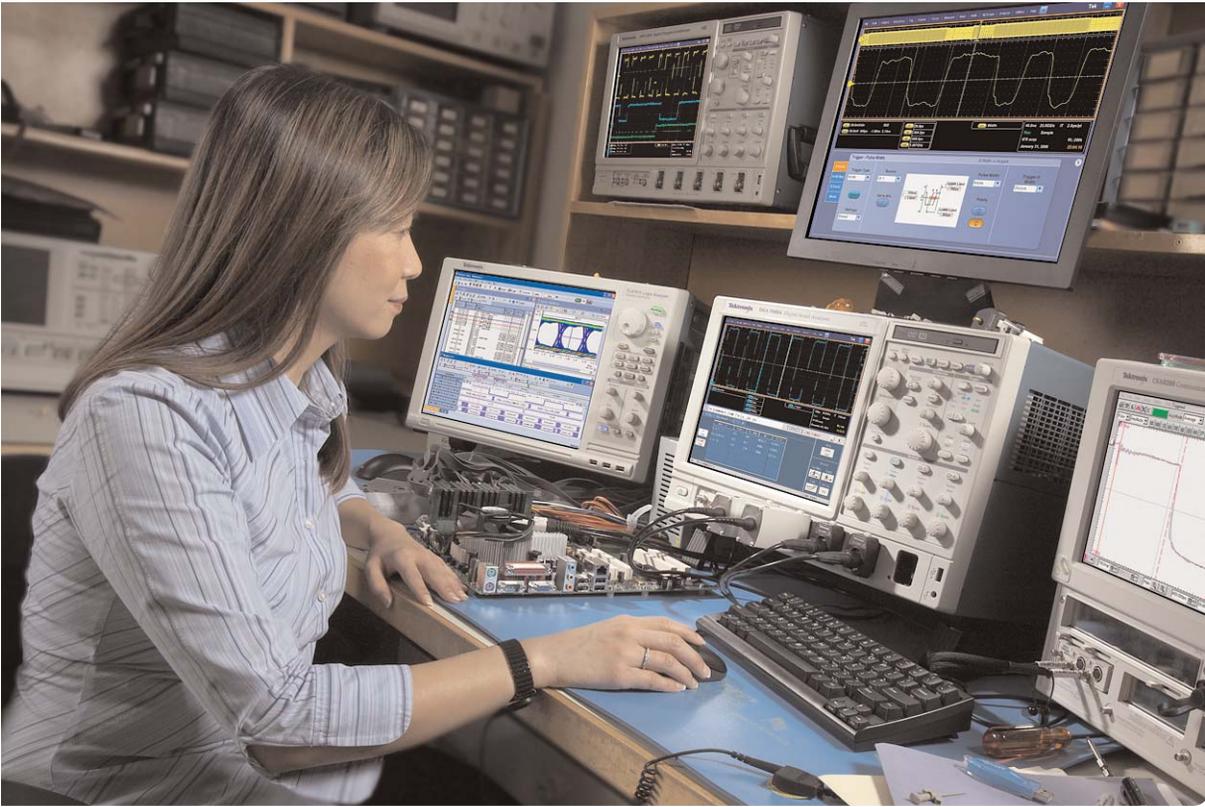


# 有效位

## 有效位测试评估数字化仪器的动态性能



### 有效位的概念

不管是设计还是购买数字化系统，您都需要某种手段来确定系统的实际数字化性能。模数转换器(ADC)、波形数字化仪或数字存储示波器的输出信号与模拟输入信号的实际接近程度怎样呢？

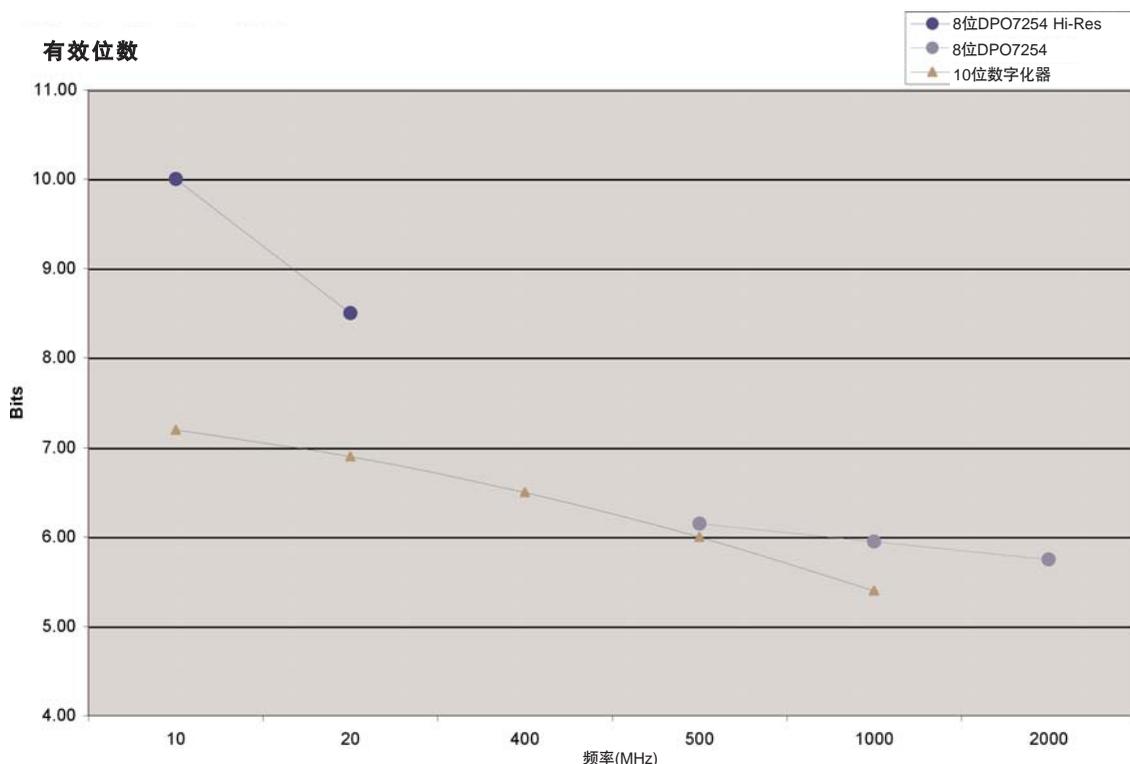
在最基本的层次上，数字化性能似乎只是简单的分辨率问题。为了得到理想的幅度分辨率，应采用拥有必要“位”数(量化等级)的数字化器件。为了得到理想的时间分辨率，需要有必

要取样速率的数字化器件。这些问题看上去非常简单，但遗憾的是，它们也很容易会出现误导。

尽管“8位数字化器件”可能会在DC或缓慢变化的信号上提供接近8位的准确性和分辨率，但却不适用于速度较高的信号。根据采用的数字化技术及其它系统因素，动态数字化性能会随着信号速度提高而明显下降。在到达指定带宽之前，8位数字化器的性能可以下降到6位、4位、甚至更少的有效位。

## 有效位

### ► 应用指南



► 图1. 在比较数字化器性能时，测试整个频率范围非常重要。

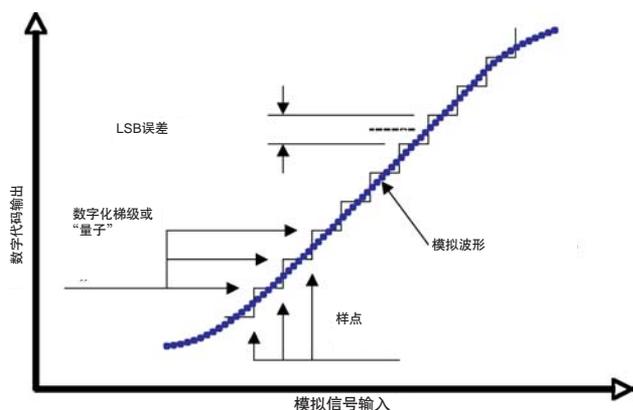
如果您正在设计ADC设备、数字化仪器或测试系统，那么必需了解影响数字化性能的各种因素，并通过某种手段评估数字化器件的整体性能。有效位测试为确定动态数字化性能指标提供了一种手段。有效位不仅可以作为各个设计阶段(从ADC设备设计或选型开始)的评估手段，还可以用来提供整个系统动态性能指标。

对数字化系统采购决策者来说，有效位同样是一个重要的评估工具手段。在某些情况下，有效位可能已经被作为系统或仪器指标的一部分，这在波形数字化仪器中正变得越来越常见。但是，并不是每台仪器，每个系统部件都给出了有效位指标，因此，可能需要评估有效位，以便进行比较。如果数

字化器件嵌入到系统中，那么有效位评估可以为动态数字化系统性能提供整体系统指标。

通常，有效位提供了，来指定数字化设备或仪器表示各种频率的信号的能力的一种手段。基本概念如图1所示，其中图中显示了有效位与频率关系情况。

图1显示了两台数字化器件的有效位数与频率关系，与增益带宽或波特图一样，ENOB一般(但不总是)随着频率下降。主要区别在于：ENOB图比较的是数字化精度或数字位的准确性，而不是模拟增益(或衰减)准确性。



► 图2. 量化误差。

图1告诉我们，有效数字化的准确性随着数字信号频率增加而下降。换句话说，8位数字化器只在DC和低频或低信号斜率上提供了8个有效位的准确性。随着被数字化的信号的频率或速度提高，数字化性能下降到越来越低的有效位值。

数字化器件性能下降表现为数字化信号上的噪声电平提高。这里的“噪声”是指输入信号与数字化输出之间的任何随机或伪随机误差。数字化信号上的这个噪声可以用信噪比(SNR)表示：

$$SNR = rms\_signal / rms\_error \quad [公式1]$$

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，其中与有效位(EB)的关系如下：

$$EB = \log_2(SNR) - \frac{1}{2} \log_2(1.5) - \log_2(A / FS) \quad [公式2]$$

分辨率或有效位数(N)	量化等级	信噪比, dB (6.08N+1.8dB)
4	16	26.12
6	64	38.28
8	256	50.44
10	1,024	62.60
12	4,096	74.76
14	16,384	86.92
16	65,536	99.08

► 表1. 数字化器有±1/2 LSB的误差

其中A是数字化信号的峰到峰输入幅度的峰峰值，FS是数字化器输入的满刻度的峰峰值。其它常用公式包括：

$$EB = N - \log_2(rms\_error / ideal\_quantization\_error) \quad [公式3]$$

其中N是数字化器的标称(静态)分辨率，且

$$EB = -\log_2(rms\_error * \sqrt{12/FS}) \quad [公式4]$$

注意，所有这些公式都基于数字化过程产生的噪声或误差大小。在公式3中，“理想量化误差”项是输入信号理想的N位数字化的rms误差。IEEE标准同时为数字化波形记录器定义了公式2和公式3 (IEEE标准1057)。公式4是公式3的另一种形式，其假设理想的量化误差在最低有效位(LSB)峰峰值上呈正态分布。这一假设允许用 $FS/(2\sqrt{12})$ 代替理想的量化误差项，其中FS是数字化器件的满刻度输入范围。

对这些公式，需要注意的另一个重要事项是它们基于满刻度信号(FS)。在实际测试中，可以使用小于满刻度(如50%或90%)的测试信号来提高有效位数。因此，任何比较有效位指标或测试都必须考虑测试信号幅度及频率。

## 有效位

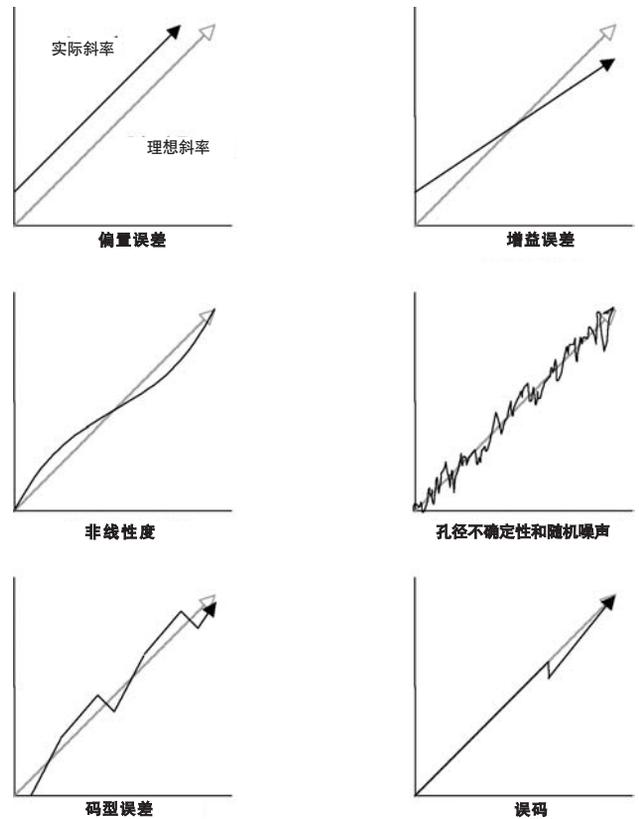
### ► 应用指南

#### 数字化过程中的误差来源

与数字化有关的噪声或误差可能自有各种来源。即使在理想的数字化器中，量化也会有最低的噪声或误差大小。这种“量化误差”总计为 $\pm 1/2\text{LSB}$  (最低有效位)，如图2和表1所示，这个误差是数字化本身的一部分，它是与理想的数字化有关的分辨率极限或不确定性。在这个基本的理想本底误差之上，实际的数字化器进一步增加了误差。这些进一步增加的实际误差可以划分成几大类：

- DC偏置(也是AC偏置或“码型”误差，有时称为“固定码型失真”，与交错的采样方式有关)
- 增益误差(DC和AC)
- 非线性度(模拟)和非单调性(数字)
- 相位误差
- 随机噪声
- 频率(时基)不准确性
- 孔径不确定性(取样时间抖动)
- 数字误差(如由于亚稳态性、代码丢失等导致的数据丢失)
- 其它误差来源，如触发动抖动

图3说明了部分其它基本误差类别，使您能够对其影响有一个直观认识。数字化器中的许多误差都是指定的或与任何放大器或模拟网络有关的经典误差类型。例如，DC偏置、增益误差、相位误差、非线性度和随机噪声可能会发生在波形捕获过程(从模拟波形输入到数字化波形值输出)中的任何部分。



► 图3. 与非理想数字化有关的误差包括DC偏置、增益误差、积分和差分非线性度、取样抖动和其它噪声因素(多余位、丢失位等等)

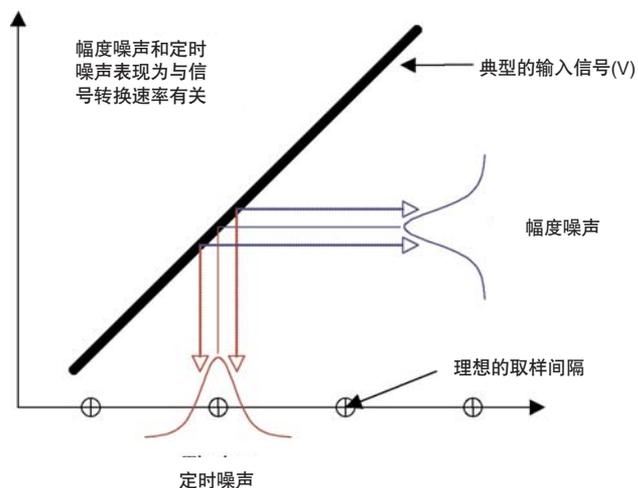
另一方面，孔径不确定性和时基不准确性是波形数字化中的取样过程有关现象。孔径不确定性的基本概念如图4所示。

在图4中，必需指出的是，孔径不确定性会导致幅度误差，误差大小与斜率有关。信号斜率越陡，时间抖动取样导致的误差越大。孔径不确定性只是信号频率高或信号斜率陡导致有效位下降的众多原因之一。但是，孔径不确定性是研究输入信号频率和幅度相关问题的一种有用而又图形化的例证。

为进一步研究孔径不确定性的影响，假设在过零点上对正弦波幅度取样。对低频正弦波，过零点上的斜率很低，因此孔径不确定性的误差最小。然而，随着正弦波的频率增加，过零点上的斜率提高。其结果，同样数量的孔径不确定性或抖动会造成更大的幅度误差。更高的误差意味着SNR更低及有效位下降。换句话说，数字化器件的性能会随着频率提高而下降，公式如下。

$$f = \frac{1}{\sqrt{6} \cdot \pi \cdot \Delta t \cdot 2^N} \quad \text{[公式5]}$$

在公式5中，f是rms孔径不确定 $\Delta t$ 一定时，可以被数字化成n位满刻度正弦波的频率。如果孔径不确定性保持不变，并提高频率，为保持方程5等式，则位数n必须下降。



▶ 图4. 孔径不确定性或取样速率导致幅度误差，这一误差与转换速率和定时抖动有关。类似的，幅度噪声可能会影响定时测量。

但是，在频率提高时，位数n所需的下降程度有一定的要求，这可以返回到图4中所示的概念。如果正弦波的幅度从满刻度下降，那么过零点斜率也会下降。因此幅度误差下降，改善有效位数。这表明了一个重要事实，在比较各种数字化器的有效位时，有效位不仅取决于频率，还取决于测试波形的幅度。任何一对一测试或数字化器比较都必须包括输入波形幅度(一般是满刻度的50%或90%)和频率指标。

此外，应该指出的是，输入放大器滚降、采集后滤波和其它处理可能会降低数字化仪器内部的信号幅度。这会导致有效位指标夸大仪器在实际动态性能。

## 有效位

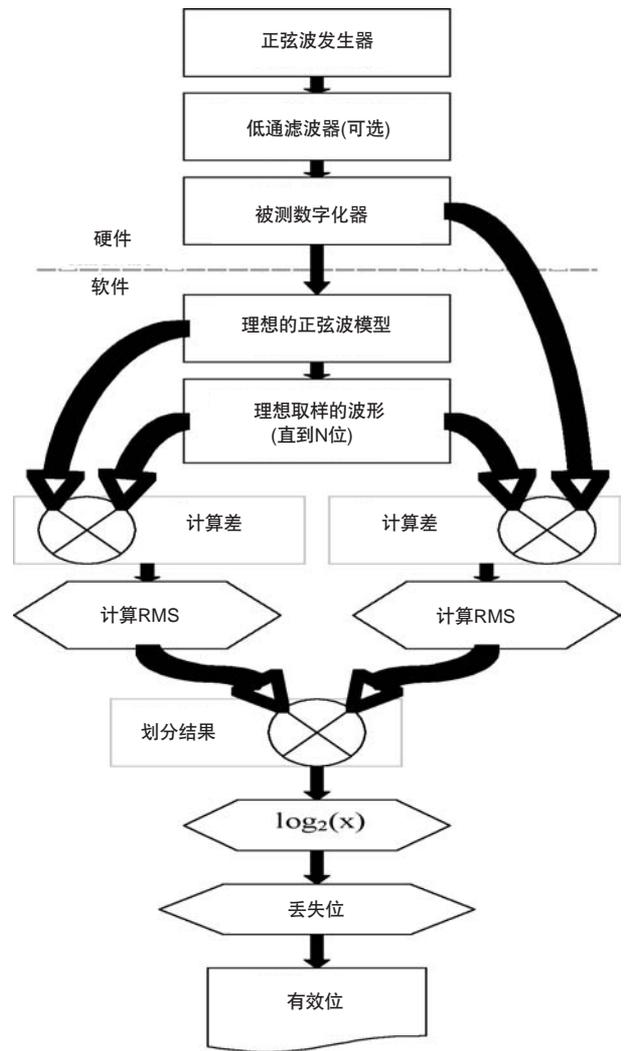
### ► 应用指南

#### 有效位测量流程

除上面提到的误差来源和考虑因素外，数字化误差还可能有一些其它来源。例如，在没有采样保持或跟踪保持的实时高速数字化中，最低有效位必须以非常高的速率变化，以跟踪高速变化的信号。这对数据线路及这些低有效位缓冲输入提出了高带宽要求。如果没有达到这些带宽要求，快速变化的低有效位将被“丢失”，造成数字化器的有效位性能下降。当然，在数字化设备之前和之后还有许多其它可能的误差来源。

比起区分和测量数字化系统中的各个误差源而言，测量整体性能要更加简便。换句话说，在理想的输入信号一定时，数字化系统对输出信号的整体误差有什么影响？一个很好的起点是确定数字化系统的SNR及公式2、3、4定义的有效位。这提供了容易理解的通用比较指标。

基本测试流程如图5所示。需要把已知的理想信号应用到数字化器件中，然后由计算机分析数字化后的波形。由于理想正弦波生成和表征相对简便，所以使用正弦波作为测试信号。整体测试要求是：正弦波的发生器的性能必须超过被测数字化器的性能。否则，测试将不能把数字化误差与信号源误差分开。可能需要在信号源中增加滤波器，以把信号源谐波降低到明显低于被测数字化器期望的水平。



► 图5. 有效位测量流程。

为获得有效位数，将计算纯的(理想化的)正弦波，并拟合到数字化的正弦波中。这个理想的正弦波公式如下：

$$A \cdot \sin(2\pi ft + \Theta) + C \quad \text{[公式6]}$$

其中A正弦波的幅度，f是正弦波频率， $\Theta$ 是相位，t是时间，C是DC偏置。这一正弦波拟合实际过程，可以采用多种软件算法中选用迅速收敛到最佳结果的一种算法。把这个结果作为到数字化器的模拟输入描述。但要注意的是，由于模拟信号参数从数字化器输出中计算得出，因此不包括DC偏置、增益、相位和频率误差。必需通过单独测试来测量这些误差，如利用直方图测试或与相关具体误差相适应的其它测试。在计算理想的输入正弦波的模型之后，将进行进一步计算来确定理想取样和正弦波的数字化。这可以模拟作为理想的N位数字化器被测时生成的信号。然后计算得出的理想正弦波与理想取样和数字化的正弦波之差。在方程3中的rms为理想量化误差。通过从实际数字化正弦波中减去理想正弦波，得到结果的rms值，可以获得有效位公式(3和4)中使用的rms误差值。也可以找到信号的rms值和rms误差，用来计算公式2中使用的SNR。

最后计算(使用公式2, 3或4)得到数字化器的有效位数。通过输入信号幅度保持不变而频率变化，可以进一步确定目标数字化器或数字化系统的有效位数。然后可以画出有效位数与频率的关系图，获得数字化器的性能曲线，如图1所示。

有效位把许多关键的数字化器系统误差组合，在对比时，易于理解和使用。但是，如前所述，有效位取决于输入信号占数字化器满刻度幅度的百分比。数字化器在小于满刻度幅度测试一般会比在100%满刻度幅度测试时会更有效。在小于满刻度上测试也可以，因为在实际中大多数数字化器输入信号低于满刻度，避免数字化器过载。不管采用哪种测试方法(满刻度还是部分刻度)，都应根据有效位数来提供输入测试信号幅度指标。

在选择频率，画有效位图时也要特别注意。如果测试信号频率在谐波上与数字化器的取样速率相关，那么有可能存在差频，干扰测试结果。因此，最好保证测试信号与数字化器取样异步。

## 有效位

### ► 应用指南

转换器误差	有效位测试	FFT测试	频谱平均测试	直方图测试
差分	<b>是</b>	<b>是</b>	<b>是</b>	<b>是</b>
非线性度	rms误差的一部分	作为提升的本底噪声	作为提升的本底噪声	读数是%LSB
积分	<b>是</b>	<b>是</b>	<b>是</b>	<b>是</b>
非线性度	rms误差的一部分	作为混杂到基带的基波	作为混杂到基带的基波	
代码丢失	<b>是</b>	<b>是</b>	<b>是</b>	<b>是</b>
	rms误差的一部分	作为提升的本底噪声	作为提升的本底噪声	作为二元组和零数量
孔径不	<b>是</b>	<b>是</b>	<b>是</b>	<b>否</b>
确定性	rms误差的一部分	作为提升的本底噪声	作为提升的本底噪声	平均输出
噪声	<b>是</b>	<b>是</b>	<b>是</b>	<b>否</b>
	rms误差的一部分	作为提升的本底噪声	作为提升的本底噪声	平均输出
增益误差	<b>否</b>	<b>否</b>	-	<b>是</b>
				显示在峰到峰分布中
偏置误差	<b>否</b>	<b>否</b>	-	<b>是</b>
				FS峰到峰值的读数%

► 表2. 模数转换器动态性能测试摘要。

数字化器件的触发是需要注意的另一个方面。整体来说，应在单次模式下捕获测试信号。这样可以有效消除抖动带来的影响，把评估集中在数字化器件本身上。但是，为在更高带宽下运行(或在数字存储示波器的扫描速度下运行)，许多数字化器件必须使用重复触发和等效取样，在多个重复的输入波形上构建一整套样点。触发抖动和长时间漂移影响会增加等效数字化器件有关的噪声。在大多数情况下，对信号平均进行处理，以降低噪声，从而提高数字化器的有效位数。如果在有效位测试时，对信号平均处理，那么应在有效位结果中指明使用的信号平均次数。

此外，还应知道某些数字化仪器中使用的内置信号平均功能可能会以高于数字化器本身的分辨率来使用。例如，信号平均时，8位数字化仪器可以使用内部16位运算，这种高分辨率平均可能会使8位数字化器表现为10位或11位数字化器。当然在使用平均后的输入信号时，这会产生更加有效的测试结果。一般来说，不能有效地比较采用信号平均功能的数字化器与单次捕获信号的数字化器，除非这两个数字化器可以设置成共同的工作模式，以便“公平以及平等地”进行比较。

## 其它动态性能测试

除有效位测试外，还可以使用其它测试方法来评估数字化器的动态性能，其中包括FFT测试、频谱平均测试和直方图测试。一般来说，使用这些测试可以增强有效位测试结果，或者获得数字化器性能的某些特定方面的具体信息。表2概括了各种测试进行的误差测量。

简单地说，FFT测试可以测量由于积分非线性度导致的数字化器的本底噪声和谐波失真，通过简单地计算数字化的正弦波测试信号的FFT来完成。假设FFT计算的精度远远高于数字化的正弦波，FFT结果的本底噪声就是数字化器的本底噪声。此外，来自非线性度的任何谐波都将反映在FFT结果中。假设信号源波形中的谐波失真达到最小，谐波幅度表明数字化器的非线性度，应该指出的是，数据上使用的窗口类型及是否在FFT应用之前从数据中去掉了均值，会影响对结果分析。

除重复采集的测试波形转换成频域之外，频谱平均与FFT测试类似。将逐点平均计算，获得频谱平均值。这可以更简便地查看数字化器的性能，更简便地分析本底噪声和谐波。但是，为有效分析结果，结果中应有测试信号幅度和频率信息。

直方图测试采用不同的方式研究数字化信号代码密度。在测试时，数字化器件数字化输入的纯正弦波，不同数字输出代码的相对发生数量称为代码密度。这被视为归一化的直方图，显示了从零到满刻度的每个代码的发生频率。输出“0”代码密度表明了代码丢失，密度偏离理想值一般表明线性度误差。

是否进行附加测试取决于有疑问的数字化器期望的误差指标数量。如图1和表2所示，有效位很好地从整体上表明了数字化器的动态性能。可以使用其它测试扩展这一测试，反映与具体误差来源有关的更多细节。但是，有效位仍是基本指标中最主要的指标，在很大程度上就像带宽是放大器和示波器的基本指标一样。

## 有效位

### ► 应用指南

#### 参考书目参考文献

Bednarek,C., “模数转换器转换器的动态特性”

**Handshake**, 泰克公司, 1988年夏季号, 第9-11页。

Bird, S.C.和J.A. Folchi, “波形记录器的时基要求,” **惠普期刊** 1982年11月, 第29-34页。

DeWitt,L., “动态测量反映数字化器的整体性能”

**Handshake**, 泰克公司, 1980年春季/夏季号, 第9-12页。

Dornberg, J., H.S. Lee和D. Hodges, “模数转换器的全速测试”

**IEEE固态电路期刊**, Vol. SC-19, No. 6, 1984年12月, 第820-827页。

Harris, F.J., “离散傅立叶变换谐波分析窗口,” **IEEE学报**, Vol. 66, No. 1, 1978年1月, 第51-83页。

**IEEE标准1057**, 数字化波形仪器标准。

Jenq, Y.C., “非正态取样信号的数字频谱, 理论和应用, 第一部分: 波形数字化仪基础知识,” **IEEE仪器和测量学报**, Vol IM-37, No. 2, 1988年6月。

Jenq,Y.C.和P. Crosby, “正弦波参数估算算法在波形数字化器有效位测量中的应用,” **IEEE IMTC/88**, San Diego, CA., 1988年4月19-22日。

Jenq,Y.C., “使用频谱平均测量模数转换器的谐波失真和本底噪声,” **IEEE IMTC/88**, San Diego, CA., 1988年4月19-22日。

Jenq, Y.C., “模数转换器的异步动态测试,” **Handshake**, 泰克公司, 1988年夏季号, 第4-7页。

Peets, B.E., A.S. Muto和J.M. Neil, “波形记录器性能测量,” **惠普期刊**, 1982年11月, 第21-29页。

Ramreriz, R.W., “数字化器规范及其在波形中的应用,” **电子测试**, 1981年9月。



**泰克科技(中国)有限公司**  
上海市浦东新区川桥路1227号  
邮编: 201206  
电话: (86 21) 5031 2000  
传真: (86 21) 5899 3156

**泰克北京办事处**  
北京市海淀区花园路4号  
通恒大厦1楼101室  
邮编: 100088  
电话: (86 10) 6235 1210/1230  
传真: (86 10) 6235 1236

**泰克上海办事处**  
上海市静安区延安中路841号  
东方海外大厦18楼1802-06室  
邮编: 200040  
电话: (86 21) 6289 6908  
传真: (86 21) 6289 7267

**泰克深圳办事处**  
深圳市罗湖区深南东路5002号  
信兴广场地王商业大厦G1-02室  
邮编: 518008  
电话: (86 755) 8246 0909  
传真: (86 755) 8246 1539

**泰克成都办事处**  
成都市人民南路一段86号  
城市之心23层D-F座  
邮编: 610016  
电话: (86 28) 8620 3028  
传真: (86 28) 8620 3038

**泰克西安办事处**  
西安市东大街  
西安凯悦(阿房宫)饭店345室  
邮编: 710001  
电话: (86 29) 8723 1794  
传真: (86 29) 8721 8549

**泰克武汉办事处**  
武汉市汉口建设大道518号  
招银大厦1611室  
邮编: 430022  
电话: (86 27) 8781 2760/2831

**泰克香港办事处**  
香港铜锣湾希慎道33号  
利园3501室  
电话: (852) 2585 6688  
传真: (852) 2598 6260

如查看升级信息, 请访问网址: [www.tektronix.com.cn](http://www.tektronix.com.cn)



版权所有 © 2008, Tektronix, Inc. 全权所有。Tektronix 产品受美国和外国专利权(包括已取得的和正在申请的专利权)的保护。本文中的信息将取代所有以前出版的资料中的信息。保留更改产品规格和价格的权利。TEKTRONIX 和 TEK 是 Tektronix, Inc. 的注册商标。引用的其它所有商标名称均为他们各自公司的服务标志、商标或注册商标。

12/08 JS/WWW

4HC-19448-1

**Tektronix®**