

基于全差分运放的水听器集成低通滤波器

姜晋鲁^{1,2} 方 硕^{1,2}
JIANG Jinlu FANG Shuo

摘 要

声传感器阵列测量精度受限于阵列尺寸,即随着阵列尺寸的减小,滤波器摆幅不足以抵抗串扰导致测量精度显著下降;另一方面,声传感器阵列在强电磁等恶劣环境下可靠较低。基于以上问题,文章在传统水声传感器阵列检测前端提出基于折叠式共源共栅全差分运算放大器的多重反馈低通滤波器,来提高恶劣环境下的测量精度和稳定性。所设计的滤波器首先采用全差分运放增加信号摆幅抵抗串扰来提高精度;其次通过利用共源-共栅型结构消除相位失真提高可靠性;最后在电路设计时令每个 CMOS FET 都有自己的电源和地线,展宽全差分运算放大器的相位裕度,降低零极点影响提高系统稳定性。最终实现提高微小型水声传感器阵列检测精度与灵敏度。

关键词

声测量;全差分;共源-共栅;多重反馈

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.11.031

0 引言

水声信号是低频信号,为了消除环境噪声,提高传输信号的信噪比,水听器的前端读出系统一般在前置放大器放大后,需要进行低通滤波。现今的声传感器阵列尺寸越来越小,

传感器之间的串扰逐渐明显。在现今声传感器阵列低供电电压的情况下,传统低通滤波器很难能产生足够大的信号摆幅来抵抗串扰的影响大大影响测量精度,这为水听器的小型化提出了挑战^[1]。全差分运算放大器能够提供全摆幅,能够有效抑制电路的共模信号,减小电路的偶次谐波失真,在现代的电路设计中应用非常广泛。由于全差分运放具备这些优势,采用全差分运放构成低通滤波器将很可能有效降低串扰噪声的影响,提高检测精度,从而提高了阵列接收水声信号的灵敏度,进而得到了小尺寸条件下的高分辨率^[2,3],为提高小型化集成化的水听器系统提供了新思路^[4]。另一方面,作为阵元,传统压电式水听器易受电磁干扰,且在高温、

1. 哈尔滨工程大学信息与通信工程学院
黑龙江哈尔滨 150001
 2. 哈尔滨工程大学先进船舶通信与信息技术工信部重点实验室
黑龙江哈尔滨 150001
- [基金项目] 国家自然科学基金(62104054);哈尔滨工程大学校级大学生创新训练计划项目

- [7] 周钱生,戴麟.快速查表法优化视频解码中 YCbCr 到 RGB 的转换[J].现代电子技术,2007(15):167-169+183.
- [8] RANI K S, HANS W J.FPGA implementation of bilinear interpolation algorithm for CFA demosaicing[J]. Piscataway:IEEE,2013:857-863.
- [9] PRIYA J J, ANNALAKSHMI M, GANESAN R.FPGA implementation of low power image scaling processor using bilinear interpolation[J].Programmable device circuits & systems, 2014,6(5):PDCS052014002.
- [10] 张彪,宋红军,刘霖,等.基于 PCIE 接口的高速数据传输系统设计[J].电子测量技术,2015(10):113-117.
- [11] ROTA L, CASELLE M, CHILINGARYAN S, et al.A new DMA PCIe architecture for Gigabyte data transmission[C]//

- Real Time Conference.Piscataway:IEEE, 2014:1-2.
- [12] 信侃.基于 Xilinx FPGA 的 PCIe 总线接口设计与实现[J].无线电通信技术,2014,40(4):94-96.

【作者简介】

李耀成(1997—),男,广西北流人,硕士,助理研究员,研究方向:FPGA 高速总线设计、FPGA 图像采集和处理。

常可铮(1997—),男,河南唐河人,硕士,助理研究员,研究方向:深度学习图像处理、模型量化及 FPGA 硬件加速。

杨得武(1997—),男,甘肃白银人,硕士,助理研究员,研究方向:硬件电路设计。

(收稿日期:2024-07-23)

高压等恶劣环境下不能可靠工作,而全差分运算放大器能够有效抑制电磁干扰、高温高压等恶劣环境产生的共模信号,并且能够减小电路的偶次谐波失真^[5-10]。在水听器的测量系统中,滤波技术是系统实现的关键。多重反馈滤波器(multiple feedback filter)技术具有精度高、速度快、分量灵敏度低、硬件成本低等优势,非常适宜在高速动态信号测量中的应用^[11-14]。常用的MFB(multiple feedback)型滤波器有反相输入型和同向输入型。然而MFB型滤波器由于引入的反馈量较多,导致其幅度与相位稳定性降低,在实验中很难精确控制,进而导致MFB型滤波器在水听器滤波中的应用率不高^[15]。

基于以上问题,本文提出了一种基于全差分运算放大器的MFB型低通滤波器技术,用于提高小尺寸条件下的水听器精度。该滤波电路首先采用全差分运算放大器实现对低频水听信号进行摆幅增强,抵抗低频信号之间的串扰,提高检测精度;其次采用共模反馈回路来控制输出的共模电平提高灵敏度、抗电磁干扰能力;最后对MFB技术中的反馈采取精确调校,提高滤波器的稳定性。

1 系统结构

MFB型低通滤波器系统结构示意图如图1所示。

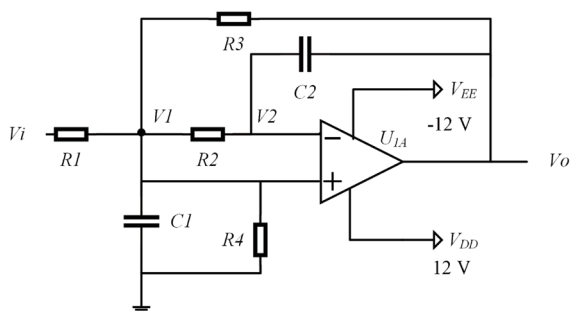


图1 MFB型低通滤波器系统结构示意图

系统由全差分运算放大器、反馈电阻 R_3 、反馈电容 C_2 、分压电阻 R_1 和 R_2 以及平衡电阻 R_4 组成。信号由运放的反相端输入,输出端通过 R_3 和 C_2 构成两个反馈支路,信号的频率决定着反馈的强弱。MFB型滤波器属于反相输入滤波器,同向输入一般被偏置为共模电位或接地。这种类型的拓扑结构可以提供非常精确的滤波器响应和低分量灵敏度。在MFB型滤波器中,存在电容的反馈,在调试时需要特别小心零极点,否则就会出现相位失真,降低MFB型滤波器的稳定性甚至产生自激振荡,导致水听器测量系统的失效。

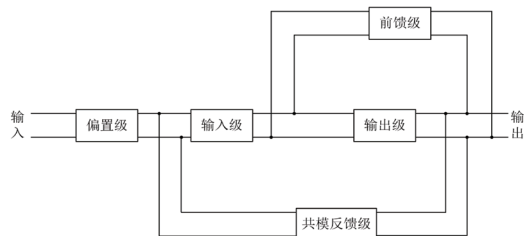
因此,本文通过利用共源-共栅型结构的高可靠性,令每个CMOS FET都有自己的电源和地线,展宽全差分运算放大器的相位裕度,进而降低调试时的零极点影响,提高系统的稳定性。此外,全差分运算放大器拟采用折叠式共源-共栅型结构,有效增大了输入输出摆幅,减少串扰噪声,提高

检测精度与灵敏度,得到小尺寸条件下的高分辨率。

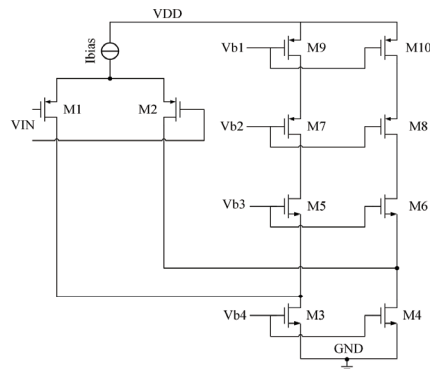
2 实验原理

2.1 折叠式共源-共栅型全差分运算放大器

通过分析折叠式共源-共栅结构的优点和缺点,改进了以这种结构为基础的全差分运算放大器的电路结构。增添了偏置电路、前馈级和共模反馈级来满足有关技术指标。其电路结构框图如图2(a)所示。从图2中可以看出,该全差分运算放大器主要由五个部分组成,分别是偏置级、输入级、输出级、前馈级和共模反馈级。输入级和输出级构成了选型时决定采用的两级运算放大器。图2(b)给出了所设计的全差分折叠式共源-共栅型放大器的电路。



(a) 系统结构图



(b) 全差分式电路图

图2 折叠式共源-共栅型放大器

为了同时发挥两级运放增益和输出摆幅的两大优势,采用折叠式共源-共栅结构作为两级运放的输入级来尽可能大的提高增益,采用共源放大器作为两级运放的输出级以获得较大的输出摆幅。

输入级的增益为:

$$A_1 = -g_{m1} \cdot R_{o1} \quad (1)$$

式中: g_{m1} 是输入级中输入管的跨导, R_{o1} 是输入级的输出电阻。

$$R_{o1} = g_{m7} r_{o7} (r_{o1} \parallel r_{o9a} \parallel r_{o9b}) \parallel g_{m5} r_{o5} r_{o3} \quad (2)$$

式中: r_{ox} 代表 M_x 管的输出电阻, g_{mx} 代表 M_x 管的跨导, $x \in \{1, 2, 3, \dots, 10\}$ 。

故输入级的增益为:

$$\begin{aligned} A_1 &= -g_{m1} [g_{m7} r_{o7} (r_{o1} \parallel r_{o9a} \parallel r_{o9b}) \parallel g_{m5} r_{o5} r_{o3}] \\ &= -\frac{g_{m1} g_{m7} g_{m5}}{g_{m5} g_{o7} (g_{o1} + g_{o9a} + g_{o9b}) + g_{m7} g_{o5} g_{o3}} \end{aligned} \quad (3)$$

同理, 输出级增益为:

$$A_2 = -g_{m13}(r_{o11} \parallel r_{o13}) \quad (4)$$

为了稳定全差分放大器的输出直流电平, 必须采用共模反馈环路来稳定输出直流电压, 因为差分信号不能稳定直流工作点。并且在设计共模反馈环路的时候, 必须考虑以下几个方面。

(1) 共模反馈环路的直流增益要尽可能大。

(2) 共模反馈环路的带宽也要尽可能大, 最好是能和差分通路接近。

(3) 共模反馈环路的稳定性也必须达到一定的要求。

由于两级结构的运放容易产生多个极点, 为了解决这一问题, 本设计加入了前馈级电路来规定电路的零点, 如图 3。前馈级电路将输入信号添加到输出端作为输入量, 该输入信号反映输出的前馈信号, 此时, 该信号与期望的正反馈(正反馈信号通常由控制对象来设定)进行比较并应用差分法产生调节量, 从而使输出与期望信号相匹配。

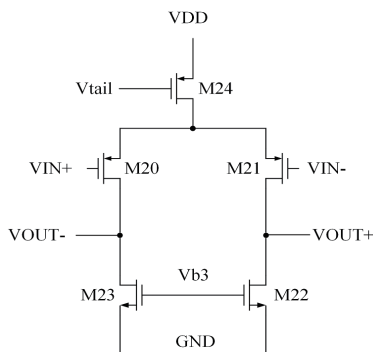


图 3 前馈级电路

将折叠共源-共栅型全差分运算放大电路在 cadence 中进行建模仿真。

2.2 MFB 型低通滤波器

根据图 1 中的 MFB 型低通滤波器系统结构, 根据运放的虚短和虚断特性, 可以列出电路方程:

$$V_2 = 0 \quad (5)$$

$$\frac{V_1 - V_2}{R_2} = sC_2(V_2 - V_0) \quad (6)$$

由欧姆定律和基尔霍夫电流定律可得:

$$\frac{V_i - V_1}{R_1} = sC_1V_1 + \frac{V_1 - V_2}{R_2} + \frac{V_1 - V_0}{R_3} \quad (7)$$

联立上面三个式子, 化简可得传递函数的关系式:

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = -\frac{\frac{R_3}{R_1} \times \frac{1}{R_2 R_3 C_1 C_2}}{s^2 + \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right) \frac{1}{C_1} s + \frac{1}{R_2 R_3 C_1 C_2}} \quad (8)$$

由传递函数可以看出, MFB 低通滤波电路具有反相作用。一个具有等效响应特性的差分滤波器, 是可以基于单端的

MFB 型滤波器。值得注意的是, 在声传感器阵列中传感器之间相互串扰的情况下, 由于 MFB 拓扑的增益不需要隔离电阻, 是不会发生电路振荡, 相比其它类型的拓扑结构对于阻带的抑制效果更好, 并且 MFB 型滤波器在闭环极点对放大器增益带宽积的灵敏度影响更小, 在高品质因素的条件下, 其相应的灵敏度更高, 能够更好地适应声传感器阵列的需求。其具体原理如下。

二阶低通滤波器的归一化传递函数可以写为:

$$H(s) = H_{up} / (s^2 + \alpha s + \beta) \quad (9)$$

令 $s = s/\omega_c$, 可以得到去归一化之后的二阶低通滤波器的传递函数为:

$$H(s) = H_{up} \omega_c^2 / (s^2 + \alpha \omega_c s + \beta \omega_c^2) \quad (10)$$

式中: H_{up} 为滤波器的通带增益, ω_c 是滤波器的截止频率, 品质因数为:

$$Q = \sqrt{\beta} / \alpha \quad (11)$$

式中: α 和 β 是二项式的系数。

由式 (8) 可以得到:

$$\begin{cases} \beta \omega_c^2 = \frac{1}{R_2 R_3 C_1 C_2} \\ H_{up} \omega_c^2 = -\frac{R_3}{R_1} \times \frac{1}{R_2 R_3 C_1 C_2} \\ \alpha \omega_c = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right) \frac{1}{C_1} \end{cases} \quad (12)$$

令 $R_3 = AR_1$, $C_2 = mC_1$ 则:

$$H_{up} = -\beta \frac{R_3}{R_1} = -\beta A \quad (13)$$

$$\beta m \omega_c^2 C_1^2 R_3^2 - \alpha \omega_c C_1 R_3 + (A+1) = 0 \quad (14)$$

由于 R_3 一定有实根, 则必然有:

$$\Delta = (\alpha \omega_c C_1)^2 - 4\beta m \omega_c^2 (A+1) C_1 \geq 0 \quad (15)$$

即:

$$m \leq \frac{\alpha^2}{4\beta(A+1)} \quad (16)$$

解得:

$$\begin{cases} R_3 = \frac{\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - 4\beta m(A+1)}}{2\beta m \omega_c C_1} \\ R_2 = \frac{\alpha \mp \sqrt{\alpha^2 - 4\beta m(A+1)}}{2\beta m(A+1) \omega_c C_1} \end{cases} \quad (17)$$

根据式 (17) 可知, 仔细设计 C_1 和 m 的值即可获得灵敏度更高, 能够更好地适应声传感器阵列的低通滤波器。

3 仿真分析

3.1 折叠式共源-共栅全差分运算放大器

首先需要通过 DC 仿真观察电路中各点的电压电流值是否符合预期结果, 仿真前所设置的共模电压为 1.5 V。如图 4

所示,通过 DC 仿真可以看出,共模电压为 1.5 V,直流电流为 1.47 mA,VDD 为 3.3 V,各点电压和电流值符合预期结果。

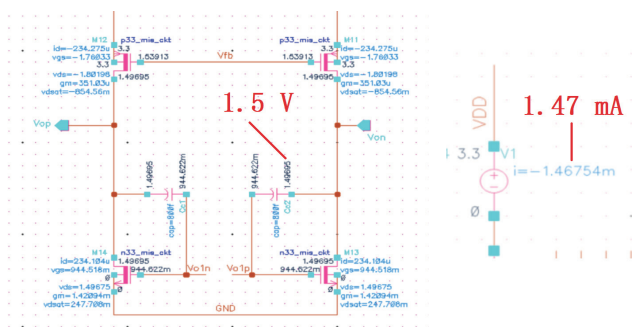


图 4 运算放大器 DC 仿真结果

全差分运算放大器的增益曲线如图 5 所示,从图中可以看出增益为 86 dB,GBW 为 161 MHz。通过之前增益的表达式可以知道,该全差分运算放大器的增益大于 65 dB,满足 MFB 型滤波器的需求。对于共模环路,其增益曲线如图 6 所示,可见共模环路增益为 28.7 dB,GBW 为 29 MHz。

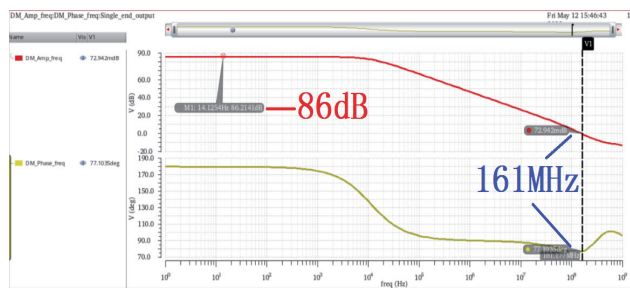


图 5 全差分运算放大器的增益仿真曲线



图 6 全差分运算放大器的共模增益仿真曲线

压摆率直接体现运放的灵敏度,为了仿真全差分运算放大器的转换速率即压摆率,对其进行瞬态仿真,如图 7,得出电压发生变化处的斜率为 46.4 V/ μ s,即压摆率为 46.4 V/ μ s,可以看出相比于常规运放,本文的全差分运放压摆率明显提高,这种摆幅将有效抵抗串扰的影响,显著提高测量精度。

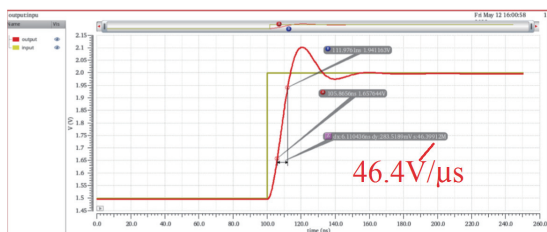


图 7 全差分运算放大器的压摆率仿真曲线

共模抑制比 (CMRR) 是运算放大器差分输入增益与共模增益的比值,它的大小表现了运算放大器能否较好地抑制共模信号的输入,即抵抗电磁干扰以及在高温、高压等恶劣环境下的高可靠性。进行交流仿真时,设置频率在 1 Hz 到 1 GHz 变化,得到图 8 所示曲线,可以看出该运算放大器的共模抑制比为 135.6 dB。可见该运放共模抑制能力很强,能够满足恶劣条件下的应用需求。

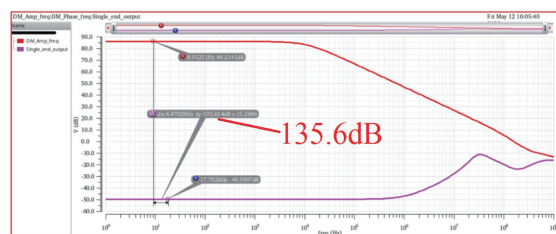


图 8 全差分运算放大器的共模抑制比仿真曲线

电源抑制比 (PSRR) 是输入电源电压的变化量与转换器输出的变化量的比值,反映了运算放大器能否有效地抑制对地噪声。图 9 为电源抑制比的仿真结果,可以看出该全差分运算放大器的电源抑制比是 96.6 dB。可见该运放对电源噪声的抑制能力很强,能够满足复杂的水下环境影响。

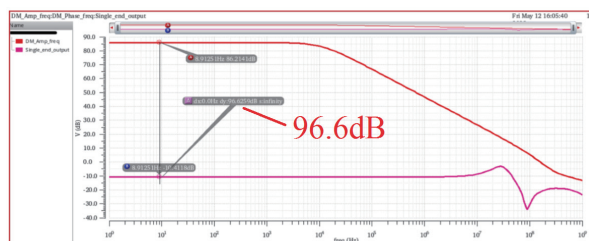


图 9 全差分运算放大器的电源抑制比仿真曲线

总谐波失真 (THD) 表明运放工作时,由于电路不可避免的振荡或其它谐振产生的二次、三次谐波与实际输入信号叠加,导致输出端信号包括谐波成分的信号,谐波成分与实际输入信号的比用百分比来表示,即 THD。THD 仿真如图 10 所示,结果表明仿真频率 100 kHz,输出幅度 100 mV,THD 为 2.04%。可以看出 THD 是很小的,因此其抗谐波干扰能力很强,非常适合作为滤波器的运放使用。

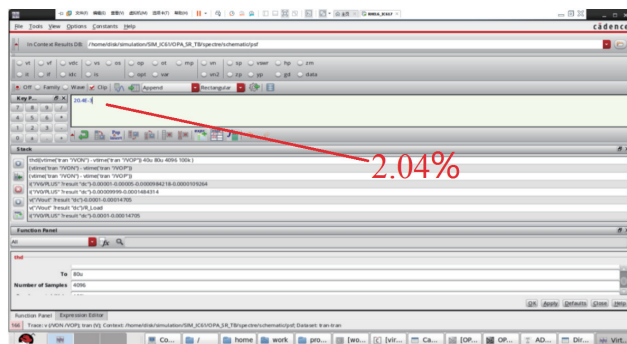


图 10 全差分运算放大器的总谐波失真 (THD) 仿真曲线

对运放的噪声性能进行仿真，如图 11 所示，可以看出等效输入噪声在高频为 $8.1 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。低频噪声较高是因为 $1/f$ 噪声引起的，这也是水听阵列需要主要考虑的频率范围，在组成 MFB 低通滤波器时要进行优化。

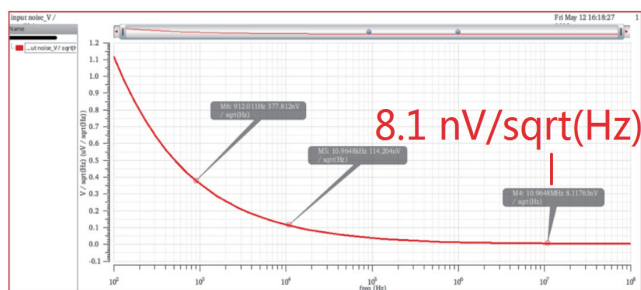


图 11 全差分运算放大器的噪声仿真曲线

3.2 全差分 MFB 低通滤波器的仿真

首先对全差分 MFB 低通滤波器的增益和通频带进行仿真，如图 12 所示。可以看出其增益为 0 dB ， -3 dB 带宽为 5.5 kHz 。在高频处，滤波器的衰减为 40 dB 每十倍频程。

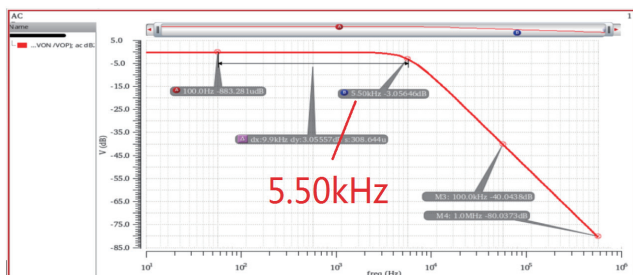


图 12 全差分有源低通滤波器的增益和通频带

有源低通滤波器中的噪声主要有两种，第一种是由电阻内部的电子做无规则的热运动引起的热噪声。第二种是由运算放大器中的晶体管引入的散粒噪声、分配噪声和闪烁噪声。通过对滤波器噪声的仿真，从图 13 可以看出滤波器等效输入噪声在高频处 $402.6 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

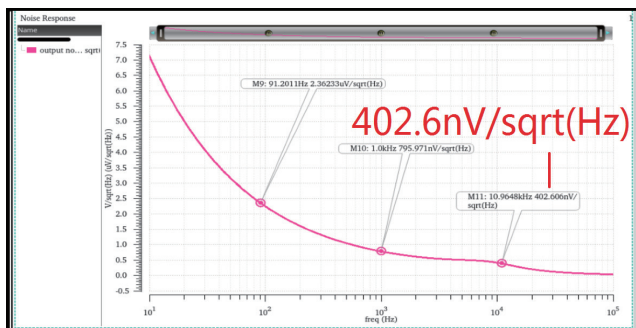


图 13 全差分有源低通滤波器的噪声仿真

设置输入的单端差分信号幅度为 50 mV ，频率为 1 kHz 来进行瞬态仿真，可以从图 14 看出输出的差分信号幅度为 100 mV ，频率也为 1 kHz 。符合全差分有源低通滤波器的输入输出规律。通过计算器计算得到 THD 为 3.5% 。

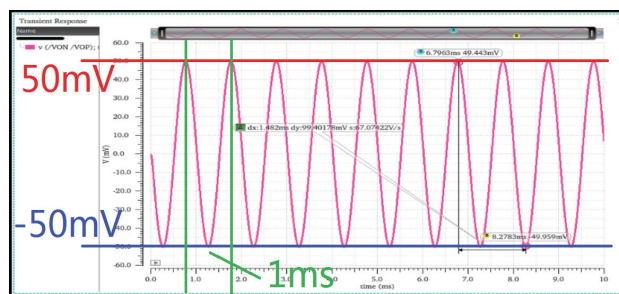


图 14 全差分有源低通滤波器的瞬态仿真

4 实验分析

图 15 所示为包含本实验 MFB 全差分有源低通滤波器的水听传感器阵列模拟前端，其中采用 AD743J 作为水听器专用前置放大器。由本实验设计的折叠式共源 - 共栅全差分运算放大器组成 MFB 低通滤波器，将前置放大器放大后的水声信号进行滤波。信号发生器输入幅度为 20 mV 频率为 20 Hz 的正弦波来模拟水听器的输出信号。

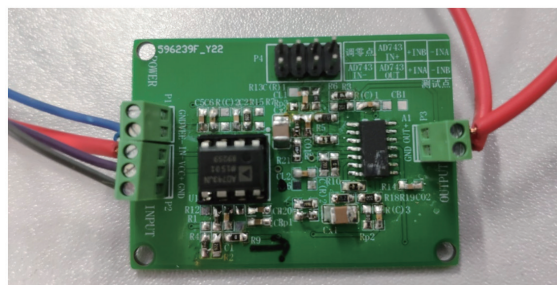


图 15 包含本实验 MFB 全差分有源低通滤波器的水听传感器阵列模拟前端

用示波器来观察输入的水听器信号和滤波后的信号。图 16 所示为示波器显示的水听器信号和滤波后的信号。其中比较杂乱的噪声比较大的是信号发生器模拟水听器的输出信号，波形结构比较规律噪声很小的为本实验设计的折叠式共源共栅全差分运算放大器组成 MFB 低通滤波器输出。示波器显示的结果可以看出，在经过 MFB 低通滤波后噪声显著降低。本实验设计的折叠式共源 - 共栅全差分运算放大器组成 MFB 低通滤波器功能得到了实验验证。

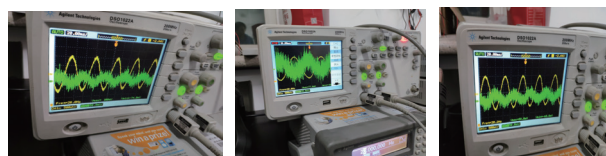


图 16 示波器显示的水听器信号和滤波后的信号

图 17 所示为本实验设计的折叠式共源 - 共栅全差分运算放大器组成 MFB 低通滤波器增益下降为 0.707 倍时，信号发生器的输出频率和示波器显示的 MFB 低通滤波器输出。从图 17 中可以看出，本实验设计的折叠式共源 - 共栅全差分运算放大器组成 MFB 低通滤波器的通频带约为 5.5 kHz ，与图 12 中的仿真结果吻合很好，仿真结果得到了实验验证。因此

本实验设计的折叠式共源-共栅全差分运算放大器组成 MFB 低通滤波器实现了对低频水听信号进行摆幅增强,能够抵抗低频信号之间的串扰进而提高检测精度。此外还具备灵敏度高、抗电磁干扰能力强以及稳定性高的优势。解决了水听器实际应用时低频信号之间的串扰以及恶劣环境下可靠性低的问题。



图 17 示波器显示的水听器信号和滤波后的信号

5 结论

针对现今微小型水声传感器阵列中传感器之间的串扰降低测量精度、恶劣环境下可靠低的问题,在传统水声传感器阵列检测前端提出采用折叠式共源-共栅全差分运算放大器对低频水听信号进行摆幅增强抵抗串扰,并组成 MFB 低通滤波器来控制输出的共模电平提高灵敏度、抗电磁干扰能力以及稳定性,达到在恶劣环境下实现高精度检测的目的。根据 MFB 型滤波器中电容反馈容易出现相位失真导致系统失效的问题,通过利用共源-共栅型结构的高可靠性,令每个 CMOS FET 都有自己的电源和地线,展宽全差分运算放大器的相位裕度,降低零极点影响提高系统稳定性,提高微小型水声传感器阵列检测精度与灵敏度。

参考文献:

- [1] KAY S M. Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory [M]. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall Inc, 1993.
- [2] 杨光义,魏天奇,李杰潘,等.全差分可控增益射频宽带放大器系统[J].实验室研究与探索,2019,38(9): 116-121.
- [3] 范国亮,黄治华,何峥嵘,等.一种高速轨到轨输出差分放大器设计[J].电子元件与材料,2022,41(10): 1066-1071.
- [4] 罗德猛,徐海东,胡长青,等.一种可用于自容式水听器的信号采集电路设计[J].声学技术,2023,42(3): 306-313.
- [5] MATTHUS C D, BUHR S, KREISSIG M, et al. High gain and high bandwidth fully differential difference amplifier as current sense amplifier[J].IEEE transactions on instrumentation and measurement, 2021, 70: 2000911.
- [6] SPINELLI E M, GUERRERO F N, GARCÍA P A, et al. A fully-differential biopotential amplifier with a reduced number of parts [J]. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 2022, 71: 2006908.
- [7] KIM Y J, CHOI H C, AHN G C, et al. A 12 bit 50 MS/s CMOS nyquist A/D converter with a fully differential class-AB switched op-amp[J].IEEE journal of solid-state circuits, 2010, 45 (3): 620-628.
- [8] AN X, WAGNER J, ELLINGER F. Fully differential ultra-wideband amplifier with 46-db gain and positive feedback for increased bandwidth[J].IEEE transactions on circuits and systems ii-express briefs, 2021, 68 (4): 1083-1087.
- [9] ZHAO Y, SHANG Z X, LIAN Y. A 2.55 NEF 76 dB CMRR DC-coupled fully differential difference amplifier based analog front end for wearable biomedical sensors[J].IEEE transactions on biomedical circuits and systems,2019, 13 (5): 918-926.
- [10] CROVETTI P S. Finite common-mode rejection in fully differential nonlinear circuits[J].IEEE transactions on circuits and systems ii-express briefs, 2011, 58 (8): 507-511.
- [11] SUN Y C. Synthesis of leap-frog multiple-loop feedback OTA-C filters [J].IEEE transactions on circuits and systems ii-express briefs, 2006, 53 (9): 961-965.
- [12] ZHU B H, WANG C H, SUN Y C, et al. Systematic design of current-mode multiple-loop feedback filters based on a single CDCTA [J].IETE Journal of research, 2017, 63 (3): 435-447.
- [13] ZHAO W S, SUN Y C. Current-mode high-frequency wavelet filter based on leap-frog multiple-loop feedback structure[C]//2013 IEEE 56th International Midwest Symposium on Circuits and Systems. Piscataway: IEEE, 2013: 209-212.
- [14] WANG C H, LENG Y, ZHANG Q J, et al. Systematic design of fully balanced differential current-mode multiple-loop feedback filters using CFBCCII[J]. Radioengineering, 2010, 19 (1): 185-193.
- [15] 熊俊俏,戴璐平,刘海英.无限增益多路反馈带通滤波器的研究[J].电气电子教学学报,2013,35(3): 84-86.

【作者简介】

姜晋鲁(2004—),男,山西襄汾人,本科,研究方向:电子信息。

方硕(1989—),通信作者(e-mail: fangshuo_89@hrbeu.edu.cn),男,黑龙江大庆人,博士,讲师,研究方向:数字模拟芯片设计。

(收稿日期: 2024-08-13)