

是德科技

高分辨率示波器评测

在您的 8 位示波器上获得 8 位以上的分辨率

应用指南

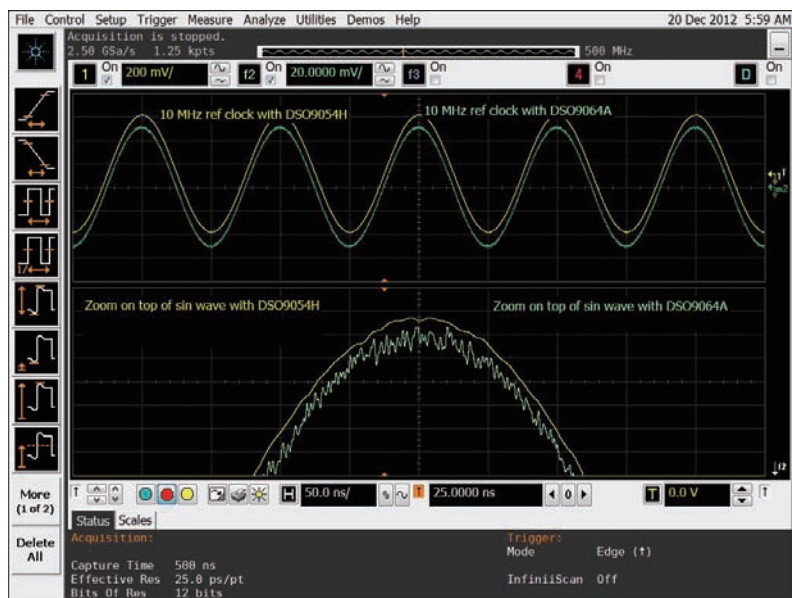


图 1.

图 1 所示的是 8 位分辨率示波器与 12 位分辨率示波器的采集结果对比。两台示波器均与完全相同的低噪声 10 MHz 参考时钟信号相连。放大函数用于对每个捕获波形的顶部进行放大。

示波器的 ADC 对垂直分辨率有何影响？

所有制造商均指定了其示波器的 ADC 位数，分辨率是由示波器中的模数 (A/D) 转换器所确定的最小量化水平。

唯一的数字编码或量级 (Q 级) 的位数是 2^n ，其中 n 是指 ADC 位数。8 位 ADC 具有 256 Q 级，而 12 位 ADC 具有 4096 Q 级。每个示波器 ADC 在示波器的全量程垂直值内工作，因此，Q 电平步进与全标度垂直示波器设置有关。如果用户将垂直设置调整为 100 mV/格，例如全屏等于 800 mV (8 格 \times 100 mV/格)，Q 电平分辨率等于 3.125 mV/电平 (800 mV / 256 电平)。如果测量电流，对于 10 mA/格的垂直设置，Q 电平分辨率设置为 312.5 μ A/电平 (80 mA / 256 电平)。

如果信噪比 (SNR) 足够高的话，ADC 位数越多即表示可以看到的信号细节越小。对于图 2 中所示的增加的分辨率位数的有效性，噪声通常具有更重要的影响。在这个示例中，无论是拥有 12 位 ADC 的 LeCroy HRO66Zi，还是拥有 12 位垂直分辨率的 Keysight DSO9054H，均充分利用了 10 位的分辨率。分辨率的较低两位被整个垂直设置量程的前端噪声所消耗。

在本应用指南中，我们将会讨论：

- 示波器的 ADC 位数和分辨率位数如何区分
- 垂直分辨率与噪声之间的关系
- 高分辨率模式如何工作，何时使用
- 平均模式与何时使用

在过去十年中，示波器技术发展非常迅速，在采样率、带宽和存储器深度等方面都实现了重大的进步。示波器的另一关键技术指标是垂直分辨率。观看额外垂直细节通常是指高动态范围测量。

目前，有几款示波器提供超过 8 位的垂直分辨率。在某些示波器中，在标准 8 位模数转换器 (ADC) 的输出端应用数字信号处理 (DSP) 技术，即可获得这种高分辨率。除此之外，额外分辨率可通过使用 8 位以上的 ADC 来实现。此外，某些示波器借助 8 位 ADC 和 DSP 组合，获得更多位数的垂直分辨率。

示波器的 ADC 对垂直分辨率有何影响？（续）

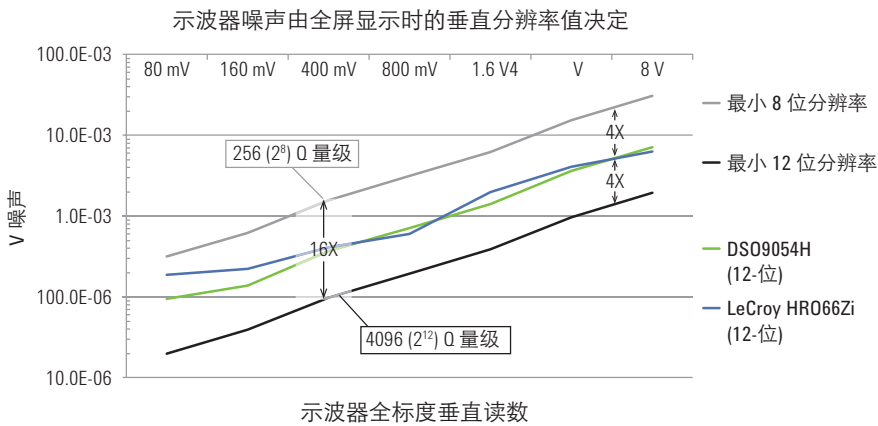


图 2.

“位数”技术指标的实际含义是什么？

“分辨率的位数”是指示波器能够将采集样本映射成多少独一无二的垂直单位。采用这一术语的示波器系列一般使用 8 位 ADC 和 DSP 以实现高于 8 位的分辨率。将示波器设为“高分辨率模式”是告诉示波器进行过采样，并将 ADC 的输出进行数字过滤，以实现更高的分辨率位数。

对于 Keysight Infiniium 示波器来说，N 抽头 boxcar 平均值滤波器是一种最常见的、增加位数的 DSP 算法。平均值除以 2 会增加 1 位分辨率。分辨率位数 r 的一般表达式如方程式 1 所示。

$$r = n + \log_2(N) \text{ 分辨率位数} \quad (1)$$

例如，使用 16 抽头 boxcar 平均值滤波器对 8 位 ADC 中的数据进行处理，可获得 12 位分辨率。

有些制造商倾向于指定“增强位数”。增强位等同于理想 ADC 位，用 SNR 表示。用于提供增强位 m 的方法也能提供相同的理想 SNR（来自于理想的 m 位 ADC）。通过在 n 位 ADC 输出端上应用 boxcar 平均值滤波器，增强位数 m 经由方程式 2 得出。

$$m = n + \log_4(N) \text{ 增强位} \quad (2)$$

例如，64 抽头 boxcar 平均值滤波器对 8 位 ADC 中的数据进行处理，具备 12 位增强分辨率。

ENOB 与分辨率位数和 ADC 位数有何关系？

另一个常用的技术指标是“有效位数”（ENOB）。ENOB 是测量数字化信号 SNR 的量度。方程式 3 给出了 SNR (dB) 的定义。方程式 4 给出了均方根电压 (V_{RMS}) 的定义，适用于计算示波器的 SNR。方程式 5 显示了 ENOB 和 SNR 的关系。

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10}(\text{信号功率} / \text{噪声功率}) \quad (3)$$

$$SNR_{dB} = 20 \log_{10}(\text{信号 } V_{RMS} / \text{噪声 } V_{RMS}) \quad (4)$$

$$ENOB = (SNR_{dB} - 1.761) / 6.02 \quad (5)$$

每增加一个有效位，SNR 就会增加 6.02dB。理想的 8 位 ADC 的 ENOB 是 8，SNR 是 50dB。量化效应会导致理想 ADC 出现噪声。分辨率位数越高的理想 ADC 具有更低的量化噪声和更好的 ENOB。ENOB 随着频率而变化，通常根据特定频率来指定。

在比较示波器技术时，ENOB 是一个重要的品质因数。示波器的全部噪声源和误差源可以降低 ENOB，包括 ADC 量化噪声、ADC 差分非线性、ADC 积分非线性、热噪声、散粒噪声以及输入放大器失真。注意，考虑到上述噪声源和误差源，ENOB 技术指标通常明显低于位数技术指标。以一个 12 位高分辨率数字示波器为例，它在高频率（或同等频率）上的 ENOB 为 8 至 9 位，SNR 为 50dB 至 56dB。

高分辨率波形示例

图 3 显示了支持高分辨率采集模式的数字示波器所捕获的三个波形。输入信号是一个阶梯斜坡信号，通过驱动数模转换器（DAC）和数字计数器生成。上部的网格显示了三个采用标准放大率的波形。下部网格显示了采用 10 倍放大率的全部三个重叠波形，以显示更多垂直细节。顶部波形是以 2.5GSa/s 的速率捕获，并关闭高分辨率采集模式。

高分辨率波形示例 (续)

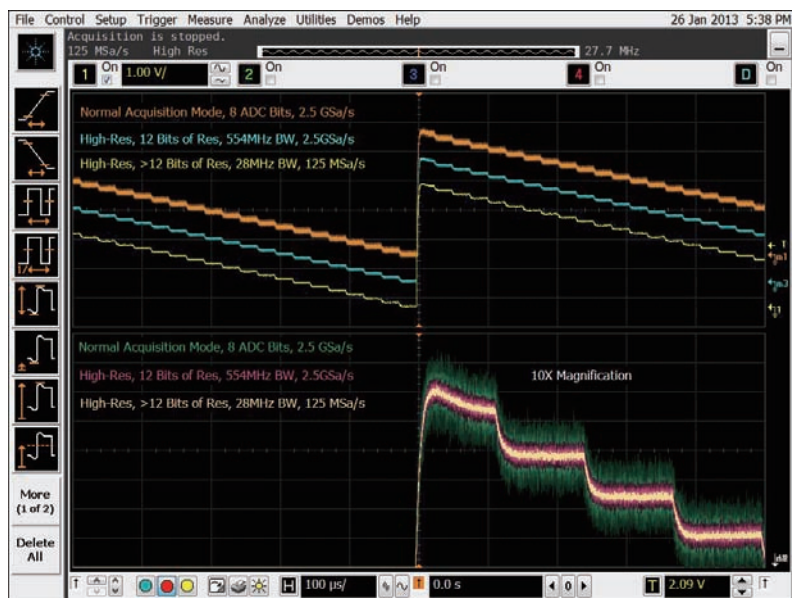


图 3. 高分辨率信号轨迹示例

要注意信号的所有噪声和细节描述的缺乏。在放大 10 倍的视图中，信号细节变得尤为明显。在波形中添加垂直高频振动，以增强显示效果，在这种情况下，量化就变得不易察觉。中间波形是以 2.5GSa/s 的速率捕获，并打开高分辨率采集模式，分辨率设为 12 位。波形带宽是 554 MHz。噪声显著降低。可以查看更多的垂直细节。底部波形是在分辨率超过 12 位的条件下捕获的。将采样率设为 125MSa/s，垂直分辨率超过 12 位，带宽降至 28 MHz，即可实现捕获。对于这个信号，把带宽设为 28 MHz 是充足的，可提供最佳 SNR 和最详细的垂直信息。

示波器采用 8 位 ADC 和 boxcar 平均值以实施高分辨率采集模式，可生成公式 1 中的信号轨迹。方程式 6 显示了 boxcar 平均值滤波器的近似带宽。

$$\text{Boxcar 带宽} \approx 0.4428 F_s / N \quad (6)$$

对于图 3 中间的轨迹，带宽可通过以下方法计算。采样率为 F_s ，boxcar 平均值滤波器的速度是 20GSa/s，分辨率位数是 12 位。使用公式 2，抽头数目是 $2^{(12-8)}$ 或 16 抽头。带宽是 $0.4428 \times 20G/16$ 或 554 MHz。大多数高分辨率示波器能够自动计算和显示带宽。

高分辨率采集体系结构

图 4 是一个通常用于实施高分辨率采集系统的体系结构。带宽限制滤波器在模拟输入信号上运行，可消除高于 Nyquist 频率的信号成分。Nyquist 频率定义为采样频率 F_s 的二分之一。任何高于 Nyquist 频率的信号成分都会向下折回到导通频带，由此造成多余的混叠。

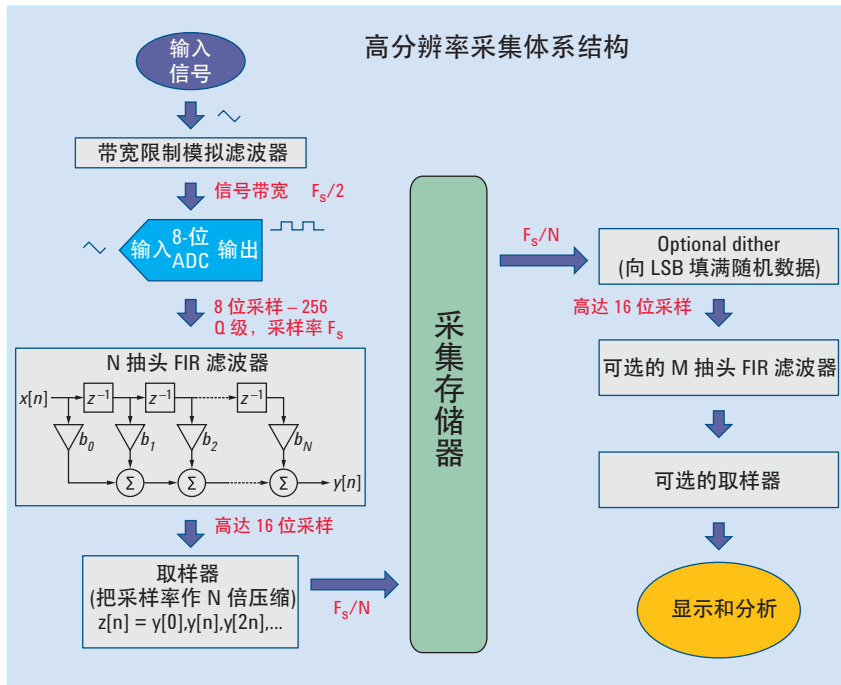


图 4. 高分辨率采集体系结构

在 Keysight 9000 H 系列示波器上，术语“超采样”用于描述采样过程。为避免混叠效应，要求最低采样频率是有限带宽模拟信号的带宽的两倍。超采样表示采样率明显高于这个采样频率。超采样有助于增加垂直分辨率，降低本底噪声。

对于以较低采样率运行的标准全带宽示波器，混叠是一个大问题。把带宽限制滤波器的转折频率设为略高于最大指定带宽的数值，且无法重新配置，因而不支持较低的采样率。在高分辨率体系结构中，进行下采样之前，首先运行 N 抽头低通 FIR 滤波器，即可大幅度减少混叠。滤波器要对信号成分进行衰减，否则信号成分就会在下采样结束后向下折回到导通频带。对于专用的高分辨率示波器而言，混叠不是重要考虑事项，这是因为带宽限制滤波器的转折频率是依据已降低的最大带宽技术指标而设置的。例如，运行高分辨率模式的 4 GHz 示波器可在 500 MHz 频率上获得 12 位分辨率，它必须把转折频率设为 4 GHz 以上，从而支持最大可用带宽。换言之，专用的 500 MHz 高分辨率示波器可将转折频率设为略高于 500 MHz，进而完全消除混叠。

高分辨率采集体系结构（续）

带有均匀抽头加权的滤波器又称为 boxcar 平均值滤波器。Boxcar 平均值滤波器易于实施，并支持极高的输入采样率和多种抽头。但是它的矩形时间响应会在频域内生成 $\text{Sin}(x)/x$ 响应（参见图 5）。

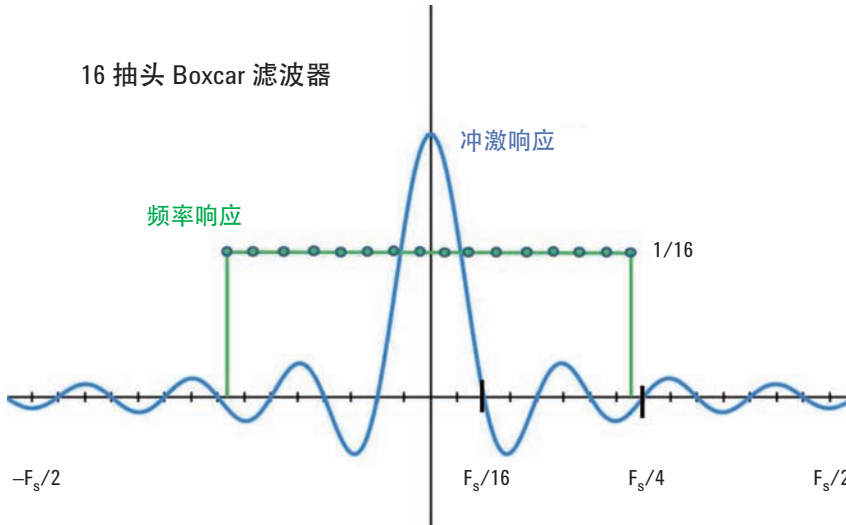


图 5.16 抽头 Boxcar 平均值滤波器的脉冲响应和频率响应

阻带区域中的旁瓣会使超出带宽范围的信号成分向下折回到导通频带，由此产生额外的噪声、混叠与失真。为避免这个现象，有些示波器，例如是德科技的示波器，采用非均匀抽头加权生成更合乎需要的频率响应。

FIR 滤波器后面的取样器可用于支持采集存储器在更长时间的采样操作。在大多数情况下，N 抽头滤波器和取样器集成到一个单元，仅输出一个 N 样本。下采样的频率映像是指它生成多个频率响应，以抽取频率 F_s/N 的整数倍为中心。Nyquist 频率降至 $F_s/(2N)$ 。当频率超过 $F_s/(2N)$ 时，任何在 FIR 滤波器阻带区域内的信号成分向下折回到导通频带，由此产生额外的噪声、混叠与失真。为避免这个现象，有些示波器在采集存储器的输出端应用 M 抽头 FIR 滤波器。M 抽头和 N 抽头滤波器共用这个滤波功能，可获得很高的分辨率平均值，该功能可使 N 抽头滤波器变得更短，并提高给定带宽的采样率。

使用采集平均值改善垂直分辨率

示波器借助采集平均值减少噪声和改善垂直分辨率。启动平均值模式可使示波器对每个捕获波形的垂直幅度值与后继波形的同一垂直采样值求取平均值。示波器允许用户指定对多少个波形求取平均值。与高分辨率体系结构不同，采集平均值不会降低带宽。但它仅针对重复信号进行操作。

采集平均值适用于以下情况：

- 要求使用示波器最大带宽。
- 信号是重复性的。
- 不需要深存储器。
- 要求控制平均数。

高分辨率采集适用于以下情况：

- 不需要示波器最大带宽，或示波器拥有与带宽相关的过量采样率
- 必须通过单次触发捕获信号。
- 要求使用深存储器来捕获长时间信号。

尽管并非所有示波器厂商均支持此功能，不过 Keysight Infiniium 示波器允许同时运行采集平均值和高分辨率采集，可使用户在带宽和吞吐量之间权衡。

使用采集平均值改善垂直分辨率（续）



图 6. 高分辨率对于捕获低噪声 PRBS 信号效果极佳，但采集平均值不会。

图 6 显示了使用 10 位分辨率、2 GHz 带宽的高分辨率示波器捕获的一个 PRBS 信号。图中还显示了使用采集平均值功能（四个平均值）捕获 PRBS 信号。此时，采集平均值会生成一个毫无意义的显示，这是因为 PRBS 信号在捕获时间范围内不属于周期信号。

为什么购买专用的高分辨率示波器？

如果测量应用软件要求更高的垂直分辨率和中等带宽，那么专用的高分辨率示波器，例如 Keysight 9000 H 系列示波器可能是最佳选择。高分辨率示波器利用最新的 ADC 和 DSP 技术，提供出色的分辨率和低噪声性能。混叠将会得到更好的控制，因为原厂可以制作一个可对更高频率信号进行衰减的硬件前端。无需特殊模式或设置，即可实现更高的分辨率。这使得示波器具有易用性的优点。鉴于存档需要，位数和带宽可以自动显示。

myKeysight

myKeysight

www.keysight.com/find/mykeysight

个性化视图为您提供最适合自己的信息！



www.axiestandard.org

AdvancedTCA® Extensions for Instrumentation and Test (AXIe) 是基于 AdvancedTCA 标准的一种开放标准，将 AdvancedTCA 标准扩展到通用测试半导体测试领域。是德科技是 AXIe 联盟的创始成员。



www.lxistandard.org

局域网扩展仪器 (LXI) 将以以太网和 Web 网络的强大优势引入测试系统中。是德科技是 LXI 联盟的创始成员。



www.pxisa.org

PCI 扩展仪器 (PXI) 模块化仪器提供坚固耐用、基于 PC 的高性能测量与自动化系统。



3 年保修

是德科技卓越的产品可靠性和广泛的 3 年保修服务完美结合，从另一途径帮助您实现业务目标：增强测量信心、降低拥有成本、增强操作方便性。

是德科技保证方案

www.keysight.com/find/AssurancePlans

5 年的周密保护以及持续的巨大预算投入，可确保您的仪器符合规范要求，精确的测量让您可以继续高枕无忧。



www.keysight.com/go/quality

是德科技公司

DEKRA 认证 ISO 9001:2008

质量管理体系



是德科技渠道合作伙伴

www.keysight.com/find/channelpartners

黄金搭档：是德科技的专业测量技术和丰富产品与渠道合作伙伴的便捷供货渠道完美结合。

ATCA®, AdvancedTCA®, and the ATCA logo are registered US trademarks of the PCI Industrial Computer Manufacturers Group.

如欲获得是德科技的产品、应用和服务信息，请与是德科技联系。如欲获得完整的产品列表，请访问：www.keysight.com/find/contactus

是德科技客户服务热线

热线电话：800-810-0189、400-810-0189

热线传真：800-820-2816、400-820-3863

电子邮件：tm_asia@keysight.com

是德科技(中国)有限公司

北京市朝阳区望京北路 3 号是德科技大厦

电话：86 010 64396888

传真：86 010 64390156

邮编：100102

是德科技(成都)有限公司

成都市高新区南部园区天府四街 116 号

电话：86 28 83108888

传真：86 28 85330931

邮编：610041

是德科技香港有限公司

香港北角电器道 169 号康宏汇 25 楼

电话：852 31977777

传真：852 25069233

上海分公司

上海市虹口区四川北路 1350 号

利通广场 19 楼

电话：86 21 26102888

传真：86 21 26102688

邮编：200080

深圳分公司

深圳市福田区福华一路 6 号

免税商务大厦裙楼东 3 层 3B-8 单元

电话：86 755 83079588

传真：86 755 82763181

邮编：518048

广州分公司

广州市天河区黄埔大道西 76 号

富力盈隆广场 1307 室

电话：86 20 38390680

传真：86 20 38390712

邮编：510623

西安办事处

西安市碑林区南关正街 88 号

长安国际大厦 D 座 501

电话：86 29 88861357

传真：86 29 88861355

邮编：710068

南京办事处

南京市鼓楼区汉中路 2 号

金陵饭店亚太商务楼 8 层

电话：86 25 66102588

传真：86 25 66102641

邮编：210005

苏州办事处

苏州市工业园区苏华路一号

世纪金融大厦 1611 室

电话：86 512 62532023

传真：86 512 62887307

邮编：215021

武汉办事处

武汉市武昌区中南路 99 号

武汉保利广场 18 楼 A 座

电话：86 27 87119188

传真：86 27 87119177

邮编：430071

上海MSD办事处

上海市虹口区欧阳路 196 号

26 号楼一楼 J+H 单元

电话：86 21 26102888

传真：86 21 26102688

邮编：200083



本文中的产品指标和说明可不经通知而更改

© Keysight Technologies, 2013 - 2014

Published in USA, August 3, 2014

出版号：5991-1617CHCN

www.keysight.com