

## شیفت دهنده فاز ۱۸۰ درجه په‌ن باند با خطای فاز پایین

فواد فریدونی<sup>۱\*</sup>، سمیه چمانی<sup>۲</sup>، سید عبدالله میرطاهری<sup>۳</sup> و محمد علی سبط<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۲و۴- استادیار، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی،

۳- دانشیار دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت: ۹۳/۱۱/۲۰، تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۲/۱۵)

**چکیده:** در این مقاله یک شیفت دهنده فاز ۱۸۰ درجه با قابلیت کاربرد در بازه فرکانسی ۳-۵GHz طراحی می‌شود. عملکرد ساختار بر مبنای تبدیل خطوط میکرواستریپ به موج‌بر هم صفحه (CPW) و بالعکس است. بدین منظور با استفاده از یک تبدیل متوالی میکرواستریپ به CPW به میکرواستریپ و پس از انجام یک فرایند بهینه‌سازی، عمل شیفت فاز ۱۸۰ درجه تحقق می‌یابد. ساختار پیشنهادی دارای تطبیق امپدانس مناسب ( $S_{11} < -10$  dB) و افت عبوری پایین ( $|S_{21}| < 2$  dB) در بازه فرکانسی مورد نظر بوده و همچنین مقدار شیفت فاز ۱۸۰ درجه با خطای فاز پایین ۶ درجه را حاصل می‌کند. به منظور تأیید ادعای فوق، ساختار ابتدا به صورت عددی شبیه‌سازی شده و پس از پیاده‌سازی، نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری مقایسه شدند. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده عملکرد مناسب ساختار پیشنهادی بوده و نویدبخش استفاده از آن در کاربردهای مختلف مانند مدولاتورهای شیفت فاز باینری (BPSK) و ساختارهای تغذیه آنتن‌های آرایه‌ای است. علاوه بر این، طرح پیشنهادی نسبت به ساختارهای مدار مجتمع ساده‌تر بوده و هزینه پیاده‌سازی آن پایین‌تر است.

## واژه‌های کلیدی: شیفت دهنده فاز، خطای فاز، مدولاتور شیفت فاز، تبدیل خطوط میکرواستریپ

### ۱- مقدمه

با توجه به پیشرفت‌های صورت گرفته در حوزه فناوری فرایه‌ن باند (UWB) در سال‌های اخیر، نیاز به طراحی و پیاده‌سازی سامانه‌های په‌ن باند به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. شیفت دهنده‌های فاز ۱۸۰ درجه یکی از ادوات مهم سامانه‌های ماکروویو هستند که در کاربردهای مختلف از جمله ساختارهای شکل‌دهی پرتو در سامانه‌های آرایه‌ای، آنتن‌های آرایه‌فازی [۱]، مقسم‌های توان [۲] و مدولاتورهای شیفت فاز [۳] استفاده می‌شوند. به عنوان مثال در ساختارهای آرایه‌ای برای دستیابی به الگوی تابشی مناسب، تغذیه آنتن‌ها با فاز متفاوت صورت می‌گیرد که این هدف با شیفت دهنده‌های فاز په‌ن باند امکان‌پذیر خواهد بود. همچنین در مدولاتورهای شیفت فاز باینری، شیفت‌دهنده‌ها وظیفه ایجاد اختلاف فاز مناسب در سیگنال خروجی با توجه به سیگنال‌های کنترل در ورودی را بر عهده دارند؛ بنابراین طراحی یک شیفت‌دهنده فاز په‌ن باند با خطای فاز پایین یک شرط اساسی برای دستیابی به نتیجه مناسب در کاربردهای نامبرده است.

شیفت‌دهنده‌های فاز معمولاً در انواع مختلفی طراحی و پیاده‌سازی می‌شوند. شیفت‌دهنده‌های متغیر که معمولاً به صورت تجاری با استفاده از فناوری‌های مدار مجتمع (MMIC و MEMS) ساخته می‌شوند قادر هستند با توجه به یک سیگنال کنترل خارجی، شیفت فازهای متغیر به صورت دیجیتال یا آنالوگ را تولید کنند. این نوع از ساختارها معمولاً یک گستره وسیع فرکانسی و شیفت فاز را پوشش می‌دهند.

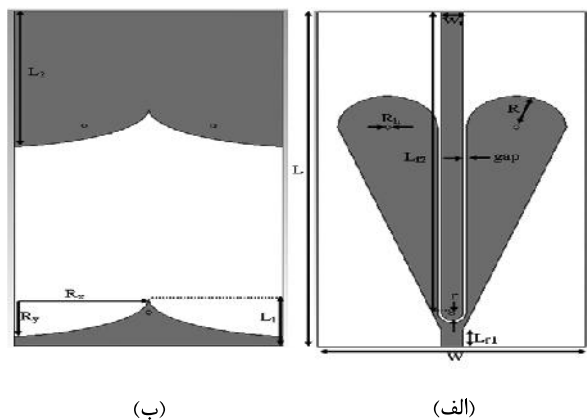
در مقابل شیفت‌دهنده‌های متغیر، ساختارهای با شیفت فاز ثابت قرار دارند که در طول یک بازه فرکانسی مشخص، شیفت فاز ثابتی را تولید می‌کنند [۱ و ۴]. این ساختارها نسبت به حالت قبلی به صورت ساده‌تر و با استفاده از خطوط میکرو استریپ پیاده‌سازی می‌شوند و نیازی به منبع کنترل خارجی ندارند. اگرچه دستیابی به یک شیفت فاز ثابت در طول بازه فرکانسی بزرگ به عنوان یک چالش در این نوع از شیفت‌دهنده‌های فاز معرفی می‌شود، در کاربردهایی که فقط نیاز به یک شیفت ثابت (مثلاً ۱۸۰ درجه) وجود دارد استفاده از آن‌ها به دلیل کاهش قابل توجه هزینه‌ها و پیچیدگی ساختار توصیه می‌شود.

را برای کاربردهای بیشتری مناسب می‌سازد. لازم به ذکر است ساختار پیشنهادی دارای خطای فاز و افت عبوری پایینی است در حالی که در مراجع قبلی اشاره‌ای به این موارد نشده است.

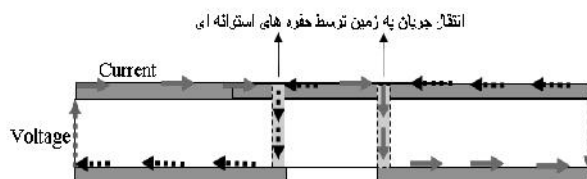
ادامه بخش‌های مقاله به ترتیب زیر ارائه خواهند شد. در بخش دوم ساختار شیفتهنده پیشنهادی به تفصیل بررسی خواهد شد. در بخش سوم نتایج شبیه‌سازی، اندازه‌گیری و تحلیل پارامتری ساختار ارائه خواهد شد. در بخش پایانی نیز نتیجه‌گیری موضوع ارائه خواهد شد.

## ۲- طراحی

در شکل (۱-الف) نمای فوقانی و در قسمت (۱-ب) نمای زیر ساختار پیشنهادی به همراه پارامترهای مختلف آن نشان داده شده است. این ساختار بر روی برد راجرز RO4003 با ثابت دی‌الکتریک ۳٫۳۸ و ضخامت ۲۰mm (۰٫۵۰۸ mm) و تانژانت تلفات ۰٫۰۰۲۷ پیاده‌سازی شده است. همان‌طور که می‌بینیم پارامترهای مختلفی در ساختار وجود دارند که ابعاد آن‌ها برای دست‌یابی به خروجی مناسب در یک فرایند بهینه‌سازی بهینه خواهد شد.



شکل ۱: (الف) نمای بالا (ب) نمای پایین ساختار



شکل ۲: نحوه توزیع جریان و قطبش ولتاژ در ساختار پیشنهادی

یک فرایند بهینه‌سازی بهینه خواهد شد. در لایه بالایی، ساختار با یک خط میکرواستریپ ۵۰ اهم شروع شده سپس با یک تبدیل باریک‌شونده میکرواستریپ به CPW ادامه می‌یابد و در نهایت با یک

ساده‌ترین ساختار شیفتهنده فاز، استفاده از دو خط میکرواستریپ با اختلاف طول مشخص (نصف طول موج در حالت شیفته فاز ۱۸۰ درجه) است که با توجه به فرکانس مرکزی، عمل شیفته فاز انجام می‌گیرد؛ اما پهنای باند فرکانسی این ساختار بسیار محدود بوده و امکان استفاده از آن را در کاربردهای پهن باند با مشکل روبرو می‌کند. برای غلبه بر این مشکل و ایجاد ساختارهای پهن باند، معمولاً از تبدیل بین خطوط میکرواستریپ مختلف مانند CPW [۵]، [۶] استفاده می‌شود. در [۱] با استفاده از تبدیل‌های متوالی میکرواستریپ به CPW، برای میکرواستریپ یک ساختار جدید جهت شیفته فاز ۱۸۰ درجه پیشنهاد شده است که در بازه فرکانسی ۵/۵-۱۸ GHz عملکرد مناسبی را دارا است؛ اما ساختار فوق در فرکانس‌های کمتر از ۵ GHz از نظر پهنای باند و شیفته فاز خروجی مناسبی ندارد.

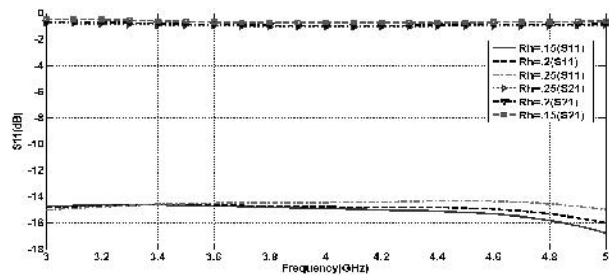
در این مقاله، با استفاده از پیکربندی تبدیل میکرواستریپ به CPW به میکرواستریپ ساختار شیفتهنده فاز ۱۸۰ درجه پهن باند در بازه فرکانسی ۳-۵ GHz پیشنهاد شده است. این بازه فرکانسی در واقع گستره موردنظر برای پیاده‌سازی یک مدولاتور پهن باند شیفته فاز است که طرح پیشنهادی نیز به‌عنوان بخشی از آن استفاده خواهد شد. برای دست‌یابی به عملکرد مناسب، ساختار پیشنهادی از جنبه مختلف مانند افت بازگشتی ( $S_{11}$ )، مقدار شیفته فاز و همچنین میزان خطای فاز بهینه شده است. شبیه‌سازی ساختار مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار CST انجام شده است.

نتایج اندازه‌گیری نیز با شبیه‌سازی همخوانی قابل قبولی دارد که مؤید عملکرد قابل قبول طرح موردنظر است. نتایج نشان می‌دهند که در بازه ۳-۵ GHz ساختار دارای پهنای باند امیدانی قابل قبول است ( $S_{11} < -10\text{dB}$ ). همچنین مقدار شیفته فاز تولیدشده برابر با ۱۸۹ درجه است که در حدود ۶ درجه خطای فاز و ۲dB افت عبوری نیز در عبور سیگنال مشاهده شده است. مقدار ۹ درجه انحراف از ۱۸۰ درجه به دلیل پارامترهای جانبی مانند اثر لحیم‌کاری و اثر کانکتورهای SMA بوده و اجتناب‌ناپذیر است. البته این مقدار انحراف در کاربردهای نامبرده از جمله مدولاتور، خطای قابل توجهی ایجاد نمی‌کند.

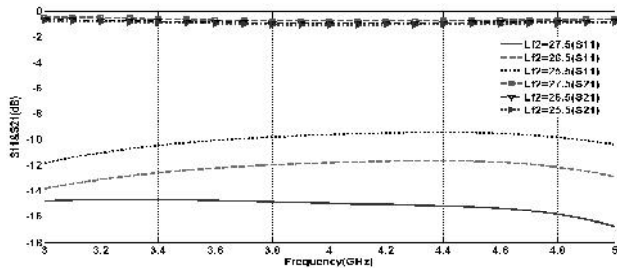
در مقایسه با ساختارهای شیفته دهنده فاز پیاده‌سازی شده با مدار مجتمع [۷]، ساختار پیشنهادی دارای پیکربندی ساده‌تر و هزینه ساخت بسیار پایین‌تر و پهنای باند بزرگ‌تری است. همچنین پهنای باند نسبی ساختار نسبت به [۱] افزایش یافته و شروع بازه فرکانسی آن کاهش یافته است که این مسئله استفاده از ساختار فوق

منحنی‌های افت بازگشتی ( $S_{11}$ ) و افت عبوری ( $S_{21}$ ) برای مقادیر مختلف پارامتر ( $L_{f1}$ ) به‌عنوان یکی از پارامترهای تأثیرگذار بررسی شده است. در این حالت همه پارامترهای دیگر برابر با مقادیر گزارش شده، در جدول قرار داده شده به جز  $L_{f1}$  و  $L_{f2}$  که باید متناسب با  $L_{f1}$  تغییر کنند تا مکان حفره‌ها ثابت بماند.

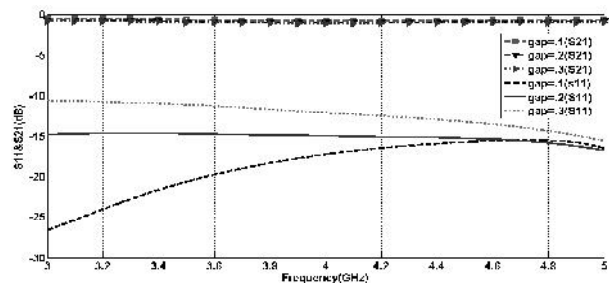
همان‌طور که می‌بینیم مقادیر کوچک‌تر  $L_{f1}$  یا  $L_{f2}$  بلندتر باعث بهبود  $S_{11}$  شده درحالی‌که  $S_{21}$  تغییرات اندکی دارد مقدار آن کمتر از ۱dB - باقی می‌ماند. با توجه به اینکه اختلاف فاز نیز در این حالت تغییرات کمی دارد، مقدار بهینه  $L_{f1}$  باهدف دستیابی به مقدار قابل قبول برای  $S_{11}$  انتخاب می‌شود. در شکل (۴-ب) منحنی‌های افت بازگشتی برای مقادیر مختلف شعاع حفره‌ها نشان داده شده است.



(الف)



(ب)



(پ)

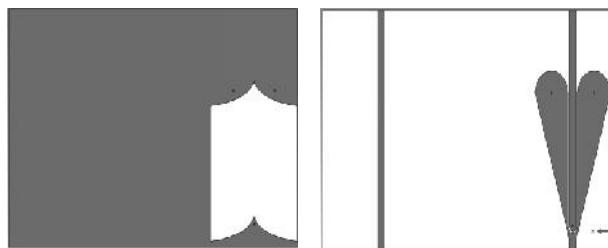
شکل ۴: منحنی‌های  $S_{11}$  و  $S_{21}$  با تغییر پارامترهای (الف)  $L_{f1}$  (ب)  $R_h$  (پ)  $gap$

خط  $50 \Omega$  خاتمه پیدا می‌کند. قسمت تبدیل باید با دقت طراحی شود به‌صورتی‌که عدم تطبیق ناشی از آن در ادامه ساختار به حداقل برسد. بدین منظور این بخش با خطوط بسیار باریک و ظریفی شروع و در ادامه عرض آن افزایش یافته و درواقع زمین قسمت CPW بدین شکل ایجاد می‌شود. بخش انتهایی زمین به‌صورت دایروی شکل داده شده است.

در قسمت زیر مورد زمین‌های خطوط میکرواستریپ قرار داده شده که به‌صورت کمان‌هایی از بیضی است. همچنین سه حفره استوانه‌ای وظیفه انتقال جریان از بالای مورد به قسمت زمین و درواقع تحقق شیفت فاز ۱۸۰ درجه (قطبش‌های مخالف در درگاهی‌های ساختار) را بر عهده‌دارند. مکان، نحوه قرارگیری و شعاع آن‌ها نیز باهدف دستیابی به یک افت بازگشتی مناسب در ساختار بهینه شده است. لازم به ذکر است در بخش بعدی تأثیر تغییر شعاع این حفره‌ها بر عملکرد ساختار نشان داده شده است. جریان و ولتاژهای تولیدی در درگاهی‌های ساختار و نقش حفره‌های استوانه‌ای در شکل (۲) نشان داده شده‌اند. در جدول (۱)، ابعاد بهینه پارامترهای مختلف باهدف دستیابی به خروجی مناسب ( $S_{11} < -10\text{dB}$  و شیفت فاز ۱۸۰ درجه) گزارش شده است.

جدول (۱): ابعاد بهینه‌شده ساختار (mm)

$R_{f1}$	gap	R	L	W	R	$L_{f2}$	$W_{f2}$	$L_2$	$L_1$	$L_{f1}$	$R_{f2}$	$R_w$
۱۳	۰.۲	۳.۷	۳.۰	۱.۵	۱.۴۵	۳.۷۵	۱.۳	۱.۱/۳	۵	۱.۵	۷.۵	۳.۴



شکل ۳: ساختار شیفت دهنده فاز و خط میکرواستریپ معمولی

### ۳- نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری

#### ۳-۱- شبیه‌سازی پارامتری

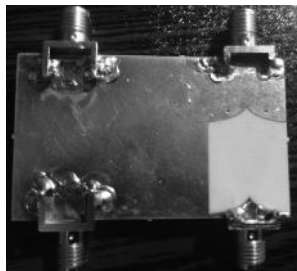
در این بخش تحلیل پارامتری ساختار پیشنهادی باهدف روشن شدن بیشتر تأثیر پارامترهای مختلف مسئله ارائه خواهد. برای نشان دادن اختلاف فاز، یک خط میکرواستریپی معمولی نیز به موازات ساختار شیفت‌دهنده فاز قرار داده می‌شود شکل (۳) و در واقع اختلاف فاز بین دو خط اندازه‌گیری می‌شود. در شکل (۴-الف)

با توجه به شکل مشخص است که میزان شیفت فاز در ساختار پیشنهادی تقریباً ثابت و در بازه ۱۸۷-۱۸۰ درجه قرار دارد. در واقع تأثیر پارامترهای مسئله بر روی افت بازگشتی ( $S_{11}$ ) ساختار است و میزان شیفت فاز، در صورت تطبیق، به صورت ذاتی همواره در بازه مورد نظر تغییر خواهد کرد. این مسئله با توجه به پیکربندی ساختار و نحوه توزیع جریان‌ها نیز قابل تأیید است.

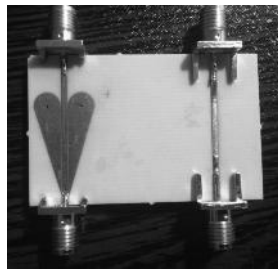
### ۳-۲- اندازه‌گیری

در شکل (۶) نمای فوقانی و زیرین ساختار پیاده‌سازی شده شامل بخش شیفت فاز و خط معمولی نشان داده شده است. در شکل (۷-الف) منحنی‌های اندازه‌گیری  $S_{11}$ ،  $S_{21}$  نشان داده شده است. همان‌طور که می‌بینیم در بازه فرکانسی ۳-۵ GHz  $-10 < S_{11}$  و افت عبوری نیز کمتر از ۲ dB است. اگرچه این مقادیر قابل قبول هستند اما اختلاف (بیشینه ۳ dB) بین نتایج اندازه‌گیری و نتایج شبیه‌سازی  $S_{11}$  در بخش قبل مشاهده می‌شود. برای این اختلاف چند توجیه وجود دارد که در ادامه بیان خواهند شد. به‌عنوان مورد اول، در نتایج شبیه‌سازی اثر کانکتورهای SMA و لحیم‌کاری لحاظ نشده است؛ بنابراین بخشی از این اختلاف می‌تواند ناشی از عوامل فوق باشد.

یک دلیل مهم‌تر حساسیت بالای ساختار پیشنهادی نسبت به پارامترهای آن است. همان‌طور که مشاهده شد تغییرات در حد ۰/۰۵ تا ۰/۱ mm در پارامترهای ساختار گاهی باعث ایجاد تغییرات در حد ۱۵ dB در منحنی‌های  $S_{11}$  می‌شود؛ بنابراین دقت فرایند ساخت می‌تواند تأثیر مستقیمی در نتایج بگذارد و از این جهت به نظر می‌رسد که خطاهای ایجاد شده اجتناب‌ناپذیر باشند. در شکل (۷-ب) منحنی‌های اندازه‌گیری شده فاز در خطوط معمولی و ۱۸۰ درجه نشان داده شده است و همچنین در قسمت (۷-پ) اختلاف فاز اندازه‌گیری و شبیه‌سازی باهم مقایسه شده‌اند. همان‌طور که می‌بینیم میزان اختلاف فاز اندازه‌گیری بین خطوط در گستره ۱۸۹-۱۹۵ تغییر می‌کند که نشان‌دهنده ۶ درجه تغییرات یا خطای فاز و ۹ درجه انحراف فاز از عدد ۱۸۰ درجه است.



(ب)

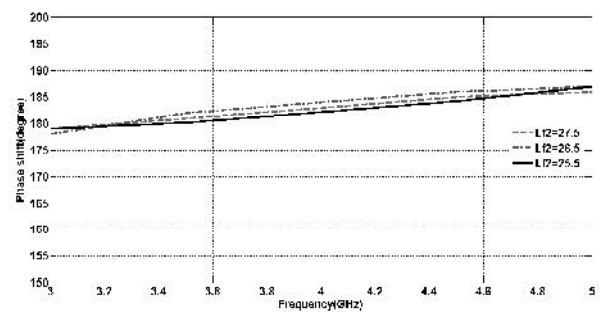


(الف)

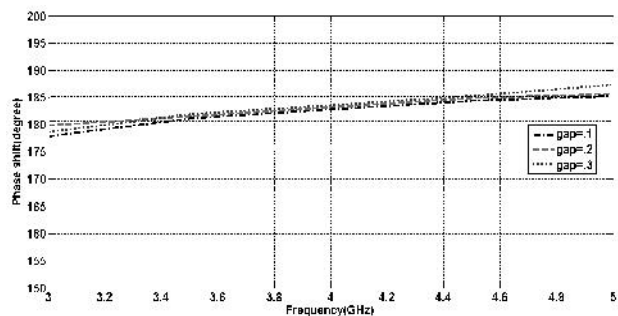
شکل ۶: نمای (الف) لایه فوقانی و (ب) زیرین ساختار پیشنهادی

همان‌طور که می‌بینیم شعاع حفره بزرگ‌تر باعث بدتر شدن  $S_{11}$  شده و بر روی  $S_{21}$  تأثیر ناچیزی دارد. در قسمت (۵-پ) تأثیر افزایش عرض شکاف نیز بررسی شده است. همان‌طور که می‌بینیم شکاف‌های کوچک‌تر (۰/۱ mm) باعث بهبود  $S_{11}$  می‌شود. به دلیل محدودیت در ساخت ابعاد کوچک، مقدار ۰/۲ mm برای شکاف و ۰/۱۵ mm برای شعاع حفره‌ها انتخاب و به ازای آن  $S_{11} < -15$  dB حاصل شد.

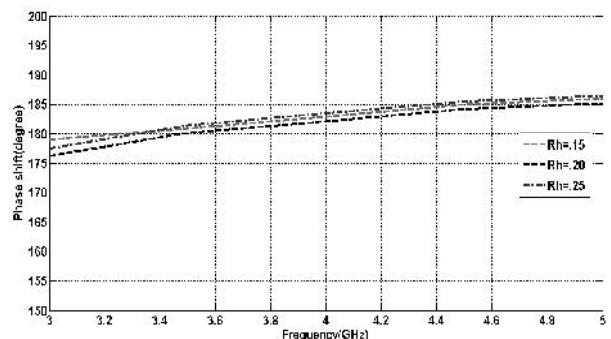
در شکل (۵) تغییرات مقدار شیفت فاز با توجه به تغییر پارامترهای ساختار نشان داده شده است.



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۵: تغییرات شیفت فاز با تغییرات پارامترهای

(الف)  $Lf1$  (ب) gap (پ)  $R_h$

#### ۴- نتیجه گیری

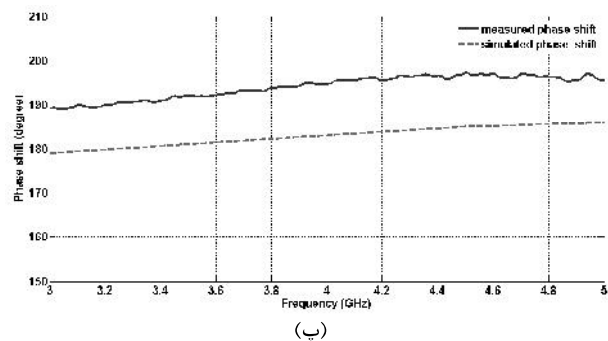
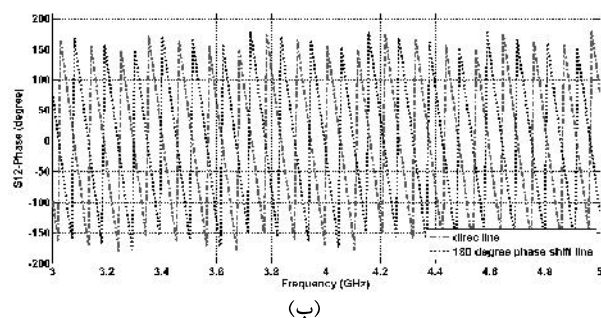
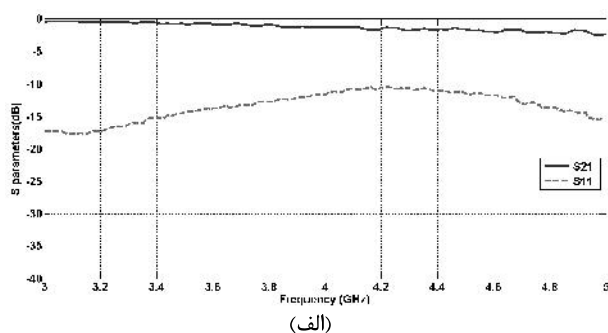
یک شیفت دهنده فاز ۱۸۰ درجه پهن باند در بازه فرکانسی ۳-۵ GHz طراحی شد. با استفاده از تبدیل میکرواستریپ به cpw به میکرواستریپ ساختار تحقق پیدا کرد. عمل شیفت فاز با قرار دادن سه حفره استوانه‌ای در ساختار باهدف انتقال جریان و ایجاد قطبی شدگی معکوس ولتاژ انجام گرفت. نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری نشان‌دهنده عملکرد مناسب ساختار پیشنهادی برای استفاده در کاربردهای مربوطه است.

#### ۵- مراجع

- [1] A. A. Eldek, "Microstrip 180 degree phase shifter for ultra wideband applications," IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (AP-S), pp.1-4, July 2008.
- [2] E. Wang, X. Fu, and Q. Tian, "Broadband power divider with phase shifter," 2012 2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet), pp. 1700 – 1702, April 2012.
- [3] D. Kettle, N. Roddis, and R. Sloan, "Ka-band InP MMIC 180° phase switch," IEEE Microw. Compon. Lett., vol. 15, no. 6, pp. 425-427, June 2005.
- [4] F. Fereidoony, S. Chamaani, S. A. Mirtaheri, and M. A. Sebt, "Wideband 180 Degree Phase Shifter with Low Phase Error," The third Iranian Conference on Engineering Electromagnetic (ICEEM 2014), Dec. 2014. (in Persian)
- [5] K. X. Tilley, D. Wu, and K. Chang, "Wideband transition from conductor-backed coplanar waveguide to modified coplanar stripline using multiple substrates," *Electronic Lett.*, vol. 29, no. 23, pp. 2051–2052, 1993.
- [6] A. M. E. Safwat, K. A. Zaki, W. Johnson, and C. H. Lee, "Novel transition between different configurations of planar transmission lines," IEEE Microw. Compon. Lett., vol. 12, no. 4, pp. 128–131, Apr. 2002.
- [7] [https://www.hittite.com/content/documents/data\\_sheet/hmc928lp5.pdf](https://www.hittite.com/content/documents/data_sheet/hmc928lp5.pdf)

از سوی دیگر نتایج شبیه‌سازی شیفت فاز ۱۸۷-۱۸۰ درجه با خطای فاز ۷ درجه را نشان می‌دهند؛ بنابراین خطای فاز در حالت اندازه‌گیری و شبیه‌سازی تقریباً یکسان بوده اما در نتایج اندازه‌گیری، ۹ درجه انحراف فاز از ۱۸۰ درجه مشاهده شده است. این میزان انحراف به دلیل ناهمگون بودن اتصال کانکتورهای SMA (از نظر مونتاژ و لحیم کاری) است. اگرچه این میزان خطا در کاربرد مدولاتور شیفت فاز خطای چندانی ایجاد نمی‌کند، در کاربردهایی که نتایج دقیق تر لازم است می‌توان انحراف را با افزودن فاز اضافی به خط معمولی (افزودن طول به روش Meandering) جبران کرد.

لازم به ذکر است که ساختار پیشنهادی با هدف دستیابی به شیفت فاز ۱۸۰ درجه بهینه شده است. درواقع میزان اختلاف فاز مستقل از طول‌های اضافی است که در ادامه ساختار به آن افزوده خواهند شد و در آن حالت نیز شیفت دهنده طراحی شده عملکرد خود را حفظ خواهد کرد.



شکل ۷: منحنی‌های اندازه‌گیری شده  $S_{21}$  و  $S_{11}$  (الف) دامنه (ب) فاز (پ) اختلاف فاز

---

## **Wideband 180 Degree Phase Shifter with Low Phase Error**

**F. Fereidoony\*, S. Chamaani, S. A. Mirtaheri, M. A. Sebt**

\* Electrical Engineering K. N. T. University of Technology

(Receive: 2014/12/19, Accept: 2015/08/03)

### **Abstract**

*A wideband 180 degree phase shifter is proposed to operate in 3-5 GHz bandwidth. It is designed on the base of transitions between microstrip and coplanar waveguide (CPW) lines. Thus, a sequence of microstrip -to (CPW) -to microstrip transitions are used to realize the structure. This phase shifter has a good return loss ( $S_{11} < -10$  dB) and a low transmission loss ( $|S_{21}| < 2$  dB) in the specified frequency range. It makes also a 180 degree phase shift with low value of 6 degrees phase error in the output signal. Numerical Simulation and measurement results are provided to verify these claims. Results show acceptable performance of the structure to use in relevant applications such as binary phase shift keying (BPSK) modulators and feeding networks in phase array antennas. Moreover, its simple and low cost structure makes it a good candidate in mentioned applications compared to conventional phase shifters implemented by integrated circuits (IC).*

**Keywords:** component: phase shifter; phase error; bi-phase modulator; microstrip transition.