

# 电压基准噪声对 ADC ENOB 和无噪声分辨率的影响

**Jackson Wightman**

Applications Engineer  
Voltage References

**Shridhar More**

Systems Manager  
Voltage References

## 引言

从温控器到飞行控制的诸多系统都使用模数转换器 (ADC) 来采集现实世界的模拟信号，这些信号将在数字域中进行处理，并根据数字结果采取必要的措施。每个 ADC 指定一定的位数来表示它可以产生的各种数字电平。对于给定的恒定 ADC 输入，由于典型信号链中的各种误差，ADC 的输出不是一个恒定的数字值。因此，为了更好地进行比较，并从采集的数据中提取最多信息，务必考虑信号链的有效位数 (ENOB) 或无噪声分辨率。更高的精度需要更高的 ENOB 和无噪声分辨率。

通常，系统的信噪比 (SNR)、总谐波失真 (THD) 和噪声在 ENOB 计算中起着重要作用。对于现场变送器或测试和测量应用等多个系统，直流输入信号的准确度和精度至关重要。因此，噪声规格变得极其关键。与 ADC 配合使用的电压基准是信号链中的关键元件，会影响精度和准确度。

## 电压基准对 ADC 噪声的影响

虽然可以通过滤波消除一些噪声，但您无法实际滤除低频下的噪声。在电压基准中，受所需的电阻/电容滤波器元件的尺寸影响，也无法在不对信号链性能产生重大影响的情况下滤除闪烁噪声（即 0.1Hz 至 10Hz 的噪声）。因此，您的系统中几乎始终存在噪声。

除了电压基准噪声之外，还会有来自 ADC 本身和 ADC 驱动器的噪声。这些元件中的每一个都会在生成数字信号的电路中产生噪声。图 1 为该电路的简化方框图。

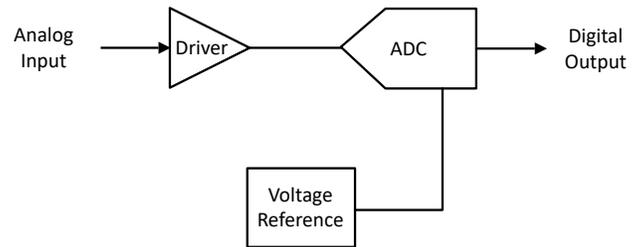


图 1. 具有外部电压基准的通用 ADC 电路配置。

方程式 1 将此电路的总噪声表示为：

$$\text{Total Noise} = \sqrt{\text{Noise}_{\text{Driver}}^2 + \text{Noise}_{\text{ADC}}^2 + \text{Noise}_{\text{VREF}}^2} \quad (1)$$

在确定系统的 ENOB 时，务必要知道电路中存在的噪声量。通常，选择低噪声器件对于低噪声设计至关重要。

在本文中，我不仅将重点介绍电压基准选择，还介绍可帮助您更大限度地提高 ADC 性能的其他数据处理选择。

## 电压基准对 THD 的影响

如果对电压基准引脚的重复采样，会导致出现只能间隔几纳秒的电流瞬变。但是，对于 ADC，为了避免出现较大的增益误差，外部基准必须在采样相位结束时稳定或再充电。降低采样速度可以解决这个问题，但这并非总是可行。通常，ADC 越精确，其基准输入所需的电流消耗就越大。如果电压基准带宽不够高或输出阻抗过高，将无法为 ADC 的基准输入充电。这会导致压降，从而导致增益误差和较低的 ENOB。

因此，有时需要在电压基准的外部使用高带宽、低输出阻抗缓冲器，以提高 ADC 的 THD 并满足有关失真和 ENOB 的数据表规格。一些 ADC 具有内部电压基准缓冲器，但并不

非所有 ADC 都具有。图 2 展示了在何处添加外部缓冲器来提高电路的 THD。

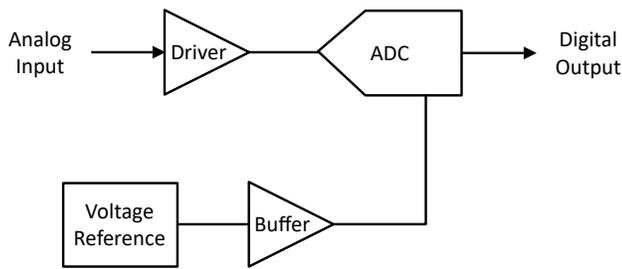


图 2. 具有外部电压基准和基准缓冲器的通用 ADC 电路配置。

## 电压基准噪声和 THD 对 ENOB 有何影响

ENOB 可测量电路的交流特性对 ADC 分辨率的影响。电路的噪声和 THD 由一个称为信噪比和失真 (SINAD) 的术语表示。SINAD 用一个数字表示这两个交流特性，如方程式 2 所示：

$$\text{SINAD (dB)} = -20 \log \sqrt{10^{-\text{SNR}/10} + 10^{\text{THD}/10}} \quad (2)$$

从方程式 2 可以看出，随着 SNR 的增加，SINAD 也会增大。因此，出现的噪声和失真越少，SINAD 就越好。使用 SINAD，您可以根据方程式 3 轻松得到 ADC 的 ENOB，尤其是因为：

$$\text{ENOB} = \frac{\text{SINAD} - 1.76\text{dB}}{6.02} \quad (3)$$

再回顾一下方程式 1，降低基准电压中的总噪声会降低电路中的总噪声，从而使 SNR 增大。随着 SNR 的增加，ENOB 也会增大。此外，在电压基准的输出端添加高带宽缓冲器也会使 ADC 的 THD 降低，从而使 ENOB 增大。

## 电压基准噪声对无噪声分辨率有何影响

虽然 ENOB 能很好地体现 ADC 输出的分辨率，但它不考虑直流性能。若要了解从直流输入到 ADC 的噪声对分辨率的影响，请考虑求出电路的无噪声分辨率。使用方程式 4，您可以通过观察 ADC 数字输出的最低有效位 (LSB) 数量中的代码扩展来计算无噪声分辨率，同时测量直流信号：

$$\text{Noise Free Resolution} = N - \log_2(\text{Code Spread}) \quad (4)$$

为了突出显示基准噪声对系统精度性能的影响，我们使用 REF70（具有 0.23ppm<sub>p-p</sub> 闪烁噪声）和 REF50（具有 3ppm<sub>p-p</sub> 闪烁噪声）对给定信号链进行了直流代码扩展测试。REF50 和 REF70 都是与高精度 ADC 搭配使用的高精度电压基准，并具有不同的直流特性。不过，在本练习中，目标完全是比较这些器件在信号链电路中的噪声性能。

本设计使用电池实现稳定的直流电源，其电压电平接近 ADS8900B 20 位 SAR ADC 的满标量程范围，该 ADC 以 20kSPS 的速率捕获数据。使用增益 = 1 的 OPA2320 来驱动 ADS8900B 输入。该 ADC 集成了基准缓冲器驱动器；因此，不需要可选的基准缓冲器。在电压基准的输出端放置一个简单的电阻电容低通滤波器可进一步降低电压基准的噪声。图 3 展示了用于这些测试的设置。

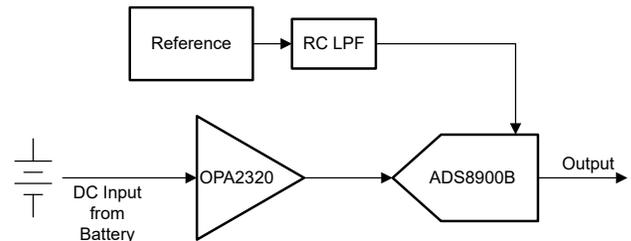


图 3. 用于以下无噪声分辨率测试的电路。

除电压基准之外的信号链元件也有闪烁噪声，这将是最终代码扩展的一部分。由于信号链仅在使用不同的基准时保持不变，因此只有电压基准噪声会对性能数据产生影响。

高精度系统采用数据处理技术来提高精度和整体分辨率。在本实验中，我们通过将输出乘以 16，将 ADS8900B 中的 20 位原始数据转换为 24 位长度。不同的有限脉冲响应 (FIR) 滤波器处理转换后的 24 位数据。如果输入值发生变化，FIR 滤波器易于实现且稳定得更快。输出数据速率保持在 20kSPS，但延迟由滤波器特性定义。

在 24 位级别，REF50 和 REF70 的噪声（以及精度）几乎相似，总噪声主要由信号链及其宽带噪声决定。平均代码值的差异是由基准电压差异造成的，这是一个精度规格，您可以通过校准来消除。这些结果如图 4 和图 5 所示。

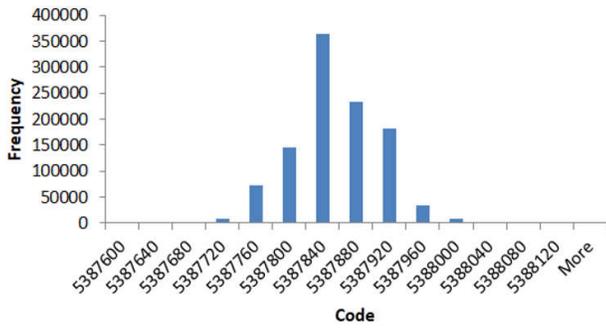


图 4. REF50 噪声 = 3ppm<sub>p-p</sub> 时的结果。

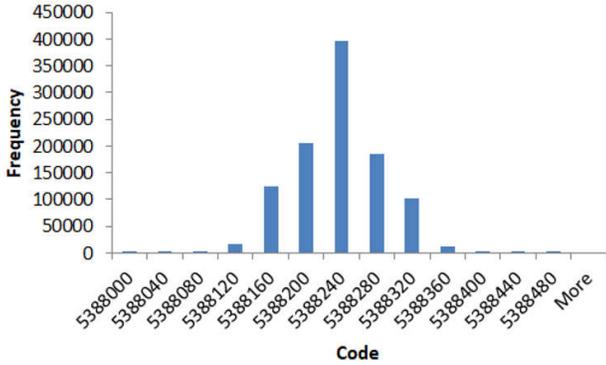


图 5. REF70 噪声 = 0.23ppm<sub>p-p</sub> 时的结果。

我们使用倍频程工具通过三种不同的数字滤波器对原始数据进行后处理：

- 1024 抽头移动平均滤波器。
- 801 抽头 17Hz 低通滤波器。
- 455 抽头 36Hz 低通滤波器。

图 6 展示了这些滤波器的滤波器响应。

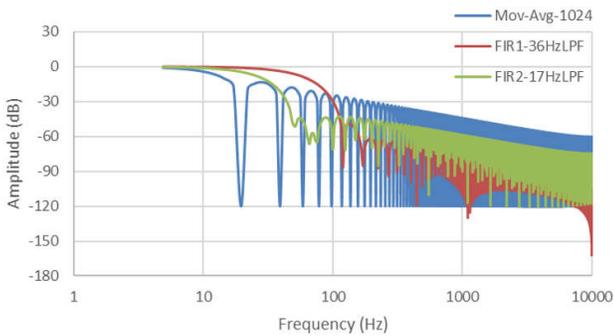


图 6. 数字滤波器响应。

通过方程式 4，您可以轻松地将 REF50 和 REF70 与每个滤波器配置文件对 ADC 分辨率的影响进行比较。表 1 总结了这些测试的结果。

图 7、图 8 和图 9 说明了数字滤波器对代码扩展的影响。

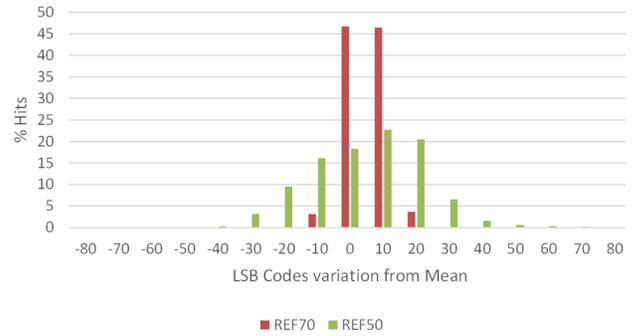


图 7. 1024 抽头滤波器直方图。

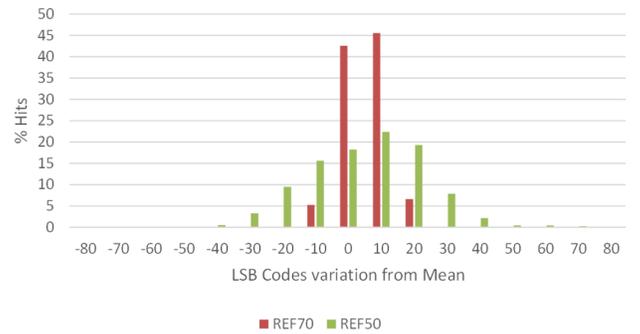


图 8. 455 抽头滤波器直方图。

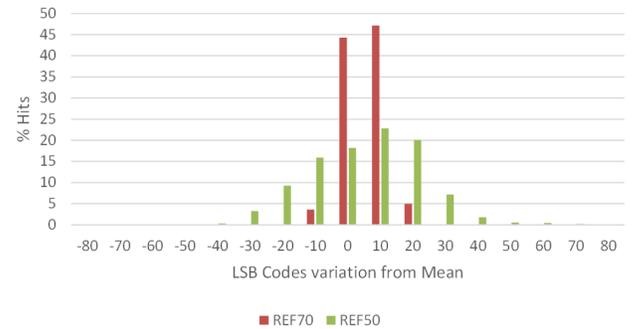


图 9. 801 抽头滤波器直方图。

数字滤波器类型	转角频率 (Hz)	抽头数	直流代码扩展 (LSB)	无噪声分辨率 (位)	直流代码扩展最低有效位	无噪声分辨率 (位)
			REF70 (24 位)		REF50 (24 位)	
无滤波器	不适用	0	448	15.1	496	15.0
1,024 抽头移动平均值	8	1,024	35	18.8	118	17.1
第 1 个 FIR	17	801	38	18.7	121	17.0
第 2 个 FIR	36	455	49	18.3	135	16.9

**表 1.** 使用不同滤波器配置文件和基准器件的直流代码扩展比较。

这种比较表明，在精度极高的应用中，REF70 在计算无噪声分辨率时的性能优于 REF50，这主要是由于该器件在闪烁噪声水平方面的差异所致。使用 REF70 时的代码扩展减少表明，其超低噪声可以在高精度应用中提供近 2 位分辨率的优势。此外，我们还可以看到，使用低噪声基准允许使用快速 455 抽头滤波器，同时仍能保持高无噪声分辨率。低电压基准闪烁噪声将导致更低的代码扩展，从而实现更高的无噪声分辨率。与 ENOB 一样，在为低无噪声分辨率设计信号链时，噪声也是一个重要的考虑因素。

## 结语

由于 ADC 用于数千种应用和技术，我们始终需要获得更高的精度和准确度。无论您是设计高度先进的 X 射线系统、非常精确的电池测试电路，还是任何其他创新，谨慎选择和实现电压基准对于提高 ADC 信号链的精度和准确度都至关重要。您将提高 ADC 的 ENOB 和无噪声分辨率，从而实现更先进和更多样化的信号链实现方案。

**重要声明:** 本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。建议客户在订购之前获取有关 TI 产品和服务的最新和完整信息。TI 对应用帮助、客户的应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不负任何责任。有关任何其它公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的认可、保证或授权。

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