

Analog Engineer's Circuit

适用于音频 DAC 的有源滤波电路



Paul Frost

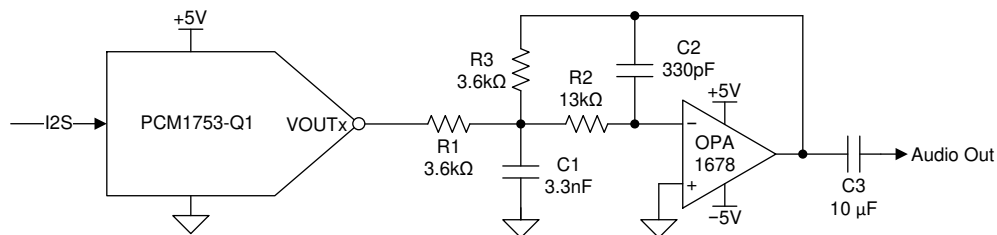
设计目标

滤波器特性

滤波器输入	截止频率	滤波器增益
4V _{pp} , 1.42V _{RMS}	23kHz 时为 -3dB	-1V/V, 0dB

设计说明

该电路显示了适用于音频数模转换器 (DAC) 应用的二阶有源滤波器的实现。在汽车音响主机、家庭影院条形音箱和 AV 接收器之类的应用中，在可闻范围内（约 20Hz 至 22kHz）最大程度地减小不良噪声至关重要。因此，许多 Δ - Σ 类型的音频 DAC 实现了噪声整形技术，这种技术可以强制可闻范围内的 DAC 输出侧在过采样功能所产生的噪声，该过程称为“噪声整形”，而实际噪声称为“带外噪音”。许多常见的音频 DAC（如 PCM1753-Q1）都具有噪声整形功能，可将带外噪声强制实现为大约数字源的采样率 f_s 50%。尽管该噪声通常被认为是不可闻的，但它可能对音频 DAC 输出端的放大器电路产生不利影响。例如，该带外噪声可能被在更高频率下工作的 D 类放大器混叠回到可闻范围内。此外，如果未实现滤波，那么该噪声也会经历与输出放大器相同的模拟增益。与简单的一阶 RC 滤波器相比，利用二阶有源滤波器设计可以实现更接近可闻频带的更高水平的噪声衰减。此外，由于滤波器中运算放大器的输出驱动能力，它允许系统音频输出的阻抗和电流驱动比音频 DAC 所能提供更低的阻抗和更强的电流驱动。



设计说明

1. 必须注意的是，设计的 f_c 针对至少为 44.1kHz 的采样率（这在音频系统中很常见）进行了优化。 f_c 应约为采样率的 50%，以衰减来自 Δ - Σ 调制器的带外噪声。如果使用了更高频率的采样率，请在频域中进一步向外移动截止频率，以允许来自音频 DAC 的更宽带宽。
2. 并非所有音频 DAC 都需要二阶有源滤波器。某些音频 DAC 具有不同的噪声整形架构，可使带外噪声更加远离可闻范围，这意味着简单的 RC 滤波器可能足以衰减不需要的噪声。
3. 大多数音频系统都具有直流阻断电容器，以允许音频输出以接地为参考中心。在该设计中，将阻断电容器直接放在 DAC 的输出端，但由于放大器也会有一些小的偏移，因此电容器通常直接放置在滤波器的输出端，或者放置在有源滤波器所连接的放大器或耳机驱动器的输入端。

设计步骤

1. 根据应用需求选择 DAC。考虑所需的信噪比 (SNR)、总谐波失真和噪声 (THD+N) 以及支持的 I2S 接口采样率。虽然大多数音频 DAC 支持 16kHz 至 192kHz 的采样率，但并非所有音频 DAC 都支持 384kHz 或 768kHz 等采样率。较高的采样率会导致噪声整形，从而使带外噪声进一步远离可闻范围，但并非所有音频源都能提供这些采样率。
2. 为设计选择的放大器 (OPA1678) 是 CMOS 输入放大器。与 JFET 类型的放大器相比，在较低的频率下，CMOS 输入放大器在放大器输入端具有较低的电流噪声。电流噪声会转换为输出端的电压噪声，因为滤波器具有输入大电阻值，因此选择具有低电流噪声的放大器非常重要。
3. 选择滤波器的电阻器和电容器值，从而在大约 23kHz 处具有一个 -3dB 点。可以使用以下公式计算电路的 f_C ：

$$f_C = \frac{1}{2\pi\sqrt{R2 \cdot R3 \cdot C1 \cdot C2}}$$

4. 用于滤波器的电容器必须为 COG/NP0 型陶瓷电容器。COG/NP0 型电容器具有较低的电容电压系数，这意味着组件的电容值受器件两端电压偏置的影响较小。由于电容器是滤波器性能的关键，因此应避免在信号路径中使用其他类型的陶瓷电容器。
5. 建议针对滤波器中的电阻元件使用薄膜电阻器。所有电阻都具有取决于电阻和温度的电压噪声，这很好理解，如下面的第一个公式所示。但电阻还具有电流噪声，该噪声取决于电阻器两端的电压、频率和常数 C (取决于电阻器的构成材料)，如下面的第二个公式所示。

$$S_T = 4kRT$$

其中

- k 是玻尔兹曼常数
- R 是电阻
- T 是温度

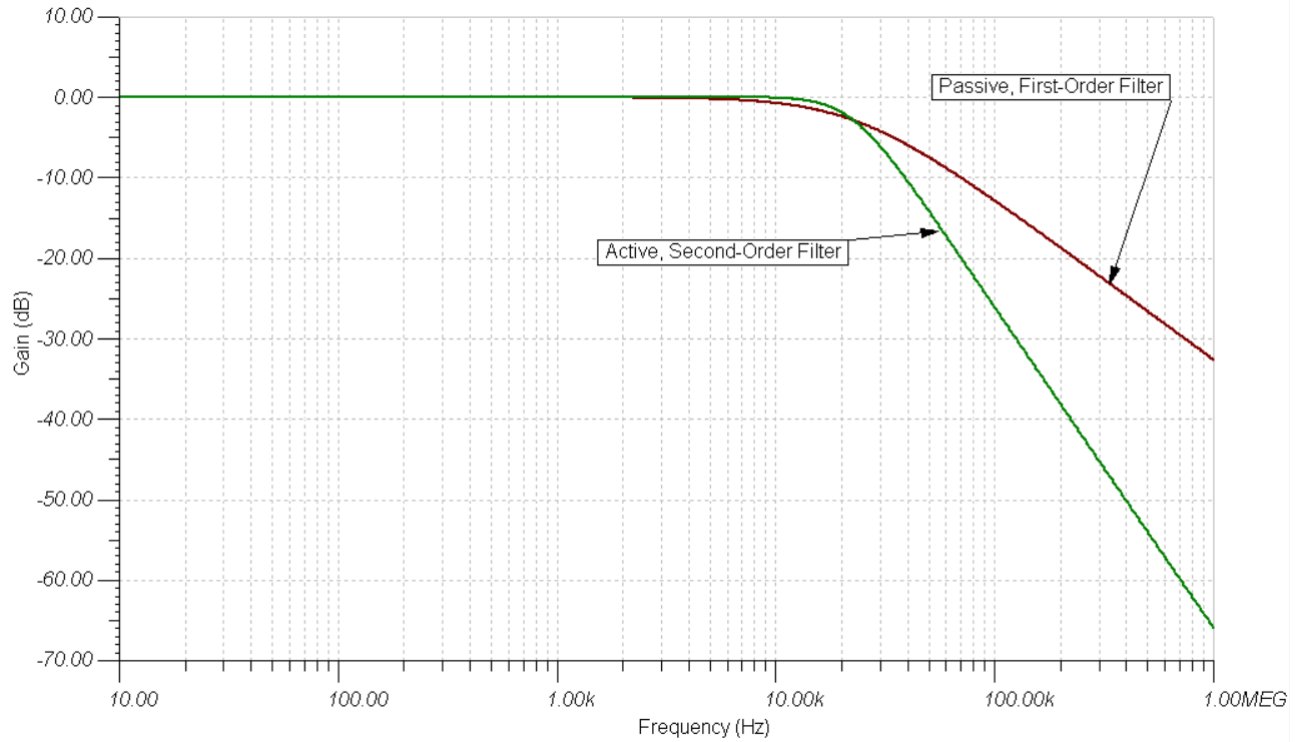
$$S_E = (C \times U^2) \div f$$

其中

- C 是源自电阻器材料的常数
- U 是电阻器两端的差分电压
- f 是频率

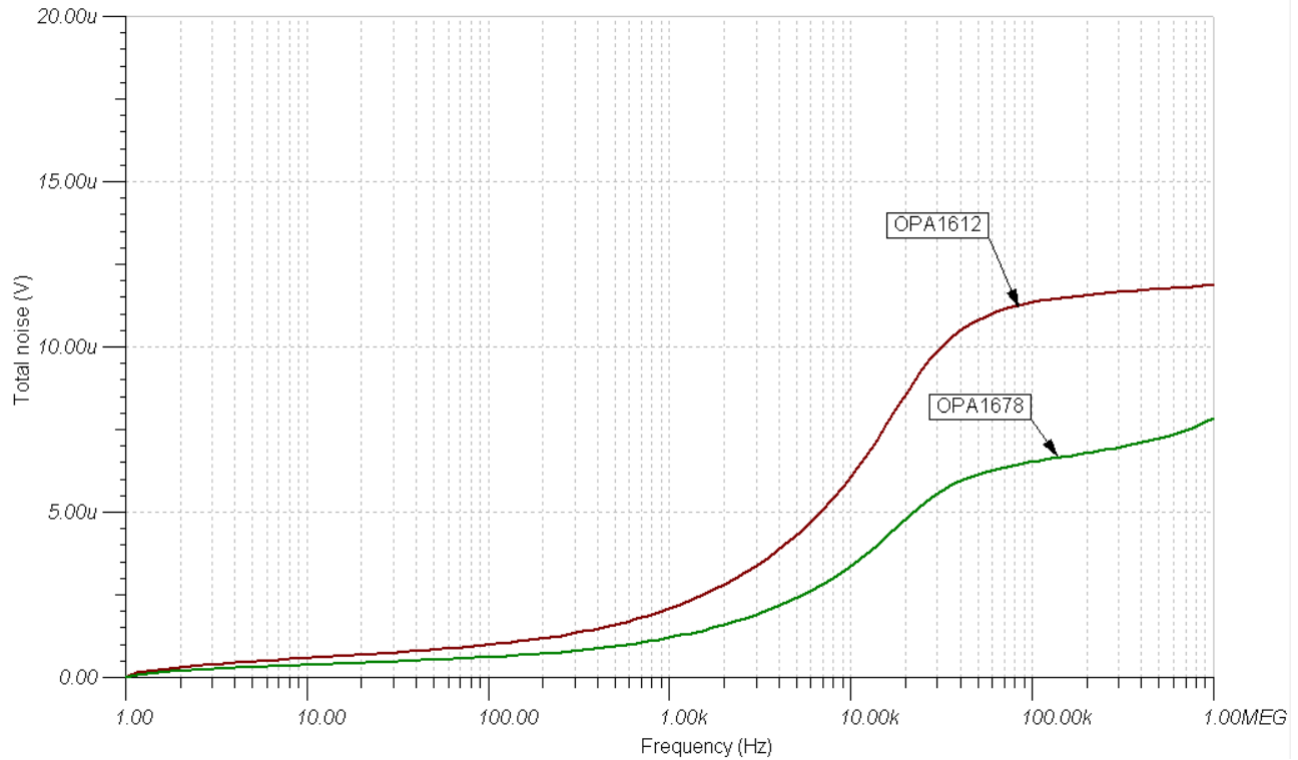
仿真滤波器响应

下图显示了二阶有源滤波器的仿真滤波器响应以及具有大致相同 f_c 的简单一阶 RC 滤波器的响应。请注意，一阶滤波器的滤波器滚降为 $-20\text{dB}/十倍频程$ ，而有源滤波器的滚降为 $-40\text{dB}/十倍频程$ 。



仿真噪声性能

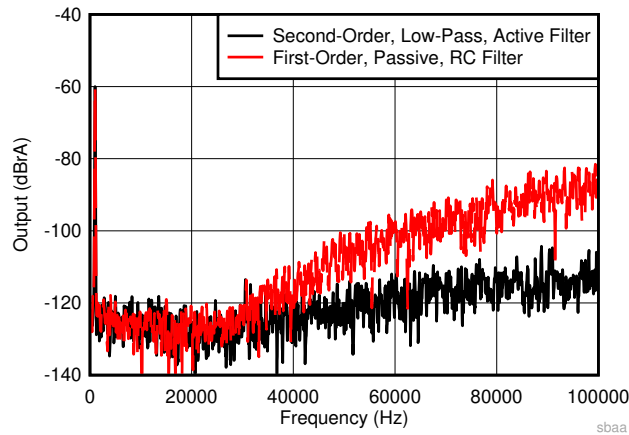
下图显示了电路的仿真总噪声成分（DAC 除外）。使用 OPA1678 和 OPA1612 线对其进行了仿真，前者在 1kHz 下具有 $4.5\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的噪声，后者在 1kHz 下具有 $1.1\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的噪声。结果表明，尽管 OPA1612 具有较低的电压噪声，但与 OPA1678 相比，系统中电流噪声的成分也会导致 OPA1612 中具有更大的总噪声。



测量的输出频谱

使用二阶有源滤波器和一阶 RC 滤波器在频域中测量了 DAC 的输出。DAC 的输出在 1kHz 频率下设置为 -60dB 满标度振幅，采样率为 48kHz。

下图显示，带外噪声在大约 24kHz 处开始增大，这是在进行 PCM1753-Q1 噪声整形情况下的预期结果。在 100kHz 下，二阶滤波器的输出比 RC 滤波器约低 20dB。



设计中采用的器件

器件	主要特性	链路	其他可能的器件
PCM1753-Q1 , PCM1754-Q1 (1)	24 位分辨率、106dB 典型 SNR、0.002% 典型 THD+N、单端、电压输出音频 DAC	汽车类 106dB SNR 立体声数模转换器 (DAC) (软件控制)	音频 DAC
OPA1678	适用于音频应用的低失真、低噪声、低输入电流双路放大器	单通道 450nA 毫微功耗精密运算放大器	音频运算放大器概述

(1) PCM1753 和 PCM1754 是相似的器件，区别仅在于前者通过 SPI 进行控制，而后者通过硬件进行控制。

设计参考资料

德州仪器 (TI), [SBAM410 电路源文件](#), 软件

其他链接：

德州仪器 (TI), [精密 DAC 学习中心](#), 产品系列概述

德州仪器 (TI), [设计高端音频系统](#), 视频

德州仪器 (TI), [音频 DAC](#), 产品系列概述

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2024，德州仪器 (TI) 公司