

کاهش نویز فاز در نوسان سازهای کنترل شونده با ولتاژ (VCO) در باند L با استفاده از ساختارهای فرامواد ابررسانا

علی کشوری^۱، سیدمحمدحسن جوادزاده^۲

^۱ کارشناسی ارشد مخابرات، دانشگاه شاهد، تهران

^۲ استادیار گروه مخابرات، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران (نشانی پست الکترونیک smh.javadzadeh@shahed.ac.ir)

چکیده

امروزه با توجه به پیشرفت‌های که در مخابرات بی‌سیم رخ داده، تقاضا برای نوسان‌سازهای کنترل شونده با ولتاژ (VCO) با نویز فاز بسیار کم، به عنوان یکی از اجزای اساسی سنتز کننده‌های فرکانسی، افزایش چشمگیری پیدا کرده است. نویز فاز نوسان‌ساز کنترل شونده با ولتاژ به ضریب کیفیت رزوناتور وابسته است که در این کار، این موضوع با بکارگیری رزوناتورهای فرامواد ابررسانا محقق شده است. به کارگیری ابررساناها در فرامواد سبب سه خاصیت منحصربه‌فرد تلفات بسیار کم، کوچک‌تر شدن ابعاد ساختار و همچنین افزایش ضریب کیفیت رزوناتور می‌شود. در این مقاله با بکارگیری این خواص، در ساختار رزوناتور توانسته‌ایم در باند فرکانسی L به نویز فاز 150dBc/Hz - در آفست 100KHz برای VCO با محدوده تغییرپذیری فرکانسی 150MHz دست یابیم. این رزوناتور را در دو حالت فرامواد با مس و فرامواد ابررسانا بررسی و نتایج را با یکدیگر مقایسه کرده‌ایم. نهایتاً نشان داده خواهد شد چگونه بکارگیری ابررسانا می‌تواند سبب کاهش نویز فاز در VCO شود.

کلیدواژه

نوسان ساز، نویز فاز، فرامواد ابررسانا، ضریب کیفیت رزوناتور، فرامواد.

مقدمه

فرامواد به موادی گفته می‌شود که مهندسی شده‌اند و خواص آن‌ها ممکن است در طبیعت یافت نشود. این مواد ویژگی‌های خود را از ساختارشان (که به دقت طراحی شده است) می‌گیرند. فرامواد معمولاً از ساختارهای متناوب فلزی ساخته شده‌اند و تناوب ساختار بسیار کوچک‌تر از طول موج است و بنابراین به آن‌ها ضریب گذردهی و نفوذپذیری مؤثر نسبت می‌دهیم که ساختارشان این مقادیر مؤثر را تعیین می‌کند. در واقع می‌توان این‌گونه تصور کرد که هر یاخته^۲ از ساختار معادل است با یک فرا-اتم^۳ که نقش اتم را در مواد معمولی بازی می‌کند. با طراحی مناسب این فرا-اتم می‌توان مشخصات الکتریکی و مغناطیسی فراماده را تنظیم کرد [۳-۵].

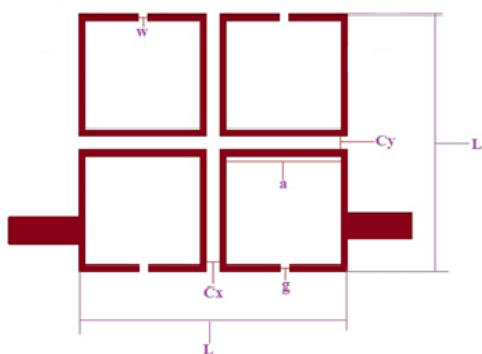
استفاده از ابررسانا دما بالا به جای رسانای فلزی در رزوناتورهای مسطح امکان کوچک‌سازی این نوع رزوناتورها تا حد نسبتاً زیادی بدون آنکه تلفات زیاد شود را فراهم کرده است و به این ترتیب با استفاده از کوچک بودن رزوناتورهای ابررسانا به نوبه خود باعث پایین آمدن هزینه ساخت و همچنین پایین آمدن هزینه سرمایه‌ی رزوناتور نیز می‌شود. رزوناتورهایی که با استفاده از فناوری ابررسانایی ساخته

یکی از قطعاتی که در سیستم‌های مخابراتی مورد استفاده قرار می‌گیرد قطعه نوسان‌ساز کنترل شونده با ولتاژ است. نوسان‌ساز کنترل شونده با ولتاژ یک دستگاه الکترونیکی است که برای کنترل فرکانس توسط ولتاژ طراحی شده است. فرکانس نوسان یا سرعت تکرار در ثانیه متناسب با ولتاژ DC ورودی تغییر می‌کند، پس وقتی سیگنال پیام را به VCO ارسال می‌کنیم، مدولاسیون فرکانس، مدولاسیون فاز و مدولاسیون پهنای پالس را می‌توان به دست آورد. سیگنال خروجی یک نوسان‌ساز علاوه بر این‌که باید در فرکانس موردنظر با حداکثر دامنه ممکن تولید شود باید یک ویژگی مهم دیگر را داشته باشد، و آن ویژگی نویز فاز سیگنال است. نویز فاز را به صورت نسبت توان در یک سمت مدولاسیون فاز به کل توان سیگنال در پهنای باند یک هرتزی و در یک آفست مشخص را می‌گوییم که واحد آن dBc/Hz است. امروزه با توجه به پیشرفت‌های که در مخابرات بی‌سیم انجام شده است، تقاضا برای کانال‌های بدون نویز فاز در نوسان‌سازهای کنترل شونده با ولتاژ افزایش پیدا کرده است، زیرا نویز فاز یکی از عوامل مهم برای انتقال اطلاعات است. [۱-۲].

² Unit cell

³ Meta-atom

¹ Voltage-controlled oscillator



شکل ۱: نمای رزوناتور.



شکل ۲: پارامترهای زیر لایه تشدیدگر.

جدول ۱: مقادیر رزوناتور فرامواد با مس.

h	Cx	Cy	g	a	w	L
31 mil	0.8 mm	0.7 mm	1.3 mm	10 mm	1.2 mm	25 mm

در این طراحی از زیرلایه‌ی راجرز TC600 با ضخامت h که دارای ضریب گذردهی الکتریکی 6.15 و تانژانت تلفات 0.002 می‌باشد استفاده شده است. همچنین فلز مورد استفاده در این ساختار مس با ضخامت t به مقدار ۳۵ میکرون است. مقادیر طول موج و فرکانس تشدید ساختار نیز طبق روابط ۱ تا ۴، [۲] به دست می‌آیند.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

$$\lambda_g = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

C = سرعت موج در فضای آزاد

$z_0 = 50\Omega$ امپدانس مشخصه

هم چنین طول و عرض میکرواستریپ نیز از روابط ۳ تا ۵ به دست می‌آیند.

$$z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_r \left[\frac{w}{d} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{w}{d} + 1.444 \right) \right]}} \text{ for } w/d \geq 1 \quad (3)$$

$$\frac{w}{d} = \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] \quad (4)$$

$$B = 377 \pi / 2z_0 \sqrt{\epsilon_r} \quad (5)$$

می‌شوند دارای مزیت‌هایی نسبت به رزوناتورهای معمول مایکروویو به شرح زیر می‌باشند:

- ۱- تلفات انتقال کم
- ۲- گزینش بسیار بهتر
- ۳- عدد نویز بسیار کم
- ۴- سایز کوچک‌تر و وزن کمتر نسبت به رزوناتورهای مایکروویو با کارایی مشابه

در این گزارش ابتدا یک رزوناتور فرامواد با استفاده از فلز مس طراحی می‌کنیم و سپس بعد از آن با افزودن ماده ابررسانا به ساختار مقادیر نویز فاز را در آفست‌های مختلف را بررسی خواهیم کرد. همچنین قابل ذکر است که شبیه‌سازی‌های قسمت پسیو با استفاده از دو نرم‌افزار CST و HFSS انجام شده است و شبیه‌سازی‌های قسمت اکتیو با نرم‌افزار ADS صورت گرفته است.

طراحی رزوناتور فرامواد

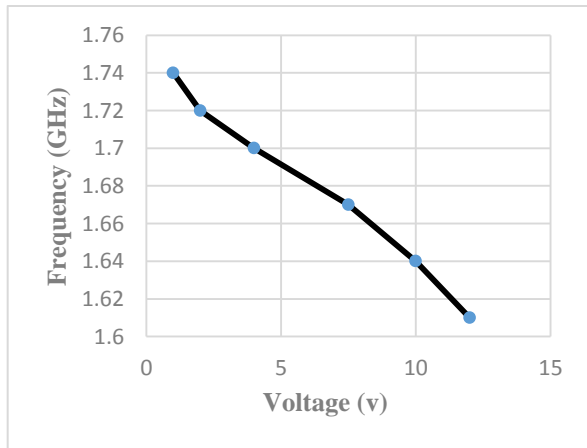
ساختارهای فرامواد متشکل از یک سری مسی‌های حلقوی می‌باشند، که بانظم و چیدمان خاصی کنار یکدیگر قرار می‌گیرند تا به ضریب کیفیت مورد نظر دست پیدا کنیم. ضریب کیفیت رزوناتور برابر است با نسبت بین انرژی ذخیره شده و انرژی تلف شده در طی یک دوره تناوب که هر چه ضریب کیفیت بیشتر باشد، نمودار فرکانسی دارای قله نوک تیزتری خواهد بود. با توجه به فرکانس کاری و میزان ضریب کیفیت مورد نظر تعدادی از آن حلقه‌ها با فواصل مشخص در کنار همدیگر قرار دارند. در این طراحی یک ساختار فرامواد که بتوان به کمک یک بایاس خارجی فرکانس رزونانس آن را تنظیم کرد طراحی و ارائه می‌گردد. هدف رسیدن به یک تشدیدگر فرکانسی قابل تنظیم با ضریب کیفیت بالا بوده تا به کمک آن بتوان یک اسیلاتور کنترل شونده با ولتاژ با نویز فاز بسیار پایین طراحی کرد. در شکل ۱، شماتیک این رزوناتور قابل ملاحظه است.

همان‌طور که در شکل ۱، مشاهده می‌گردد این ساختار از ۴ حلقه رزونانسی (SRR^۱) تشکیل شده است، که این حلقه‌ها با چیدمان و فواصل خاصی از یکدیگر قرار گرفته اند. ساختارهای SRR دارای شکاف در حلقه‌ها می‌باشند، که این شکاف‌ها یکی از ویژگی‌های مهم در طراحی است و نحوه قرار گرفتن این شکاف‌ها بسیار مهم است [۶].

تحریک این ساختار توسط خط انتقالی در ورودی و خروجی آن است که این ساختار در راستای قائم متقارن می‌باشند. طول ابعاد مختلف این ساختار به صورت جدول ۱ و شکل ۲ است.

^۱ Split Ring Resonator

پس از شبیه‌سازی فرکانس تشدید در شکل ۴، قابل مشاهده است که ضریب کیفیت رزوناتور فرامادی 4.6×10^4 است. همچنین با مشاهده شکل ۵، می‌توان دریافت که مکان انتخابی حلقه‌ها و شکاف‌ها درست انتخاب شده است، چراکه کوپلینگ موج از حلقه‌ها به یکدیگر درست انجام می‌شود. اکنون پس از بررسی محدوده تغییر پذیری فرکانسی در شکل ۶، مشاهده می‌شود میزان محدوده تغییرپذیری فرکانسی ۱۳۰ مگاهرتز است، که نسبت به کارهای قبلی انجام شده با استفاده از ساختارهای فرامادی افزایش یافته است.

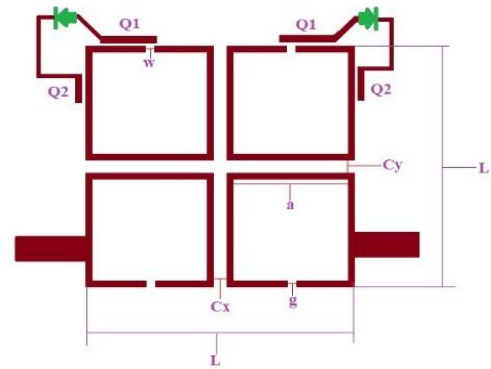


شکل ۶: میزان تغییرپذیری فرکانسی رزوناتور فرامادی با مس.

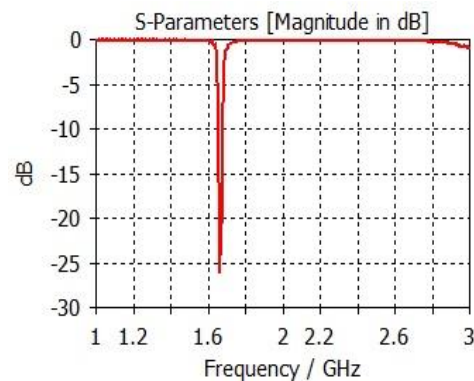
پس از بررسی محدوده تغییرپذیری به بررسی مقادیر نویز فاز در این حالت می‌پردازیم. در شکل ۷، مدار اسپلاتور کنترل شونده با ولتاژ را مشاهده می‌شود که در این طراحی در مسیر فیدبک یک باکس رزوناتور برای بارگذاری فایل‌های s2p رزوناتور تعبیه شده است. ترانزیستور به‌کاربرده شده برای این اسپلاتور NESG20M04 از کمپانی NEC بوده که این ترانزیستور BJT است. نویز بسیار پایین این ترانزیستور و همچنین ابعاد مناسب این ترانزیستور را برای کارهای مخابراتی بسیار مناسب ساخته است. در مدار شکل ۷، مقدار بهینه‌ی بایاس نیز با توجه به نتایج حاصل به‌صورت ولتاژ کلکتور ۲ ولت، جریان کلکتور ۰/۷ میلی‌آمپر و ولتاژ بیس امیتر منفی ۰/۵۳ انتخاب می‌شود. همچنین قابل‌ذکر است که مقاومت‌های R2 و R3 جهت جاری بودن جریان در پیوند (کلکتور-امیتر) قرار گرفته‌اند.

اکنون پس از استخراج فایل‌های S2P و قرار دادن این فایل‌ها در مدار نوسان‌ساز مقادیر نویز فاز را برای حالت فرامادی بررسی می‌کنیم، این مقادیر در شکل ۸، نشان داده شده‌اند و خلاصه‌ای از این مقادیر در جدول ۲، در آفست‌های مختلف نشان داده شده‌اند.

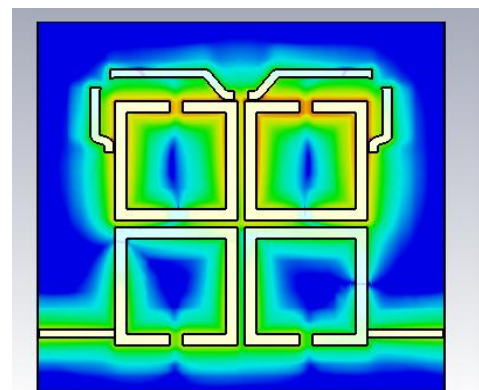
اکنون برای تحقق نوسان‌ساز کنترل شونده با ولتاژ نیاز به دیود ورکتور داریم که مدل پیشنهادی ما برای این کار دیود ورکتور BB131 از کمپانی NXP است که محل قرار گیری این دیود ورکتور بسیار مهم است زیرا در مقدار تنظیم پذیری فرکانس نقش مهمی را دارا است. این دیود ورکتور را در نرم‌افزار HFSS و CST به‌صورت یک مدار عناصر فشرده طبق دیتا شیت طراحی شده است و با قرار دادن این دیود ورکتور در ساختار همانند شکل ۳، میزان تغییرپذیری فرکانسی را در ادامه بررسی می‌کنیم.



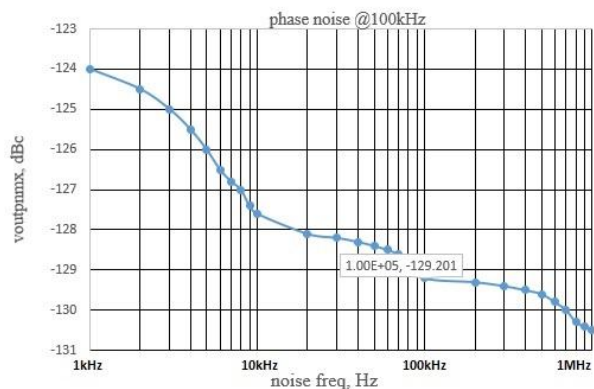
شکل ۳: نحوه قرار گرفتن دیود ورکتور در ساختار.



شکل ۴: پاسخ فرکانس تشدید رزوناتور فرامادی با مس.



شکل ۵: میدان‌ها در داخل فضا فرایند تشدید در ساختار فرامواد ابررسانا در نرم افزار CST.



شکل ۹: مقدار نویز فاز در فرکانس ۱.۶۱ گیگاهرتز و آفست ۱۰۰ کیلوهرتز برای رزوناتور فرامادی.

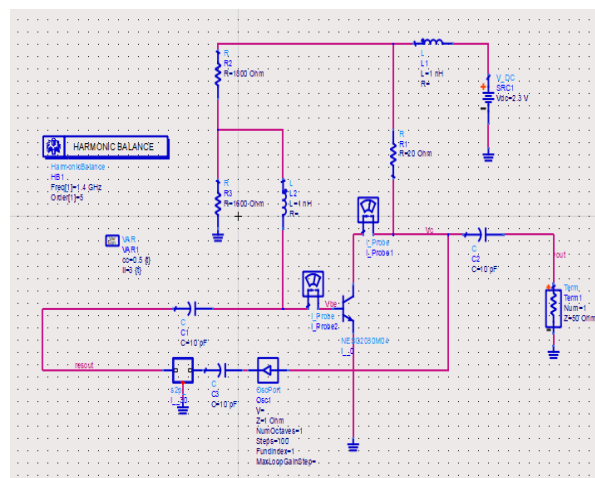
در ادامه در جدول ۳ مقایسه کار انجام شده در این مقاله با دیگر کارهای انجام شده را در آفست ۱۰۰ کیلوهرتز با یکدیگر مقایسه کرده ایم و در ادامه خواهیم دید که این مقادیر به دلیل خاصیت ابرسانایی به طور چشمگیری بهبود یافته اند.

جدول ۳: مقایسه رزوناتور فرامادی با دیگر رزوناتورهای فرامادی.

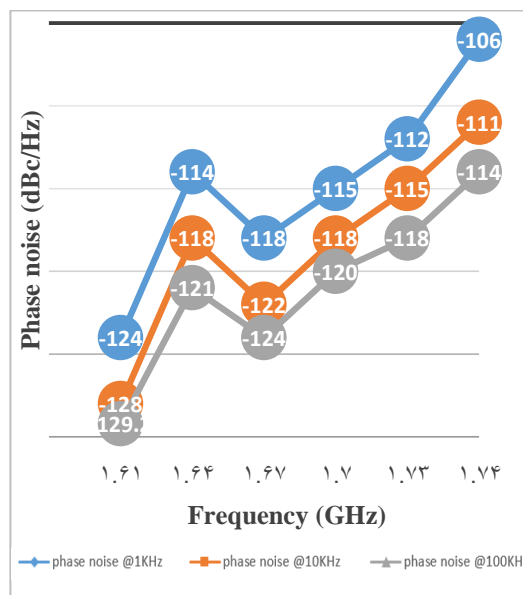
Ref.	Phase noise in 100kHz	Tuning Range	Freq. Range
[6]	-119	120	X
[7]	-122	120	C
[8]	-124	127	S
This Work	-129	130	L

رزوناتور فرامواد ابرسانا

ضریب کیفیت رزوناتور از جمله مهم ترین عوامل بر روی نویز فاز یک اسیلاتور بوده و هرچقدر میزان ضریب کیفیت افزایش یابد نویز فاز نیز کاهش می یابد [۷]. در این قسمت قصد داریم با به کارگیری ابرسانای YBCO که یک ابرسانای دمابالا با دمای بحرانی ۹۲ کلوین است [۸-۹]، تأثیرات این ابرسانا را بر روی ضریب کیفیت و نویز فاز بررسی کنیم. در این قسمت از زیر لایه MgO با ضریب دی الکتریک 9.8 با ضخامت 0.5mm در نظر گرفته شده است، و فیلم ابرسانای YBCO نیز دارای ضخامت 500nm است. با توجه به بالاتر بودن ضریب دی الکتریک نسب به حالت فرامادی ابعاد نیز کوچک تر شده اند. فرکانس تشدید پس از شبیه سازی در دو نرم افزار CST در شکل ۱۰، ۱ نشان داده شده است که در این حالت ضریب کیفیت رزوناتور 7.3×10^6 به دست آمده است، همانطور که مشاهده می شود ضریب کیفیت رزوناتور در حالت مشابه بسیار بهبود یافته است که علت آن این است که تلفات ابرسانا در مقایسه با فلزات معمولی بسیار پایین است که سبب کاهش تلفات هادی و در نتیجه بهبود ضریب کیفیت



شکل ۷: نمای اسیلاتور کنترل شونده با ولتاژ در نرم افزار ADS.



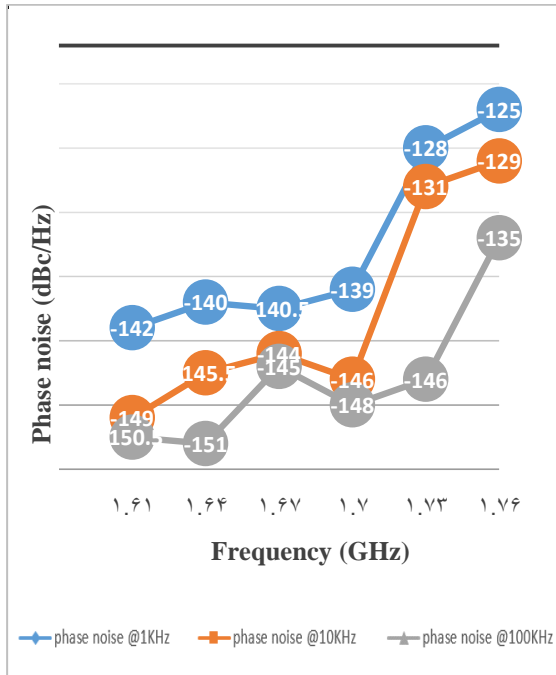
شکل ۸: مقادیر نویز فاز برای رزوناتور فرامادی با مس.

جدول ۲: خلاصه ای از مقادیر نویز فاز برای رزوناتور فرامادی.

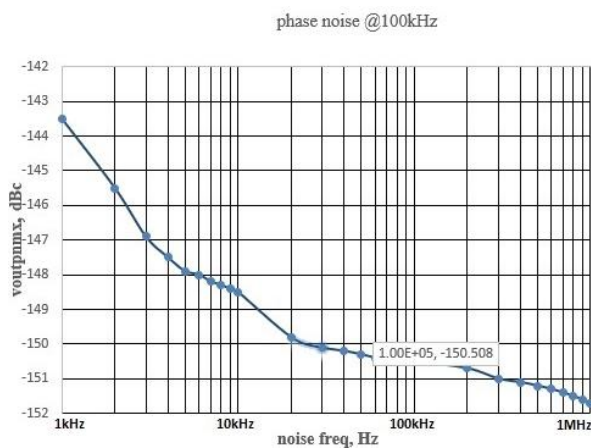
Tuning Range (GHz)	1.61~1.74
Phase noise @ 1kHz	-106 ~ -124
Phase noise @ 10kHz	-111 ~ -128
Phase noise @ 100kHz	-114 ~ -129.2
Phase noise @ 1MHz	-126 ~ -135.5

در ادامه نیز میزان نویز فاز را در فرکانس ۱.۶۱ گیگاهرتز در آفست ۱۰۰ کیلوهرتز در شکل ۹ نشان داده شده است.

اکنون پس از بررسی میزان تغییرپذیری محدوده فرکانسی و با استخراج فایل‌های s2p و با قرار دادن این فایل‌ها در مدار نوسان‌ساز مورد مقادیر نویز فاز را در شکل ۱۳، مرتب‌سازی کرده‌ایم و خلاصه‌ای از این مقادیر را در جدول ۴، نشان داده‌ایم و در ادامه در شکل ۱۴، میزان نویز فاز را برای فرکانس ۱.۶۱ گیگاهرتز در آفست ۱۰۰ کیلوهرتز نشان داده‌ایم.



شکل ۱۳: مقادیر نویز فاز برای رزوناتور فرامواد ابررسانا.

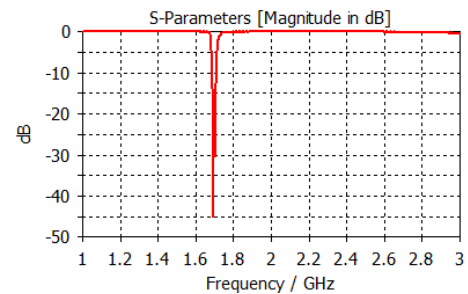


شکل ۱۴: میزان نویز فاز را برای فرکانس ۱.۶۱ گیگاهرتز در آفست ۱۰۰ کیلوهرتز.

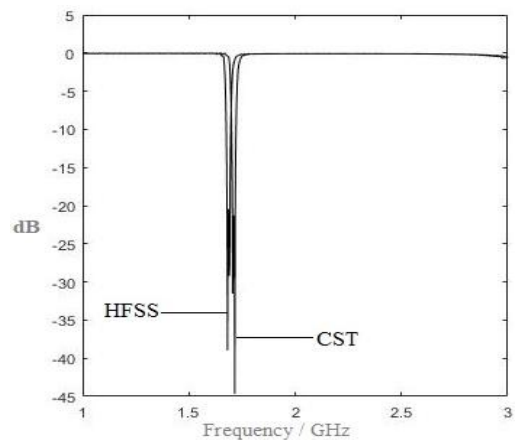
جدول ۴: خلاصه‌ای از مقادیر نویز فاز برای رزوناتور فرامواد ابررسانا.

Tuning Range (GHz)	1.61~1.76
Phase noise @ 1kHz	-125 ~ -143
Phase noise @ 10kHz	-129 ~ -149
Phase noise @ 100kHz	-135 ~ -150
Phase noise @ 1MHz	-142 ~ -154.5

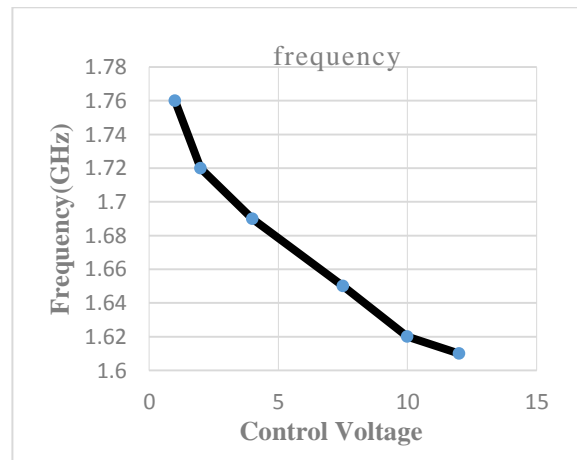
رزوناتور می‌شود. در ادامه مقایسه پاسخ فرکانس تشدید را در دو نرم افزار CST و HFSS را در شکل ۱۱، نشان داده‌ایم. با مقایسه شکل ۴ و ۱۰ مشاهده می‌گردد، ضریب کیفیت رزوناتور در حالت فرامواد ابررسانایی نسبت به حالت فرامادی همانطور که انتظار داشتیم بسیار بهتر شده است، که انتظار نویز فاز بسیار بهتری را نسبت به حالت فرامادی داریم. در ادامه به بررسی میزان تغییرپذیری فرکانسی در حالت فرامواد ابررسانا می‌پردازیم. شکل ۱۲، میزان تغییرپذیری ساختار را نشان می‌دهد که میزان تغییرپذیری فرکانسی در این حالت به ۱۵۰ مگاهرتز رسیده است.



شکل ۱۰: پاسخ فرکانس تشدید برای رزوناتور فرامواد ابررسانا در نرم‌افزار CST.



شکل ۱۱: مقایسه پاسخ‌های فرکانسی برای پاسخ‌های دو نرم‌افزار HFSS و CST.



شکل ۱۲: میزان تغییرپذیری فرکانسی رزوناتور فرامواد ابررسانا.

[2] D. M. Pozar, "Microwave Engineering 3e," *Transmission Lines and Waveguide*. pp.143-149,2005

[3] J.B. Pendry, A.J. Holden, W.J. Stewart, and I. Youngs, "Extremely low frequency Plasmon's in metallic mesostructures," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 76, no. 25, p. 4773, 1996.

[4] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena," *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, vol. 47, no. 11, pp. 2075-2084, 1999.

[5] Shelby, A. Richard, D. R. Smith, and Seldon Schultz. "Experimental verification of a negative index of refraction." *science* 292, no. 5514, pp. 77-79, 2001

[6] C. Lee and S. Seo, "Very low phase noise voltage controlled oscillator using Double H-Shape Metamaterial Resonator," in *synthetic Aperture Radar (APSAR), 2011 3rd International Asia-pacific Conference on*, 2011, pp. 1-4: IEEE.

[7] J. Choei and C. Seo, "Novel Low Phase Noise VCO Using High-Q Metamaterial Transmission Line Based On Complementary Spiral Resonator," in *Microwave Symposium Digest, 2009, MTT09, IEEE MTT-S International*, 2009 pp. 1501-1504: IEEE.

[8] J. W. Choi and C. H. Seo, "Microstrip square open loop metamaterial resonator and rat race couple for low phase noise push VCO," *Journal of electromagnetic engineering and science*, vol. 11, no. 4, pp. 235-238, 2011.

[9] M. R. Vidyakshmi and S. Raghavan, "A cad model of triangular split ring resonator based on equivalent circuit approach," *presented at Applied Electromagnetics Conference (AEMC)*, pp. 1- 4, 2009.

[10] A. Hajimiri and T. H. Lee, "A general theory of phase noise in electrical oscillator," *IEEE journal of solid-state circuits*, vol. 35, no. 3, pp. 326-336, 2000.

[11] S. Y. Lee, K. Y. Kang, and D. Ahn, "Fabrication of YBCO superconducting dual mode resonator for satellite communication," *IEEE transaction on applied Superconductivity*, vol. 5, no. 2, pp. 2563-2566, 1995.

[12] C. M. Chorey, K. S. Kong, K. B. Bhasin, J. Warner, and T. Itoh, "YBCO superconducting ring resonator at millimeter-wave frequencies," *IEEE transaction on microwave theory and techniques*, vol. 39, no. 9, pp. 1480-1487, 1991.

[13] S. Doyle, "Lumped element kinetic inductance detectors," PhD dissertation, Cardiff University, 2008.

[14] O. Noroozian, "Superconducting microwave resonator arrays for submillimeter/far-infrared imaging. PhD dissertation," California Institute of Technology, 2012.

[15] K. Hayashi, A. Saito, Y. Ogawa, M. Murata, T. Sawada, K. Nakajima, H. Yamada, S. Ariyoshi, T. Taino, H. Tanoue, C. Otani, S. Ohshima, "Design and fabrication of microwave kinetic inductance detectors using NbN symmetric spiral resonator array," *Journal of Physics: Conference Series 507*, vol. 507, no. 4, p. 042015, 2014.

به کارگیری ابررساناها در فرامواد سبب ایجاد چند خاصیت مهم از جمله تلفات بسیار کم، تنظیم پذیری، و کوچک تر شدن ابعاد می شود. در این مقاله نیز با استفاده از همین خواص در رزوناتورهای فراموادی توانسته ایم یک رزوناتور فرامواد ابررسانایی با ضریب کیفیت بسیار بهتر نسبت به رزوناتورهای ابررسانا که در جدول ۵ این مقایسه را انجام داده ایم و که به تبع آن توانسته ایم نویز فاز را به طور چشم گیری کاهش دهیم، به طوری که در فرکانس 1.61GHz در آفست ۱۰۰ کیلوهرتز برای رزوناتور فرامواد ابررسانا توانستیم به مقدار نویز فاز -۱۵۰dBc/Hz دست یابیم. مقایسه نتایج حاصله از حالت فرامواد با فلزات متداول با حالت فرامواد ابررسانا در جدول ۶ آورده شده است. همان طور که ملاحظه می گردد میزان تغییر پذیری فرکانسی VCO از ۱۳۰ به ۱۵۰ مگاهرتز افزایش یافته است و همچنین مقادیر نویز فاز نیز به طور چشم گیری کاهش یافته اند.

جدول ۶: مقایسه ضریب کیفیت رزوناتور پیشنهادی با دیگر رزوناتورهای ابررسانا.

Ref.	Film Material	Q Factor	Resonance Frequency (GHz)
[13]	Al	1×10^5	6.58
[14]	TiN	1.7×10^6	1.5
[14]	TiN	3.8×10^5	1.5
[15]	NbN	2×10^5	4.49
This work	YBCO	7.3×10^6	1.61

جدول ۵: مقایسه مقادیر نویز فاز برای دو نوع رزوناتور فرامواد.

Resonator type	Phase noise@100Khz	Tuning Range MHz
Metamaterial Structures	-115 ~ -129.5	130
Superconducting Metamaterial Structures	-135 ~ -150	150

[1] A. Chenakin, *Frequency Synthesizers: Concept to Product*. Artech House, 2011.