

بررسی ساختار اسیلاتورهای هارمونیک N - ام ، پوش - پوش و تریپل - پوش

سارا عندلیب ، فاطمه پورحسن زاده

دانشگاه گیلان

fateme.pourhasanzade@gmail.com , nightingale_sar@yahoo.com

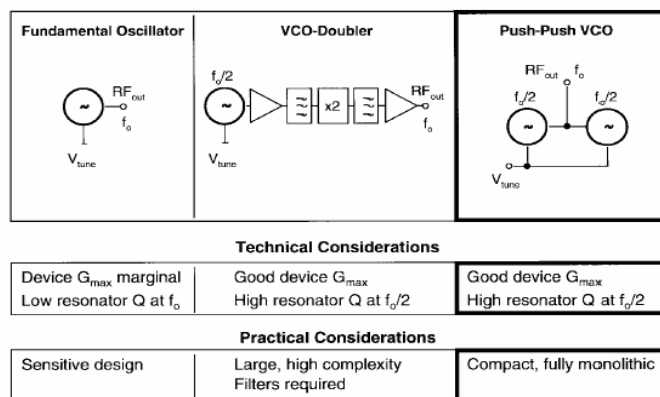
چکیده - با گسترش مدارات *wide band* همچون رادار، سیستم های موج میلی متری (در سنسورها و ارتباطات موبایل) و میکروویو و نیاز به منابع فرکانس بالا، استفاده از ساختاری مدرن بجای ساختارهای کلاسیک همراه با چند دوبلر در مسیر، بررسی شد. این مقاله به بحث پیرامون اسیلاتورهای پوش - پوش (کاربرد مثلاً در *advanced imaging*) و تریپل - پوش می پردازد که به ترتیب از 2 و 3 زیر مدار اسیلاتوری همسان در فرکانس کار یکسان تشکیل شده اند تا بر اساس اختلاف فاز موجود در خروجی هر زیر مدار و جمع سیگنال های خروجی با یک مدار مناسب، بتوان به سیگنالی با فرکانس چند برابر از 2 برابر در پوش - پوش تا N برابر در N - پوش دست یافت.

کلید واژه - اسیلاتور هارمونیک، پوش - پوش، تریپل - پوش، نویز فاز

1- مقدمه

فرکانس نوسان قطعات (f_{max}) می باشد بنابراین اسیلاتورهای هارمونیک N - ام برای فرکانس های موج میلی متری جذاب تر اند [1,3]. اسیلاتورهای N - هارمونیک به دو دسته تقسیم می شوند؛ (N-push) 1-parallel و 2-cascade که با قرار دادن $N = 2$ خواهیم داشت: cascade:doubler, parallel:push-push. اما، مزیت parallel بر cascade این است که؛ بلوک عملیاتی کمتر دارند مثلاً در $N = 2$ پوش - پوش تابع بلوک ضرب اضافی و فیلتر و تقویت را ندارد. بنابراین، ساین کوچک تر و فشرده تری دارد و از آنجا که دابلر ندارد، محدودیت توان ناشی از آن را نداشته و توان مصرفی کمتری دارد.

برای ارتباطات ماکروویو و امواج میلی متری و سیستم های رادار، منابع سیگنال با فرکانس بالا لازم است. دو روش برای تهیه منبع فرکانس بالا داریم: 1- اسیلاتورهای با فرکانس پایه بالا 2- اسیلاتورهای هارمونیک N - ام. اما، معایب گونه اول در فرکانس های بالا؛ ضریب کیفیت پایین، بهره ناکافی و نویز فاز بالاست و مزیت N - هارمونیک هابه جهت اینکه در فرکانس پایین تری کار می کنند، Q بالا، بهره کافی، نویز فاز مناسب، جداسازی فرکانس داخلی و خارجی و دستیابی به فرکانس خروجی بالاتر از بیشترین



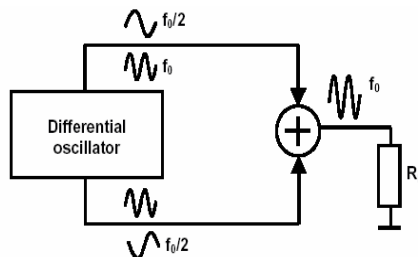
شکل 1 - مقایسه سه روش اسیلاتوری بیان شده در مقدمه [7]

یابد که منجر به جداسازی بار و نوسان ساز می گردد. در ضمن سری های فیدبک برای تولید مقاومت منفی به منظور نوسان استفاده شده اند. [1] حال N - پوش را برای N های مختلف نام گذاری می کنیم.

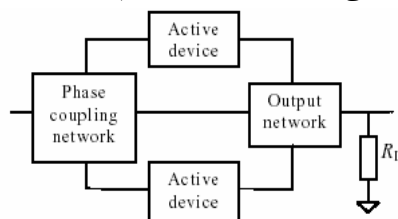
| | |
|-------|----------------|
| $N=2$ | Push-Push |
| $N=3$ | Triple-Push |
| $N=4$ | Quadruple-Push |

3- اسیلاتور پوش - پوش

با ترکیب دو اسیلاتور با اختلاف فاز 180° ، مولفه های فرکانس اصلی حذف و مولفه های هارمونیک دوم بهبود می یابد و فرکانس خروجی دو برابری گردد. هر زیر مدار بطور مجزا در $f_o/2$ نوسان می کند [1,2].

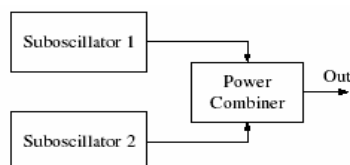


شکل 4 - اسیلاتور پوش - پوش ساخته شده با اسیلاتور تفاضلی [6] در شکل 4 از اسیلاتور تفاضلی که بطور ذاتی اختلاف فاز تولید می کند استفاده شده است. می توان این اختلاف فاز را بوسیله شبکه phase coupling ایجاد نمود. شرط اختلاف فاز 180° در پوش - پوش باعث می شود که هارمونیک اصلی حذف و هارمونیک دوم تقویت گردد.



شکل 5 - ایجاد اختلاف فاز مورد نظر در اسیلاتور پوش - پوش بوسیله شبکه phase coupling [5,2]

در زیر گونه ساده تری دیده می شود.

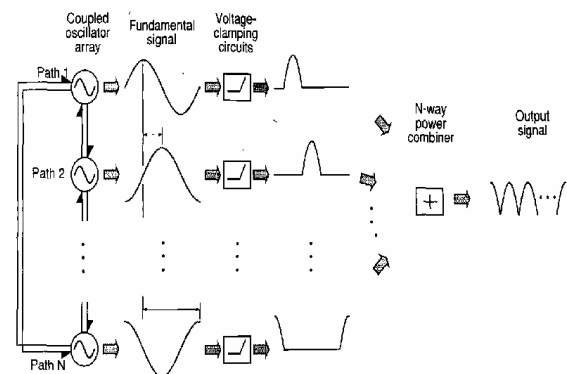


شکل 6 - گونه ساده تری از اسیلاتور پوش - پوش

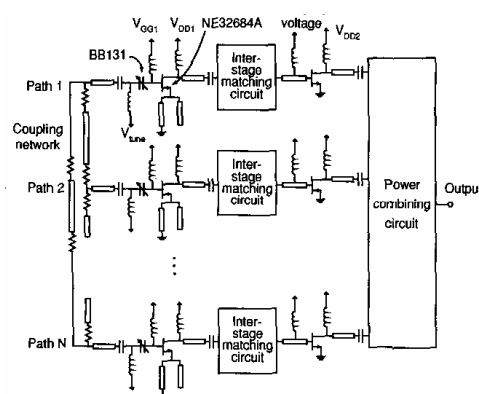
اثبات ریاضی این که فرکانس پایه حذف می شود و $f_1 = 2f_0$ (فرکانس پایه هر زیر اسیلاتور) را در خروجی خواهیم داشت، مطابق زیر است، [8]

2- اسیلاتورهای هارمونیک N - ام (N -پوش)

با ترکیب N اسیلاتور که هر کدام بادیگری اختلاف فاز $360/N$ دارند، مولفه N - ام تقویت شده و هارمونیک های پایین تر حذف می شوند. دو راه برای تولید N - هارمونیک داریم؛ 1- تقویت هارمونیک N - ام و حذف هارمونیک های پایین تر. 2- کوپل چند اسیلاتور با اختلاف فاز های مختلف و استفاده از پدیده injection lock.



شکل 2 - بلوک دیاگرام اسیلاتور هارمونیک N - ام



شکل 3 - شماتیک اسیلاتور هارمونیک N - ام

عوامل کنترل عدد هارمونیک تقویت شده در اشکال 2 و 3:

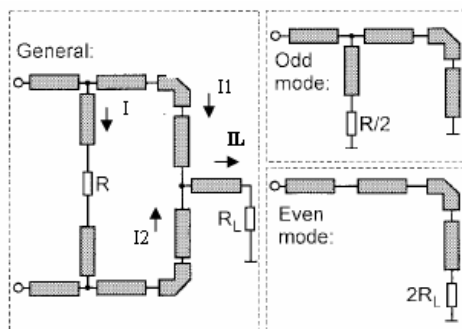
1 - اختلاف فاز بین اسیلاتورهای کوپل شده

2 - زاویه هدایت مدار کلمپ ولتاژ

با یاد آوری اینکه کلمپ اثر غیر خطی را زیاد می کند. برای کنترل زاویه کندوکتانس سیگنال خروجی استفاده می شود و مقدار بهینه اش به اینکه کدام هارمونیک مطلوبست، بستگی دارد. معمولاً بصورت تقویت کننده کلاس C (در هارمونیک دوم کلاس B) عمل میکند. در ضمن ترانزیستوری که در کلاس C کار کند، نزدیک به شبکه دو قطبی یک طرفه است.

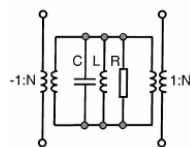
بنابراین، توان خروجی مدار ترکیبی و مدار تطبیق میانی می توانند مستقل طراحی شوند و اثر pulling کاهش می

فازند $I_L = 2I_1$ پس R_L در زیر مدار even بصورت $2R_L$ ظاهر می شود.



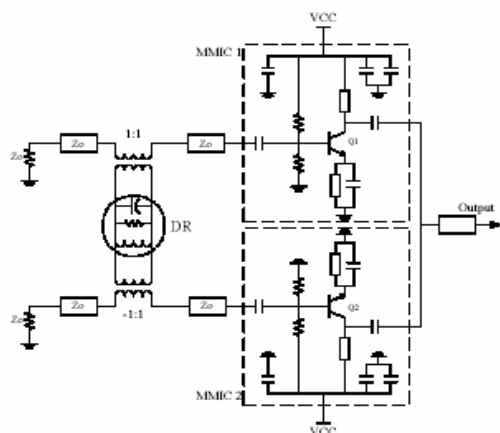
شکل 9- دو مد که با ترکیب گر ویلکینسون متصل شده اند. [2]

در مد odd جریان ها اختلاف فاز 180° دارند بنا براین ($R_L = 0$) زمین مجازی داریم که Q بی باری و بار یکی می شود و بر اثر pulling به شدت مقاوم خواهد بود. و این هارمونیک دوم است که اثر بار را احساس می کند. برای ایجاد اختلاف فاز می توان از DR استفاده کرد. ابتدا، یادآوری می کنیم که مدار معادل CAD ای مطابق شکل زیر دارد که از یک RLC (رزوناتور) همراه با دو ترانس ایده آل در دو طرف به منظور ایجاد اختلاف فاز مورد نظر (که برای پوش - پوش این نسبت ها 1:1 و 1:1- می باشد)، تشکیل شده است. [4,5]



شکل 10- مدل CAD برای دی الکتریک رزوناتور [5]

نمونه پوش - پوش همراه با DR را در شکل زیر می بینیم. [4]



شکل 11- پوش - پوش DRO

4- تریپل - پوش

$$s_1(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cdot \sin(\omega_n t + \phi_n) \quad (1)$$

$$s_2(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cdot \sin(\omega_n t + \phi_n + (n+1)\pi) \quad (2)$$

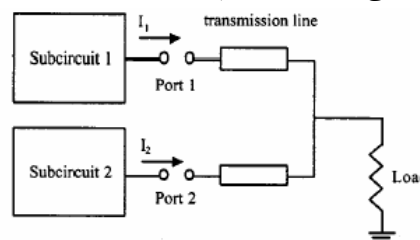
و در نتیجه داریم:

$$s(t) = s_1(t) + s_2(t) = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} 2a_n \cdot \sin(\omega_n t + \phi_n) \quad (3)$$

s_1 و s_2 خروجی زیر مدارات نوسان اند. که هم اندازه و غیر هم فازند. می بینیم که خروجی در هر مونیک های فرد دو برابر شده است.

3-1 فرمول Freitag برای پارامتر z

فرمول ریاضی توسط Freitag برای پایداری وسایل ترکیبی با پارامتر Z بیان شد. هدف او در واقع جلوگیری از مد odd نوسان و بررسی پایداری تقویت کننده توان با وسایل ترکیبی بود. ماتریس پارامتر Z بصورت زیر است: [3]



شکل 7- تحلیل بر مبنای مدل دو قطبی

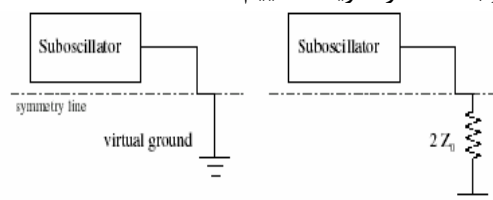
$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

تقارن برقرار است: $Z_{ij} = Z_{ji}, i, j = 1, 2$

$$\lambda_e = Z_{11} + Z_{12} \quad \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{مد even} \quad (5)$$

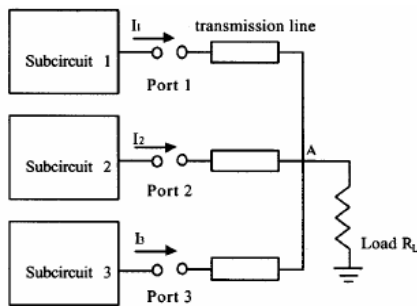
$$\lambda_o = Z_{11} - Z_{12} \quad \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \quad \text{مد odd} \quad (6)$$

بنابراین مد even هم فاز و مد odd غیر هم فازند. و در طراحی لازم است که مد even را سرکوب و مد odd که مطلوب ماست را تحریک نماییم.



شکل 8- جدا سازی دو زیر مدار در دو مد

اگر $R_L = 50$ در نظر بگیریم، در دو مد، دو زیر مدار داریم. مد even هم فازند، جریانی بین دو زیر مدار وجود ندارد



شکل 14- مدل سه قطبی برای تحلیل تریپل - پوش

و خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\lambda_e = Z_{11} + 2Z_{12} \quad \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{مد even} \quad (8)$$

$$\lambda_o = Z_{11} - Z_{12} \quad \text{مد odd (دو ریشه)} \quad (9)$$

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0 \quad (\text{اختلاف فاز } 120^\circ) \quad (10)$$

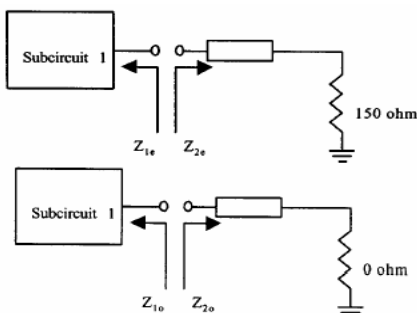
طراحی Triple - Push مثل پوش - پوش نیاز دارد که مد even را خاموش کرده و مد odd را تحریک نماییم.

2-4- آنالیز برای طراحی Triple - Push

آنالیز خطی: دریافت اینکه کدام مد مناسب تر است، odd یا even و نیز پیش بینی اولیه فرکانس نوسان را بر عهده دارد.

آنالیز حوزه زمان: طراحی را تقویت می کند و پیش بینی فرکانس نوسان و توان خروجی را بر عهده دارد و بوسیله یک سری انتگرال - دیفرانسیل بیان وابستگی جریان و ولتاژ نسبت به زمان را مطرح می کند. [3]

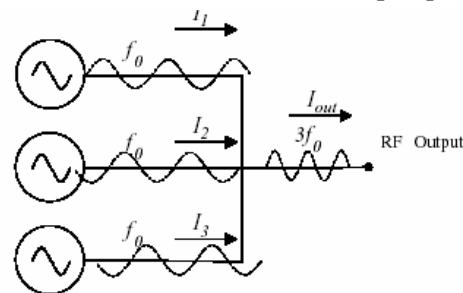
در می یابیم که در مد odd به جهت اختلاف فاز 120° زمین مجازی داریم. مثلاً اگر مشابه پوش - پوش $R_L = 50$ باشد، آنگاه برای طراحی باید موارد زیر را در نظر بگیریم:



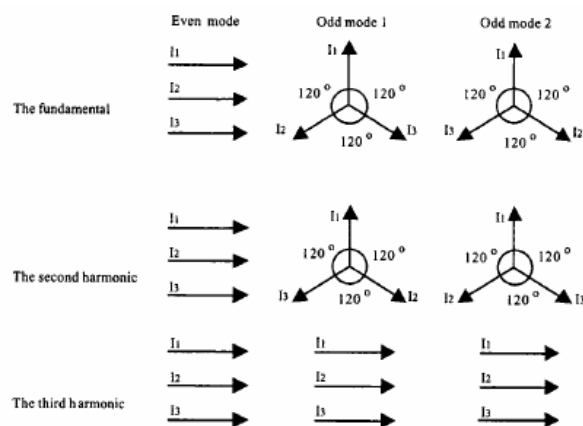
شکل 15- در مد even $3R_L$ و مد odd 0 ظاهر می شود.

$$\text{مد even} \quad \text{Re}[Z_{1e} + Z_{2e}] > 0 \quad (11)$$

اولین بار در ژوئن 2000 با مقاله a novel triple-push Osc. Approach مطرح شد. از ترکیب سه زیر مدار که توسط خطوط میکرواستریپ به هم وصل شده اند، ساخته شده است. پس، سه زیر اسیلاتور با یک مد even و دو مد odd داریم. جریان مد odd در هر زیر اسیلاتور 120° اختلاف فاز دارند و خروجی، ترکیبی از هارمونیک سوم را می دهد. [1,3]



شکل 12 - شمایی از تریپل - پوش [9]



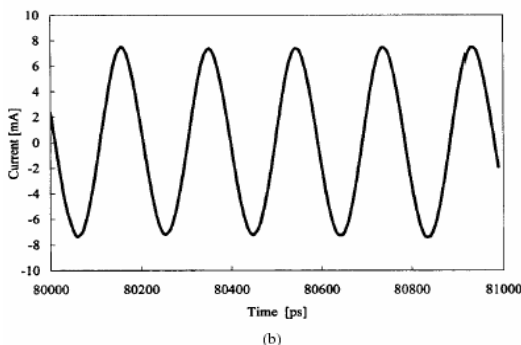
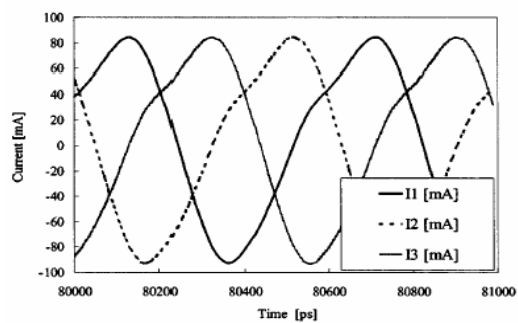
شکل 13 - مد مناسب را در هارمونیک سوم نشان می دهد.

می بینیم که در مد even فاز بدون تغییر است. در مد odd هارمونیک اول (f_0) ، 120° و هارمونیک دوم $(2f_0)$ ، 240° و هارمونیک سوم $(3f_0)$ ، 360° اختلاف فاز دارند و چون در هارمونیک های پایین تر از سه، اختلاف فاز داریم که منجر به حذف هارمونیک های پایین تر می شود این مد مناسب تر از مد even می باشد. [3,9]

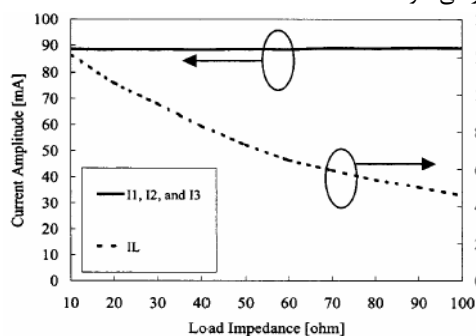
یادآور می شویم که دو روش تحلیل ریاضی و تحلیل حوزه زمان برای نشان دادن اختلاف فاز 120° بین سیگنال های اساسی هر زیر اسیلاتور در مد odd وجود دارد.

1-4- فرمول Freitag برای پارامتر z

گفتیم، یک مد even و دو مد odd داریم. از three port برای بیان نکاتی چند درمورد تریپل استفاده می کنیم. [3]



شکل 18- I_L دارای دوره تناوب 200 psec یا فرکانس 4.9 GHz است در حالی که I_1 و I_2 و I_3 هر کدام با دوره تناوب 600 psec یا فرکانس 1.67 GHz و با اختلاف فاز 120° نسبت به هم ظاهر می شوند.



شکل 19- وابستگی جریان بار (خط چین) و عدم وابستگی جریان هارمونیک های اول (خط مستقیم) به تغییر بار از 0 تا 100 اهم را نشان می دهد.

پیداست که جریان های اصلی I_1 و I_2 و I_3 به جهت اینکه در مد odd اختلاف فاز 120° دارند، زمین مجازی را مقابل خود می بینند و تابعی از بار نیستند. تنها پس از ترکیب I_1 و I_2 و I_3 در هارمونیک سوم است که بار دیده می شود و با افزایش بار، جریان عبوری کاهش می یابد.

و شکل 20 نشان می دهد که توان خروجی که از

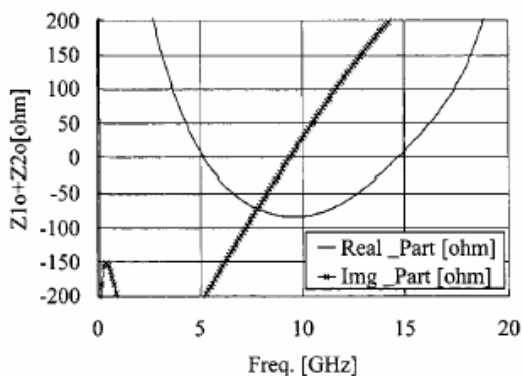
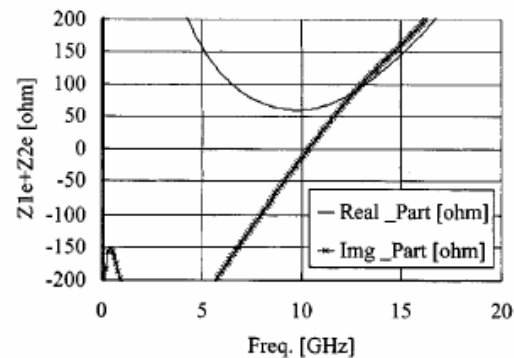
رابطه $P = \frac{R_L \cdot (I_L)^2}{2}$ بدست می آید، در ابتدا با افزایش بار،

افزایش می یابد و از یک جایی به بعد با کاهش جریان بار

کم می شود. و بدین ترتیب R_L بهینه 33 اهم می شود. [3]

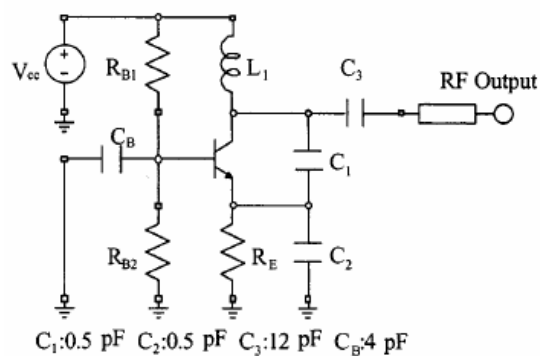
$$\text{Re}[Z_{l0} + Z_{20}] < 0, \text{Im}[Z_{l0} + Z_{20}] = 0 \quad \text{مد odd} \quad (12)$$

به عنوان نمونه در شکل 16 با توجه به اینکه $\text{Im}[Z_{l0} + Z_{20}]$ در $f = 9 \text{ GHz}$ صفر می شود و برقراری سایر شرایط، طراحی صورت می پذیرد. (همین شرایط برای پوش - پوش نیز برقرار است) [7]



شکل 16 - تحقق شرایط طراحی در 9-GHz

تمام مقادیر به گونه ای انتخاب شده اند که مد odd تحریک و مد even حذف گردد. در شکل زیر I_1 ، چوک RF و C_1 و C_2 برای تعیین فرکانس C_3 ، برای حذف DC و C_B برای تولید مقاومت منفی، R_E برای پایداری در برابر تغییر حرارت می باشد.

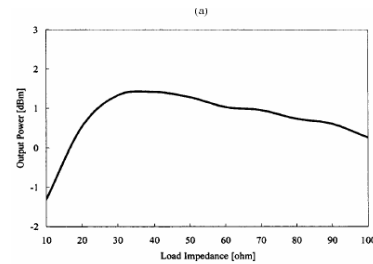


شکل 17 - شماتیک اسلاتور ترپیل - پوش در 4.9-GHz [3,9]

شود و با توجه به مزایای برشمرده در این مقاله، جایگزین روش های کلاسیک شد. دو حالت خاص پوش-پوش و تریپل-پوش بررسی گردید که علاوه بر مد نامطلوب even به ترتیب دارای یک مد و دو مد odd بودند که با تقویت هارمونیک های دوم و سوم و حذف هارمونیک های پایین تر منجر به 2 یا 3 برابر شدن فرکانس خروجی می شدند. و یادآور شدیم، طراحی نوسان ساز باید مد even را سرکوب کرده و مد odd را برای مقصود مورد نظر تحلیل نماییم.

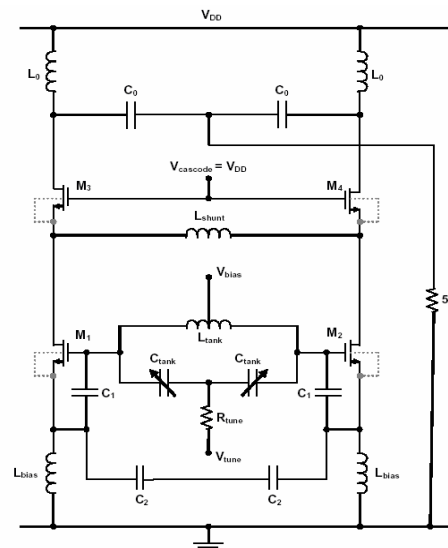
مراجع

- [1] S.Yen and T.Chu, "An Nth harmonic Oscillator Using An N-Push coupled Oscillator Array with Voltage-clamping Circuits", IFTH-33, IEEE MTT-SDigest 2003
- [2] F.X.Sinnesbichler, H.Geltinger and G.R.Olbrich "A 38-GHZ Push-Push Oscillator Based on 25-GHZ f_T BJT's", IEEE Microwave Guided Wave Lett., Vol.9, pp.151-153, April 1999
- [3] Y.Tang and H.Wang, "Triple-push Oscillator Approach: Theory and Experiments" IEEE Journal of Solid-State circuits, Vol.36, No.10, October 2001
- [4] H.Chang, H.Wang, Y.Wang, P.Chao, C.Chen, "A 22-GHZ Ultra Low Phase Noise Push-Push Dielectric Resonator Oscillator Using MMICs", 12th GaAs Symposium- Amsterdam, 2004
- [5] F.Sinnesbichle, "Hybrid Millimeter-Wave Push-Push Oscillator Using Silicon-Germanium HBTs", IEEE Trans. Microwave theory and technique, Vol.51, No.2, February 2003
- [6] M.Muh, "Design of FinFET static frequency divider and a millimeter-wave CMOS push-push VCO", university of California at Berkeley
- [7] K.Kobayashi, A.Oki, L.Tran, J.Cowles, A.Guiterrez Aitken, F.Yamada, T.Block, D.Streit, "A 108-GHZ InP-HBT Monolithic Push-Push VCO with low phase noise and wide tuning Bandwidth", IEEE Journal of Solid-State circuits, Vol.9, September 1999
- [8] R.Wanner, H.Schaefer, R.Lachner, G.Olbrich and P.Russer, "A SiGe low phase noise push-push vco for 72 GHZ", National Taiwan Uni. Taipei
- [9] Y.Lung Tang and H.Wang, "A 24.6-GHz MMIC HBT Triple-Push Oscillator", National Taiwan Uni. Taipei, Taiwan



شکل 20- منحنی توان خروجی بر حسب تغییرات بار

5- و نهایتاً پوش-پوش CMOS



شکل 21- پوش-پوش CMOS

امپدانسی که از گیت M_1 می بینیم، شامل یک فرکانس وابسته با بخش حقیقی منفی و وابسته به C_1 و C_2 و رسانایی وسیله است. حال دو تا از این سورها پیروها با تانک تشدید در ساختار VCO با هم ترکیب شده اند (روش ساخت مقاومت منفی). سیگنال تفاضلی که با این VCO تولید می شود، سپس هارمونیک دوم را در حالت مستقیم خروجی پوش-پوش تولید می کند. بخش cascade برای دی کاپل کردن هسته VCO از خروجی بکار می رود. از L_{bias} بجای منبع جریان استفاده شده است. L_{shunt} هم، پایداری اولیه و توان خروجی هارمونیک دوم را افزایش، توان مصرفی dc را کاهش می دهد. امپدانس ورودی شامل R_P و C_P است که خازن موازی نباید خیلی بزرگ باشد و با C_1 و C_2 مشخص می گردد. برای اطمینان از شروع نوسان مناسب باید $|R_P| < nR_{tan k}$ باشد ($n > 2$ یا $n > 3$). [6]

6- نتیجه گیری

استفاده از اسپیلاتورهای N- هارمونیک از آن جهت که سبب توسعه محدوده فرکانسی عنصر فعال در تولید سیگنال می