**理解ADC中的ENOB(有效位数)：数字示波器动态性能的关键指标**

来源：[微波射频网](https://www.mwrf.net/" \t "_blank)

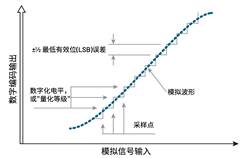
随着测量精度要求提升，有效位数（ENOB）已成为评估ADC、数字示波器真实性能的核心指标。ENOB由IEEE定义，综合了噪声、抖动、非线性失真等误差，反映设备在实际使用中的“有效分辨率”。

随着测量精度需求的不断提升，理解示波器或数字示波器对测量结果的影响变得极其复杂。有效位数(ENOB)是ADC、数字化仪和数字示波器的重要性能指标，它能够涵盖大部分由信号采集引起的误差。ENOB由IEEE定义，综合了噪声、抖动、非线性失真等误差，反映设备在实际使用中的“有效分辨率”。

有些模数转换器(ADC)或示波器厂商会着重宣传其产品的分辨率(Resolution)。分辨率是本底噪声的决定因素之一，因为模数转换器(ADC)无法测量到±½最低有效位(LSB)以内的变化。

**有效位数(ENOB)与分辨率的关系**

这种误差被称为量化噪声(QuantizationNoise)，它将信噪比限制为：SNR=6.02N+1.76dB其中，N=分辨率（比特数)。量化噪声正是ENOB概念的由来。ENOB定义为：测得的ADC或仪器性能等效于一个仅受量化噪声限制的理想ADC时的比特数。举例来说：一个标称12位的示波器若规格中写明ENOB=8位，那么它等效于一个理想的8位ADC。

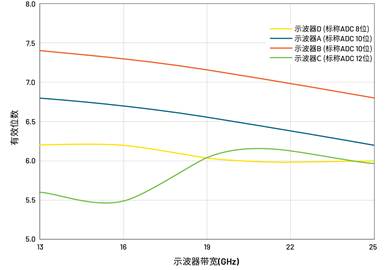


*图1–量化误差示意图*



*表1–数字示波器的±½LSB误差*

图2展示了目前市面上四款示波器的ENOB。可以得出几个重要结论：标称的ADC位数和ENOB(有效位)相差甚远。尤其是图中标称12位ADC和标称8位ADC的两款示波器：在高频下它们的ENOB相当，但在低频段，8位示波器的ENOB甚至要明显好于12位的示波器，这种反差让人惊讶。



*图2–高带宽示波器的ENOB比较*

这四款仪器中，只有两款的ENOB接近8位，才能真正发挥优秀的量化噪声性能。如果图中性能最佳的10位示波器，其ADC位数降低为8位（保持系统其它部分不变），其在13GHZ时的ENOB，仅从7.4位降低到7.1位。同样的假设下，另一款10位的示波器在13GHZ时的ENOB，也仅仅是从6.8位降低到6.7位。另一方面，标称12位的示波器在大部分频段上的ENOB并不比8位示波器更好。可见，ADC的名义上较高的分辨率，并不见得可以转化为有效位数(ENOB)的明显优势，或者说带来更好的测量性能。

理解ENOB的意义在自动化测试中也很重要。如果一个标称10位或12位的示波器，甚至都不能提供7位以上的ENOB，那么根本就没有必要浪费大量时间和硬盘空间，来传输和存储16位数据(采样数据用字节的方式存储，超过8位的ADC数据会占用2个字节，即16比特)。付出的大量时间和存储成本，而对测量精度的提升微乎其微，得不偿失。

**有效位数(ENOB)的推导**

数字示波器器性能下降通常表现为数字化信号上的噪声水平增加。这里的“噪声”是指输入信号与数字化输出之间的任意随机或伪随机误差。数字化信号上的这种噪声可通过信噪比(SNR)来表示：

https://www.mwrf.net/uploadfile/2025/1009/20251009172827285.png

其中，rms\_signal是数字化信号的均方根值，rms\_error是噪声误差的均方根值。与有效比特(EB)之间的关系可以表示为:

https://www.mwrf.net/uploadfile/2025/1009/20251009172827693.png

其中，A是输入信号的幅度，而FS是ADC输入的满量程范围:

https://www.mwrf.net/uploadfile/2025/1009/20251009172827991.png

其中N是数字示波器的标称(静态)分辨率，和

https://www.mwrf.net/uploadfile/2025/1009/20251009172827382.png

需要注意的是：所有这些公式都基于数字化过程中产生的噪声或误差水平。在公式(3)中，N位数字示波器的最小rms误差为理想量化误差(此时的ENOB等于N)。公式(2)与(3)均由IEEE数字化波形记录仪标准(IEEEStd.1057)定义。公式(4)是公式(3)的一种替代形式。它假设理想量化误差在一个最低有效位（LSB）峰-峰范围内均匀分布，因此理想量化误差项可替换为FS/(2N√12)，其中FS为数字示波器的满量程输入范围。

另一个需要注意的重要点是：这些公式均基于输入信号幅度正好等于ADC的满量程范围(FS)。在实际测试中，可能使用低于满量程的测试信号(例如50%或90%满量程)。这会导致ENOB的计算结果，比真实使用场景下要更好一些。因此，任何ENOB规格或测试结果的比较，都必须考虑测试信号的幅度和频率。

**数字化过程中的误差来源**

与数字化相关的噪声或误差可能来自多种来源。即便在一个理想的数字示波器中，仍然存在由量化带来的最低噪声或误差。这种“量化误差”大小约为±½LSB（最低有效位）。

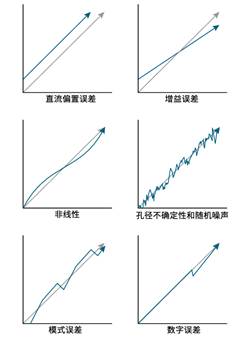
真实的数字示波器还会叠加其他误差，主要类别及影响如下：

▪  常见模拟相关误差：直流偏置（含交流偏置 / 模式误差）、增益误差（直流和交流）、非线性（模拟部分）、非单调性（数字部分）、相位误差、随机噪声等，这些误差可能出现在从模拟信号输入到数字化输出的任意波形捕获环节，属于放大器或模拟网络中的经典误差。

▪  采样相关误差：孔径不确定性（采样时刻抖动）和频率（时基）不准确性是与采样相关的特有误差。孔径不确定性会导致幅度误差，误差大小与信号斜率正相关，信号频率越高、斜率越陡，相同抖动下幅度误差越大，进而降低信噪比（SNR）和有效位数（ENOB）；时基不准确性则影响采样的时间精度。

▪  其他误差：还包括数字误差（如亚稳态导致的数据丢失、缺码）、触发抖动等。

除去直流偏置和增益误差外，ENOB能够将这些误差汇总为一个综合的优值指标。

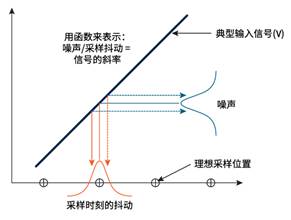


*图 3 – 与非理想数字化相关的误差*

图3展示了一些最基本的误差类别，帮助直观理解其影响。许多数字示波器中遇到的误差，实际上是任何放大器或模拟网络中都会出现的经典误差类型。例如：直流偏置、增益误差、相位误差、非线性和随机噪声，都可能出现在波形捕获过程中的任意环节-从模拟波形输入到数字化波形输出。

另一方面，孔径不确定性和时基不准确性是波形数字化过程中与采样相关的现象。图4展示了孔径不确定性的基本概念。

从图 4 可以看出，孔径不确定性会导致幅度误差，并且误差大小取决于信号斜率。信号斜率越陡，同样时间抖动导致的误差幅度就越大。孔径不确定性只是在更高信号频率或更大斜率下导致有效位数下降的诸多原因之一。然而，它是一个有用且直观的例子，有助于我们理解与输入信号频率和幅度相关的问题。



*图 4 – 孔径不确定性（采样抖动）*

为了更深入理解孔径不确定性的影响，假设信号是正弦波，示波器在正弦波的过零点位置进行采样：对于低频正弦波，过零点的斜率较小，因此孔径不确定性带来的误差也较小。随着正弦波频率的增加，过零点的斜率变大。结果是：在相同的孔径不确定性或抖动下，产生的幅度误差更大。

更大的误差意味着更低的信噪比（SNR），以及有效位数（ENOB）的下降。换句话说，随着频率升高，数字示波器性能下降。这可以通过以下公式表示：

https://www.mwrf.net/uploadfile/2025/1009/20251009172827692.png

当信号幅度低于满量程时，正弦波过零点斜率减小，孔径不确定性带来的幅度误差会减少，ENOB 会相应提高。因此，ENOB 不仅取决于信号频率，还与测试波形幅度相关，对比 ENOB 需明确输入波形幅度（通常为满量程的 50% 或 90%）及频率。此外，输入放大器滚降、采集后滤波等处理可能降低示波器内部信号幅度，导致 ENOB 规格看似优于实际测试值。

**有效位数的测量过程**

有效位数测量无需逐一区分误差源，而是通过直接测量系统整体性能来计算，具体流程和注意事项如下：

**核心思路**：给定理想输入信号，测量数字化系统引入的总体误差，先确定系统信噪比（SNR），再依据相关公式计算 ENOB，以此作为不同系统性能比较的直观通用优值指标。

**基本测试流程**

▪  信号输入：向示波器输入已知高质量正弦波（易产生且易表征），要求正弦波发生器性能显著优于被测示波器（最好高 10dB 以上），必要时加滤波器抑制信号源谐波，避免其误差干扰测量。

▪  波形分析：用计算机分析数字化波形，先构建理想正弦波模型（公式：A・sin (2πft+Θ)+C，其中 A 为幅度、f 为频率、Θ 为相位、t 为时间、C 为直流偏置），通过软件算法拟合数字化波形得到该模型，此模型视为示波器输入端模拟信号描述（直流偏置、增益、相位、频率误差未包含在内，需单独测试）。

▪  误差计算：模拟理想 N 位示波器对输入信号的输出，计算理想正弦波与理想数字化结果的差异，其均方根值即为理想量化误差，用于后续 ENOB 计算。

ENOB 汇总了数字化系统的多个关键误差，形成一个简单直观的指标。但它依赖于输入信号占满量程的百分比。测试应尽量在接近满量程（通常为 90%）下进行，同时避免因噪声或带宽造成削顶。使用较低幅度的信号(相较于满刻度量程)，会降低采样抖动和谐波失真对ENOB 的影响；但弊大于利，实际操作中仍然要尽量避免。

选择测试信号频率时要避免与采样率产生谐波关系，否则可能出现拍频干扰结果。因此，测试信号最好与采样时钟保持异步。

触发也是一个需要注意的环节：一般应使用单次采样模式捕获信号，以消除触发抖动对 ENOB 测试的影响，集中评估数字示波器本身性能。

高带宽仪器常需重复触发和等效时间采样构建完整波形，会引入额外触发抖动与长期漂移，增加噪声，此时可能用信号平均降低噪声以提高 ENOB。若使用信号平均，需注明平均次数；且采用信号平均的示波器与单次采样的示波器，若工作模式不同，二者 ENOB 比较通常无效。此外，部分示波器通过信号平均处理，可能使 ENOB 高于标称 ADC 位数（如 8 位示波器表现得像 10-11 位），但会丢失原始波形非重复性细节。