

یک فیلتر G_m -C قابل تنظیم ولتاژ پایین و توان پایین برای کاربردهای بی سیم

امیر باغی رهین^(۱) - ضیاءالدین دائی کوزه کنانی^(۲)

(۱) مربی - دانشکده برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سردرود

(۲) استاد - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تبریز

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۳/۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۲/۲۶

خلاصه: در این مقاله، یک تقویت کننده ترانسانایی عملیاتی (OTA) ولتاژ پایین و توان پایین با استفاده از ترانزیستور FGMOS پیشنهاد شده است. در OTA پیشنهادی در تکنولوژی TSMC 0.18 μ m CMOS با ولتاژ تغذیه یک ولت و توان مصرفی ماکزیمم 40 μ W، محدوده تنظیم نسبی ۵۰ برابر به دست می آید. نتایج شبیه سازی تقویت کننده پیشنهادی، بهره حلقه باز 30.2 dB و فرکانس بهره واحد 942 MHz را نشان می دهند. در مقایسه با کارهای قبلی، تقویت کننده پیشنهادی، با ولتاژ تغذیه کمتر، عملکرد فرکانسی بهتر، سوئیچینگ ولتاژ خروجی بالاتر، خطیگی بهتر و توان مصرفی کمتری را عرضه می کند. OTA پیشنهادی در ساختار یک فیلتر G_m -C مرتبه دوم به کار گرفته شده و محدوده تنظیم خوب از 100 kHz تا 5.6 MHz به دست آمد که مشخصات بی سیم Bluetooth (فرکانس 650 kHz)، CDMA2000 (فرکانس 700 kHz) و Wideband CDMA (فرکانس 2.2 MHz) را به خوبی پوشش می دهد. مساحت اشغال شده سیلیکون برای فیلتر طراحی شده برابر $192\mu\text{m} \times 535\mu\text{m}$ می باشد.

کلمات کلیدی: تقویت کننده ترانسانایی عملیاتی (OTA)، ولتاژ پایین و توان پایین، ترانزیستور FGMOS، فیلتر G_m -C، وارونگر.

A Low-Voltage and Low-Power Programmable G_m -C Filter for Wireless Applications

Amir Baghi Rahin⁽¹⁾ - Ziaadin Daei Koozeh Kanani⁽²⁾

(1) Instructor - Department of Electrical Engineering, Sardroud Branch, Islamic Azad University, Sardroud, Iran

amir.baghi@sardroud-iau.ac.ir

(2) Associate Professor - Department of Electrical and Computer Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran

zdaie@tabrizu.ac.ir

In this paper, a low voltage and low power (LV/LP) Operational Transconductance Amplifier (OTA) using FGMOS (Floating-Gate MOS) transistor is proposed. The relative tuning range of 50 is achieved in this OTA while only consumes 40 μ W with 1.0 V supply voltage in TSMC 0.18 μ m CMOS technology. The simulation results of the proposed OTA show an open loop gain of 30.2 dB and a unity gain frequency of 942 MHz. In comparison with previous works, the proposed OTA, with lower supply voltage, is provided the better frequency performance, higher output voltage swing, better linearity and lower power consumption. The proposed OTA is used in the second-order G_m -C filter to show a good tuning range from 100 kHz to 5.6 MHz which is suitable for the wireless specifications of Bluetooth (650 kHz), CDMA2000 (700 kHz) and Wideband CDMA (2.2 MHz). The active area occupied by the designed filter on silicon is $192\mu\text{m} \times 535\mu\text{m}$.

Index Terms: Low-voltage and low-power (LV/LP), operational transconductance amplifier (OTA), FGMOS (floating-gate MOS), G_m -C filter, inverter.

۱- مقدمه

کمتری را در مقایسه با ترانزیستور MOS مرسوم در تکنولوژی مشابه مصرف کنند و در عین حال عملکرد مشابهی داشته باشند [۱۴]. ترانزیستور FGMOS یک ترانزیستور MOS با گیت عایق شده می باشد که در آن ورودی‌ها بطور خازنی به گیت متصل شده‌اند. ولتاژ در گیت شناور (V_{FG}) را به صورت زیر می‌توان بیان نمود [۱۴]:

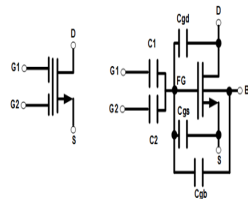
$$V_{FG} = \sum_{i=1}^N \frac{C_i}{C_T} V_i + \frac{C_{GS}}{C_T} V_S + \frac{C_{GD}}{C_T} V_D + \frac{Q_{FG}}{C_T} \\ = \sum_{i=1}^N \frac{C_i}{C_T} V_{is} + V_S + \frac{C_{GD}}{C_T} V_{DS} + \frac{C_{GB}}{C_T} V_{BS} + \frac{Q_{FG}}{C_T} \quad (1)$$

در رابطه فوق، N تعداد ورودی‌ها، C_i و V_i به ترتیب خازن و ولتاژ ورودی i ام می‌باشد. C_{GS} ، C_{GD} و C_{GB} به ترتیب خازن پارازیت مابین گیت شناور و درین، سورس و بدنه است. Q_{FG} بار باقی مانده می‌باشد که ممکن است در طی پروسه ساخت در گیت شناور به دام بیفتد. با روش پیشنهادی در مرجع [۱۵] می‌توان از این بار (Q_{FG}) صرفنظر نمود. C_T خازن کل دیده شده از گیت شناور می‌باشد و به صورت زیر می‌باشد [۱۴]:

$$C_T = C_{GD} + C_{GS} + C_{GB} + \sum_{i=1}^N C_i \quad (2)$$

در شکل (۱)، سمبل و مدار معادل ترانزیستور FGMOS نوع n با دو ورودی نشان داده شده است. در ترانزیستور FGMOS دو ورودی، هر ورودی با خازن poly II-poly I به گیت شناور متصل می‌گردد.

به طور کلی OTA های مبتنی بر وارونگرهای CMOS در تحقق فیلترهای قابل تنظیم به منبع تغذیه قابل تنظیم نیاز دارند، تا فیلتر را تنظیم نمایند، که برای کاربردهای ولتاژ پایین مناسب نمی‌باشند. بنابراین، در این مقاله، ما وارونگر FGMOS را استفاده می‌کنیم تا تقویت کننده ترانسسانی عملیاتی‌مان را تنظیم نمائیم. تقویت کننده پیشنهادی قادر خواهد بود تا با سیگنالهای ورودی rail-to-rail و ولتاژ تغذیه نزدیک به یک ولت کار کند و در عین حال خطینگی بالا و پهنای باند بزرگی داشته باشد.



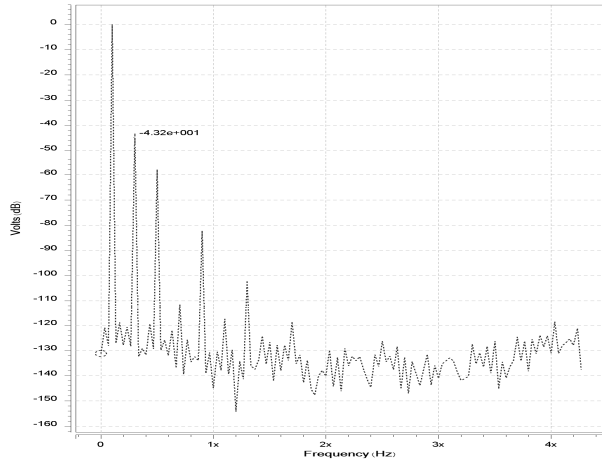
شکل (۱): سمبل و مدار معادل ترانزیستور FGMOS نوع n با دو ورودی
Fig. (1): Symbol and equivalent circuit of 2-input n-type FGMOS

در بخش دوم این مقاله، یک OTA بهینه شده برای کاربردهای ولتاژ پایین پیشنهاد می‌کنیم. در این بخش، تبدیل ولتاژ به جریان خطی وارونگر FGMOS توصیف شده و با کنترل مد مشترک، افزایش بهره dc و تنظیم ترانسانا ادامه می‌یابد. در بخش سوم، عملکرد OTA پیشنهادی به وسیله یک فیلتر مرتبه دوم مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در بخش چهارم، نتایج شبیه‌سازی OTA پیشنهادی و فیلتر مرتبه دوم طراحی شده ارائه شده و در بخش پنجم نتیجه گیری‌ها را خواهیم داشت.

تقویت کننده‌های ترانسسانی عملیاتی (OTA) یا مدارات مبدل ولتاژ به جریان برای تحقق سیستمها و مدارات زمان پیوسته بسیاری به کار برده شده‌اند. برای مثال، در تحقق انواع تقویت کننده‌ها، ضرب کننده‌ها، فیلترهای G_m -C (یا OTA-C) و اسیلاتورها استفاده شده‌اند [۵]-[۱۸]. فیلترهای زمان پیوسته با OTA ها و خازنها پیاده‌سازی شده و به فیلترهای G_m -C یا OTA-C معروف می‌باشند. این فیلترها برای دسته‌ای از کاربردها مانند مدارات هارد دیسک، فیلترهای IF، فیلتر فاز خطی، اسیلاتورهای LC و فیلترهای RF رایج و کاربر پسند می‌باشند. بسیاری از ساختارها در مقالات برای پیاده‌سازی تقویت کننده‌های ترانسسانی عملیاتی پیشنهاد شده‌اند. استفاده از وارونگرهای CMOS یک انتخاب مطرح در طراحی مدارات تقویت کننده ترانسسانی عملیاتی می‌باشد و اکثراً به دلیل نداشتن گره‌های داخلی پهنای باند بزرگتری را فراهم می‌کنند [۱۲]-[۶]، [۲۱]-[۲۰]، [۲۵]. اولین بار Nauta یک ترانسسانی تفاضلی بر اساس شش وارونگر CMOS پیشنهاد نمود [۶]. ترانسسانی Nauta یک بلوک سازنده خیلی نیرومند در پیاده‌سازی فیلترهای G_m -C فرکانس بالا می‌باشد. تنظیم ترانسسانی Nauta تنها با تغییر دادن ولتاژ تغذیه انجام می‌گیرد [۶]. بنابراین، منابع تغذیه قابل تنظیم نیاز می‌باشد که برای کاربردهای ولتاژ پایین اصلاً مناسب نیست. پیشنهادهای بسیاری برای تنظیم این ترانسانا در مقالات گزارش شده‌اند. در مرجع [۷]، یک نوع اصلاح شده از ترانسسانی Nauta با ولتاژ مد مشترک ورودی تنظیم شده است. در مراجع [۹] و [۲۱] ترانسسانی Nauta با ترانزیستورهای گیت شناور چند ورودی (MIFGT) و در مرجع [۱۰] با زوج CMOS (double CMOS pair) تنظیم شده است.

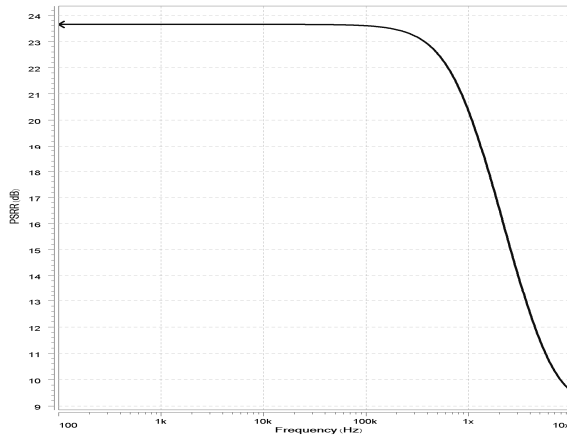
در بسیاری از کاربردها، OTA بلوکی با بیشترین توان مصرفی می‌باشد. با افزایش درخواست برای مدارات و سیستم‌های ولتاژ پایین طراحی مدار مجبور می‌شوند تا طراحی‌هایشان را با الزامات مورد نیاز برای این نوع از این مدارات سازگار کنند. طراحی ولتاژ پایین بالقوه منجر به مدارات توان پایین می‌شود.

از آنجایی که ولتاژ تغذیه این مدارها را می‌توان کاهش داد عملکرد مدار به طور قابل توجه تغییر خواهد کرد که بعضی مواقع مضر می‌باشد. بنابراین، باید توپولوژی‌هایی به کار گرفته شوند که بتوان عملکرد مدار را تحت محدودیت‌های ولتاژ پایین بدون مصالحه کردن با سایر پارامترها بهینه نموده و توان مصرفی را کاهش داد. استفاده از ترانزیستورهای FGMOS (MOS با گیت شناور) به دلیل ساختارهای انعطاف‌پذیری که دارند برای کاربردهای ولتاژ پایین و توان پایین مناسب بوده [۱۳]، [۲۰]-[۲۳] و در کنار سایر رویکردها می‌توانند مفید و سودمند باشند. مزیت‌های این ترانزیستورها کاهش پیچیدگی مدار، ساده‌سازی پردازش سیگنال، شیفت دادن سطوح سیگنال و ترکیب نمودن مکانیسم‌های قابل تنظیم می‌باشد. مدار طراحی شده با ترانزیستور FGMOS می‌تواند در ولتاژ تغذیه کمتری کار نموده و توان

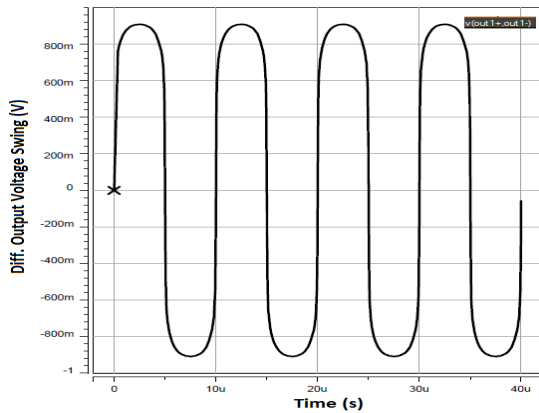


شکل (۷): نمودار FFT تقویت کننده پیشنهادی
Fig. (7): The FFT plot of the proposed OTA

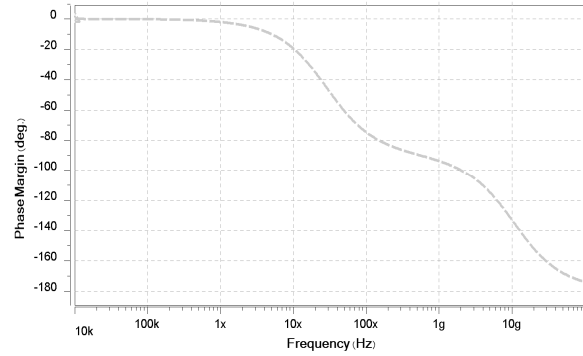
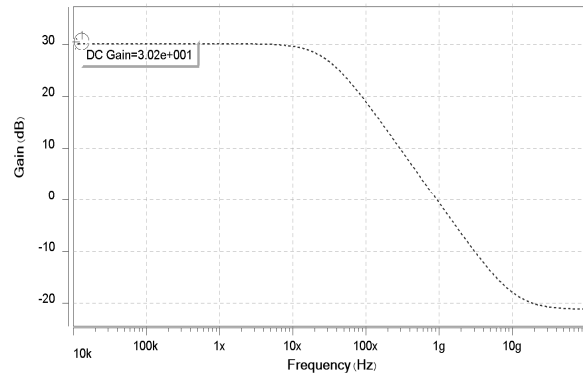
نسبت حذف اثر تغذیه در شکل (۸) برای OTA پیشنهادی به ازای $Z \leq 0.5 \text{ pF}$ نشان داده شده است. از شکل (۸)، ملاحظه می‌گردد که PSRR کل برای فرکانسهای پایین 23.6 dB می‌باشد.



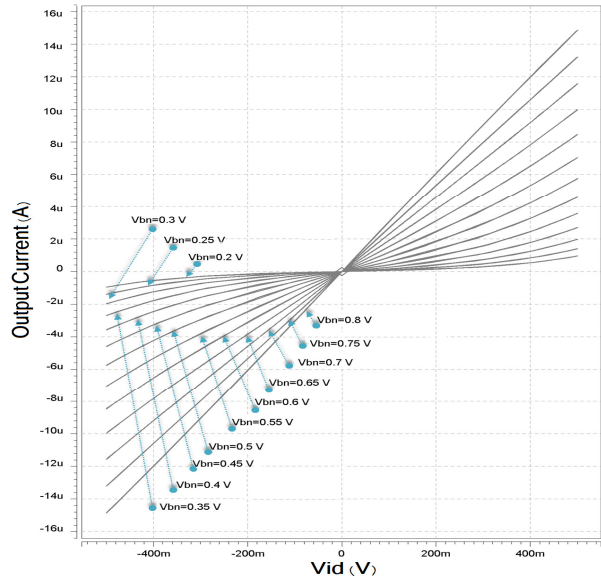
شکل (۸): PSRR برحسب فرکانس برای $Z \leq 0.5 \text{ pF}$
Fig. (8): PSRR of the proposed OTA for $Z \leq 0.5 \text{ pF}$



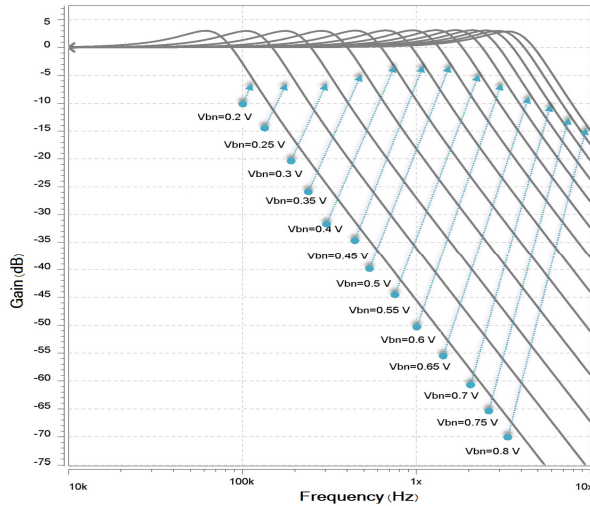
شکل (۹): سوئیچینگ تفاضلی ولتاژ خروجی OTA پیشنهادی
Fig. (9): Differential output voltage swing of the proposed OTA



شکل (۵): پاسخ فرکانسی OTA پیشنهادی
Fig. (5): AC response of the proposed OTA



شکل (۶): مشخصه ولتاژ جریان OTA پیشنهادی
Fig. (6): V-I characteristics of the proposed OTA



شکل (۱۰): تنظیم فرکانس قطع فیلتر G_m -C مرتبه دوم برای پاسخ پایین گذر

Fig. (10): Frequency tuning of the proposed 2-order G_m -C filter for low-pass response

در جدول (۲) عملکرد فیلتر شبیه سازی شده به طور خلاصه آورده شده و با کارهای قبلی مقایسه شده است. فیلتر طراحی شده با نرم افزار Cadence Virtuoso XL (IC5141) چینی شده و تصویر آن در شکل (۱۱) نشان داده شده است. این فیلتر مساحت $192 \times 535 \mu m^2$ از سیلیکون را مصرف می‌کند.

به منظور نشان دادن عملکرد OTA پیشنهادی، فیلتر G_m -C مرتبه دوم نشان داده شده در شکل (۴) در تکنولوژی مشابه و ولتاژ تغذیه برابر طراحی شد. مقادیر خازنهای C_1 و C_2 به ترتیب برابر $2.7 pF$ و $1.35 pF$ می‌باشند. هنگامی که تمامی ترانس‌ها برابر بوده و با جریان یکسانی بایاس می‌شوند و خازن C_1 برابر $2C_2$ باشد، $Q=0.7$ به دست می‌آید. شکل (۱۰) تنظیم‌پذیری فیلتر G_m -C مرتبه دوم را برای پاسخ پایین گذر نشان می‌دهد. از شکل (۱۰) ملاحظه می‌شود که با تغییر دادن V_{bn} و فرکانس قطع فیلتر از $100 KHz$ تا $5.6 MHz$ تغییر می‌کند.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله یک OTA ولتاژ پایین و توان پایین بر اساس وارونگرهای FG MOS پیشنهاد شده است. طرح جدید امکان تنظیم‌پذیری وسیع، عملکرد ولتاژ پایین و پهنای باند بالا با ولتاژ تغذیه ثابت را امکان‌پذیر می‌کند. OTA پیشنهادی در تحقق فیلترهای قابل تنظیم به ولتاژ تغذیه متغیری برای تنظیم نمودن فیلتر نیاز نداشته و برای کاربردهای ولتاژ پایین بسیار مناسب می‌باشد. مناسب بودن OTA پیشنهادی با طراحی یک فیلتر زمان پیوسته G_m -C مرتبه دوم یک ولت مورد ارزیابی قرار گرفت و پاسخ فرکانسی آن از $100 kHz$ تا $5.6 MHz$ تنظیم گردید که برای کاربردهای بی‌سیم مناسب می‌باشد. ماکزیمم توان مصرفی فیلتر طراحی شده از شبیه‌سازی‌ها $160 \mu W$ به دست آمد.

کارایی OTA پیشنهادی از طریق شبیه‌سازی ثابت شده و به طور خلاصه در جدول (۱) نشان داده شده است. اگر OTA پیشنهادی را با مرجع [۱۱] مقایسه نماییم چندین مزیت را برای OTA پیشنهادی ملاحظه خواهیم نمود:

- (۱) تنظیم OTA به وسیله ولتاژهای بایاس وارونگرهای FG MOS انجام شده و ولتاژ تغذیه همواره ثابت باقی می‌ماند.
 - (۲) ولتاژ خروجی مد مشترک و مقاومت خروجی به وسیله ولتاژهای بایاس وارونگرهای FG MOS با یک ولتاژ تغذیه ثابت صورت می‌گیرد.
 - (۳) سوئیچینگ ولتاژ ورودی به صورت rail-to-rail می‌باشد.
 - (۴) توان مصرفی کمینه شده است.
- علیرغم ویژگی‌های جالب OTA پیشنهادی چند عیب برای آن می‌توان شمرد که عبارتند از:

(۱) به دلیل مقسم‌های خازنی در وارونگرهای FG MOS، ترانس‌سازایی، پهنای باند، نسبت حذف اثر تغذیه و ماکزیمم فرکانس قطع دست یافتنی فیلتر کاهش یافته‌اند.

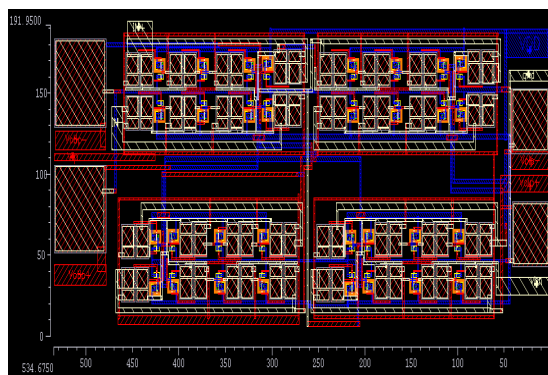
(۲) به دلیل خازنهای پارازیتی مرتبط با خازنهای ورودی poly II-poly I، پهنای باند نیز کاهش می‌یابد.

با این همه برای کاربردهای فرکانس پایین و ولتاژ پایین، OTA پیشنهادی گزینه بسیار مناسبی است و مزایای آن به معایب ارجحیت دارد. در مقایسه با مرجع [۱۱]، OTA پیشنهادی با ولتاژ تغذیه کمتر، فرکانس بهره واحد بالا، سوئیچینگ ولتاژ خروجی بیشتر، خطینگی بهتر و توان مصرفی کمتری را عرضه می‌کند.

Table (1): Simulation results of the proposed programmable OTA and comparison with previous works

جدول (۱): نتایج شبیه‌سازی OTA قابل تنظیم پیشنهادی و مقایسه

Characteristics	[11]	[18]	Proposed
Technology	0.35 μm CMOS	0.35 μm CMOS	0.18 μm CMOS
Supply Voltage	2.5 V	3.3 V	1.0 V
DC Gain (dB)	31.3	29.3	30.2
UGF (MHz)	3560	28.97	942
Phase Margin	77°	82.8°	86.7°
CMRR (dB) @ 100 KHz	31	35.19	29.5
PSRR (dB) @ 10 KHz	37.45	68.6	23.6
Output Swing (V)	2.27	0.88	0.89
THD	@ 1V _{p-p} -46 dB	@ 0.3V _{p-p} -40 dB	@ 0.5V _{p-p} -40 dB
Total input noise (nV/ \sqrt{Hz})	85	-	44
Power (μW)	800	44.53	40



شکل (۱۱): چینش فیلتر طراحی شده

Fig. (11): Layout of the designed G_m -C filter

Table (2): Simulation results of the designed G_m -C filter and comparison with previous works

جدول (۲): نتایج فیلتر طراحی شده و مقایسه با کارهای قبلی

	[11]	[18]	[19]	[22]	[25]	This work
Technology	0.35 μ m CMOS	0.35 μ m CMOS	0.18 μ m CMOS	0.5 μ m CMOS	0.13 μ m CMOS	0.18 μ m CMOS
Supply Voltage (V)	2.5	3.3	\pm 1.8	\pm 1.65	0.5	1.0
Power Consumption (μ W)	3990	178	> 313	4620	332	160
Frequency Tuning (MHz)	2.25-3.5	0.01-2.8	10-300	0.2 -1.5	0.97 -5.1	0.1-5.6
Tuning Range	< 2	> 200	30	7.5	>5	> 50
THD	-	@ 0.3V _{P-P} -40 dB	@0.188V _{P-P} -40 dB	@1V _{P-P} -55 dB	@51.75mV _{P-P} -40 dB	@500mV _{P-P} -40 dB
Total input noise (μ V/ \sqrt{Hz})	-	0.113	0.02	185	0.027	0.197
Filter Order	2	2	2	3	3	2
Die Area (mm ²)	-	0.154	-	2.22	-	0.102

References

- [1] S. Szczepanski, J. Jakusz, R.A. Schaumann, "Linear fully balanced CMOS OTA for VHF filtering applications", IEEE Trans. on Circuits and Sys.-II: Analog and Digital Signal Processing, Vol. 44, No. 3, pp.174-187, 1997.
- [2] M.H. Voornal, H. Veenstra, "Tunable high-frequency G_m -C filters", IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 35, No.8, pp.1097-1108, 2000.
- [3] B. Nauta, "Analog CMOS filters for very high frequencies", Norwell, MA: Kluwer Academic, 1993.
- [4] H. Liu, A.I. Karsilyan, "A high frequency band pass continuous-time filter with automatic frequency and Q-factor tuning", Proceeding of the IEEE/ISCAS, Vol.1, pp.328-331, 2001.
- [5] X. Zhang, E.I. Ei-Masry, "A novel CMOS OTA based on body-driven MOSFETs and its applications in OTA-C filters", IEEE Trans. on Circuits and Sys. I: Fundamental Theory and Applications, Vol. 54, pp.1204-1212, 2007.
- [6] B. Nauta, "A CMOS transconductance-C filter technique for very high frequencies", IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 27, No. 2, pp. 142-153, 1992.
- [7] T. Lee, H. Pan, "A low-voltage CMOS transconductor for VHF continuous-time filters", Proceedings of the IEEE/ISCAS, Vol. 1, pp.213-216, 1997.
- [8] P. Andreatani, S. Mattisson, "On the use of Nauta's transconductor in low-frequency CMOS g_m -C bandpass filters", IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 37, No. 2, pp. 114-124, 2000.
- [9] F. Munoz, A. Torralba, R.G. Carvajal, J. Tombs, J. Ramirez - Angulo, "Floating-gate-based tunable CMOS low voltage linear transconductor and its application to HF g_m -C filter design", IEEE Trans. on Circuits and Sys. II, Vol. 48, No. 1, pp. 106-110, 2001.
- [10] S. Ramasany, B.A. Venkataramani, "A low power reconfigurable analog baseband block for software defined radio", Journal of Signal Processing System, Vol. 62, No. 2, pp. 131-144, 2011.
- [11] H. Barthelemy, S. Meill, J. Gaubert, N. Dehaese, S. Bourdel, "OTA based on CMOS inverter and application in the design of tunable bandpass filter", Analog Integrated Circuits and Signal Processing, Vol. 57, No.2, pp. 169-178, 2008.
- [12] T.Y.Lo, C.C. Hung, "A 1 GHz equiripple low-pass filter with a high-speed automatic tuning scheme", IEEE Trans. on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, Vol. 19, No. 2, pp. 175-181, 2011.
- [13] E. Sanches-Sinencio, A.G. Andreou, "Low -voltage /low-power integrated circuits and systems: Low-voltage mixed-signal circuits", New York: IEEE Press, 1999.

- [14] E. Rodriguez-Villegas, "Low voltage and low power analog and digital design with the floating gate MOS transistor (FGMOS)", London: IET, 2006.
- [15] E. Rodriguez-Villegas, H. Barnes, "Solution to the trapped charge in FGMOS transistors", Electronics Letters, Vol. 39, No.19, pp. 1416-1417, 2003.
- [16] S. Pavan, Y.P. Tsividis, K. Nagaraj, "Widely programmable high-frequency continuous-time filters in digital CMOS technology", IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 35, pp. 503-511, 2000.
- [17] B. Razavi, "Design of analog CMOS integrated circuits", New York: McGraw-Hill, 2001.
- [18] A. Pirmohammadi, M.H. Zarifi, "A low power tunable G_m -C filter based on double CMOS inverters in $0.35 \mu\text{m}$ ", Analog Integrated Circuits and Signal Processing, Vol. 71, No. 3, p. 473-479, 2012.
- [19] S. Kumaravel, A. Gupta, B. Venkataramani, "VLSI implementation of G_m -C filter using modified Nauta OTA with double CMOS pair", Recent Advances in Intelligent Computational Systems (RAICS), pp. 216 – 220, 2011.
- [20] J. Sobhi, Z.D. Koozehkanani, A.B. Rahin, A. Tahmasebi, "A new OTA based on FGMOS inverters for low voltage and low power applications", Proceeding of the International Conference on Circuit and Signal Processing, Shanghai, China, Dec. 2010.
- [21] J. Sobhi, Z.D. Koozehkanani, A.B. Rahin, "A low voltage and low power programmable continuous-time filter based on FGMOS inverters", Proceeding of the International Conference on Circuit and Signal Processing, Shanghai, China, Dec. 2010.
- [22] C. Garcia-Alberdi, A.J. Lopez-Martin, L. Acosta, R.G. Carvajal, J. Ramirez-Angulo, "Tunable class AB CMOS G_m -C filter based on quasi-floating gate techniques", Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Trans. on, Vol.60, No.5, pp.1300,1309, May 2013.
- [23] E. Rodriguez-Villegas, A. Yufera, A. Rueda, "A 1.25-V micropower G_m -C filter based on FGMOS transistors operating in weak inversion", IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol.39, No.1, pp.100, 111, Jan. 2004.
- [24] J.M. Carrillo, J.F. Duque-Carrillo, G. Torelli, "1-V continuously tunable CMOS bulk-driven transconductor for G_m -C filters", Proceeding of the IEEE/ISCAS, pp.896-899, 2008.
- [25] R. Arya, G. Souliotis, S. Vlassis, C. Psychalinos, "A 0.5 V 3^{rd} -order tunable g_m -C filter", Radio Engineering, 22(1), 174-178, 2013.