

# 一种 0.1Hz 至 10Hz 滤波放大器设计

孙 泉, 齐 敏, 汤 亮, 乔东海

(中国科学院声学研究所, 北京 100190)

**摘要:** 本文设计了一种用于电压参考和运算放大器低频噪声测试的滤波放大器。采用计算机仿真验证设计参数, 制作了 PCB 并进行测试, 最终实现的滤波放大器指标为: 下限截止频率 0.1Hz、上限截止频率 10Hz、本底噪声峰峰值 250nVpp、通带增益 100dB, 采用本文设计的滤波放大器和示波器可以实现大多数低噪声运算放大器和低噪声电压参考的低频噪声测量。

**关键字:** 低频噪声; 滤波放大器; 低噪声运算放大器

**中图分类号:** TP402

**文献标识码:** A

## Design of a 0.1Hz to 10Hz filtering amplifier

SUN Quan, QI Min, TANG Liang, QIAO Dong-hai

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China)

**Abstract:** This paper presents a novel filtering amplifier for low frequency measurement of voltage reference and operational amplifier. The paper employs computer simulation to verify design parameters. A filtering amplifier PCB was designed and testing of the board was carried out. The paper realizes the low-end cut off frequency of 0.1Hz, high-end cut off frequency of 10Hz, peak-to-peak noise floor of 250nVpp, in-band gain of 100dB. The proposed filtering amplifier could be used to measure low frequency noise of most kinds of low-noise operational amplifier and low-noise voltage reference.

**Key words:** Low Frequency Noise; Filtering Amplifier; Low-noise Amplifier

## 0 引 言

现代高性能传感器, 如陆地检波器、水听器中都会用到低噪声运算放大器和低噪声参考电压源, 这些器件的噪声性能对传感器整体性能起着决定性的作用。低频噪声是低噪声运算放大器和低噪声参考电压源的一项重要指标参数, 一般用 0.1Hz 至 10Hz 范围内的噪声电压峰峰值来表示低频噪声的大小<sup>[1]</sup>。对低频噪声的测量通常由芯片设计公司负责, 但是在设计指标较高的传感器或者自己设计低噪声器件时, 往往需要自己对器件的低频噪声进行测量。对低频噪声的测量具有挑战性, 因为通常待测器件的噪声非常小, 在微伏甚至纳伏量级, 需要将微小的噪声限定在 0.1Hz 至 10Hz 的频带范围内, 并且将其放大到示波器可以观察的量级。目前测量低频噪声没有统一方案, 低噪声运算放大器由于具有较大增益, 待测器件

本身可以作为测量放大器的一部分, 而低噪声参考电压源的低频噪声则需要独立于待测器件的电路测量<sup>[2]</sup>。

本文设计了一种 0.1Hz 至 10Hz 滤波放大器, 可以通用于低噪声放大器和低噪声参考电压源的低频噪声测量, 本论文第二节阐述滤波放大器的工作原理, 第三节详述滤波器的计算机辅助设计, 第四节给出滤波放大器的实测结果, 第五节是论文的总结。

## 1 滤波放大器工作原理

由于待测器件不包含在测试电路中, 本文提出的 0.1Hz 至 10Hz 噪声测试方案较传统方案相比具有通用性。图1是本文提出的测试方案示意图, 待测器件输出电压进入滤波放大器, 其 0.1Hz 至 10Hz 范围内的信号被放大, 其他信号被衰减, 滤波放大器输出进入示波器进行测量。待测器件一般有两种, 即低噪声运算放大器和低噪声参考电压源, 低噪声运算放大器连成图1(b)所示的反相放大器结构, 同相输入端接地, 其等效输入电压噪声被放大, 然后进入噪声放大器, 低噪声参考电压源的输出电压可直接进入滤波放大器。目前噪声最低的商业低噪

收稿日期: 2014-06-07; 修回日期: 2014-07-08

基金项目: 本文受国家科技重大专项子课题(2011ZX05008)资助

作者简介: 孙泉(1983-), 男, 云南, 彝族, 博士, 助理研究员, 研究方向为集成电路设计, 电子系统设计。

通讯作者: 孙 泉, qsun@mail.ioa.ac.cn。

声放大器0.1Hz至10Hz噪声为40nVpp<sup>[3]</sup>, 低噪声参考电压源0.1Hz至10Hz噪声为1000nVpp<sup>[4]</sup>, 为了在示波器中观察到这些噪声, 滤波放大器的带内增益至少为100dB。

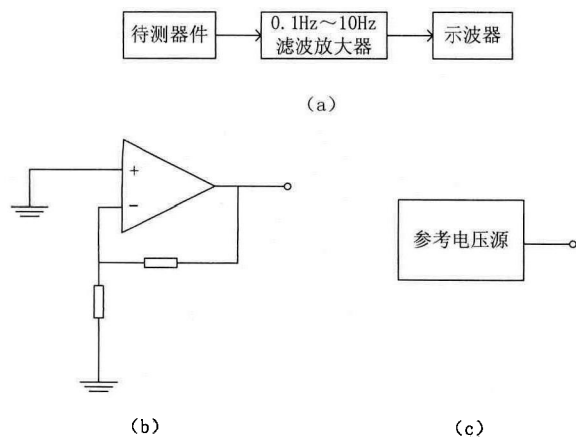


图 1 0.1Hz 至 10Hz 噪声测试方案  
Fig.1 Measurement scheme of 0.1Hz to 10Hz noise

本文设计的 0.1Hz 至 10Hz 滤波放大器电路图如图 2 所示, 一共分为五级。

第一级为一个二阶 RC 高通滤波器, 这一级是滤波放大器通用化的关键, 二阶 RC 高通滤波器滤除了输入信号中的直流分量, 避免在后面的电路中直流分量被放大引起放大器饱和, 该滤波器的截止频率约为 0.01Hz。

第二级是一个电压放大器, 增益为 60dB, 其作用是将噪声在这一级尽量放大。由于这是一个有源增益级, 这一级的噪声将会是整个系统噪声的主要噪声源, 在这一级中选择一个低噪声放大器特别关键, 放大器电压噪声会被直接放大 1000 倍。而放大器的电流噪声会通过电阻 R5 转换为电压噪声并被放大 1000 倍, 因此除了选择较小的 R5 的阻值, 高电流噪声放大器是不适用的。通常的低噪声放大器采用双极型工艺制造, 但是双极型工艺的放大器电流噪声很大, 第二级中的放大器应该选择一个 CMOS 输入或 JFET 输入放大器。

第三级是一个采用 Sallen-Key 技术的巴特沃茨二阶高通滤波器, 其截止频率为 0.1Hz, 增益为 20dB。这一级滤波器的设计主要考虑最大化通带平坦度, 采用 Sallen-Key 技术可以提高输入阻抗, 增加滤波器 Q 值并增加对无源器件容差的容忍度。

第四级是一个巴特沃茨二阶低通滤波器, 其增益为 20dB, 采用多路反馈技术。这一级滤波器的设计主要考虑最大化通带平坦度。

第五级是一个增益为 0dB 的巴特沃茨二阶低通滤波器, 它和第四级一个构成了 4 阶低通滤波器,

截止频率为 10Hz。这一级滤波器的设计主要考虑最大化通带平坦度。

第三、第四和第五级滤波器中放大器的选择原则主要是考虑不给滤波放大器整体增加噪声, 由于第二级的增益为 60dB, 后续电路中的噪声一般情况下不会影响整体噪声性能, 但是考虑到滤波器采用了阻值较大的电阻, 应该选用低输入偏置电流的放大器作为有源器件, 为了方便可以选择和第二级中一样的低噪声放大器, 如果考虑电路成本, 可以选择低输入偏置电流的正常功耗放大器。

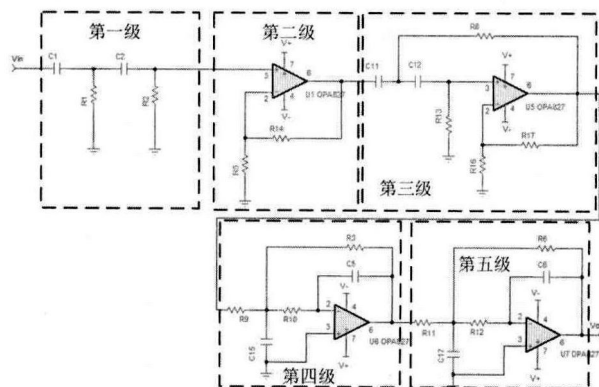


图 2 0.1Hz 至 10Hz 滤波放大器原理图  
Fig.2 Schematic of the proposed 0.1Hz to 10Hz filtering amplifier

为了精确测量待测器件的0.1Hz至10Hz噪声, 滤波放大器需要精确的截止频率和带内增益, 这是由较大的内部运算放大器增益和精确的无源器件参数保证的。为了保证截止频率和增益的精确, 内部运算放大器增益只是达到120dB, 无源器件参数要达到1%精度。

## 2 计算机辅助设计

计算机辅助设计用于在制版之前对设计进行评估, 确保电路的指标和设计目标一致。目前主要的芯片公司如模拟器件、德州仪器、凌特等都提供基于 spice 的免费版仿真器, 仿真中用到的有源器件宏模型可以下载, 这些宏模型可用于时域仿真、交流仿真、噪声仿真等常用仿真和分析。

对于本文设计的滤波放大器, 主要考虑截止频率、通带增益和噪声指标, 可以用交流传递函数仿真和噪声仿真来验证设计的参数。

### 2.1 交流传递函数仿真

对滤波放大器进行交流传递函数仿真, 结果如图 3 所示, 上图为幅频特性曲线, 下图为相频特性

曲线。

滤波放大器交流传递函数呈带通特性, 下限截止频率约为 0.1Hz, 上限截止频率约为 10Hz, 通带增益 100dB。滤波放大器中第一级二阶 RC 滤波器的截止频率为 0.01Hz, 因此在图 3 的幅频特性中看不到它的作用, 从 0.01Hz 到 0.1Hz 这段频率的斜率为 40dB/十倍频程, 10Hz 以上的斜率为 -80dB/十倍频程。

对噪声测量来说, 相位不重要, 因此图 3 下图中的相频特性曲线虽然有很大相移, 但不影响我们的应用。

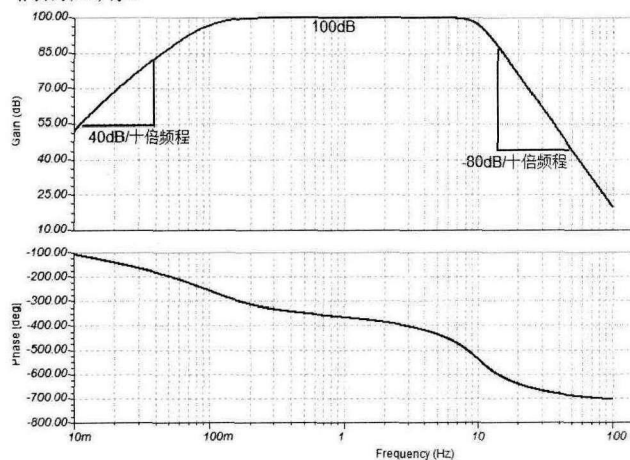


图 3 滤波放大器波特图  
Fig.3 Filtering amplifier bode plot

## 2.2 噪声仿真

对滤波放大器的积分噪声进行仿真, 结果如图 4 所示, 仿真时输入接地, 这样输出噪声就是滤波放大器本身的噪声。从图 4 中看出输出积分噪声从 0.1Hz 处开始上升, 到 10Hz 以后基本不随频率升高而升高, 可见只有通频带内的噪声进行了积分。

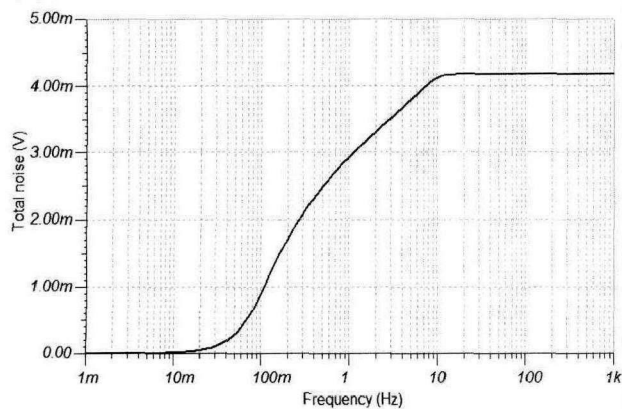


图 4 放大器输出积分噪声  
Fig.4 Output integrated noise of amplifier

由于滤波放大器的第二级有 60dB 增益, 输出噪声主要由这一级中放大器的等效输入噪声决定。仿真的 0.1Hz 至 10Hz 内的积分噪声有效值为

4.1mV, 转换为峰峰值乘以 6 倍<sup>[2]</sup>, 得到峰峰值为 24.6mV, 而第二级中放大器的 0.1Hz 至 10Hz 噪声峰峰值为 250nV, 考虑到滤波放大器 100dB 的增益, 仿真和已知数据基本吻合。

## 3 实测结果

图 2 中的电路方案在 PCB 上实现, PCB 如图 5 所示。核心放大器采用  $\pm 5V$  双电源供电, 板子上采用两个 LDO 芯片将输入电压转换为  $\pm 5V$  电源。

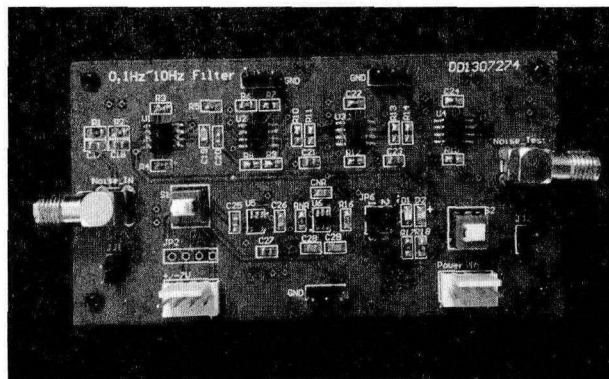


图 5 0.1Hz 至 10Hz 滤波放大器电路板  
Fig.5 The PCB of the filtering amplifier

电路噪声很容易受到电磁干扰的影响, 极低的电路噪声测试需要做好电磁屏蔽。电磁屏蔽的原则是采用密闭的导体作为屏蔽盒, 低噪声电路置于屏蔽盒之内, 屏蔽盒应尽量少开口, 除了无法避免的信号线和电源之外应该完全密闭。图 6 是本论文自制的屏蔽盒, 屏蔽盒只留下三个电源接口和一个信号接口。测试时测试板的地应该连接到屏蔽盒上。

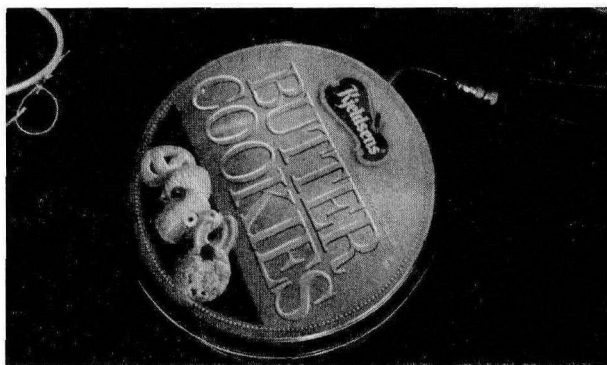


图 6 自制屏蔽盒  
Fig.6 Shielding box for low frequency noise measurement

图 7 是将滤波放大器输入接地时输出噪声峰峰值波形, 0.1Hz 至 10Hz 峰峰值为 250nV (放大器 100dB), 基本与设计结果相符。

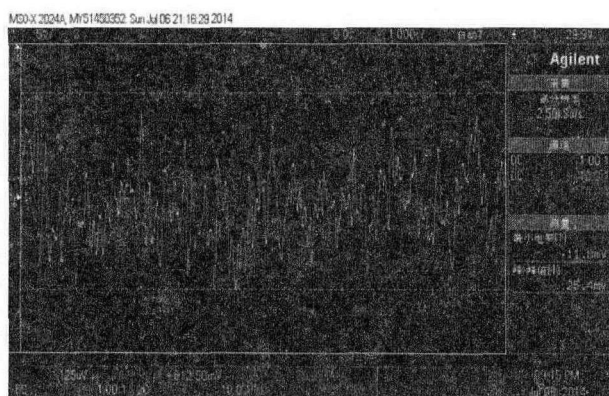


图 7 滤波放大器 0.1Hz 至 10Hz 噪声  
Fig.7 0.1Hz to 10Hz noise of the filtering amplifier

图 8 是利用本文设计的滤波放大器对一个低噪声参考电压进行测试的结果，峰峰值大约为 1.8uV。

## 4 结 论

本文设计了一种用于参考电压和放大器的低频噪声测试的滤波放大器，实现的滤波放大器指标为：通带频率 0.1Hz 到 10Hz、本底噪声峰峰值 250nVpp、通带增益 100dB，采用本文设计的滤波放大器和示波器可以实现大多数低噪声放大器和低噪声参考电压的低频噪声测量。

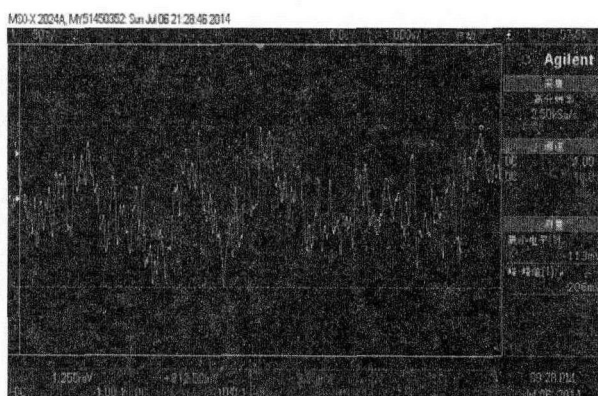


图 8 采用滤波放大器测试的参考电压 0.1Hz 至 10Hz 噪声  
Fig.8 Measurement result of 0.1Hz to 10Hz noise of a voltage reference with proposed filtering amplifier

## 参 考 文 献

- [1] 专著: Kay, Art. Operational Amplifier Noise: Techniques and Tips [M]. Elsevier Science, 2012.
- [2] 电子文献: Arthur Kay. 0.1Hz to 10Hz Noise Filter., Jun 2013. [www.ti.com](http://www.ti.com)
- [3] 电子文献: Analog Device. AD797 datasheet rev.1. 2013. [www.analog.com](http://www.analog.com)
- [4] 电子文献: Analog Device. ADR4520 datasheet rev.0. 2012. [www.analog.com](http://www.analog.com)