



泰克 4 系、5 系和 6 系列 MSO 混合信号示波器

# 提高垂直分辨率 改善测量精度

白皮书—Josh O'Brien & Brandon Gould



## 引言

提高垂直分辨率一直是示波器设计者的目标，因为工程师需要测量更精细的信号细节。但是，想获得更高垂直分辨率并不只理论上增加示波器模数转换器（ADC）的位数就能实现的。泰克 4、5 和 6 系列示波器采用全新的 12 位 ADC 和两种新型低噪声放大器，不仅在理论上提高分辨率，在实用中垂直分辨率性能大大提升。这些颠覆式的产品拥有高清显示器和快速波形更新速率，并且实现更高的垂直分辨率来查看信号的细节。

本文重点介绍泰克 4、5 和 6 系列 MSO 设计者实现更高分辨率采集细节所采用的技术，另外还介绍了有效位数（ENOB）指标，以及这一重要性能指标的作用和局限性。如需进一步了解多采集技术，如波形平均，更详细地了解 ENOB，请参阅本文文末给出的参考资料。



图 1: 6 系列 MSO 采用 12 位 ADC、信号处理和低噪声前端实现高垂直分辨率。

## 需要更高的垂直分辨率

在数字示波器对信号采样时，ADC 会把信号分成多个垂直二进制数据（有时称为模数转换电平或量化电平或最低有效位（LSB））。每个二进制数据表示一个离散的垂直电压等级，二进制数据越多，分辨率越高。这些模数转换等级在 ADC 中表示为  $2^N$ ，其中  $N$  表示位数。

## 先来看一个电源开关实测对比

在这个例子中，我们想要观察一个相当大的开关信号上的周期性振荡。开关电路在每个周期后会产生振荡，我们的目标是检查这些振荡。但与开关信号的幅度相比，振荡相对较小。图 1 显示了使用不同垂直分辨率示波器进行相同测试的结果。为了看到整个开关周期，垂直刻度必须设置为大约 1V/ 分以将信号适应显示的 10 个刻度。



图 1: 使用 8 位 MDO4000C (左侧) 和 12 位 4 系列 MSO (右侧) 示波器放大显示一个切换信号

## 测试结果

图 2 和图 3 显示了两台示波器在相同条件下的测试结果：(采样率为 250MSa/s, 采样点数为 10k, 垂至刻度为 1V)。两台仪器都使用了相同的 IsoVu 光学隔离电压探头，以消除其它探头可能引入的噪声。

可以看到，8 位示波器由于量化级数小而导致在高放大倍数下的结果出现了明显的锯齿状，使得分析振荡变得困难。



图 2. 显示了 MDO4000C 示波器的谐振现象 (分辨率为 8 位)

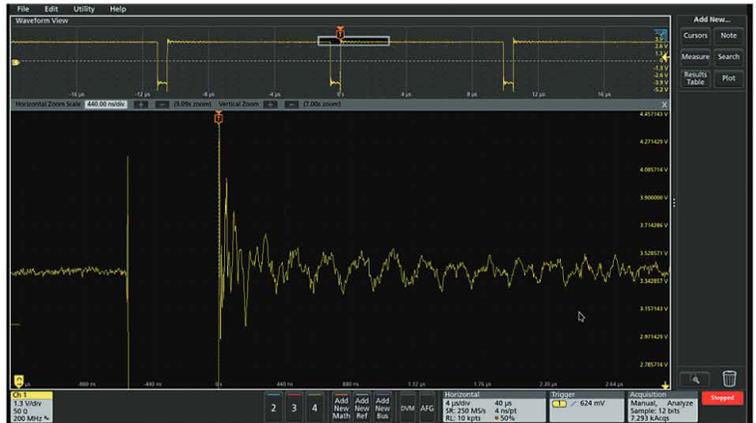


图 3. 显示了新的 4 系列 MSO 示波器的谐振现象 (分辨率为 12 位)

## 需要更高的垂直分辨率

在数字示波器对信号采样时，ADC 会把信号分成多个垂直二进制数据 (有时称为模数转换电平或量化电平或最低有效位 (LSB))。每个二进制数据表示一个离散的垂直电压等级，二进制数据越多，分辨率越高。这些模数转换等级在 ADC 中表示为  $2^N$ ，其中 N 表示位数。

一般正弦波（图 2a）视垂直分辨率会表现出很大的差异。图 2b 是使用 2 位 ADC 转换后的正弦波， $2^2=4$  个模数转换电平。数据可以存储在 4 个不同的垂直二进制数据中：00、01、10 或 11。4 位 ADC 有 16 个模数转换等级，作为 4 位数据存储（图 2c）。因此，模数转换等级越多，分辨率越高，数字示波器表示的信号越接近原始模拟信号。

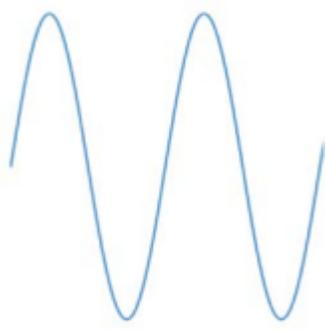


图 2a: 模拟信号

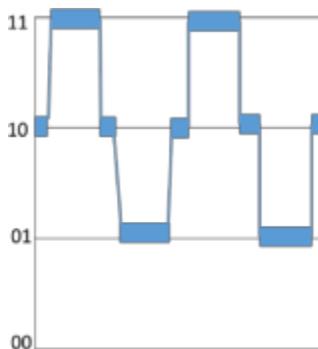


图 2b: 2 位模数转换器

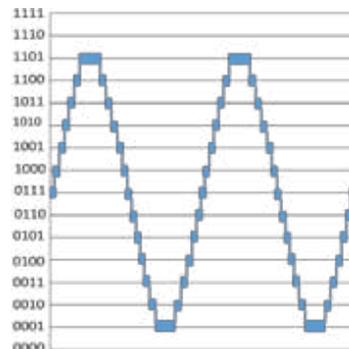


图 2c: 4 位模数转换器

更高的垂直分辨率提供了两个重要优势：

- 清楚地查看信号，并能够放大信号，查看信号的细节。
- 可以更精确地测量电压，这在电源设计验证中尤其关键。

传统数字示波器一直基于 8 位 ADC 技术，大部分工程师在设计工作中通过提高采样率，从而改善水平分辨率。随着时间推移，8 位 ADC 在采样率、噪声性能、低失真方面都得到了优化。但 ADC 本身只能提供  $2^8=256$  个垂直模数转换等级，对于需要更高垂直分辨率的应用来说，比如电源设计，这种垂直模数转换等级可能太粗糙了。

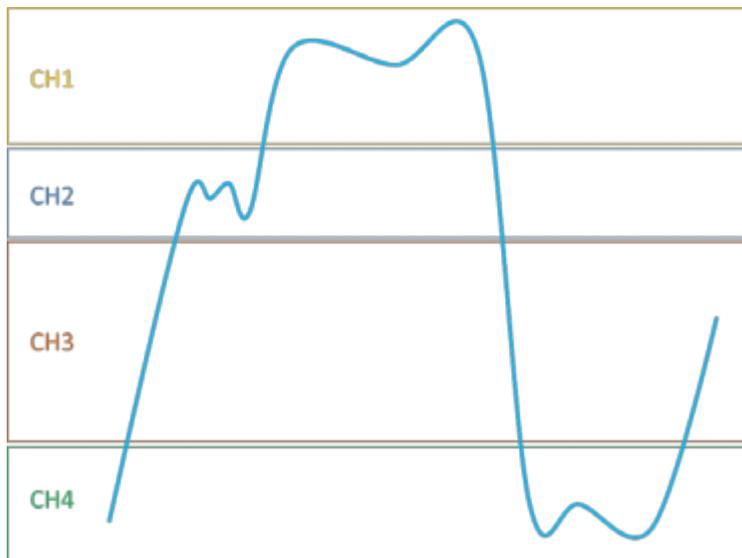


图 3: 把多条示波器通道手动“缝合”在一起，重建信号

在 8 位 ADC 中，查看更多电压细节的一种常用方法是过量程测试 + 多条通道。在这种方法中，多条通道连接到同一个信号，设置电压标度时会故意超示波器输入量程。它会调节每条通道的垂直位置，查看信号的不同部分。然后用户把信号“缝合”回去，从而提高垂直分辨率。如图 3 所示，这种方法会导致失真，因为 8 位示波器的输入放大器可能要费力地从过量程饱和中恢复过来。仪器以这种方式运行时，测试结果一般没法保证。

## 全新示波器 ASIC 实现更高的垂直分辨率



图 4a: 全新泰克 12 位 ASIC  
(TEK049)



图 4b: 全新泰克模拟放大器 ASIC  
(TEK061)



图 4c: 全新泰克模拟前端 ASIC  
(TEK026D)

由于示波器采集系统技术的发展，实现的垂直分辨率较以前的 8 位 ADC 采集系统大大提高。这主要通过是在示波器中实现认真规划的 ASIC 设计来完成。在本白皮书中，我们将说明怎样通过 ASCII 来大幅度改善分辨率：

- 清性能更高的 ADC (12 位)
- 高清显示处理技术
- 改良后的低噪声、高增益模拟前端
- 硬件滤波器，消除固有噪声
- 实现高分辨率触发

## 性能更高的 ADC (12 位)

例如，在泰克 4、5 和 6 系列 MSO 示波器中，有一系列全新 ASIC 发挥着关键作用。第一个是模数转换器 (ADC)。由于全新 ASIC (TEK049) 提供了四个 12 位逐次接近 ADCs (图 4a)，TEK049 ADC 的运行速率达到了 25GS/s，每台 4、5 或 6 系列 MSO 可以有一个或两个 ASIC，具体视通道数量而定。

由于 TEK049 ASIC 内置的是 12 位 ADC，它们提供了 4,096 个垂直模数转换等级，垂直分辨率较以前的 8 位 ADC 高出了 16 倍。在 4 和 5 系列 MSO 中，它们以 3.125 GS/s 提供完成的 12 位样点。在 6.25 GS/s 时，数据通过 12 位 ADC 采集，但存储在 8 位存储内存中，以适应 ASIC 和内存之间的最大传送速率。在 6 系列 MSO 中，它们以 12.5 GS/s 提供完成的 12 位样点。在 25 GS/s 时，数据通过 12 位 ADC 采集，但存储在 8 位存储内存中，以适应 ASIC 和内存之间的最大传送速率。

## 高清显示处理技术，增强波形查看功能

TEK049 ASIC 还采用显示处理硬件，因此 4、5 和 6 系列 MSO 能够支持实时更新速率的大型高清显示器。由于 1920×1080 像素，示波器可以利用更高的 ADC 分辨率，便于查看对工程师来说至关重要的信号细节。在其他示波器中，显示系统把 ADC 代码压缩到提供的垂直像素中，用户看不到 ADC 实际捕获的重要细节。TEK049 还实现了超快速更新速率，支持 16 位色彩深度。这种快速更新速率及灰度等级允许用户检出波形的关键点，对需要精细信号细节的人员，进一步加强了其查看波形的能力。把多种功能融合到一个 ASIC 中，降低了系统噪声，因为处理信号时不必通过 PCB 传输信号。图 5 是上一代示波器芯片组，其功能与全新 TEK049 的功能相同。

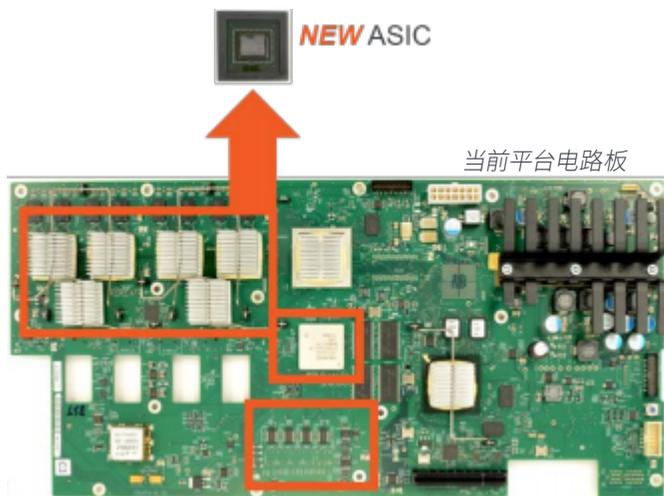


图 5: TEK049 ASIC 把上一代仪器中多块芯片执行的功能融合在一起

## 在高带宽、低 V/Div 设置下降低噪声，提高增益

全新 ASIC 还发挥着关键作用，使得示波器能够支持示波器显示器上的各种满刻度。在 4、5 和 6 系列 MSO 中，前端的放大器和衰减器系统调节增益，一直利用 ADC 满刻度优势。放大器噪声必需非常低，以便利用高分辨率 ADC 的优势，并能够在高带宽和低 V/Div 设置下使用示波器。6 系列 MSO 中的全新 TEK061 ASIC (图 4b) 在高带宽和小垂直标度下提供了行业领先的性能。全新 TEK026D (图 4c) ASIC 适用于 4、5 和 6 系列，保证超低噪声，甚至可以精确探测 1 GHz，而不会从探头放大器中增加噪声。图 6 是该系统的总体框图。

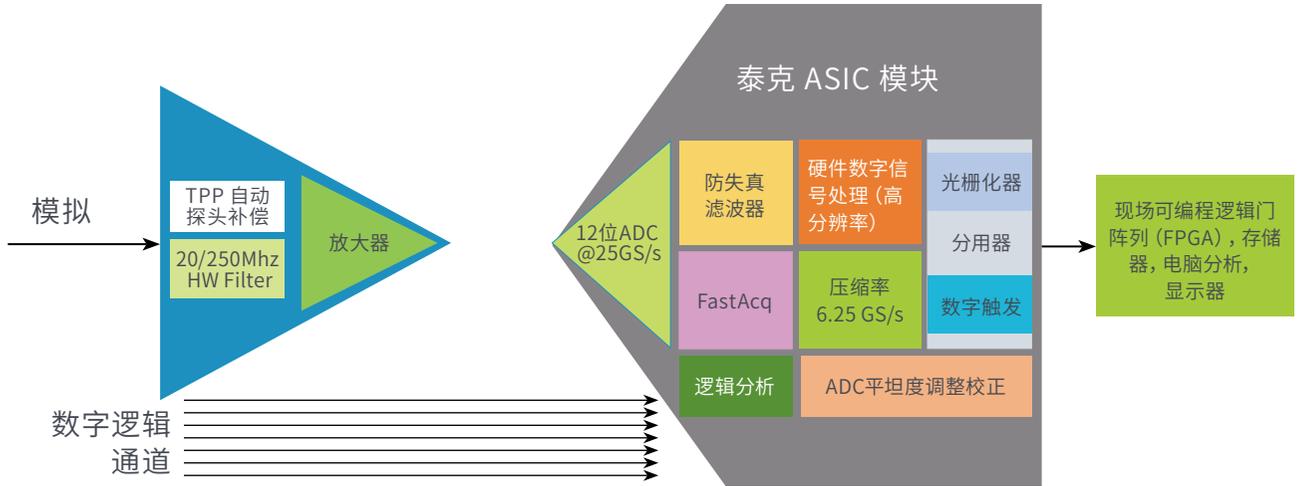


图 6: 4、5 和 6 系列 MSO 一条通道的采集路径

## 硬件滤波器技术改善垂直分辨率

多年来,泰克一直提供减噪技术和垂直分辨率增强功能,在配备 8 位 ADC 的仪器上实现 8 位以上的垂直分辨率。[“多种工具把示波器分辨率提升到 11 位以上”](#) 应用指南中更详细地介绍了这些功能。在本文中,我们重点介绍单次采集可以使用的技术,而不是波形平均或等效时间采样。

一般来说,示波器 ADCs 一直以最大采样率运行,而不管采用什么设置。然后用户可以设置较低的采样率,并压缩(舍弃)样点去存储想要的记录长度 / 采样率的组合。这种模式称为“采样模式”,也就是扔掉多余的样点。泰克一直采用称为高分辨率或“HiRes”模式的方法,来更有效地利用“多余的”样点。样点会进行平均,创建所需的采样率,这个过程通常称为“信号组平均”。每个样点由更多的信息组成,提供了更好的准确度,有效地提高了垂直分辨率。图 7 比较了采样模式与 HiRes (信号组平均) 模式。这种技术目前仍在广泛应用。

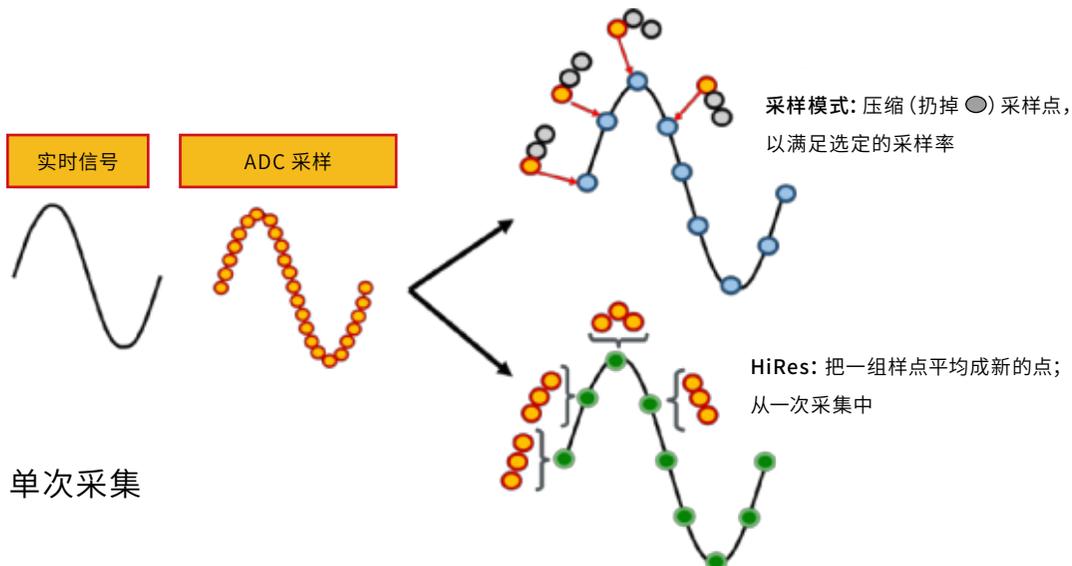


图 7: 采样模式与 HiRes (信号串平均) 模式比较。

通过使用信号组平均技术，垂直分辨率的位数可以提高：

$$0.5 \log D$$

其中：D 是压缩率，或最大采样率与实际采样率之比。

可以预测，改善垂直分辨率的能力受到系统固有噪声的限制。例如，如果 ADC 在通过高本底噪声的放大器 / 衰减器之后采集样点，那么这些点的准确度会下降，抵消信号组平均或传统“HiRes”模式实现的分辨率增强。需要指出的是，在模拟信号调节和 ADC 采样相结合来优化实时信号特点时，高分辨率模式才会实现最好的效果。

4、5 和 6 系列 MSO 在信号组平均或“HiRes”方法基础上作了进一步改进。在传统方法中，高频噪声受到带宽相对较高的防失真滤波器限制。

全新高分辨率模式（也叫 High Res）利用 TEK049 ASIC 中的硬件，不仅执行平均功能，还针对每种采样率实现了防失真滤波器和一套独特设计的有限脉冲响应（FIR）滤波器，确保用户以最高分辨率表示被测的原始信号。

FIR 滤波器对选定的采样率保持最大带宽，防止失真，在超出可用带宽时消除噪声能量。图 8 介绍了滤波器使用方式上的差异。

### 示波器高分辨率信号处理技术比较

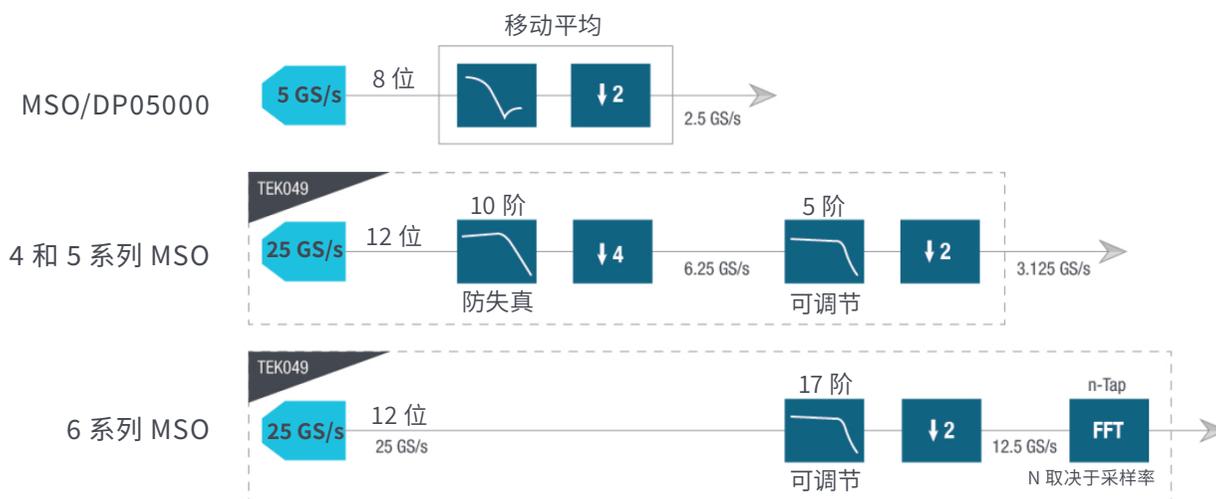


图 8: 与 MSO/DPO5000 相比，4、5 和 6 系列 MSO 的滤波器功能得到明显改善。5 阶和 17 阶滤波器可以调节，具体视示波器设置而定；6 系列上的 FFT（触发后）提供了探头校正功能，确保测量系统的准确性。

在 4、5 和 6 系列 MSO 上，每个滤波器的低通响应是为全面平衡噪声抑制和瞬态阶跃响应而设计的。砖墙滤波器可以实现最大的噪声抑制效果，但不能提供最优的瞬态响应。

吉布斯现象描述了一种效应，大的频响不连续点（如砖墙滤波器）会在系统的阶跃响应中导致振铃和过冲/下冲，如图 9 所示。因此，均衡方法必须考虑限制噪声，而不会引起差的阶跃响应。如果没有认真均衡，那么示波器可能会导致差的噪底指标，但在波形显示中却不能准确地复现信号。

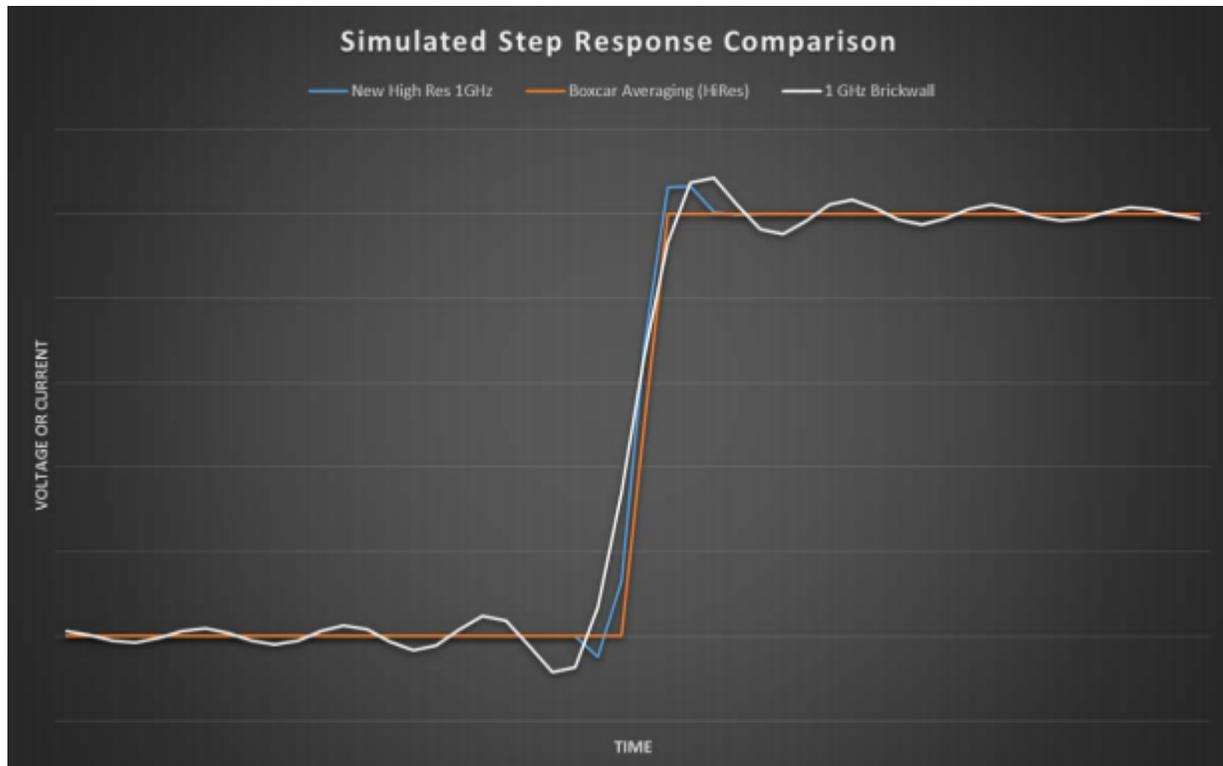


图 9: High Res 模式下矩形信号的阶跃响应

4、5 和 6 系列 MSO 中的 High Res 模式一直提供了最低 12 位的垂直分辨率，在 125 MS/s 或以下采样率时提供了高达 16 位的垂直分辨率。

### ASIC 可以触发并快速显示高分辨率样点

除查看更高分辨率的信号外，用户必须能够放心地捕获事件。因此，示波器的触发系统必须能够处理更高的分辨率，以一致的方式捕获显示的行为。由于 TEK049 ASIC 实时执行 DSP 滤波，使用硬件模块而不是触发系统，因此触发可以基于处理后的高分辨率样点。相比之下，传统 HiRes（信号组平均）方法针对的是存储的样点，而不是触发信号，因此高频瞬态信号或毛刺可能会假触发，在显示的屏幕上看不到。

把新改进的 High Res 平均和滤波与触发紧密集成在一起，还会改善显示模式，如 FastAcq® 波形快速捕获。在这种模式下，仪器每秒可以捕获超过 500,000 个波形，可以与 High Res 结合使用，更好地查看识别对性能至关重要的信号细节，如电源设计验证。图 10 左侧显示了 FastAcq 模式下两个边沿上有噪声的正弦波假触发，右侧显示了打开 High Res 时的 FastAcq 信号。右侧正在触发滤波后的上升沿。

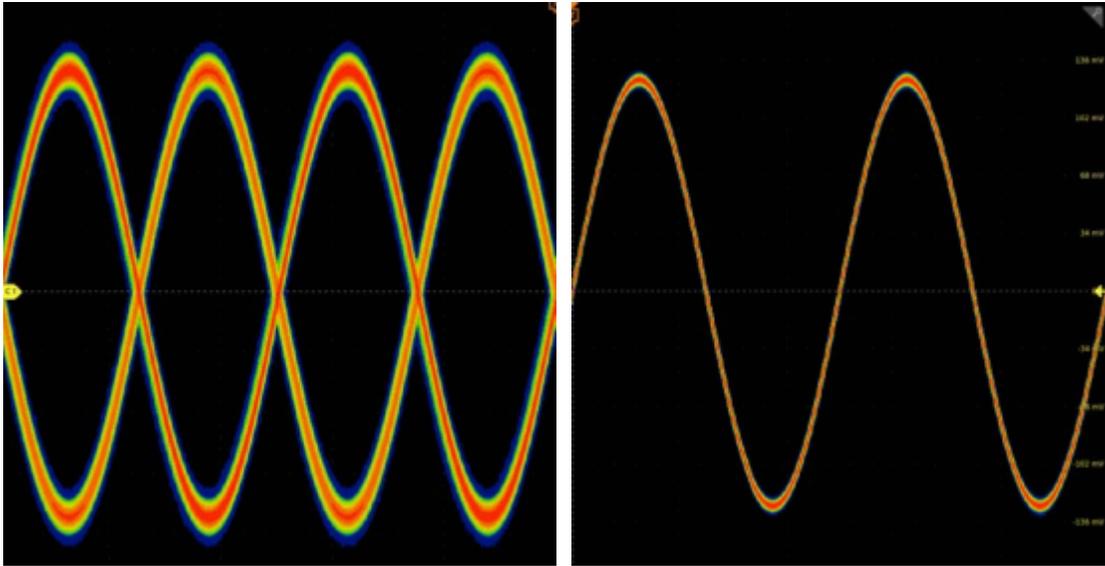


图 10: FastAcq 独立于触发系统应用信号组平均功能，出现假触发(左)。FastAcq 采用新的 High Res 方法，滤波触发(右)。

## 分辨率离开准确度是没有意义的

如果仪器的前端有噪声或容易发生失真，或者如果其采样率发生时间间隔误差，那么分辨率再高也是没有意义的。为了量化有意义的分辨率，除考虑 ADC 中的位数外，还必须考虑失真和抖动。为实现这个目标，电子行业发明了“有效位数”（ENOB）的概念，来考察由于噪声、失真、插补错误和采样抖动导致的误差。

## 什么是有效位数 (ENOB) ？

ENOB 表示模数转换器或示波器提供的等效实用位数，其中考虑了仪器噪声、谐波失真、线性度和采样抖动。它输入质量非常高的信号，然后把模数转换器的输出与该输入进行对比，来实现这一点。泰克采用 IEEE 模数转换波形记录仪标准 (IEEE std. 1057) 规定的方法。由于上述噪声和失真，所以 ENOB 一直低于 ADC 中的位数。一般来说，优质 8 位 ADC 示波器的 ENOB 在 4 位和 6 位之间，具体取决于选择的带宽和垂直标度。拥有 10 位或 12 位 ADCs 的高分辨率示波器的 ENOB 一般在 7 位和 9 位之间。由于 ENOB 考虑的不只是理论 ADC 分辨率，所以它是衡量模数转换系统实际分辨率的更好的指标。

尽管 ENOB 是确定模数转换系统准确度的一个重要因素，但它并不是比较测量质量的万能指标。它不包括 DC 偏置、增益、相位和频率误差。必须单独考虑这些误差，例如，如果进行的测量影响频率性能的准确度，那么更好的指标可能是误差矢量幅度 (EVM)。ENOB 可能会隐藏示波器上频响或平坦度差的问题。

为实现更高的 ENOB，4、5 和 6 系列 MSO 示波器采用了本白皮书前面重点介绍的增强功能：

- 性能更高的 ADC (12 位)

- 性高清显示处理技术
- 改良后的低噪声、高增益模拟前端
- 硬件滤波器, 消除固有噪声
- 实现高分辨率触发

为实现更高的 ENOB, 图 11 对比了来自 1.5 V DDR3 电源的测量截图。左侧是 6 位 ENOB 的传统 8 位示波器捕获的 DDR3 电源测量截图。电源似乎有明显的噪声和部分显著的周期性电压尖峰。右侧显示的是同一电源的测量截图, 但是使用噪声更低、7 位以上更好 ENOB 的高分辨率示波器捕获的。注意与前面的示波器测量相比, 基准噪声大大降低。显著的周期性尖端在幅度上的一致性也大大提高。使用 ENOB 更高的示波器, 有助于更快、更简便地识别问题。在本例中, 来自 1.5 V 降压调节器的 1 MHz 开关噪声是问题根源。

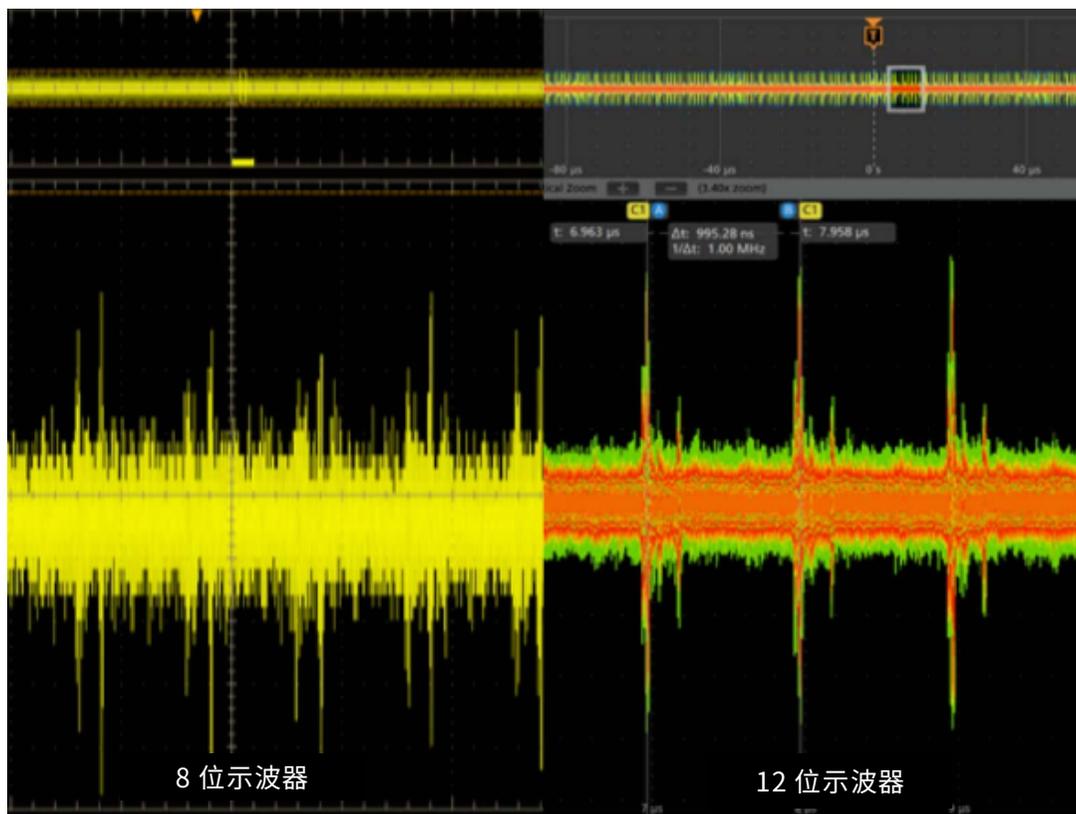


图 11: 8 位示波器 (左) 和 12 位示波器 (右) DDR3 电源比较。

## 总结

示波器中更高的垂直分辨率可以查看重要的信号细节。但是, 提供这种分辨率并不能只靠增加 ADC 的位数。4、5 和 6 系列 MSO 采用多角度方法, 不仅实现了更高的 ADC 分辨率, 还采用数字信号处理、触发系统集成、更高的 ENOB 和低噪声模拟前端, 从而有效地提高了分辨率。

#### 4、5 和 6 系列 MSO 性能与上一代仪器比较

	6 系列 MSO	5 系列 MSO	4 系列 MSO	MSO/DPO5000B 系列
ADC 分辨率	12 位	12 位	12 位	8 位
系统 ENOB	8.8 位	8.2 位	8.2 位	6.0 位
每条通道采样率	25 GS/s	6.25 GS/s	6.25 GS/s	5 GS/s
高分辨率触发系统	是	是	是	-
高级滤波	硬件 DSP 滤波 (High Res)	硬件 DSP 滤波 (High Res)	硬件 DSP 滤波 (High Res)	信号组平均 (HiRes)
探头 + 示波器自动滤波	是	是	是	-
ADC 平坦度调节	是	是	-	-

#### 参考资料

[多种工具把示波器测量分辨率提升到 11 位以上应用指南, 泰克, 2017](#)

[有效位应用指南, 泰克, 2008](#)

[4 系列 MSO 混合信号示波器产品技术资料, 泰克, 2019](#)

[5 系列 MSO 混合信号示波器产品技术资料, 泰克, 2017](#)

[6 系列 MSO 混合信号示波器产品技术资料, 泰克, 2019](#)

