



# 测量系统信号完整性： 重要考虑因素

## 技术简介

### 引言

在示波器用户选择示波器进行关键测量时，主打指标通常是选择示波器时使用的唯一衡量指标。示波器最重要的三大指标是：

- 带宽
- 采样率
- 记录长度

在这些主打指标中，衡量示波器功能的第一大指标是带宽。毕竟，带宽越高，性能越高，对不对？答案是不一定。本文将指出每种非常简单的假设中的陷阱，讨论确定测量系统效果时要考虑的其他重要因素。根据您希望观看和分析信号实际情况的预期，您需要更多地了解示波器的实际性能。

## 技术简介

### 带宽：这个指标告诉了我们什么？

模拟带宽是简单地规定正弦波的实测幅度比实际正弦波幅度低 3 dB 的频率 ( 参见 IEEE-1057)。

如果您想在正弦波上仅以 3% 的误差进行幅度测量，那么您要在比示波器额定带宽低的频率中测量正弦波。由于大多数信号要比正弦波复杂，使用测量设备 ( 如示波器 ) 时通用的经验法则是其带宽应该是要测量的信号带宽的五倍。这一通用法则并不适用于所有情况，因为对相同频率的信号，上升时间会变化，谐波内容也会变化。

### 带宽没有告诉我们什么？

大多数普通用户选择使用示波器，显示和测量复杂的电信号和光学信号，其在仪器显示器上显示为信号幅度随时间变化图。模拟带宽是一个关键的示波器指标，这基于频域中的必要性，而不是时域中的必要性。根据采样定理，复杂的信号将包含许多频谱成分 ( 如包含若干离散的、但谐波相关的正弦成分的多音调 )。

通过使用频谱分析，我们可以了解哪些成分用于采样的信号。但是，为全面检定这些成分，我们必须知道构成复杂信号的每个成分的准确幅度和相位。在这种情况下，带宽指标几乎没有提到仪器怎样捕获这些细节。从带宽角度看，我们所知道的全部信息是对正弦波输入，幅度误差在指定带宽上接近 30%。

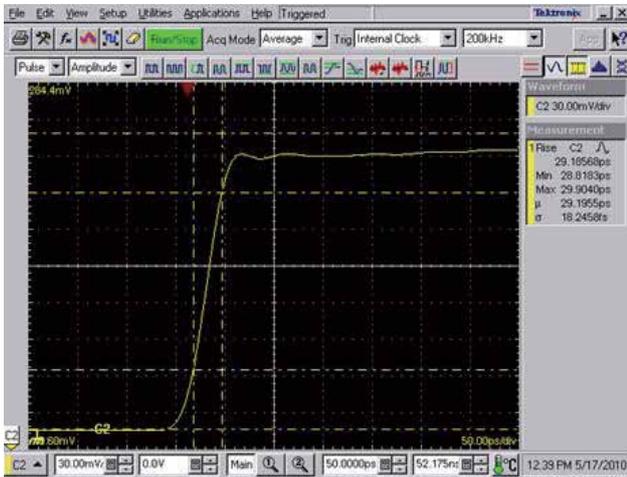


图 1. 泰克 50GHz 等效时间采样示波器捕获的 30ps 上升时间脉冲。

### 什么时候上升时间比带宽更重要？

除通用信号分析外，大多数工程师还关注时间测量，如上升时间和下降时间。因此，为从指定带宽中估算示波器系统的上升时间，我们可以使用近似公式，如：

$$T_r = \frac{0.35}{BW}$$

带宽和上升时间之间的这个 0.35 系数基于简单的 10–90% 上升时间单极模型，其假设系统响应呈高斯分布。实际上，特别是在当前的数字示波器中，这一假设根本就不正确，带宽乘以示波器的上升时间常数，得到的结果可能会接近 0.45。

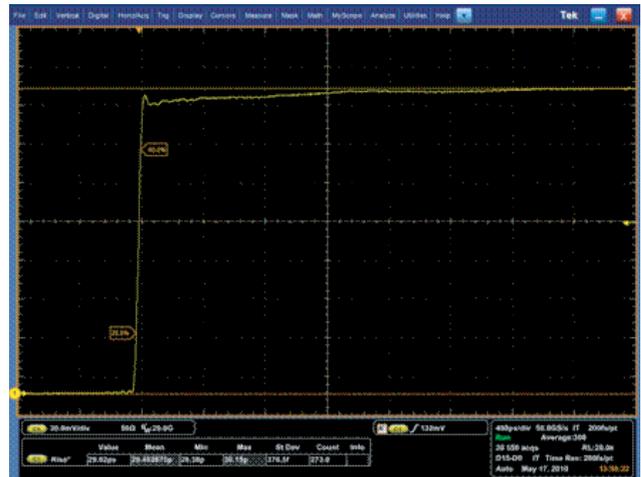


图 2. 泰克 20GHz 实时示波器捕获的 30ps 上升时间脉冲。

那么为上升时间测量选择最好的示波器有什么实际意义呢？两台示波器拥有相同的带宽性能，但上升时间、幅度和相位响应相差可能会非常大。因此，只知道示波器的带宽并不能可靠地告诉我们示波器的测量功能，也不能告诉我们示波器准确捕获复杂信号的能力，如高速串行数据流。此外，从带宽 x 上升时间的近似计算中得出的上升时间，可能是不准确的。了解示波器上升时间和下降时间响应的最可靠方式是使用比示波器快得多的理想阶跃信号进行测量。

图 1 显示了 50GHz 等效时间采样示波器测量的大约 30ps 的上升时间。图 2 则使用 20GHz 实时示波器测量相同的信号。50GHz 采样示波器测得的上升时间为 29.2ps，20GHz 实时示波器测得的上升时间为 29.6ps。在检定上升时间 ~30ps 的最快速的第三代高速串行信号时，20GHz 实时示波器的上升时间误差为 0.3ps 或 ~1%。

## 技术简介

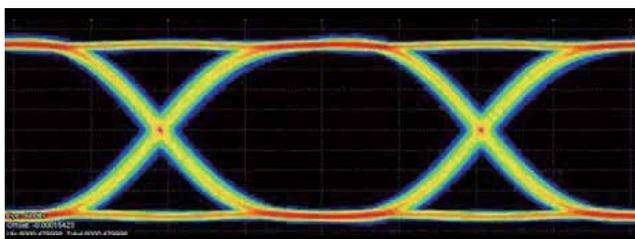


图 3: 使用泰克 20GHz 实时示波器捕获的 12.5Gb/s PRBS7 数据的眼图。

上面的实验指出了本次讨论的症结所在：信号带宽本身不能告诉我们信号的频谱内容。测量系统准确测量上升时间的能力，比单纯的带宽影响要更大。上升时间越快，生成的基础频率谐波越高。视信号中的跳变速度，在更高的谐波上可能有、也可能没有足够的频谱内容，需要带宽更高的仪器。大多数高速串行信号在流经信道时，上升时间已经下降。在图 3 和图 4 中，大家看到两台示波器捕获的 12.5Gb/s PRBS7 数据的眼图，一个是在 20GHz 实时示波器上获得的（图 3），



图 4: 使用泰克 50GHz 等效时间采样示波器捕获的 12.5Gb/s PRBS7 数据的眼图。

另一个是在 50GHz 等效时间采样示波器上获得的（图 4）。从两张图片对比中可以看出，实时示波器基本上看不到信号劣化。这是因为信号的上升时间不够快，不足以把能量推送到高阶谐波，而必需使用带宽更高的设备。

由于当前生产的许多大容量、低成本电路板中采用的材料，上升时间也受到了限制。市场上提供了许多新奇的电路板材料，扩展了这些限制，但其成本通常很高，而不能用于大批量制造环境中。当前生产的大多数 FR-4 材料的上升时间限定在 ~30ps 左右。

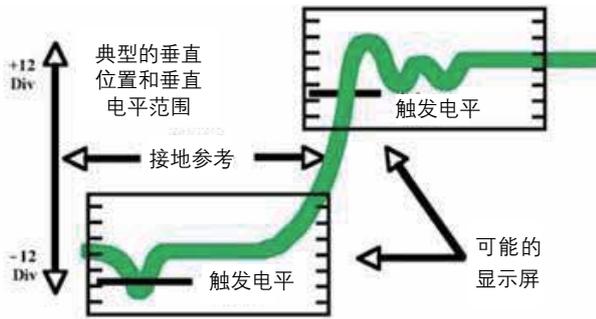


图 5. 阶跃响应畸变。

### 什么是阶跃响应？

在实践中，大多数示波器用户希望示波器拥有完美的整体阶跃响应。带宽作为一项指标，没有告诉我们示波器复现复杂波形形状的能力。为了检验阶跃响应性能，需要非常干净的阶跃发生器。当示波器在屏幕上复现这个干净（接近于理想状态）的阶跃信号时，显示的偏差称为畸变。

图 5 显示了阶跃响应畸变和上升时间在示波器屏幕上的表现形式。

在使用示波器时，与理想的阶跃响应相比，您愿意容忍多大的偏差？影响阶跃响应偏差的关键因素可能有四个：

- 基本示波器模拟性能
- 探测效应
- 采样不足假信号效应
- 数字信号处理效应

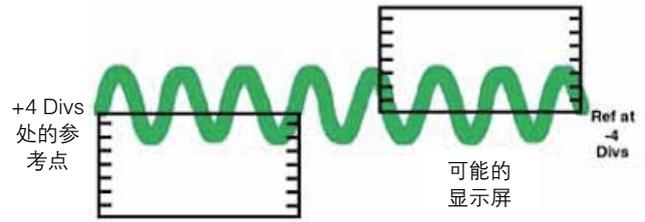


图 6. 垂直位置和触发电平的动态范围。

### 哪些因素决定着示波器的基本模拟性能？

真正的模拟性能取决于模拟示波器电路直到模数 (A/D) 转换器，包括示波器每条通道中的垂直输入衰减器、位置控制以及触发拾电路。下面将介绍在使用示波器查找信号完整性细节时，在这条电路中需要考虑哪些因素。

在决定考察波形细节时，您可能很快就会发现传统垂直位置控制的限制。每次在改变 volts/div 控制功能扩展轨迹时，您都必须重新定位波形。在打算扩展没有在接地参考附近的波形部分时，典型的 -12 格垂直位置范围很快会限制您可以使用的扩展或缩放范围。此外，在重新定位垂直扩展的轨迹时，您可能还需要在该细节上保持一个触发点或定时参考，以便使其保留在屏幕上。这要求您还要考虑触发电平控制范围。图 6 说明了这些模拟限制。

## 技术简介

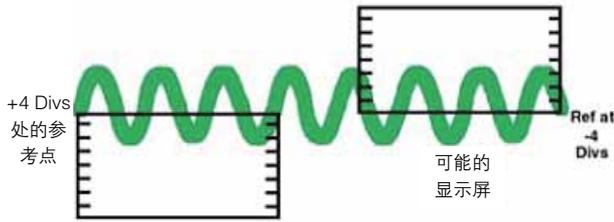


图 7: 垂直位置移动 volts/div 零参考点。

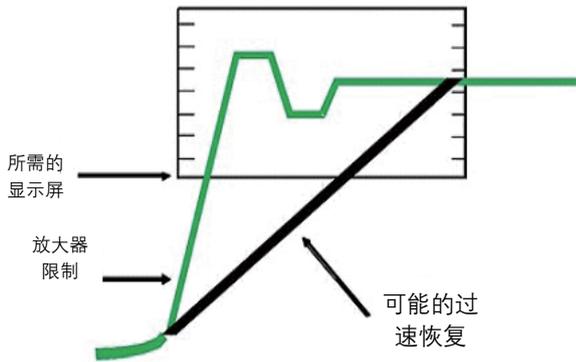


图 9. 过载恢复特点可能会导致高速细节消失。

当您在垂直方向重新定位轨迹时，您还会重新定位扩展参考点，其固定在地电平上，如图 7 所示。

如果您想“放大”没有处在地电平的波形细节，应考虑指定偏置控制，如图 8 所示。

垂直偏置允许重新定义扩展使用的显示的参考点。例如，如果您想在脉冲顶部扩展波形细节，其处在 +5 V，那么只需把偏置控制设置成 +5 V。然后把 volts/div 变为所需的灵敏度，而不必重新定位轨迹。偏置会导致示波器的垂直模拟动态范围大幅度提高。

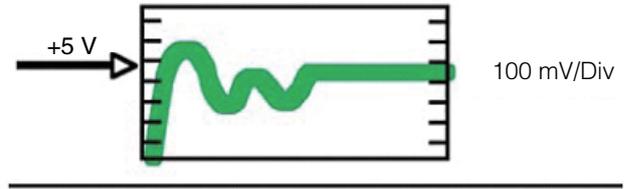


图 8. 垂直偏置把 volts/div 参考点从零变到某个其它电压。

“放大”垂直波形细节的缺点之一是示波器的垂直放大器和采集系统具有过载恢复限制。在驱动波形的一部分移出屏幕，以扩展特定细节时，垂直系统需要从过载情况下恢复。典型的过载恢复指标可能是“在 1 ns 内恢复 90%”，表示“在 2 ns 内恢复 99%”。在泰克 DPO/DSA/MSO 系列高性能示波器当前型号中，过载恢复对 15 格过载最低只有 100 ps。

真正的模拟性能远远不只是带宽。必须了解带宽、影响带内平坦度和相位响应的阶跃响应畸变、上升时间和下降时间。放大细节的能力要求垂直位置控制和偏置控制，对您的应用要有足够的范围。这意味着示波器垂直系统在满足测量要求方面，也有足够的过载恢复特点。

在模数转换器量程范围之外获得部分信号时(如前所述)，信号的数字信号处理可能会更多地成为问题，而不是解决方案。能够使 DSP 失效非常关键，以便使用上述技术准确地评估波形的各个区域。事实的确如此，因为整个信号不再提供给处理系统，DSP 假信号可能会掩盖细小的信号特点。我们将在本技术简介后面进一步介绍这一课题。

### 探头对带宽和上升时间有哪些影响？

如果您把一个电阻器、一个电容器、甚至一根导线焊接到电路上，您是否预想到这些元件会影响电路中该部分的信号？当然，您想得到。这些元件影响着信号幅度，降慢信号速度，影响信号形状。同样，每只示波器探头都有一定的电容。每只示波器探头都有一个电阻值。每只示波器探头都将影响测量点上的信号。这不是探头会不会改变信号的问题，而是改变多少的问题。

理想的探头将以完美的保真度捕获任何信号，对被测电路没有侵入性。对探头设计人员的要求似乎很明确：超高带宽，宽动态范围，不影响被测信号。我们将考察下述主题及其对带宽、上升时间和阶跃响应的影响。

- 不同要求，不同探头
- 探头带宽和上升时间
- 短引线及选择适当的附件

#### 不同要求，不同探头。

探头用于许多不同环境中，用来根据各种行业标准进行测试。例如，测量电源应用中的高压要求遵守安全认证标准。这种测量要求机械坚固的探头，且要有非常大的动态范围，但这些探头不要求高带宽。而现代串行标准等应用则要求测量工具使用精密部件，拥有高带宽及低动态范围。

必须认识到，示波器探头是为不同目标市场设计的，这会影响探头的设计要求。对变化的测量环境，探头有不同的带宽功能。在为测量确定适当的探头时，要确保探头拥有足够的带宽。多少带宽才算足够呢？让我们看一下。

### 探头带宽和上升时间

#### 带宽

带宽是示波器探头设计的频率范围。例如，100 MHz 示波器探头指定用于在最高 100 MHz 的所有频率上执行测量。但是，探头捕获信号的能力在指定频率范围内是变化的。事实上，每个探头制造商都假设在最大指定带宽上，探头的频响下降 3 dB。在超过 3 dB 点的频率上，信号幅度会过度衰减，测量结果可能不能预测。

#### 上升时间

带宽描述了频域特点，但没有提供探头和示波器复现复杂波形形状随时间变化的完整画面。为获得完整信息，阶跃响应在获得时域特点中至关重要。这种检定能力通过探头的上升时间值提供，其中通过评估系统对速度超过测试系统能力的阶跃输入的响应，来获得上升时间。

## 技术简介

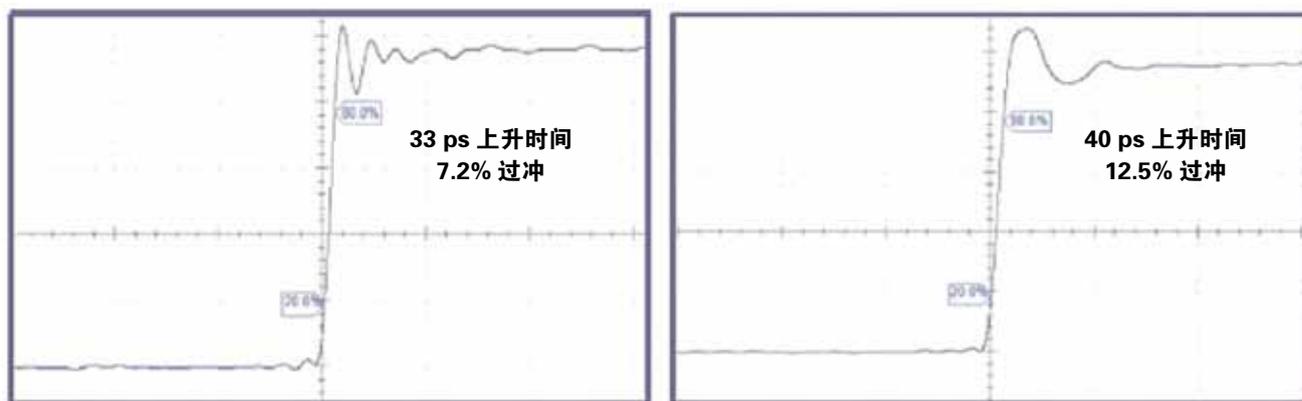


图 10. 长引线可能会导致非常不同的测量结果。

### 短引线及选择适当的附件

在探头连接到一个测量点上时，它会给电路带来负荷。电容单元和电感单元一般来自探头尖端形状和导线长度。电感单元可能会有变化，因为增加了不同的探头尖端附件，而且信号线和地线采用不同长度的导线。

### 信号引线 and 地线要尽可能短

有时把导线连接到测试点上可能极具挑战。用户可能

会通过加长信号线或地线，来补偿这个连接问题。如图 10 所示，加长 P7500 探头上的信号线，会影响测量。左图中引线较短，右图中的信号线则长得多，上升时间和过冲值由于导线长度变化而变化。P7500 探头系列是一种 TriMode™ 探头，能够在单端配置、差分配置和共模配置中观察信号，而不需每次都进行新连接。用户只需按探头上的一个按钮，就可以简便地实现所有这些组合。

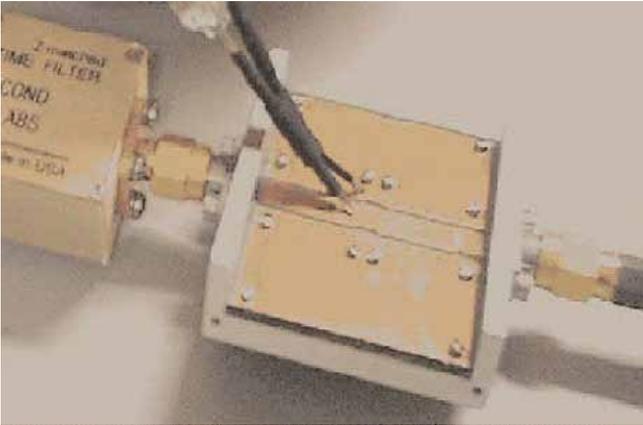


图 11. 确保了解探头尖端附件对测量的影响。

### 选择适当的附件

示波器探头一般配备大量不同的探头尖端附件。探头标配不同的附件，支持各种设计活动，如验证、调试、一致性测试、等等。此外，某些探头配备焊接解决方案，可以免提实现牢固连接。

用户应该知道，不同的探头配套尖端可能会有不同的测量结果。为更方便地连接被测器件，某些测试线有夹子，某些引线更长，某些探头连接器有方形引脚插座。看一下图 11 中的连接。这张图中的探头带有 1”

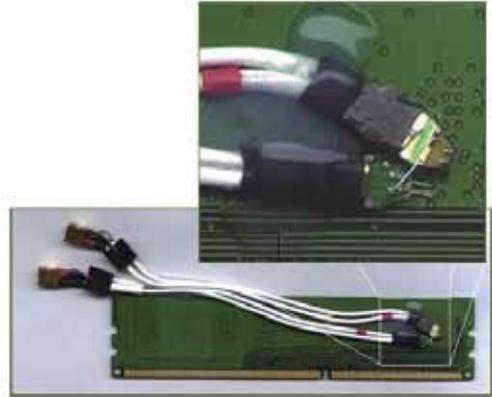


图 12. P7500 系列远距离焊接探头尖端到达测量的信号源。

信号线和地线。很明显，引线越长，电感越高，进而会导致振铃、畸变或过冲等效应。图 12 显示了 P7500 TriMode™ 探头系列使用的远距离焊接尖端的连接。远距离焊接尖端允许尽可能近地连接参考信号，通过把端接带到尖端头部，最大限度地降低电感影响，确保到 DUT 的引线最短。问题在于，有各种各样的连接方法，这些不同方法可能会导致不同的测量结果。探头制造商一般会指明探头尖端附件对测量的影响。

## 技术简介

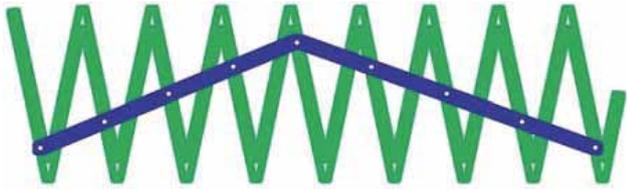


图 13. 采样不足的假信号。

### 什么是采样不足假信号效应？

对复杂的波形，频谱分析仪或波形快速傅立叶变换 (FFT) 可以确定波形中存在的频谱正弦波。内奎斯特定理指出，对正确数字化的信号，对波形中每一个频谱正弦波周期，必需采样两次以上。如果信号中最快的正弦波的采样速度没有快于这一两倍速率，那么就会违反内奎斯特定理，信号将以不能校正的假的方式重建 (假信号)。图 13 说明了采样不足怎样导致假的波形重建。

如果显示屏上出现的信号表现为没有被触发，即使触发灯常亮，采样不足仍很可能成为问题。如果怀疑存在这种问题，应把 sec/div 旋钮旋转到更快速度，最后您会看到稳定触发的显示画面。这适用于重复的波形。

对单次事件，如果在一开始时没有真正了解波形，那么不可能获得与这类假信号有关的提示 (假波形重建)。重复波形的形状表面上好象是正确的，但可能会有错误定时。或者由于采样不足，快速移动的波形细节形状可能是不正确的。

在观察显示的波形时，感受到的假信号可能会让您的双眼受到愚弄，即使已经满足内奎斯特定理。这意味着对波形中每个频谱正弦波成分，您有两个以上的样点，如前所述。图 14 显示了这种多点显示。



图 14. 点模式没有显示实际波形形状。

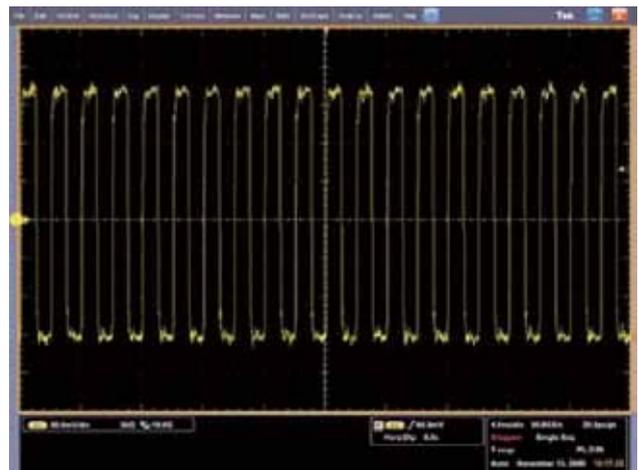


图 15. 矢量模式改善了感受到的假信号。

感受到的假信号可能会表现为由多个点组成的码型。当然，实际波形还是看不到的。通过使用各种线把这些点连接起来，可以明显改善显示的这种假信号或假波形复现。把多个点连接起来的这个过程称为内插，如图 15 所示，这是使用图 14 中相同的点获得的。



图 16a. 使用  $\sin(x)/x$  内插过采样的波形。



图 16b. 使用  $\sin(x)/x$  内插采样不足的波形。

为真正消除感受到的假信号效应，我们必须使用内奎斯特定理中的数字滤波器，称为  $\text{sine}(x)/x$ 。这种数学滤波器可以在波形的实际样点之间计算真正正确的直接点，前提是不存在“实际假信号”。这意味着对到达示波器模数转换器的信号中的每一个频谱（正弦波成分）周期，都存在着两个以上的样点。

那么  $\text{sine}(x)/x$  对采样不足的阶跃响应有什么影响呢？在图 16a 中，波形被过采样，使用  $\text{sine}(x)/x$  内插时正确显示。在图 16b 中，波形采样不足，在显示画面中使用  $\text{sine}(x)/x$  内插后，导致了原始信号上不存在的振铃。在图 16c 中，波形也采样不足，在显示画面中使用线性内插（采集样点之间的直线）时，可以更好地表示原始信号。

大家可以看到，采样不足与内插相结合，会提供与波形有关的误导性非常强的信息。因此必须认真选择采样率和显示内插，确保信号有最佳的测量信号保真度。



图 16c. 采用线性内插的采样不足的波形。

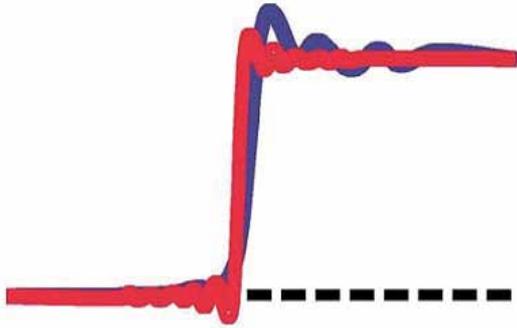


图 17. DSP 增强的形状、上升时间和带宽。

### 过采样怎样改善数据采集？

过采样可以降低作为示波器中模数转换一部分生成的量化噪声。降低的噪声数量取决于有问题的示波器的通带或频率响应以及应用多少过采样。

例如，我们看一下 20GHz 带宽和 50GS/s 采样率的示波器。这种仪器的内奎斯特频率是 25GHz。在 20GHz 的通带及最大平坦响应中，您可以看到采样频率基础频率周围存在着某些更高频率的噪声。如果要把仪器的这个采样率扩展到 100GS/s，那么内奎斯特频率现在是 50GHz，由于数字化过程而存在的噪声现在会被扩展到频率跨度的两倍。同时，示波器的通带没有变化，因此仪器带宽中包括的噪声较少。

此外，这一概念也指明了只使用测量关心信号所需的仪器带宽的好处。如果您使用仪器的全部带宽，测量的信号只有仪器额定带宽的一半，那么您将看到测量中包括的更高带宽时可能存在的任何噪声。

### 数字信号处理对上升时间、带宽和信号保真度有什么影响？

在实践中，实际样点之间的内插是一种数字信号处理 (DSP) 方式。波形处理可以满足多种用途，包括：

- 增强带宽
- 改善上升时间
- 校准增益和波形
- 校正频谱幅度和相位
- 归一化光学参考接收机
- 分析波形偏差和异常波形抖动

在图 17 中，蓝色轨迹是通过示波器上不理想的垂直放大器系统的未校正波形。红色曲线显示了 DSP 形状校正以及增强的带宽和改善的上升时间。

可以使用 DSP 滤波器，改善示波器采集通道的带通及幅度和相位响应。这种滤波器可以扩展带宽，使示波器通道频响平坦化，改善相位线性度，在通道之间提供更好的匹配度。傅立叶系列 DSP 滤波最常用的用途是改善带宽和上升时间。

在增强快速上升阶跃的上升时间时，傅立叶系列 DSP 收敛到阶跃的中点。在阶跃的两侧，系列将会振荡。振荡的峰值高度会较阶跃下降，但在加总项数提高时，峰值 1、峰值 2 等等的高度会保持相同，使得振铃的幅度和形状相同，但频率会更高。每个振铃的峰值过冲有一个恒定高度 (= 阶跃的 18%)，在项数提高时会朝着阶跃边沿移动。这种效应称为 Gibbs 现象。

因此，根据 Gibbs 现象，在使用傅立叶数学运算把带宽增强到极限时，振铃前和振铃后将发生在阶跃边沿，如图 17 所示，其中示波器通道响应是低通和线性相位。Gibbs 现象振铃数量取决于 DSP 实现的上升时间和带宽改进量以及被测信号的速度。

为使 DSP 带宽增强功能像本文介绍的那样一致工作，必须满足两个条件。第一，采样率必须保持足够高，保证内奎斯特或以上速率（采样率一半）的任何频谱频率成分都不会到达示波器的模数转换器。如果没有满足这一条件，那么会发生采样不足，DSP 很可能会破坏显示的波形的完整性。第二，整个波形必须保持在模数转换器的范围内。如果选择放大波形细节，进而驱动信号的另一个部分在垂直方向移出屏幕，那么数字信号处理很可能会导致不想要的失真。

### 什么是“有效位数”？其对测量有什么影响？

不管是设计数字系统，还是购买设计系统，您都需要某种手段，确定实际生活中的真实数字化性能，也就是任何给定模数转换器 (ADC)、波形数字化器或数字存储示波器的输出追踪任何给定模拟输入信号的密切程度。

在最基本的层面上，数字化性能似乎只是与分辨率有关。有人说，对想要的幅度分辨率，找一个拥有要求的“位”数（量化等级）的数字化器就可以了。对想要的时间分辨率，只需以要求的采样率运行数字化器就可以了。遗憾的是，这种说法的误导性也非常强。

尽管“8 位数字化器”可能在 DC 或缓慢变化的信号上提供了接近 8 位的精度和分辨率，但对更高速的信号则并非如此。视采用的数字化技术及其它系统因素，在信号速度提高时，动态数字化性能可能会明显下降。在达到指定带宽前，8 位数字化器的性能可能会下降到 6 位、4 位、甚至更低的有效位数。如果您正在设计 ADC 设备、数字化仪器或测试系统，非常重要的一点是了解影响数字化性能的各种因素，同时应该有某种手段来评估整体性能。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从 ADC 设备设计或选型开始的各个设计阶段的评估工具，还可以用来提供整体系统动态性能指标。

对制订数字化系统采购决策的用户，有效位也同样是一种重要的评估工具。在某些情况下，有效位可能已经作为系统或仪器指标的一部分作出规定。这对波形数字化仪器变得日益常见。然而，可能并不是每台仪器或每个系统元件都指明了有效位。因此，可能必需评估有效位，以进行比较。如果多个设备被组合成一个系统，那么有效位评估对确定动态数字化系统性能可以提供一个整体系统指标。

从本质上看，有效位为指定数字化设备或仪器表示各种频率信号的能力提供了一种手段。

## 技术简介

与增益带宽或博德图一样，ENOB 一般、但并非总是随着频率下降。主要差别在于，ENOB 图比较的是数字化精度或精度的数字位，而不是模拟增益（或衰减）精度。

基本上，8 位数字化器只在 DC 和低频率或低速信号斜率上提供 8 个有效位的精度。在被数字化的信号频率或速度提高时，数字化性能会下降到越来越低的有效位值。

这种数字化器性能下降表现为数字化信号上的噪声水平提高。这里的“噪声”是指输入信号和数字化输出之间任何随机误差或伪随机误差。数字化信号上的这个噪声可以用信噪比 (SNR) 表示：

$$SNR = \left( \frac{rms\_signal}{rms\_error} \right)$$

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。有效位 (EB) 与它们的关系为：

$$EB = \log_2 (SNR) - \frac{1}{2} \log_2 (1.5) - \log_2 \left( \frac{A}{FS} \right)$$

其中：A 是数字化信号的峰峰值输入幅度，FS 是数字化器输入的峰峰值满标度范围。其它常用公式包括：

$$EB = N - \log_2 \left( \frac{rms\_error}{ideal\_quantization\_error} \right)$$

其中 N 是数字化器的标称（静态）分辨率；以及

$$EB = -\log_2 \left( rms\_error * \sqrt{\frac{12}{FS}} \right)$$

注意，所有这些公式都基于数字化过程生成的噪声或误差水平。在公式 3 中，“理想的量化误差”项是理想的输入信号 N 位数字化中的 rms 误差。公式 2 和公式 3 都是 IEEE 数字化波形记录器标准 (IEEE std. 1057) 规定的。公式 4 则是公式 3 的变形，其假设理想的量化误差在一个最低有效位 (LSB) 峰峰值上呈均匀分布。这一假设允许用下面的公式替换理想的量化误差项：

$$\frac{FS}{2^n * \sqrt{12}}$$

其中：FS 是数字化器的满标度输入范围。

对这些公式，要注意的另一点是它们都基于满标度信号 (FS)。在实际测试中，可以使用小于满标度（如 50% 或 90%）的测试信号。这可以改善有效位结果。因此，任何有效位指标比较或测试都必须考虑测试信号幅度及频率。

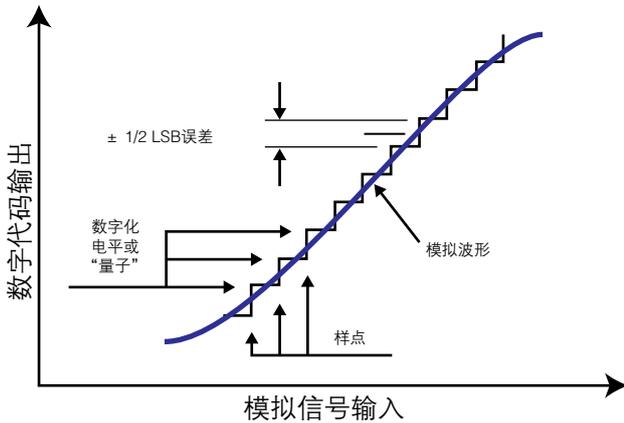


图 18. 量化误差。

分辨率或有效位 (N)	量化电平	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. 数字化器的误差为  $\pm 1/2$  LSB。

### 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源于各种来源。即使在理想的数字化器中，量化仍会导致最低的噪声或误差水平。这种“量化误差”等于  $\pm 1$  LSB (最小的两个有效位)。如图 18 和表 1 所示，这个误差是数字化固有的部分。它是与理想的数字化有关的分辨率极限或不确定度。除这个基本理想误差本底外，实际生活中的数字化器还增加了进一步的误差。实际生活中的进一步误差可以归成几大类：

- DC 偏置 (也称为 AC 偏置或“码型”误差，有时称为“固定码型失真”，其与隔行扫描采样方法有关)
- 增益误差 (DC 和 AC)
- 线性度 (模拟) 和非单调性 (数字)
- 相位误差
- 随机噪声
- 频率 (时基) 不准确度
- 孔径不确定度 (采样时间抖动)
- 数字误差 (如由于亚稳定状态、代码丢失等等导致的数据丢失)
- 其它误差来源，如触发抖动

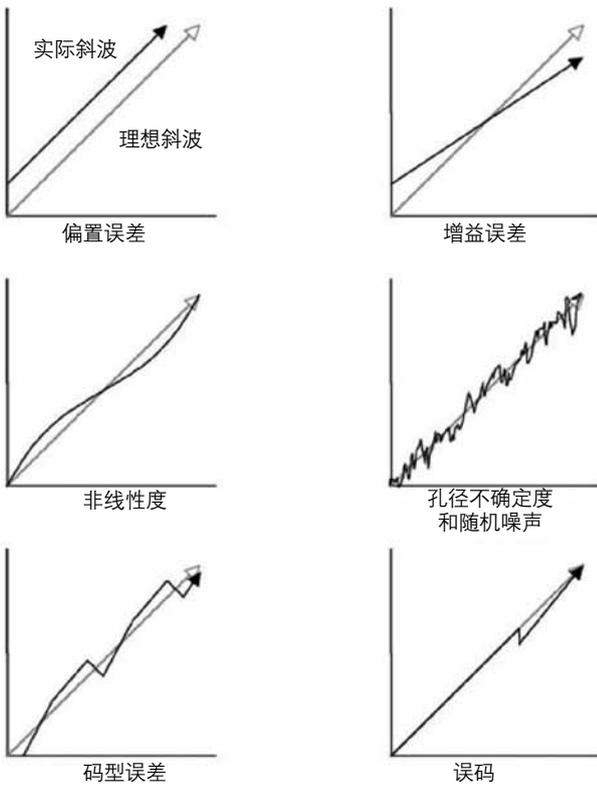


图 19. 典型模数转换误差。

图 19 说明了部分比较基本的误差类别，您可以概括地了解这些误差的影响。数字化器中遇到的许多误差是指定的或与任何放大器或模拟网络有关的典型误差类型。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中的任何地方，从模拟波形输入直到数字化波形值输出。

## 技术简介

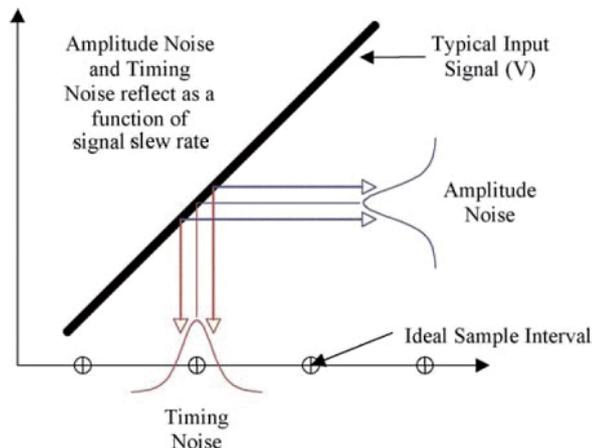


图 20. 孔径不确定度或采样抖动会导致幅度误差，幅度误差是转换速率和定时抖动的函数。

类似的，幅度噪声可能会影响定时测量。

另一方面，孔径不确定度和时基不准确度则是波形数字化伴随的采样过程相关的现象。图 20 说明了孔径不确定度的基本概念。

在图 20 中，必需注意孔径不确定度会导致幅度误差，误差量级与斜率有关。信号斜率越陡，时间抖动样点导致的幅度量级越大。孔径不确定度只是有效位在较高信号频率或斜率时下降的众多原因中的一个原因。然而，孔径不确定度以图形方式有效说明了输入信号频率和幅度相关问题。

为进一步了解孔径不确定度的影响，应在正弦波过零点上对正弦波幅度采样。对低频正弦波，过零点上的斜率很低，导致孔径不确定度产生的误差最小。然而，在正弦波频率提高时，过零点上的斜率也会提高。结果对相同数量的孔径不确定度或抖动，幅度误差会加大。误差越大，SNR 越低，有效位则会下降。换句话说，数字化器的性能会随着频率提高而下降。下面的公式说明了这一关系：

$$f = \frac{1}{\sqrt{6} * \pi * \Delta t * 2^N}$$

在公式 7 中，f 是以给定 rms 孔径不确定度  $\Delta t$  数字化成 n 位的满标度正弦波的频率。如果孔径不确定度保持不变，频率提高，那么位数 n 必须下降，以保持公式 7 中的等式。

然而，有一种方式可以针对频率提高实现所需的位数 n 下降。这要追溯到图 20 中所示的概念。如果正弦波的幅度从满标度下降，那么过零斜率会下降。因此，幅度误差下降，导致更好的有效位数。在比较各种数字化器的有效位数时，这指明了一个重要事实。有效位不仅依赖于频率，还依赖于测试波形的幅度。任何数字化器的一对一测试或比较必须包括输入波形的幅度（一般是满标度的 50% 或 90%）及频率指标。

另外还要指出的是，输入放大器滚降时，采集后滤波和其它处理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环境中真实的动态性能。

### 有效位对您有影响吗？

这在很大程度上取决于您要测量的是什么，有效位是否对测量结果有影响。高速串行数据在非常特定的频率上有谐波，可能会传送通过测量系统，大部分不受有效位下降影响。知道在测量中选择使用的仪器的有效位性能在仪器整个额定带宽中的表现非常重要。然后，您才能知道性能是否足以满足自己的需求。

### 小结

作为主打指标，带宽说明了示波器复现波形实际特点的能力，但并不能代表一切。阶跃响应、上升时间、下降时间、畸变和带内平坦度及相位响应提供了与测量系统实际保真度有关的多得多的信息，在您希望考察波形细节时，要记住垂直偏置和触发电平范围及优秀的过载恢复功能可以以预期方式查看这些细节。还有，别忘了探头负荷效应，特别是从信号尖端和地线适配器。

采样率是另一个主打指标。在拥有适当数量的采样率时，与采集的样点之间的正确内插相结合，再加上适当的触发到采样时间校正，您可以不用太担心采样不足导致的假信号效应。在使用带宽和上升时间增强数字信号处理时，应确保其为您提供所需的信号保真度。最后，应确保测量系统的有效位满足测试信号的信号完整性要求。

**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) 5795 0700  
传真: (86 10) 6235 1236

**泰克上海办事处**  
上海市徐汇区宜山路900号  
科技大楼C楼7楼  
邮编: 200233  
电话: (86 21) 3397 0800  
传真: (86 21) 6289 7267

**泰克深圳办事处**  
深圳市福田区南园路68号  
上步大厦21层G/H/I/J室  
邮编: 518031  
电话: (86 755) 8246 0909  
传真: (86 755) 8246 1539

**泰克成都办事处**  
成都市锦江区三色路38号  
博瑞创意成都B座1604  
邮编: 610063  
电话: (86 28) 6530 4900  
传真: (86 28) 8527 0053

**泰克西安办事处**  
西安市二环南路西段88号  
老三届世纪星大厦26层C座  
邮编: 710065  
电话: (86 29) 8723 1794  
传真: (86 29) 8721 8549

**泰克武汉办事处**  
武汉市解放大道686号  
世贸广场1806室  
邮编: 430022  
电话: (86 27) 8781 2760/2831

**泰克香港办事处**  
香港九龙尖沙咀弥敦道132号  
美丽华大厦808-809室  
电话: (852) 2585 6688  
传真: (852) 2598 6260

#### 有关信息

泰克公司备有内容丰富的各种应用文章、技术简介和其他资料, 并不断予以充实, 可为从事前沿技术研究的工程师提供帮助。请访问泰克公司网站 [cn.tektronix.com](http://cn.tektronix.com)



©2010 年泰克公司版权所有, 侵权必究。泰克产品受到已经签发及正在申请的美国专利及外国专利的保护。本文中的信息代替以前出版的材料中的所有信息。本文中的技术数据和价格如有变更, 恕不另行通告。TEKTRONIX 和 TEK 是泰克公司的注册商标。本文中提到的所有商号均为各自公司的服务标志、商标或注册商标。