

شبکه شکل دهنده پرتو باتلر ماتریس مایکروستریپ برای تغذیه آنتن آرایه فازی با پهنای پرتو باریک در باند Ka

علیرضا دولت آبادی^۱ حامد معظمی گودرزی^۲

۱- استادیار- دانشکده فنی و مهندسی- دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی- بروجرد- ایران
alireza.dolatabady@abru.ac.ir

۲- استادیار- دانشکده فنی و مهندسی- دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی- بروجرد- ایران
moazami@abru.ac.ir

چکیده:

استفاده از طیف فرکانسی موسوم به باند Ka، کاربردهای گسترده‌ای در مخابرات ماهواره‌ای و پیاده‌سازی رادارهای مختلف دارد. همچنین، بخشی از طیف فرکانسی مورد نیاز در پیاده‌سازی شبکه‌های مخابراتی سیار نسل پنجم (5G)، منطبق بر این باند فرکانسی است. از طرفی، بسیاری از کاربردهای ذکر شده، نیازمند دستیابی به پرتو تشعشعی با قابلیت پایش دقیق در محدوده زاویه‌ای باریک است. تحقق این ویژگی به کمک آنتن‌هایی دارای پهنای پرتو باریک به دست می‌آید. آنتن‌های آرایه‌ای، در کنار فراهم نمودن بهره مورد نیاز، می‌توانند فراهم کننده چنین نیازی باشند. قابلیت تنظیم این پرتو باریک در محدوده قابل قبول از جهات مختلف، دیگر ویژگی مطلوب به شمار می‌آید که آن نیز، با به کارگیری آنتن‌های آرایه فازی امکان پذیر است. تغییر جهت بیشینه پرتو تشعشعی (کب اصلی) چنین آنتنی را می‌توان به کمک عناصر فعال تغییر دهنده فاز تغذیه آنتن‌های سازنده آرایه، مانند دیودهای پین و ادوات فریت، ایجاد نمود. با این حال، به کارگیری شبکه غیرفعال باتلر ماتریس ابزاری ساده‌تر و ارزان‌تر برای دستیابی به این هدف به شمار می‌آید. با افزایش تعداد درگاه‌های چنین عنصری برای اعمال تغذیه به آنتن‌های مورد نظر، پهنای پرتو باریک‌تری تولید می‌شود. در این مقاله، پس از مروری بر مفاهیم ساختارهای باتلر ماتریس، طرحی ساده از باتلر ماتریس 32×32 در طیف فرکانسی باند Ka بر پایه خطوط مایکرواستریپ معرفی، و نتایج شبیه‌سازی عملکرد آن ارائه می‌شود. در پایان، با اعمال موج به دو درگاه ورودی مشخص باتلر ماتریس و اتصال آن به آرایه مایکرواستریپ، پهنای پرتو $3/5$ درجه به دست می‌آید.

واژه‌های کلیدی: آنتن، آرایه فازی، باتلر ماتریس، رادار، نسل پنجم مخابرات سیار، مایکرواستریپ

DOI: 10.52547/jiaeee.19.3.11

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۲۰

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۰۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۳

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر علیرضا دولت آبادی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - بروجرد - کیلومتر سوم جاده خرم‌آباد - دانشگاه آیت الله بروجردی - دانشکده فنی و مهندسی

۱- مقدمه

می‌آید. برای شبیه‌سازی رفتار ساختارها، از نرم‌افزار کامسول استفاده می‌شود. از ویژگی‌های طرح پیشنهادی، در کنار پهنای پرتو باریک، پیاده‌سازی آن بر یک بُرد تک‌لایه و برای باند فرکانسی Ka است. پیش‌تر، تنها طرحی شماتیک و پیچیده برای برای پیاده‌سازی باتلر ماتریس از مرتبه ۳۲ ارائه شده است [۱۴]. همچنین، باتلر ماتریس با ساختاری اصلاح شده از مرتبه ۴ به‌عنوان تغذیه آنتن مارپیچی در باند Ka معرفی شده است [۱۵]. در طرحی دیگر نیز، از باتلر ماتریس برای تغذیه آرایه‌ای از آنتن‌ها با ساختاری براساس هم‌محور مستطیلی در باند Ka استفاده شده است [۱۶]. اخیراً در پژوهشی جامع، شبکه‌های مختلف شکل‌دهنده پرتو از جمله باتلر ماتریس، برای کاربرد در مخابرات سیار نسل پنجم و ششم مطالعه شده‌اند [۱۷]. براساس یافته‌های ما، تاکنون هیچ مطالعه‌ای براساس تغذیه آرایه‌هایی از مرتبه ۳۲ در باند فرکانسی Ka صورت نگرفته است.

این مقاله، شامل بخش‌های زیر است: در بخش ۲، مروری بر مبانی ساختارهای باتلر ماتریس و بخش‌های سازنده آن صورت می‌گیرد. همچنین به‌اختصار، آنتن میکرواستریپ از نوع تغذیه با خط معرفی می‌شود. در بخش ۳، نتایج شبیه‌سازی بررسی باتلر ماتریس از مرتبه 32×32 ارائه می‌شود. همچنین، الگوی تشعشعی ناشی از تغذیه یک آرایه از آنتن‌های میکرواستریپ معرفی شده در بخش ۲، پس از اعمال موج به درگاه‌های مختلف باتلر ماتریس 32×32 ارائه می‌شود. در بخش ۴ نیز، مقاله با بیان نتیجه‌گیری، پایان می‌یابد.

۲- معرفی ساختار

۲-۱- مقدمه

اصلی‌ترین کاربرد یک شبکه باتلر ماتریس، اعمال تغذیه مورد نظر به آنتن‌های تشکیل دهنده یک آرایه فازی است. این قطعه، مقادیر دامنه و فاز مطلوب را برای آرایه آنتن‌ها با هدف تشعشع در جهت مشخص، بدون تغییر در آرایش فیزیکی تغذیه آنتن‌ها و یا به‌کارگیری ادوات فعال، فراهم می‌کند. با توجه به اینکه باتلر ماتریس شامل چندین جزء ساختاری است، از آن به‌عنوان یک شبکه در متون مختلف یاد می‌شود. این ساختار کم‌تلفات با دارا بودن ویژگی جهت‌دهی^۱ پرتو، می‌تواند پرتوهایی متعام بر هم در درگاه‌های خروجی خود ایجاد کند [۱۸]. همه درگاه‌های ورودی در این ساختار از همدیگر ایزوله هستند و پس از تابش موج به هریک از آنها، این موج به طور یکنواخت بین درگاه‌های خروجی توزیع می‌شود. ضمن تحریک هر یک از درگاه‌های ورودی، اختلاف فاز درگاه‌های خروجی، به مقدار معینی تغییر می‌کند [۱۹]. بنابراین می‌توان به تعداد درگاه‌های ورودی باتلر ماتریس، پرتوهای مستقل و در جهات متفاوت تولید نمود. تعامد پرتوها در این شبکه، امکان کنترل توان هر پرتو به‌طور مستقل از دیگر پرتوها را ممکن می‌سازد.

بیشتر طراحی‌های باتلر ماتریس، بر اساس خطوط میکرواستریپ است که بستر مناسبی برای پیاده‌سازی ساختارهای صفحه‌ای در

استفاده از طیف فرکانسی موسوم به باند Ka ، کاربردهای گسترده‌ای در مخابرات ماهواره‌ای [۱] و پیاده‌سازی رادارهای مختلف، به ویژه در کاربردهای با رزولوشن بالا و برد کوتاه دارد [۲]. از سویی، افزایش تعداد متقاضیان و مشترکین شبکه‌های مخابراتی سیار، پدید آورنده نسل‌های پی در پی مخابراتی، از جمله نسل پنجم، با قابلیت نرخ انتقال بالای داده بوده است [۳]. این امر، نیاز به استفاده از باندهای فرکانسی بالاتر را برای اختصاص به مشترکین، بیش از پیش لازم می‌دارد. بخشی از طیف فرکانسی مورد نیاز برای پیاده‌سازی پیوند^۱های مخابراتی نسل پنجم منطبق بر طیف فرکانسی باند Ka است [۴]. بسیاری از کاربردهای ذکر شده، نیازمند دستیابی به پرتو تشعشعی با قابلیت پایش^۲ دقیق در محدوده زاویه‌ای باریک است. پهنای پرتو مطلوب در کنار دستیابی به بهره مناسب، با استفاده از آرایه‌ای از آنتن‌ها قابل حصول است [۵]. همچنین، باید امکان تنظیم این پرتو باریک در محدوده قابل قبولی از جهات، وجود داشته باشد. با به‌کارگیری آنتن‌های آرایه فازی، این ویژگی قابل دستیابی است [۶]. در چنین آرایه‌ای، جهت بیشینه الگوی تشعشعی، با نام بُب اصلی، به کمک تغییر فاز آنتن‌ها تغییر می‌کند. در نتیجه، پایش زاویه‌ای فضا در محدوده وسیعی ممکن می‌شود. در یک آنتن آرایه فازی، با استفاده از قطعات فعال مختلف، از جمله عناصر فریت [۷] و دیودهای پین [۸]، می‌توان جهت بیشینه پرتو تشعشعی را، به کمک تغییر در فاز تغذیه عناصر آرایه، تغییر داد [۹]. روشی مشابه، ساده‌تر و ارزان‌تر برای این مقصود، به‌کارگیری ساختارهایی غیرفعال، موسوم به باتلر ماتریس است [۱۰]. باتلر ماتریس، ساختاری هم‌پاسخ با n درگاه^۳ ورودی و n درگاه خروجی است که با کوپلاژ تغذیه به درگاه‌های ورودی، اختلاف فاز خطی و مشخص در درگاه‌های خروجی آن ایجاد می‌شود. در این ساختار، که به منزله کوپلر برای اعمال تغذیه به آنتن‌های آرایه فازی است، درگاه‌های ورودی از یکدیگر ایزوله هستند و با افزایش تعداد درگاه‌ها، دستیابی به پهنای پرتو باریک‌تر، فراهم می‌شود [۱۱].

در این مقاله، ابتدا مروری بر مفاهیم ساختارهای باتلر ماتریس، صورت می‌گیرد. در ادامه، از آنجایی که دستیابی به پهنای پرتوی باریک، مد نظر است، به طراحی و شبیه‌سازی باتلر ماتریس 32×32 پرداخته می‌شود. هدف طراحی، در طیف فرکانسی مشخص در باند Ka است که کاربردهای زیادی در پیاده‌سازی رادارهای مختلف دارد [۱۲]. این ساختار، می‌تواند به طرق گوناگون پیاده‌سازی شود که در اینجا، پیاده‌سازی آن بر یک بُرد مدار چاپی، به کمک خطوط انتقال میکرواستریپ پیشنهاد می‌شود [۱۳]. برای بررسی پهنای پرتو نهایی، باید اتصال شبکه طراحی شده به آرایه‌ای از آنتن‌ها مطالعه شود. آنتن‌های مطالعه شده در اینجا، آنتن‌هایی میکرواستریپ هستند. پس از اعمال موج به دو درگاه ورودی و مشخص باتلر ماتریس 32×32 و سپس اتصال آن به آنتن‌ها، پهنای پرتوی در حد $3/5$ درجه به دست

پیش رونده در درگاه‌های خروجی باتلر ماتریس از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۳]:

$$\text{Phase Difference} = \pm \frac{2n-1}{N} \times 180^\circ \quad (1)$$

که N ، مرتبه باتلر ماتریس (تعداد درگاه‌های ورودی-خروجی)، و n عددی است که از ۱ تا N تغییر می‌کند. پس از اتصال باتلر ماتریس به آنتن آرایه فازی، بیشینه الگوی تشعشعی در زاویه زیر مشاهده می‌شود [۲۴]:

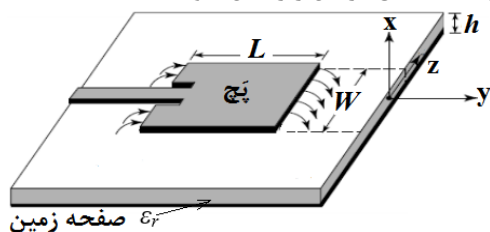
$$\theta_{\max} = -\sin^{-1} \left(\frac{\delta \lambda}{2\pi d} \right) \quad (2)$$

که در آن δ ، اختلاف فاز بین درگاه‌های خروجی باتلر ماتریس (ورودی آنتن‌ها)، و d فاصله بین عناصر آنتن‌های مجاور در آرایه است. روند طراحی باتلر ماتریس از مراتب مختلف در مراجع متعدد به تفصیل بیان شده است [۱۸ و ۲۳]. در بخش سوم از این مقاله، نتایج طراحی و شبیه‌سازی این ساختار از مرتبه ۳۲ بیان می‌شود.

۲-۴- آنتن میکرواستریپ، از نوع تغذیه با خط

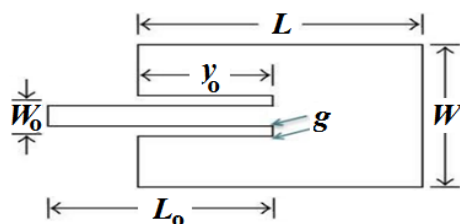
با توجه به اینکه باید باتلر ماتریس طراحی شده به آرایه‌ای از آنتن‌های میکرواستریپ وصل شود، در ادامه روند طراحی این آنتن‌ها مرور می‌شود.

یکی از انواع مرسوم و مناسب آنتن‌ها به‌ویژه برای کاربردهای صفحه‌ای و قابل پیاده‌سازی بر سطوح برد مداری و مجتمع سازی، آنتن‌های میکرواستریپ است. تغذیه این آنتن‌ها، به روش‌های مختلف صورت می‌گیرد که شامل تغذیه به کمک کابل هم‌محور، خط میکرواستریپ، تزویج از طریق روزنه، و نزدیکی با یک پچ میکرواستریپ دیگر است [۲۵]. در این مقاله، از آنتن‌هایی با تغذیه به کمک خطوط میکرواستریپ مطابق شکل (۲) استفاده می‌شود که امکان تحقق شرط تطبیق امپدانس را نیز فراهم می‌نماید. برای طراحی این آنتن، باید مطابق مراحل زیر عمل نمود.



شکل (۲): تغذیه آنتن میکرواستریپ از طریق خط میکرواستریپ

[۲۵]



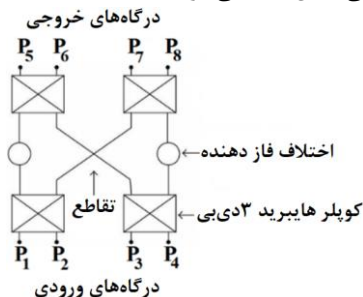
شکل (۳): بخش‌های مختلف برای طراحی آنتن میکرواستریپ [۲۵]

طیف‌های فرکانسی مختلف به‌شمار می‌رود [۱۹]. این ساختار معمولاً با تعداد درگاه 2^m ، که m یک عدد صحیح مثبت است، طراحی می‌شود. البته، تعداد درگاه‌های متفاوت با این مطلب نیز گزارش شده‌اند [۲۰ و ۲۱].

۲-۲- باتلر ماتریس و بخش‌های سازنده آن

باتلر ماتریس، ساختاری است شامل n درگاه ورودی و n درگاه خروجی که شامل چندین کوپلر هایبرید، تقاطع^۵، و نیز تغییر دهنده فاز^۶ است. روش مرسوم برای طراحی این ساختار، بر اساس فن‌آوری مدار چاپی با به‌کارگیری خطوط میکرواستریپ است.

یکی از اجزای سازنده باتلر ماتریس، کوپلر هایبریدها هستند که بسته به نوع طراحی، اختلاف فاز ۹۰ یا ۱۸۰ درجه در درگاه‌های خروجی خود ایجاد می‌کنند [۲۲]. تقاطع‌ها یکی دیگر از عناصر در طراحی ماتریس باتلرها به حساب می‌آیند که می‌توان آنها را با پشت سرهم قرار دادن دو کوپلر هایبرید ایجاد نمود. هرگاه موجی به یکی از درگاه‌های ورودی آن اعمال می‌شود، تنها به آن درگاه خروجی راه می‌یابد که در طرف مخالف نسبت به درگاه ورودی قرار دارد، در حالی که دو درگاه دیگر نسبت به آنها ایزوله هستند. به این قطعه، کوپلر ۰ دی‌بی هم گفته می‌شود [۱۸]. همچنین، بسته به مرتبه باتلر ماتریس و چگونگی پیاده‌سازی طرح آن، به چندین بخش تغییر دهنده فاز نیاز است که این بخش را نیز می‌توان به کمک خطوط میکرواستریپ ایجاد نمود. به‌غیر از اجزای یاد شده، گاهی برای تحقق شرط تطبیق امپدانس^۷ برای تغذیه آنتن‌ها، لازم است تا از خطوط دیگری نیز با طول‌های مشخص در طراحی مد نظر استفاده شود. در شکل (۱)، نمایی شماتیک از یک باتلر ماتریس کامل شامل درگاه‌های ورودی و خروجی نشان داده می‌شود.



شکل (۱): نمایی شماتیک یک باتلر ماتریس کامل [۱۷]

۲-۳- طراحی باتلر ماتریس

با اتصال خروجی‌های باتلر ماتریس به یک آرایه از آنتن‌ها، می‌توان تغذیه‌ای با دامنه برابر و اختلاف فاز ثابت بین عناصر مجاور اعمال کرد. بنابراین، پرتوهایی تولید می‌شود که جهت آن علاوه بر طول موج، به این وابسته است که به کدام درگاه ورودی تغذیه اعمال شده است. اگر تغذیه تنها به برخی از درگاه‌های ورودی اعمال شود، باید دیگر درگاه‌های ورودی، به بار ۵۰ اهم مختوم شوند. تغییر فاز

$$R_{in}(y=0) = \frac{1}{2G_1}, G_1 = \frac{1}{90} \left(\frac{w}{\lambda_0} \right)^2 \quad (10)$$

برای $w \ll \lambda_0$, $R_{in}(y=y_0) = 50\Omega$

۸- محاسبه پهنای شکاف:

پهنای شکاف (g)، می‌تواند به صورت‌های مختلف $g \approx w_0/N$ انتخاب شود که در آن N ، می‌تواند برابر با ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ... باشد [۲۵].

در پایان، از این آنتن در یک آرایه استفاده می‌شود که آرایه‌ها توسط خروجی‌های باتلر ماتریس تغذیه می‌شوند. الگوی تشعشعی کل آرایه، مطابق اصل حاصل ضرب پرتوها، محاسبه می‌شود [۲۶]:

$$E_{total} = E_s \times AF \quad (11)$$

که در آن E_s میدان تشعشعی مربوط به یکی از آنتن‌ها و AF ضریب آرایه به صورت زیر است:

$$AF = \sum_{n=1}^N a_n e^{+j(n-1)(kd \cos \theta + \beta_n)} \quad (12)$$

که در آن θ زاویه پرتو، d فاصله بین عناصر آرایه، و β_n و a_n فاز و دامنه تحریک n امین عنصر هستند.

۳- نتایج طراحی و شبیه‌سازی

۳-۱- روش شبیه‌سازی

شبیه‌سازی‌ها به کمک نرم‌افزار کامسول اجرا شده‌اند که بر اساس روش اجزای محدود عمل می‌کند [۲۷]. در محاسبات مختلف نیز از نرم‌افزار متلب استفاده شده است. پارامترهای مداری خط انتقال برای استفاده در شبیه‌سازی‌ها، توسط ابزار محاسبه‌گر خط محاسبه شده‌اند. فرکانس کار برای طرح‌های مختلف، ۴۰ گیگاهرتز انتخاب شده است.

۳-۲- زیرلایه مورد استفاده

بخش‌های مختلف تشکیل دهنده ساختار باتلر ماتریس و آنتن‌ها، بر روی زیرلایه Rogers RT/duroid 5880 پیاده‌سازی شده‌اند. پارامترهای ساختاری این زیرلایه ضریب دی‌الکتریک ۲/۲، تانژانت تلفات ۰/۰۰۰۹، و ضخامت ۳۱ میل (۰/۷۸۷ میلی‌متر) هستند. مقادیر پارامترهای مداری شامل مقاومت، رسانایی، ظرفیت و خودالقایی در واحد طول، توسط ابزار محاسبه‌گر خط به صورت Ω/m ۱۲/۴۱، nH/m ۰/۲۷۲/۹، S/m ۰، و pF/m ۱۰۷/۱ محاسبه شده‌اند.

۳-۳- باتلر ماتریس ۳۲×۳۲

مطابق طرح شماتیک شکل (۴)، بخش‌های اصلی باتلر ماتریس ۳۲×۳۲ ارائه شده، شامل ۸۰ کوپلر هایبرید ۹۰ درجه، ۲۳۲ تقاطع، ۲ اختلاف فاز دهنده ۱۶۸/۷۵ درجه، ۴ اختلاف فاز دهنده ۱۵۷/۵ درجه، ۲ اختلاف فاز دهنده ۱۴۶/۲۵ درجه، ۸ اختلاف فاز دهنده ۱۳۵ درجه، ۲ اختلاف فاز دهنده ۱۲۳/۷۵ درجه، ۴ اختلاف فاز دهنده ۱۱۲/۵ درجه، ۲ اختلاف فاز دهنده ۱۰۱/۲۵ درجه، ۱۶ اختلاف فاز دهنده ۹۰ درجه.

این روال طراحی، با در نظر گرفتن اطلاعاتی شامل ثابت دی‌الکتریک ϵ_r ، فرکانس تشدید f_r و ضخامت h است [۲۵]:

۱- محاسبه پهنای پیچ:

$$w = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{1+\epsilon_r}} \quad (3)$$

که در آن c سرعت نور در فضای آزاد است.

۲- محاسبه ثابت دی‌الکتریک موثر آنتن پیچ:

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12h}{w}}} \right) \quad (4)$$

۳- محاسبه طول اضافی بر پیچ:

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.246 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8 \right)} \quad (5)$$

که در آن c سرعت نور در فضای آزاد است.

۴- محاسبه طول واقعی پیچ:

$$L = L_{eff} - \Delta L, L_{eff} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (6)$$

۵- محاسبه پهنای پیچ تغذیه:

همان‌گونه که مشخص است، پیچ تغذیه، یک خط انتقال معمولی است، بنابراین می‌توان از روابط خط انتقال برای محاسبه پهنای تغذیه استفاده نمود [۲۶]:

$$\frac{w_0}{h} = \begin{cases} \frac{8e^A}{8e^{2A} - 2}^{**} \\ \frac{2}{\pi} \left[\frac{B - 1 - \ln(2B - 1)}{+ \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left(\ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right)} \right]^* \end{cases} \quad (7)$$

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad \text{که}$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0 \sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{نمادهای } ** \text{ و } * \text{، به ترتیب نمایان گر حالت‌های}$$

$w/h < 2$ و $w/h > 2$ هستند.

۶- محاسبه طول تغذیه:

طول الکتریکی تغذیه باید به صورت $L_0 = \lambda/2$ باشد:

$$L_0 = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (8)$$

۷- محاسبه عمق برش (y_0):

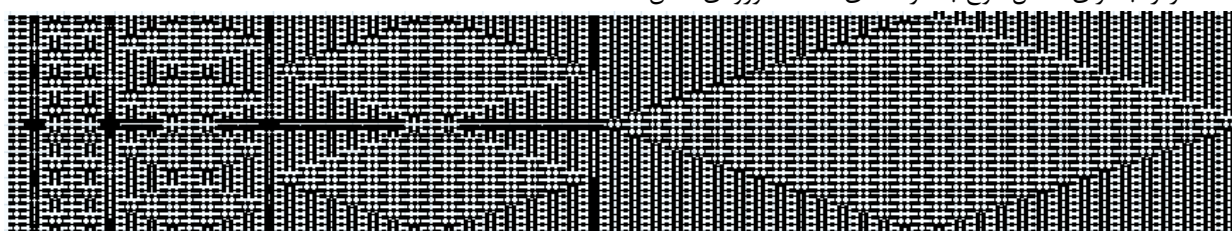
$$R_{in}(y=y_0) = R_{in}(y=0) \cos^2 \left(\frac{\pi}{L} y_0 \right) \quad (9)$$

که:

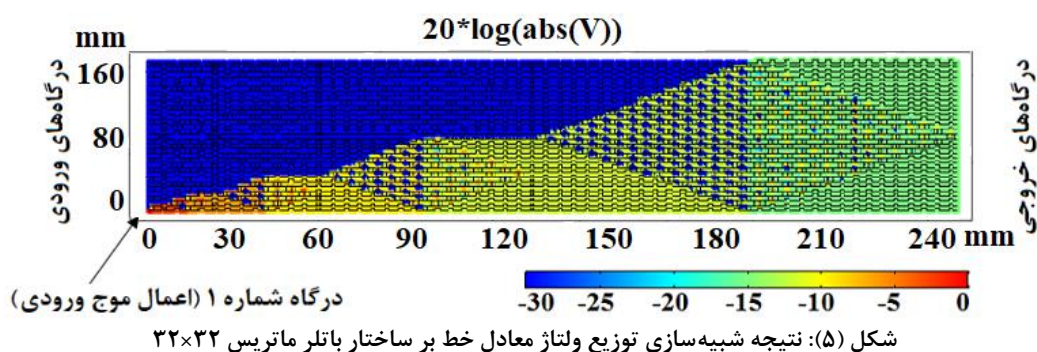
می‌دهد. از این مقادیر، در بخش ۳-۴ برای به‌دست آوردن الگوی تشعشی آرایه فازی مدنظر و نیز زاویه بیشینه تشعشع استفاده می‌شود.

در طرح پیشنهادی، برای دستیابی به ایزولاسیون حداکثر (که متناظر با مقادیر تلفات جای‌گذاری درگاه‌های ورودی نسبت به همدیگر است)، بهینه‌سازی برای پهنای خطوط مورد استفاده در پیاده‌سازی ساختار، صورت گرفته است. شکل (۶)، منحنی طیف پارامترهای پراکندگی را برای چند درگاه دلخواه نشان می‌دهد. شکل (۷) نیز، طیف فاز پارامترهای پراکندگی را برای انتقال موج بین چند درگاه مختلف و دلخواه نشان می‌دهد.

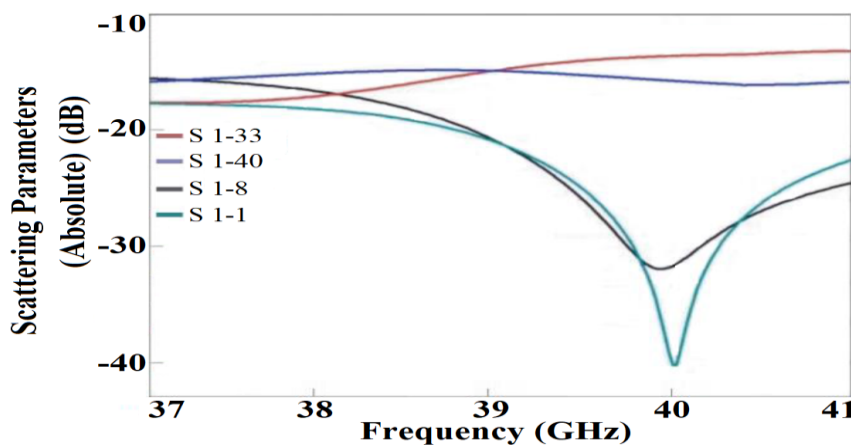
درجه، ۲ اختلاف فاز دهنده ۷۸/۷۵ درجه، ۴ اختلاف فاز دهنده ۶۷/۵ درجه، ۲ اختلاف فاز دهنده ۵۶/۲۵ درجه، ۸ اختلاف فاز دهنده ۴۵ درجه، ۲ اختلاف فاز دهنده ۳۳/۷۵ درجه، ۴ اختلاف فاز دهنده ۲۵ درجه و ۲ اختلاف فاز دهنده ۱۱/۲۵ درجه است. بر این اساس، شکل (۵) نتیجه شبیه‌سازی توزیع ولتاژ معادل بر ساختار خط انتقالی باتلر ماتریس ۳۲×۳۲ را برای تحریک یکی از درگاه‌های ورودی نشان می‌دهد. با توجه به تقارن ساختار، برای تحریک سایر درگاه‌های ورودی نتیجه مشابهی به‌دست می‌آید. ابعاد مشخص شده، برای فرکانس کاری ۴۰ گیگاهرتز است. مطابق شکل، به‌خوبی تقسیم مساوی توان، به میزان ۱۵ دی‌بی در درگاه‌های خروجی و نیز ایزولاسیون درگاه‌های ورودی، مشاهده می‌شود. جدول (۱)، فاز درگاه‌های خروجی و نیز اختلاف فاز را به ازای اعمال موج به درگاه‌های مختلف ورودی نشان



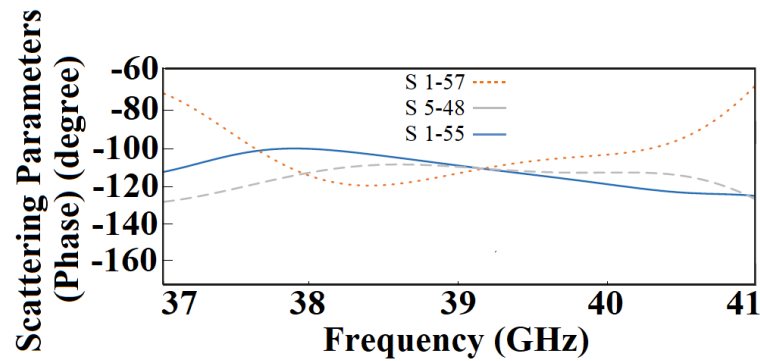
شکل (۴): طرح شماتیک برای باتلر ماتریس ۳۲×۳۲ میکرواستریپ



شکل (۵): نتیجه شبیه‌سازی توزیع ولتاژ معادل خط بر ساختار باتلر ماتریس ۳۲×۳۲



شکل (۶): طیف پارامترهای پراکندگی ضریب بازتاب نسبت به درگاه ۱ و انتقال از درگاه ۱ به درگاه‌های ۸، ۳۳، و ۴۰، برای ساختار باتلر ماتریس ۳۲×۳۲ ارائه شده



شکل (۷): طیف فاز پارامترهای پراکندگی برای انتقال بین درگاه‌های ۱ به ۵۵، ۱ به ۵۷، و ۵ به ۴۸، برای ساختار باتلر ماتریس 32×32 ارائه شده

جدول (۱): فاز ولتاژ محاسبه شده در هر درگاه خروجی از باتلر ماتریس 32×32 بر حسب زاویه

		شماره درگاه خروجی							
		۳۳	۳۴	۳۵	۳۶	۳۷	۳۸	۳۹	۴۰
شماره درگاه تحریک	۱	-۱۱/۲۵	۶۷/۵	۵۶/۲۵	۱۳۵	۳۳/۷۵	۱۱۲/۵	-۳۳/۷۵	-۱۸۰
	۲	-۱۰۱/۲۵	۱۵۷/۵	-۳۳/۷۵	-۱۳۵	-۵۶/۲۵	-۱۵۷/۵	-۱۲۳/۷۵	-۹۰
	۳	۶۷/۵	-۳۳/۷۵	-۴۵	-۱۴۶/۲۵	۱۱۲/۵	۱۱/۲۵	-۱۳۵	-۱۰۱/۲۵
	۴	-۲۲/۵	۵۶/۲۵	-۱۳۵	-۵۶/۲۵	۲۲/۵	۱۰۱/۲۵	۱۳۵	-۱۱/۲۵
	۵	۱۴۶/۲۵	۱۳۵	۳۳/۷۵	۲۲/۵	۱۱/۲۵	۰	۱۲۳/۷۵	-۱۱۲/۵
	۶	۵۶/۲۵	-۱۳۵	-۵۶/۲۵	۱۱۲/۵	-۷۸/۷۵	۹۰	۳۳/۷۵	-۲۲/۵
	۷	۱۳۵	-۵۶/۲۵	-۱۵۷/۵	۱۱/۲۵	۰	۱۶۸/۷۵	-۶۷/۵	-۱۲۳/۷۵
	۸	۴۵	۳۳/۷۵	۱۱۲/۵	۱۰۱/۲۵	-۹۰	-۱۰۱/۲۵	-۱۵۷/۵	-۳۳/۷۵
	۹	۱۶۸/۷۵	-۱۵۷/۵	۱۴۶/۲۵	-۱۸۰	۳۳/۷۵	۶۷/۵	۱۱/۲۵	۴۵
	۱۰	۷۸/۷۵	-۶۷/۵	۵۶/۲۵	-۹۰	-۵۶/۲۵	۱۵۷/۵	-۷۸/۷۵	۱۳۵
	۱۱	-۱۵۷/۵	۵۶/۲۵	۰	-۱۴۶/۲۵	۶۷/۵	-۷۸/۷۵	-۱۳۵	۷۸/۷۵
	۱۲	۱۱۲/۵	۱۴۶/۲۵	-۹۰	-۵۶/۲۵	-۲۲/۵	۱۱/۲۵	۱۳۵	۱۶۸/۷۵
	۱۳	-۱۲۳/۷۵	-۱۸۰	۳۳/۷۵	-۲۲/۵	-۷۸/۷۵	-۱۳۵	۷۸/۷۵	۲۲/۵
	۱۴	۱۴۶/۲۵	-۹۰	-۵۶/۲۵	۶۷/۵	-۱۶۸/۷۵	-۴۵	-۱۱/۲۵	۱۱۲/۵
	۱۵	-۱۸۰	-۵۶/۲۵	۱۵۷/۵	-۷۸/۷۵	-۱۳۵	-۱۱/۲۵	-۱۵۷/۵	-۳۳/۷۵
	۱۶	۹۰	۳۳/۷۵	۶۷/۵	۱۱/۲۵	۱۳۵	۷۸/۷۵	۱۱۲/۵	۵۶/۲۵
	۱۷	۱۴۶/۲۵	-۱۵۷/۵	۱۶۸/۷۵	-۱۳۵	۱۰۱/۲۵	۱۵۷/۵	۱۲۳/۷۵	-۱۸۰
	۱۸	۵۶/۲۵	-۶۷/۵	۷۸/۷۵	-۴۵	۱۱/۲۵	-۱۱۲/۵	۳۳/۷۵	-۹۰
	۱۹	-۱۵۷/۵	۷۸/۷۵	۴۵	-۷۸/۷۵	۱۵۷/۵	۳۳/۷۵	۰	-۱۲۳/۷۵
	۲۰	۱۱۲/۵	۱۶۸/۷۵	-۴۵	۱۱/۲۵	۶۷/۵	۱۲۳/۷۵	-۹۰	-۳۳/۷۵
	۲۱	-۱۰۱/۲۵	-۱۳۵	۱۰۱/۲۵	۶۷/۵	۳۳/۷۵	۰	-۱۲۳/۷۵	-۱۵۷/۵
	۲۲	۱۶۸/۷۵	-۴۵	۱۱/۲۵	۱۵۷/۵	-۵۶/۲۵	۹۰	۱۴۶/۲۵	-۶۷/۵
	۲۳	-۱۳۵	۱۱/۲۵	-۱۱۲/۵	۳۳/۷۵	۰	۱۴۶/۲۵	۲۲/۵	۱۶۸/۷۵
	۲۴	۱۳۵	۱۰۱/۲۵	۱۵۷/۵	۱۲۳/۷۵	-۹۰	-۱۲۳/۷۵	-۶۷/۵	-۱۰۱/۲۵
	۲۵	-۱۲۳/۷۵	۱۱۲/۵	۱۶۸/۷۵	-۱۸۰	۱۱/۲۵	۲۲/۵	-۵۶/۲۵	-۴۵
	۲۶	۱۴۶/۲۵	-۱۵۷/۵	۷۸/۷۵	-۹۰	-۷۸/۷۵	۱۱۲/۵	-۱۴۶/۲۵	۴۵

۳۷	-۱۱۲/۵	-۵۶/۲۵	۰	-۱۶۸/۷۵	۲۲/۵	-۱۴۶/۲۵	۱۳۵	-۳۳/۷۵
۲۸	۱۵۷/۵	۳۳/۷۵	-۹۰	-۷۸/۷۵	-۶۷/۵	-۵۶/۲۵	۴۵	۵۶/۲۵
۲۹	-۱۰۱/۲۵	۴۵	۱۱/۲۵	-۶۷/۵	-۱۴۶/۲۵	۱۳۵	-۳۳/۷۵	-۱۱۲/۵
۳۰	۱۶۸/۷۵	۱۳۵	-۷۸/۷۵	۲۲/۵	۱۲۳/۷۵	-۱۳۵	-۱۲۳/۷۵	-۲۲/۵
۳۱	-۱۸۰	۱۴۶/۲۵	۱۱۲/۵	-۱۴۶/۲۵	۱۳۵	-۱۲۳/۷۵	۶۷/۵	۱۶۸/۷۵
۳۲	۹۰	-۱۲۳/۷۵	۲۲/۵	-۵۶/۲۵	۴۵	-۳۳/۷۵	-۲۲/۵	-۱۰۱/۲۵

		شماره درگاه خروجی							
		۴۱	۴۲	۴۳	۴۴	۴۵	۴۶	۴۷	۴۸
شماره درگاه تحریک	۱	-۱۱/۲۵	۶۷/۵	۵۶/۲۵	۱۳۵	۳۳/۷۵	۱۱۲/۵	-۳۳/۷۵	-۱۸۰
	۲	-۱۰۱/۲۵	۱۵۷/۵	-۳۳/۷۵	-۱۳۵	-۵۶/۲۵	-۱۵۷/۵	-۱۲۳/۷۵	-۹۰
	۳	۶۷/۵	-۳۳/۷۵	-۴۵	-۱۴۶/۲۵	۱۱۲/۵	۱۱/۲۵	-۱۳۵	-۱۰۱/۲۵
	۴	-۲۲/۵	۵۶/۲۵	-۱۳۵	-۵۶/۲۵	۲۲/۵	۱۰۱/۲۵	۱۳۵	-۱۱/۲۵
	۵	۱۴۶/۲۵	۱۳۵	۳۳/۷۵	۲۲/۵	۱۱/۲۵	۰	۱۲۳/۷۵	-۱۱۲/۵
	۶	۵۶/۲۵	-۱۳۵	-۵۶/۲۵	۱۱۲/۵	-۷۸/۷۵	۹۰	۳۳/۷۵	-۲۲/۵
	۷	۱۳۵	-۵۶/۲۵	-۱۵۷/۵	۱۱/۲۵	۰	۱۶۸/۷۵	-۶۷/۵	-۱۲۳/۷۵
	۸	۴۵	۳۳/۷۵	۱۱۲/۵	۱۰۱/۲۵	-۹۰	-۱۰۱/۲۵	-۱۵۷/۵	-۳۳/۷۵
	۹	-۱۱/۲۵	۲۲/۵	-۳۳/۷۵	۰	-۱۴۶/۲۵	-۱۱۲/۵	-۱۶۸/۷۵	-۱۳۵
	۱۰	-۱۰۱/۲۵	۱۱۲/۵	-۱۲۳/۷۵	۹۰	۱۲۳/۷۵	-۲۲/۵	۱۰۱/۲۵	-۴۵
	۱۱	۲۲/۵	-۱۲۳/۷۵	-۱۸۰	۳۳/۷۵	-۱۱۲/۵	۱۰۱/۲۵	۴۵	-۱۰۱/۲۵
	۱۲	-۶۷/۵	-۳۳/۷۵	۹۰	۱۲۳/۷۵	۱۵۷/۵	-۱۶۸/۷۵	-۴۵	-۱۱/۲۵
	۱۳	۵۶/۲۵	۰	-۱۴۶/۲۵	۱۵۷/۵	۱۰۱/۲۵	۴۵	-۱۰۱/۲۵	-۱۵۷/۵
	۱۴	-۳۳/۷۵	۹۰	۱۲۳/۷۵	-۱۱۲/۵	۱۱/۲۵	۱۳۵	۱۶۸/۷۵	-۶۷/۵
	۱۵	۰	۱۲۳/۷۵	-۲۲/۵	۱۰۱/۲۵	۴۵	۱۶۸/۷۵	۲۲/۵	۱۴۶/۲۵
	۱۶	-۹۰	-۱۴۶/۲۵	-۱۱۲/۵	-۱۶۸/۷۵	-۴۵	-۱۰۱/۲۵	-۶۷/۵	-۱۲۳/۷۵
	۱۷	-۳۳/۷۵	۲۲/۵	-۱۱/۲۵	۴۵	-۷۸/۷۵	-۲۲/۵	-۵۶/۵	۰
	۱۸	-۱۲۳/۷۵	۱۱۲/۵	-۱۰۱/۲۵	۱۳۵	-۱۶۸/۷۵	۶۷/۵	-۱۴۶/۲۵	۹۰
	۱۹	۲۲/۵	-۱۰۱/۲۵	-۱۳۵	۱۰۱/۲۵	-۲۲/۵	-۱۴۶/۲۵	-۱۸۰	۵۶/۲۵
	۲۰	-۶۷/۵	-۱۱/۲۵	۱۳۵	-۱۶۸/۷۵	-۱۱۲/۵	-۵۶/۲۵	۹۰	۱۴۶/۲۵
	۲۱	۷۸/۷۵	۴۵	-۷۸/۷۵	-۱۱۲/۵	-۱۴۶/۲۵	-۱۸۰	۵۶/۲۵	۲۲/۵
	۲۲	-۱۱/۲۵	۱۳۵	-۱۶۸/۷۵	-۲۲/۵	۱۲۳/۷۵	-۹۰	-۳۳/۷۵	۱۱۲/۵
	۲۳	۴۵	-۱۶۸/۷۵	۶۷/۵	-۱۴۶/۲۵	-۱۸۰	-۳۳/۷۵	-۱۵۷/۵	-۱۱/۲۵
	۲۴	-۴۵	-۷۸/۷۵	-۲۲/۵	-۵۶/۲۵	۹۰	۵۶/۲۵	۱۱۲/۵	۷۸/۷۵
	۲۵	-۱۲۳/۷۵	۱۱۲/۵	۱۶۸/۷۵	-۱۸۰	۱۱/۲۵	۲۲/۵	-۵۶/۲۵	-۴۵
	۲۶	۱۴۶/۲۵	-۱۵۷/۵	۷۸/۷۵	-۹۰	-۷۸/۷۵	۱۱۲/۵	-۱۴۶/۲۵	۴۵
	۲۷	-۱۱۲/۵	-۵۶/۲۵	۰	-۱۶۸/۷۵	۲۲/۵	-۱۴۶/۲۵	۱۳۵	-۳۳/۷۵
	۲۸	۱۵۷/۵	۳۳/۷۵	-۹۰	-۷۸/۷۵	-۶۷/۵	-۵۶/۲۵	۴۵	۵۶/۲۵
	۲۹	-۱۰۱/۲۵	۴۵	۱۱/۲۵	-۶۷/۵	-۱۴۶/۲۵	۱۳۵	-۳۳/۷۵	-۱۱۲/۵

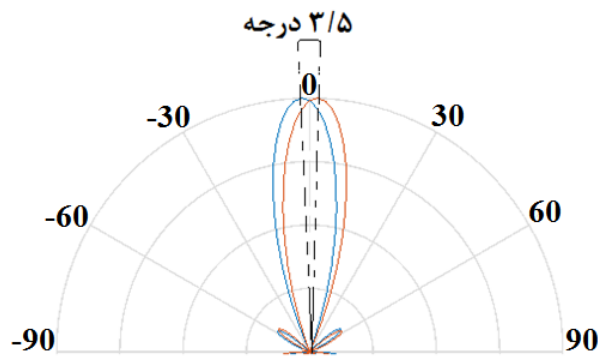
۳۰	۱۶۸/۷۵	۱۳۵	-۷۸/۷۵	۲۲/۵	۱۲۳/۷۵	-۱۳۵	-۱۲۳/۷۵	-۲۲/۵
۳۱	-۱۸۰	۱۴۶/۲۵	۱۱۲/۵	-۱۴۶/۲۵	۱۳۵	-۱۲۳/۷۵	۶۷/۵	۱۶۸/۷۵
۳۲	۹۰	-۱۲۳/۷۵	۲۲/۵	-۵۶/۲۵	۴۵	-۳۳/۷۵	-۲۲/۵	-۱۰۱/۲۵

		شماره درگاه خروجی							
		۴۹	۵۰	۵۱	۵۲	۵۳	۵۴	۵۵	۵۶
شماره درگاه تحریک	۱	-۱۰۱/۲۵	-۲۲/۵	-۳۳/۷۵	۴۵	-۵۶/۲۵	۲۲/۵	-۱۲۳/۷۵	۹۰
	۲	۱۶۸/۷۵	۶۷/۵	-۱۲۳/۷۵	۱۳۵	-۱۴۶/۲۵	۱۱۲/۵	۱۴۶/۲۵	-۱۸۰
	۳	-۲۲/۵	-۱۲۳/۷۵	-۱۳۵	۱۲۳/۷۵	۲۲/۵	-۷۸/۷۵	۱۳۵	۱۶۸/۷۵
	۴	-۱۱۲/۵	-۳۳/۷۵	۱۳۵	-۱۴۶/۲۵	-۶۷/۵	۱۱/۲۵	۴۵	-۱۰۱/۲۵
	۵	۵۶/۲۵	۴۵	-۵۶/۲۵	-۶۷/۵	-۷۸/۷۵	-۹۰	۳۳/۷۵	۱۵۷/۵
	۶	-۳۳/۷۵	۱۳۵	-۱۴۶/۲۵	۲۲/۵	-۱۶۸/۷۵	۰	-۵۶/۲۵	-۱۱۲/۵
	۷	۴۵	-۱۴۶/۲۵	۱۱۲/۵	-۷۸/۷۵	-۹۰	۷۸/۷۵	-۱۵۷/۵	۱۴۶/۲۵
	۸	-۴۵	-۵۶/۲۵	۲۲/۵	۱۱/۲۵	-۱۸۰	۱۶۸/۷۵	۱۱۲/۵	-۱۲۳/۷۵
	۹	۷۸/۷۵	۱۱۲/۵	۵۶/۲۵	۹۰	-۵۶/۲۵	-۲۲/۵	-۷۸/۷۵	-۴۵
	۱۰	-۱۱/۲۵	-۱۵۷/۵	-۳۳/۷۵	-۱۸۰	-۱۴۶/۲۵	۶۷/۵	-۱۶۸/۷۵	۴۵
	۱۱	۱۱۲/۵	-۳۳/۷۵	-۹۰	۱۲۳/۷۵	-۲۲/۵	-۱۶۸/۷۵	۱۳۵	-۱۱/۲۵
	۱۲	۲۲/۵	۵۶/۲۵	-۱۸۰	-۱۴۶/۲۵	-۱۱۲/۵	-۷۸/۷۴	۴۵	۷۸/۷۵
	۱۳	۱۴۶/۲۵	۹۰	-۵۶/۲۵	-۱۱۲/۵	-۱۶۸/۷۵	۱۳۵	-۱۱/۲۵	-۶۷/۵
	۱۴	۵۶/۲۵	-۱۸۰	-۱۴۶/۲۵	-۲۲/۵	۱۰۱/۲۵	-۱۳۵	-۱۰۱/۲۵	۲۲/۵
	۱۵	۹۰	-۱۴۶/۲۵	۶۷/۵	-۱۶۸/۷۵	۱۳۵	-۱۰۱/۲۵	۱۱۲/۵	-۱۲۳/۷۵
	۱۶	۰	-۵۶/۲۵	-۲۲/۵	-۷۸/۷۵	۴۵	-۱۱/۲۵	۲۲/۵	-۳۳/۷۵
	۱۷	-۱۲۳/۷۵	-۶۷/۵	-۱۰۱/۲۵	-۴۵	-۱۶۸/۷۵	-۱۱۲/۵	-۱۴۶/۲۵	-۹۰
	۱۸	۱۴۶/۲۵	۲۲/۵	۱۶۸/۷۵	۴۵	۱۰۱/۲۵	-۲۲/۵	۱۲۳/۷۵	۰
	۱۹	-۶۷/۵	۱۶۸/۷۵	۱۳۵	۱۱/۲۵	-۱۱۲/۵	۱۲۳/۷۵	۹۰	-۳۳/۷۵
	۲۰	-۱۵۷/۵	-۱۰۱/۲۵	۴۵	۱۰۱/۲۵	۱۵۷/۵	-۱۴۶/۲۵	۰	۵۶/۲۵
	۲۱	-۱۱/۲۵	-۴۵	-۱۶۸/۷۵	۱۵۷/۵	۱۲۳/۷۵	۹۰	-۳۳/۷۵	-۶۷/۵
	۲۲	-۱۰۱/۲۵	۴۵	۱۰۱/۲۵	-۱۱۲/۵	۳۳/۷۵	-۱۸۰	-۱۲۳/۷۵	۲۲/۵
	۲۳	-۴۵	۱۰۱/۲۵	-۲۲/۵	۱۲۳/۷۵	۹۰	-۱۲۳/۷۵	۱۱۲/۵	-۱۰۱/۲۵
	۲۴	-۱۳۵	-۱۶۸/۷۵	-۱۱۲/۵	-۱۴۶/۲۵	۰	-۳۳/۷۵	۲۲/۵	-۱۱/۲۵
	۲۵	-۳۳/۷۵	-۱۵۷/۵	-۱۰۱/۲۵	-۹۰	۱۰۱/۲۵	۱۱۲/۵	۳۳/۷۵	۴۵
	۲۶	-۱۲۳/۷۵	-۶۷/۵	۱۶۸/۷۵	۰	۱۱/۲۵	-۱۵۷/۵	-۵۶/۲۵	۱۳۵
	۲۷	-۲۲/۵	۳۳/۷۵	۹۰	-۷۸/۷۵	۱۱۲/۵	-۵۶/۲۵	-۱۳۵	۵۶/۲۵
	۲۸	-۱۱۲/۵	۱۲۳/۷۵	۰	۱۱/۲۵	۲۲/۵	۳۳/۷۵	۱۳۵	۱۴۶/۲۵
	۲۹	-۱۱/۲۵	۱۳۵	۱۰۱/۲۵	۲۲/۵	-۵۶/۲۵	-۱۳۵	۵۶/۲۵	-۲۲/۵
	۳۰	-۱۰۱/۲۵	-۱۳۵	۱۱/۲۵	۱۱۲/۵	-۱۴۶/۲۵	-۴۵	-۳۳/۷۵	۶۷/۵
	۳۱	-۹۰	-۱۲۳/۷۵	-۱۵۷/۵	-۵۶/۲۵	-۱۳۵	-۳۳/۷۵	۱۵۷/۵	-۱۰۱/۲۵
	۳۲	-۱۸۰	-۳۳/۷۵	۱۱۲/۵	۳۳/۷۵	۱۳۵	۵۶/۲۵	۶۷/۵	-۱۱/۲۵



شماره درگاه خروجی									
اختلاف فاز	۶۴	۶۳	۶۲	۶۱	۶۰	۵۹	۵۸	۵۷	
۵/۶۲	۹۰	-۱۲۳/۷۵	۲۲/۵	-۵۶/۲۵	۴۵	-۳۳/۷۵	-۲۲/۵	-۱۰۱/۲۵	۱
-۱۷۴/۳۷	-۱۸۰	۱۴۶/۲۵	۱۱۲/۵	-۱۴۶/۲۵	۱۳۵	-۱۲۳/۷۵	۶۷/۵	۱۶۸/۷۵	۲
۱۶۳/۱۲	۱۶۸/۷۵	۱۳۵	-۷۸/۷۵	۲۲/۵	۱۲۳/۷۵	-۱۳۵	-۱۲۳/۷۵	-۲۲/۵	۳
-۱۵۱/۸۷	-۱۰۱/۲۵	۴۵	۱۱/۲۵	-۶۷/۵	-۱۴۶/۲۵	۱۳۵	-۳۳/۷۵	-۱۱۲/۵	۴
۱۴۰/۶۲	۱۵۷/۵	۳۳/۷۵	-۹۰	-۷۸/۷۵	-۶۷/۵	-۵۶/۲۵	۴۵	۵۶/۲۵	۵
-۱۲۹/۳۷	-۱۱۲/۵	-۵۶/۲۵	۰	-۱۶۸/۷۵	۲۲/۵	-۱۴۶/۲۵	۱۳۵	-۳۳/۷۵	۶
۱۱۸/۱۲	۱۴۶/۲۵	-۱۵۷/۵	۷۸/۷۵	-۹۰	-۷۸/۷۵	۱۱۲/۵	-۱۴۶/۲۵	۴۵	۷
-۱۰۶/۸۷	-۱۲۳/۷۵	۱۱۲/۵	۱۶۸/۷۵	-۱۸۰	۱۱/۲۵	۲۲/۵	-۵۶/۲۵	-۴۵	۸
۹۵/۶۲	۱۳۵	۱۰۱/۲۵	۱۵۷/۵	۱۲۳/۷۵	-۹۰	-۱۲۳/۷۵	-۶۷/۵	-۱۰۱/۲۵	۹
-۸۴/۳۷	-۱۳۵	۱۱/۲۵	-۱۱۲/۵	۳۳/۷۵	۰	۱۴۶/۲۵	۲۲/۵	۱۶۸/۷۵	۱۰
۷۳/۱۲	۱۶۸/۷۵	-۴۵	۱۱/۲۵	۱۵۷/۵	-۵۶/۲۵	۹۰	۱۴۶/۲۵	-۶۷/۵	۱۱
-۶۱/۸۷	-۱۰۱/۲۵	-۱۳۵	۱۰۱/۲۵	۶۷/۵	۳۳/۷۵	۰	-۱۲۳/۷۵	-۱۵۷/۵	۱۲
۵۰/۶۲	۱۱۲/۵	۱۶۸/۷۵	-۴۵	۱۱/۲۵	۶۷/۵	۱۲۳/۷۵	-۹۰	-۳۳/۷۵	۱۳
-۳۹/۳۷	-۱۵۷/۵	۷۸/۷۵	۴۵	-۷۸/۷۵	۱۵۷/۵	۳۳/۷۵	۰	-۱۲۳/۷۵	۱۴
۲۸/۱۲	۵۶/۲۵	-۶۷/۵	۷۸/۷۵	-۴۵	۱۱/۲۵	-۱۱۲/۵	۳۳/۷۵	-۹۰	۱۵
-۱۶/۸۷	۱۴۶/۲۵	-۱۵۷/۵	۱۶۸/۷۵	-۱۳۵	۱۰۱/۲۵	۱۵۷/۵	۱۲۳/۷۵	-۱۸۰	۱۶
۱۶/۸۷	۹۰	۳۳/۷۵	۶۷/۵	۱۱/۲۵	۱۳۵	۷۸/۷۵	۱۱۲/۵	۵۶/۲۵	۱۷
-۲۸/۱۲	-۱۸۰	-۵۶/۲۵	۱۵۷/۵	-۷۴/۷۵	-۱۳۵	-۱۱/۲۵	-۱۵۷/۵	-۳۳/۷۵	۱۸
۳۹/۳۷	۱۴۶/۲۵	-۹۰	-۵۶/۲۵	۶۷/۵	-۱۶۸/۷۵	-۴۵	-۱۱/۲۵	۱۱۲/۵	۱۹
-۵۰/۶۲	-۱۲۳/۷۵	-۱۸۰	۳۳/۷۵	-۲۲/۵	-۷۸/۷۵	-۱۳۵	۷۸/۷۵	۲۲/۵	۲۰
۶۱/۸۷	۱۱۲/۵	۱۴۶/۲۵	-۹۰	-۵۶/۲۵	-۲۲/۵	۱۱/۲۵	۱۳۵	۱۶۸/۷۵	۲۱
-۷۳/۱۲	-۱۵۷/۵	۵۶/۲۵	۰	-۱۴۶/۲۵	۶۷/۵	-۷۸/۷۵	-۱۳۵	۷۸/۷۵	۲۲
۸۴/۳۷	۷۸/۷۵	-۶۷/۵	۵۶/۲۵	-۹۰	-۵۶/۲۵	۱۵۷/۵	-۷۸/۷۵	۱۳۵	۲۳
-۹۵/۶۲	۱۶۸/۷۵	-۱۵۷/۵	۱۴۶/۲۵	-۱۸۰	۳۳/۷۵	۶۷/۵	۱۱/۲۵	۴۵	۲۴
۱۰۶/۸۷	۴۵	۳۳/۷۵	۱۱۲/۵	۱۰۱/۲۵	-۹۰	-۱۰۱/۲۵	-۱۵۷/۵	-۳۳/۷۵	۲۵
-۱۱۸/۱۲	۱۳۵	-۵۶/۲۵	-۱۵۷/۵	۱۱/۲۵	۰	۱۶۸/۷۵	-۶۷/۵	-۱۲۳/۷۵	۲۶
۱۲۹/۳۷	۵۶/۲۵	-۱۳۵	-۵۶/۲۵	۱۱۲/۵	-۷۸/۷۵	۹۰	۳۳/۷۵	-۲۲/۵	۲۷
-۱۴۰/۶۲	۱۴۶/۲۵	۱۳۵	۳۳/۷۵	۲۲/۵	۱۱/۲۵	۰	۱۲۳/۷۵	-۱۱۲/۵	۲۸
۱۵۱/۸۷	-۲۲/۵	۵۶/۲۵	-۱۳۵	-۵۶/۲۵	۲۲/۵	۱۰۱/۲۵	۱۳۵	-۱۱/۲۵	۲۹
-۱۶۳/۱۲	۶۷/۵	-۳۳/۷۵	-۴۵	-۱۴۶/۲۵	۱۱۲/۵	۱۱/۲۵	-۱۳۵	-۱۰۱/۲۵	۳۰
۱۷۴/۳۷	-۱۰۱/۲۵	۱۵۷/۵	-۳۳/۷۵	-۱۳۵	-۵۶/۲۵	-۱۵۷/۵	-۱۲۳/۷۵	-۹۰	۳۱
-۵/۶۲	-۱۱/۲۵	۶۷/۵	۵۶/۲۵	۱۳۵	۳۳/۷۵	۱۱۲/۵	۳۳/۷۵	-۱۸۰	۳۲

شماره درگاه تحریک



شکل (۹): نمایش پهنای پرتو ۳/۵۸ درجه، ناشی از تحریک درگاه‌های ۱ و ۳۲ از یک باتلر ماتریس ۳۲×۳۲

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، پس از مروری بر مفاهیم ساختارهای باتلر ماتریس، طرح ساختار از مرتبه ۳۲، و سپس طراحی آرایه فازی میکرواستریپ، نتایج شبیه‌سازی ساختار باتلر ماتریس ارائه شد. طراحی‌های صورت گرفته برای فرکانس کار ۴۰ گیگاهرتز در باند Ka در نظر گرفته شده است. به کمک به کارگیری باتلر ماتریس ۳۲×۳۲، پهنای پرتو ۳/۵ حاصل شد.

مراجع

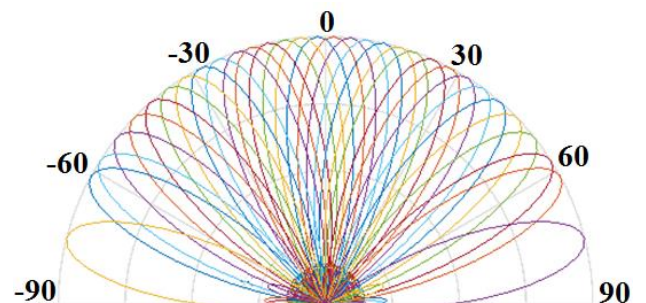
- [1] Suryana, J.; Sugihartono, Wiyogo, D. "Design and Realization of Flat Mobile VSAT Antenna for Ku/Ka Band Satellite Communications with Auto-Beam Steering Capability," International Conference of Information and Communication Technology, Bandung, Indonesia, 2013.
- [2] Huo, J.; Bi, Y.; Lu, D.; Duan, S. "Cloud Classification and Distribution of Cloud Types in Beijing Using Ka-Band Radar Data," Advances in Atmospheric Sciences, 2019, 36, 793-803.
- [3] Liu, D.; Gu, X.; Baks, C. W.; Valdes-Garcia, A. "Antenna-in-Package Design Considerations for Ka-Band 5G Communication Applications," IEEE Trans. Ant. Prop. 2017, 65, 6372-6379.
- [4] Cao, Y.; Chin, K. S.; Che, W.; Yang, W.; Eric, S. L. "A Compact 38 GHz Multibeam Antenna Array with Multifolded Butler Matrix for 5G Applications," IEEE Ant. Wireless Prop. Lett. 2017, 16, 2996-2999.
- [5] کیوان سیدعلی، عربی همایون، "آنتن آرایه شکافی ۶۴ المانی با حفره پشتی و تکنولوژی ساخت SIW و با استفاده از تحریک مودهای بالاتر"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، دوره ۱۸، شماره ۳، صفحات ۳۷-۴۲، ۱۴۰۰.
- [6] Coward, J. F.; Chalfant, C. H.; Chang, P. H. "A Photonic Integrated-optic RF Phase Shifter for Phased Array Antenna Beam-forming Applications"; J. Light. Technol. 1993, 11, 2201-2205.
- [7] Sazegar, M.; Zheng, Y.; Maune, H.; Damm, C.; Zhou, X.; Binder, J.; Jakoby, R. "Low-cost Phased-array Antenna Using Compact Tunable Phase Shifters Based on Ferroelectric Ceramics"; IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2011, 59, 1265-1273.

۳-۴ پرتو تشعشعی آرایه فرضی تغذیه شده

در ادامه برای به دست آوردن الگوی تشعشعی آرایه فازی مورد نظر و نیز زاویه بیشینه تشعشع، آرایه‌ای از آنتن معرفی شده در بخش ۴-۲ به خروجی‌های مختلف باتلر ماتریس متصل می‌شوند. همچنین از فازهای به دست آمده در بخش ۳-۳ استفاده می‌شود. مطابق رابطه (۱۱)، الگوی تشعشعی کل، تحت تاثیر ضریب آرایه (AF) است، که آن نیز مستقل از نوع آنتن‌های آرایه، به فاصله آنها، و فاز و دامنه تحریکشان وابسته است. در این مقاله، فاصله بین آنتن‌های آرایه $\lambda/2$ در نظر گرفته شده است. شکل (۸)، به ترتیب الگوی تشعشعی آرایه فازی ۳۲ تایی را که به کمک خروجی‌های باتلر ماتریس متناظر تغذیه شده‌اند نشان می‌دهند. این شکل‌ها، با تغذیه همزمان تمامی درگاه‌های ورودی حاصل شده‌اند. رنگ‌های مختلف در شکل‌ها، حاصل اعمال تغذیه انفرادی به درگاه‌های ورودی مختلف است. مشاهده می‌شود که به ازای اعمال تغذیه به درگاه‌های ورودی مختلف، بیشینه تشعشع به جهت‌های مختلف می‌گردد. با توجه به اینکه هدف، دستیابی به یک پهنای پرتو باریک است، کافی است تا تنها دو ورودی آرایه تغذیه شوند. اگر در آرایه ۳۲ عنصری، دو ورودی ۱ و ۳۲، تغذیه شوند، پرتو شکل (۹) حاصل می‌شود که پهنای پرتو ۳/۵ درجه در آن قابل مشاهده است. زوایای لب اصلی، مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

$$\theta_{\max} = -\sin^{-1}\left(\frac{\delta\lambda}{2\pi d}\right) \quad (13)$$

که در آن δ ، اختلاف فاز بین درگاه‌های خروجی آنتن و d فاصله بین دو آنتن مجاور در آرایه است. مطابق یک قاعده سرانگشتی، پهنای پرتو حاصل از یک چنین آرایه‌ای، به کمک رابطه $108/n$ ، که در آن n تعداد عناصر به کار رفته در آرایه است، ۳/۳ درجه پیش‌بینی می‌شود که به مقدار یاد شده ۳/۵ درجه، نزدیک است. در نهایت، الگوی تشعشعی کل آرایه، مطابق رابطه (۱۱)، پس از محاسبه E_s به دست می‌آید.



شکل (۸): الگوی تشعشعی ناشی از ضریب آرایه، برای یک آرایه ۳۲ تایی تغذیه شده با خروجی‌های متناظر باتلر ماتریس

- [22] Pozar, D. M. "Microwave Engineering"; 3rd Ed. Wiley, NJ, USA, 2005.
- [23] Moody, H. J. "The Systematic Design of the Butler Matrix"; IEEE Trans. Antennas Propag. 1964, 12, 786-788.
- [24] Che Rose, M. R.; Mohd Shah, S. R.; Abdul Kadir, M. F.; Misman, D.; Abdul Aziz, M. Z. A.; Suaidi, M. K. "The Mitered and Circular Bend Method of Butler Matrix Design for WLAN Application"; Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics, Melaka, Malaysia, 2007.
- [25] Balanis, C. A. "Antenna Theory"; 3rd Ed. John Wiley & Sons, NJ, USA, 2005.
- [26] El-Tager, M.; Eleiwa, M. A. "Design and Implementation of Smart Antenna Using Butler Matrix for ISM Band"; Progress in Electromagnetic Research symposium, Beijing, China, 2009.
- [27] <http://www.comsol.com>
- [28] Gross, F.; "Smart Antenna for Wireless Communication"; McGraw-Hill, NY, USA, 2005.
- [8] Uhlmann, M. "Cylindrical Phased Array with PIN-diode Controlled Parallel-plate Feeding System"; 5th European Microwave Conference, Hamburg, Germany, 1975.
- [9] Nikfalazar, M.; Kohler, C.; Wiens, A.; Mehmood, A.; Sohrabi, M.; Maune, H.; Binder, J. R.; Jakoby, R. "Beam Steering Phased Array Antenna with Fully Printed Phase Shifters Based on Low-temperature Sintered BST-composite Thick Films"; IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett. 2016, 26, 70-72.
- [۱۰] مهرافزا امیر، براتی طرقی پوریا، پورزیا علی، "طراحی ماتریس باتلر جهت شکل‌دهی پرتو آنتن در شبکه‌های آرایه فازی"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، دوره ۱۶، شماره ۴، صفحات ۱۷-۲۵، ۱۳۹۸.
- [11] Lin, Y. S.; Lee, J. H. "Miniature Butler Matrix Design Using Glass-based Thin-film Integrated Passive Device Technology for 2.5-GHz Applications"; IEEE Trans. Microw. Theory Techn. 2013, 61, 2594-2602.
- [12] Aourik, S.; Errkik, A.; Zbitou, J.; Latrach, M. "A New Design and Implementation of 4x4 Butler Matrix for Ka Band Applications," General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS), Rome, Italy, 2021.
- [۱۳] نوری تبار علیرضا، شمسی حسین، احمدی سید آرش، "طراحی و ساخت فیلتر پایین گذر میکرواستریپ فشرده با باند گذر تیز و فاکتور توقف بالا"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، دوره ۱۴، شماره ۲، صفحات ۵۷-۶۴، ۱۳۹۶.
- [13] Bona, M.; Manholm, L.; Starski, J. P.; Svensson, B. "Low-loss Compact Butler Matrix for a Microstrip Antenna"; IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2002, 50, 2069-2075.
- [14] Fonseca, N. J. G. "An Investigation of Blass and Nolen Matrices," CNES Toulouse Space Center, Toulouse, France, Tech. Note 152, Nov. 2007.
- [15] Sutton, N.; Filipovic, D. S. "Design of a K-thru Ka-Band Modified Butler Matrix Feed for a 4-arm Spiral Antenna," 2010 Loughborough Antennas & Propagation Conference, UK, 2010.
- [16] Wang, Y.; Ke, M.; Lancaster, M. J. "A Ka-Band Butler Matrix with Antenna Array Based on Micromachined Rectangular Coaxial Structures," European Microwave Conference, 2009.
- [17] Guo, Y. J.; Ansari, M.; Fonseca, N. J. G. "Circuit Type Multiple Beamforming Networks for Antenna Arrays in 5G and 6G Terrestrial and Non-Terrestrial Networks," IEEE J. Microwaves, 2021, 1, 1-19.
- [18] Al Habibi, H. A. R. "Design of a 4x4 Butler Matrix for Vehicle Radar Beamforming Antenna Systems at 24 GHz"; M.Sc. Thesis, The Islamic University of Gaza, Gaza, Palestine, 2014.
- [19] Macnamara, T. M. "Positions and Magnitudes of Fixed Phase Shifters in Butler Matrices Incorporating 90° Hybrids"; IEEE P. Microw. Ant. Prop. 1988, 135, 359-360.
- [20] Zhang, G. X.; Sun, B. H.; Sun, L.; Zhao, J. P.; Geng, Y.; Lian, R. N. "Design and Implementation of a 3x3 Orthogonal Beam Forming Network for Pattern-Diversity Applications"; Prog. Electromagn. Res. C, 2014, 53, 19-26.
- [21] Trujillo, J. G. C.; Perez, M. S.; Garcia, A. N.; Vera-Isasa, M. "3x3 Multibeam Network for a Triangular Array of Three Radiating Elements: Design and Measurement"; IEEE EUROCON-International Conference on Computer as a Tool, Lisbon, Portugal, 2011.

¹ Link

² Steering

³ Port

⁴ Directive

⁵ Junction

⁶ Phase Shifter

⁷ Impedance Matching