

## طراحی و ساخت نوسان ساز کم نویز با استفاده از ساختار مشدد دی الکتریک فعال

زهرا سلطانی<sup>۱\*</sup>، شهروز اسدی<sup>۲</sup>، اسفندیار مهرشاهی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، ۲- استادیار، ۳- دانشیار، دانشگاه شهید بهشتی

(دریافت: ۹۷/۱۲/۱۴، پذیرش: ۹۸/۰۳/۲۶)

**چکیده:** در این مقاله، تئوری طراحی یک نوسان ساز با مشدد دی الکتریک فعال در فرکانس ۸ GHz با ساختاری جدید نشان داده شده است. این ساختار تکیه بر کاهش نویز فاز به وسیله تنها یک عنصر فعال دارد در حالی که در ساختارهای پیشنهادی قبلی از دو عنصر فعال استفاده شده است. ساختار پیشنهاد شده از یک بازخورد اضافی بین تقویت کننده و مشدد به منظور افزایش ضریب کیفیت بهره می برد. نتایج اندازه گیری نشان می دهد که نویز فاز به مقدار  $-145 \text{ dBc/Hz}$  در آفست  $100 \text{ kHz}$  کاهش پیدا کرده که بیانگر  $12 \text{ dB}$  بهبود در مقایسه با نوسان ساز با مشدد دی الکتریک غیرفعال است. همچنین، در مقایسه با نوسان سازهایی با مشددهای فعال معمول، منبع نویز تقویت کننده دوم که موجب نوسان های ناخواسته می شود، حذف گردیده و هم چنین سایز و توان مصرفی کاهش یافته است. این ساختار دارای پائین ترین مقدار نویز فاز در مقایسه با نوسان ساز با مشددهای دی الکتریک دیگر است.

**کلیدواژه ها:** حلقه فعال، نوسان ساز مشدد دی الکتریک، نویز فاز، ضریب کیفیت

### ۱- مقدمه

نویز فاز<sup>۳</sup> است. در سال های اخیر، بر روی طراحی و ساخت نوسان ساز با مشددهای دی الکتریک با حداقل نویز فاز اقدامات متعددی صورت گرفته است [۴-۶]. نشان داده شده است که با استفاده از فیلترهای بیضوی<sup>۴</sup> به عنوان مشدد، ضریب کیفیت افزایش و نویز فاز کاهش می یابد [۷]. اگر چه ضریب کیفیت فیلتر توسط ضریب کیفیت بارگذاری نشده  $Q_0$  هر یک از عناصر تشکیل دهنده که هر یک محدود به تلفات تشعشعی، هدایت و دی الکتریک هستند، تحت تأثیر قرار می گیرد. تزویج مقاومت منفی به مشدد از جمله راه های دیگر به منظور جبران سازی تلفات انرژی مشدد است. کاهش چشم گیر نویز فاز زمانی میسر می شود که مشدد در داخل حلقه بازخورد فعال قرار گیرد [۸-۱۱]. انتخاب مناسب تقویت کننده و نوع تزویج نشان می دهد که مقاومت معادل مشدد می تواند با مقاومت منفی تولید شده در حلقه بازخورد فعال حذف گردد. به علاوه، استفاده از فیلتر فعال با ضریب کیفیت بالا در محل صفرهای انتقال در نوسان ساز از روش های دیگر کاهش نویز فاز است [۱۱-۱۲]. پاسخ فرکانس فیلترهای مشدد عایقی در حلقه بازخورد نشان می دهد  $Q_0$  افزایش می یابد و روشی مناسب جهت کاهش نویز فاز است [۱۴]. مشددهای فعال به علت داشتن  $Q_L$  بالا، در طراحی نوسان ساز با نویز فاز پائین مناسب هستند، اگر چه منابع نویزی اضافه می کنند

نوسان ساز به عنوان یک منبع سیگنال پایدار و دارای طیف خالص در فرکانس مورد نظر در شبکه های مخابراتی به کار گرفته می شود. عملکرد نوسان سازها به عملکرد مشدد با ضریب کیفیت بالا بستگی دارد. در مشددهای مسطح، ضریب کیفیت چندان قابل ملاحظه نیست و زمانی که داخل حلقه بازخورد نوسان ساز قرار می گیرند، مقدار ضریب کیفیت مجدداً کاهش می یابد. در بین مشددها، مشدد عایقی<sup>۱</sup> به علت داشتن تلفات پائین، پایداری حرارتی، قابلیت مجتمع پذیری با مدارات گسترده به عنوان یکی از بهترین انتخاب ها به عنوان گزینه فرکانسی در داخل حلقه بازخورد نوسان سازها می باشند [۳-۱]. در مشدد دی الکتریک با مد تحریک  $TE_{018}$  قسمت اعظم انرژی الکتریکی ذخیره شده در داخل استوانه دی الکتریک قرار دارد و باقی مانده انرژی خارج از استوانه داخل هوا قرار گرفته است که با افزایش فاصله از سطح، مقدار آن کاهش می یابد. ضریب کیفیت این مشددها بین ۱۰۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰ در فرکانس ۱۰ GHz است. به منظور قرارگیری مشدد در داخل مدار، تزویج مؤثر بین مشدد و عنصر فعال نیاز است. ضریب کیفیت بارگذاری شده  $Q_L$  در مشددها تحت تأثیر مشخصه های خطوط تزویج شده به عنوان یک عامل تعیین کننده در اندازه گیری

<sup>3</sup> Phase Noise

<sup>4</sup> Elliptical Filter

<sup>5</sup> Unloaded Quality Factor

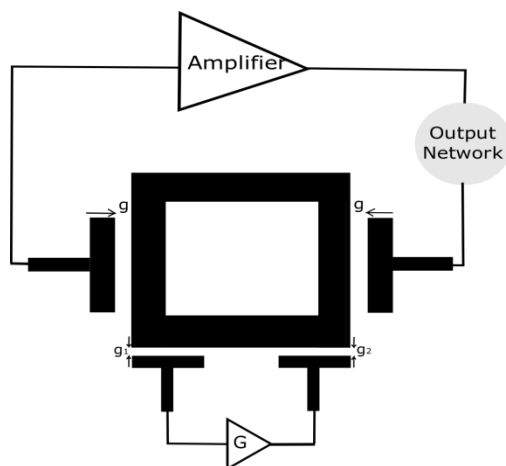
\* نویسنده پاسخگو: soltani.n87@gmail.com

<sup>1</sup> Dielectric Resonator

<sup>2</sup> Loaded Quality Factor

به منظور جبران کامل تلفات مشدد، مقدار  $Q_0$  باید به مقدار بی نهایت برسد. در رابطه (۱)،  $Q_1$  و  $Q_2$  ضریب کیفیت بارگذاری شده ورودی و خروجی مشدد وقتی به بازخورد فعال کوپل می شود،  $L$  اندوکتانس، و  $R$  مقاومت مدار معادل مشدد عایقی را نشان می دهد.

$$\begin{aligned} Q_1 &= \left( \frac{50n_1^2}{L_r \omega_0} \right) \\ Q_2 &= \left( \frac{50n_2^2}{L_r \omega_0} \right) \\ Q_u &= \left( \frac{R_r}{L_r \omega_0} \right). \end{aligned} \quad (1)$$



شکل (۱): ساختار نوسان ساز با مشدد فعال [۱۰]

در نهایت ضریب کیفیت بارگذاری شده به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\begin{aligned} Q_1 &= \left( \frac{G^2 - 1}{G^2} \right) Q_u \\ Q_2 &= (G^2 - 1) Q_u. \end{aligned} \quad (2)$$

باید توجه نمود که  $G$  در رابطه (۲)، بهره تقویت کننده دوم به منظور جبران تلفات در مشدد است. به واسطه وجود دو تقویت کننده در ساختار، نویز بیشتری به نوسان ساز تحمیل و توان بیشتری مصرف می شود. در نتیجه پایداری مدار تحت تأثیر قرار می گیرد و راندمان مدار کاهش می یابد. به علاوه نوسان های ناخواسته به علت این که شرایط نوسان در فرکانس های دیگر در داخل حلقه بازخورد تأمین می شود، اتفاق خواهد افتاد.

که روی نویز فاز نوسان ساز اثر منفی دارد [۱۶-۱۵]. بنابراین، اگر اثرات منبع نویز اضافه شده به مدار کاهش یابد، عملکرد نوسان ساز بهبود می یابد. به علاوه، توان مصرفی نوسان ساز با مشدد فعال به دلیل استفاده از دو تقویت کننده نسبت به نوع غیرفعال خود بیشتر است.

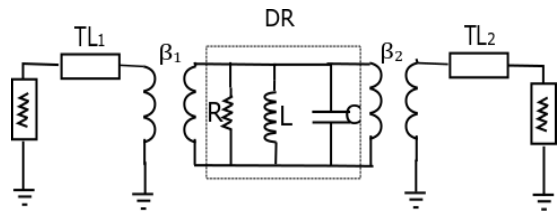
نوسان در فرکانس های ناخواسته در حلقه فعال از موارد دیگری است که باید مد نظر قرار گیرند. به منظور کاهش این نوسانات، ساختار جدیدی از نوسان ساز با مشدد عایقی که تنها از یک تقویت کننده به منظور فعال سازی مشدد و نوسان مدار استفاده کرده، ارائه می شود. اساس این ایده بهره گیری از یک عنصر فعال با دو هدف است، نوسان مدار و فعال سازی مشدد دی الکتریک. یکی از ویژگی های این نوع نوسان سازها، سادگی در ساختار آن ها است. مقاومت منفی از طریق خط انتقال تزویج شده به مشدد عایقی که ابعاد آن ها با توجه به مقدار بهره تزویج شده از تقویت کننده مشخص می شوند، تلفات را حذف می کند. در واقع نیازی به استفاده از دو تقویت کننده و مصرف توان بیشتر نیست. نوسان فقط در فرکانس تشدید مشدد دی الکتریک اتفاق می افتد و از نوسان در فرکانس های ناخواسته جلوگیری به عمل می آید. اگر چه این ایده در خصوص مشدد دی الکتریک عملی گردید، اما می تواند در نوسان سازهایی با مشددهای مختلف به کار گرفته شوند. روش پیشنهادی با نوسان ساز مشدد عایقی در حالت غیرفعال در فرکانس ۸ GHz از نظر نتایج شبیه سازی و آزمایشگاهی به منظور بررسی اثرات حلقه بازخورد فعال اضافه شده، مقایسه خواهد شد.

## ۲- بهبود ضریب کیفیت

$Q_0$  مشدد تحت تأثیر تلفات دی الکتریک و هادی قرار دارد. مقدار نویز فاز متناسب با معکوس مربع  $Q_L$  است، بنابراین، به منظور کاهش نویز فاز نوسان ساز لازم است که  $Q_L$  افزایش یابد [۱۷].

### ۲-۱- طراحی و ساخت مشدد فعال

اضافه نمودن بازخورد فعال و یا تزویج مقاومت منفی به مشدد از راه حل های کاهش نویز فاز نوسان ساز هستند. با قرارگیری مشدد در حلقه بازخورد فعال  $Q_L$  افزایش می یابد [۱۶]. شکل (۱) ساختار نوسان ساز با مشدد فعال معمول متشکل از دو تقویت کننده را نشان می دهد. فاصله های  $g_1$  و  $g_2$  بین مشدد و تقویت کننده دوم به وسیله ترانسفورماتورهایی با ضرایب  $n_1$  و  $n_2$  که مقدار تزویج بین تقویت کننده و مشدد را نشان می دهد، مدل می گردند.



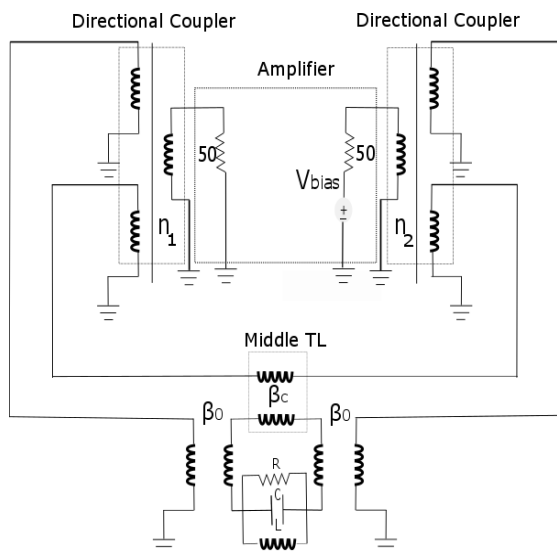
شکل (۳): مدار معادل ساختار مشدد دی الکتریک کوپل شده به دو خط مایکرواستریپ

$\beta_1$  و  $\beta_2$  تزویج خارجی ورودی و خروجی مشدد را مشخص می‌کند که به وسیله  $Q_L$  و I.L به یکدیگر مرتبط می‌شوند [۱۹-۱۸].

$$Q_L = \frac{Q_0}{1 + \beta_1 + \beta_2} \quad (۳)$$

$$I.L = 20 \log \frac{1 + \beta_1 + \beta_2}{2\sqrt{\beta_1\beta_2}}$$

در نتیجه مدار معادل ساختار نوسان ساز با مشدد عایقی پیشنهاد شده در شکل (۲)، به صورت شکل (۴) مدل سازی می‌شود. با در نظر گرفتن فواصل مساوی بین مشدد عایقی و TL،  $\beta_1$  و  $\beta_2$  با هم مساوی و برابر با  $\beta_0$  می‌گردند. این تزویج از طریق ترانسفورماتورهایی با ضریب  $n_1$  و  $n_2$  بین مشدد و تقویت کننده مدل شده است. خط انتقال میانی توسط ترانسفورماتوری با ضریب کیفیت  $\beta_c$  مدل گردیده است. لازم به ذکر است که اندازه بهره در داخل حلقه دوم به اندازه‌ای نیست که بتواند همه شرایط نوسان را برقرار سازد و تنها شرط فاز برقرار می‌شود. برقراری شرط فاز این تضمین را می‌دهد که فرکانس نوسان با افزودن حلقه جدید تغییر پیدا نمی‌کند. مقدار بهره تزریق شده به مشدد از روی نسبت  $n_1$  و  $n_2$  تعیین می‌شود.

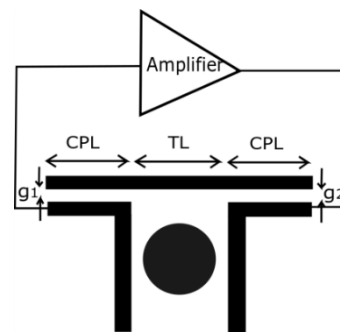


شکل (۴): مدار معادل نوسان ساز به همراه مشدد دی الکتریک فعال پیشنهادی

## ۲-۲- ساختار پیشنهادی نوسان ساز با مشدد فعال به کارگیری یک عنصر فعال

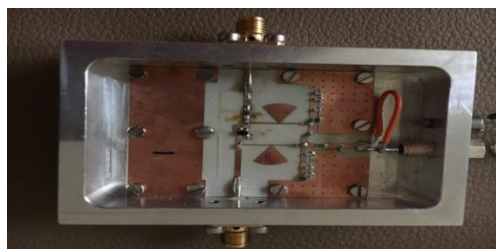
به منظور کاهش مشکلات مطرح شده، به جای استفاده از تقویت کننده اضافی در حلقه بازخورد، ساختار جدیدی از نوسان ساز با مشدد فعال که تنها از یک تقویت کننده استفاده می‌کند، نشان داده شده است. اساس این روش، افزایش ضریب کیفیت بارگذاری شده مشدد از طریق اضافه نمودن حلقه بازخورد جدید است. بنابراین، طبق رابطه (۲)، ضریب کیفیت بارگذاری شده افزایش و در نتیجه نویز فاز کاهش می‌یابد. در مقایسه با نوسان سازهایی با مشددهای فعال معمول، نویز اضافه‌ای به علت وجود تقویت کننده دوم اضافه نخواهد شد. همچنین، توان مصرفی کاهش خواهد یافت که منجر به افزایش راندمان مدار می‌شود.

شکل (۲)، بلوک دیگرام ساختار پیشنهاد شده از نوسان ساز با مشدد دی الکتریک فعال را که از یک تقویت کننده تشکیل یافته نمایش می‌دهد. اختلاف بین ساختار مشدد عایقی پیشنهاد شده و مشدد غیرفعال، وجود دو زوج خط تزویج و خط انتقال میانی است. فاصله موجود بین خطوط تزویج  $g_1$  و  $g_2$ ، میزان بهره تزویج شده به مشدد،  $G$  را مشخص می‌کند. بهره تقویت کننده باید به گونه‌ای انتخاب گردد که شرایط نوسان را فرآورده سازد که مقدار آن برابر با نسبت ولتاژها در اطراف خطوط کوپل شده است. ضرایب  $n_1$  و  $n_2$  نیز توسط رابطه (۱) برای هر مقدار مشخصی از  $Q$  تعیین می‌گردند. بنابراین، ابعاد خطوط تزویج از طریق نرم افزار HFSS به راحتی قابل محاسبه می‌باشند. طول خط مایکرواستریپ میانی TL پارامتری تعیین کننده بر مقدار ضریب کیفیت بارگذاری شده است. با تنظیم طول این خط، مقدار اندوکتانس مدار معادل تغییر پیدا می‌کند.



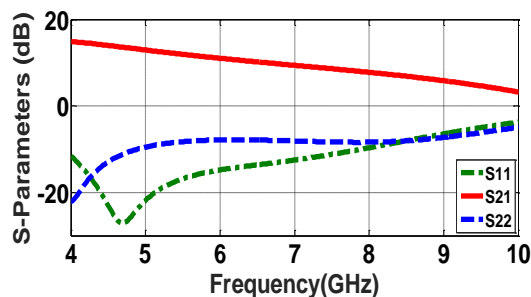
شکل (۲): ساختار نوسان ساز با مشدد عایقی فعال پیشنهادی

در ساختار مشدد دی الکتریک کوپل شده به خطوط، با تغییر فاصله بین مشدد عایقی و دو خط انتقال مایکرواستریپ، نسبت بین  $Q_L$  و  $Q_0$  تغییر پیدا می‌کند. شکل (۳)، مدار معادل مشدد عایقی کوپل شده را نشان می‌دهد که  $R$ ،  $L$ ،  $C$  امپدانس معادل مشدد  $Z$  را مدل می‌کند.



شکل (۶): تقویت کننده بایاس شده

پاسخ فرکانسی تقویت کننده بایاس شده در شکل (۷)، نشان می دهد بهره در فرکانس ۷/۹۹ GHz برابر با ۷/۷ dB است.



شکل (۷): نتایج اندازه گیری تقویت کننده طراحی شده

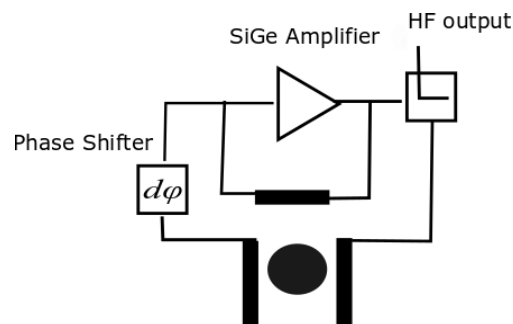
### ۳-۲- مشدد دی الکتریک

پایداری نوسان ساز بستگی به مشخصه های مشدد دارد. ضریب کیفیت بارگذاری نشده مشدد،  $Q_0$  بستگی به ویژگی های ماده سازنده و نوع مشدد دارد. داشتن  $Q_0$  بالا تضمینی بر داشتن نوسان ساز با نویز پائین نیست. در این مقاله، دو تزویج کننده جهت کوپل نمودن توان به مشدد عایقی به کار گرفته شده است. بدون جداکننده<sup>۳</sup> میدان مغناطیسی مشدد در داخل زمین نشت پیدا می کند. بنابراین، مشدد عایقی به وسیله جداکننده به ارتفاعی برابر با  $H_s$  بر روی مدار چاپی قرار داده شده است. مشدد مورد نظر از ماده ای به نام Barium Zinc Tantalate ( $BaznTaO_3$ ) با ثابت دی الکتریک برابر با  $29/5 \pm 1$  با قطر  $7/8$  mm و ارتفاع برابر با  $3/2$  mm ساخته شده است. فرکانس تشدید برابر با  $7/9918$  GHz و  $Q_0$  برابر با ۹۰۰۰ در فرکانس ۱۰ GHz است. طول خطوط تزویج بر مقدار  $Q_L$  تأثیر می گذارد زیرا ضریب تزویج زمانی که مشدد عایقی در حداکثر میزان توزیع جریان قرار دارد، در فاصله  $\lambda/4$  از مدار بسته و  $\lambda/2$  از خطوط مدار باز، در نقطه بهینه است. طبق مشخصات ارائه شده از خط، یک چهارم طول موج معادل با  $5/7$  mm است.

همچنین روش تفاضل محدود<sup>۱</sup> (FDM) با مش هایی با ابعاد بزرگتر در خارج از مشدد عایقی و در فضای اطراف آن به منظور

### ۳- طراحی نوسان ساز

شکل (۵)، بلوک دیاگرام عملیاتی نوسان ساز با مشدد دی الکتریک فعال را نشان می دهد. این ساختار شامل تقویت کننده، شیفت دهنده فاز، کوپلر خروجی، مشدد با  $Q$  بالا به همراه حلقه فعال است. اجزای مدار بر روی زیر آیند از نوع Rogers RO4003C قرار گرفته اند. هر قسمت به صورت جداگانه طراحی و پیاده سازی شده است که در این قسمت روش کار به طور مختصر شرح داده می شود.



شکل (۵): ساختار عملیاتی نوسان ساز با مشدد دی الکتریک فعال پیشنهادی

### ۳-۱- تقویت کننده

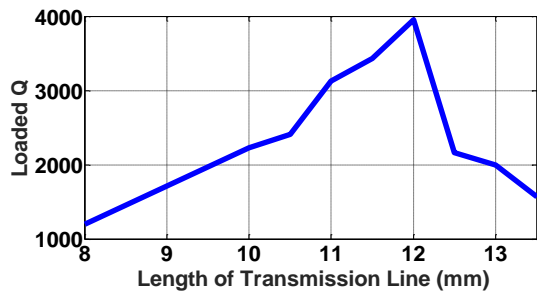
در طراحی نوسان ساز میکروویو، مدل غیرخطی تقویت کننده مورد استفاده قرار می گیرد. مدل Gunmel-Pool تقویت کننده به همراه عناصر پارازیتیکی مورد نظر است. بهره تقویت کننده باید به اندازه ای باشد تا بتواند تلفات داخلی کوپلرها، مشدد، شیفت دهنده فاز، کوپلر خروجی، اتصال دهنده ها و کابل ها را جبران کند. لازمه نوسان اینست که در هنگام شروع نوسان بهره حلقه بزرگتر از ۱ باشد. ترانزیستور Infineon BFP520F یک تقویت کننده دوقطبی کم نویز و توان بالا از گروه SiGe است، که در ولتاژ  $V_{CE}$  برابر ۲۷ و جریان کلکتور  $I_C$  برابر ۳۶ mA بایاس گردیده، به عنوان عنصر فعال به کار گرفته شده است.

در مدار بایاس شده، استاپ های شعاعی<sup>۱</sup> و خطوط انتقال دارای طول الکتریکی برابر با ۹۰ درجه در فرکانس ۸ GHz هستند که مدار را در فرکانس های بالا باز نگه دارند. ولتاژ DC برابر با ۴/۵ V به عنوان تغذیه تقویت کننده به کار گرفته شده و اندازه گیری ها توسط تحلیل گر شبکه<sup>۲</sup> مدل HP8720B صورت گرفته است. به منظور حذف بهره فرکانس های پائین و اطمینان از پایداری، یک مقاومت به صورت سری با بایاس تی در بیس و کلکتور قرار گرفته است. علت استفاده از بایاس تی، ایزوله نمودن بایاس DC از RF می باشد.

<sup>۳</sup> Spacer

<sup>۱</sup> Radial Stub

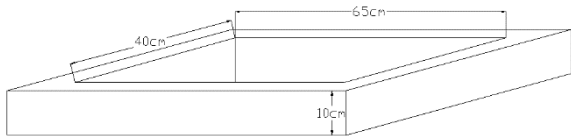
<sup>۲</sup> Network Analyzer



شکل (۱۰): تغییرات  $Q_L$  نسبت به طول خطوط میکرواستریپ

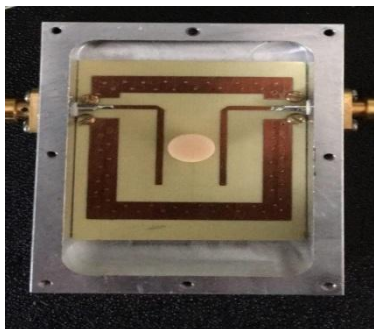
مشدد دی الکتریک در داخل محفظه فلزی با ابعاد  $10\text{cm} \times 6.5\text{cm} \times 4\text{cm}$  که دارای چندین فرکانس تشدید با مدهای مختلف (ترکیبی از p.n.m) است، قرار دارد. معادله (۶)، رابطه بین فرکانس تشدید  $f_r$ ، ابعاد محفظه  $c, b, a$  و هم چنین مد تحریک شده در محفظه را بیان می کند. به علاوه به منظور جلوگیری از نوسانات ناخواسته در فرکانس های تحریک شده در محفظه که در فرکانس های  $2/3\text{ GHz}$ ،  $4/4\text{ GHz}$  و  $7/8\text{ GHz}$  رخ می دهد، تکه ای از ماده جاذب بر روی دیواره داخلی بالایی محفظه چسبانده شده است، در نتیجه  $Q_0$  از مقدار  $9600$  به  $8100$  کاهش می یابد [۲۰].

$$f_r = c \sqrt{\left(\frac{m}{2a}\right)^2 + \left(\frac{n}{2b}\right)^2 + \left(\frac{p}{2c}\right)^2} \quad (5)$$



شکل (۱۱): ساختار محفظه فلزی

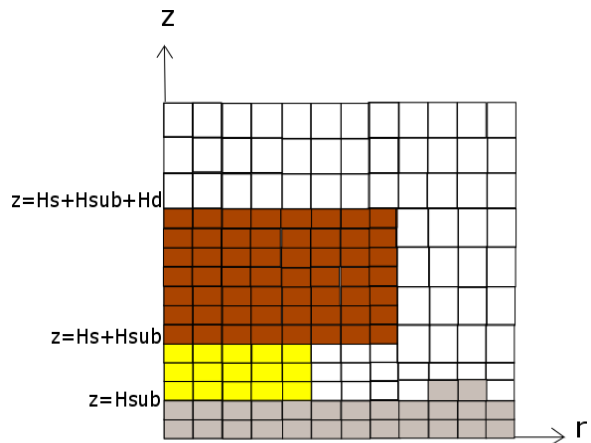
شکل (۱۲)، ساختار مشدد ساخته شده را نمایش می دهد. بعد از چسباندن ماده جاذب، به عنوان مشدد در اندازه گیری ها مورد استفاده قرار گرفت.



شکل (۱۲): مشدد ساخته شده در جعبه آلومینیومی

فاصله بین خطوط انتقال،  $10/8\text{ mm}$  و مشدد عایقی به فاصله  $6\text{ mm}$  از انتهای خط قرار گرفته است. شکل (۱۳)، نتایج اندازه گیری مشخصه فرکانسی مشدد دی الکتریک را نشان می دهد.  $Q_L$  برابر با  $3651$  و فرکانس تشدید  $7/9918\text{ GHz}$

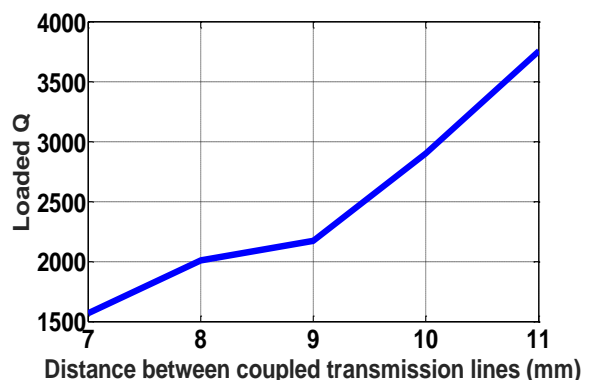
محاسبه فاصله بین خطوط میکرواستریپ و مشدد عایقی به محفظه حاوی مشدد عایقی اعمال گردیده است. شکل (۸)، یک چهارم از ساختار متقارن مشدد عایقی کوپل شده به دو خط میکرواستریپ در داخل محفظه را نشان می دهد. به منظور یافتن فاصله بهینه بین مشدد عایقی و خطوط میکرواستریپ، معادله (۴) باید به همه نقاط شکل (۸) اعمال گردد.



شکل (۸): بخشی از ساختار مشدد عایقی کوپل شده در محفظه

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \left( \omega^2 \epsilon \mu - \frac{1}{r^2} \right) \psi + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = 0. \quad (4)$$

شکل (۹)، نتایج شبیه سازی وابستگی  $Q_L$  به فاصله بین خطوط انتقال از طریق محاسبات تفاضل محدود نشان می دهد. طول خطوط میکرواستریپ  $11/4\text{ mm}$  معادل با  $\lambda/2$  می باشند. نتایج نشان می دهد که با افزایش فاصله بین خطوط انتقال،  $Q_L$  افزایش می یابد.



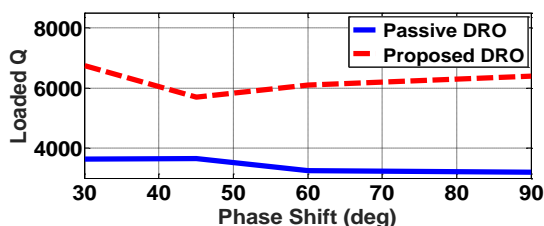
شکل (۹): تغییرات  $Q_L$  نسبت به فاصله بین خطوط میکرواستریپ

شکل (۱۰)، نتایج آزمایشگاهی مقدار  $Q_L$  را نسبت به طول خطوط تزویج مورد مقایسه قرار می دهد. نتایج نشان می دهد که در طول خط  $12\text{ mm}$  که حدود معادل با  $\lambda/2$  و با فاصله ای برابر با  $10/8\text{ mm}$  بین خطوط تزویج مقدار  $Q_L$  حداکثر مقدار خود را دارد.

با تغییر طول خط انتقال میانی به منظور برقراری شرط فاز در حلقه بازخورد و اندازه‌گیری نویز فاز نوسان‌ساز، طول بهینه خط میکرواستریپ به دست می‌آید. با بهره‌گیری از مدل پیشنهادی ارائه‌شده در شکل (۲)، اندازه‌گیری بهره حلقه باز نشان می‌دهد که مقدار  $Q_L$  به ۶۷۵۸ افزایش یافته است.

### ۳-۵- شیفتهنده فاز

هدف از شیفتهنده فاز تنظیم باند باریک نوسان‌ساز است. زمانی که یک تغییر فاز خارجی به سیستم اعمال می‌شود، مشدد در فرکانسی غیر از فرکانس اصلی خود تشدید خواهد داشت. مزیت تنظیم فاز توسط شیفتهنده فاز که می‌تواند به صورت مکانیکی تنظیم گردد این است که  $Q$ ، فرکانس، و نویز فاز خروجی را تغییر نمی‌دهد. اختلاف فاز کل در داخل حلقه باید مضرب صحیحی از  $2\pi$  باشد که حداکثر مقدار ضریب کیفیت به دست آید. شکل (۱۵)،  $Q_L$  مربوط به مشدد غیرفعال و فعال پیشنهادی را در فازهای مختلفی از شیفتهنده فاز در حلقه باز مقایسه می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که هر کدام از نوسان‌سازها در فازهای مختلفی به حداکثر مقدار  $Q$  می‌رسند.



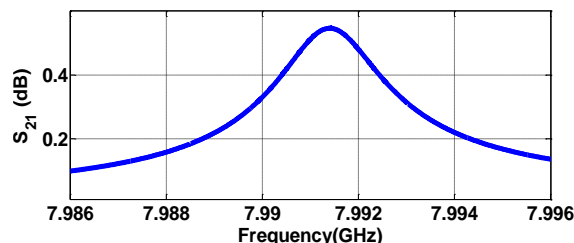
شکل (۱۵): تغییرات  $Q_L$  براساس تغییرات فاز شیفتهنده فاز

### ۴- نتایج شبیه‌سازی

به منظور صحت‌گذاری بر تئوری ارائه‌شده، یک نوسان‌ساز متشکل از مشدد دی‌الکتریک غیرفعال، تقویت‌کننده، شیفتهنده فاز، و تزویج‌کننده خروجی و همچنین نوسان‌ساز با مشدد دی‌الکتریک فعال پیشنهادی که شامل یک عنصر فعال است، در فرکانس ۷/۹۹۱۸ GHz طراحی و شبیه‌سازی گردیدند. پارامترهای طراحی تقویت‌کننده بایاس‌شده، مشدد دی‌الکتریک و فاصله‌های تزویج در هر دو ساختار یکسانند و تنها تفاوت اصلی وجود تزویج اضافه در ساختار مشدد فعال است. شکل (۱۶)، بلوک دیاگرام این دو نوع نوسان‌ساز و نتایج شبیه‌سازی نویز فاز آن‌ها را مورد بررسی و مقایسه قرار می‌دهد. ساختار نوسان‌ساز مشدد عایقی فعال با وجود یک عنصر فعال، مقدار نویز فاز را به اندازه ۱۲ dB کاهش می‌دهد. مقدار نویز فاز برابر با  $-142$  dBc/Hz در آفست فرکانسی ۱۰۰ kHz است که با افزایش ضریب کیفیت حاصل شده است.

اندازه‌گیری گردید. بنابراین، طبق رابطه (۶)، مقدار  $Q_0$  برابر با ۸۱۰۰ خواهد بود.

$$S_{21} = \left(1 - \frac{Q_L}{Q_0}\right) \quad (6)$$



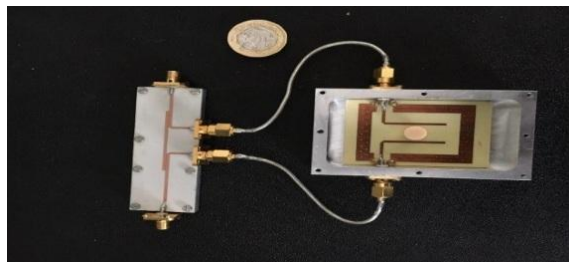
شکل (۱۳): طیف فرکانسی اندازه‌گیری مشدد در آفست ۱۰ MHz

### ۳-۳- تزویج‌کننده خروجی

فرکانس و دامنه نوسانات به تغییرات بار متصل به خروجی بستگی دارد. تغییرات پارامترهای نوسان‌ساز ناشی از Load Pulling با به‌کارگیری تزویج‌کننده خروجی کاهش می‌یابد. به همین منظور از تزویج‌کننده به طول  $\lambda/4$  و ضریب تزویج ۱۰ dB - استفاده گردید [۲۱].

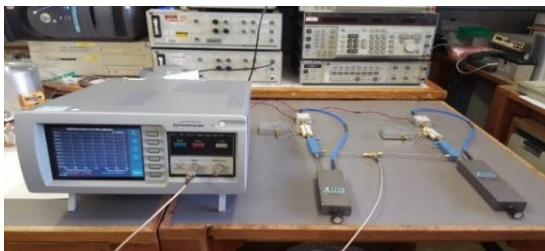
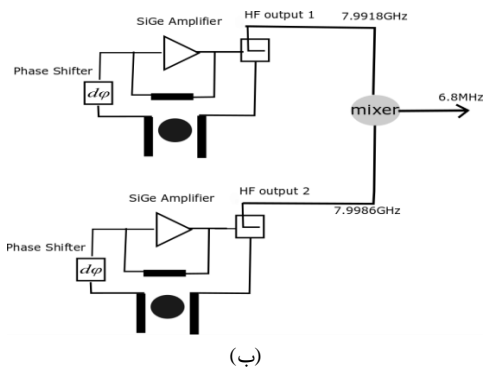
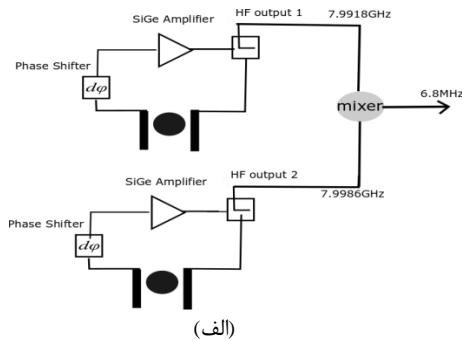
### ۳-۴- حلقه بازخورد فعال

ضریب کیفیت مشدد عایقی تزویج شده به خطوط میکرواستریپ برابر با ۳۶۵۱ در فرکانس ۷/۹۹۱۸ GHz است. طبق رابطه (۱)، افزایش  $Q_L$  نویز فاز را کاهش می‌دهد. شکل (۱۴)، ساختار مشدد متصل به بازخورد فعال شامل دو خط تزویج و یک خط انتقال در میان آن‌ها به منظور تزریق توان به مشدد، نشان می‌دهد. ابعاد خطوط تزویج، فاصله بین خطوط و طول خط انتقال میانی از عوامل کلیدی هستند که بر مقدار  $Q_L$  و نویز فاز تأثیر گذارند و طبق روابط (۱) و (۲) به منظور بهبود نویز فاز توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی HFSS بهینه شده‌اند. طول خطوط تزویج برابر با  $\lambda/4$  و فاصله بین آن ۱ mm تنظیم گردیده است، به نحوی که مشابه یک تزویج‌کننده ۱۰ dB - عمل می‌کنند. نسبت ولتاژ در دو سر خط انتقال میانی، میزان بهره تزریق شده به مشدد را نشان می‌دهد که این مقدار برابر ۱/۳۳ است.

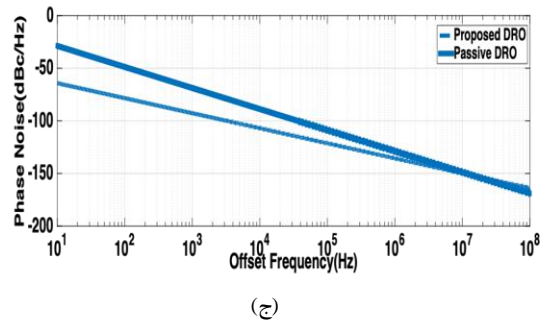
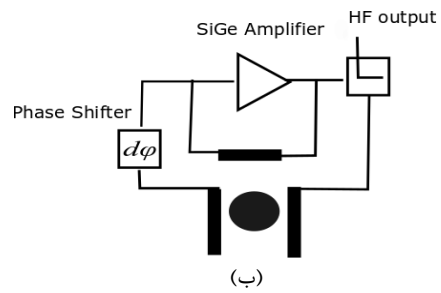
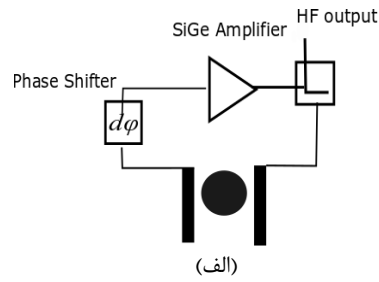


شکل (۱۴): مشدد دی‌الکتریک متصل به حلقه بازخورد

از آنجایی که نویز فاز نوسانساز مشدد عایقی از سطح نویز فاز طیف سنج کمتر است، اندازه‌گیری نویز فاز به روش ضربان<sup>۱</sup> (اتصال دو نوسانساز مشابه توسط مخلوط‌کننده) صورت گرفته است. شکل (۱۸-الف) بلوک دیاگرام اندازه‌گیری نویز فاز نوسانساز مشدد عایقی غیرفعال، شکل (۱۸-ب) بلوک دیاگرام اندازه‌گیری نویز فاز نوسانساز مشدد عایقی فعال با وجود یک عنصر فعال، شکل (۱۸-ج) ساختار تست آزمایشگاهی نوسانساز مشدد عایقی فعال با وجود یک عنصر فعال را نشان می‌دهد. در روش اندازه‌گیری به روش ضربان خروجی به صورت یک سیگنال پائین آورده شده است که فرکانس آن برابر با ۶/۸ MHz است. نویز فاز خروجی مخلوط‌کننده به منظور بررسی اثر وجود حلقه بازخورد فعال مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که نویز فاز واقعی ۳ dB کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده است. لذا لازم است که ۳ dB از مقدار اندازه‌گیری شده، کاسته شود.



شکل (۱۸): اندازه‌گیری نویز فاز، الف) بلوک دیاگرام نوسانساز غیرفعال، ب) بلوک دیاگرام نوسانساز فعال، ج) ساختار تست آزمایشگاهی نوسانساز مشدد عایقی فعال با وجود یک عنصر فعال



شکل (۱۶): الف) نوسانساز مشدد عایقی غیرفعال ب) نوسانساز مشدد عایقی فعال ج) نتایج شبیه‌سازی نویز فاز نوسانساز مشدد عایقی فعال و غیرفعال

## ۵- نتایج اندازه‌گیری

به منظور انجام تست‌های آزمایشگاهی اجزای نوسانساز شامل مشدد، تقویت‌کننده و تزویج‌کننده‌ها جداگانه داخل محفظه‌های فلزی و یا بر روی صفحات فلزی قرار داده شده‌اند. در نهایت همه اجزای نوسانساز داخل یک محفظه فلزی به منظور جلوگیری از تشعشعات الکترومغناطیسی قرار گرفت. طیف خروجی ساختار نوسانساز مشدد عایقی فعال پیشنهادی در شکل (۱۷) قابل مشاهده است.



شکل (۱۷): توان خروجی نوسانساز فعال با وجود یک عنصر فعال

<sup>1</sup> Beating



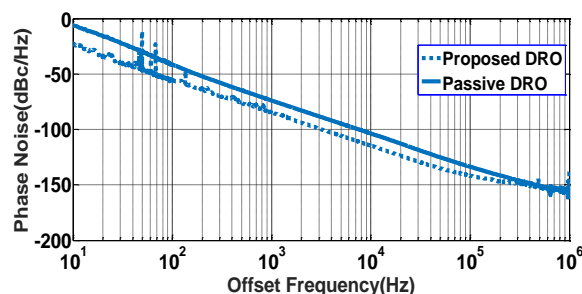
## ۶- نتیجه گیری

هدف اصلی این مقاله، طراحی نوسان‌سازهایی با حداقل نویز فاز است. ساختار نویسی از نوسان‌ساز با مشدد دی‌الکتریک فعال که در فرکانس ۷/۹۹۱۴ GHz نوسان می‌کند، مورد بررسی قرار گرفته است. با هدف دستیابی به حداقل نویز فاز، ساختار مشدد دی‌الکتریک در حلقه بازخورد به‌گونه‌ای تغییر یافته است که میزان  $Q_L$  افزایش یابد. اساس این روش، استفاده از تنها یک تقویت‌کننده در ساختار نوسان‌ساز با مشدد فعال است که مسائل مربوط به نوسان‌ساز با مشدد فعال معمول از جمله اضافه شدن نویز، پیچیدگی ساختار، نوسان در فرکانس‌های ناخواسته و کاهش راندمان مدار را ندارد. نتایج اندازه‌گیری نشان می‌دهد که نویز فاز به مقدار  $-145$  dBc/Hz در آفست  $100$  kHz کاهش پیدا کرده که بیانگر  $12$  dB بهبود در مقایسه با نوسان‌ساز با مشدد دی‌الکتریک غیرفعال است. همچنین مقدار  $Q_L$  از  $3651$  به مقدار  $6758$  افزایش یافته است.

## ۷- مراجع

- Z. Li, Y. Liu, and J. Bao, "A phase noise reduction method in microwave oscillator using a high-Q transmission line loaded with active SIW resonator", *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol.58, no.1, Nov. 2015.
- M. Takbiri, A. Bijari, S.M. Razavi, "CMOS differential low noise amplifier with low power level and high power for ultra-band frequency application," *Journal of Applied electromagnetics*, vol.4, pp.47-56, 2016 (In Persian).
- L. K. Hady, A. A. Kishk, and D. Kajfez, "Dielectric resonator antenna in a polarization filtering cavity for dual function applications," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 56, no. 12, pp. 3079-3085, Dec. 2008.
- J.K. Plourde and C.L. Ren, "Application of Dielectric Resonators in Microwave Components", *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol.29, no.8, pp. 754-769, Aug.1981.
- S. J. Fiedziuszko and S. Holme, "Dielectric resonators raise your high-Q," *IEEE Microw. Mag.*, vol. 2, no. 3, Sep. 2001.
- D. Kajfez and P. Guillon, *Dielectric Resonators*. Norwood, MA: Artech House, 1986.
- S.B. Cohn, "Microwave bandpass filters containing high-Q dielectric resonators", *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol.16, no.4, pp. 218-227, Apr.1968.
- C.Y. Chang and T. Itoh, "Microwave active filters based on coupled negative resistance method," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 38, pp. 1879-1884, Dec. 1990.
- H. Du, X. Yu, H. Zhang, and P. Chen, "A method to improve phase noise of oscillator based on triangular SIW resonators", *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol.60, no.5, May. 2018.
- M. Nick and A. Mortazawi, "Low phase-noise planar oscillators based on low-noise active resonators," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 58, no. 5, pp. 1133-1139, May. 2010.
- M. Nick, "New Q-Enhanced Planar Resonators for Low Phase-Noise Radio Frequency Oscillators," Ph.D. dissertation, Dept. Electrical Eng., Michigan Univ., Ann Arbor, MI, 2011.

شکل (۱۹)، مقدار نویز فاز نوسان‌ساز مشدد عایقی پیشنهادی و غیرفعال را مورد مقایسه قرار می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که نویز فاز در حالت فعال برابر با  $-145/19$  dBc/Hz است که  $12$  dB نسبت به حالت غیرفعال کاهش یافته است.



شکل (۱۹): نتایج اندازه‌گیری نویز فاز نوسان‌ساز با مشدد عایقی پیشنهادی و غیرفعال

جدول (۱)، عملکرد ساختار پیشنهادی را با انواع نوسان‌سازها با مشدد عایقی، با ساختارها و عناصر تقویت‌کننده متفاوت مورد بررسی قرار می‌دهد. فاکتور نویز  $^1(NF)$ ، نوسان‌سازها را از لحاظ فرکانس تشدید  $f_0$ ، آفست فرکانسی  $\Delta f$ ، توان مصرفی  $P_{DC}$  و نویز فاز  $P.N$  طبق رابطه (۸) مورد مقایسه قرار می‌دهد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که ساختار نوسان‌ساز با مشدد عایقی فعال عملکرد بهتری نسبت به دیگر نوسان‌سازها با مشدد عایقی دارد.

$$FOM = P.N - 20 \log \left( \frac{f_0}{\Delta f} \right) + P_{DC} \text{ (dBm)}. \quad (7)$$

جدول (۱): مقایسه عملکرد انواع نوسان‌سازها

ساختار	$f_c$ نوسان‌ساز مشدد عایقی (GHz)	$\Delta f$	PN (dBc/Hz)	FOM
[۲۳]	۲۳/۸	۱ MHz	-۱۴۶	-۲۱۵/۶
[۲۴]	۶/۷	۱ MHz	-۱۵۵	-۲۰۲/۵
[۲۵]	۹/۷۸	۱۰۰ kHz	-۱۱۶/۲	-۱۸۱
[۲۶]	۱۰/۰۵	۱۰۰ kHz	-۱۲۲	-۲۰۶
نوسان‌ساز مشدد عایقی غیرفعال	۷/۹۹	۱۰۰ kHz	-۱۳۳	-۲۰۶
نوسان‌ساز مشدد عایقی فعال	۷/۹۹	۱۰۰ kHz	-۱۴۵/۱	-۲۱۹/۶
پیشنهادی				

<sup>1</sup> Figure of Merit



- [19] R. Soares, J. Graffeuil, and J. Obregon, Applications of GaAs MESFETs. Artech House, Norwood, MA, 1983.
- [20] Z.Soltani, S. Asadi, E. Mehrshahi, "Single Transistor Low Phase Noise Active Dielectric Resonator Oscillator," INT J MICROW WIREL T., Aug.2019.
- [21] D. M. Pozar, Microwave engineering. USA, NY, New York: Wiley, 2012.
- [22] M. Tiebout, "Low-power low phase noise differentially tuned quadrature VCO design in standard CMOS," IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 36, no. 7, pp. 1018- 1024, Jul. 2001.
- [23] P. Vryonides, S. Nikolaou, and H. Haralambous, "24 GHz low phase noise HBT dielectric resonator oscillator," IEEE 11th annual Wireless and Microwave Technology Conference, pp. 1-4, Apr. 2010.
- [24] C. Perez, D. Floriot, P. Maurin, P. Bouquet, P. M. Guitierrez, J. Obregon, and S. A. Delage, "Extremely low noise InGaP/GaAs HBT oscillator at C-band," IEE Electron Lett., vol. 34, no. 8, pp. 813-814, Apr. 1998.
- [25] M. Q. Lee, K. K. Ryu, and I. B. Yom, "Phase noise reduction of microwave HEMT oscillators using a dielectric resonator coupled by a high impedance inverter," ETRI Journal, vol. 23, no. 4, Dec. 2001.
- [26] N. M. Mahyuddin and N. L. A. Latif, "A 10 GHz low phase noise Split-Ring resonator oscillator," International Journal of Information and Electronics Engineering, vol. 3, no. 6, pp. 584-589 Nov. 2013.
- [12] J. Choi, M. Nick, and A. Mortazawi, "Low phase noise planar oscillators employing elliptic response bandpass filters," IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol.57, no.8, pp. 1959-1965, 2009.
- [13] J. Lee, Y.T. Lee, and S. Nam, "A phase noise reduction technique in microwave oscillator using high-Q active filter," IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., vol.12, no.11, pp. 426-428, 2002.
- [14] B. Madrangeas, B. Jarry, P. Guillon, J. Larroque, B. Theron, and D. Parise, "Three-pole dielectric resonator microwave bandpass active filter," IEE Proc H, Microw. Antennas Propag., vol. 139, no.2, pp. 205-207, Apr. 1992.
- [15] J. Lee, Y.T. Lee, and S. Nam, "High-Q active resonator using amplifiers and their applications to low phase-noise free-running and voltage-controlled oscillators," IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol.52, no.11, pp. 2621-2626, 2004.
- [16] Z. Chen, W. Hong, J. X. Chen, J. Zhou, and L. Sheng Li, "Low phase noise oscillator utilizing high-Q active resonator based on substrate integrated waveguide technique," IET Microw. Antennas Propag., vol.8, no.3, pp.137-144, 2014.
- [17] D. B. Leeson, "A simple model of feedback oscillator noise spectrum", Proc. IEEE, vol.54, no.2, pp. 329-330, Feb. 1966.
- [18] A. Khanna and Y. Garault, "Determination of loaded, unloaded, and external quality factors of a dielectric resonator coupled to a microstrip line", IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol.31, no. 3, pp. 261-264, 1983.

---

**Design and Fabrication of Low Noise Oscillator Using  
Active Dielectric Resonator**

**Z. Soltani<sup>\*</sup>, S. Asadi, E. Mehrshahii**

**Shahid Beheshti University**

(Received: 05/03/2019, Accepted: 16/06/2019)

**Abstract**

*In this paper, the design theory of an 8 GHz oscillator based on a new structure of active dielectric resonators is presented. The new structure emphasizes on phase noise reduction by employing only one active device. The proposed structure uses additional feedback from transistor to resonator in order to increase the quality factor. Measurement results report that phase noise is reduced to -145.19 dBc/Hz at 100 kHz offset frequency which represents 12 dB improvement compared to oscillators with passive dielectric resonators. Also, compared to oscillators with conventional active resonators, noise source of the second amplifier which makes spurious oscillation is removed. The size and power consumption are reduced since one transistor is used in the presented structure. This structure performs the lowest phase noise compared to oscillators with other dielectric resonators.*

**Keywords:** Active Feedback, Dielectric Resonator Oscillator, Phase Noise, Quality Factor

---

<sup>\*</sup> Corresponding author E-mail: [soltani.n87@gmail.com](mailto:soltani.n87@gmail.com)