

利用多种工具，把示波器测量分辨率提高到 11 位以上

应用指南

在进行高分辨率测量时，您可以把数字示波器看作一个整体系统，来改善测量结果。在对示波器工作模式、探头性能特点、过滤技术及整个系统交互方式有了基本了解之后，您可以改善小信号细节的测量效果。本

应用指南介绍了可以增强现代数字示波器中高分辨率波形采集的某些测量和信号处理技术。在了解了这些技术的优点和缺点后，您可以在示波器中实现最好的测量分辨率。

整体系统方法

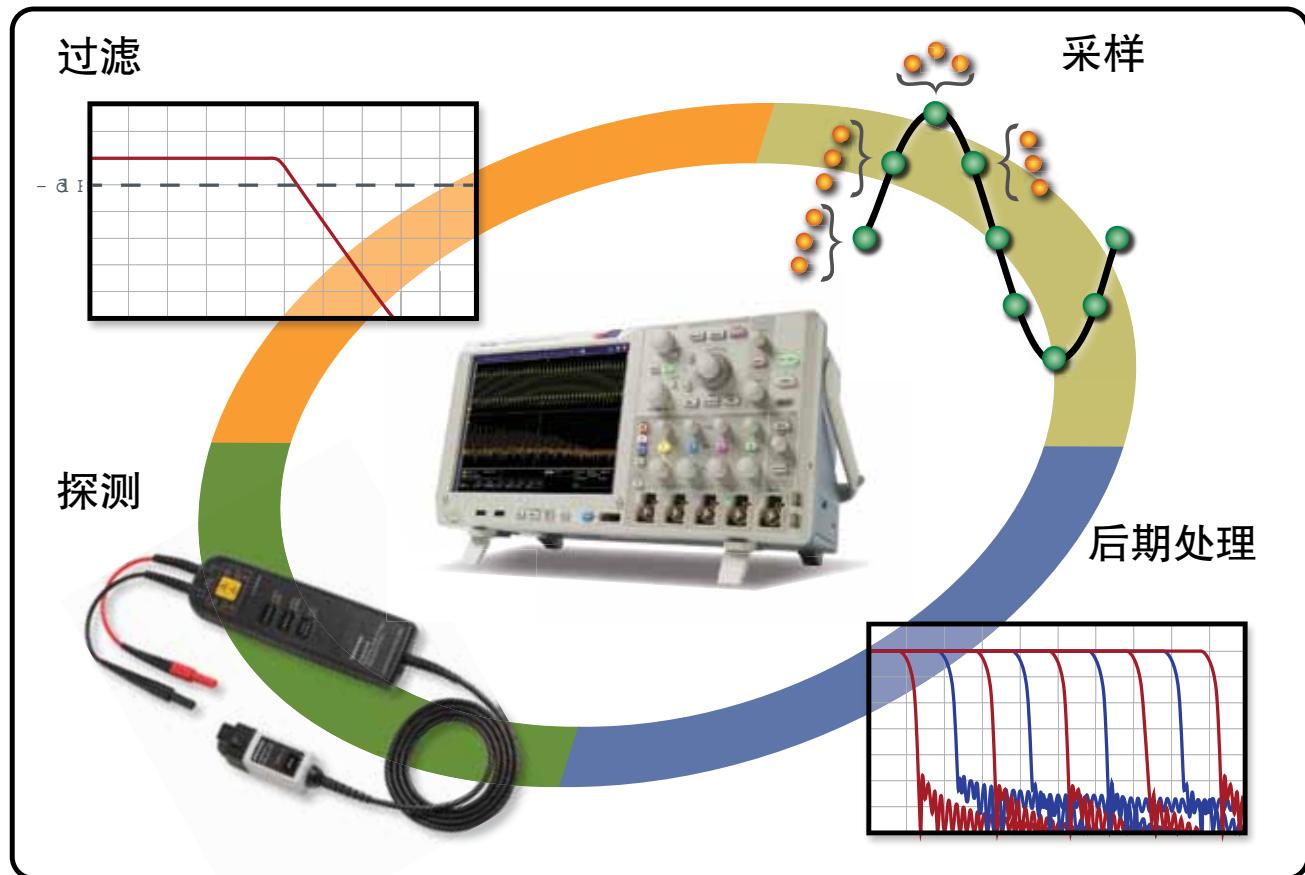


图 1. 为实现高分辨率，必须优化整个测量系统。

为实现高分辨率测量，应把数字示波器看作一个整体系统，而不是简单的模数转换器。必须考虑整条信号路径，从探头尖端，直到示波器的模拟前端、采样和

数字信号处理。图 1 所示的每个系统单元都会影响测量分辨率，可以进行优化，以实现最佳结果。

探测

探头选择和探头设置至关重要

探头的作用似乎很明显，但为实现最优结果，必须进行折衷，特别是在进行高分辨率测量时。示波器标配的无源探头可能并不是实现最佳分辨率的最佳解决方案。

在本应用指南中，我们将概括介绍影响高分辨率测量结果的探测考虑因素。与探测有关的更详细的信息请参阅 www.tektronix.com 网站中的 泰克《探头 ABC》入门手册 (60W-6053-XX)。

最大限度地降低衰减，使信噪比达到最大。在高分辨率测量中，非常重要的一点是使信号幅度达到最大，同时使外部噪声达到最小。探头选择是非常关键的第一步。电压探头与示波器的输入阻抗构成电压分路器（如 1X、10X、100X），一般会衰减输入信号。1X 探头不会降低或衰减信号，10X 探头则会把输入降低到原始信号幅度的 1/10。示波器通过放大信号来补偿这种衰减，遗憾的是，示波器也会放大探头和示波器增加的任何噪声。从信噪比角度看，最优探头应该没有衰减或衰减很低。例如，图 2 所示的 TPP0502 高阻抗无源探头提供了 500 MHz 带宽，但只有 2X 衰减。

使用短线，最大限度地降低噪声耦合。所有电压测量都是相对于参考源进行的，这个参考源通常是“接地”。准确的测量，特别是低压测量，尤其依赖到参考电压的低阻抗路径。为使信号失真和捡拾噪声达到最小，使用的接地应尽量短。尽管标准无源探头上的长地线



图 2. TPP0502 无源探头，500MHz 和 2X 衰减。

会方便浏览，但地线电感会与输入电容谐振，在快速边沿上导致振铃。由探头尖端和地线构成的大的环路区域会把噪声磁耦合到信号中。此外，地线的感性电抗与开关器件等噪声源接近，会把噪声静电耦合到信号中。最好的解决方案是最大限度地缩短地线长度，并尽可能接近信号连接，把它连接到参考点上。

使用内置探头滤波器降低噪声。许多有源差分电压探头和/或电流探头标配带宽滤波功能。有时为灵活起见，探头机身内置的带宽滤波功能提供了多种带宽设置。在某些情况下，在选择其中一个带宽滤波器时，探头会与示波器通信，另外还会在示波器前端打开硬件滤波功能。这进一步降低了系统噪声，有助于提高系统的信噪比。滤掉不想要的噪声可以查看进一步细节，获得更高的测量分辨率。

应用指南

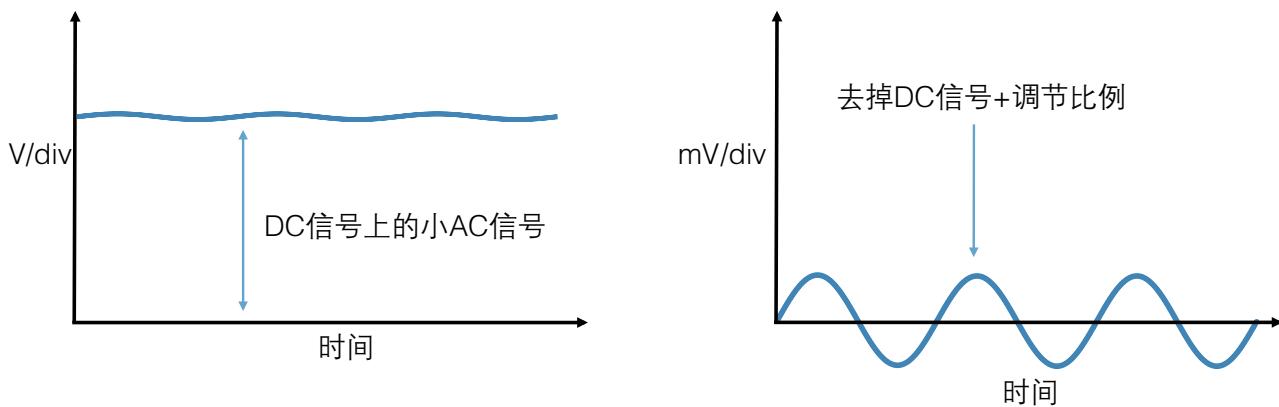


图 3. 左侧 AC + DC 信号。右侧去掉了 DC 分量，成比例缩放 AC 分量，以改善分辨率。

使用 DC 信号测量小 AC 信号

注：在涉及大电压时，人身安全及设备可靠性至关重要，以便检验最大电压完全落在测试系统的“绝对”或“非破坏”最大输入指标内。此外，为准确测量，非常重要的一点是信号要保持在标称工作范围内（如有源探头的线性范围或动态范围内）。

如果说接近地电平的小信号测量极具挑战性，那么测量位于大 DC 分量上的低压 AC 信号的难度则要大得

多。在电源上进行纹波测量是这种应用的常见实例（图 6）。处理 DC 偏置可能会涉及探头设置以及示波器前端设置。

在 DC 偏置上测量低电压信号最简单的技术是使用参考地电平的探头采集整个信号，然后测量 AC 分量（图 3，左图）。这种技术不允许 AC 信号测量全面利用测量系统的动态范围，信噪比会很差。

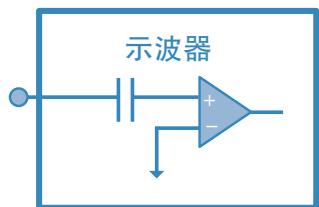


图 4. 示波器输入放大器上的 AC 耦合。

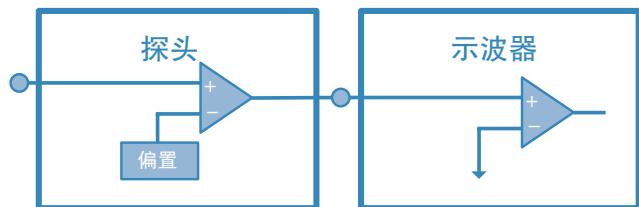


图 5. 在探头中增加 DC 偏置。

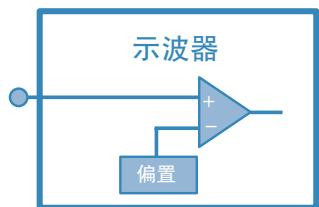


图 6. 在示波器输入放大器中增加 DC 偏置。

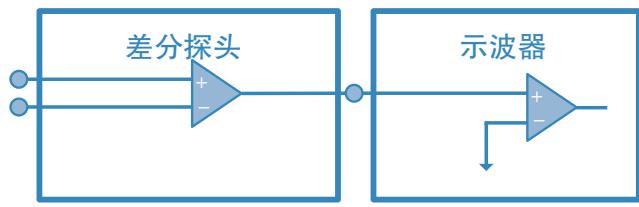


图 7. 差分探头只把 AC 信号应用到示波器输入放大器上。

另一种技术是在示波器输入上使用 AC 耦合（或“DC 封锁”）。通常可以从示波器的通道设置中选择 AC 耦合。它插入一个与输入信号串联的电容器，封锁 DC。AC 耦合特别适合从输入信号中去掉 DC 分量，只要信号没有失真，如把有源探头驱动到最大范围以上。电容器封锁 DC 的效果特别好，但还可以封锁非常低的频率变化，如漂移。最后，可能并不是所有示波器输入端接设置中都提供了 AC 耦合。

一种更好的技术是在放大器上手动增加精密的 DC 偏置电压，以补偿输入信号上的 DC 偏置。可以在有源探头的放大器中增加偏置（参见图 5）。最好使用 DC 偏置，而不是 AC 耦合，因为偏置方式可以看到 DC 电平中的变化，而 AC 耦合会一起封锁 DC。另外，

还可以在示波器的输入放大器中使用偏置。这种方式也特别适合从输入信号中去掉 DC 分量，只要信号还没有失真。

所有上述实例都采用单端或参考地电平探头。在某些情况下，电路中可能会有分量，其中有关心的低幅度信号，但信号在高于或低于地电平的某个 DC 电平上浮动。更好的选择是使用差分有源探头测量经过元器件的关心的信号，而不是使用接地探头，接地探头必须相对于接地测量 DC 偏置。

对差分探头，与探头指标有关的所有指引仍然适用，包括最大电压限制。此外，共模抑制比 (CMRR) 至关重要，因为它代表着探头抑制或忽略信号 DC 分量（或两个输入共同的任何信号）的能力。

应用指南

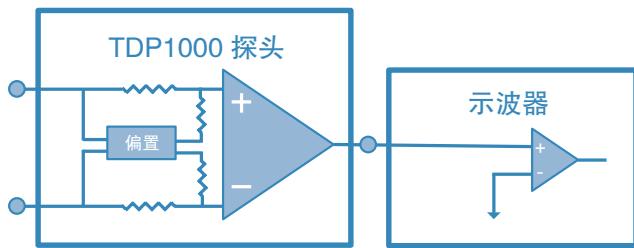


图 8. TDP1000 差分探头中的自动 DC 偏置补偿。

某些高级探头，如泰克 TDP1000 差分探头，利用了差分探头的优势，用 DC 抑制模式替代及改善偏置技术。DC 抑制模式测量输入信号，生成内部偏置，抵消信号的 DC 分量，自动实现偏置过程。由于输入信号一直直接耦合到放大器中，因此 DC 抑制模式不会提高 DC 成分的共模和差模动态范围。

限制输入信号的动态范围

为测量信号在接地周围部分的细节，可以放大波形，信号更高的部分会偏移出屏幕。这是一种好方法，但必须注意，过度驱动探头或示波器输入放大器可能会导致失真，所以要特别小心。有源探头及示波器前端中的放大器是为在线性范围内工作设计的。在线性范围之外，输入信号可能会失真。(产品技术资料中一般会指明有源探头的线性动态范围。示波器的线性范围接近于全屏。) 在信号超过线性范围时，放大器被过速驱动，可能要很长时间才能恢复，这也称为阶跃响应稳定时间。例如，泰克 MSO/DPO70000 系列示

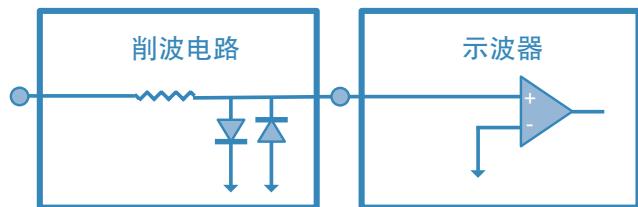


图 9. 把输入信号限定在 0 V(接地) 周围关心区域的简化的削波器电路。

波器指定了三个参数：增益设置（满刻度），稳定误差（%），时间。这些参数指明了满刻度电压范围、屏幕上允许的该范围的百分比、以及波形稳步回到稳定操作所需的典型时间。

在进行高分辨率测量时，一般不推荐过速驱动放大器，超出动态范围。但是，如果测量的信号部分发生在过速驱动条件之前或之后，从而允许放大器全面恢复，那么您可以获得很好的测量效果。您应该考虑使用教科书或行业资料中多种标准信号削波电路之一，而不是过速驱动示波器或探头放大器。图 9 所示的削波器电路通常用来限制进入示波器电压输入。图 9 中的电路用来把输入缩减到高于或低于地电平的二极管下跌水平上，以在关心的点周围实现更高的分辨率（在本例中是地电平周围的小信号），而不会过速驱动 ADC 的线性范围。可以使用类似的电路，使关心的区域偏移到地电平以上或以下。

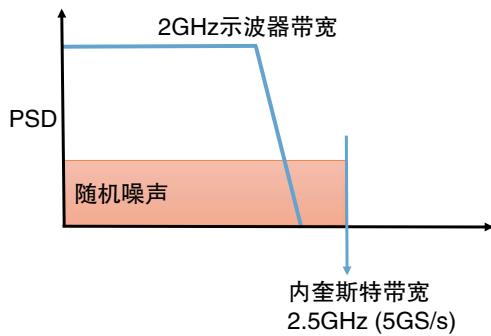


图 10. 内奎斯特带宽及其与随机通道噪声的关系。

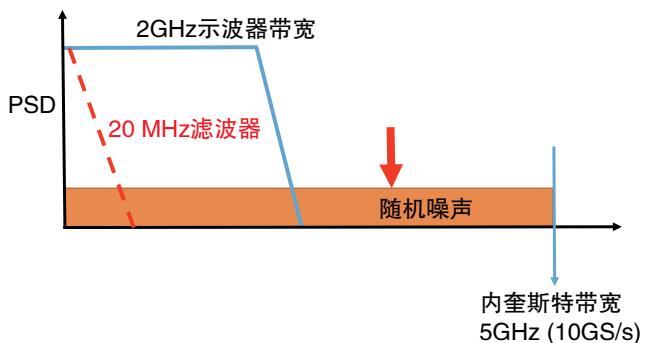


图 11. 更高的采样率分离出随机通道噪声。

滤波

使用硬件带宽限制和采样率降低噪声

在大多数情况下，在高分辨率测量中，噪声的影响要高于 ADC 分辨率。大多数示波器和某些高级探头有一条电路，限制着测量系统的带宽。通过限制带宽，可以降低波形上的噪声，更干净地显示信号，得到更稳定的信号测量结果。噪声大约是带宽的平方根。负面影响是在消除噪声的同时，带宽限制还会降低或消除高频信号成分。许多泰克示波器在垂直通道菜单中提供了 20 MHz 和 250 MHz 模拟滤波器。

数字示波器的采样率也影响着降噪效果。内奎斯特定理指出，为了在所需带宽内复现所有信号成分的准确表示，采样率必须大于带宽的两倍。例如，2 GHz

通道带宽示波器要求至少 4 GS/s 以上的采样率，才能准确表示信号。根据定义，随机噪声包含着所有频率，因此测量通道中随机噪声的功率频谱密度 (PSD) 会均匀分布在内奎斯特带宽内，是选择的采样率的一半。例如，在 5 GS/s 示波器中，内奎斯特带宽是 2.5 GHz，但 2 GHz 处的示波器带宽会滤掉截止频率区域与内奎斯特带宽之间的噪声，参见图 10。

随着采样率提高，随机噪声均匀分布在更宽的内奎斯特带宽范围内。在图 11 中，我们看到一台 10 GS/s 示波器，其拥有 5 GHz 的内奎斯特带宽。随机通道噪声现在分布到 5 GHz 上，而不是 2.5 GHz。如果示波器带宽保持不变，那么净效应是抑制了更多数量的噪声。使用滤波器降低示波器带宽进一步降低了噪声。

采样

使用采样技术提升分辨率

数字信号处理通常用于原始样点，把示波器的垂直分辨率提升到模数转换器 (ADC) 的分辨率之上。波形平均和 HiRes 就是其中两种处理技术。在介绍这些技术前，我们先回顾一些定义。

垂直分辨率一般被视为用来衡量模数转换器 (ADC) 把输入电压转换成数字值的精度水平的指标。但更准确地说，它是转换流程的粒度，用位表示。例如，绝大部分示波器基于 8 位分辨率 ADC，把输入信号的样点表示为 28 个或 256 个离散量化或数字化电平之一。

精密度反映了测量信号幅度的可重复性或一致性。在理论上，N 位 ADC 的分辨率限制着测量系统区分和表示小信号的能力。这种能力可以表示为信噪比 (SNR)。SNR 越好，测量小电压指标的机会更大。

$$\text{SNR} = 6.08 * N + 1.8$$

其中： SNR 是信噪比，用 dB 表示
N 是数字化器中的位数

垂直精度与垂直分辨率

有必要比较一下垂直分辨率与垂直精度。垂直精度反映的是幅度测量结果与信号实际幅度的接近程度。

有些数字示波器采用高分辨率 ADC，表面上看它们的精度要高于 8 位产品，但事实不一定如此。采用 8 位 ADC 及高性能探头和信号处理技术的系统提供的结果可能等同于、甚至好于采用更高位数的 ADC 的系统。DC 精度是一个常用的示波器指标，它指的是仪器能够测量 DC 值的精度。有人认为，在测量 AC 信号时，

DC 精度越好，仪器精度越高，事实不一定如此。示波器和探头的许多其他特点也影响着整体精度。

最后一个、也是复杂得多的指标是有效位数 (ENOB)，这个指标用来衡量仪器在各种频率上准确表示信号的能力。ENOB 是 IEEE 数字化波形记录器标准 (IEEE std. 1057) 规定的。与增益带宽或博德图一样，ENOB 随着频率变化，一般会随着频率提高而下降。这种数字化器性能下降可以描述为信号上随机或伪随机噪声电平提高。误差来源包括 DC 偏置、增益误差、模拟非线性度、转换器非单调性和代码丢失、触发抖动、孔径不确定度 (采样时间抖动) 和随机噪声。有效位数这个课题非常复杂，超出了本文的讨论范围。如需进一步信息，请参阅泰克“有效位应用指南：4HW-19448-XX，网址：www.tektronix.com。

示波器采集模式

在泰克示波器中，“采集模式”一词指波形数据的初始表示，通常是 8 位或 16 位分辨率。所有后续处理操作 (显示、自动测量、光标、数学和应用) 都基于采集模式定义的信号表示。

大多数示波器中默认的采集模式是采样模式。这是最简单的采集模式，在这种模式下，普通示波器以选择的采样率 (直到最大采样率) 用 8 位幅度值表示波形上的每个点。

在测量低压信号时，有两种采集模式非常重要，具体视波形的可重复性而定，因为它们可以用来改善测量分辨率：平均模式和 HiRes 模式。下面几节详细介绍了这两种模式。如需了解怎样使用其他采集模式，请参阅泰克“示波器 XYZs”入门手册：03W-8605-XX，网址：www.tektronix.com。

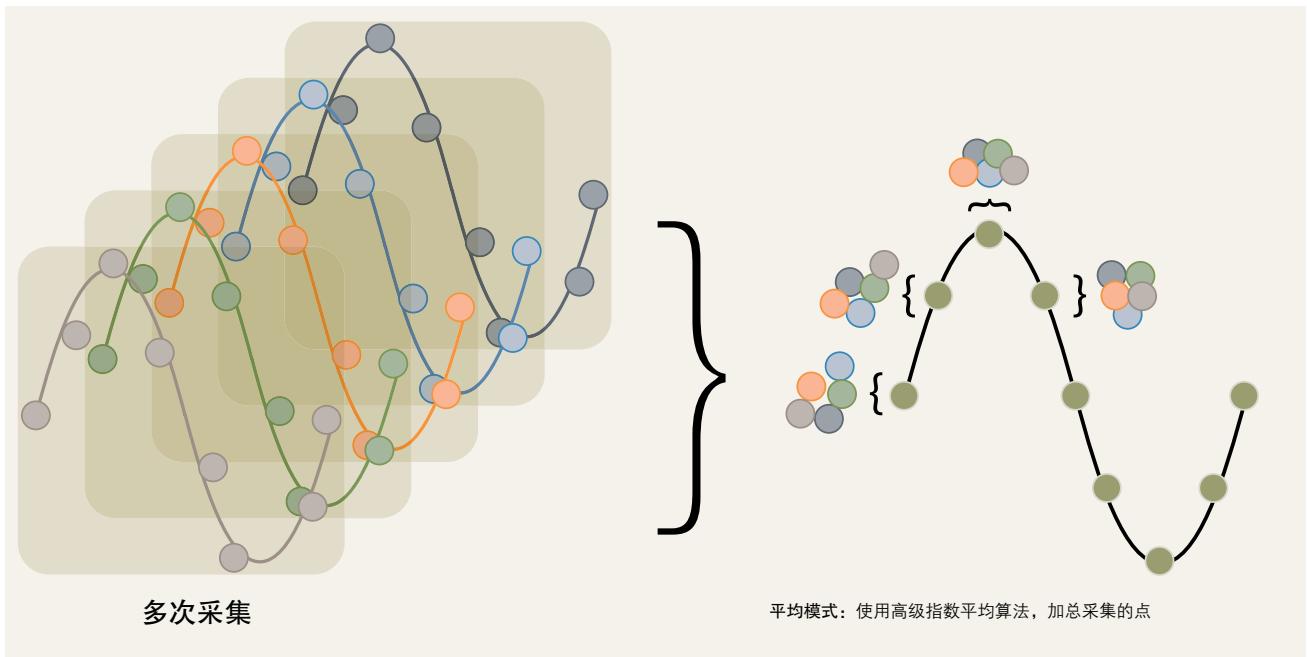


图 12. 平均采集模式在多次采集中计算每个记录点的平均值。

平均

平均模式是示波器采集系统中基本降噪信号处理技术之一。它依赖多次触发采集重复的信号。通过使用来自两次或两次以上采集的数据，这种模式逐点平均采集中对应的数据点，形成输出波形。平均模式改善了信噪比，降低了与触发无关的噪声，提高了垂直分辨率，可以更简便地观察重复信号。

计算平均波形的传统方法是先简单地加总所有采集中对应样点，然后除以采集次数。但是，这种方法要一直等到采集了所需的全部 N 个波形之后，才能显示平均值。耽误的时间对大部分用户是不可接受的，采集数据量会迅速超出示波器的内存容量。

$$A_N = (1 / N) * (x_0 + x_1 + x_2 + \dots + x_{n-1})$$

其中： A_N 是平均的采集中的点

N 表示请求的平均总数

x_n 是 n 次采集中的点

n 表示采集次数

可以修改传统平均算法，每次在采集另一个波形时立即显示结果，解决显示平均的波形时延误时间的问题。但是，数据存储问题依旧没有得到解决。稳定的平均算法为：

$$a_n = (1 / n) * (x_0 + x_1 + x_2 + \dots + x_{n-1})$$

其中： a_n 是当前平均采集中的点

x_n 是新采集 n 中的点

n 表示采集次数

注意，为了得到具体 N 次采集的加总平均值，只需把示波器置入 Single Sequence(单次序列) 模式。在这种模式下，在 n 到达 N 时，采集会停止，平均的波形中包含着具体 N 个采集的波形。

应用指南

泰克示波器采用指数平均算法，可以在每次采集后在显示画面上立即更新结果，明显降低了要求的存储容量。指数平均流程采用下面的公式，从新采集 x_n 和之前平均波形 a_{n-1} 中得到新的平均的波形 a_n ：

$$a_n = a_{n-1} + (1/p) * (x_n - a_{n-1}) = a_{n-1} * ((p-1)/p) + (x_n / p)$$

其中：n 表示采集次数

N 表示请求的平均总数

a_n 是平均的采集中新的点

a_{n-1} 是过去平均的采集中的点

x_n 是新采集中的点

p 是平均因数

如果 ($n < N$)，那么 $p = n$ ，否则 $p = N$

得到的平均后的波形相同，与使用哪种平均算法无关。但要注意，不管是采集的波形还是平均的波形，指数平均算法的效率都要高得多。

这两种算法都可以立即显示波形中一致的趋势效应。您可以在低速信号中看到这一点。如果信号是稳定的，那么您会看到前 N 次采集中噪声连续下降。在 N 次采集后，信号仍将变化，但整体降噪或垂直分辨率不再有改观。平均功能提高了信号的垂直分辨率。这种增强效果用位数表示，与平均总数相关：

$$\text{增强分辨率} = 0.5 \log_2(N)$$

其中：N 表示请求的平均总数

平均数量	增强分辨率 (位)	总垂直分辨率 (位)
1	0.0	8.0
2	0.5	8.5
4	1.0	9.0
8	1.5	9.5
16	2.0	10.0
32	2.5	10.5
64	3.0	11.0
128	3.5	11.5
256	4.0	12.0
512	4.5	12.5
1024	5.0	13.0
2048	5.5	13.5
4096	6.0	14.0
8192	6.5	14.5
10000	6.64	14.64

表 1. 由于平均而增强的垂直分辨率。

表 1 显示了波形平均功能提供的理想的分辨率增强能力。

表 1 中的值也是理想值。在许多泰克示波器中，平均算法是使用固定点数学实现的。平均最大数量是 10,000，因此总分辨率位数限定在最大 14.64。在实践中，固定点数学、噪声和抖动误差会使最大分辨率进一步降低。

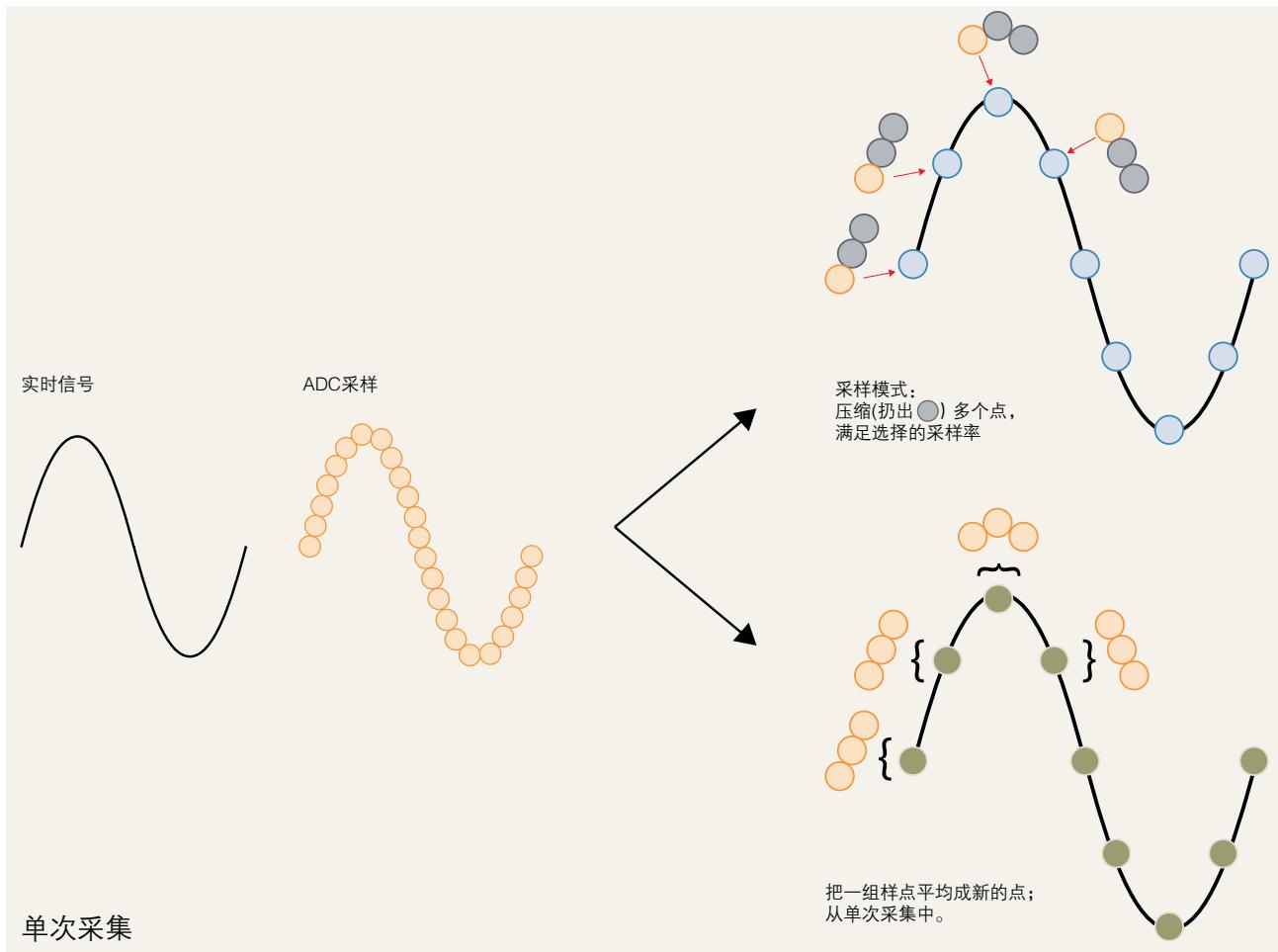


图 13. HiRes 采集模式计算每个采集间隔中所有样点的平均值。

HiRes 采集模式

HiRes 模式是泰克已获专利的采集流程，它计算并显示每个采样间隔中所有顺序样点值的平均值。这种模式提供了一种方法，用过采样获得与波形有关的进一步信息。在 HiRes 模式下，通过获得进一步水平采样信息，可以提供更高的垂直分辨率，降低带宽和噪声。HiRes 处理在定制硬件中完成，以最大限度地提高速度。HiRes 模式较平均模式的一个关键优势，是即使单次采集也可以使用 HiRes 模式。

带宽限制及由于 HiRes 导致的垂直分辨率提高程度会随着仪器的最大采样率和实际（选择的）采样率变化。实际采样率一般显示在屏幕底部附近，最大采样率可以参见产品技术资料。垂直分辨率位数为：

$$\text{垂直位数} = 8 + 0.5 \log_2 (D)$$

其中：D 是压缩比或最大采样率 / 实际采样率

得到的 -3 dB 带宽（除非受到测量系统模拟带宽的进一步限制）是：

$$BW = 0.44 * SR$$

其中：SR 是实际采样率

应用指南

采样率	平均次数	分辨率位数	-3 dB 带宽
5 GS/s	1	8.0	2.2 GHz
2.5 GS/s	2	8.5	1.1 GHz
1 GS/s	5	9.2	440 MHz
500 MS/s	10	9.7	220 MHz
250 MS/s	20	10.2	110 MHz
100 MS/s	50	10.8	44 MHz
50 MS/s	100	11.3	22 MHz
25 MS/s	200	11.8	11 MHz
10 MS/s	500	12.5	4.4 MHz
5 MS/s	1,000	13.0	2.2 MHz
2.5 MS/s	2,000	13.5	1.1 MHz
1 MS/s	5,000	14.1	440 kHz
500 kS/s	10,000	14.6	220 kHz
250 kS/s	20,000	>15	110 kHz
100 kS/s	50,000	>15	44 kHz
50 kS/s	100,000	>15	22 kHz
25 kS/s	200,000	>15	11 kHz
10 kS/s	500,000	>15	4.4 kHz
5 kS/s	1,000,000	>15	2.2 kHz
2.5 kS/s	2,000,000	>15	1.1 kHz
1 kS/s	5,000,000	>15	440 Hz

表 2. 6.25 GS/s 示波器中由于 HiRes 增强的垂直分辨率。

对最大非交织采样率为 6.25 GS/s 的示波器, HiRes 提供了下述性能 (参见表 2)。

对最大非交织采样率为 5 GS/s 的示波器, HiRes 提供了下述性能 (参见表 3)。

采样率	平均次数	分辨率位数	-3 dB 带宽
6.25 GS/s	1	8.0	2.75 GHz
3.125 GS/s	2	8.5	1.38 GHz
1.25 GS/s	5	9.2	550 MHz
625 MS/s	10	9.7	275 MHz
250 MS/s	25	10.3	110 MHz
125 MS/s	50	10.8	55 MHz
62.5 MS/s	100	11.3	27.5 MHz
25 MS/s	250	12.0	11 MHz
12.5 MS/s	500	12.5	5.5 MHz
5 MS/s	1,250	13.1	2.2 MHz
2.5 MS/s	2,500	13.6	1.1 MHz
1 MS/s	6,250	14.3	440 kHz
500 kS/s	12,500	14.8	220 kHz
250 kS/s	25,000	>15	110 kHz
100 kS/s	62,500	>15	44 kHz
50 kS/s	125,000	>15	22 kHz
25 kS/s	250,000	>15	11 kHz
10 kS/s	625,000	>15	4.4 kHz
5 kS/s	1,250,000	>15	2.2 kHz
2.5 kS/s	2,500,000	>15	1.1 kHz
1 kS/s	6,250,000	>15	440 Hz

表 3. 5 GS/s 示波器中由于 HiRes 增强的垂直分辨率。

与平均一样, 表 2 和表 3 中的值都是理想值。在许多泰克示波器中, 平均算法是在硬件中实现的, 采用固定点数学, 得到大约 16 位的最大分辨率值。观察到的分辨率改善程度略低, 会随着应用变化, 但这种信号处理技术对许多应用尤其有效。

本应用指南最后的实例演示了这种技术。

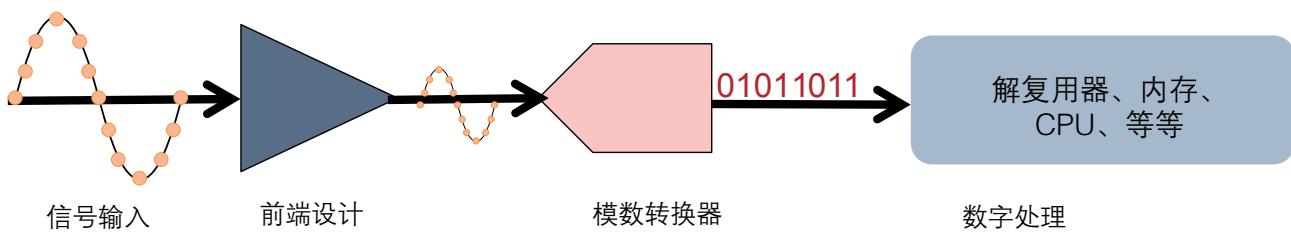


图 14. 应优化所有采集阶段，以实现最佳分辨率和噪声性能。

后期处理

噪声无处不在，需要滤波和优化。本应用指南主要介绍通过优化采集的所有阶段，改善垂直分辨率，降低噪声，进而改善测量分辨率。测量结果取决于多个因素和设置条件。噪声可能来自外部来源、探测，甚至来自示波器本身。尽管差分探测、硬件滤波和采样模式等技术可以降低部分效应，但想进一步增强效果，可以采用用户指定的数字信号处理 (DSP) 滤波器以及数学通道滤波。

本应用指南前面演示了模拟带宽限制技术，可以降低宽带噪声。带宽限制通常和平滑算法一样，也在软件中实现，通常与硬件带宽滤波相结合，帮助防止发生假信号。基于软件的带宽限制滤波器可以提供更多的滤波带宽选择，更好地控制频率和相位响应，实现更锐利的截止频率特点。一般来说，带宽较高的示波器一般提供这些选项，其一般在垂直通道菜单中提供。

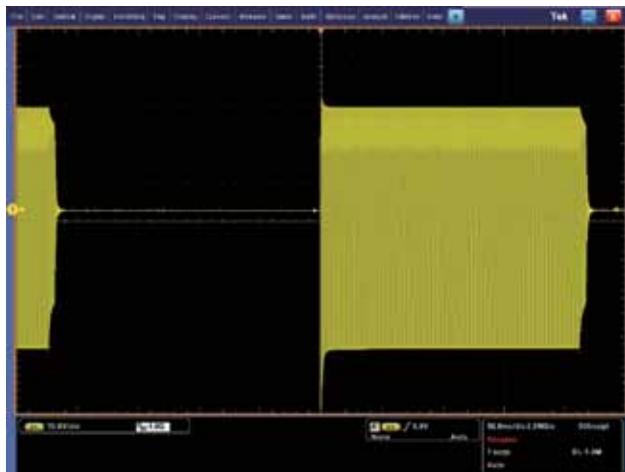


图 15. 电致发光线逆变器 – 650Vpp 大信号。

使用平均或高分辨率模式的测量实例

使用 HiRes 模式测量小信号细节

第一个实例说明了可以怎样使用上面列出的技术，克服存在大信号时测量小信号细节的挑战。这些小纹波、电压变化常见于功率测量和许多其他应用中。在本例中，我们分析了电致发光 (EL 线) 逆变器的输出。逆变器生成规则的突发，以驱动为不同类型的装置、玩具、服装等照明的 EL 线。EL 线基本上是一个铜芯，荧光里包着一条细铜线，在 AC 电流流经铜线时会发出亮光。

在测量这种特殊器件时，其中一个突发包测得 650V 峰峰值，每隔 1.7Hz 发生一次，如图 15 所示。为在示波器中捕获这个信号，我们需要 700V 满刻度 (70V/div * 10 个竖格)。普通 8 位示波器只能看到 256 个数字化电平 (泰克示波器在全部 10 个竖格中是 250 个数字化电平)，分辨率视图仅每个数字化电平 2.8V。遗憾的是，信号基线中丢失了一个超低阻尼信号，其幅度不到几伏特。

在带宽滤波和 HiRes 模式的帮助下，这台示波器可以设置成捕获最高 11 位分辨率。使用硬件滤波器及 HiRes 模式滤除噪声可以提高分辨率位数。如图 16

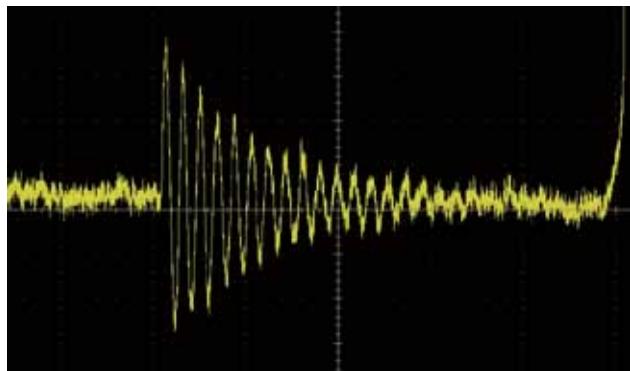


图 16. 电致发光线逆变器 – 大突发包前的小阻尼振铃。

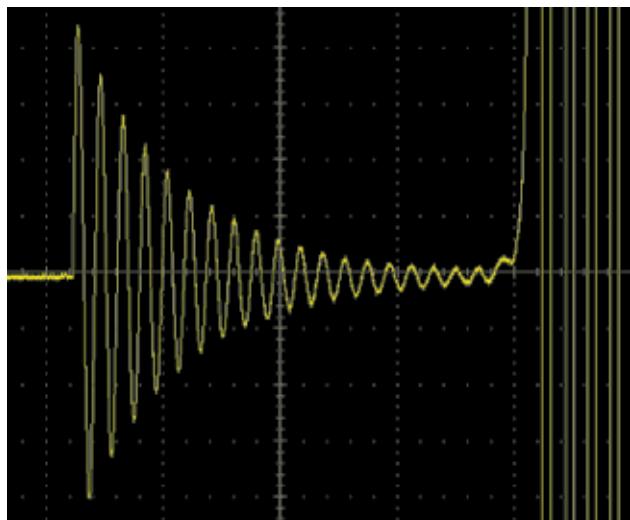


图 17. 过速驱动的电致发光线逆变器信号，可以看到所有振铃。

所示，振铃细节从噪声中分离出来，清晰可见。现在可以查看直到 30mV 的细节！

捕获这种信号的方法之一是双重探测信号，通道 1 设置成 70V/div，另一条通道设置成 1 V/div。这种方法的优点是能够提高垂直灵敏度，以超低噪声看到所需的细节，同时保证更高的测量质量。这种方法的主要缺点是使用两条示波器通道，重复探测，要保证示波器拥有良好的过速驱动恢复性能。在这种情况下，振铃发生在过速驱动部分前面，因此这种技术的效果很好。如图 17 所示，在过速驱动通道上可以清楚地看到振铃的全部细节。

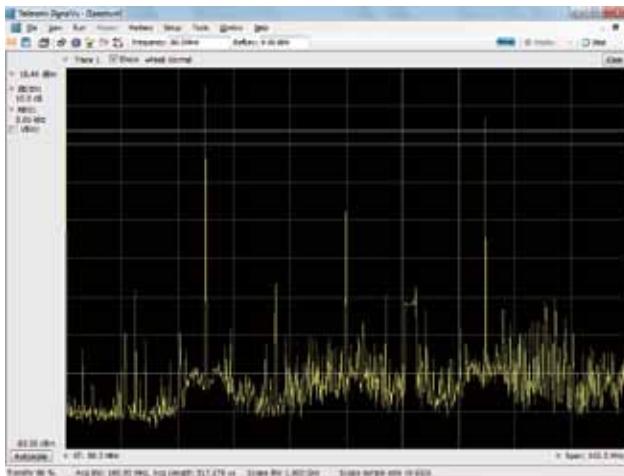


图 18. 40 MHz 数字时钟在采样模式下的频谱，随机基线噪声和其他信号使显示画面变得复杂。

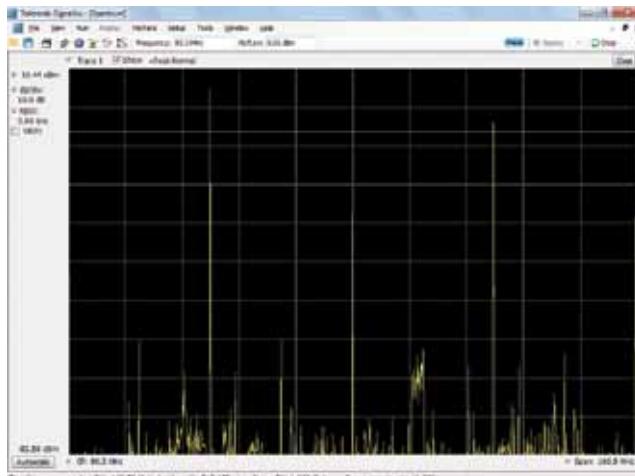


图 19. 40 MHz 数字时钟在平均 64 个波形基础上的频谱，显示谐波要明显清楚得多。

测量 40 MHz 时钟频谱

第二个应用是分析 40 MHz 数字时钟的频谱。数字信号在信号边沿的时间位置中、而不是信号幅度中传送大多数信息 (在越过门限时测得)。波形平均可以非常有效地从这类连续信号中去掉随机噪声。

频谱分析可以非常灵敏地测量平均产生的降噪效果，这在一定程度上要归功于其对数垂直标度。注意图 18 和图 19 中的垂直标度都是 10 dB/div。

在图 19 中，我们可以看到基础谐波和奇数谐波的幅度保持相当恒定，而平均功能把基线噪声降低了 10–20 dB，另外还降低了许多其他分量，因此可以更简便地识别时钟的谐波及其他干扰信号。

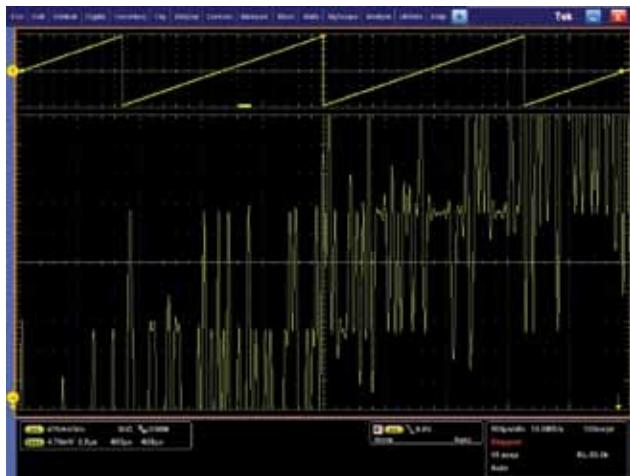


图 20. 高分辨率数字斜坡信号放大后的画面，显示了由于 8 位 ADC 中分辨率有限产生的数字化噪声。



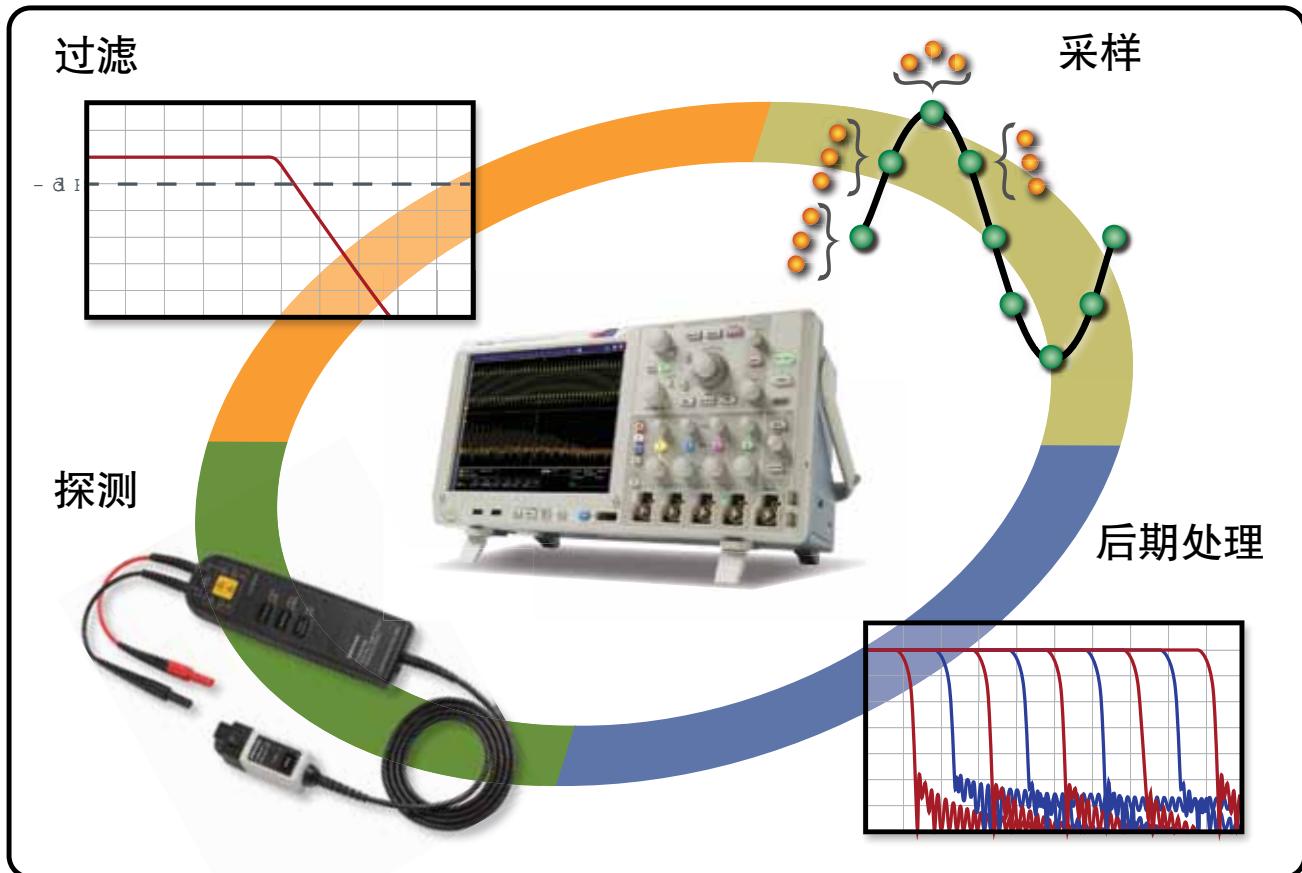
图 21. 同一高分辨率斜坡信号放大后的画面，基于大量的平均，显示垂直分辨率明显高得多。

检验 DAC 分辨率

第三个实例是采用高分辨率 DAC (或在本例中是高分辨率 AWG7000 任意波形发生器) 来改进实际垂直分辨率的方法。图 20 是 10 位垂直分辨率时放大后的斜坡信号画面。尽管在画面下方可以看到离散的 8 位阶跃，但信号上有足够的噪声，偶尔导致 ± 1 个误码。在这种 8 位分辨率下，误码明显要高于斜坡信号上的 10 位阶跃。

图 21 显示波形平均功能明显改善了效果。在这种情况下，数字化噪声中清楚地显现各个 10 位阶跃，演示了在波形平均之类的信号处理技术帮助下，8 位 ADC 能够提供至少 10 位垂直分辨率。

整体系统方法



总结

为获得最好的测量分辨率，我们不能只关心示波器 ADC 的位数，而是需要采用端到端的整体系统方法，限制噪声影响，改善数字分辨率。本应用指南介绍了泰克数字示波器中高分辨率波形采集使用的部分基本

测量和信号处理技术，并使用部分简单的实例介绍了其优势。通过了解这些优点和缺点，您可以更简便地选择及成功地应用泰克示波器和探测解决方案，进行更好的高分辨率测量。

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



©2015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。