

示波器频率响应及其对上升时间测量精度的影响

Dennis Weller 安捷伦科技

一般示波器的频率响应是高频型的,由许多具有类似频响的电路元件组合而成,传统的模拟示波器就是这个样子,从它的BNC输入端至CRT显示,有很多模拟放大器构成一个放大器链。有关高频响应示波器的特点,在行业内已经广为人知。

但鲜为人知的是当代高性能数字示波器所普遍采用的平坦频率响应。数字示波器中和高频响应有关的只是很少的几个模拟放大器,并可用DSP技术优化其对精度的影响。对于数字示波器来说,还有一件重要的事情是,要尽量避免采样混叠误差(当被测信号频率具有超

过示波器采样率一半,也就是超过Nyquist频率的频率成分时,就会产生采样混叠误差),而模拟示波器是根本没有这种问题的。与高频响应相比,平坦型频率响应能减少采样混叠误差,我们在这里首先回顾高频响应和平坦响应的特性。然后讨论这两种响应类型所对应的上升时间测量精度。从而说明具有平坦频率响应的示波器与具有同样带宽的高频响应示波器相比,有更高的上升时间测量精度。

我们的讨论以1GHz示波器为例。这里的分析结论完全适用于其它带宽。

高频响应示波器的特性

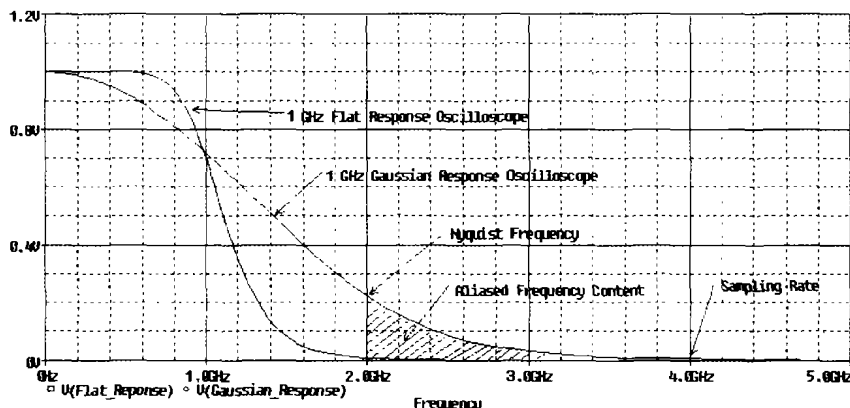


图1 1GHz带宽示波器的频率响应

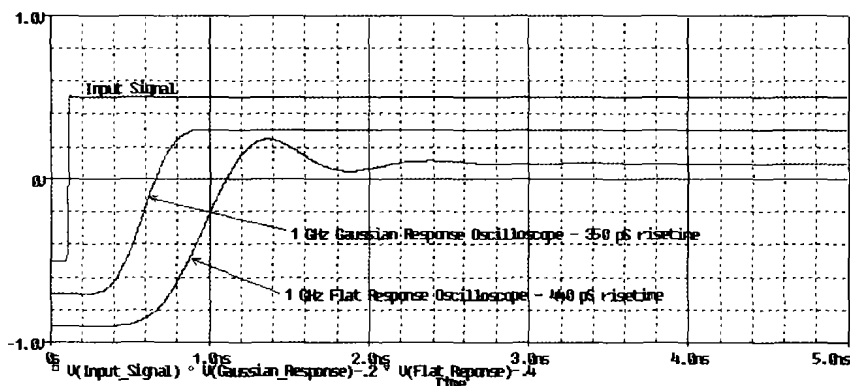


图2 1GHz带宽示波器对快阶跃输入的脉冲响应

1GHz示波器的典型高频响应如图1所示。高频响应的优点是不管输入信号(被测信号)有多快,它都能给出没有过冲的较好脉冲响应。图2示出1GHz高频响应示波器对快沿阶跃信号的脉冲响应。

在高频响应示波器中,示波器的上升时间与示波器带宽间有常用公式:

$$\text{上升时间} = 0.35 / \text{带宽}$$

其系统总带宽为各子系统带宽的RMS值,可使用下面关系式计算:

$$\text{系统带宽} =$$

$$1 / (1/BW^2_{\text{探头}} + 1/BW^2_{\text{示波器}})^{0.5}$$

通常情况下,若示波器探头带宽比示波器带宽更高,系统带宽不会变得很差。相反,被测上升时间通常与系统及信号上升时间有关,计算公式为:

$$\text{被测上升时间} = (RT^2_{\text{信号}} + RT^2_{\text{系统}})^{0.5}$$

当示波器系统的上升时间并不比信号上升时间快很多时,则可用该关系式估算信号的实际上升时间。

平坦响应示波器的特性

图1对平坦响应和高频响应作了比较。应注意它在-3dB前有更为平坦的频率响应,但在-3dB后迅速下降。这样的响应形状有时也称为最大平坦响应或砖墙响应。

平坦响应有两大优点。第一个优点是信号在-3dB带宽之前的频响较为平坦,即衰减较小,测量结果也较为精确。第二个优点是超过-3dB带宽后,频响曲线急剧滚降,大大减小数字示波器中的采样混叠机会。

在时域,当有快沿阶跃信号输入时,平坦频率响应示波器会产生脉冲过冲和振铃,如图2所示。我们知道过冲和振铃是示波器的不良响应。但这种情况只有在信号上升时间很快,远远超过示波器可精确测量的能力范围时,才会产生。这种情况下,应使用更高带宽的

示波器, 否则测量误差会很大。

与高斯系统不同, 平坦频响示波器的系统带宽不能由其子系统部件的 RMS 值确定。用于高斯响应示波器系统的带宽和上升时间公式不适用于平坦响应示波器系统! 而需要示波器厂商提供示波器系统带宽, 即由示波器/探头及其前端附件构成的组合带宽。

在平坦响应示波器的情况下, 上升时间与带宽的关系为:

$$\text{上升时间} = N / \text{带宽}$$

(这里 $N = 0.4$ 至 0.5)

N 越大, 说明频率响应越陡峭, 或越像“砖墙”。上面的关系式有时也包括在示波器指标中, 从而给出示波器的响应类型。

测量精度

哪一种频率响应类型能提供最好的测量精度? 需要考虑最大信号频率和示波器的采样混叠误差。

信号最高频率

在图1的例子中, 与高斯响应相比, 平坦频率响应在 -3dB 带宽 (1GHz) 前衰减较小。因而对在 -3dB 带宽之内的信号频率成分, 平坦响应示波器的测量精度远比高斯响应示波器更高。

例如, 让我们使用这两种频率响应类型的示波器, 比较对上升时间为 700ps 的信号测量结果。由上升时间可确定该信号的最高频率, 即:

$$\text{信号最高频率} = 0.5 / \text{上升时间}$$

信号最高频率的定义为: 任何一种测量系统 (也包括示波器在内) 能精确复现信号, 所对应的最高频率 (当然包括最高频率以内的频率成份)。

使用这一关系式, 可得到上升时间为 700ps 的信号, 其主要频率在 714MHz 以下。我们可从图1看到对于最高为 714MHz 的频率, 平坦响应示波器比高斯响应示波器有更小的衰减, 因而能更精确地测量 700ps 跳变沿的上升时间。

若被测信号上升时间特别快 (即更快的跳变沿), 高斯响应示波器最终反而将超过平坦响应示波器的上升时间测量精度。这是因为随着信号上升时间减小 (即跳变沿更快), -3dB 以上频率成分增加, 此时平坦响应示波器的幅度响

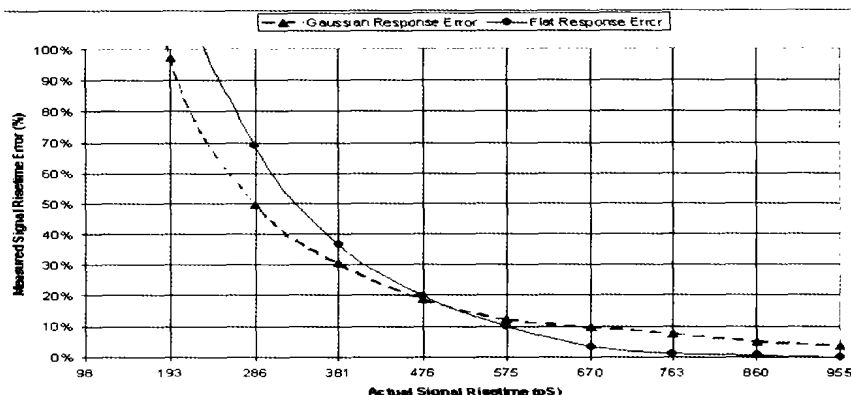


图3 1GHz 带宽示波器的上升时间测量精度



图4 由采样混叠误差造成的波形颤动

应将低于高斯响应示波器。

图3是用我们例子中所使用的两种示波器, 对各种不同上升时间的信号的测量误差。应注意在高斯响应示波器测量精度超过平坦响应示波器交界处, 上升时间测量误差已经达到 15% 。因此, 对于信号上升时间的精确 ($< 15\%$) 测量, 在同样带宽时, 平坦响应示波器远优于高斯响应示波器。

采样混叠误差

数字示波器使用两种基本采样方法: 重复采样和实时采样。重复采样示波器的应用场合是针对重复信号的, 将多次采集的样点构建成一个波形, 不易产生采样混叠误差。实时采样示波器往往是一次采集捕获所有的信号信息, 或一旦有感兴趣的信号, 就采集, 否则一直等待。这里的讨论主要针对更常见的实时采样示波器, 它比重复采样示波器有更多的优点。

数字实时示波器要精确测量信号, 信号必须没有过多 Nyquist 频率之上的

频率成分, Nyquist 频率等于采样频率的一半。在频域中, 高于 Nyquist 频率的频率成分将折合到低于 Nyquist 频率。在时域, 这一误差以具有“颤动”跳变沿的脉冲响应出现, 如图4所示。在不一致的上升时间和时间差测量中, 会产生“颤动”的跳变沿。

对于图1中采样率为 4GHz 的例子, Nyquist 频率为 2GHz 。高斯响应示波器允许采样 2GHz 以上的频率成分, 这些频率成分会对信号造成采样混叠误差。但平坦响应示波器衰减了 2GHz 以上的所有频率成分, 因此不存在采样混叠误差。

为精确测量信号, 没有采样混叠误差, 示波器必须有足够的采样率。对于高斯响应示波器, 采样率通常需要4倍于示波器带宽, 甚至是6倍于示波器带宽。而平坦响应示波器有陡峭的滤波器, 因此2.5倍于示波器带宽的采样率就能避免混叠误差。●