

了解SINAD、ENOB、SNR、THD、 THD + N、SFDR，不在噪底中迷失

作者：Walt Kester

简介

用于定量表示ADC动态性能的常用指标有六个，分别是：SINAD(信纳比)、ENOB(有效位数)、SNR(信噪比)、THD(总谐波失真)、THD + N(总谐波失真加噪声)和SFDR(无杂散动态范围)。对于这些指标，虽然大部分ADC制造商采用相同的定义，但也存在一些例外。比较ADC时，这些指标非常重要，因此不仅要了解各指标反映哪一方面性能，而且要明白它们之间的关系。

有多种方法可以量化ADC的失真和噪声，但所有方法均基于一种使用一般化测试设置的FFT分析，例如图1所示的设置。

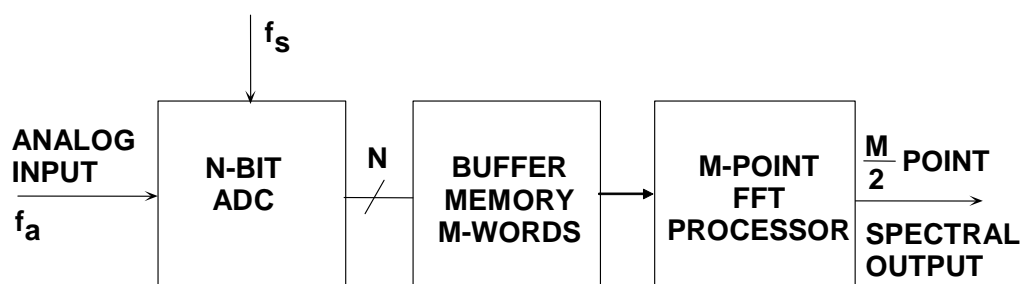


图1：用于对ADC输出进行FFT分析的一般化测试设置

FFT的频谱输出是频域中连续的M/2个点(M为FFT的大小，即缓冲存储器中存储的采样点数)。两点之间的间隔为 f_s/M ，覆盖的总频率范围为DC至 $f_s/2$ ，其中 f_s 为采样速率。各频率“仓”的宽度(有时也称为FFT的“分辨率”)为 f_s/M 。图2所示为使用ADI公司ADIsimADC®程序得到的一个理想12位ADC的FFT输出。注意，FFT的理论噪底等于理论SNR加上FFT“处理增益” $10 \times \log(M/2)$ 。必须记住，用于计算SNR的噪声值是分布于整个奈奎斯特带宽(DC至 $f_s/2$)的噪声，而FFT用作一个带宽为 f_s/M 的窄带频谱分析仪，它扫描整个频谱，其结果是将噪声下推一个与处理增益相等的量，该效应与模拟频谱分析仪的带宽窄化相同。

图2所示的FFT数据代表5次独立FFT的平均值。注意，求多次FFT的平均值不会影响平均噪声底，只会“熨平”各频率仓所含幅度的随机变化的作用。

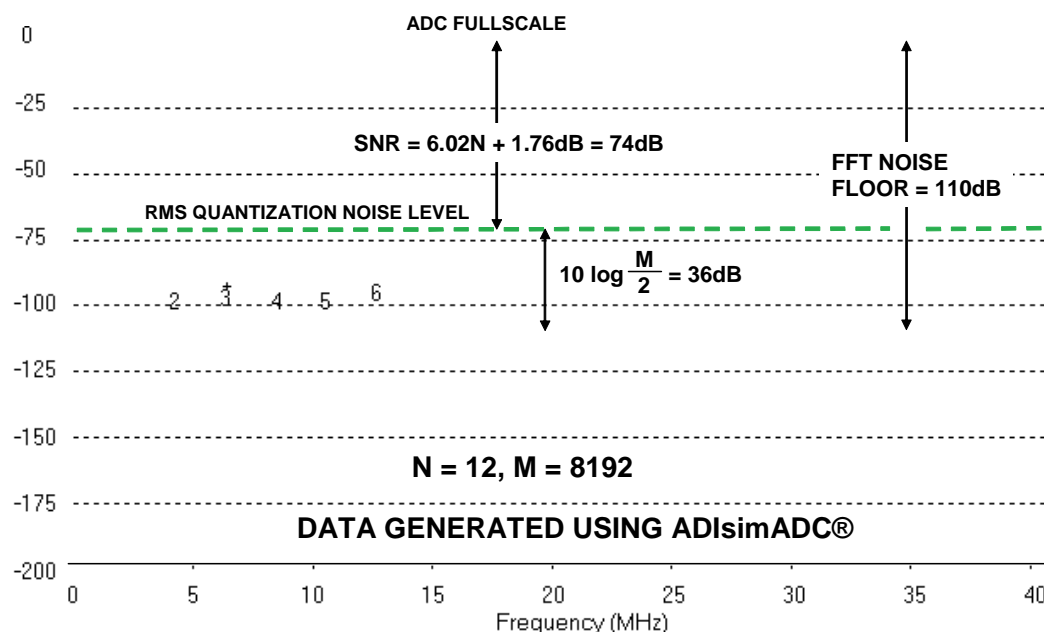
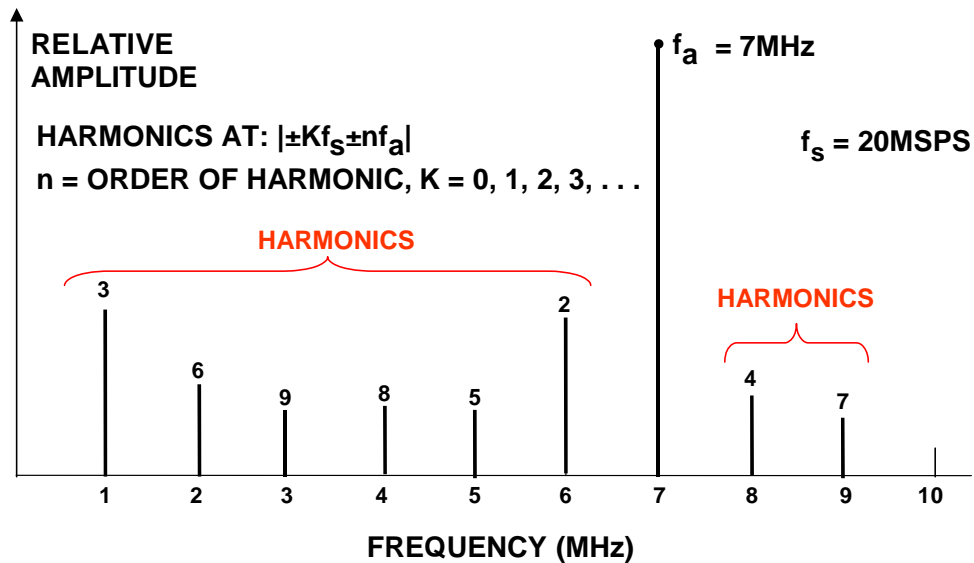


图2：理想12位ADC的FFT输出，输入 = 2.111MHz， $f_s = 82\text{MSPS}$ ，5次FFT的平均值， $M = 8192$ ，数据通过ADIsimADC®产生

FFT输出可以像模拟频谱分析仪一样用来测量各次谐波的幅度和数字化信号的噪声成分。输入信号的谐波可以通过其在频谱中的位置与其它失真积相区别。图3显示了一个以20 MSPS速率进行采样的7 MHz输入信号及前9次谐波的位置。 f_a 的混叠谐波处于 $|\pm Kf_s \pm nf_a|$ 的频率位置，其中n为谐波的次数， $K = 0, 1, 2, 3, \dots$ 。数据手册一般仅说明二次和三次谐波，因为这些谐波往往是最大的，但也有一些数据手册说明了最差谐波的值。

谐波失真通常用dBc(低于载波的分贝数)来表示，不过音频应用可能会用百分比来表示，它指的是信号均方根值与相关谐波的均方根值之比。谐波失真一般用接近满量程的输入信号(一般比满量程低0.5 - 1 dB以防止箝位)来规定，但也可以用任何电平来规定。对于远低于满量程的信号，转换器微分非线性(DNL)引起的其它失真积——非直接谐波——可能会限制性能。



**图3：失真积的位置：输入信号 = 7 MHz，
采样速率 = 20 MSPS**

总谐波失真(THD)指的是基波信号的均方根值与其谐波(一般仅前5次谐波比较重要)的和方根的平均值之比。ADC的THD虽然可以用任何电平来规定，但是一般也用接近满量程的输入信号来规定。

总谐波失真加噪声 (THD+N) 指的是基波信号的均方根值与其谐波加上所有噪声成分(直流除外)的和方根的平均值之比。必须说明噪声测量的带宽。对于FFT，带宽为DC至 $f_s/2$ 。如果测量带宽为DC至 $f_s/2$ (奈奎斯特带宽)，则THD + N等于下文所述的SINAD。不过应注意，在音频应用中，测量带宽不一定是奈奎斯特带宽。

无杂散动态范围 (SFDR) 指的是信号的均方根值与最差杂散信号(无论它位于频谱中何处)的均方根值之比。最差杂散可能是原始信号的谐波，也可能不是。在通信系统中，SFDR是一项重要指标，因为它代表了可以与大干扰信号(阻塞信号)相区别的最小信号值。SFDR可以相对于满量程(dBFS)或实际信号幅度(dBc)来规定。图4以图形化方式说明了SFDR的定义。

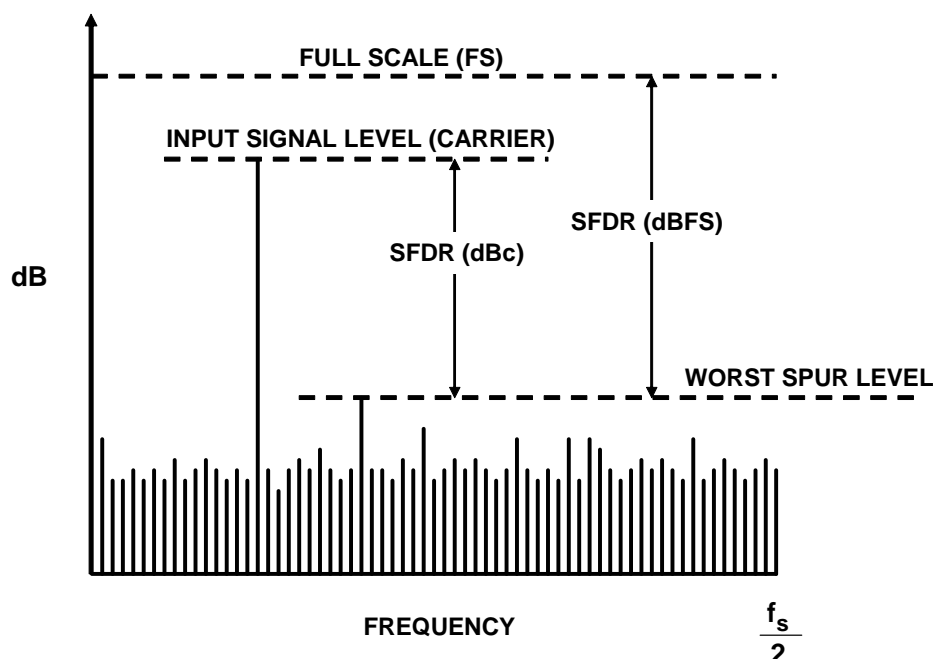


图4: 无杂散动态范围(SFDR)

利用ADI公司的ADIsimADC® ADC建模程序,可以在不同工作频率、电平和采样速率下评估各种高性能ADC。这些模型能够精确显示实际的性能,图5所示为14位80 MSPS ADC [AD9444](#)的典型FFT输出。注意,输入频率为95.111 MHz,采样过程将其混叠回15.111 MHz。输出还显示了前5次谐波的位置。本例中,所有谐波均为混叠。程序还能计算并列出重要的性能参数,如左边的数据栏所示。

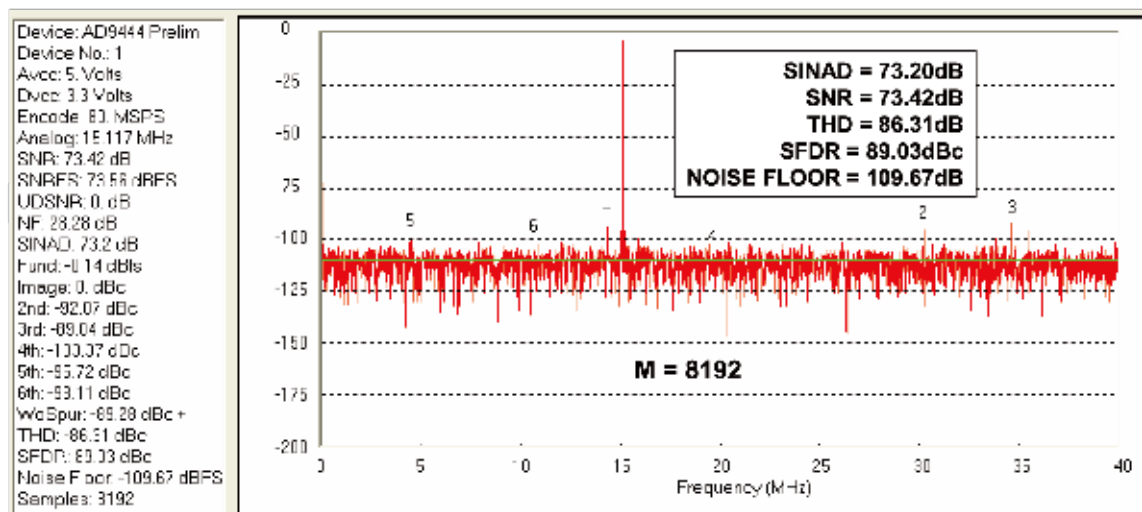


图5: 14位80MSPS ADC [AD9444](#), $f_{in} = 95.111\text{MHz}$, $f_s = 80\text{MSPS}$, 5次FFT的平均值, $M = 8192$, 数据通过ADIsimADC®产生

信纳比(SINAD)、信噪比(SNR)和有效位数(ENOB)

SINAD和SNR值得特别关注，因为ADC制造商之间就其确切含义仍然存在一些分歧。信纳比(SINAD或 $S/(N + D)$)指的是信号幅度均方根与所有其它频谱成分(包括谐波但不含直流)的和方根(rss)的平均值之比。SINAD很好地反映了ADC的整体动态性能，因为它包括所有构成噪声和失真的成分。SINAD曲线常常针对不同的输入幅度和频率而给出。对于既定的输入频率和幅度，如果SINAD和THD + N二者的噪声测量带宽相同(均为奈奎斯特带宽)，则二者的值相等。图6所示为12位65MSPS ADC [AD9226](#)的典型曲线。

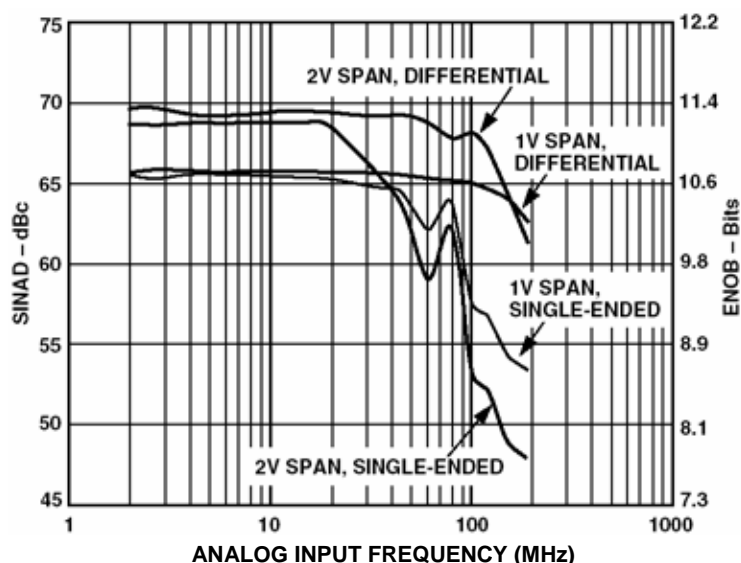


图6：12位65MSPS ADC [AD9226](#)在不同输入满量程范围下的SINAD和ENOB

SINAD曲线显示，ADC的交流性能因高频失真而下降；曲线通常针对远高于奈奎斯特频率的频率而绘制，以便能够评估欠采样应用中的性能。诸如此类的SINAD曲线对于评估ADC的动态性能非常有用。常常利用理想N位ADC的理论SNR计算公式($SNR = 6.02N + 1.76 \text{ dB}$)，将SINAD换算为有效位数(ENOB)。对上式求解N，并用SINAD的值代替SNR：

$$ENOB = \frac{SINAD - 1.76 \text{ dB}}{6.02} . \quad \text{等式1}$$

注意，等式1假设使用满量程输入信号。如果信号电平降低，则SINAD的值减小，ENOB也会减小。对于较低的信号幅度，在计算ENOB时有必要增加一个校正系数，如等式2所示：

$$\text{ENOB} = \frac{\text{SINAD}_{\text{MEASURED}} - 1.76 \text{ dB} + 20 \log \left(\frac{\text{Fullscale Amplitude}}{\text{Input Amplitude}} \right)}{6.02} \quad \text{等式2}$$

该校正系数本质上将ENOB值归一化到满量程，从而与实际信号幅度无关。

信噪比(SNR，有时也称为无谐波的SNR)与SINAD一样，也是根据FFT数据计算，不同的是计算剔除了信号谐波，仅留下噪声项。实际应用中，只需剔除主要的前5次谐波。SNR性能在高输入频率下会下降，但由于不包括谐波项，其下降速度一般不像SINAD那样快。

少数ADC数据手册有时会将SINAD与SNR混为一谈，因此在解读这些规格时必须小心，务必弄清制造商的确切含义。

SINAD、SNR和THD之间的数学关系

SINAD、SNR和THD之间存在数学关系(假设所有指标均在相同的输入信号幅度和频率下测量)。在下面的等式中，SNR、THD和SINAD用dB表示，根据实际的数值比S/N、S/D、S/(N+D)得出：

$$\text{SNR} = 20 \log \left(\frac{S}{N} \right), \quad \text{等式3}$$

$$\text{THD} = 20 \log \left(\frac{S}{D} \right), \quad \text{等式4}$$

$$\text{SINAD} = 20 \log \left(\frac{S}{N + D} \right). \quad \text{等式5}$$

从等式3、等式4和等式5可以求解数值比N/S、D/S和(N+D)/S：

$$\frac{N}{S} = 10^{-\text{SNR} / 20} \quad \text{等式6}$$

$$\frac{D}{S} = 10^{-\text{THD} / 20} \quad \text{等式7}$$

$$\frac{N+D}{S} = 10^{-\text{SINAD}/20} \quad \text{等式8}$$

由于等式6、等式7和等式8的分母均为S，因此N/S和D/S的和方根等于(N+D)/S：

$$\frac{N+D}{S} = \left[\left(\frac{N}{S} \right)^2 + \left(\frac{D}{S} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\left(10^{-\text{SNR}/20} \right)^2 + \left(10^{-\text{THD}/20} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad \text{等式9}$$

$$\frac{N+D}{S} = \left[10^{-\text{SNR}/10} + 10^{-\text{THD}/10} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad \text{等式10}$$

因此，S/(N+D)必须等于：

$$\frac{S}{N+D} = \left[10^{-\text{SNR}/10} + 10^{-\text{THD}/10} \right]^{-\frac{1}{2}}, \quad \text{等式11}$$

所以，

$$\text{SINAD} = 20 \log \left(\frac{S}{N+D} \right) = -10 \log \left[10^{-\text{SNR}/10} + 10^{-\text{THD}/10} \right]. \quad \text{等式12}$$

等式12给出了SINAD与SNR和THD的函数关系。

同样，如果我们知道SINAD和THD，则可以求解SNR：

$$\text{SNR} = 20 \log \left(\frac{S}{N} \right) = -10 \log \left[10^{-\text{SINAD}/10} - 10^{-\text{THD}/10} \right]. \quad \text{等式13}$$

同样，如果我们知道SINAD和SNR，则可以求解THD：

$$\text{THD} = 20 \log \left(\frac{S}{D} \right) = -10 \log \left[10^{-\text{SINAD}/10} - 10^{-\text{SNR}/10} \right]. \quad \text{等式14}$$

ADI公司网站上提供了一款易用的设计工具，它实现了等式12、13和14。必须再次强调，只有在相同的输入频率和幅度下测量这三个指标时，上述关系才成立。

结束语

SINAD、SNR、ENOB、THD、THD + N和SFDR是衡量ADC动态性能的常用指标，以制造商的数据手册为基础详细了解这些指标至关重要。本教程给出了各项指标的定义，并推导出了SINAD、SNR和THD之间的关系。

参考文献

1. Walt Kester, [*Analog-Digital Conversion*](#), Analog Devices, 2004, ISBN 0-916550-27-3, Chapter 6. Also available as [*The Data Conversion Handbook*](#), Elsevier/Newnes, 2005, ISBN 0-7506-7841-0, Chapter 2.
2. Hank Zumbahlen, *Basic Linear Design*, Analog Devices, 2006, ISBN: 0-915550-28-1. Also available as [*Linear Circuit Design Handbook*](#), Elsevier-Newnes, 2008, ISBN-10: 0750687037, ISBN-13: 978-0750687034. Chapter 6.

Copyright 2009, Analog Devices, Inc. All rights reserved. Analog Devices assumes no responsibility for customer product design or the use or application of customers' products or for any infringements of patents or rights of others which may result from Analog Devices assistance. All trademarks and logos are property of their respective holders. Information furnished by Analog Devices applications and development tools engineers is believed to be accurate and reliable, however no responsibility is assumed by Analog Devices regarding technical accuracy and topicality of the content provided in Analog Devices Tutorials.