ANALOG DEVICES 超越一切可能™ | ADI AnalogDialogue

# 非常见问题第209期：如何组合使用低通滤波器和ADC驱动器获取20 V p-p信号

Philip Karantzalis，高级应用工程师
Frances De La Rama，产品应用工程师

## 问题：

为何要组合使用低通滤波器(LPF)和模数转换器(ADC)驱动器？

## 答案：

为了减小模拟信号链的尺寸，降低其成本，并提供ADC抗混叠保护（ADC采样频率周围频段中的ADC输入信号不受数字滤波器保护，必须由模拟低通滤波器(LPF)进行衰减）。20 V p-p LPF驱动器一般用于工业、科技和医疗(ISM)设备中，该设备必须使用具有更低满量程输入的高速ADC对传统的20 V p-p信号范围进行数字化处理。

## 简介

通过驱动ADC实现优化的混合信号性能，这是一大设计挑战。图1所示为标准的驱动器ADC电路。在ADC采集期间，采样电容将反冲RC滤波器中指数衰减的电压和电流。混合信号ADC驱动器电路的最佳性能受到多个变量影响。驱动器的建立时间、RC滤波器的时间常数、驱动阻抗，以及ADC采样电容的反冲电流在采样时间内相互作用，导致产生采样误差。采样误差随着ADC位数、输入频率和采样频率的增大而增大。

标准ADC驱动器具有大量实验数据样本，可用于可靠的设计流程。但缺乏实验数据来引导进行驱动ADC的低通滤波器设计。本文介绍集成模拟低通滤波、信号压缩和ADC驱动器的LPF驱动器电路（参见图2）。

表1列出了图2所示电路的性能变量。下方的实验室数据和分析旨在引导说明，给出图2所示的电路的时间和频率响应限值。

**表1. 图2所示电路的性能变量**

| LPF驱动器 | RC滤波器 | ADC |
|---|---|---|
| -3 dB带宽、阻带衰减、建立时间、噪声、THD | 电阻值、RC时间常数 | 采样频率、位数、采样时间、SNR、THD |

## 实验室数据和分析

信噪比(SNR)和总谐波失真(THD)是衡量系统动态性能的两个重要参数。能否实现最佳性能，取决于ADC和信号调理级的组合，在本文中，后者包括三阶低通滤波器和单端至差分转换器。图2所示的LPF驱动器电路的-3 dB带宽和建立时间会有所不同，有关SNR和THD的测量值，请参见表2至表5。本文将会探讨受测变量和这些变量对系统性能的影响。

### 低通滤波器-3 dB带宽

比较信号带宽为1 MHz与2 MHz和0.5 MHz时系统的性能。当-3 dB点分别为558 kHz、1 MHz、和2.3 MHz，其性能如表2所示。将截止频率降低至558 kHz，LPF噪声带宽随之降低，但SNR提高。将截止频率增大至1 MHz或2.3 MHz，LPF驱动器建立时间缩短，THD降低。

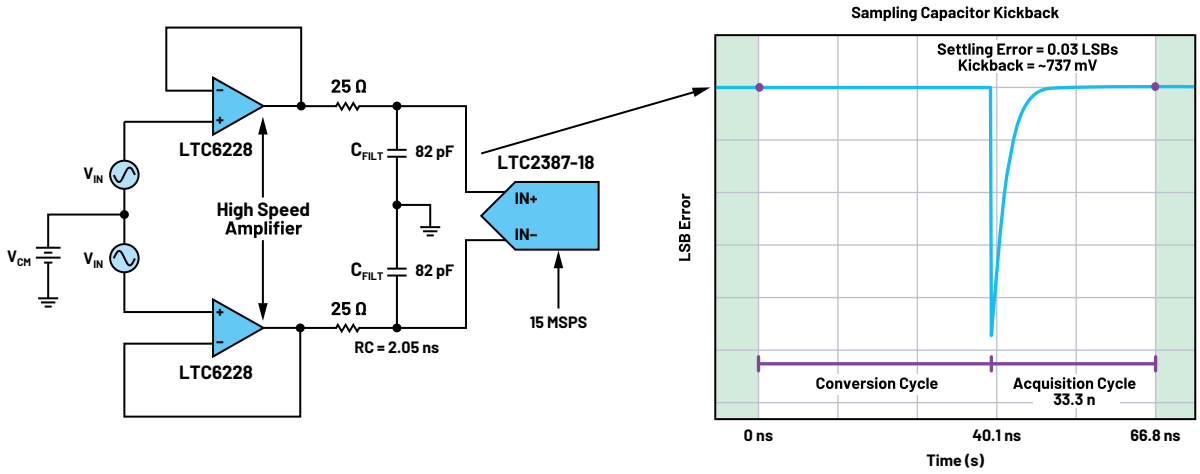



*图1. 标准ADC驱动器和RC滤波器。*

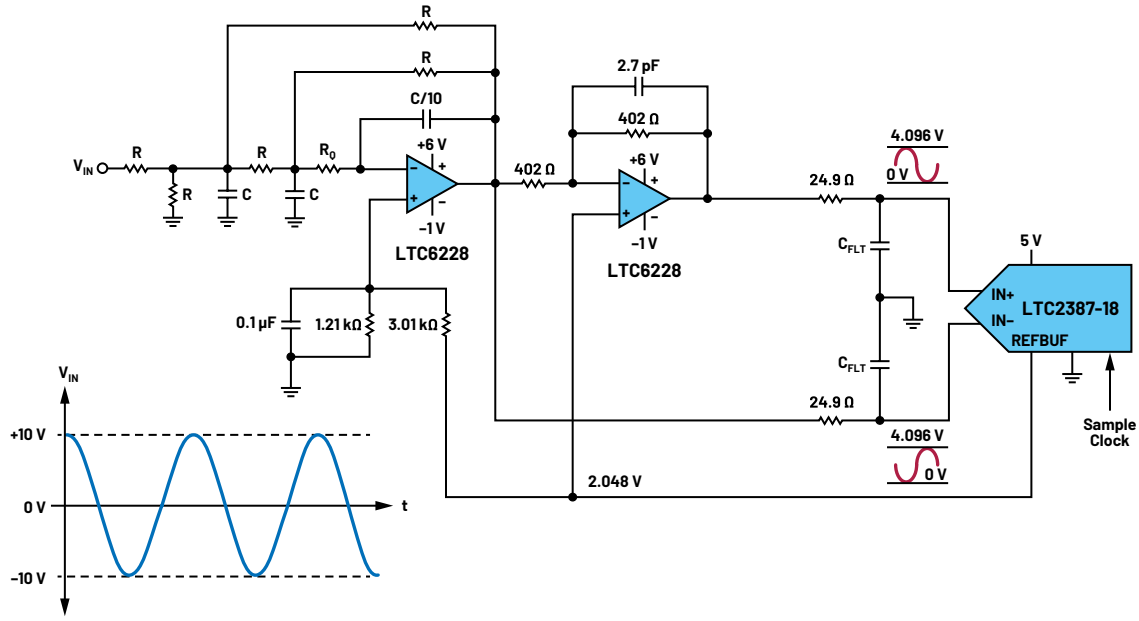



*图2. LPF驱动器和ADC电路。*

### 表2. R = 750 Ω时三种截止频率对应的LPF驱动器性能

| $V_{IN}$ (V p-p) | $F_{IN}$ (kHz) | -3 dB 频率 | RQ | LPF 驱动器C | LPF 驱动器R | SNR | THD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 20 | 2 | 558 kHz | 150 Ω | 2700 pF | 750 Ω | 90 dB | -98 dB |
| | | 1 MHz | | 1500 pF | | 90 dB | -103 dB |
| | | 2.21 MHz | | 680 pF | | 88 dB | -106 dB |

### 表3. R = 412 Ω时三种截止频率对应的LPF驱动器性能

| $V_{IN}$ (V p-p) | $F_{IN}$ (kHz) | -3 dB 频率 | RQ | LPF 驱动器C | LPF 驱动器R | SNR | THD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 20 | 2 | 580 kHz | 150 Ω | 4700 pF | 412 Ω | 91 dB | -98 dB |
| | | 1 MHz | | 2700 pF | | 90 dB | -97 dB |
| | | 2.25 MHz | | 1200 pF | | 89 dB | -99 dB |

更改图2所示的R或C可以更改截止频率。使用C电容来设置截止频率时，LPF驱动器THD更低；R电阻值降低，有助于略微改善SNR；如表3所示。

### 设置RQ电阻（图2）

LPF的RQ电阻可设置时间响应。RQ越高，过冲越大，建立时间越长。RQ越低，过冲越小，建立时间越短。图3显示使用150 Ω和75 Ω RQ电阻时对应的LPF瞬态响应。我们测试了使用不同的RQ时LPF驱动器的性能，测试结果如表4所示。

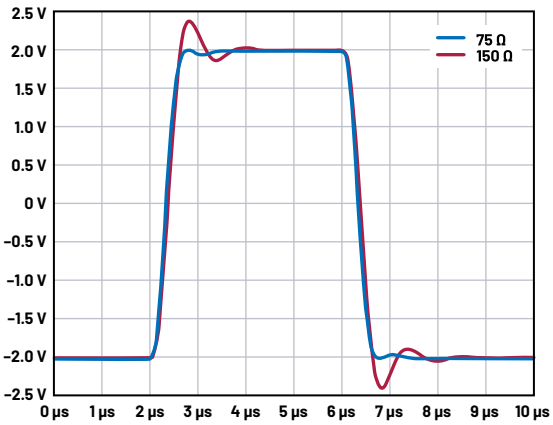



*图3. 不同的RQ值对应的过冲和建立时间。*

### 表4. 不同的RQ值对应的LPF驱动器性能

| $V_{IN}$ (V p-p) | 采样速率(MSPS) | -3 dB频率 | RQ | LPF驱动器C | LPF驱动器R | SNR | THD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 20 | 10 | 558 kHz | 150 Ω | 2700 pF | 750 Ω | 90 dB | -98 dB |
| | | | 75 Ω | | | 90 dB | -97 dB |
| | | 1 MHz | 150 Ω | 1500 pF | | 89 dB | -102 dB |
| | | | 75 Ω | | | 89 dB | -100 dB |
| | | 2.3 MHz | 150 Ω | 680 pF | | 88 dB | -106 dB |
| | | | 75 Ω | | | 88 dB | -106 dB |

根据实际测量得出的数据，使用75 Ω和150 Ω RQ对SNR和THD性能没有明显影响，只是影响过冲和建立时间的一个因素。

## ADC采样速率

表5中的数据显示，如果使用LTC2387-18，在10 MSPS时系统的THD性能低于15 MSPS时（在10 MSPS时，图2中的RC驱动器电容C3和C4的值为180 pF）。

注：在10 MSPS时，LTC2387-18和LTC2386-18的采样时间分别为61 ns和50 ns。

### 表5. 采样速率为10 MSPS和15 MSPS时的LPF驱动器性能

| $V_{IN}$ (V p-p) | 采样速率(MSPS) | -3 dB频率 | RQ | LPF驱动器C | LPF驱动器R | SNR | THD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 20 | 15 | 1 MHz | 150 Ω | 1500 pF | 750 Ω | 88 dB | -96 dB |
| | 10 | | | | | 89 dB | -101 dB |
| | 15 | 2.3 MHz | 75 Ω | 680 pF | | 88 dB | -93 dB |
| | 10 | | | | | 88 dB | -106 dB |

## RC滤波器

驱动器和ADC之间的RC滤波器用于限制带宽，确保实现宽带宽低噪声，且实现更优的信噪比。RC数值决定-3 dB截止频率。降低R有时可能导致响铃振荡和不稳定。增大R会增大采样误差。使用更低的C值，会导致更高的电荷反冲，但充电时间更快。使用更高的C值，可以降低电荷反冲，但充电时间会变慢。此外，设置RC值是确保在给定的采样时间内获取稳定样本的关键。使用数据手册的推荐值和精密ADC驱动器工具给出的建议值会是一个非常不错的起点。

精密ADC驱动器工具是一款综合工具，可以帮助预测在驱动器和ADC之间使用不同的RC值系统的性能。可以使用这款工具检查的参数包括电荷反冲、采样误差和采样时间。

使用25 Ω和180 pF RC实现更低的-3 dB截止频率时，输入信号建立时间和电荷反冲会受到影响。要实现更低的-3 dB截止频率，并确保输入信号在采集时间内正确建立，我们可能需要使用更低的采样速率。根据LTC2387-18数据手册，采样时间通常是周期时间减去39 ns。在15 MSPS使用LTC2387-18时，采样时间为27.67 ns，在10 MSPS使用此器件时，采样时间为61 ns。

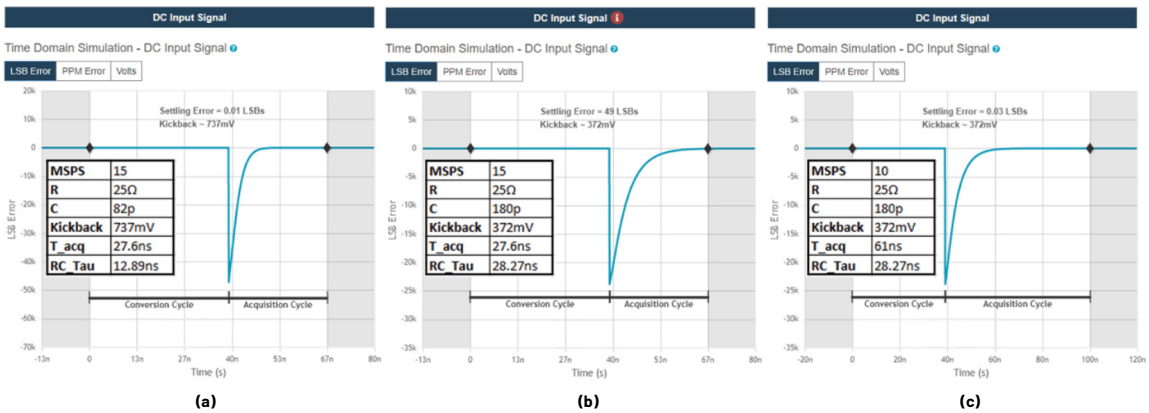



*图4. 使用不同采样速率时的电荷反冲、RC_Tau、采样时间：(a) 15 MSPS采样速率，LTC2387-18使用建议的RC值（25 Ω和82 pF），(b) 15 MSPS采样速率，LTC2386-18使用建议的RC值（25 Ω和180 pF），(c) 10 MSPS采样速率，LTC2386-18使用建议的RC值（25 Ω和180 pF）。*

借助精密ADC驱动器工具，图4a至4c汇总列出了使用不同的RC值时对应的反冲差值和RC时间常数(Tau)，以及采样速率为10 MSPS和15 MSPS时的采样时间。图4a显示LTC2387-18在15 MSPS采样速率下，使用推荐RC值（25 Ω和82 pF）时的建立响应。图4b显示在C为180 pF时，得出的RC时间常数更高，这导致在15 MSPS采样速率、27.6 ns采样时间内输入信号无法建立。图4c使用与图4b相同的RC值（25 Ω和180 pF），但在使用10 MSPS采样速率、采样时间增加至61 ns之后，信号能够建立。

### LPF驱动器电阻选择

可以通过更改R或C来实现LPF驱动器的-3 dB截止频率。电阻噪声是系统总噪声的组成部分。根据噪声计算公式，从理论上来说，降低电阻值可以降低电阻噪声。为了进行验证，我们尝试了两个不同的电阻值作为LPF驱动器R，分别是750 Ω和412 Ω。从理论来说，R更低时得出的SNR应该更佳，但从实际获得的数据来看，如表2和表3所示，SNR并无很大改善，相反，这会对THD性能产生更大影响。

LPF电阻（图1中的R）越低，放大器所需的电流越大。使用更低的电阻值时，运算放大器的输出电流高于最大线性驱动电流。

### 放大器驱动器选择

在选择要使用的ADC驱动器时，实现器件最佳性能所对应的规格至关重要。我们使用两个ADC驱动器来收集数据，分别是ADA4899-1和LTC6228。这些ADC驱动器非常适合用于驱动LTC2387-18，后者用于进行实验室测量。在选择ADC驱动器时考虑的一些规格包括带宽、电压噪声、谐波失真和电流驱动能力。根据已完成的测试，从THD和SNR这两个方面来看，ADA4899-1和LTC6228的性能差异可以忽略。

## LPF设计和应用指南

图5显示LPF电路。5个相同电阻（R1至R5）、1个用于调节LPF时间响应的电阻(RQ)、2个相同的接地电容（C1和C2），以及1个数值为接地电容1/10的反馈电容(C3)，这些器件构成了LPF无源组件（±1%电阻和±5%电容）。

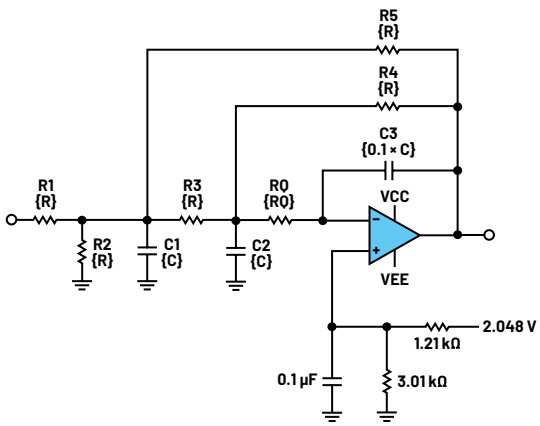



*图5. LPF电路。*

### 简单的LPF设计流程（注1）

R1至R5 = R，C1和C2 = C。

要尽量降低失真，电阻R1至R5的值必须在600 Ω至750 Ω范围内。

- 设置R = 750 Ω
- C = 1.5E9/$f_{3\,dB}$（最接近标准的5%电容pF），$f_{3\,dB}$为LPF -3 dB频率（注2）
- 例如：如果$f_{3\,dB}$为1 MHz，那么C = (1.5E9)/(1E6) = 1500 pF
- C3 = C/10
- RQ = R/5或R/10（注3和4）

**注1.** 简单的滤波器设计只需要一个计算器，无需使用非线性s域公式。

**注2.** 如果R = 619 Ω，那么C = 1.8E9/$f_{3\,dB}$，$f_{3\,dB}$为LPF -3 dB频率。

**注3.** RQ = R/5，用于实现最大阻带衰减，RQ = R/10，用于实现低过冲和快速建立时间。

采用RQ/5和RQ/10时，在10× $f_{-3\,dB}$时，阻带衰减分别为-70 dB和-62 dB。

**注4.** 如果RQ = R/10，-3 dB频率比RQ = R/5时低7%，也就是说，R1至R5等于RQ/5时R的0.93。

**注5.** LPF驱动器差分输出至ADC输入的PCB线路距离为1"或更低。

**注6.** LPF运算放大器的$V_{CC}$和$V_{EE}$分别为6 V和-1 V，输出线性电压摆幅为0 V至4.098 V。

## 结论

根据表2至表5的SNR和THD数据，我们可以了解图2所示电路的性能。通过增大电容来降低LPF带宽，这会增大SNR（降低LPF噪声带宽）。LPF带宽越低，失真程度越高（因为LPF建立时间比实现最低采样误差所需的时间长）。此外，如果LPF电阻值太低，THD会随之降低，因为LPF运算放大器需要驱动反馈电阻和反相运算放大器输入电阻（运算放大器输出电流更高时，失真程度降低）。

LTC2387-18 ADC采用10 MSPS采样频率时，LPF通带必须为1 MHz或高于1 MHz，以尽可能降低THD。将LPF设置为1 MHz，是对SNR、THD和足量ADC混叠抑制的任意妥协。

## 设计参考：ADI的精密ADC驱动器工具

### 精选器件

#### *运算放大器*

| 产品型号 | $V_{OS}$ (V)最大值 | $I_{BIAS}$ (A)最大值 | GBP (Hz)典型值 | $V_{NOISE}$ (V/√Hz)典型值 | THD 2 V p-p, RL = 1k | $V_S$范围最小值/最大值(V) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ADA4899-1 | 35 µV | -12 µA | 600 MHz | 1 nV/√Hz | -117 dBc (1 MHz) | ±5 V |
| LTC6228/ LTC6229 | 20 µV | -16 µA | 890 MHz | 0.88 nV/√Hz | -120 dBc (1 MHz) | ±5 V |

### 模数转换器

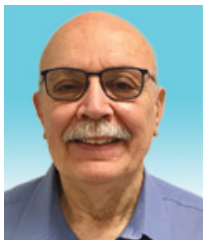
| 产品型号 | 分辨率（位） | 最大值$F_S$ | 输入类型（单端、差分） | $V_{IN}$范围（$V_{MIN}$/$V_{MAX}$） | SNR (dB) | INL (LSB) | 数据输出接口 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| LTC2387 | 18 | 15 MSPS | 单端、差分 | $-V_{REFBUF}$至$+V_{REFBUF}$ | 95.7 | ±0.6 | 串行LVDS接口 |


## 致谢

主要顾问：

混合信号部门的高级应用工程师Guy Hoover和Clarence Mayott。

精密ADC驱动器工具设计师Anne Mahaffey


## 作者简介

Philip Karantzalis自1973年就一直从事模拟信号电路和系统的测试和设计工作。他于1986年加入ADI公司信号调理部门，为数据采集、RF调制器、解调器和混频器、ADC和高精度测试系统提供基带信号设计。Philip目前担任ADI公司精密系统部的高级应用工程师。作为纽约市RCA电子学院的一名毕业生，曾在旧金山州立大学学习高等数学。

## 作者简介

Frances de la Rama于2007年加入ADI公司，担任技术员。2014年至2019年通过ADI的继续教育计划(CEP)攻读电子工程学位，他毕业于菲律宾科技大学达义分校。2019年成为菲律宾开发中心（PDC，前身为设计、布局和应用）的一员，隶属于ADI产品应用团队。在早期的工作中，他主要负责线性产品和解决方案，侧重于放大器领域；现在，他主要从事以ADBT100x为核心产品的电池化成和测试(BFT)工作。



ANALOG DEVICES
超越一切可能™

如需了解区域总部、销售和分销商，或联系客户服务和技术支持，请访问analog.com/cn/contact。

向我们的ADI技术专家提出棘手问题、浏览常见问题解答，或参与EngineerZone在线支持社区讨论。
请访问ez.analog.com/cn。

©2023 Analog Devices, Inc. 保留所有权利。
商标和注册商标属各自所有人所有。

“超越一切可能”是ADI公司的商标。

请访问analog.com/cn