

## طراحی کوپلر خط-شاخه فشرده با حذف هارمونیک‌های ناخواسته با استفاده از شاخه‌های باز و خطوط T شکل برای کاربرد در سیستم‌های مخابرات بی‌سیم

امیر حسین فرهمند<sup>۱</sup>، سعید روشنی<sup>۲</sup>، سبحان روشنی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه برق، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

amhofarahmand@gmail.com

۲- دانشیار گروه برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

s\_roshany@yahoo.com

۳- استادیار گروه برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

sobhan\_roshany@yahoo.ca

**چکیده:** در این مقاله طراحی جدیدی از کوپلر خط-شاخه همراه با قابلیت حذف هارمونیک‌های ناخواسته و کاهش اندازه طراحی شده است. این کوپلر با استفاده از خطوط T شکل و متقاطع، همراه با شاخه‌های انتها باز طراحی شده است. طرح پیشنهادی برای فرکانس مرکزی  $1/8 \text{ GHz}$  طراحی شده که قابلیت حذف تا هارمونیک ۵ ام و کاهش اندازه  $78/5\%$  نسبت به حالت مرسوم آن را دارد. به عبارت دیگر کوپلر پیشنهادی هارمونیک‌های دوم، سوم، چهارم و پنجم را به ترتیب با تضعیف‌های  $15 \text{ dB}$ ،  $27 \text{ dB}$ ،  $24 \text{ dB}$  و  $21 \text{ dB}$  حذف می‌کند. در کوپلر طراحی شده، تلفات عبوری در دو مسیر عبوری بهتر از  $0/05 \text{ dB}$  در فرکانس کاری می‌باشد. همچنین تلفات برگشتی و ایزولاسیون نیز در فرکانس کاری به ترتیب برابر  $28/3 \text{ dB}$  و  $27/9 \text{ dB}$  می‌باشند. کوپلر طراحی شده در باند فرکانسی از  $1/67 \text{ GHz}$  تا  $1/93 \text{ GHz}$  و با فرکانس مرکزی  $1/8 \text{ GHz}$  به خوبی عمل می‌کند که معادل  $15\%$  پهنای باند است. کوپلر نقش مهمی در عملکرد سیستم‌های مخابرات بی‌سیم مانند رادار دارد و در نتیجه بهبود عملکرد کوپلر منجر به افزایش کارآمدی سیستم خواهد شد.

**واژه‌های کلیدی:** کوپلر، خطوط ریزنوار، رزوناتور، حذف هارمونیک‌های ناخواسته.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۹/۱۲/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۰/۰۱/۱۸

نویسنده مسئول : سبحان روشنی

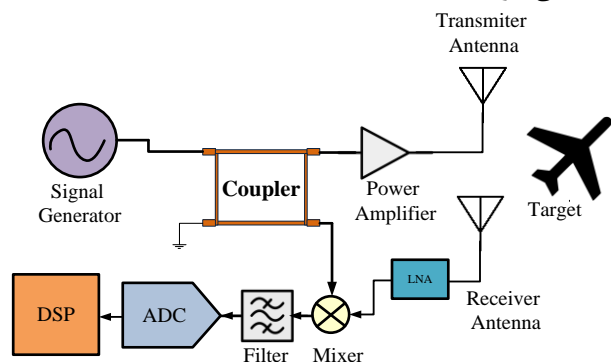
## ۱- مقدمه

ناخواسته در پاسخ مدار است. کوپلر خط-شاخه معمولی همانطور که فرکانس کار را عبور میدهد هارمونیک‌های ناخواسته را نیز عبور می‌دهد و هیچگونه تضعیفی بر روی هارمونیک‌ها و دیگر فرکانس‌ها ندارد، لذا حضور هارمونیک‌ها در پاسخ فرکانسی باعث ایجاد اثرات غیر خطی در سیستم‌های مخابراتی می‌شود. همچنین کوپلر خط-شاخه متداول که از چهار شاخه بلند با طول یک چهارم طول موج تشکیل دارای ابعاد بزرگی می‌باشد که از نظر ساخت و هزینه مقرون به صرفه نمی‌باشد. در این مقاله این دو ویژگی بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. تکنیک‌های مورد استفاده در مقالات پیشین برای طراحی کوپلر جهت بهبود عملکرد عبارتند از استفاده از خطوط کوپل شده [۲]، خطوط انتقال T شکل [۴]، خطوط امیدانس پله ای و شاخه‌های انتها باز و بسته [۱۲]، [۱۱]، [۱۰]، [۶]، شاخه‌های شعاعی [۱۴]، [۱۳]، عناصر فشرده [۱۸]، [۱۷]، [۱۶]، [۱۵] سلول رزونانسی [۶]، [۳]، خطوط مارپیچی [۱۹]، [۳]، کوپلرهای چند راهه [۲۱]، [۲۰] و خیلی از تکنیک‌های ترکیبی دیگر.

در [۳] یک کوپلر کوچک در فرکانس ۹ گیگاهرتز طراحی شده که توانایی حذف هارمونیک‌ها را دارا می‌باشد. در کوپلر ارائه شده در مرجع مذکور به کمک چهار سلول رزونانسی که به جای چهار خط بلند کوپلر معمولی با طول یک چهارم طول موج به کار رفته چهار خط با طول‌های کوتاه تر طراحی شده که توانایی حذف هارمونیک‌های سوم و پنجم را دارا می‌باشد. همچنین برای کاهش اندازه بیشتر با استفاده از خطوط تا شده کوچک سازی بیشتری حاصل شده است. کوپلر ارائه شده در مرجع مذکور با استفاده از تکنیک‌های گفته شده توانسته که ابعاد کوپلر را تا ۶۴ درصد نسبت به ابعاد کوپلر معمولی کاهش دهد. متأسفانه به علت استفاده از سلول‌های رزونانسی تلفات عبوری در کار فوق اندکی بالا رفته و حدود ۳٪ دسی بل می‌باشد. همچنین حذف هارمونیک‌های ناخواسته و درصد کاهش اندازه در کوپلر ارائه شده در مرجع مذکور بسیار چشمگیر نمی‌باشد.

یکی از دیگر تکنیک‌های مهم در طراحی کوپلر استفاده از خطوط امیدانس پله‌ای و شاخه‌های باز است [۱۰-۱۲]. در مقاله [۱۰] یک کوپلر از نوع خط-شاخه با حذف هارمونیک‌های ناخواسته ارائه شده است. تکنیک مورد استفاده در این کوپلر شاخه‌های باز به شکل متقارن است. ابعاد این کوپلر کوچک سازی شده و دارای حذف هارمونیک مرتبه‌ی چهار است. همچنین قابلیت پهن باند بودن را نیز داراست. این کوپلر تلفات عبوری بالایی دارد که باعث از بین رفتن سیگنال در قطعه می‌شود و مطلوب نیست. در مقاله‌ی [۱۱] یک کوپلر با کاهش اندازه معرفی شده است. تکنیک مورد استفاده در این مقاله تکنیک ایجاد سطوح و خطوط انتقال پله‌ای و مارپیچ و تو در تو به همراه شاخه‌های باز است. از طرفی با این پیچیدگی بالا در طراحی این کوپلر توانایی حذف حتی یک هارمونیک را ندارد. یک کوپلر با استفاده از شاخه‌های باز با طول نابرابر در [۱۲] معرفی شده و مورد بررسی قرار گرفته است. این کوپلر خاصیت حذف هارمونیک تا هارمونیک چهارم را دارا است و

تقسیم کننده‌های توان و کوپلرهای جهتی یا خط-شاخه قطعات مایکروویو هستند که برای تقسیم یا ترکیب توان در فرکانس‌های مایکروویو استفاده می‌شوند. در تقسیم کننده‌ی توان، سیگنال ورودی به دو یا چند سیگنال خروجی با توان کمتر تقسیم می‌شود و در ترکیب کننده دو یا چند سیگنال از ورودی گرفته شده و ترکیب آن‌ها در پورت خروجی ایجاد می‌شود. کوپلر خط-شاخه یک نوع متقارن کوپلر است که دارای چهار شاخه یکسان می‌باشد و توان را با نود درجه اختلاف فاز تقسیم یا ترکیب می‌کند. کوپلرها کاربردهای فراوانی در مدارهای مخابرات و سیستم‌های فرکانس رادیویی و مایکروویو دارند. از جمله ی این کاربردهای می‌توان به کاربرد کوپلرها در قطعات مایکروویو مانند تقویت کننده‌های توان دوهرتی، تقویت کننده‌های توان متقارن، ماژول‌های تگ خون تراشه‌های RFID، شبکه‌های تغذیه آنتن‌ها، و میکسرها اشاره کرد [۶-۱۱]. همچنین کوپلرهای کوچک سازی شده به علت ابعاد کوچک و وزن کم در صنایع نظامی مانند رادار و صنایع هوایی مانند هواپیماها و ماهواره‌های کوچک کاربرد دارند [۷-۹]. در حالت کلی در هر قسمت از سیستم‌های مخابراتی که نیاز به تقسیم یا ترکیب سیگنال باشد از کوپلر استفاده می‌شود به عنوان نمونه در رادار موج پیوسته مدولاسیون فرکانس که نیاز به تقسیم سیگنال بین بخش‌های گیرنده و فرستنده وجود دارد از کوپلر به صورت نشان داده شده در شکل (۱) استفاده می‌شود. قطعه کوپلر نقش مهمی در عملکرد سیستم رادار دارد و در نتیجه بهبود عملکرد کوپلر منجر به افزایش کارآمدی سیستم رادار می‌گردد. همچنین برخی از موارد از قطعه ی کوپلر در خود تقویت کننده ی توان نیز استفاده می‌شود.



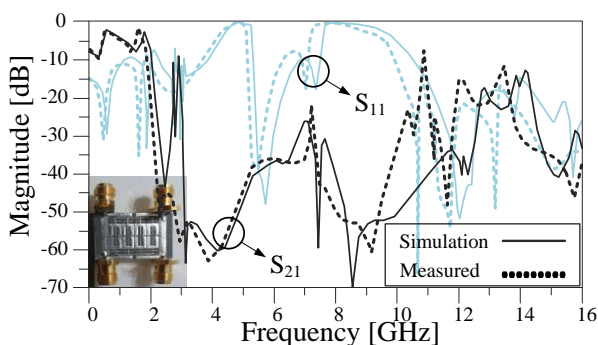
شکل (۱): کاربرد کوپلر در رادار موج پیوسته مدولاسیون فرکانس

کوپلرها انواع مختلفی دارند و برای هر تقسیم دلخواه توان طراحی شده‌اند و معمولاً تقسیم توان را در پورت‌های خروجی بصورت مساوی انجام می‌دهند. از نظر اختلاف فاز نیز می‌توان گفت در کوپلرها، اختلاف فاز  $90^\circ$  یا  $180^\circ$  بین پورت‌های خروجی وجود دارد. کوپلرهای خط-شاخه متداول ترین ساختار کوپلرهای چهار خطه هستند که اختلاف فاز  $90^\circ$  در پورت‌های خروجی ایجاد می‌کنند. دو ایراد اساسی در کوپلرهای معمولی ابعاد بزرگ و وجود هارمونیک‌های

شبیه سازی صورت گرفته نتایج شبیه سازی الکترومغناطیسی با مدارهای ساخته شده قبلی تایید و تصدیق شده است. زیر لایه‌ی استفاده شده برای جانمایی یک زیر لایه‌ی ۵۸۸۰ RT/Duroid با ضخامت ۰/۵۰۸ mm و ضریب گذردهی ۲/۲ است.

## ۲- صحت سنجی نتایج شبیه سازی

در این مقاله ابتدا صحت نتایج شبیه سازی الکترومغناطیسی که با استفاده از محیط جانمایی در نرم افزار ADS انجام شده، چک شده است. شبیه سازی الکترومغناطیسی از دقت بسیار بالایی برخوردار است و همان‌طور که در شکل (۲) مشخص شده است، نتایج کوپلر طراحی و ساخته شده توسط نویسندگان در مقاله [۲۷] توسط شبیه سازی الکترومغناطیسی و نتایج اندازه گیری تطبیق بسیار بالایی دارد. در نتیجه نتایج شبیه سازی الکترومغناطیسی با محیط و شرایط یکسان در این مقاله دقت بالایی دارد و با نتایج ساخت همخوانی خواهد داشت.

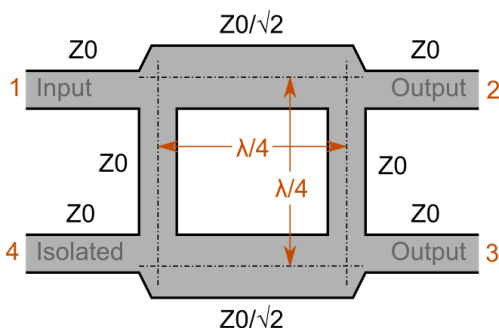


شکل (۲): صحت سنجی نتایج شبیه سازی با نتایج ساخت و اندازه گیری در کوپلر طراحی شده.

## ۳- مراحل طراحی کوپلر

### ۳-۱ طراحی کوپلر خط-شاخه متداول

ساختار کوپلر خط-شاخه متداول در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳): ساختار کوپلر خط-شاخه متداول [۱].

همان‌طور که در شکل (۳) دیده می شود کوپلر خط-شاخه ای دارای چهار خط ریزنوار با طول ۹۰ درجه ( $\lambda/4$ ) می باشد. دو خط افقی داری

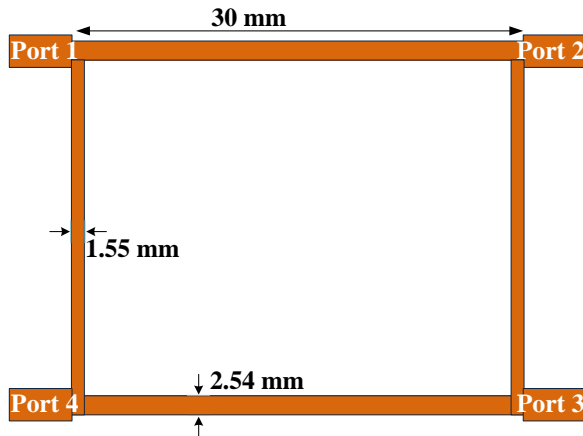
در آن از تکنیک شاخه‌های باز استفاده شده، که باعث شده ابعاد آن نیز نسبت به حالت معمول کاهش پیدا کند. اگرچه تلفات عبوری در این قطعه قابل قبول نیست.

در کوپلرهای طراحی شده در مقالات [۱۳ و ۱۴] از تکنیک شاخه‌های شعاعی استفاده شده است. استفاده از این شاخه‌ها نسبت به شاخه‌های باز معمولی امکان طراحی با قابلیت کوچک سازی بیشتری را فراهم می آورد. کوپلرهای طراحی شده در این مقالات قابلیت کوچک سازی دارند اما هارمونیک‌های ناخواسته را به خوبی حذف نمی کنند.

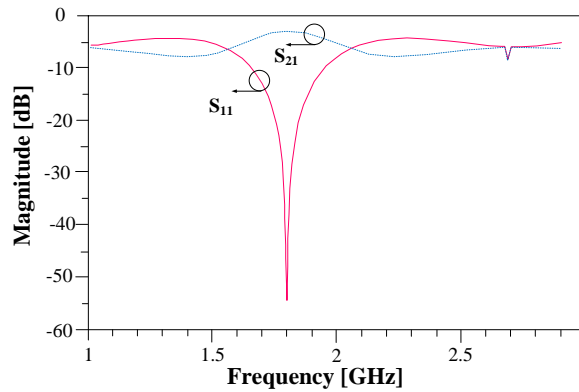
در مراجع [۱۵-۱۸] قطعات فشرده، نظیر سلف و خازن برای طراحی کوپلر و مقسم توان بهینه شده به کار رفته است. متأسفانه استفاده از قطعات فشرده باعث افزایش پیچیدگی فرایند ساخت مدار می شود و قطع ساختار سه بعدی به دست می آورد که نسبت به ساختار دوبعدی نامطلوب می باشد [۲۲]. در مرجع [۲۳]، خطوط بلند نود درجه بکار رفته در کوپلر متعارف با خطوط ناپیوسته جایگزین شده است، که باعث ۶۰ درصد کاهش ساز در مدار شده است. ولی در کار فوق تلفات عبوری قابل قبول نمی باشد. در مرجع [۲۴]، خطوط بلند نود درجه بکار رفته در کوپلر متعارف با خطوط ترکیبی با ساختار left-handed و right-handed جایگزین شده که کاهش اندازه بسیار مناسبی را ایجاد نموده اما متأسفانه این ساختار هارمونیکها را حذف نمی کند. در مرجع [۲۵]، ساختارهای تی شکل و پی شکل نامتقارن برای حذف هارمونیک و کاهش اندازه به کار رفته اند. متأسفانه این کار دارای ساختار پیچیده بوده و از تلفات عبوری بالا در باند عبور رنج می برد.

در [۲۶] یک کوپلر فشرده با حذف هارمونیک در فرکانس ۲/۴ گیگاهرتز طراحی شده است. کوپلر طراحی شده در مرجع مذکور به کمک رزوناتورهای به کار رفته در ساختار داخلی آن توانایی حذف هارمونیک‌های دوم و سوم را دارا می باشد. همچنین رزوناتورهای به کار رفته به جای خطوط بلند با طول یک چهارم طول موج در کوپلر طراحی شده باعث کاهش اندازه حدود ۵۵ درصد در مقایسه با کوپلر معمولی شده است. متأسفانه ساختار کوپلر ارائه شده در مرجع مذکور دارای تلفات عبوری نسبتاً بالایی می باشد که این ایراد باعث نقص عملکرد این کوپلر می شود. دلیل تلفات عبوری بالا در این تکنیک استفاده از سلول‌های رزونانسی بین پورت‌ها می باشد که تلفات عبوری سلول رزونانسی به تلفات عبوری مسیر مستقیم بین دو پورت اضافه می گردد. همچنین حذف تنها دو هارمونیک عملکرد بسیار چشمگیری نمی باشد.

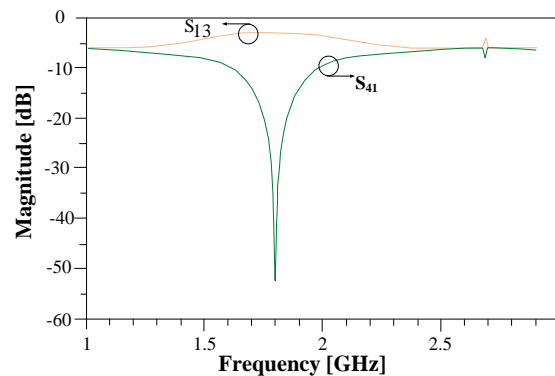
در این مقاله یک کوپلر خط-شاخه با هدف کاهش اندازه و تضعیف هارمونیک‌های ناخواسته طراحی شده است. در کوپلر پیشنهادی با استفاده از خطوط T شکل، متقاطع و شاخه‌های انتها باز بیش از ۷۸/۵ درصد کاهش اندازه حاصل شده است. همچنین در کوپلر پیشنهادی هارمونیک‌های دوم، سوم، چهارم پنجم با سطوح تضعیف بسیار بالایی حذف می شوند. در نهایت جانمایی مدار و شبیه سازی الکترومغناطیسی با دقت بالا انجام گرفته است. برای اطمینان از دقت



(الف)



(ب)



(ج)

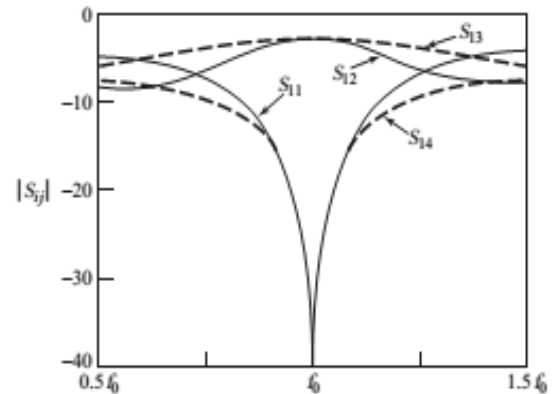
شکل (۵): (الف) ساختار یک کوپلر خط-شاخه معمولی (ب)

پارامترهای پراکندگی  $S_{11}$  و  $S_{21}$ . (ج) پارامترهای پراکندگی  $S_{31}$  و  $S_{41}$ .

## ۲-۳ طراحی کوپلر خط-شاخه اولیه

در ابتدا از شاخه‌های باز به منظور کاهش اندازه و حذف هارمونیک‌ها استفاده شده است. یک کوپلر خط-شاخه با استفاده از شاخه‌های باز در شکل (۶) نمایش داده شده است. همانطور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، شاخه‌های انتها باز در داخل کوپلر جای نمی‌گیرند که این امر باعث می‌شود که اندازه قطعه کاهش مناسبی را نداشته باشد. به همین علت بهتر است که آن شاخه‌های انتها باز را نیز با استفاده از تبدیلات دیگری کوچک نمود. در طرح کوپلر اولیه به جای

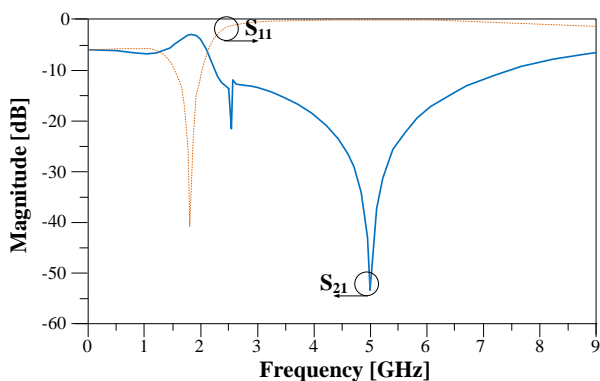
امپدانس  $35/4$  اهم می‌باشند و دو خط عمودی دارای امپدانس  $50$  اهم هستند. با ساختار فوق پارامترهای پراکندگی کوپلر متداول بصورت نشان داده شده در شکل (۴) می‌باشد. همانطور که در شکل (۴) دیده می‌شود، برای سیگنال تابیده شده از پورت یک، در فرکانس کاری هیچ سیگنالی به پورت یک نباید باز تابیده شود و هیچ بخشی از سیگنال نباید به پورت چهارم منتقل شود لذا باید مقادیر  $S_{14}$  و  $S_{11}$  خیلی کم و بصورت نشان داده شده در شکل باشند. از سوی دیگر در صورت متقارن بودن کوپلر سیگنال تابیده شده از پورت یک به دو قسمت مساوی تقسیم شود و نصف سیگنال به پورت دوم و نصف دیگر به پورت سوم منتقل شود، لذا باید مقادیر  $S_{12}$  و  $S_{13}$  برابر مقدار  $-3\text{dB}$  باشند.



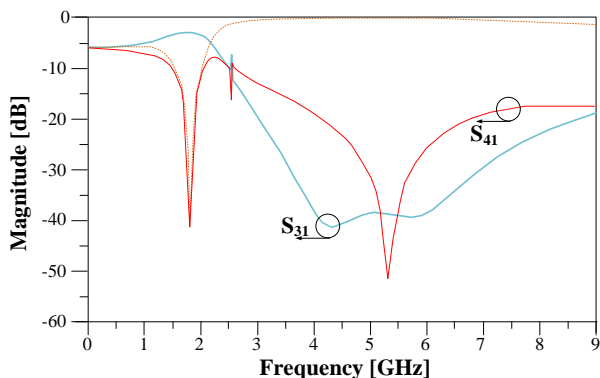
شکل (۴): پارامترهای پراکندگی یک کوپلر متداول [۱].

همانطور که گفته شد، هدف اصلی در طراحی کوپلر در این مقاله رسیدن به کاهش اندازه و حذف هارمونیک‌های ناخواسته است. در نتیجه در این بخش توضیح داده خواهد شد که چگونه کوپلر پیشنهادی با استفاده از رزوناتور T شکل و متقاطع، همراه با شاخه‌های انتها باز طراحی شده است. برای توضیح روند طراحی در ابتدا یک کوپلر خط-شاخه معمولی در فرکانس  $1/8 \text{ GHz}$  بر روی زیر لایه  $5880$  RT/Duroid با ضخامت  $0.508 \text{ mm}$  و ضریب گذردهی  $2/2$  طراحی شده که در شکل (۵) نمایش داده شده است.

با توجه به شکل (۵) کوپلر معمولی دارای چهار پورت است و دارای ابعاد بزرگی است. همانطور که توضیح داده شد و در شکل (۵) مشخص شده است، کوپلر خط-شاخه معمولی تمامی هارمونیک‌های ناخواسته را عبور می‌دهد و هیچگونه تضعیفی بر روی هارمونیک‌ها و دیگر فرکانس‌ها ندارد، لذا حضور هارمونیک‌ها در پاسخ فرکانسی باعث ایجاد اثرات نا مطلوب در سیستم‌های مخابراتی می‌شود. همچنین کوپلر خط-شاخه متداول که از چهار شاخه بلند با طول یک چهارم طول موج تشکیل دارای ابعاد بزرگی می‌باشد که از نظر ساخت و هزینه مقرون به صرفه نمی‌باشد. در فصل "۳-۴ طراحی کوپلر خط-شاخه پیشنهادی" روند طراحی کوپلر خط-شاخه پیشنهادی توضیح داده خواهد شد.



(الف)



(ب)

شکل (۸): پاسخ فرکانسی کوپلر خط-شاخه اولیه. (الف)

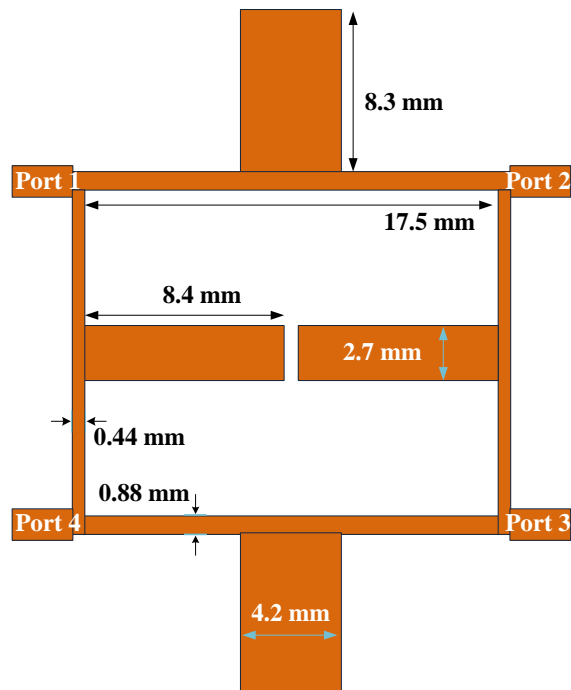
پارامترهای پراکندگی  $S_{21}$  و  $S_{11}$ . (ب) پارامترهای پراکندگی  $S_{41}$  و  $S_{31}$ .

همچنین با توجه به پاسخ فرکانسی کوپلر خط-شاخه اولیه، فرکانس کاری  $1/8$  GHz است. تلفات عبوری در دو مسیر عبوری در این فرکانس بهتر از  $0.8$  dB است که مقدار کمی محسوب می‌شود. توان بین دو پورت خروجی به نسبت خیلی دقیقی به صورت مساوی تقسیم شود. از طرفی این طراحی اولیه دارای کاهش اندازه  $65\%$  است و توانایی حذف هارمونیک‌های دوم و سوم یعنی در فرکانس‌های  $3/6$  GHz و  $5/4$  GHz را داراست. اما در این طراحی حذف هارمونیک و کاهش اندازه، امکان بهبود دارند که در ادامه توضیح داده خواهند شد.

### ۳-۳- طراحی کوپلر خط-شاخه اولیه بهبود یافته

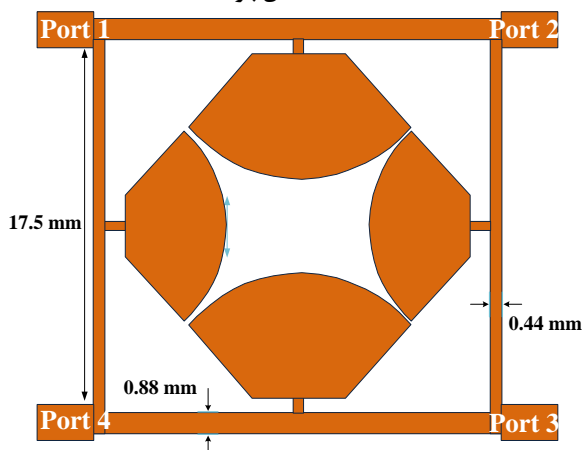
به منظور رفع ایرادات طرح اولیه، از اتصالات متقاطع و اتصالات T شکل به همراه شاخه شعاعی جهت ایجاد بازه‌ی پهن‌تر برای حذف هارمونیک‌های ناخواسته استفاده شده است. این شاخه‌ها که با طول و عرض متفاوت استفاده شده‌اند، باعث ایجاد صفرهای انتقال در فرکانس‌های متفاوت در پاسخ فرکانسی این کوپلر خواهند شد. طرح کوپلر خط-شاخه اولیه بهبود یافته در شکل (۹) نمایش داده شده است. ابعاد کوپلر خط-شاخه اولیه بهبود یافته نسبت به ساختار کوپلر خط-شاخه اولیه تفاوتی نداشته اما همانطور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، پاسخ فرکانس از نظر تضعیف هارمونیک‌ها بهبود پیدا کرده است. باید به این نکته توجه کرد که

آن شاخه‌های انتها باز مستطیلی از شاخه‌های انتها باز شعاعی معادل استفاده شده است. کوپلر اولیه طراحی شده برای فرکانس مرکزی  $1/8$  گیگاهرتز در شکل (۷) نمایش داده شده است. پاسخ فرکانسی مربوط به کوپلر اولیه طراحی شده نیز در شکل (۸) آورده شده است. همانطور که در شکل (۷) مشخص است با تبدیل شاخه‌های انتها باز مستطیلی شکل به شاخه‌های انتها باز شعاعی شکل این شاخه‌ها داخل کوپلر جانمایی شده‌اند که به کوچک سازی کمک زیادی می‌کند.



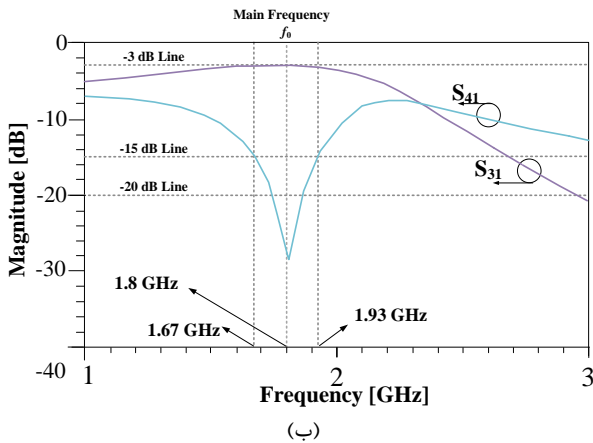
شکل (۶): ساختار یک کوپلر خط-شاخه با استفاده از

شاخه‌های باز



شکل (۷): ساختار کوپلر خط-شاخه اولیه



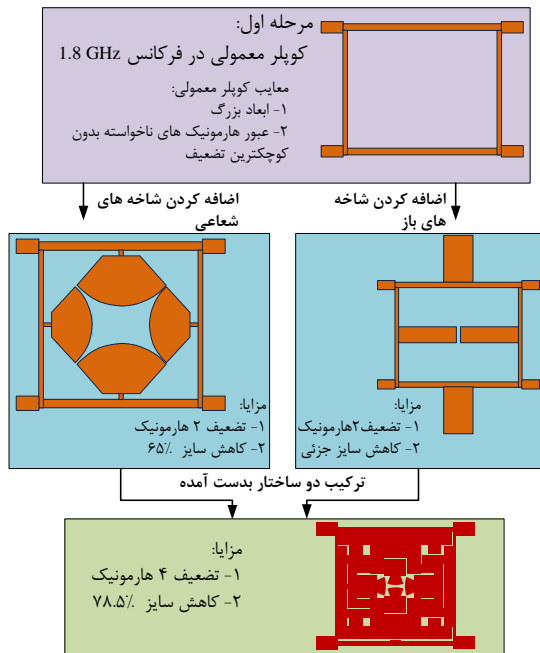


شکل (۱۳): پاسخ فرکانسی داخل باند کوپلر خط-شاخه اولیه بهبود یافته. (الف) پارامترهای پراکنندگی  $S_{21}$  و  $S_{11}$ . (ب) پارامترهای پراکنندگی  $S_{41}$  و  $S_{31}$ .

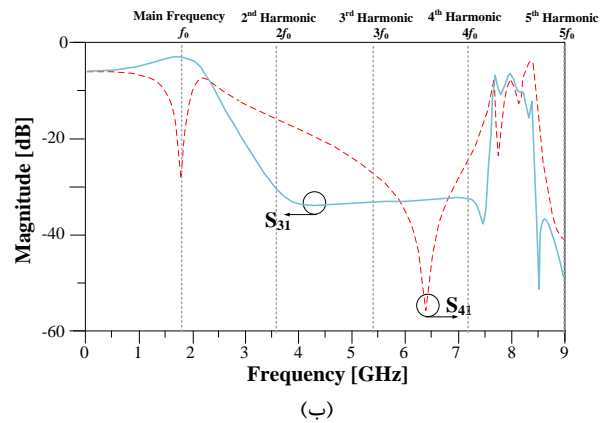
#### ۴- تحلیل نتایج

در شکل (۱۴) روند طراحی و تحلیل نتایج کوپلر پیشنهادی نمایش داده شده است. همان طور که در شکل دیده می شود در ابتدا یک کوپلر معمولی در فرکانس 1.8 GHz طراحی گردید که دارای معایبی مانند ابعاد بزرگ و عبور هارمونیک های ناخواسته به همراه فرکانس اصلی بدون کوچکترین تضعیفی می باشد. برای بهبود معایب مذکور دو طرح اولیه ارائه گردیدند که هر یک تا حدودی باعث بهبود عملکرد از نظر کاهش ابعاد و حذف هارمونیک گردید. در نهایت با ترکیب دو ساختار اولیه طرح پیشنهادی نهایی ارائه شد که توانایی حذف هارمونیک های دوم الی پنجم و همچنین کاهش ابعاد ۷۸/۵٪ را دارا می باشد.

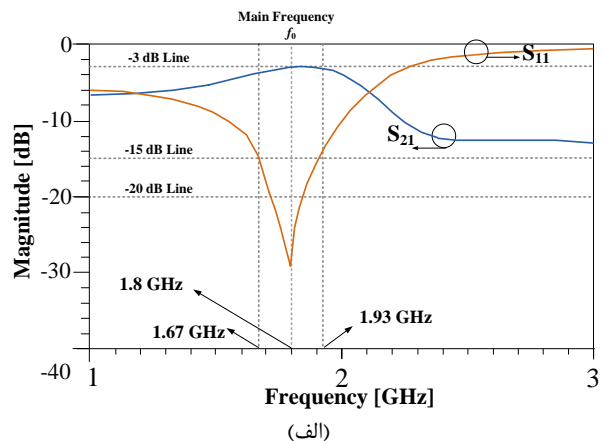
#### روند طراحی و تحلیل نتایج کوپلر پیشنهادی



شکل (۱۴): روند طراحی و تحلیل نتایج کوپلر



شکل (۱۲): پاسخ فرکانسی کوپلر خط-شاخه پیشنهادی. (الف) پارامترهای پراکنندگی  $S_{21}$  و  $S_{11}$ . (ب) پارامترهای پراکنندگی  $S_{41}$  و  $S_{31}$ . کاهش اندازه در این طراحی برابر ۷۸/۵٪ است. پاسخ فرکانسی کوپلر خط-شاخه پیشنهادی در شکل (۱۲) نمایش داده شده است. باتوجه به نتایج پاسخ فرکانسی، کوپلر پیشنهادی به خوبی در فرکانس ۱/۸GHz طراحی شده است و تلفات عبوری در دو مسیر عبوری در فرکانس کاری بهتر از ۰/۰۵ dB می باشد. همچنین کوپلر پیشنهادی قابلیت حذف هارمونیک های دوم، سوم، چهارم و پنجم را به ترتیب با تضعیف ۱۵ dB، ۲۷ dB، ۲۴ dB و ۲۱ dB داراست. تلفات برگشتی و ایزولاسیون نیز در فرکانس کاری به ترتیب برابر با ۲۸/۳ dB و ۲۷/۹ dB می باشند. در شکل (۱۳) پاسخ فرکانسی داخل باند کوپلر خط-شاخه پیشنهادی نمایش داده شده است. با توجه به این پاسخ فرکانسی کوپلر طراحی شده در باند فرکانسی از ۱/۶۷ GHz تا ۱/۹۳ GHz و با فرکانس مرکزی ۱/۸ GHz به خوبی عمل می کند. لازم به ذکر است که در این بازه، پارامترهای تلفات برگشتی و ایزولاسیون زیر خط ۱۵- است. همچنین در این بازه کوپلر تلفات عبوری خوبی از خود نشان می دهد. در نتیجه می توان این بازه را پهنای باند فرکانسی کوپلر در نظر گرفت که معادل ۱۵٪ پهنای باند است.





## مراجع

- [1] Pozar D, Microwave Engineering. John Wiley & Sons, 2009.
- [2] Soleymani H, Roshani S. Design and implementation of a bandpass Wilkinson power divider with wide bandwidth and harmonic suppression. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences. 2020 Jan 28;28(1):414-22.
- [3] Roshani S, Roshani S. A compact coupler design using meandered line compact microstrip resonant cell (MLCMRC) and bended lines. Wireless Networks. 2021 Jan;27(1):677-84.
- [4] Jamshidi M, Siahkamari H, Roshani S, Roshani S. A compact Gysel power divider design using U-shaped and T-shaped resonators with harmonics suppression. Electromagnetics. 2019 Oct 3;39(7):491-504.
- [5] Tahmasbi M, Razaghian F, Roshani S. Design of compact microstrip low pass filter using triangular and rectangular shaped resonator with ultra-wide stopband and sharp roll-off. Analog Integrated Circuits and Signal Processing. 2019 Oct 1;101(1):99-107.
- [6] Roshani S, Roshani S, Zarinitabar A. A modified Wilkinson power divider with ultra harmonic suppression using open stubs and lowpass filters. Analog Integrated Circuits and Signal Processing. 2019 Feb 15;98(2):395-9.
- [7] Shi Y, Yi X, Feng W, Wu Y, Yu Z, Qian X. 77/79-GHz Forward-Wave Directional Coupler Component Based on Microstrip and SIW for FMCW Radar Application. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2020 Oct 15;10(11):1879-88.
- [8] Lalbakhsh A, Jamshidi MB, Siahkamari H, Ghaderi A, Golestanifar A, Linhart R, Talla J, Simorangkir RB, Mandal K. A compact lowpass filter for satellite communication systems based on transfer function analysis. AEU-International Journal of Electronics and Communications. 2020 Sep 1;124:153318.
- [9] Letavin DA, Knyazev NS. Miniaturization of microstrip devices for small space satellites and aircraft. International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM. 2018;18(6.1):293-8.
- [10] Barik RK, Phani Kumar KV, Karthikeyan SS. A compact wideband harmonic suppressed 10 dB branch line coupler using cascaded symmetric PI sections. Microwave and Optical Technology Letters. 2016 Jul;58(7):1610-1613.
- [11] Iran-Nejad V, Lotfi-Neyestanak AA, Shahzadi A. Compact broadband quadrature hybrid coupler using planar artificial transmission line. Electronics letters. 2012 Dec 6;48(25):1602-3.
- [12] Velidi VK, Patel B, Sanyal S. Harmonic suppressed compact wideband branch-line coupler using unequal length open-stub units. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering. 2011 Jan;21(1):115-9.
- [13] Kashaninia A, Faraji T, Arani MF. Miniaturization and harmonic suppression of the branch-line coupler based on radial stubs. IEICE Electronics Express. 2011;8(10):736-41.
- [14] Wang J, Ni J, Zhao S, Guo YX. Compact microstrip ring branch-line coupler with harmonic suppression. Journal of Electromagnetic Waves and Applications. 2009 Jan 1;23(16):2119-26.
- [15] Chun, Y. H., & Hong, J. S. (2006). Compact wideband branchline hybrids. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 54(2), 704–709.
- [16] Beigzadeh, M., Dehghani, R., & Nabavi, A. (2017). Analysis and design of a lumped-element hybrid coupler using limited quality factor of components. AEU-

در جدول (۱) مقایسه‌ای بین کوپلر خط-شاخه پیشنهادی با کارهای پیشین صورت گرفته است. این جدول نشان می‌دهد که کوپلر پیشنهادی از نظر کاهش اندازه و حذف هارمونیک نتایج خوبی را به دست آورده است و در نتیجه اهداف مورد نظر برای طراحی کوپلر مطلوب محقق شده است.

جدول (۱): مقایسه کوپلر خط-شاخه پیشنهادی با کارهای پیشین

تضعیف هارمونیک	کاهش اندازه (%)	تلفات عبوری (dB)	فرکانس مرکزی (GHz)	مرجع
هارمونیک ۳ و ۵	۶۴	۰/۳	۰/۹	[۳]
هارمونیک ۴	۷۶/۶	۰/۹۱	۰/۹	[۱۰]
ندارد	۵۳	N/A	۲/۴	[۱۱]
هارمونیک ۴	۷۱	۰/۸	۱	[۱۲]
هارمونیک ۳	۷۸	۰/۴	۱/۳۹	[۱۴]
هارمونیک ۳	۶۳	۰/۳	۱	[۲۸]
هارمونیک ۳	۶۳	۰/۹	۲/۱	[۲۹]
هارمونیک ۳	۳۰	۰/۵	۲	[۳۰]
ندارد	۵۰	۰/۳۳	۱	[۳۱]
هارمونیک ۲ الی ۵	۷۸/۵	۰/۰۵	۱/۸	کار پیشنهادی

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، یک کوپلر خط-شاخه همراه با قابلیت حذف هارمونیک‌های ناخواسته و کاهش اندازه طراحی شده است. با توجه به پاسخ فرکانسی مناسب این طرح، این کوپلر می‌تواند در مداراتی که نیاز به حذف هارمونیک‌های اولیه و نهایی دارند کاربرد داشته باشد. از دیگر مزایای این طرح می‌توان به اندازه کوچک آن اشاره کرد. علاوه بر موارد ذکر شده، با توجه به اینکه تلفات عبوری، بازگشتی و ایزولاسیون این طرح مناسب می‌باشد و همچنین با توجه به فرکانس کاری و باند عبور، این کوپلر می‌تواند در طراحی و ساخت تجهیزات شبکه‌های مخابراتی کاربرد داشته باشد. برخی از نتایج این مقاله عبارتند از:

- (الف) با استفاده از خطوط T شکل و متقاطع، همراه با شاخه‌های شعاعی در طراحی کوپلر پیشنهادی، باند قطعی وسیع و کاهش اندازه بسیار بالا حاصل گردید.
- (ب) شاخه‌های T شکل و متقاطع باعث کاهش اندازه و ایجاد صفر انتقال در فرکانس‌های دلخواه می‌شوند که این امر سبب حذف هارمونیک‌های ناخواسته خواهد شد.
- (ج) شاخه‌های شعاعی باعث دقت در تنظیم فرکانس، تلفات عبوری، تنظیم دقیق تقسیم توان به صورت برابر و نابرابر و همچنین کاهش بیشتر ابعاد می‌شوند. این امر از طریق تغییر در طول، عرض و زاویه‌ی این شاخه حاصل می‌شود.



- International Journal of Electronics and Communications, 82, 312–320.
- [17] Shao, W., He, J., & Wang, B. Z. (2010). Compact rat-race ring coupler with capacitor loading. *Microwave and Optical Technology Letters*, 52(1), 7–9.
- [18] Chen, A., Zhuang, Y., Zhou, J., Huang, Y., & Xing, L. (2018). Design of a broadband Wilkinson power divider with wide range tunable bandwidths by adding a pair of capacitors. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 66(4), 567–571.
- [19] Hosseini SM, Rezaei A. Design of a Branch-line Microstrip Coupler Using Spirals and Step Impedance Cells for WiMAX Applications. *Aro-The Scientific Journal of Koya University*. 2020 Feb 20;8(1):1-4.
- [20] Lee E, Ku H. Design of a 7-Way Microstrip Divider for a Hexagonal Honeycomb Structure. *IEEE Access*. 2020 Apr 13;8:70367-74.
- [21] Shahi H, Masoumi N, Safavi-Naeini S, Mohammad-Taheri M. N-Way Planar Balanced-to-Balanced Series Feeding Network for Balanced Frequency-Scanning Phased Array. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2020 Mar 9;68(7):5334-43.
- [22] Cheng, K. K., & Ip, W. C. (2010). A novel power divider design with enhanced spurious suppression and simple structure. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 58(12), 3903–3908.
- [23] Sun, K. O., Ho, S. J., Yen, C. C., & Van Der Weide, D. (2005). A compact branch-line coupler using discontinuous microstrip lines. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 15(8), 519–520.
- [24] Zhang, J., Tao, J., Zong, B., & Zhou, C. (2015). Compact branchline coupler using uni-planar spiral based CRLH-TL. *Progress In Electromagnetics Research*, 52, 113–119.
- [25] Kumar, K. P., Barik, R. K., & Karthikeyan, S. S. (2016). A novel two section branch line coupler employing different transmission line techniques. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 70(5), 738–742.
- [26] Gu, J., & Sun, X. (2005). Miniaturization and harmonic suppression rat-race coupler using C-SCMRC resonators with distributive equivalent circuit. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 15(12), 880–882.
- [27] Hosseinkhani F, Roshani S. A compact branch-line coupler design using low-pass resonators and meandered lines open stubs. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*. 2018 May 30;26(3):1164-70.
- [28] Kim JS, Kong KB. Compact branch-line coupler for harmonic suppression. *Progress In Electromagnetics Research*. 2010;16:233-9.
- [29] Choi KS, Yoon KC, Lee JY, Lee CK, Kim SC, Kim KB, Lee JC. Compact branch-line coupler with harmonics suppression using meander T-shaped line. *Microwave and Optical Technology Letters*. 2014 Jun;56(6):1382-4.
- [30] Wang LY, Hsu K, Tu WH. Compact microstrip harmonic-suppressed quadrature hybrids. *Microwave and Optical Technology Letters*. 2009 Apr;51(4):981-5.
- [31] Sedighy SH, Khalaj-Amirhosseini M. Compact branch line coupler using step impedance transmission lines (SITLs). *Appl. Comput. Electromagn. Soc. J.*. 2013 Sep 1;28(9):866-70.