین پرتو را به‌طور هم‌زمان با اتصال به المان‌های شیفتهنده فاز در فضا منتشر کنند.

هر چقدر تعداد المان‌های شیفتهنده فاز بیشتر شود، توان بیشتری به سیستم وارد می‌شود و باعث افزایش برد دید رادار می‌شود. همچنین، افزایش گین را به همراه دارد. شیفتهنده‌ها به دو صورت پین دیود و فریت‌ها هستند که در این مقاله از پین دیود استفاده شده است. سرعت بالای سوئیچینگ، داشتن قابلیت معکوس‌پذیری و در دسترس بودن، ازجمله مزایای پین دیودها نسبت به فریت‌ها است. همچنین در فرکانس‌های بالا، پین دیود به‌عنوان یک مقاومت کم عمل کرده و جریان را به‌سرعت و بدون ایجاد افت ولتاژ عبور می‌دهد. این مقاله روی طراحی و شبیه‌سازی آنتن آرایه فازی انتقالی مطابق با جدول ۱ متمرکز است.

جدول ۱. ویژگی‌های طرح موردنظر

| ردیف | پارامترها | مقدار |
|------|---------------------------------------|---|
| ۱ | کل زاویه تحت پوشش | (-۴۵،+۴۵) |
| ۲ | پهنای پرتو نیم توان | ۹۱۸° |
| ۳ | گام تغییر زاویه | کمتر از ۵° |
| ۴ | پلاریزاسیون | خطی |
| ۵ | تلفاف بازگشتی ^۲ (VSWR) | کمتر از ۱/۵ |
| ۶ | وزن کل (آنتن، برد کنترل و شبکه تغذیه) | ۱ کیلوگرم |
| ۷ | ابعاد | ۱۵ سانتی‌متر در ۱۵ سانتی‌متر در ۱۰ میلی‌متر |
| ۸ | توان قابل تحمل | ۱ وات |

پیشینه پژوهش

مک منمن و همکاران^۳ (۱۹۹۶) برای هدایت پرتو در رادارها از روش مکانیکی استفاده کردند. آن‌ها اشاره داشتند به دلیل محدودیت‌های موجود در این روش مکانیکی، برای سیستم‌های هدایت پرتو نمی‌توان از این روش استفاده کرد.

1. transmit array and reflect array
2. voltage standing wave ratio
3. McManamon et al.

مونتاری و همکاران^۱ (۲۰۱۰)، یک آرایه هدایت پرتو را بر روی سیستم‌های میکروالکترومکانیکال قرار دادند که با بهره‌گیری از شیفترهای تک‌بیتی، زاویه اسکن شده را نشان می‌داد. سلول ابتدایی به صورت الکترونیکی برای ارائه ۱ بیت ($180/0^\circ$ درجه) پیکربندی شده است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که هر چقدر تعداد المان‌های شیفتر دهنده فاز بیشتر شود، توان بیشتری به سیستم وارد شده و باعث افزایش گین و برد دید رادار می‌شود.

کامودا و همکاران^۲ (۲۰۱۱) تأکید داشتند که استفاده از آنتن‌هایی با آرایه بزرگ می‌تواند به بهره‌شکل‌دهی پرتو مورد نیاز و جهت‌دهی بهتر آن از طریق شیفتر دهنده‌های فاز منجر شود. یاکوبی و همکاران^۳ (۲۰۱۴) به این نتیجه رسیدند که استفاده از سیستم‌های آرایه فاز می‌تواند پرتو را حداکثر تا ۲۴ درجه بچرخاند و اگر آرایه‌های بازتابی با شیفتر دهنده‌های فاز به صورت فضایی تغذیه شوند، تلفات بسیار کمی دارند.

کلمنت و همکاران^۴ (۲۰۱۲)، یک سلول واحد با فاز تک‌بیتی ($180/0^\circ$) که توسط شیارهای U و O شبیه‌سازی شده بود، پیشنهاد کردند. آن‌ها در سال ۲۰۱۲ از یک سلول واحد تک‌بیتی با اعمال خط بایاسینگ روی پین دیود با کوانتیزاسیون فاز تک‌بیتی در فرکانس باند X استفاده کردند (۰ درجه یا ۱۸۰ درجه). پس از بررسی پژوهش آن‌ها مشخص شد که کوانتیزه کردن یک تا دو بیت منجر به کاهش بهره تا ۴ دسی‌بل شده و با افزایش بیشتر زاویه پرخش، افت گین بیشتر شده است.

آیاچ و همکاران^۵ (۲۰۱۴)، روند طراحی برای شیفتر دهنده‌های فاز در فرکانس ۱۰ گیگاهرتز را مشخص کرده و به این نتیجه رسیدند که شیفتر دهنده‌های فاز تلفات بسیار کمی دارند و همچنین، پرخش پرتو منجر به کاهش گین شده است (Alkaraki et al., 2023).

از پژوهش‌های فوق نتیجه گرفته می‌شود که نوسانات بهره در تغییر زوایای اسکن آنتن‌های آرایه فازی، یک مسئله اسای بوده که تا به امروز مورد بررسی قرار نگرفته است. در این نوع آنتن‌ها با وجود چرخش پهنای پرتو، گین به میزان بسیار زیاد افت پیدا می‌کند.

در این پژوهش سعی بر این شده که با تجمیع آنتن آرایه فازی با چند المان، چرخش پرتو با سرعت بالاتری نسبت به روش مکانیکی صورت پذیرد. از طرفی، با توجه به اینکه پهنای پرتو نیم توان با گین رابطه عکس دارند، شاهد کاهش افت زیاد گین نباشیم. به علاوه، در پایان پیشنهادی ارائه شده تا با تغییر زوایای چرخش از پین دیود بتوان منفعت بیشتری را به دست آورد.

روش شبیه‌سازی سلول واحد تک‌بیتی

سلول واحد پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده است. این سلول در یک طرف شامل یک قطعه^۶ مستطیلی $7/3$ میلی‌متر در $8/2$ میلی‌متر با یک شیار O شکل در شکل ۲ و در طرف دیگر شامل یک قطعه با همان اندازه با یک شیار U شکل در شکل ۳ است. هر دو قطعه توسط یک سوراخ^۷ فلزی که با dv در شکل ۱ مشخص است و مقدار $0/38$ میلی‌متر را داراست و در مرکز آن‌ها قرار دارد، به هم متصل می‌شوند. مطابق شکل ۱، قطعه‌ها بر روی دو زیرلایه با $\epsilon_{r,sub} = 3.55$ و $\tan \delta = 0/0027$ یکسان قرار می‌گیرند.

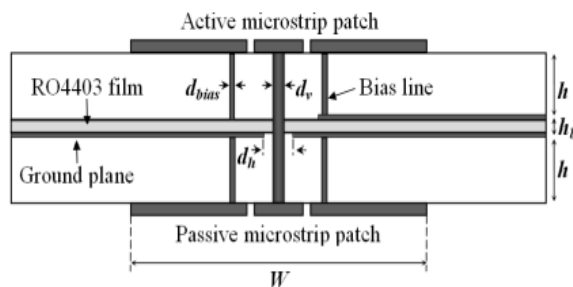
$RO4003^8, h = 1.524mm$

1. Montori et al.
2. Kamoda et al.
3. Yaacobi et al.
4. Clemente et al.
5. Ayach et al.
6. patch
7. hole
8. rogers ro4003

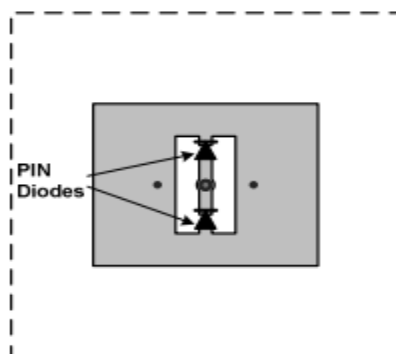
این دو زیرلایه ($\epsilon_{r, film} = 3.38$) توسط یک صفحه زمین از جنس مس با امت ۱۸ میکرومتر از هم جدا شده و توسط زیرلایه به هم پیوند داده می‌شوند.

$$RO4403, h_b = 0.09\text{mm}$$

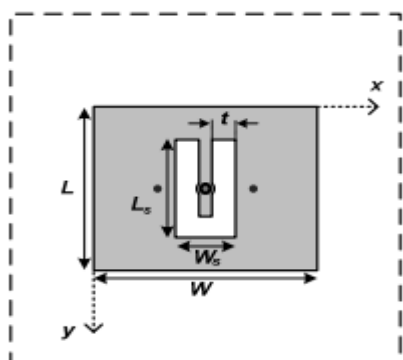
دو پین دیود با شیار O شکل مربوطه به قطعه فعال شکل ۲، مجتمع شده‌اند. این قطعه مانند قطعه غیرفعال شکل ۳ به یک خط بایاس باریک به اندازه ۰/۲۱ میلی‌متر از طریق یک اتصال عمودی^۲ به مقدار ۰/۱۵ میلی‌متر وصل می‌شود. بسته به جریان بایاس، میدان تابشی می‌تواند به میزان 0° یا 180° چرخش کند.



شکل ۱. هندسه سلول واحد (نمای کناری)



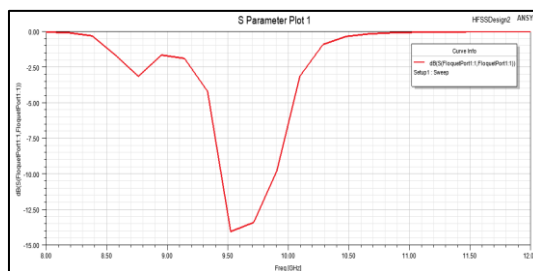
شکل ۲. قطعه فعال O شکل با دو پین دیود



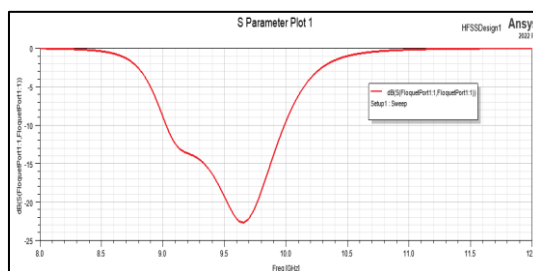
شکل ۳. قطعه غیرفعال با شیار U شکل

اگر مطابق مقاله کلمنت و همکاران (۲۰۱۲)، سلول واحد با درگاه فلوکه^۳ تحریک شود، نتایج تلفات بازگشتی و فاز آن مطابق شکل ۲ و ۳ خواهد بود.

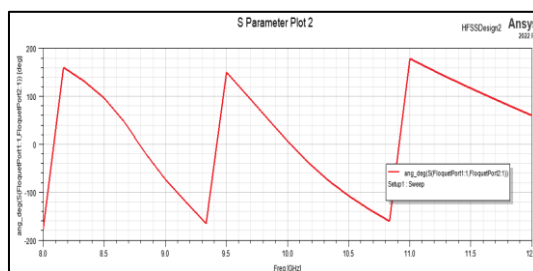
1. rogers ro4403
2. d_{bias}
3. floquet port



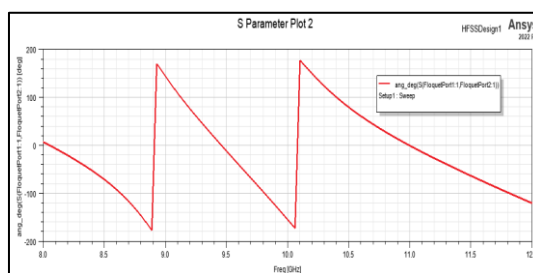
شکل ۴. تلفات بازگشتی پین دیود سلول واحد تک‌بیتی در حالت روشن



شکل ۵. تلفات بازگشتی پین دیود سلول واحد تک‌بیتی در حالت خاموش



شکل ۶. فاز پین دیود سلول واحد تک‌بیتی در حالت روشن



شکل ۷. فاز پین دیود سلول واحد تک‌بیتی در حالت خاموش

محاسبه میزان چرخش پرتو آنتن‌های آرایه‌ای

در یک آنتن آرایه‌ای، میزان چرخش یا فاصله بین عناصر از طریق رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

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

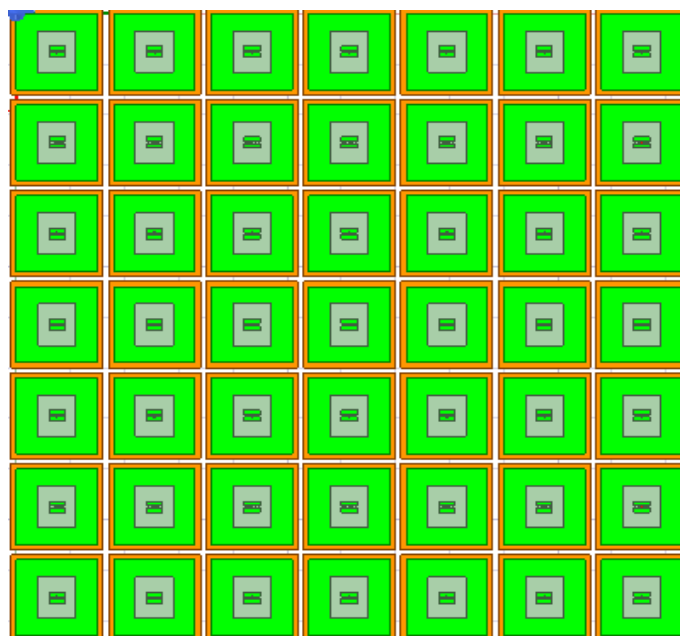
که در رابطه فوق، d فاصله بین عناصر، λ طول موج و θ میزان چرخش پرتو است. به عنوان مثال، اگر فاصله بین عناصر $23/5$ میلی‌متر و طول موج $31/57$ میلی‌متر باشد، حداکثر میزان چرخش پرتو برابر 20° است.

برای افزایش حداکثر میزان چرخش پرتو در طول موج ثابت، باید فاصله بین عناصر کاهش یابد. در مثال فوق، اگر فاصله بین عناصر ۱۸ میلی‌متر باشد، حداکثر میزان چرخش برابر 48.5° است.

آرایه آنتن

آنتن، وظیفه انتشار امواج الکترومغناطیسی در فضای آزاد را دارد. آرایه آنتن، مجموعه‌ای از تک‌عنصرها است که برای کاربرد مشخص در کنار هم قرار می‌گیرند. در این تحقیق، برای سلول واحد تک‌بیتی، آرایه آنتن طراحی شده توسط کاربر از 7×7 عنصر با فاصله ۱۸ میلی‌متر مرکز به مرکز برای چرخش پرتو تشکیل شده است. شکل ۳، نمای کلی این آرایه آنتن را در محیط شبیه‌سازی نشان می‌دهد. از نرم‌افزار HFSS برای شبیه‌سازی آرایه آنتن استفاده شده است.

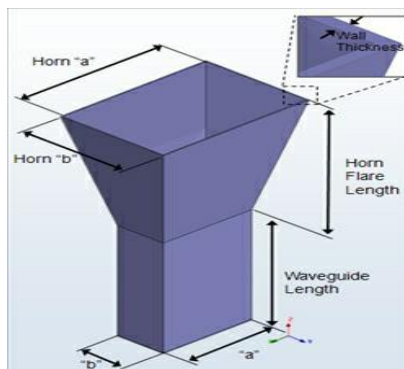
با در نظر گرفتن این آرایه آنتن برای رسیدن به هدف تحقیق، یعنی چرخش پرتو در زوایای دلخواه، در این بخش تغییرات اعمال‌شده در آرایه آنتن برای رسیدن به چرخش پرتو ارائه می‌گردد.



شکل ۸. نمایش آرایه آنتن سلول واحد تک‌بیتی

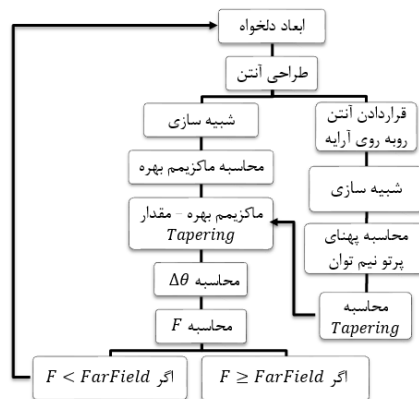
شبکه تغذیه

در این مقاله، از آنتن شیپوری هرمی برای تغذیه آرایه سلول‌های تک‌بیتی استفاده شده است (شکل ۹).



شکل ۹. مشخصات آنتن شیپوری هرمی

برای طراحی این نوع شبکه تغذیه، از شکل ۹ استفاده شده و در ادامه، روند طراحی این نوع آنتن ترسیم شده است.



شکل ۱۰. روند طراحی آنتن شیپوری هرمی

ابتدا، ابعادی را برای دهانه آنتن در نظر می‌گیریم و سپس، آنتن را طراحی می‌کنیم. در این هنگام، آنتن روبه‌روی آرایه فازی قرار گرفته، شبه‌سازی انجام شده، HPBW^۱ پهنای بین نصف توان محاسبه گردیده و مقدار گلبزرگی جانبی^۲ در سطح مطلوب Tapering به دست می‌آید. در قسمت دوم، بهره ماکزیمم آنتن را به دست می‌آوریم. در نهایت، مقدار گلبزرگی را از مقدار ماکزیمم کم می‌کنیم و $\Delta\theta$ به دست می‌آید. در نهایت، مقادیر F و D و ناحیه میدان دور^۳ از روابط (۲)، (۳) و (۴) محاسبه می‌شوند. معمولاً برای محاسبه ناحیه میدان دور آنتن از رابطه (۵) استفاده می‌شود؛ اما در این مقاله به دلیل کوچک بودن ابعاد آرایه در سلول واحد تک‌بیتی، از رابطه (۴) برای ناحیه میدان دور آنتن استفاده شده است.

$$F = \frac{A}{2 * \tan \Delta\theta} \quad (2)$$

$$D = \sqrt{(Horn_a^2 + Horn_b^2)} \quad (3)$$

$$FarField = \frac{D^2}{\lambda} \quad (4)$$

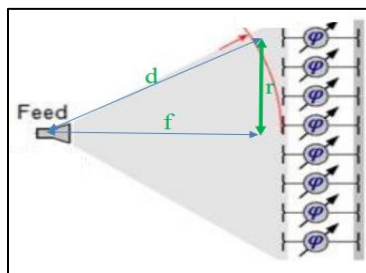
$$FarField = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (5)$$

چرخش پرتو

برای چرخش پرتو از روش مرور فازی استفاده شده است. این روش حاصل خطای فاز^۴ و فرمان فاز^۵ است (Balanis, 2016).

برای محاسبه خطای فاز، مطابق شکل ۱۱، اگر یک آنتن شیپوری هرمی روبه‌روی عنصر مرکزی آنتن آرایه‌ای انتقالی قرار گیرد، می‌توان گفت خطای فاز عنصر مرکزی آنتن آرایه‌ای انتقالی برابر صفر بوده و مقدار دقیق فاز این عنصر از معادله (۶) به دست می‌آید.

1. half power beam width
2. tapering
3. farfield
4. phase offset
5. phase shifter



شکل ۱۱. نمایی از آنتن شیپوری هرمی مقابل عناصر شیفت‌دهنده فاز

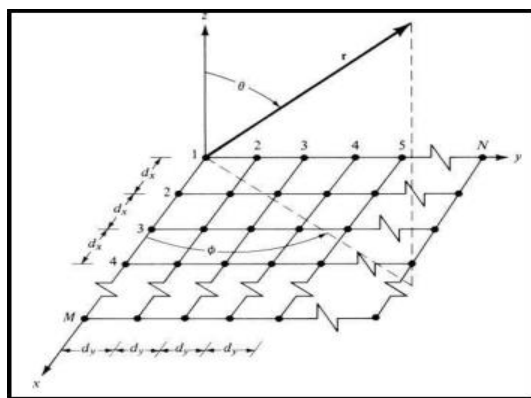
باین حال، سایر عناصر آنتن آرایه‌ای انتقالی دارای خطای فاز بوده که مقدار دقیق این خطای فاز از معادله (۶) به دست می‌آید.

$$\varphi_{center} = k_0 * F, k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (6)$$

$$\varphi_{offset} = k_0 * (\sqrt{(F.^2 + (pox.^2 + poy.^2))}) - phi1 \quad (7)$$

در معادله ۷، موقعیت مکانی^۱ هر عنصر و فاز اولیه عنصر مرکزی^۲ لحاظ شده است و برای محاسبه فرمان فاز، رابطه ۸ فرض شده است. عناصر آرایه مطابق شکل ۱۲ قرار گرفته‌اند که فاصله بین عناصر^۳ و شیفت فاز عناصر^۴ در جهت محور X و فاصله بین عناصر^۵ و شیفت فاز عناصر در جهت محور Y^۶ است.

$$\begin{aligned} \psi_x &= kd_x \sin\theta \cos\phi + \beta_x \\ \psi_y &= kd_y \sin\theta \sin\phi + \beta_y \end{aligned} \quad (8)$$



شکل ۱۲. هندسه آرایه‌های صفحه‌ای

اگر هدف این باشد که فقط یک پرتو اصلی در جهت $\theta = \theta_0$ و $\phi = \phi_0$ وجود داشته باشد، روابط فوق به صورت زیر بازنویسی می‌شوند:

$$\begin{aligned} \beta_x &= -kd_x \sin\theta_0 \cos\phi_0 \\ \beta_y &= -kd_y \sin\theta_0 \sin\phi_0 \end{aligned} \quad (9)$$

بنابراین، فرمان فاز برابر است با:

-
1. pox, poy
 2. phi1
 3. dx
 4. β_x
 5. dy
 6. β_y

$$\phi_{str} = \beta_x + \beta_y \quad (10)$$

به‌طور کلی، چرخش پرتو در روش مرور فازی برابر است با:

$$\phi_{total} = \phi_{str} - \phi_{offset} \quad (11)$$

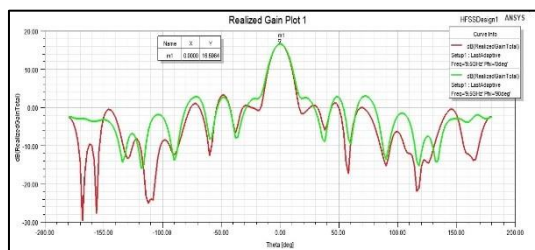
یافته‌ها

چرخش پرتو: حالت اول

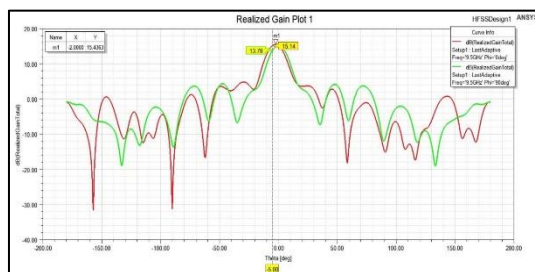
در این حالت، برای چینش عناصر از رابطه (۱۲) استفاده شده است:

$$\begin{cases} \text{if } 0^\circ < \phi_{total} < 180^\circ \Rightarrow \phi_{total} = 0^\circ \\ \text{if } 180^\circ \leq \phi_{total} \leq 360^\circ \Rightarrow \phi_{total} = 180^\circ \end{cases} \quad (12)$$

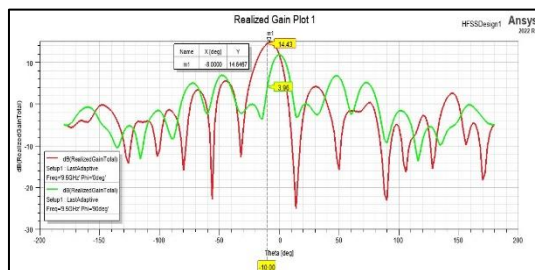
در این حالت، خروجی‌ها مطابق شکل‌های ۱۳ تا ۱۷ هستند.



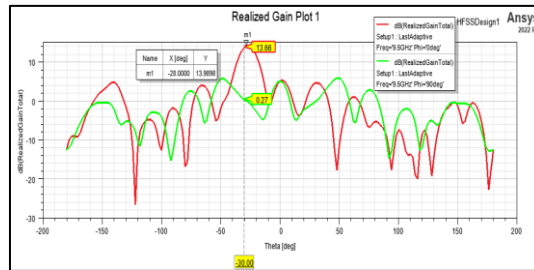
شکل ۱۳. نتایج چرخش پرتو در $\theta_{str} = 0^\circ$ و $\phi_{str} = 0^\circ$ حالت اول



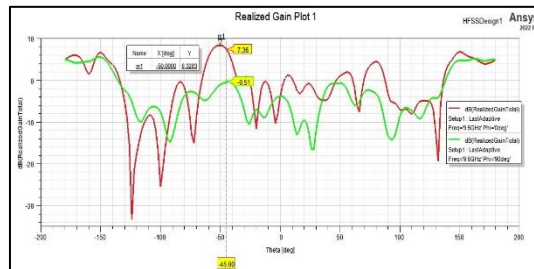
شکل ۱۴. نتایج چرخش پرتو در $\theta_{str} = -5^\circ$ و $\phi_{str} = 0^\circ$ حالت اول



شکل ۱۵. نتایج چرخش پرتو در $\theta_{str} = -10^\circ$ و $\phi_{str} = 0^\circ$ حالت اول



شکل ۱۶. نتایج چرخش پرتو در $\theta_{str} = -30^\circ$ و $\phi_{str} = 0^\circ$ حالت اول



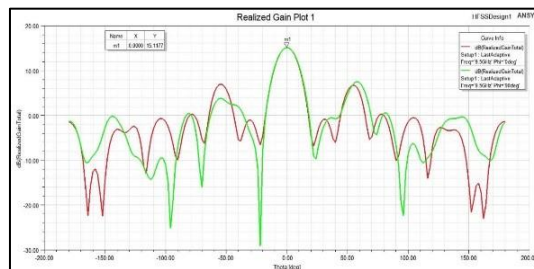
شکل ۱۷. نتایج چرخش پرتو در $\theta_{str} = -45^\circ$ و $\phi_{str} = 0^\circ$ حالت اول

چرخش پرتو: حالت دوم

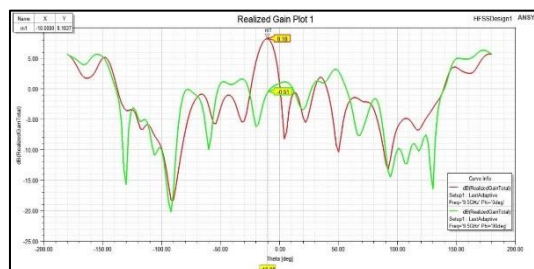
در این حالت، برای چینش عناصر از رابطه (۱۳) استفاده شده است.

$$\begin{cases} \text{if } 0^\circ \leq \phi_{total} < 90^\circ \Rightarrow \phi_{total} = 0^\circ \\ \text{if } 90^\circ \leq \phi_{total} \leq 270^\circ \Rightarrow \phi_{total} = 180^\circ \\ \text{if } 270^\circ < \phi_{total} \leq 360^\circ \Rightarrow \phi_{total} = 0^\circ \end{cases} \quad (13)$$

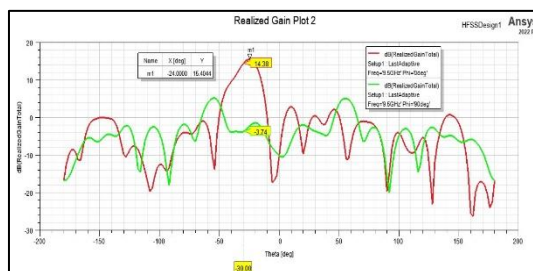
در این حالت، خروجی‌ها مطابق شکل‌های ۱۸ تا ۲۱ هستند.



شکل ۱۸. نتایج چرخش پرتو در $\theta_{str} = 0^\circ$ و $\phi_{str} = 0^\circ$ حالت دوم



شکل ۱۹. نتایج چرخش پرتو در $\theta_{str} = -10^\circ$ و $\phi_{str} = 0^\circ$ حالت دوم



شکل ۲۰. نتایج چرخش پرتو در $\theta_{str} = -30^\circ$ و $\varphi_{str} = 0^\circ$ حالت دوم



شکل ۲۱. نتایج چرخش پرتو در $\theta_{str} = -45^\circ$ و $\varphi_{str} = 0^\circ$ حالت دوم

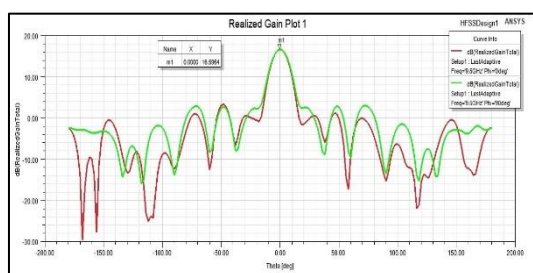
چرخش پرتو: حالت سوم (پیشنهادی)

در این حالت، برای چینش عناصر از رابطه‌های زیر استفاده شده است:

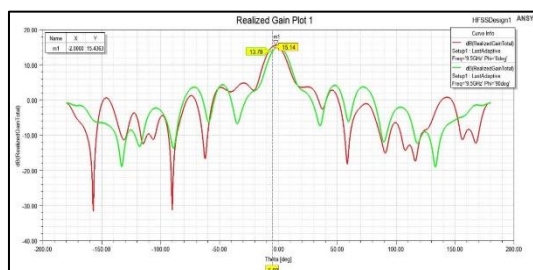
$$\text{for } \begin{cases} 0^\circ \leq \theta_{str} < 30^\circ \\ 0^\circ \leq \varphi_{str} < 30^\circ \end{cases} \begin{cases} \text{if } 0^\circ < \phi_{total} < 180^\circ \Rightarrow \phi_{total} = 0^\circ \\ \text{if } 180^\circ \leq \phi_{total} \leq 360^\circ \Rightarrow \phi_{total} = 180^\circ \end{cases}$$

$$\text{for } \begin{cases} 30^\circ \leq \theta_{str} \leq 45^\circ \\ 30^\circ \leq \varphi_{str} \leq 45^\circ \end{cases} \begin{cases} \text{if } 0^\circ \leq \phi_{total} < 90^\circ \Rightarrow \phi_{total} = 0^\circ \\ \text{if } 90^\circ \leq \phi_{total} \leq 270^\circ \Rightarrow \phi_{total} = 180^\circ \\ \text{if } 270^\circ < \phi_{total} \leq 360^\circ \Rightarrow \phi_{total} = 0^\circ \end{cases}$$

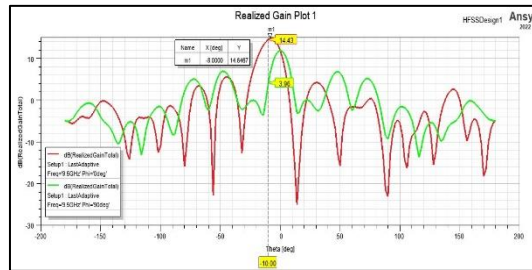
در این حالت، خروجی‌ها مطابق شکل‌های ۲۲ تا ۲۶ هستند.



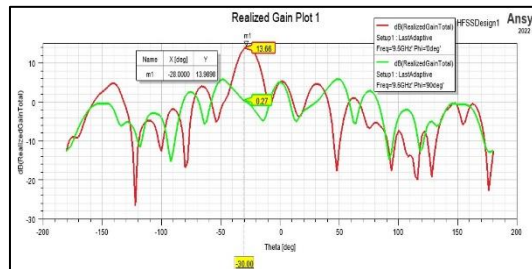
شکل ۲۲. نتایج چرخش پرتو در $\theta_{str} = 0^\circ$ و $\varphi_{str} = 0^\circ$ حالت سوم



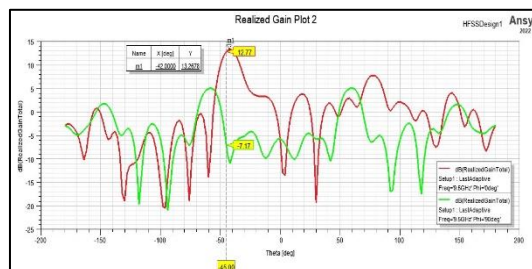
شکل ۲۳. نتایج چرخش پرتو در $\theta_{str} = -5^\circ$ و $\varphi_{str} = 0^\circ$ حالت سوم



شکل ۲۴. نتایج چرخش پرتو در $\theta_{str} = -10^\circ$ و $\varphi_{str} = 0^\circ$ حالت سوم



شکل ۲۵. نتایج چرخش پرتو در $\theta_{str} = -30^\circ$ و $\varphi_{str} = 0^\circ$ حالت سوم



شکل ۲۶. نتایج چرخش پرتو در $\theta_{str} = -45^\circ$ و $\varphi_{str} = 0^\circ$ حالت سوم

مباحث مطرح شده

نتایج مهم این پژوهش با تحقیقاتی انجام شده در گذشته مقایسه گردید که به شرح زیر است:

نتیجه اول: اگر رابطه (۱۱) برای زوایای بیشتر از 30° درجه استفاده شود، منجر به افت شدید بهره می‌شود. همچنین، اگر رابطه (۱۲) برای زوایای کمتر از 30° درجه استفاده شود، منجر به برهم خوردن تعادل بهره خواهد شد. مثلاً بهره در زاویه 30° درجه، بیشتر از مقدار بهره در زاویه 10° درجه می‌شود. با روشی که در این تحقیق استفاده شد (روش پیشنهادی)، مشکل افت شدید و برهم خوردن تعادل بهره برطرف شد.

نتیجه دوم: با استفاده از روش پیشنهادی در فرکانس مرکزی، یعنی $9/5$ گیگاهرتز، مقدار سطح گلبرگ کناری در سلول واحد تک‌بیتی برابر $17/6$ دسی‌بل می‌شود. با توجه به این مقدار سطح گلبرگ کناری، مقدار پهنای پرتو نیم توان برای سلول واحد تک‌بیتی برابر $14/59^\circ$ شده که یکی از نیازمندی‌های این مقاله به شمار می‌آید.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، سه حالت برای چرخش پرتو مورد بررسی قرار گرفت. در این بخش، نتایج حالت پیشنهادی با دو حالت دیگر مقایسه شده و نتیجه مقایسه در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. نتایج حالت پیشنهادی با دو حالت دیگر

| مقدار بهره | حالت | اول | دوم | سوم (پیشنهادی) |
|-------------------------------|------|-----------|-----------|----------------|
| 0° | | $16.5dB$ | $15.1dB$ | $16.5dB$ |
| $\pm 10^\circ$ | | $14.43dB$ | $8.18dB$ | $14.43dB$ |
| $\pm 30^\circ$ | | $13.66dB$ | $14.38dB$ | $13.66dB$ |
| $\pm 45^\circ$ | | $7.36dB$ | $12.77dB$ | $12.77dB$ |
| میزان افت بهره در زوایای چرخش | | $9.14dB$ | $6.92dB$ | $3.73dB$ |

منابع

- Alkaraki, S., Lin, Q. W., Borja, A. L., Wang, Z., Wong, H., Tang, S., Wang, Y., & Kelly, J. R. (2023). 10-GHz low-loss liquid metal SIW phase shifter for phased array antennas. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 71(11), 5045-5059.
- Ayach, O. El, Rajagopal, S., Abu-Surra, S., Pi, Z., & Heath, R. W. (2014). spatially sparse precoding in millimeter wave MIMO systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 13(3), 1499-1513.
- Balanis, C. A. (2016). *Antenna theory: Analysis and design*. John Wiley & Sons.
- Clemente, A., Dussopt, L., Sauleau, R., Potier, P., & Pouliguen, P. (2012). 1-Bit Reconfigurable Unit Cell Based on PIN Diodes for Transmit-Array Applications in X-Band. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 60(5), 2260-2269.
- Kamoda, H., Iwasaki, T., Tsumochi, J., Kuki, T., & Hashimoto, O. (2011). 60-GHz electronically reconfigurable large reflectarray using single-bit phase shifters. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 59(7), 2524-2531.
- McManamon, P. F., Dorschner, T. A., Corkum, D. L., Friedman, L. J., Hobbs, D. S., Holz, M., Liberman, S., Nguyen, H. Q., Resler, D. P., Sharp, R. C., & Watson, E. A. (1996). Optical phased array technology. *Proceedings of the IEEE*, 84(2), 268-298.
- Montori, S., Fritsch, C., Marcaccioli, L., Gatti, R. V., Jakoby, R., & Sorrentino, R. (2010). Design and measurements of a 1-bit reconfigurable elementary cell for large electronic steerable reflectarrays. *The 40th European Microwave Conference*, 918-921.
- Yaacobi, A., Sun, J., Moresco, M., Leake, G., Coolbaugh, D., & Watts, M. R. (2014). Integrated phased array for wide-angle beam steering. *Optics Letters*, 39(15), 4575.
- Yin, L., Yang, P., Dong, T., Hu, J., & Nie, Z. (2023). A modular 2-bit subarray for large-scale phased array antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 71(11), 8648-8658.

استناد به این مقاله: بیرانوند، نیما، و شهخواه، محمدرضا. (۱۴۰۳). طراحی و شبیه‌سازی آنتن آرایه فازی انتقالی سبک‌وزن باند X تجمیع‌یافته با شیفت‌دهنده فاز و ارائه پیشنهادی در جهت بهبود پرتو برای کاهش افت بهره. فصلنامه پژوهش‌های نوین در شهر هوشمند، ۳(۲)، ۳۶-۲۳.



New Researches in The Smart City is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.