

# 了解 ADC 信号链中放大器噪声对总噪声的贡献

作者: Umesh Jayamohan

## 简介

当模数转换器(ADC)的模拟输入被驱动至额定满量程输入电压时, ADC 提供最佳性能。但在许多应用中, 最大可用信号与额定电压不同, 可能需要调整。用于满足这一要求的器件之一是 *可变增益放大器(VGA)*。了解 VGA 如何影响 ADC 的性能, 将有助于优化整个信号链的性能。

本文分析一个采用双通道 16 位、125/105/80 MSPS、流水线 ADC **AD9268** 和超低失真中频 VGA **AD8375** 的电路中的噪声。信号链包括一个 VGA (在+6 dB 增益设置下使用)、一个五阶巴特沃兹低通滤波器 (-3 dB 滚降频率为 100 MHz) 和 ADC。本文将给出放大器和滤波器的噪声计算, 因为这些噪声决定 ADC 在目标频段内的动态性能。

## 问题

许多采用高速 ADC 的实际应用都需要某种驱动器、放大器或增益模块, 用以将输入信号缩放到满量程模拟输入范围<sup>1</sup>, 确保获得最佳 *信噪比(SNR)* 和 *无杂散动态范围(SFDR)*。此外, 差分放大器也可以将单端信号转换为差分信号来驱动 ADC。这些器件都是 *有源器件*, 因而会增加 ADC 前端的噪声。此噪声在工作带宽内的积分会降低转换性能。

针对具体应用, 适当 ADC 的选择取决于 *许多因素*, 包括:

- 模拟输入范围
- 输入频率/带宽
- 所需分辨率/SNR
- 所需 SFDR

某些应用同时要求高动态范围和高分辨率。AD9268 在 70 MHz 中频提供 78.2 dBFS (dB 相对于满量程) 的 SNR 和 88 dBc 的 SFDR, 非常适合此类应用。

在系统层面, ADC 前端可以使用放大器、变压器或巴伦, 但使用放大器的实现方案最为常见。使用放大器的原因可以是下面的一条或几条:

- 为输入信号提供增益以提高 ADC 分辨率。
- 缓冲或变换输入源与 ADC 之间的阻抗。
- 将单端输入信号转换为差分输出信号。

AD8375 VGA 可以用来将单端信号转换为差分信号, 同时它能在不同增益设置下保持高线性度和一致的噪声性能。这些特性使它成为在较高中频下驱动 ADC 的上好选择。糟糕的是, 信号链中的有源器件 (即放大器), 可能会限制 ADC 的性能。

## 示例

图 1 给出了噪声计算所用的电路拓扑结构。AD8375 具有高阻抗差分输出 (16 kΩ||0.8 pF)。放大器通过一个五阶低通抗混叠滤波器(AAF)与 ADC 接口, 该 AAF 具有 100 MHz 带宽和 150 Ω 输入/输出阻抗。图 1 所示电路的频率响应如图 2 所示。

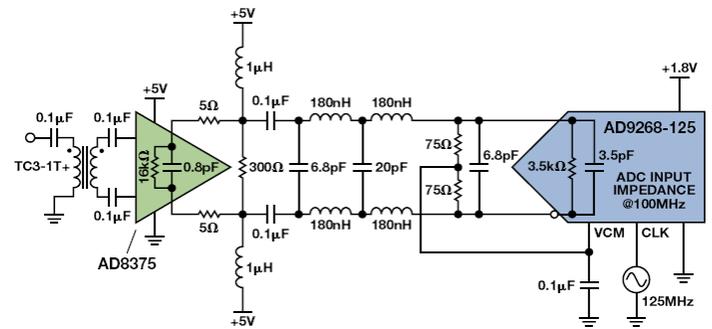


图 1. AD8375、AAF 和 AD9268 信号链

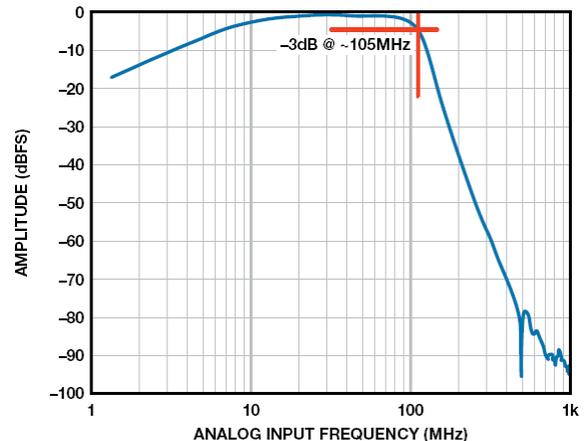


图 2. AD8375、AAF 和 AD9268 信号链的频率响应

## 性能

系统设计师不会期望驱动 ADC 输入端的放大器降低系统的总体动态性能, 但针对某一应用选择的驱动器和 ADC 组合, 并不意味着它能在另一应用中提供同样出色的性能。利用本文所述技术, 系统工程师可以在选择放大器之前估计预期的性能。

图3显示了两种不同的设置。图3(a)利用无源耦合连接转换器，是客户评估板的默认选项。无源前端网络利用变压器或巴伦，以及一个滚降频率约为200 MHz的无源低通滤波器，将单端信号转换为差分信号。图3(b)显示的可选放大器路径。这两种设置贡献的噪声比较如下。利用低中频(10 MHz)时的单音快速傅里叶变换(FFT)来计算放大器增加的噪声。

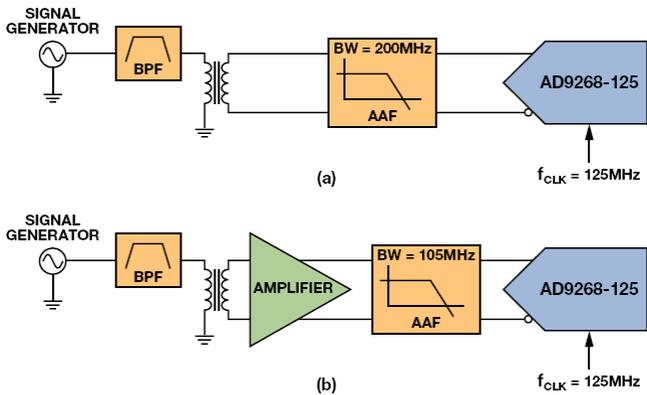


图3. 典型ADC前端：(a) 无源；(b) 有源

噪声分析通常使用两种技术，但每种技术都很麻烦。噪声谱密度(NSD)定义单位带宽的噪声功率。对于ADC，其单位为均方dBm/Hz或dBFS/Hz；对于放大器，其单位为均方根nV/√Hz。用放大器驱动ADC时，这种单位的不一致性构成系统噪声计算的障碍。

噪声系数(NF)是输入SNR与输出SNR的对数比，用dB表示。这一特性通常为RF工程师所用，在纯RF环境下很有意义，但在带ADC的信号链中使用NF计算，可能会导致令人误解的结果。<sup>2</sup>

另一种更有效的技术是对噪声密度进行“反归一化”处理，将其表示为均方根噪声电压，而不是均方电压。这种方法直截了当，能够对系统噪声进行清晰的分析，下面将予以说明。

图4和图5分别显示这两个前端的低频单音FFT。注意，无源前端的SNR为77.7-dBFS，而有源前端的SNR为72.5-dBFS，比ADC的预期性能低5.2 dBFS。

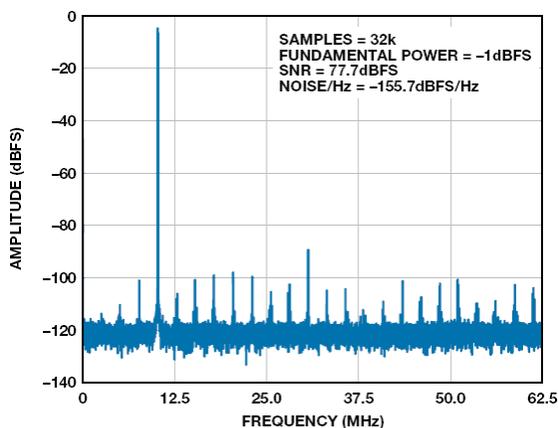


图4. 图3a电路10 MHz模拟输入音的FFT

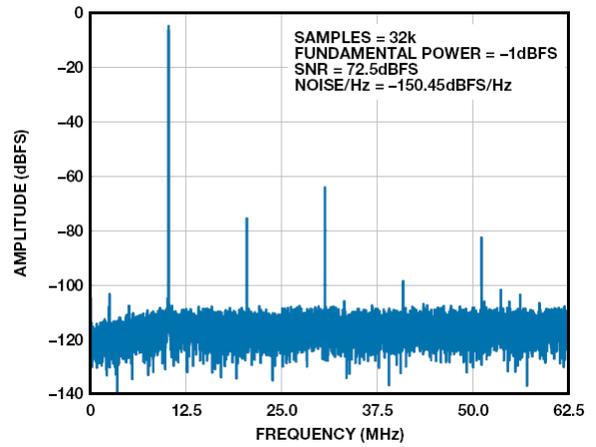


图5. 图3b电路10 MHz模拟输入音的FFT

### 分析

图3a与图3b所示设置的唯一不同是信号链中增加了放大器，因此可以放心地说，性能降低是由放大器的噪声引起的。下面的计算有助于了解放大器带来的噪声。

首先，按照数据手册的规定，使用转换器的满量程差分输入电压。将峰值电压除以 $2\sqrt{2}$ 得到均方根电压，即0.707 V rms。

$$V_{RMS} = \frac{V_{PP}}{2\sqrt{2}} \quad (1)$$

基于ADC在10 MHz时的典型SNR，转换器的噪声贡献为

$$SNR = 20 \log \left( \frac{V_{FS, RMS}}{V_{NOISE, RMS}} \right) \text{ dBFS} \quad (2)$$

$$V_{NOISE, RMS} = \frac{V_{FS, RMS}}{10^{\left(\frac{SNR}{20}\right)}} \quad (3)$$

$$V_{NOISE, ADC} = 92.2 \mu V_{RMS}$$

$V_{NOISE, ADC} = 92.2 \mu V$  rms，带放大器前端的系统SNR为72.5 dBFS，利用公式3计算系统噪声得到168  $\mu V$  rms。

$$V_{NOISE, TOTAL} = \frac{0.707}{10^{\left(\frac{72.5}{20}\right)}} = 168 \mu V_{RMS} \quad (4)$$

$$V_{NOISE, TOTAL} = \sqrt{(V_{NOISE, AMP})^2 + (V_{NOISE, ADC})^2} \quad (5)$$

$$V_{NOISE, AMP} = 140 \mu V_{RMS}$$

从公式 4 得到的系统噪声是 ADC 和 VGA 的合并噪声。放大器噪声可以利用公式 5 计算，结果为 140  $\mu\text{V rms}$ 。这表明，放大器噪声至少比 ADC 噪声大 50%，因此它是系统交流性能的限制因素。

注意，必须判断计算得到的  $V_{\text{NOISE, AMP}}$  值是否与放大器的数据手册一致。在 150  $\Omega$  差分输出阻抗下，额定噪声谱密度约为  $20 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

虽然数据手册声称 VGA 的噪声基本上不随增益而变化，但此噪声会随负载而变化，因此噪声谱密度应根据放大器输出驱动的总阻抗进行缩放。放大器的差分输出阻抗很大 ( $16 \text{ k}\Omega \parallel 0.8 \text{ pF}$ )，因此放大器看到的阻抗 (见图 1) 可以计算如下：

$$[10 \Omega + (300 \Omega \parallel 150 \Omega \parallel 3.5 \text{ k}\Omega)] = 107 \Omega.$$

利用此数值，本应用中 AD8375 的减额噪声谱密度可以通过公式 6 计算：

$$\text{AmplifierNSD} = 20 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}} \times \frac{107}{150} = 14.3 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}$$

$$V_{\text{NOISE, AMP}}(\text{Calculated}) = \text{NSD} \left( \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}} \right) \times \sqrt{\text{BW}} \times \text{ShapeFactor} \quad (6)$$

注意，利用实际滤波器计算系统噪声时，噪声带宽的形状与理想滤波器不同。频率响应的这种差别用“形状因子”这一术语来定义，反映滚降区中的噪声。形状因子取决于滤波器的阶数，是噪声带宽与 -3 dB 带宽的比值<sup>3</sup>。滤波器的极点越多，形状因子越接近 1。这一关系可从表 1 看出。

表 1. 系统阶数与形状因子的关系

系统阶数	形状因子
1	1.57
2	1.11
3	1.05
4	1.03
5	1.02

图 1 示例的形状因子为 1.02。利用公式 6 计算放大器注入的噪声：

$$V_{\text{NOISE, AMP}}(\text{Calculated}) = 14.3 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}} \times \sqrt{105 \text{ MHz}} \times 1.02 = 149 \mu\text{V}_{\text{RMS}}$$

$$V_{\text{NOISE, AMP}}(\text{Calculated}) = 149 \mu\text{V}_{\text{RMS}}$$

VGA 注入系统的这一估计噪声值与利用公式 5 算得的测量值非常吻合，证明由 AD8375 和 AD9268 组成的信号链的性能主要取决于放大器。

## 结束语

许多情况下，系统信号链需要一个放大器 (VGA 或增益模块) 来将满量程信号驱动到 ADC。系统设计师必须了解不同放大器选择导致的 ADC 性能降低情况。利用所选放大器和 ADC 进行设计之前，设计师可以利用本文所述的方法计算放大器的噪声分布，估计预定系统实现方案的预期动态性能 (通过 SNR 表示)。

## 参考文献

- <sup>1</sup>MT-006, *ADC Noise Figure—An Often Misunderstood and Misinterpreted Specification*.
- <sup>2</sup>*The Data Conversion Handbook*.
- <sup>3</sup>Reeder, Rob and Jim Caserta, “Ask The Application Engineer 36, Wideband A/D Converter Front-End Design Considerations II: Amplifier-or Transformer Drive for the ADC?” *Analog Dialogue* 41-02, 2007.

## 作者简介

Umesh Jayamohan [umesh.jayamohan@analog.com] 是 ADI 公司高速转换器部 (北卡罗来纳州格林斯博罗) 的一名应用工程师。Umesh 于 1998 年获得印度喀拉拉大学电气工程学士学位，于 2002 年获得美国亚利桑那州立大学电气工程硕士学位，担任设计和应用工程师已逾 7 年。

