

# 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  $36.8^\circ$  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  $0.98 \sim 1.92$  MHz, 中心频率  $0.68 \sim 1.34$  MHz 可调, 通带内噪声  $90.6 \mu\text{V}$ , 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  $36.8^\circ$  deg of operational amplifier, achieving the low-noise low-power optimization. Simulation results show that the bandwidth is adjustable for  $0.98 \sim 1.92$  MHz, center frequency is adjustable for  $0.68 \sim 1.34$  MHz, the noise in-band is  $90.6 \mu\text{V}$ , spurious-free dynamic ranges is  $73.7$  dB, image rejection ratio 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  $125 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  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  $87 \mu\text{V}$ <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  $65.6 \mu\text{W}$ ; 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  $60^\circ$  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,  $\text{inp}$ 、 $\text{inn}$  为滤波器输入端,  $\text{outn}$ 、 $\text{outp}$  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

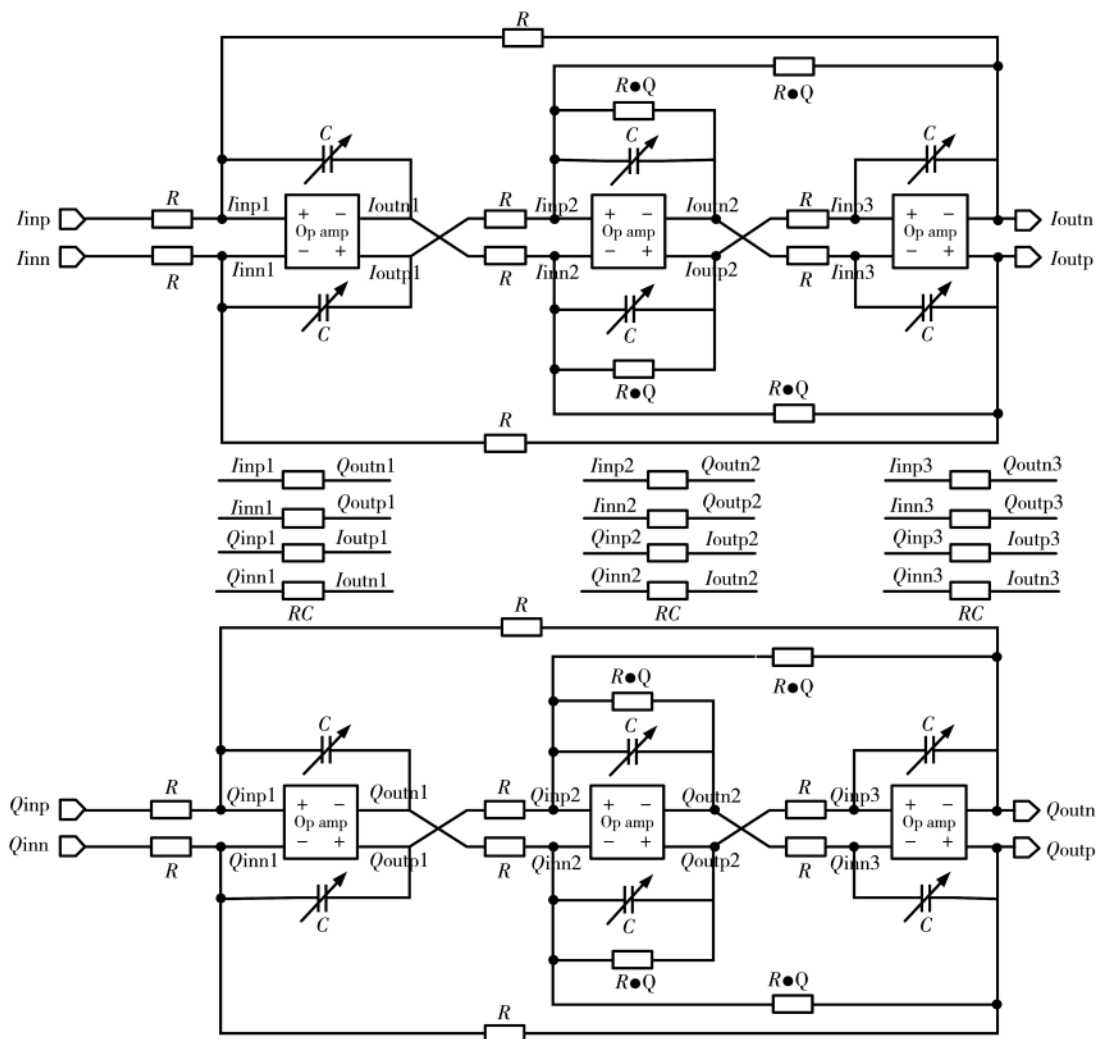


图 1 3 阶复数滤波器电路图

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  $TF(s-j\omega_0)$  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)。

$$TF(s-j\omega_0)=$$

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

$$\begin{cases} \omega_0 = \frac{1}{R_cC} \\ \omega = \frac{2(1/Q-1)}{RC} \end{cases} \quad (2)$$

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。

$$\frac{outn}{inn}(s)=$$

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

$$\frac{outn}{outn1}(s)=$$

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

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  $\omega/2GBW$  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。

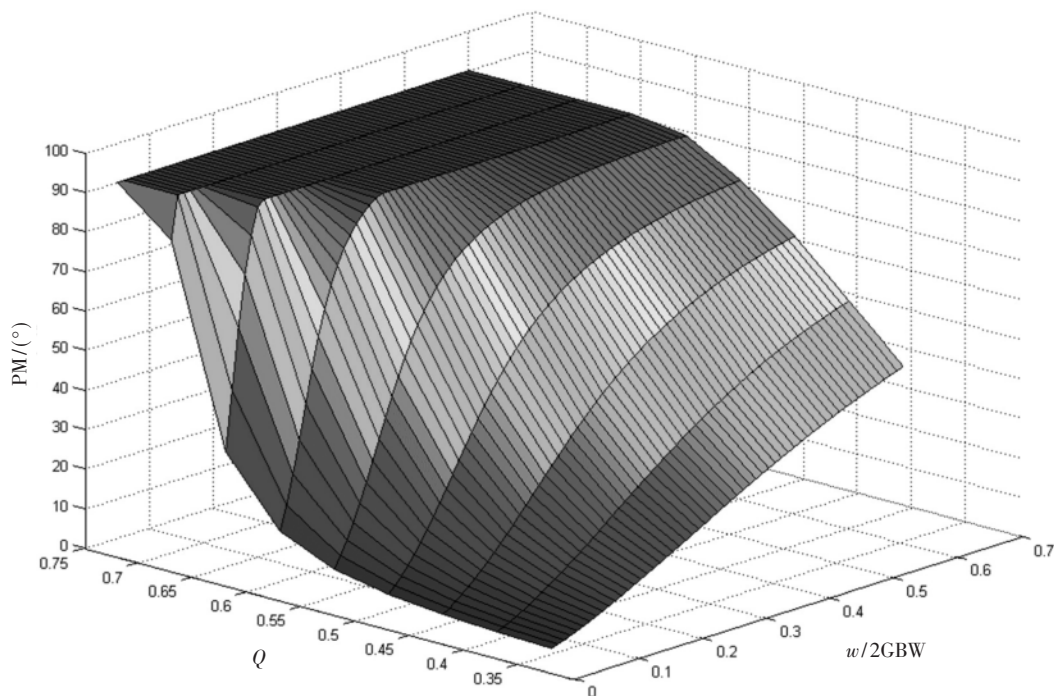


图2 最小可接受相位裕度图

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 $60^\circ$ 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= $36.8^\circ$ ,功耗220  $\mu$ A。

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

## 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

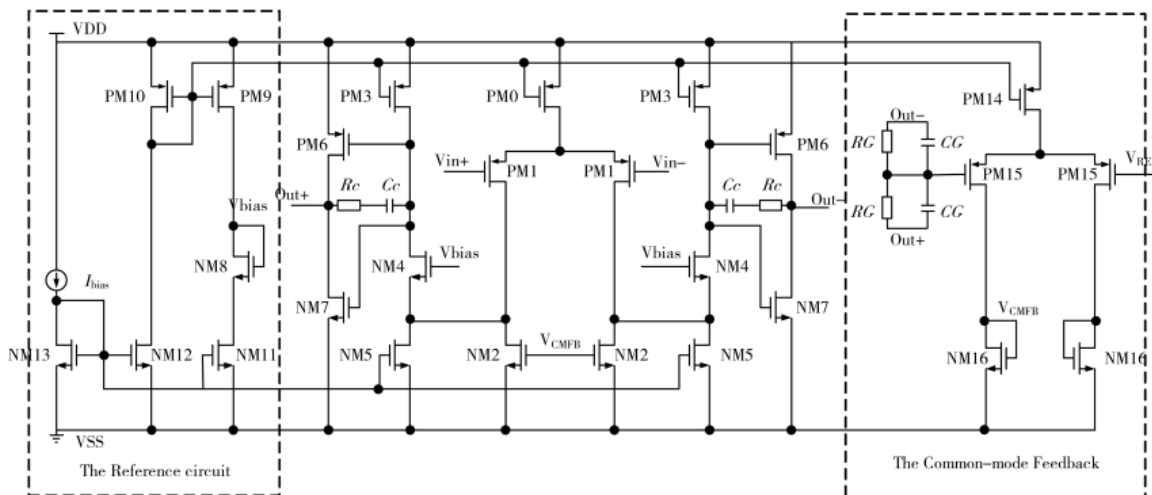


图3 Class AB两级运放电路图

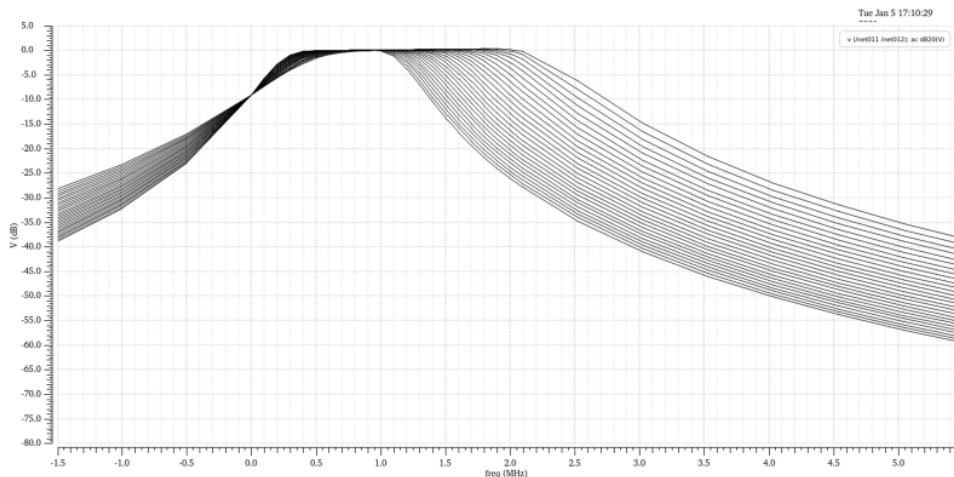


图4 滤波器可调谐曲线

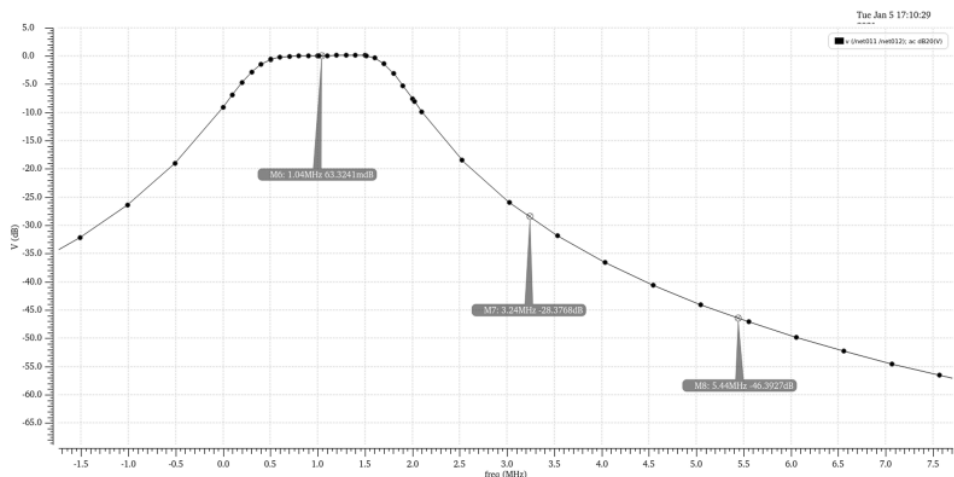


图5 滤波器幅频响应曲线

表1 不同工艺角下调谐控制字

| 电源/V、<br>温度/℃ | 工艺类型* | 中心频率/<br>MHz | 截止频率/<br>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 $2.45 \text{ fV}^2/\text{Hz}$ ,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 $90.6 \text{ } \mu\text{V}$ ,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)。

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

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

### 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



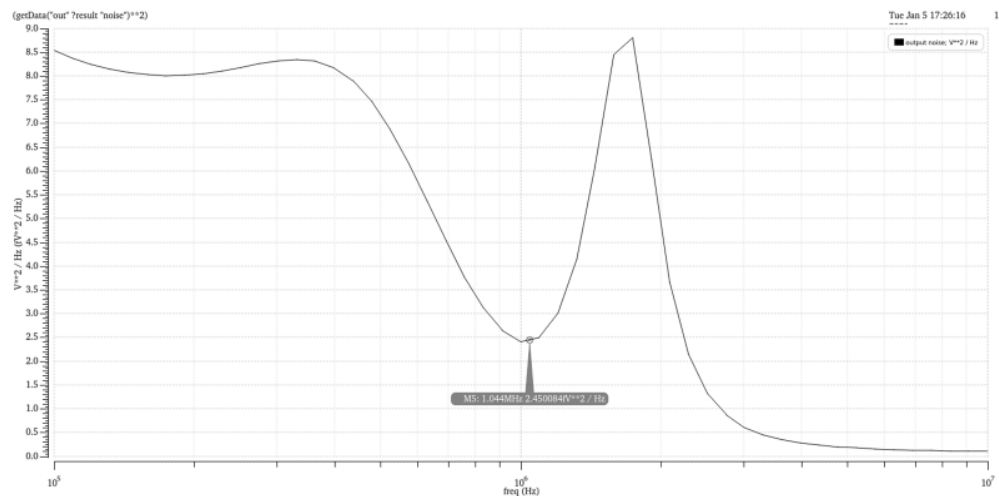


图 6 滤波器输出噪声曲线

表 2 性能指标对比

| 性能参数   | 工艺/<br>nm | 类型        | 阶数 | 带宽/<br>MHz | 中心频率/<br>MHz | IIP3/<br>dBm | 噪声/<br>$\mu\text{V}_{\text{rms}}$ | SFDR(带内)/<br>dB | 镜像<br>抑制比/dB | 电源/<br>V | 功耗/<br>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 ℃, 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- $\mu\text{W}$ /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