

理解示波器带宽 上升时间和信号保真度

介绍

当示波器用户选择示波器进行关键的测量时,示波器的主要参数指标往往是选择哪一款示波器的唯一标准。示波器最主要的指标参数是:

- 带宽
- 采样率
- 记录长度

这些主要的指标中,带宽是在选择一款示波器时第一考虑的指标,毕竟,更多的带宽意味着更高的性能,对不对? 嗯,不一定。本文将用非常简单的假设来解释这个错误的说法。如果你想看到和分析真实的信号,示波器更多的其它性能也是非常重要的。

理解示波器带宽上升时间和信号保真度 技术简介



图 1. 示波器的带宽 VS 频率

带宽 – 这个指标能告诉我们什么？

模拟带宽是一个测量指标，简单的定义是：示波器测得正弦波的幅度不低于真正弦波信号 3dB 的幅度时的最高频率（见的 IEEE – 1057）。图 1 是一个理想的示波器带宽和幅度测量误差的曲线图，从图 1 可以看出，当被测正弦波的频率等于示波器的带宽（示波器的放大器的响应是一阶高斯型）时，幅度测量误差大约 30%。

如果想测量正弦波的幅度误差只有 3%，被测正弦波的频率要比示波器的带宽要低很多（大约是示波器的带宽的 0.3 倍）。由于大多数信号是比正弦波复杂的多，使用示波器测量信号的通用法则是：示波器的带宽是被测信号的频率的 5 倍（在后面解释和见图 5）。

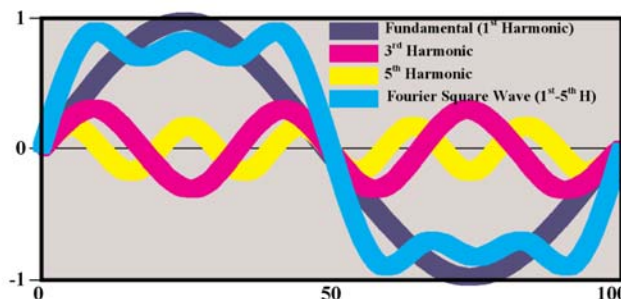


图 2. 数字方波 – 傅立叶级数展开

带宽 – 不能告诉我们什么

最典型的用户选择示波器显示和测量复杂的电和光信号，观测信号在示波器上幅度对时间的显示。模拟带宽，一个示波器重要的指标，它应该定义在频域，而不是在时域。根据采样理论，复杂的信号在频域包含丰富的频谱成分（包含多次正弦波的谐波成分），见图 2。

利用频谱分析，可以看到被采样信号的频率成分，然而，如果要充分描述这些频率成分的特点，就必须知道组成复杂信号的每个成分的准确幅度和相位信息。在这种情况下，带宽除了能够告诉将怎样捕获这些细节，其它什么也不能告诉我们。从带宽的测量角度，我们只知道，输入一个频率和带宽相同的正弦波，示波器的幅度测量误差为 30%。

带宽和上升时间的关系是什么

除了对通用的信号分析,大多数的工程师也有对时间测量感兴趣,如方波的上升时间和下降时间。因此,从指定的带宽可以评估示波器系统的上升时间,我们可以使用下面公式:

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

这里的0.35是示波器带宽和上升时间(一阶高斯模型时的10%-90%上升时间)之间的比例系数,示波器的放大器大多数使用的是一阶高斯型RC低通滤波器的响应模型。使用这个公式很容易计算出 t_r 上升时间,但是,实际往往不是这样的。

图3的表格给出了不同信号标准所需要的测量系统带宽的建议,建议的系统带宽能够保证上升时间或其它测量得到合理的测试精度。注意,仪器系统很多因数都会影响在示波器测试上升时间结果的精度,这些因数包括信号源,探头,以及示波器。

图3表格是假设信号和示波器的测试系统都是一阶响应特性,但是在实际上,特别是今天的高速串行信号,这个假设与实际相差甚远。对于最大平坦包络延迟响应,示波器的带宽和上升时间的关系系数接近0.45。

在图3中,可以看出上升时间和带宽比例系数的变化,20GHz幅频响应模型也发生变化,从简单的一阶响应到32阶响应。16阶和32阶响应类似现在的高性能示波器的响应特性,这类高性能示波器的 t_r/BW 比例系数

Standard	Data Rate	Rise Time (tr)	BW per (.35/tr)	BW for <3% Error
SDH	155Mb/s	2.0 ns	175 MHz	525 MHz
1394	100Mb/s	3.2 ns	109 MHz	328 MHz
1394	200Mb/s	2.2 ns	159 MHz	477 MHz
1394	400Mb/s	1.2 ns	292 MHz	875 MHz
DDR2	400MT/s	150 ps	2.3 GHz	7 GHz
DDR3	1333MT/s	75.0 ps	4.7 GHz	14 GHz
PCIe	2.5Gb/s	50.0 ps	7.0 GHz	21 GHz
PCIe	5.0Gb/s	30.0 ps	11.7 GHz	35 GHz
IBTA	2.5Gb/s	30.0 ps	11.7 GHz	35 GHz

图3 滤波器响应

接近0.4或0.45。对于这样的比例系数,示波器的幅频响应从低频到示波器带宽截止频率的平坦度非常好。另外,如果仪器使用非常好的滤波器,那么它的幅度和相位都会得到较好的补偿,以便以最好的保真度捕获和分析复杂信号。

什么是真正意义上最好的示波器? 两台示波器具有相同带宽性能可以有不同的上升时间,以及不同的幅频响应和相位响应! 因此,只有知道示波器的带宽,将无法可靠地知道其测量能力或其能够准确捕捉复杂信号(像高速串行数据流)的能力。同时,示波器的真实的上升时间和从示波器带宽计算出的上升时间结果是否一致值得商榷。要得到示波器真实上升时间和下降时间,唯一可靠的途径就是利用一个上升时间比示波器快的多的理想阶跃信号去测量。

理解示波器带宽上升时间和信号保真度 技术简介

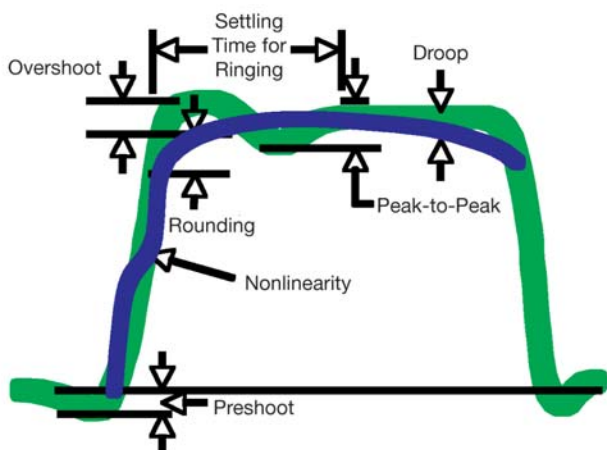


图 4. 阶跃响应的畸变

什么是阶跃响应

实际上，大多数用户需要具有良好的阶跃响应的示波器。带宽，作为一个指标，不能告诉示波器是如何好的复现一个复杂的波形形状。为了验证阶跃响应的性能，需要一个非常好的阶跃脉冲产生器，当示波器在屏幕上复现这个干净的阶跃脉冲(接近理想)，在示波器上显示的偏差被称为波形重建误差(畸变)。

图4和图5 说明了示波器的阶跃响应的畸变和上升时间可能是什么样子的。

你将会容忍所用示波器的阶跃响应与理想的阶跃响应有多大的偏差呢？影响示波器的阶跃响应有四个关键的因素：

- 相应的示波器模拟性能
- 探测的影响
- 采样混淆的影响
- 数字信号处理的影响

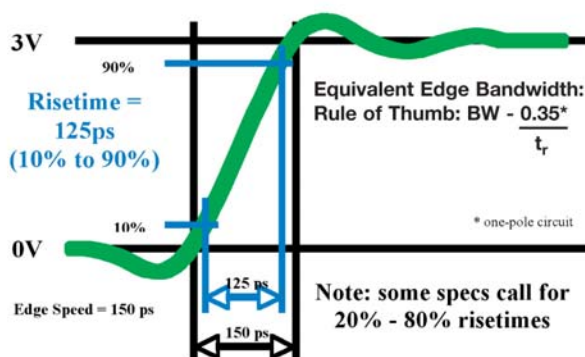


图 5. 阶跃响应上升时间

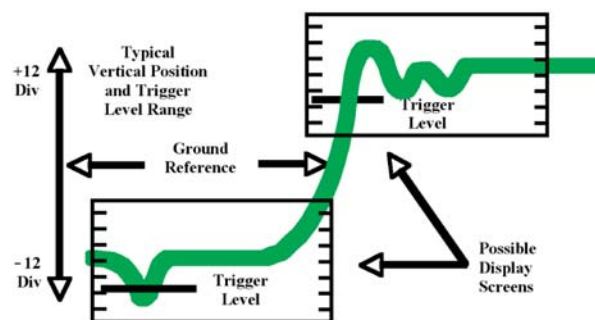


图 6. 垂直位置和触发电平的动态范围

什么是示波器的模拟性能

真实的模拟性能就是模拟示波器电路到模拟至数字(A/D 转换)转换器。这包括垂直输入衰减器以及垂直放大器，位置控制和每个通道的示波器的触发电路。下面讨论，当使用示波器去分析信号完整性细节时，需要考虑这些电路。

当需要展开波形，观测波形细节时，会发现传统垂直位置控制限制。当你每一次改变 Volt/div 控制来展开波形，你必须要重新调节位置。当展开波形某一部分(离参考地很远)，典型的 12 格垂直位置范围限制了展开或者放大的范围。当你重新调整垂直展开的波形位置时，同时还需要保留触发点和时基参考，以便展开的波形的细节能够在屏幕上显示，这就需要考虑触发电平的控制范围，图 6 说明了这些模拟限制。

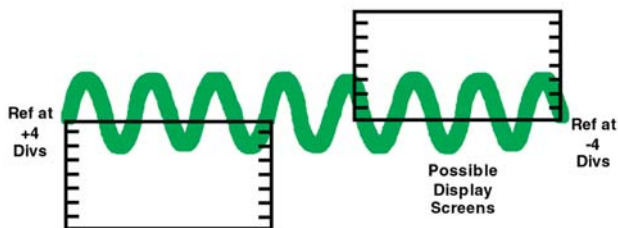


图 7. 垂直位置移动 volt/div 零参考点

当垂直移动波形轨迹位置,也需要移动展开的参考位置(以地为参考),见图 7。

如果“放大”一个波形的细节(这个波形细节不在参考地),需要调节直流偏置控制,见图 8。

垂直直流偏置允许重新定义展开波形的显示参考点,例如,如果“放大”波形的细节(这个细节是脉冲顶部在+5格),简单的设置偏置到+5格,然后改变 volt/div 到需要的灵敏度,而不需要再去调整波形的的位置。偏置控制大大提高示波器的垂直模拟动态范围。

示波器有个缺陷是:“放大”垂直波形细节会导致示波器的垂直放大器和采集系统的过载恢复限制,为了展宽波形部分细节,需要波形一部分调至示波器的屏幕外显示,示波器的垂直系统需要从过载的情况下重新恢复过来。典型的过载恢复能力指标是“1纳秒恢复90%”,这就意味着“2纳秒恢复99%”。泰克 DPO / DSA 系列示波器型号,过载恢复可低至 100ps 恢复 15 格。

真正的模拟性能好不只是带宽。带宽,阶跃响应和畸变影响带内的平坦和相位响应。放大波形细节的能力要求



图 8. 垂直偏置改变 volt/div 参考点(从零到其它电压)

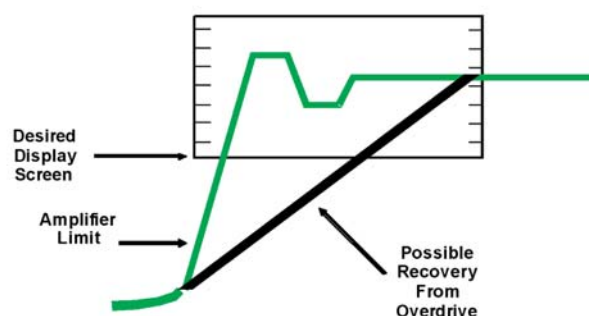


图 9. 过载恢复特性会使得高速波形细节消失

垂直位置控制和偏置控制有足够的动态范围为你的应用。这就意味着示波器的垂直系统应该有足够的系统恢复特性针对测量需求。

任何时间的部分波形超出了模拟数字转换器(刚才所描述的)的范围,对信号的数字信号处理 DSP 是一个的问题不是一个解决办法。使用上述的技术,有能力关闭 DSP 功能对于获取区域波形是非常关键的。DSP 技术给信号带来一些假象。我们将在文章最后再谈论这个话题。

理解示波器带宽上升时间和信号保真度

技术简介

探头怎么影响带宽和上升时间

如果您焊接电阻，电容，甚至电线到一块电路，你知道这些组件会影响那部分电路的信号完整性？当然会影响。这些组成，影响了信号幅度，使信号变缓，影响信号的形状。同样，每一个示波器探头都有一些电容，每个示波器探头都有电阻值，每个示波器探头会影响测量点的信号。探头会改变测试点的信号，这是肯定存在的，关键是对测试点的信号影响有多大。

一个理想的探头以最高保真度地捕获的任何信号，并且对测试点没有任何负载效应。对探头的设计者的要求似乎很清楚：极高带宽，大动态范围，并且不影响信号测试。我们将考虑下面的因素和这些因素对带宽，上升时间，以及阶跃响应的影响。

- 不同需求：不同探头
- 探头带宽和上升时间
- 短前端和选择合适的配件

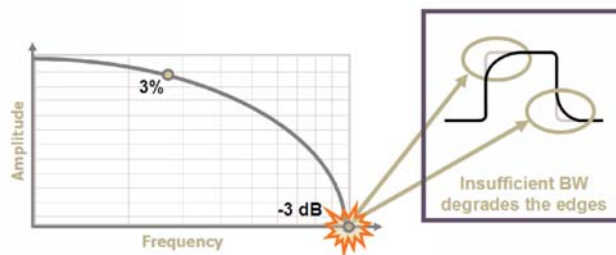


图 10. 频率 VS 幅度带宽图

不同的需求 不同的探头

探头可用于许多不同的环境和测试许多行业标准。例如，在高电压测量电源应用中，要求遵守安全认证标准。这个类型的测量需要机械坚固，探针并有非常大的动态范围，但这些探头不需要高带宽。另一方面，如现代串行标准应用要求测量探头具有使用精密部件的高带宽和 *低* 动态范围。

重要的是要认识到：示波器探头设计的目标是由市场影响探头设计。对于不同的测量环境，探头具有不同的带宽能力。在选择正确探头时，要确保探头有足够的带宽。多大带宽够用？让我们来看看

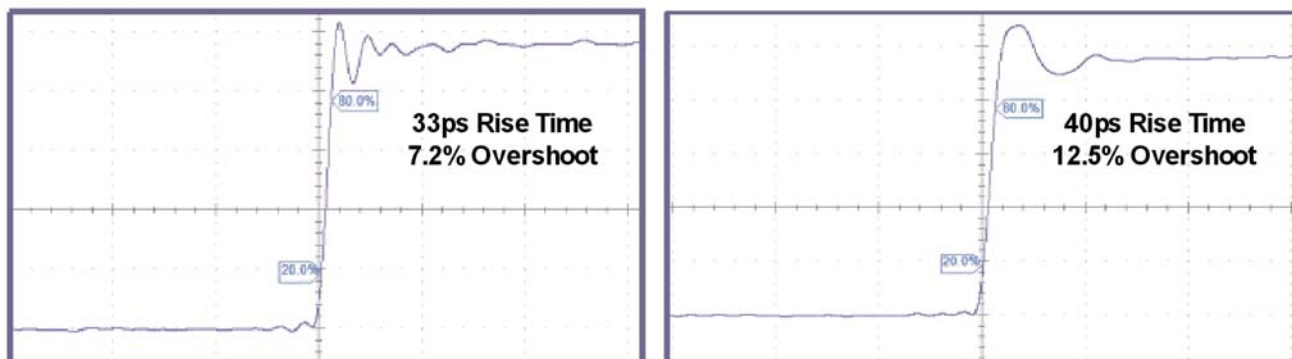


图 11. 保持信号连接前端很短

探头带宽和上升时间

带宽

为了满足示波器探头设计要求，探头带宽是大频率范围。例如，一个 100 MHz 的示波器探头要求所测量的频率范围达到 100MHz，探头能够捕捉信号在指定频率范围的变化。事实上，每个探头制造商认为，在最大指定的带宽，探头的频率响应是下降 3dB。在频率超出了 3dB 点，信号幅度会大大衰减，测量结果可能是不可预测的。

精确测量幅度的原则是：测量系统的带宽应是被测波形频率的 3 至 5 倍以上。这个建议可确保足够的带宽捕获非正弦波波形的高频率成分，如方波。例如，一个带宽是 300MHz 至 500MHz 测量系统，建议捕获 100MHz 的方波信号。

关于带宽见图 1，随着频率的增加，信号的幅度衰减。同样地 如前所述，探头制造商指定带宽到 3dB 内的幅度损失对测试信号没有明显影响，在 3dB 外，随着高频成分的衰减，在方波信号的上升和下降边缘发生明显的变化。使用探头测试信号时，选择探头带宽应是被测信号频率的 3 到 5 倍以上，幅度误差从在 3 dB 上的 30% 减少至约 3%。

上升时间

带宽描述了频域特性，但不提供完整的描绘探头，示波器是如何对时间复现复杂波形形状的。要充分理解其波形复现过程，阶跃响应是获取时域特性是必须的。时域特性通过探头的上升时间来表征，输入一个比测试系统快很多的阶跃信号来评估系统的阶跃响应，从而得到的上升时间。选用探头的规则，探头的上升时间应该比被测信号的上升时间快 3 至 5 倍。

理解示波器带宽上升时间和信号保真度

技术简介

短前端和选择合适的配件

保持信号和接地端连接尽量短

当一个探头连接到测量点,它会对被测电路产生负载效应。电容和电感成分通常来自探头尖几何形状和线长度。电感大小会随着增加了不同的探针尖端配件及不同的地线长度而发生变化。

有时候,连接线到测试点可能具有挑战性。用户可能会弥补信号或地线太长这一连接问题。在图 11 中, P7500探头的信号线前端的长度对信号测量的影响。在图 11 的左边的图是探头前端短线连接,而在图 11 的右边的图是探头前端长线连接。上升时间和过冲也会由于探头前端连接长短发生变化。

选择合适的配件

示波器探头一般都配备了一些不同的探针前端配件。不同的探头配件以便支持各种灵活的设计,如验证,调试,一致性测试等。此外,一些探头都配有焊接解决方案,使得坚固和无连接。

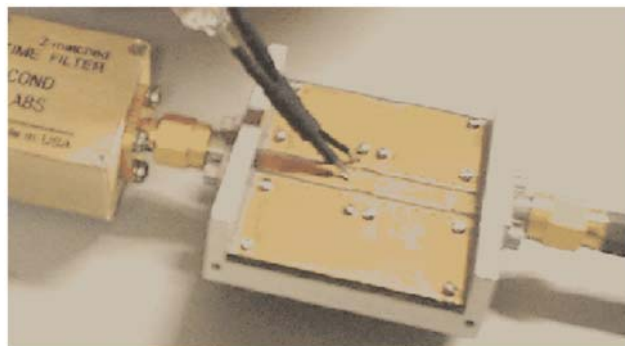


图 12. 确信理解探头前端附件是如何影响测试结果的

用户应该意识到,不同的探头配件可能导致不同的测量结果。为了方便连接到被测端,有些探头连接有小夹子,有些探头连接较长,有些探头连接有方形的引脚插座。关于连接见图 12。在此图片中的探头有 1 英寸长的信号和地线。显然,这么长的连接将产生更多感性效应,将会引起:振铃,畸变或过冲。前端有各种各样的连接方法和这些不同的方法可能会导致不同的测量结果。探头制造商通常会告诉探头前端配件将如何影响测量。



图 13. 在欠采样下的混叠波形

采样混叠影响什么

利用频谱分析仪或对波形进行快速傅立叶变换 (FFT), 复杂的波形含有正弦波频谱, 奈奎斯特理论指出, 对信号进行正确地数字化, 一个正弦波周期需要两倍以上采样, 如果取样速度没有超过在信号中最快的正弦波信号速度的 2 倍, 那么就违反根据奈奎斯特理论定理, 信号将以错误方式 (混叠) 重建, 且无法纠正成正确的波形。图 13 显示了欠采样条件下, 导致了错误的波形重建。

如果信号在屏幕上似乎显示不被触发, 即使触发灯在亮, 在欠采样下, 观测的信号是有问题的。如果这是怀疑, 调节秒/格利控制到更快的水平时基, 你应该最终看到一个稳定触发显示, 这可能是真正的重复波形。

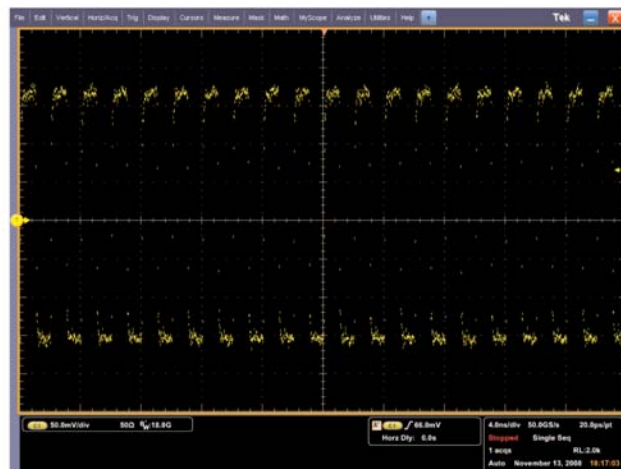


图 14. 点显示模式不能显示波形形状

对于单次采集的情况下, 不可能有这种类型的信号混叠 (虚假的波形重建)。重复波形的形状看起来可能似乎是正确的, 但是时基不正确。或者, 由于欠采样, 快速移动的波形形状的细节可能是不正确的。

信号混叠使得你被眼前显示的波形所欺骗了, 即使您理解奈奎斯特定理。这就是说, 需要两倍以上采集速率采集波形中的每个正弦波成分, 如前所述。图 14 显示这种类型的点显示。

理解示波器带宽上升时间和信号保真度 技术简介

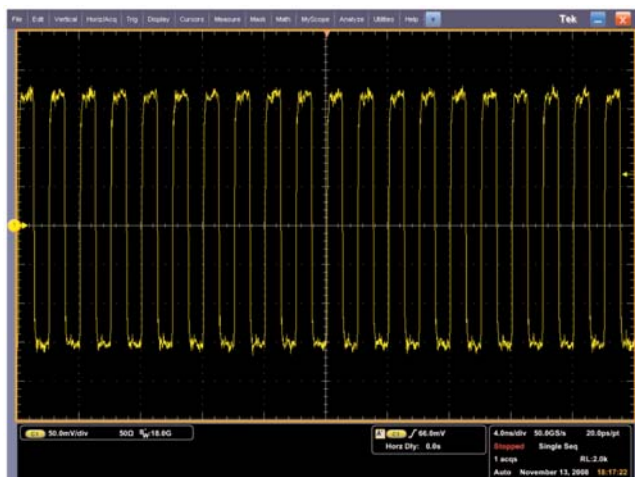


图 15. 矢量模式提高了感性的混叠

信号混叠可以以点方式显示，当然，真实的波形还是看不见的，这是显示混叠，错误的波形恢复。这种类型的显示混叠，或错误的波形恢复，通过插点并用不同类型的线连接，会有很明显的改善。这种的插点的过程被称为插值，如图 15 所示。使用点显示见图 14。

为了真正消除混叠的影响，我们必须利用数字滤波器，叫 $\sin(x)/x$ ，数字滤波器可以修正波形，即从波形实际采集的样点中计算得到的中间点，这样就不会有“混叠”。这就意味着信号中的每一个谱(正弦波成分)周期超过 2 个采样点，即达到示波器模数转换要求。

对欠采样的条件下的阶跃响应起什么作用？在图 16a 中的波形在过采样条件下，在使用了 $\sin(x)/x$ 内插显示，波形显示正确。在图 16b 中的波形在欠采样条件下，也使用了 $\sin(x)/x$ 内插显示，却导致信号出现振铃(原始信号本没有振铃)。在图 16c 中的波形在欠采样条件下，也使用了线性内插(两个采样点直接连线)显示，信号显示更接近原始波形。

从上面的分析可以看到，欠采样下的内插显示会给波形带来错误的信息。因此，需要正确设置采样率和内插显示模式，以确保最佳的信号保真度测量您的信号。



图 16. a 使用 $\sin(x)/x$ 内插模式的过采样波形

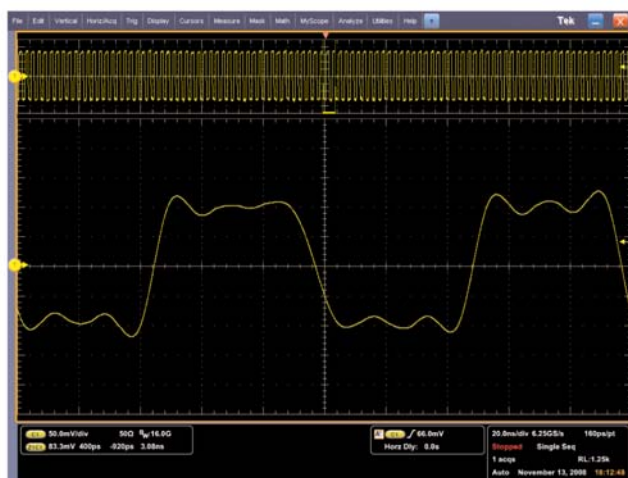


图 16b. 使用 $\sin(x)/x$ 内插模式的欠采样波形

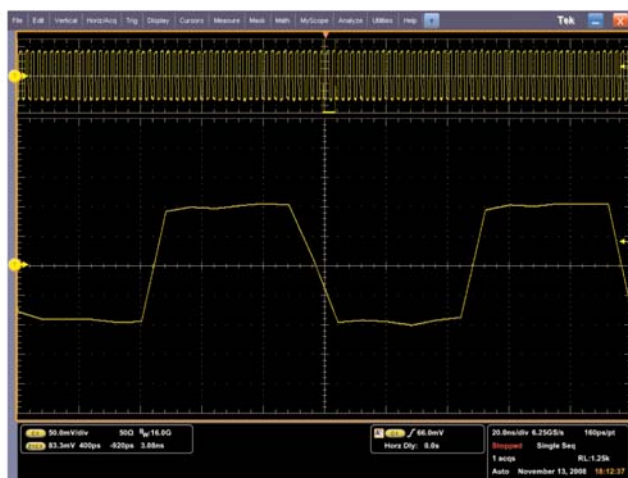


图 16c. 使用 linear 内插模式的欠采样波形

DSP 对上升时间，带宽和信号保真度有什么作用？

实际上，在实际的采样点之间内插是数字信号处理 (DSP)，对波形进行处理可以有很多用途：包括下列内容：

- 带宽增强
- 上升时间的改进
- 增益和波形校正
- 幅频和相位修正
- 光参考接收机初始化
- 波形偏差和异常的抖动分析

在图 17 中，蓝色曲线是通过不很好的垂直放大器系统示波器采集并没有经过修正的波形。红色曲线是经过 DSP 修正后的波形，带宽增强，上升时间提高了。

DSP 滤波器可以改善示波器采集通道的幅频响应和相频响应。这个滤波器可以扩展带宽，平坦示波器通道频率响应，提高相位的线性度，并使得示波器通道之间有更好的匹配。

Fourier 傅立叶系列 DSP 滤波器最 常用来改善带宽和上升时间。当要提高快沿阶跃的上升时间，傅立叶系列 DSP 可以收敛到阶跃的中点，上升阶跃的两边振荡。振荡的峰值高度离阶跃越远越小，但 peak1，peak2 等的振幅保持一样，使振铃的幅度和形状相同，但频率越来越高。每个振铃过冲的峰值有一个固定的高度 (=18% 的阶跃信号)。这种效应被称为 吉布斯现象。

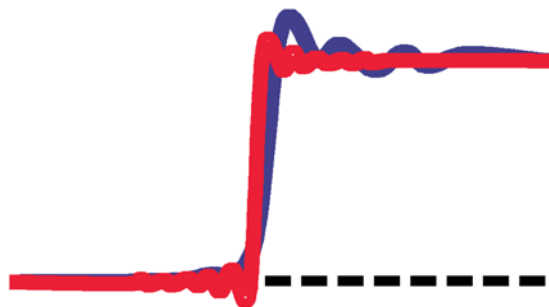


图 17. DSP 增强后的波形形状,上升时间和带宽

因此，根据吉布斯现象，当使用 DSP 带宽增强技术时，阶跃的边沿会出现前后振铃，如图 17 所示。示波器通道的响应是低通的和线性相位。吉布斯现象振铃的数量将取决于用于改进上升时间和带宽的 DSP 数量和被测信号的速度。

为了使 DSP 带宽增强，这里所描述，两个条件必须得到满足。首先，采样频率必须保持足够高，以确保没有谱高频成分大于或等于奈奎斯特带宽(采样率的一半)，以便示波器可以进行模数转换。如果这一条件没有得到满足，欠采样将发生，DSP 很可能会破坏显示波形的完整性。第二，整个波形必须在模数转换器的范围之内。如果您选择的展开观看波形细节，然后到导致信号的另一部分变形，数字信号处理很可能会造成信号不必要的失真。

总结

带宽,作为重要指标,告诉你有关示波器是如何真实地复现实际信号,但不能代表全部。阶跃响应的上升时间,下降时间,畸变,带宽内频率响应的平坦度和相位响应会告诉你更多关于测量系统真实的保真度。当你要展宽观看波形细节时,注意垂直偏置控制和触发电平范围,以及良好过载恢复能力,可以让如您所预期一样看到这些细节。不要忘记探头的负载的影响,特别是探头末端信号线和地线附件。

采样率也是另一个重要的指标。当有足够的采样率,再加上采样点之间插值修正和适当触发到采样的时间修正,可以减少注意欠采样下的混叠效应。当使用数字信号处理 DSP 增强带宽和上升时间时,要考虑提供给你的信号保真度是否是你期望的。

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

了解有关的更多信息

泰克公司不断收集应用文章,技术简报和其它资源,帮助工程师了解最前沿技术。请访问 www.tektronix.com.cn



©2008, 泰克。保留所有权利。泰克公司的产品涵盖受美国 and 外国专利,发表之前。本出版物中的信息取代,在所有先前公布材料。规格和价格改变特权保留。泰克和泰克的注册商标 泰克公司的所有其他商品名称参照是服务商标,商标或注册商标,其各自公司所有。
12/08 FLG/WWW 55C-18024-1

Tektronix[®]