طراحی سیستماتیک ماتریس باتلر ۴×۴ فشرده جهت شکل‌دهی پرتو آنتن در شبکه‌های آرایه فازی

امیر مهرافزا[۱] پوریا براتی طرقی[۲] علی پورزیاد[۳]

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تبریز- تبریز- ایران
Amehrafza@yahoo.com

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات - تهران- ایران
Pouria.barati@gmail.com

۳- استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز– تبریز- ایران
Ali_pourziad@tabrizu.ac.ir

چکیده: **در این مقاله، طراحی سیستماتیک و قدم به قدم ماتریس باتلر ۴×۴ در فرکانس کاری ۲/۴۵ گیگاهرتز، جهت استفاده در شبکه-های آرایه فازی آورده شده است. با استفاده از روش‌های افزایش پهنای باند بکار گرفته شده در این مقاله، ماتریس باتلر حاصل دارای پهنای باند بیشتری نسبت به طراحی‌های دیگر موجود در این باند فرکانسی است. به منظور افزایش پهنای باند، از عنصرهای ریزنواری غیرفعال پهن-باند بهبود یافته همانند تزویج کننده‌های جهت‌دار شاخه‌ای ۹۰ درجه، تقاطع‌ها و تغییردهنده‌های فاز شیفمن نیز استفاده شده است. تک لایه بودن ساختار، ابعاد فشرده، کم هزینه بودن روش ساخت و سادگی الگوریتم طراحی، که امکان اعمال آن در فرکانس‌های دیگر را می‌دهد، از مزیت‌های مهم این طراحی هستند. ماتریس باتلر ارایه شده بر روی زیرلایه FR4 در ابعاد۱۲۵ mm×113 mm×0.5 mm ساخت شده است. در این طرح ایزولاسیون ۲۰-۲۵ دسیبل در فرکانس مرکزی حاصل شده است و همچنین اختلاف فازهای ایجاد شده در خروجی منطبق با تئوری چرخش پرتو در سیستم‌های آرایه فازی است. پهنای باند نسبی حاصل شده از پاسخ فاز ۱۰± درجه در فرکانس مرکزی بیش از ۱۰٪ است. از کاربردهای مهم این ماتریس باتلر می‌توان تغذیه‌ی آنتن‌های آرایه فازی و ایجاد پترن تشعشعی در جهات دلخواه فضایی نام برد.**

واژه های کلیدی: آرایه فازی، ایزولاسیون، تقاطع، ماتریس باتلر، ریزنوار، تغییردهنده فاز شیفمن

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۰۳
تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۰۳
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۰۲
نام نویسنده‌ی مسئول: امیر مهرافزا
نشانی نویسنده‌ی مسئول: تبریز- بلوار ۲۹ بهمن-دانشگاه تبریز-دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1398.16.4.21.2]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.16- No.4- Winter2018

۱- مقدمه

استفاده از آنتن‌های آرایه‌ای روشی معمول جهت بالا بردن جهت‌دهی آنتن‌ها محسوب می‌شود. در برخی کاربردهای مخابراتی، نظامی، پزشکی و یا صنعتی چرخش بیم اصلی آنتن آرایه‌ای ضروری است. آنتن‌های آرایه فازی برای چرخش بیم اصلی آنتن با استفاده از تغییر فاز تغذیه المان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. لازم به توضیح است که در آنتن‌های سهموی و انعکاسی چرخش بیم به شکل مکانیکی رفع می‌شد که بدلیل مشکلات عدیده سیستم‌های مکانیکی همچون وزن و حجم بالا، سرعت عمل کم، هزینه‌های نگه‌داری بالا، منجر به ایجاد سیستم‌های آرایه فازی شد، این سیستم‌ها به شکل الکترونیکی و الکترومغناطیسی پرتوهای تشعشعی آنتن‌ها را در فضای مورد نظر حرکت می‌دهند[۱]-[۳].

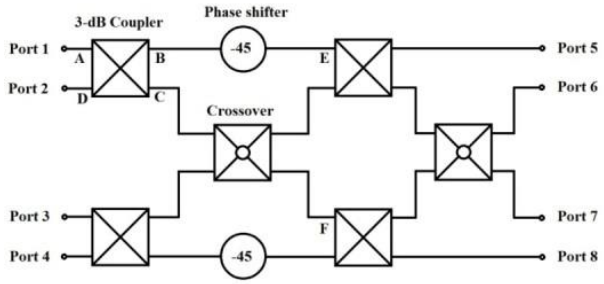
سیستم‌های آرایه فازی متشکل از چندین عنصر تشعشعی‌اند که با توجه به نیاز کاربر به شکل‌های مختلف آرایه‌ای واقع شده‌اند، با تغذیه این المان‌های تشعشعی با فازهای مختلف می‌توان پرتو مورد نظر را در جهت دلخواه قرار داد[۴]. از این رو شبکه‌های تغذیه پرتو در سیستم‌های آرایه فازی که به اختصار شبکه شکل‌دهی پرتو نیز گفته می‌شود از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، شبکه‌های شکل‌دهی پرتو به دو گروه کلی پویش پیوسته پرتو و پویش گسسته پرتو تقسیم می‌شوند، شبکه‌های پویش گسسته، پرتو تشعشعی رو به شکل گسسته و فقط در نقاط خاصی می‌توانند قرار دهند و در مقابل طراحی ساده‌تری دارند در حالی که در شبکه‌های پویش پیوسته، پرتو مورد نظر فضای تشعشعی رو به شکل پیوسته جاروب می‌کند و در مقابل این نوع شبکه‌ها دارای طراحی بسیار پیچیده‌ای‌اند[۵].

در سالیان اخیر پژوهشگرها شبکه‌های شکل‌دهی مختلفی همچون شبکه تغذیه سری، موازی و ترکیبی[۶]، لنز روتمن[۷]-[۸]، تغذیه کرپس[۹]، ماتریس باتلر[۱۰]-[۱۶] ارایه کرده‌اند. در میان این شبکه‌ها، ماتریس باتلر یکی از پرکاربردترین شبکه‌های جهت‌دهی پرتو با کاربرد عملی است و از جایگاه منحصر بفردی برخوردار است. ماتریس باتلر اولین بار در سال ۱۹۶۱ توسط آقایان "جس باتلر" و "رالف لوو" ارایه داده شد[۱۷]. از مهمترین ویژگی‌های ماتریس باتلر می‌توان به تلفات کم، ارسال و دریافت چندین پرتو بشکل همزمان، تولید بیم‌های متعامد و عدم تزویج بین بیم‌ها و کم هزینه بودن اشاره کرد[۱۸].

در این مقاله از یک ماتریس باتلر ۴×۴ به عنوان شبکه شکل‌دهی پرتو استفاده شده است. شبکه طراحی شده در این مقاله دارای چهار دهانه ورودی و چهار دهانه خروجی است و در طراحی این ساختار از نرم افزار CST استفاده شده است. انتخاب باتلر ۴×۴ به عنوان مثالی از یک روش کلی ارایه شده در این مقاله است. در بخش‌های بعدی مقاله به صورت قدم به قدم طراحی بخش‌های مختلف ماتریس باتلر آورده می‌شود.

۲- مفاهیم اساسی ماتریس باتلر

یک ماتریس باتلر ۴×۴ به طور متداول، متشکل از ۴ تزویج کننده جهت دار شاخه‌ای ۹۰ درجه، ۲ تقاطع و ۴ تغییردهنده فاز شیفمن است که در ادامه به طراحی هرکدام از این عنصرها در فرکانس مرکزی ۲/۴۵ گیگاهرتز پرداخته و از کنارهم قرار دادن آن‌ها شبکه شکل دهی باتلر طراحی خواهد شد. مدار مورد نظر برای ماتریس باتلر در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل (۱): بلوک دیاگرام ماتریس باتلر ۴×۴

مشخصه‌ی اصلی این مدار، ارضای شروط فاز ماتریس باتلر مطابق جدول ۱ است. طراحی مدار مورد نظر بر این اساس بوده است که مدار به ازای تحریک هر یک از چهار دهانه ورودی، بتواند اختلاف فازهای یکسان در دهانه‌های خروجی حاصل کند. به عنوان مثال هنگامی که دهانه ۱ تحریک شود، اختلاف فاز 45° بین دهانه‌های خروجی حاصل می‌شود. دهانه ۵، به عنوان دهانه مرجع در نظر گرفته شده است[۱۹].

$$\begin{aligned}
&\angle S_{51} = \angle S_{BA} + \angle S_{EB} + \angle S_{BA} \\
&\angle S_{61} = \angle S_{FC} + \angle S_{BA} + \angle S_{FC} + \angle S_{CA} \\
&\angle S_{71} = \angle S_{FC} + \angle S_{CA} + \angle S_{EB} + \angle S_{BA} \\
&\angle S_{81} = \angle S_{CA} + \angle S_{FC} + \angle S_{CA} \qquad (۱) \\
&\angle S_{61} - \angle S_{51} = (\angle S_{FC} - \angle S_{EB}) + (\angle S_{CA} - \angle S_{BA}) + \angle S_{FC} \\
&\angle S_{71} - \angle S_{61} = (\angle S_{EB} - \angle S_{FC}) \\
&\angle S_{81} - \angle S_{71} = (\angle S_{CA} - \angle S_{BA}) - \angle S_{EB}
\end{aligned}$$

برای اینکه روابط ۱ بتوانند ماتریس باتلر را تشکیل دهند، شروط زیر باید برقرار باشند:

$$\begin{aligned}
&\angle S_{CA} - \angle S_{BA} = -90^{\circ} \\
&\angle S_{FC} - \angle S_{EB} = -45^{\circ} \qquad (۲)
\end{aligned}$$

روابط ۱ به طور مشابه برای تمام دهانه‌ها به دست می‌آید، در روابط ۱ و ۲، پارامتر S_{nm}، پارامتر پراکندگی با در نظر گرفتن دهانه m به عنوان ورودی و دهانه n به عنوان خروجی است.

جدول (۱): شروط فاز ماتریس باتلر

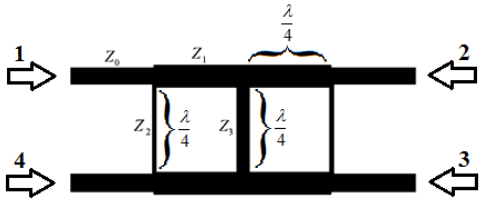
تحریک	فاز دهانه ۵	فاز دهانه ۶	فاز دهانه ۷	فاز دهانه ۸
دهانه ۱	۰	-۴۵	-۹۰	-۱۴۵
دهانه ۲	۰	۱۳۵	۹۰	۴۵
دهانه ۳	۰	-۱۳۵	-۹۰	-۴۵
دهانه ۴	۰	۴۵	۹۰	۱۳۵

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1398.16.4.21.2]

۳- طراحی ماتریس باتلر و اجزا آن

۳-۱- تزویج کننده شاخه‌ای ۹۰ درجه

تزویج کننده‌های شاخه‌ای از قطعات پر کاربرد مایکروویوند. به دلیل پهنای باند باریک این قطعه[۲۰]، از نمونه‌ی بهبود یافته‌ی آن در این طرح استفاده شده است[۲۱]-[۲۲]. شکل ۲ شمای این تزویج کننده را نشان می‌دهد که با افزایش تعداد بخش‌های تزویج کننده، پهنای باند افزایش پیدا کرده است. در مقایسه با نمونه‌ی قدیمی، این تزویج کننده از ۲ بخش تشکیل شده است. مشخصه‌ی اصلی این نمونه، پهن باند بودن آن در دامنه و فاز است. مقادیر امپدانس خطوط، در جدول ۲ آورده شده است.

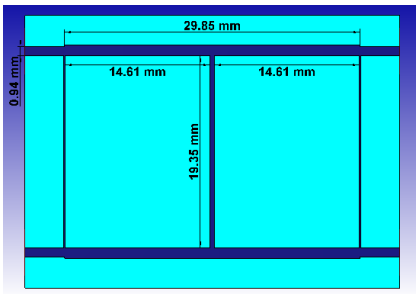


شکل (۲): تزویج کننده جهت‌دار شاخه‌ای دو بخشی پهن باند شده

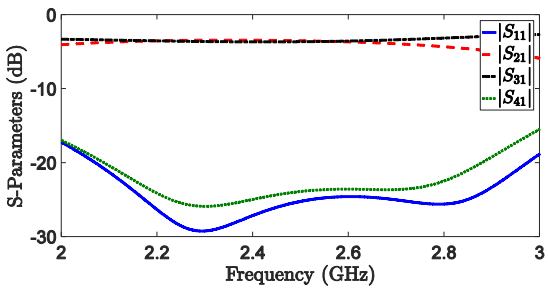
جدول (۲): امپدانس خطوط تزویج کننده ارایه شده در شکل ۲

Z_0	50 Ω
Z_1	46.33 Ω
Z_2	110.01 Ω
Z_3	71.43 Ω

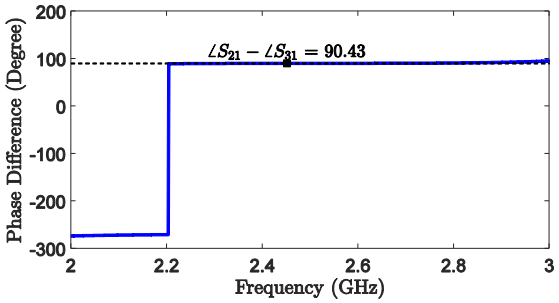
در شکل ۳ نمونه یک تزویج کننده بهبود یافته طراحی شده است بر روی زیرلایه FR4 در فرکانس کاری ۲/۴۵ گیگاهرتز نشان داده شده است که نتایج شبیه‌سازی پارامترهای پراکندگی در شکل ۴ آورده شده‌اند.



شکل (۳): تزویج کننده جهت‌دار شاخه‌ای دو بخشی طراحی شده



الف) مقادیر اندازه پارامترهای پراکندگی



ب) مقدار فاز S_{31}

شکل (۴): نتایج مقادیر دامنه‌ها و اختلاف فاز بدست آمده از شبیه سازی تزویج کننده شاخه‌ای ارایه شده در شکل ۳ - الف) مقادیر اندازه پارامترهای پراکندگی - ب) مقدار فاز S_{31}

همانگونه که از شکل ۴-الف مشخص است، مقادیر پارامترهای پراکندگی (S_{11} و S_{41}) در بازه فرکانسی ۲/۳ گیگاهرتز تا ۲/۷ گیگاهرتز بین ۲۰- تا ۳۰- دسیبل‌اند که نشانگر تطبیق امپدانس مناسب در دهانه یک و ایزوله بودن دهانه چهارم است و مقادیر S_{21} و S_{31} بسیار نزدیک به ۳ دسیبل‌اند که بیانگر تقسیم مساوی توان دهانه اول در دهانه‌های دوم و سوم است، لازم بذکر است کمی بیشتر بودن از ۳ دسیبل در این مقادیر بدلیل تلفات زیرلایه است که کاملا طبیعی است، همچنین شکل ۴-ب بیانگر اختلاف فاز ۹۰ درجه در خروجی دهانه‌های ۲ و ۳ است که مطابق انتظار است، بدین ترتیب تزویج کننده شاخه‌ای طراحی شده دارای عملکرد مناسب است.

۳-۲- تقاطع

به منظور مرتب شدن دهانه‌های خروجی و جلوگیری از چند لایه شدن ساختار، از عنصر تقاطع استفاده می‌شود. این قطعه، یک عنصر چهار دهانه‌ای است که سیگنال ورودی از دهانه یک را مشابه شکل ۵ به دهانه سه تحویل می‌دهد و نسبت به دو دهانه دیگر ایزوله است[۲۳]. ماتریس پراکندگی این قطعه در معادله ۳ ارائه شده است.

$$S = e^{-j\beta}\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \qquad (۳)$$

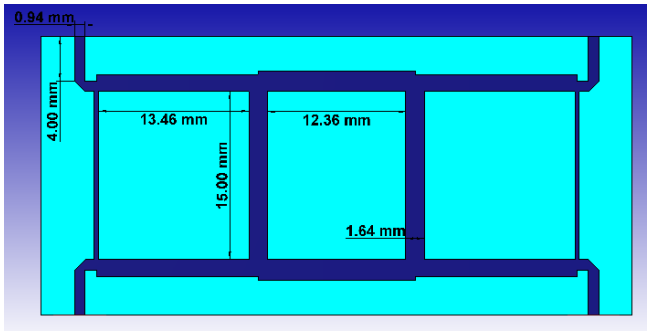
در این بخش نیز از نمونه‌ی پهن باندِ این عنصر استفاده شده است [۲۴]-[۲۵] به طوری که هر چه تعداد بخش‌های تقاطع افزایش یابد، پهنای باند بیشتری حاصل می‌شود. از یک تقاطع سه بخشی در این طرح استفاده شده است.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1398.16.4.21.2]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.16- No.4- Winter2018

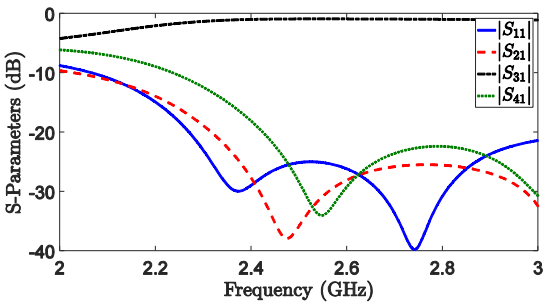


شکل (۵): تقاطع سه بخشی پهن باند شده

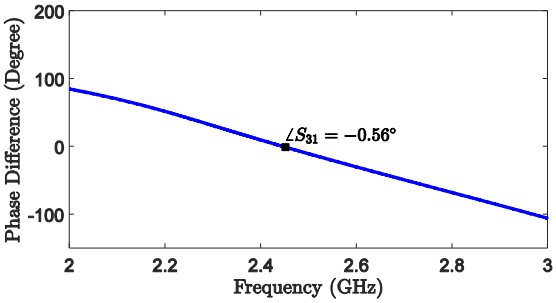
با توجه به ماتریس پراکندگی تقاطع، دامنه سیگنال ورودی بدون تغییر(در محاسبات بدون تغییر اما در عمل به دلیل تلفات زیرلایه اندکی تلفات در دامنه سیگنال خروجی مشاهده می‌شود) به خروجی منتقل می‌شود، همچنین فاز خروجی در حالت ایده‌آل باید صفر باشد اما فاز تقاطع تابعی از فرکانس، جنس و ارتفاع زیرلایه است، نکته حایز اهمیت این است که اختلاف فاز ایجاد شده بین ورودی و خروجی با توجه به نحوه‌ی طراحی می‌تواند هر مقداری داشته باشد زیرا در طراحی ماتریس باتلر از تقاطع به عنوان یک بخش تغییردهنده فاز استفاده می‌شود که در بخش آتی به تفصیل توضیح داده خواهد شد. در شکل ۶ یک نمونه تقاطع پهن‌باند طراحی شده بر روی زیرلایه FR4 در فرکانس کاری ۲/۴۵ گیگاهرتز نشان داده شده است که نتایج شبیه‌سازی در شکل ۷ آورده شده‌اند.



شکل (۶): تقاطع پهن باند طراحی شده



الف) مقادیر اندازه پارامترهای پراکندگی



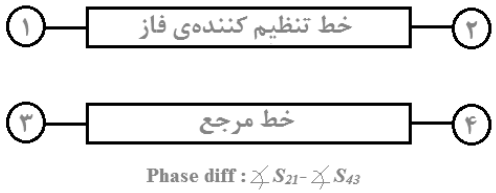
ب) مقدار فاز S_{31}

شکل (۷): نتایج مقادیر اندازه پارامترهای پراکندگی و فاز S_{31} بدست آمده از شبیه‌سازی تقاطع پهن باند ارایه شده در شکل ۶ - الف) مقادیر اندازه پارامترهای پراکندگی- ب) مقدار فاز S_{31}

نتایج ارایه شده در شکل ۷-الف بیان می‌کند تطبیق امپدانس خوبی در دهانه ۱ وجود دارد و ایزولاسیون مناسبی در دهانه‌های ۲ و ۴ است، مقادیر این تطبیق و ایزولاسیون‌ها بر روی شکل نشان داده شده است، همچنین تمام سیگنال وارده به دهانه ۱ عینا به دهانه ۳ انتقال می‌یابد و مقدار بسیار ناچیزی افت بخاطر تلفات زیرلایه وجود دارد که کاملا طبیعی است، شکل ۷-ب نشانگر فاز S_{31} است که در طراحی تغییردهنده فاز شیفمن به عنوان یک بازوی تغییردهنده فاز استفاده می‌شود، تغییر فاز بدست آمده بدست آمده صفر درجه است.

۳-۳- تغییردهنده فاز شیفمن

برای عملکرد مناسب ماتریس باتلر به تغییردهنده فاز با پهنای باند بالا نیاز است، تغییردهنده فاز شیفمن یکی از مناسب‌ترین تغییردهنده‌های پهن باند است که ساختار ساده‌ای دارد. تغییردهنده فاز شیفمن، یک تغییردهنده فاز تفاضلی است[۲۶]، تغییردهنده‌های فاز تفاضلی یک شبکه چهار دهانه‌ای شامل خط تنظیم کننده فاز و خط اصلی مطابق شکل ۸ است.



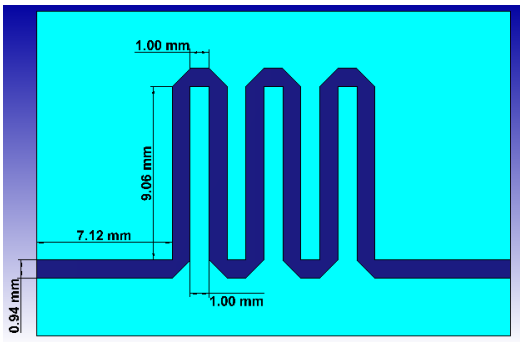
شکل (۸): توپولوژی تغییردهنده فاز تفاضلی

در تغییردهنده‌های فاز شیفمن، از اختلاف فاز یک خط تزویج شده U شکل به عنوان خط تنظیم کننده فاز با فاز یک خط مرجع استفاده می شود تا تغییر فاز مطلوب ایجاد گردد [۲۷] تا [۳۰]. در ماتریس باتلر، از فاز S_{31} به عنوان فاز خط مرجع و از یک خط U شکل تزویج شده به عنوان خط تنظیم کننده فاز استفاده می‌شود.

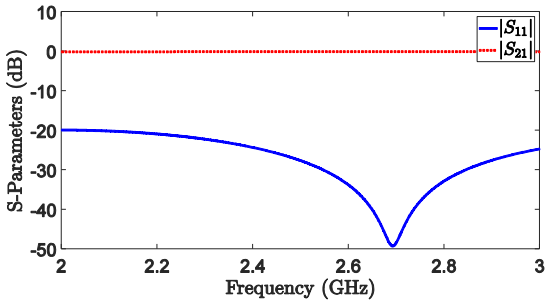
در شکل ۹ با کمک چند خط تزویج شده U شکل یک تغییر دهنده فاز ۴۵- درجه طراحی می‌شود، نکته مهم در طراحی، یکسان بودن

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1398.16.4.21.2]

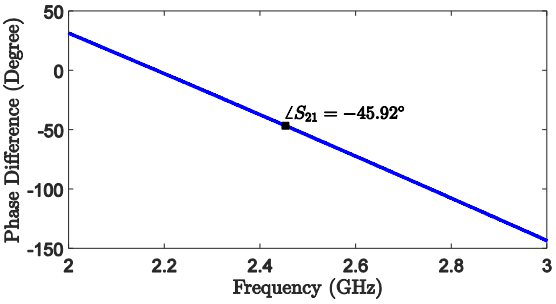
شیب خط طراحی شده با شیب تقاطع و ایجاد اختلاف فاز ۴۵ درجه با اختلاف فاز تقاطع در نقطه کاری است. به عبارتی از تقاطع به عنوان بازوی مرجع فاز تغییردهنده فاز و از خط U شکل به عنوان خط تنظیم کننده فاز تغییردهنده فاز استفاده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ آورده شده‌اند.



شکل (۹): تغییردهنده فاز شیفمن طراحی شده ۴۵- درجه

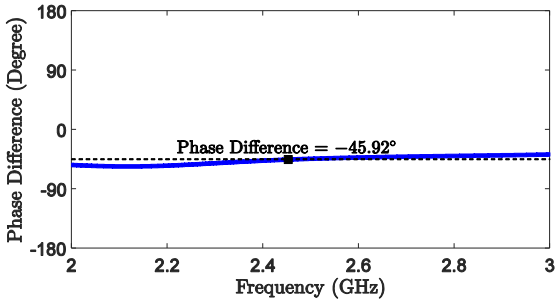


الف) مقادیر اندازه پارامترهای پراکندگی



ب) مقدار فاز S_{21}

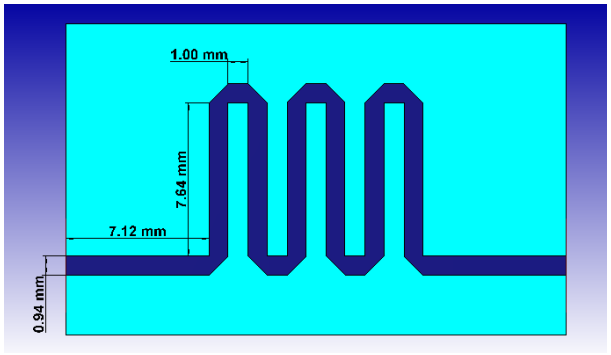
شکل (۱۰): نتایج مقادیر دامنه و فاز S_{21} بدست آمده از شبیه‌سازی تغییردهنده فاز شیفمن ارایه شده در شکل ۱۰- الف) مقادیر اندازه پارامترهای پراکندگی - ب) مقدار فاز S_{21}



شکل (۱۱): نتیجه اختلاف فاز اشکال ارایه شده در شکل ۶ و ۹، بدست آمده از شبیه‌سازی

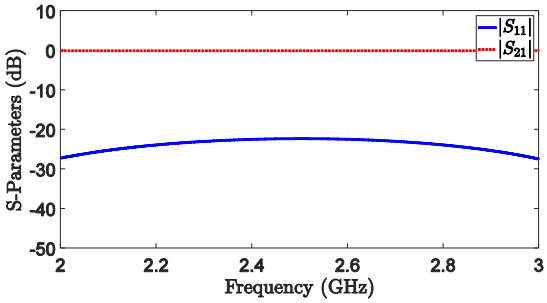
همانگونه که ملاحظه می‌شود تغییردهنده فاز تفاضلی متشکل از تقاطع و تغییردهنده فاز یک خط مستقیم است که در یک محدود وسیع(بیش از یک گیگاهرتز) تقریبا برابر ۴۵- درجه است.

در شکل ۱۲ نمونه یک تغییردهنده فاز شیفمن صفر درجه ارائه شده است، مراحل طراحی همانند تغییردهنده فاز ۴۵- درجه است، لازم بذکر است از این تغییردهنده در خروجی ماتریس باتلر و جهت تنظیم فاز ناشی از تقاطع استفاده شده در این طبقه استفاده می‌شود.



شکل (۱۲): تغییردهنده فاز شیفمن صفر درجه طراحی شده

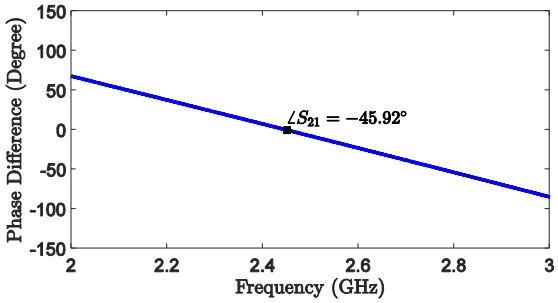
نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ آورده شده‌اند.



الف) مقادیر اندازه پارامترهای پراکندگی

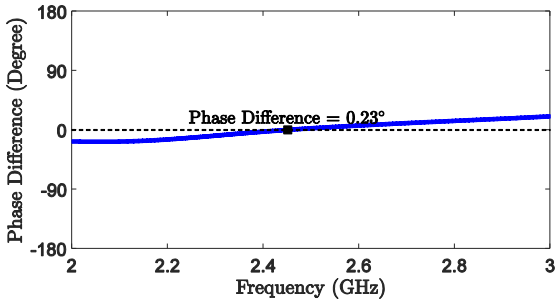
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1398.16.4.21.2]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.16- No.4- Winter2018



ب) مقدار فاز S21

شکل (۱۳): نتایج مقادیر دامنه‌ها و فاز S21 بدست آمده از شبیه-سازی تغییردهنده فاز شیفمن ارایه شده در شکل ۱۲- الف) مقادیر اندازه پارامترهای پراکندگی - ب) مقدار فاز



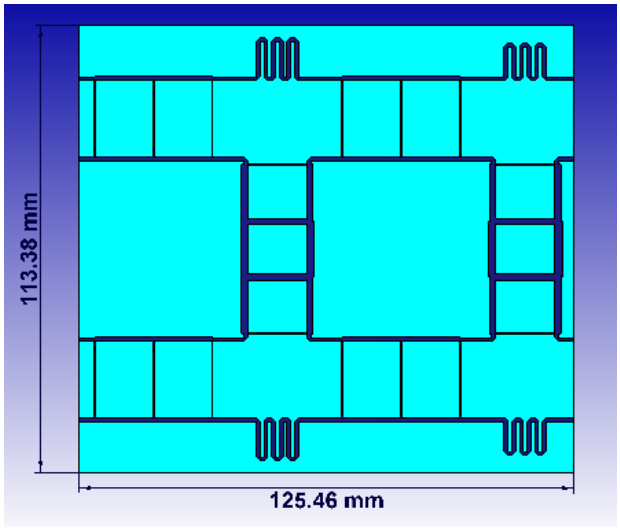
شکل (۱۴): نتیجه اختلاف فاز اشکال ارایه شده در شکل ۶ و ۱۲، بدست آمده از شبیه‌سازی

همانگونه که ملاحظه می‌شود تغییردهنده فاز تفاضلی متشکل از تقاطع و تغییردهنده فاز یک خط مستقیم است که در یک محدود وسیع تقریبا(بیش از یک گیگاهرتز) برابر صفر درجه است.

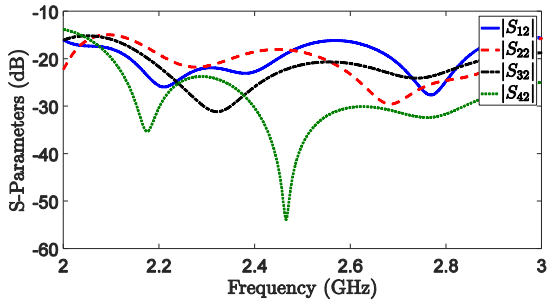
در روش ارائه شده در این مقاله، طراحی شیفت‌دهنده فاز شیفمن، مهمترین بخش طراحی ماتریس باتلر است، از این رو جهت شفافیت بیشتر، خلاصه روش طراحی این شیفت دهنده تفاضلی مجددا بیان می‌شود. ابتدا شیب نمودار فاز تقاطع‌های طراحی شده اندازه‌گیری می-شوند و در ادامه، یک خط تزویج شده، که در مدار به موازات تقاطع قرار خواهد گرفت، به گونه ای طراحی می‌شود که فاز این خط دارای شیبی همانند شیب تقاطع مورد نظر باشد. سپس خط تزویج شده طوری تنظیم می‌شود که اختلاف فاز مورد نظر بدست آید، در این لحظه طراحی اتمام می‌یابد، با توجه به اینکه شیب نمودار فازِ هر دو خط تزویج شده و تقاطع در یک محدوده از پیش تعیین شده تقریبا یکسان است و این دو ساختار در مدار به موازات هم قرار می‌گیرند، اختلاف فاز این دو خط، یک فاز ثابت در محدوده مورد نظر را ارایه می‌کند.

۴- شبیه سازی و ساخت

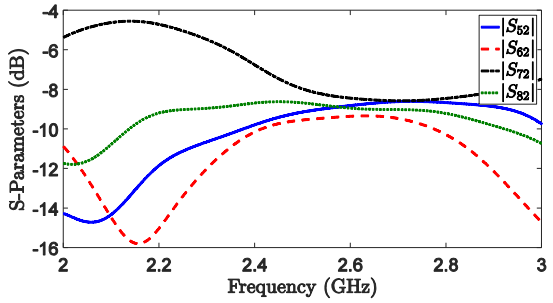
با کنارهم قرار دادن عنصرهای طراحی شده در بخش قبل، مطابق بلوک دیاگرام ارائه شده در شکل ۱، ماتریس باتلر مورد نظر طراحی می شود، شکل ۱۵ نمونه ماتریس باتلر طراحی شده بر روی زیرلایه FR4 در فرکانس مرکزی ۲/۴۵ گیگاهرتز را در محیط نرم-افزاری نشان می دهد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای مقادیر دامنه‌های ورودی‌ها و خروجی‌ها و اختلاف فاز دهانه‌های خروجی متوالی، با تحریک دهانه اول به ترتیب در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ و با تحریک دهانه دوم در شکل-های ۱۸ و ۱۹ آورده شده اند. با توجه به تقارن مداری ماتریس باتلر طراحی شده، نتایج تحریک دهانه‌های ۳ و ۴ به ترتیب با نتایج تحریک دهانه‌های ۲ و ۱ یکسان است.



شکل (۱۵): ماتریس باتلر ۴×۴ طراحی شده



الف) پارامترهای پراکندگی سمت ورودی

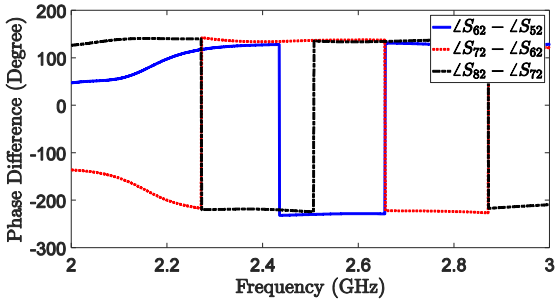


ب) پارامترهای پراکندگی سمت خروجی

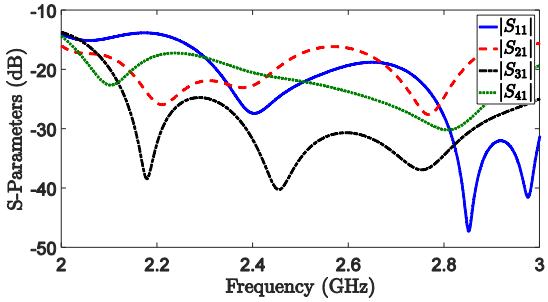
شکل (۱۶): پارامترهای پراکندگی ماتریس باتلر ارایه شده در شکل ۱۵ با تحریک دهانه اول - الف) پارامترهای پراکندگی سمت ورودی - ب) پارامترهای پراکندگی سمت خروجی

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

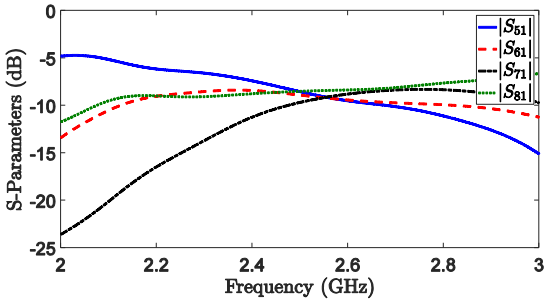
[DOR: 20.1001.1.26765810.1398.16.4.21.2]



شکل (۱۷): مقادیر اختلاف فاز دهانه‌های خروجی متوالی ماتریس باتلر ارایه شده در شکل ۱۵ با تحریک دهانه اول

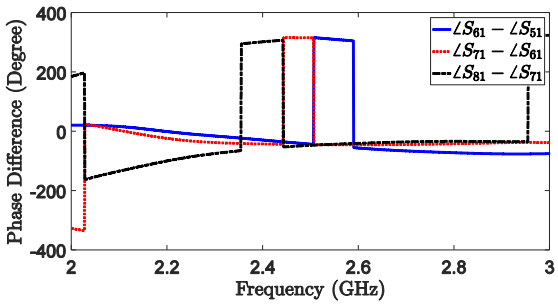


الف) پارامترهای پراکندگی سمت ورودی



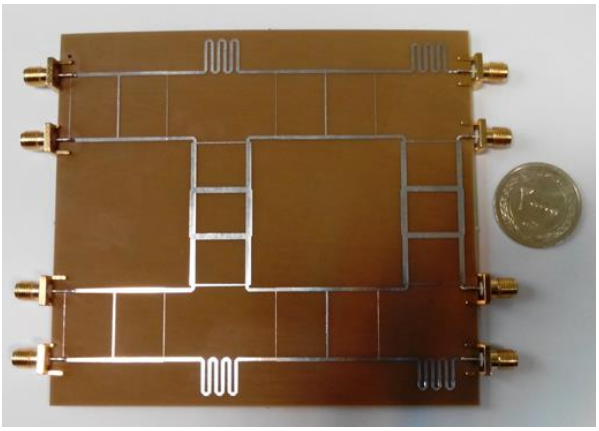
ب) پارامترهای پراکندگی سمت خروجی

شکل (۱۸): پارامترهای پراکندگی ماتریس باتلر ارایه شده در شکل ۱۵با تحریک دهانه دوم - الف) پارامترهای پراکندگی سمت ورودی - ب) پارامترهای پراکندگی سمت خروجی

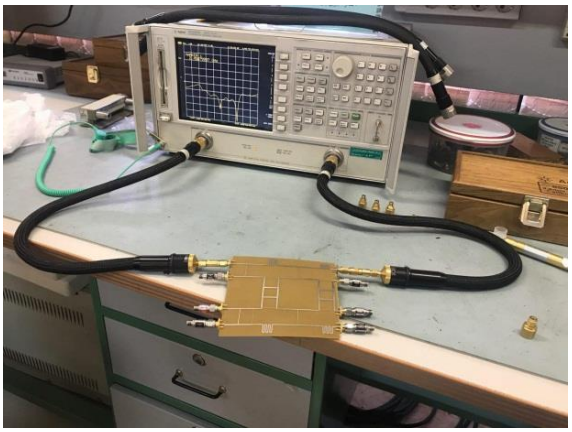


شکل (۱۹): مقادیر اختلاف فاز دهانه‌های خروجی متوالی ماتریس باتلر ارایه شده در شکل ۱۵ با تحریک دهانه دوم

مطابق شکل ۲۰، نمونه‌ای از ماتریس باتلر ارایه شده در شکل ۱۵ ساخته شده و نتایج حاصل از اندازه گیری‌های مربوطه در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ آورده شده است.

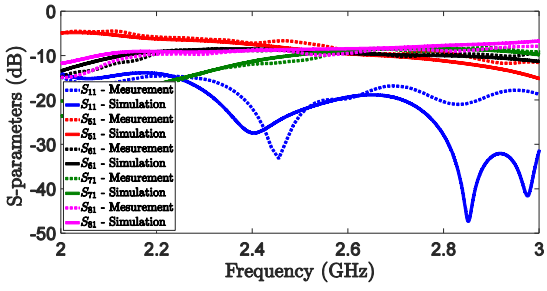


الف) نمونه ساخته شده



ب) تست نمونه آزمایشگاهی

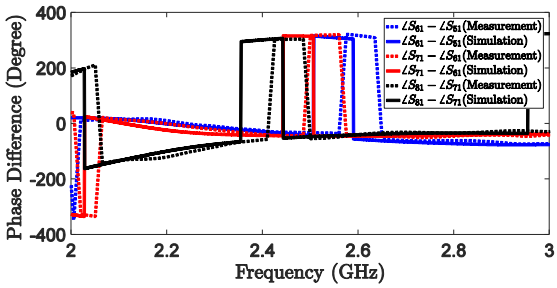
شکل (۲۰): نمونه ماتریس باتلر ۴×۴ ساخته شده و تست نمونه‌ی آزمایشگاهی –الف) نمونه ساخته شده –ب) تست نمونه‌ی آزمایشگاهی



شکل (۲۱): نتایج پارامترهای پراکندگی اندازه‌گیری شده ماتریس باتلر با تحریک دهانه اول

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1398.16.4.21.2]



شکل (۲۲): نتایج اختلاف فازهای اندازه‌گیری شده ماتریس باتلر با تحریک دهانه اول

همانطور که ملاحظه می‌شود نتایج اندازه‌گیری قابل قبول است اما دارای یک انتقال فرکانسی جزئی است که این انتقال فرکانسی ناشی از عدم مشخص بودن دقیق ضریب دی‌الکتریک زیرلایه FR4 است.

۵- بررسی و مقایسه

جهت بررسی بهتر و نشان دادن مطلوبتر عملکرد نمونه طراحی شده در این مقاله نسبت به نمونه‌های موجود، در جدول زیر نمونه ارایه شده با چندین نمونه از منظر پارامترهای S_{11}، پهنای باند، ایزولاسیون و اندازه ساختار مقایسه شده است. با توجه به جدول ارایه شده، بهبود عملکرد ساختار به وضوح مشخص است.

جدول (۳): مقایسه نمونه طراحی شده با مراجع [۳۱]-[۳۳]

پارامتر	این مقاله	[۳۱]	[۳۲]	[۳۳]
S_{11} (dB)	-۴۰	-۳۵	-۲۲	-۲۳
پهنای باند (GHz)	۰/۴	۰/۶۵	۰/۲۵	۰/۲۵
ایزولاسیون (dB)	-۲۴	-۳۰	-۲۲	-۲۶
فرکانس‌کاری (GHz)	۲/۴۵	۲/۴	۱/۹	۲
اندازه (cm×cm)	۱۲/۵×۱۱/۳	۱۷/۳×۱۷/۳	۲۸×۱۱	۱۴×۲۸

۶- نتیجه‌گیری

یک ماتریس باتلر ۴×۴ بر روی زیر لایه FR4، در بازه فرکانسی ۲/۳ گیگاهرتز تا ۲/۷ گیگاهرتز شبیه‌سازی و طراحی شد، پهنای باند فاز ±۱۰ درجه در فرکانس مرکزی بیش از ۱۰٪ است، تلفات بازگشتی و ایزولاسیون این ساختار ۸-۱۰ دسیبل و ۲۰-۲۵ دسیبل است. این ساختار از تزویج کننده شاخه‌ای دو بخشی پهن باند، تقاطع سه بخشی پهن باند و تغییردهنده فاز شیفمن ۴۵- و صفر درجه تشکیل یافته است، از مهمترین ویژگی‌های ماتریس باتلر می‌توان به سادگی طراحی و سبک بودن ساختار اشاره کرد، همچنین یک نمونه از این ساختار طراحی شده ساخته شد و در پژوهشگاه مخابرات اندازه‌گیری شد و نتایج اندازه‌گیری با نتایج شبیه‌سازی مقایسه شد. از این روش در طراحی ماتریس باتلری با تعداد المان‌های ورودی و خروجی متفاوت مانند ۸×۸ و ۱۶×۱۶ می‌توان استفاده نمود.

مراجع

[1] [1] G. Marconi, "Directive Antenna," Proc. Royal Soc., vol. 77A, p. 413, 1906.
[2] Http://en.wikipedia.org/wiki/Karl_Ferdinand_Braun
[3] R. J. Mailloux, "Electronically scanned arrays," 1th edit. Morgan & Claypool, 2007.
[4] R. C. HANSEN, "Phased Array Antennas", 2nd edit. Wiley, 2009.
[5] C.A. Balanis, "Antenna theory analysis and design", 3rd edit., Wiley, 2005.
[6] Danial Ehyaie, "Novel Approaches to the Design of Phased Array Antennas" A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of Doctor of Philosophy, The University of Michigan, 2011.
[7] Alex Ibbotson and Keith D. Palmer, "A Defocused Rotman Lens with Reduced Conjugate Port Coupling," IEEE microw. wireless compon. Lett., vol. 23, no. 8, pp. 394-396, 2013.
[8] Min Yu, Deshuang Zhao and Zhong Wang, "Near-field Image Restoration for Rotman Lens by Localized Angle-time Spread Function Based Filtering Method," IEEE Trans. on Ant. & Propag., Vol.63, no. 5, pp. 2353-2358, 2015.
[9] David Hilaro, Armando Arce Casas, "Contribution to design and application of beamforming network based on CORPS," A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of Doctor of science, Ensenada, Baja California, 2012.
[10] A.K. Bhattacharyya "Phased array antennas" 1th edit., Wiley, 2006.
[11] Erio Gandini, Mauro Ettorre, Ronan Sauleau and Anthony Grbic, "A Lumped-Element Unit Cell for Beam-Forming Networks and Its Application to a Miniaturized Butler Matrix," IEEE Trans. on Microw. Theory Tech., vol. 61, no. 4, pp. 1477-1487, 2013.
[12] Mourad Nedil and Tayeb A. Denidni, "Novel Butler Matrix Using CPW Multilayer Technology," IEEE Trans. on Microw. Theory Tech., vol. 54, no. 1, pp. 499-507, 2006.
[13] Yu Jian Cheng, Wen Bin He, Cheng Xiang Weng and Yong Fan, "Frequency-agile Butler matrix with good interference suppression for multiple radio wireless platforms," IET Microw. Ant. Propag., vol. 7, no. 7, pp. 563–568, 2013.
[14] Mahmoud Moubadir, Mohamed Bayijja and Naima, "Design and Implementation of a Technology Planar 8x8 Butler Matrix with Square Truncated Edge-Fed Array Antenna for WLAN Networks Application," 2015 IEEE I. Conf. on Wireless Networks Mob. Comm., Marrakech, Morocco, 2015.
[15] M. Wang and X. Wang, "Compact Butler matrix using composite right/left handed transmission line," IEEE Elec. Lett., vol. 47, no. 19, pp. 1081-1083, 2011.
[16] Ge Tian, Jin-Ping Yang and Wen Wu, "A Novel Compact Butler Matrix Without Phase Shifter," IEEE Microw. Wireless Compon. lett., vol. 24, no. 5, pp. 306-308, 2014.
[17] Jesse Butler and Ralph Lowe, "Beam-Forming Matrix Simplifies Design of Electronically Scanned Antennas," Elec. Design, vol. 9, pp. 170-173, 1961.
[18] hia-Chan Chang, Ruey-Hsuan Lee, and Ting-Yen Shih, " Design of a Beam Switching/Steering Butler Matrix for Phased Array System," IEEE Trans. on Ant. & Propag., vol. 58, no. 2, 2010.
[19] T. Hong Lin, S. Kuei Hsu and T.Lin Wu , "Bandwidth enhancement of 4×4 Butler matrix using broadband forward-wave directional coupler and phase difference

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1398.16.4.21.2]

compensation," IEEE Trans. on Microw. Theory Tech., vol. 61, no.12, pp. 4099-4109, 2013.
[20] D. M. Pozar, "Microwave Engineering", 4rd edit., Wiley, 2012.
[21] M. Muraguchi, M. Yukitake and Y. Naito, "Optimum design of 3-dB branch-line couplers using microstrip lines," IEEE Trans. on Microw. Theory Tech., vol. 31, no. 8, pp. 674-678, 1983.
[22] Oraizi H, Salami O, Chaychi Zadeh M A., "Bandwidth Enhancement and Optimization of SIW Branch-Line Coupler by Least Squares Method," Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, vol. 12, no. 2, pp. 85-94, 2015.
[23] L.G. Maloratsky "Passive RF and Microwave Integrated Circuits", 1th edit., Elsevier., 2004
[24] J. Yao, C. Lee, and S. Yeo, "Microstrip branch-line couplers for crossover application," IEEE Trans. On Microw. Theory Tech., vol. 59, no. 1, pp. 87-92, 2011.
[25] H. Oraizi, Jamal Hamedfar, "Optimum Design of Broadband Branch-Line Couplers with Arbitrary Power Division and Impedance Transformation," I. J. Wireless & Opt. Comm., vol. 2, no. 02, pp. 203-221, 2004.
[26] H. Oraizi and A. Shamsafar, "Optimum Design of Modified Schiffman Multi-Section Wide Band Differential Phase Shifter with Impedance Matching," Prog. Electromag. Research C, Vol. 29, pp. 1-16, 2012.
[27] Schiffman, B. M. "A new class of broad-band microwave 90-degree phase shifters," IRE Trans. on Microw. Theory Tech., Vol. 6, no. 2, pp. 232-237, 1958.
[28] Oraizi, H. and A. Shamsafar, "Design and optimization of wideband multi section coupled-line phase shifters with impedance matching," PIERS Proceedings, Moscow, Russia, pp. 1450-1453, 2009.
[29] J.L. Ramos Quirarte and J. Piotr Starski "Novel Schiffman Phase Shifters," IEEE Trans. on Microw. Theory Tech., vol. 41, no. 1, pp. 9-14, 1993.
[30] H. Oraizi and Alireza Shamsafar, "Optimum design of broadband schiffman phase shifters incorporating load and source impedance matching," 2009 International Conference on Advances in Computational Tools for Engineering Applications, Zouk Mosbeh, Lebanon, 2009.
[31] Hamza Nachouane, Abdellah Najid, Abdelwahed Tribak and Fatima Riouch, "Broadband 4x4 Butler Matrix Using Wideband 90◦ hybrid Couplers and Crossovers for Beamforming Networks," I. Confe. on Multimedia Computing Syst., pp. 1444-1448, Marrakech, Morocco, 2014.
[32] T. A. Denidni, T. E. Libar, “Wide band four-port butler matrix for switched multibeam antenna arrays”, IEEE Proc. Personal, Indoor and Mob. Radio Comm., pp. 2461-2463, Montreal, Canada, 2003.
[33] D. J. Ma, H. L. Peng, W. Y. Yin, J. Mao. “The Realization of High Isolation and Wide Band 4x4 Microstrip Butler Matrix”, Microw. Tech. Computational Electromag., 2009.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1398.16.4.21.2]