

# 低噪声低功耗3阶复数滤波器的设计

张旭东<sup>1</sup>,雷倩倩<sup>1</sup>,张芳玲<sup>1</sup>,李弦<sup>2</sup>,李连碧<sup>1</sup>

(1.西安工程大学 理学院,陕西 西安 710000;2.深圳市纽瑞芯科技有限公司,广东 深圳 518000)

**摘要:**采用UMC 40 nm CMOS工艺,设计了一款低噪声低功耗的3阶复数滤波器。利用FLFB(Follow-the-Leader-Feedback)结构良好的噪声特性,并以劳斯-霍尔维茨稳定性判据为理论依据,采用相位裕度仅为36.8°的运放,达到低噪声低功耗的优化目的。仿真结果表明:滤波器的带宽可调范围为0.98~1.92 MHz,中心频率0.68~1.34 MHz可调,通带内噪声90.6 μV,无杂散动态范围73.7 dB,镜像抑制比28.4 dB,此时总功耗为1.33 mW。

**关键词:**复数滤波器;低噪声;低功耗;稳定性判据

中图分类号: TN713

文献标识码: A

DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.211278

中文引用格式: 张旭东,雷倩倩,张芳玲,等. 低噪声低功耗3阶复数滤波器的设计[J]. 电子技术应用, 2021, 47(9): 30~34.

英文引用格式: Zhang Xudong, Lei Qianqian, Zhang Fangling, et al. Design of low-noise low-power 3rd complex filter[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(9): 30~34.

## Design of low-noise low-power 3rd complex filter

Zhang Xudong<sup>1</sup>, Lei Qianqian<sup>1</sup>, Zhang Fangling<sup>1</sup>, Li Xian<sup>2</sup>, Li Lianbi<sup>1</sup>

(1.School of Science , Xi'an Polytechnic University , Xi'an 710000 , China ; 2.NewRadio Tech , Shenzhen 518000 , China)

**Abstract:** This paper presents a low-noise low-power third-order complex filter in UMC 40 nm CMOS technology. Based on follow-the-leader-feedback architecture inherently noise figure and routh-hurwitz stability criteria, the phase margin is designed in merely 36.8 deg of operational amplifier, achieving the low-noise low-power optimization. Simulation results show that the bandwidth is adjustable for 0.98~1.92 MHz, center frequency is adjustable for 0.68~1.34 MHz, the noise in-band is 90.6 μV, spurious-free dynamic ranges is 73.7 dB, image rejection radio is 28.4 dB, and the total power consumption is 1.33 mW.

**Key words:** complex filter; low noise; low power; stability criteria

## 0 引言

在低中频接收机中,常采用复数滤波器来抑制混频过程中产生的镜像信号<sup>[1~3]</sup>。复数滤波器一般以低通滤波器为基础,通过交叉通路,使得对称轴频移 $j\omega_0$ ,由原先以j轴为对称的低通滤波器,变为以 $\omega_0$ 为中心频率的带通滤波器,形成了以j轴非对称滤波的效果,达到选择有用信号而抑制镜像信号的目的<sup>[4~5]</sup>。

复数滤波器的性能指标除了最基本的镜像抑制比(Image Rejection Ratio, IRR)之外,还需要考虑带宽、噪声以及必不可少的功耗等性能指标。考虑到不同的应用需求以及无源器件受工艺的影响,常采用电容阵列来达到带宽可调的目的<sup>[6~7]</sup>。而噪声的优化可以通过在滤波器第二级输入端加上前馈回路,通过减小回路上的噪声来减小电路噪声,在0.6 MHz的带宽下实现125 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 的输入参考噪声<sup>[8]</sup>;也可以采用FLFB结构,通过设计使截止频率远大于信号频段,10 MHz的截止频率下输出噪声达到了87 μV<sup>[9]</sup>。在功耗方面,文献[10]采用超低功

耗反相器所构成的运放,实现3阶1 MHz带宽的复数滤波器,功耗65.6 μW;或采用电流放大类型的运放,在1 mW功耗下实现了一款4阶带宽1 MHz的复数滤波器<sup>[11]</sup>;也可以采用多重反馈结构,以单阶滤波器为基础,通过多个环路综合成高阶滤波器,减小了功耗<sup>[12~13]</sup>。

本文设计了一款3阶FLFB结构的复数滤波器,在优化噪声的同时,从运放本身出发,以相位裕度(Phase Margin, PM)小于60°的运放来作为滤波器的有源模块,以劳斯-霍尔维茨(Routh-Hurwitz, RH)稳定性判据为理论依据,在保证系统稳定的前提下减小功耗。本文首先推导出复数滤波器的传输函数,在此基础上对滤波器的噪声进行理论分析,并以劳斯-霍尔维茨稳定性判据为基准,对系统稳定性以及功耗进行了理论推导,最后给出了电路的仿真结果及分析。

## 1 3阶复数滤波器电路设计

3阶复数滤波器电路如图1所示,分为I、Q两条通路,inp、inn为滤波器输入端,outn、outp为滤波器输出端,通过电阻 $R_c$ 对每一级的输入输出进行交叉连接,得

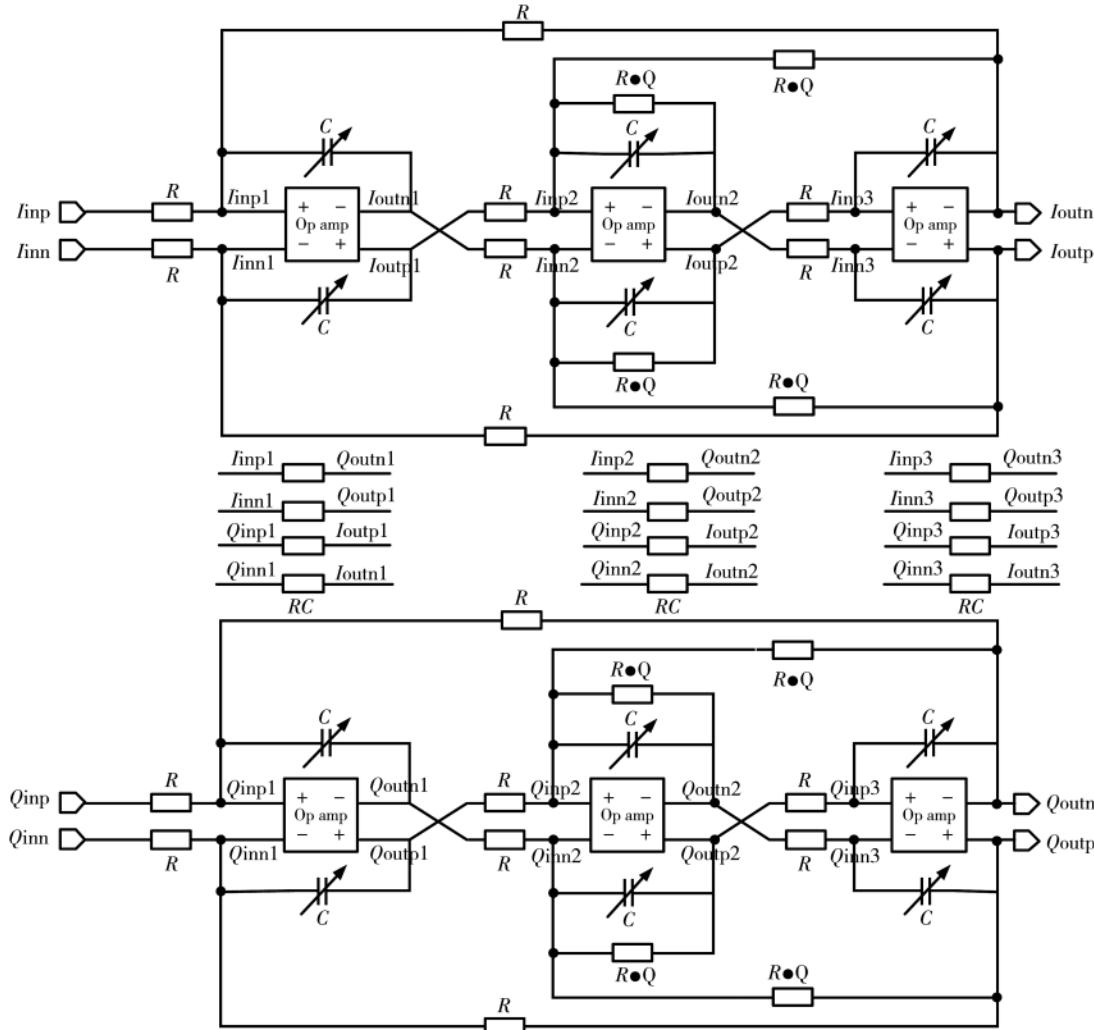


图 1 3 阶复数滤波器电路图

到复数滤波器。\$Q\$、\$R\$、\$C\$ 分别为滤波器品质因子、电阻、电容, 其中电容 \$C\$ 为 5 位控制字的电容阵列。对滤波器进行传输函数 \$\text{TF}(s-j\omega\_0)\$ 的推导, 从式(1)中可以继续推导滤波器的带宽 \$\omega\$ 和中心频率 \$\omega\_0\$ 的表达式式(2)。

$$\text{TF}(s-j\omega_0)=$$

$$\frac{1}{R^3 C^3 (s-j\omega_0)^3 + C^2 (s-j\omega_0)^2 R^2 / Q + C (s-j\omega_0) R / Q + 1} \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_0 = \frac{1}{R_c C} \\ \omega = \frac{2(1/Q-1)}{RC} \end{array} \right. \quad (2)$$

对复数滤波器的噪声进行分析, 如果在输入端 \$inn\$ 存在噪声源, 那么在输出端 \$outn\$ 所产生的输出噪声可以表示为式(3); 而如果在第一级的输出端 \$outn1\$ 存在一噪声源, 那么该噪声源对输出端 \$outn\$ 的贡献可以表示为式(4)。从式(4)中可以看到, 在滤波器的中心频率 \$\omega\_0\$ 处 \$outn1\$ 对输出端的噪声贡献为零, 此时整个电路的噪声只由第一级以及环路电阻提供, 抑制了后级电路噪声, 从而达到噪声优化的目的。

$$\frac{outn}{inn}(s) = \frac{1}{R^3 C^3 (s-j\omega_0)^3 + C^2 (s-j\omega_0)^2 R^2 / Q + C (s-j\omega_0) R / Q + 1} \quad (3)$$

$$\frac{outn}{outn1}(s) = \frac{RC(s-j\omega_0)}{R^3 C^3 (s-j\omega_0)^3 + C^2 (s-j\omega_0)^2 R^2 / Q + C (s-j\omega_0) R / Q + 1} \quad (4)$$

对复数滤波器的稳定性进行分析, 由于采用的 FLFB 低通滤波器为多重环路结构, 无法用单一环路的稳定性来判定整个系统的稳定状态, 故而以劳斯-霍尔维茨稳定性判据为理论依据, 判定系统处于稳定临界状态时, 滤波器不同的设计参数与运放参数的关系<sup>[14-15]</sup>, 利用 MATLAB 拟合数据, 得到最小可接受的相位裕度图 (Minimum Acceptable Phase Margin, MAPM), 如图 2 所示。为了保证滤波器的稳定工作状态, 在设计时使运放的单位增益带宽 (unit Gain Bandwidth, GBW)、PM 在临界状态以上。比如当 \$Q\$ 取 0.5, 此时若 \$\omega/2\text{GBW}\$ 等于 0.1, 那么运放的 PM 只需大于 \$15^\circ\$ 便可以保证滤波器的稳定。

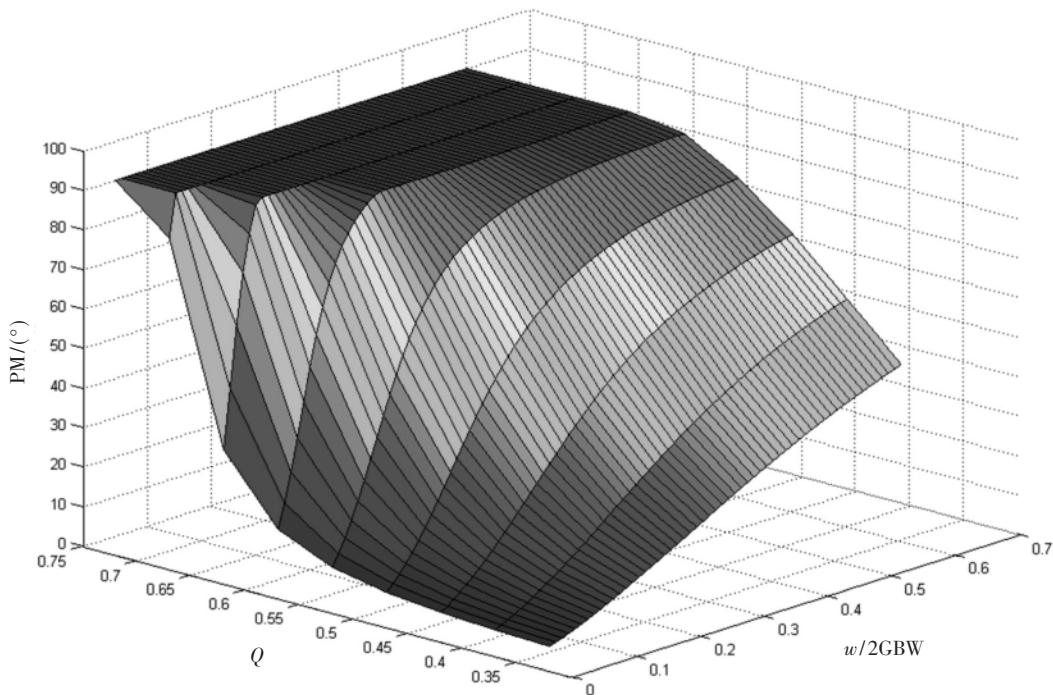


图 2 最小可接受相位裕度图

对复数滤波器的功耗进行分析,图 3 为本文采用的 Class AB 两级运放电路图,由两级放大电路、共模反馈电路(The Common-mode Feedback)以及偏置电路(The Reference Circuit)三部分组成。稳定性分析得出了滤波器参数与运放 GBW、PM 的关系,继而可以通过式(5)计算运放的第二级跨导  $G_{m2}$ ,其中  $g_m$ 、 $C_c$ 、 $C_{load}$  分别表示 MOS 管的跨导、密勒电容以及负载电容<sup>[16]</sup>。通过设计合适的 GBW,此时较小的 PM 便可保证系统的稳定,相比于传统 PM 取 60°的设计,减小了对  $G_{m2}$  的需求,从而达到减小功耗的目的。本文设计的运放在典型工艺角下,GBW 为 130 MHz,PM=36.8°,功耗 220 μA。

$$G_{m2} = g_{m6} + g_{m7} = \frac{GBW}{\tan(90^\circ - PM)} (C_c + C_{load}) \cdot 2\pi \quad (5)$$

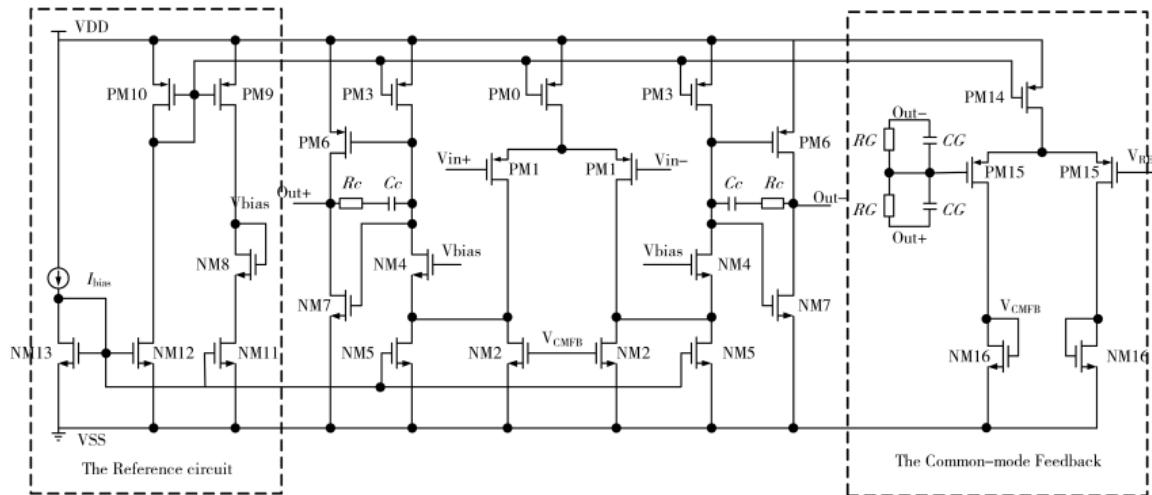


图 3 Class AB 两级运放电路图

## 2 仿真验证

采用 UMC 40 nm CMOS 工艺,设计了一款 3 阶 FLFB 结构的复数滤波器。在电源电压 1.0 V、负载电容 0.5 pF、 $Q$  取 0.5 时,常温下当控制字从 00 101 变化到 11 111,中心频率  $\omega_0$  可调范围为 0.68~1.34 MHz,带宽  $\omega$  变化范围为 0.98~1.92 MHz,如图 4 所示;图 5 是控制字为 01 101 时滤波器的输出波形,此时,  $\omega_0=1.04$  MHz,截止频率 0.29~1.79 MHz,在  $\omega_0+2.2$  MHz 处 IRR=28.4 dB,在  $\omega_0+4.4$  MHz 处 IRR=46.4 dB。为了说明本次设计的带宽可调能力,在不同的工艺角下通过改变控制字,对其进行调谐,结果如表 1 所示,调谐误差不超过 1.9%。

在典型工艺角下,选取控制字 01 101,对滤波器进

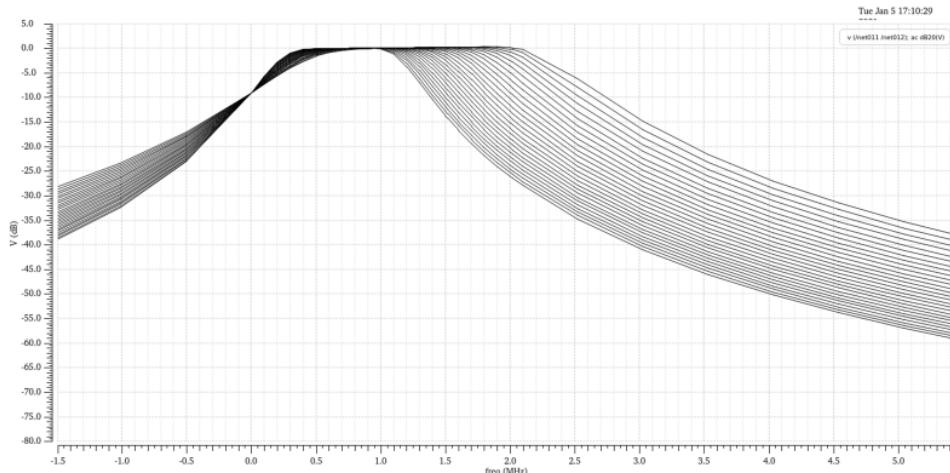


图 4 滤波器可调谐曲线

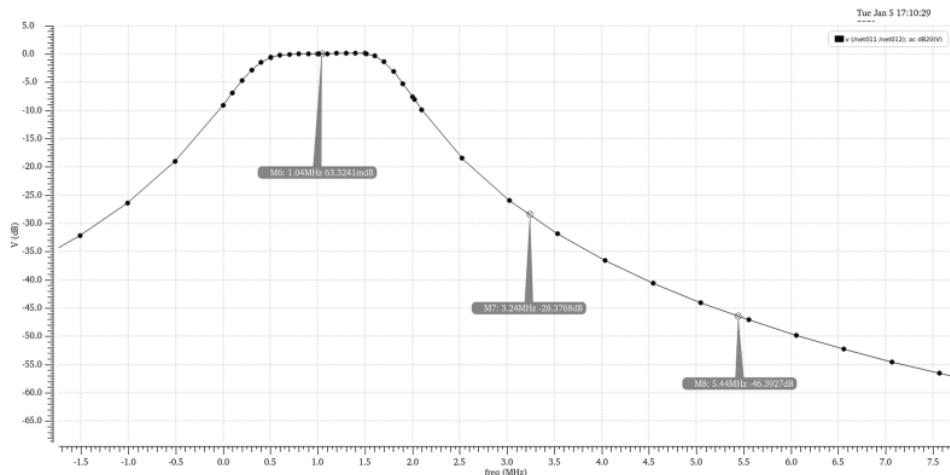


图 5 滤波器幅频响应曲线

表 1 不同工艺角下调谐控制字

电源/V、 温度/℃	工艺类型 * ffff	中心频率/ MHz	截止频率/ MHz	控制字
1.1、-30	ssss	1.024	0.28~1.77	00 101
	ffff	1.032	0.29~1.77	11 011
1.1、90	ssss	1.055	0.29~1.82	00 100
	ffff	1.040	0.30~1.78	11 010
0.9、-30	ssss	1.040	0.29~1.79	00 101
	ffff	1.037	0.29~1.78	11 011
0.9、90	ssss	1.063	0.30~1.83	00 100
	ffff	1.045	0.30~1.79	11 010
1.0、27	tttt	1.044	0.29~1.79	01 101

\*ssss, 慢工艺角; ffff, 快工艺角; tttt, 典型工艺角

行噪声仿真, 如图 6 所示。从图中可以看到在通带内 1.04 MHz 附近, 噪声达到了最小值 2.45 fV<sup>2</sup>/Hz, 对应了噪声的理论分析。

表 2 为 3 阶 FLFB 复数滤波器与其他参考文献的性能指标对比。本次设计的复数滤波器在总功耗为 1.33 mW 的情况下达到了带宽可调, 中心频率可调, 并且带内噪声积分为 90.6 μV, IRR 达到 28.4 dB。仿真结果与理论

分析相对应, 达到了减小功耗、降低噪声的目的。并且为了客观对比, 进行品质因子的计算, 计算表达式见式(6)、式(7)。

$$FOM_a = \frac{\text{Power}}{(\text{No. poles})(\omega^0 + \omega_0^2 / 2)^{1/2} \text{SFDR}} \quad (6)$$

$$FOM_b = \frac{\text{Power} \cdot \text{nosie}}{(\text{No. poles})(\omega^0 + \omega_0^2 / 2)^{1/2} \text{SFDR} \cdot \text{IIP3} \cdot \text{IRR}} \quad (7)$$

### 3 结论

本文设计了一款低噪声低功耗的 3 阶复数滤波器, 采用 FLFB 结构, 减小后级电路在输出端的噪声贡献, 以此来优化噪声; 并根据劳斯-霍尔维茨稳定性判据, 保证滤波器稳定工作的前提下, 减小运放的 PM, 以此来减小运放第二级放大电路的电流, 进而减小功耗。对电路进行仿真验证, 仿真结果与理论推导相吻合。

### 参考文献

- [1] 陈方雄.CMOS 窄带模拟集成滤波器及其在 GPS 中的应用研究[D].北京:中国科学院研究生院, 2009.
- [2] 王红敏, 林敏, 王若愚, 等.一种用于射频接收机的模拟

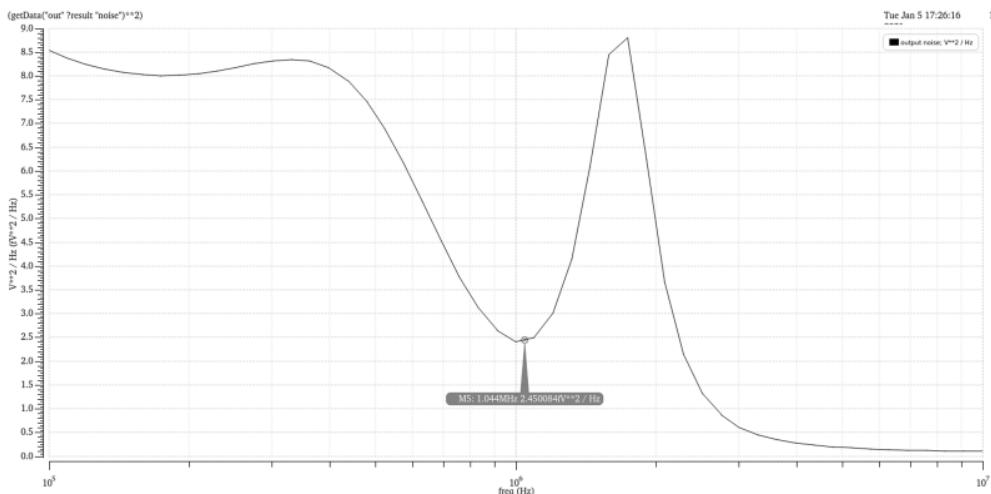


图 6 滤波器输出噪声曲线

表 2 性能指标对比

性能参数	工艺/ nm	类型	阶数	带宽/ MHz	中心频率/ MHz	IIP3/ dBm	噪声/ μVRms	SFDR(带内)/ dB	镜像 抑制比/dB	电源/ V	功耗/ mW	FOM <sub>a</sub>	FOM <sub>b</sub>
文献[4]	180	Active-RC	3	3.0	2.0	/	93.8	58.8	24.1	1.8	2.16	0.003 7	/
文献[10]	180	Active-RC	3	1.0	2.0	1.53	216	52.7	34.0	0.4	0.065 6	0.000 2	0.000 99
文献[13]	130	Active-RC	4	0.9	1.65	-9.41	/	40	18.33	0.7	0.35	0.001 5	/
本文 *	40	Active-RC	3	1.5	1.04	16	90.6	73.7	28.4	1.0	1.33	0.003 6	0.000 71

\*1.0 V, 27 °C, 典型工艺角下仿真数据

基带电路[J].微电子学,2017,47(270):109–114.

[3] 张才志.应用于无线收发机的有源复数滤波器研究[D].成都:电子科技大学,2018.

[4] LI D, JING Z, YANG Y T, et al. Third-order active-RC complex filter with automatic frequency tuning for ZigBee transceiver applications[J].中南大学学报(英文版),2015,22(3):966–973.

[5] 游玉洁.低功耗高线性度可调谐复数滤波器的设计[D].南京:东南大学,2018.

[6] 周明杰.可调谐高线性 Gm-C 复数滤波器设计[D].南京:东南大学,2015.

[7] 葛彬杰,李琰,俞航,等.一种应用于低中频接收机的复数滤波器[J].微电子学,2018,48(4):433–436,442.

[8] RASEKH A, BAKHTIAR M S. Design of low-power low-area tunable active RC filters[J].IEEE Transactions on Circuits and Systems II : Express Briefs, 2018, 65(1): 6–10.

[9] DE MATTEIS M, PIPINO A, RESTA F, et al. A 63-dB DR 22.5-MHz 21.5-dBm IIP3 fourth-order FLFB analog filter[J].IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2017, 52(7): 1977–1986.

[10] COMPASSI-SEVERO L, VAN NOIJE W A. 0.4-V 10.9-μW/Pole third-order complex BPF for low energy RF receivers[J].IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2019, 66(6): 2017–2026.

[11] ALZAHER H A, TASADDUQ N, AL-AMMARI F S. Optimal low power complex filters[J].IEEE Transactions on Circuits

& Systems I Regular Papers, 2013, 60(4): 885–895.

[12] HUANG C, CHEN C, ZHOU M J, et al. An active-RC reconfigurable lowpass-polyphase biquad filter for wireless receiver[J].Analog Integrated Circuits & Signal Processing, 2015, 84(1): 97–105.

[13] XIE Z, WU J, CHEN C. A compact low-power biquad for active-RC complex filter[J].IEEE Transactions on Circuits and Systems II : Express Briefs, 2018, 65(6): 709–713.

[14] AMIR-ASLANZADEH H, PANKRATZ E J, SANCHEZ-SINENCIO E. A 1-V +31 dBm IIP3, reconfigurable, continuously tunable, power-adjustable active-RC LPF[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2009, 44(2): 495–508.

[15] 胡寿松.自动控制原理基础教程[M].第 4 版.北京:科学出版社,2003.

[16] 毕查德·拉扎维.模拟 CMOS 集成电路设计[M].第 2 版.西安:西安交通大学出版社,2018.

(收稿日期:2021-01-06)

#### 作者简介:

张旭东(1996-),男,硕士研究生,主要研究方向:模拟基带有源滤波器。

雷倩倩(1984-),通信作者,女,博士,副教授,主要研究方向:数模混合集成电路,E-mail: leiqianqian@163.com。

张芳玲(1996-),女,硕士研究生,主要研究方向:可变增益放大器。



扫码下载电子文档

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所