

示波器基础系列之十六

——示波器响应方式对信号采集保真度的影响

李海龙 美国力科公司深圳代表处

摘要：信号保真度是评价数字示波器性能最主要的衡量标准，而采用合适的输入脉冲响应方式则是示波器高保真还原信号真实面目的非常重要的环节。信号保真度定义为显示在示波器屏幕上的波形与被测波形间的拟合程度，而脉冲响应方式表征示波器系统采用何种方式对输入激励不同频率成份的幅度和相位进行最优化处理，不同的示波器响应方式会生成不同特征的被测阶跃脉冲波形。本文以力科最新的 WaveMaster 8Zi 系列高端示波器为例，介绍了不同的示波器响应方式对信号采集保真度的影响，以及阐明了在同一台示波器上能提供多种脉冲效应优化方式对高保真度采集的重要作用。

关键词：示波器，脉冲响应，信号保真度，阶跃响应，幅频响应，相频响应，Zi 系列

1、脉冲响应原理

一个“完美”的方波脉冲包含了无数阶奇次正弦谐波分量的幅度，如公式 1 所示：

$$\begin{aligned}x_{\text{square}}(t) &= \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin((2k-1)2\pi ft)}{(2k-1)} \\ &= \frac{4}{\pi} \left(\sin(2\pi ft) + \frac{1}{3} \sin(6\pi ft) + \frac{1}{5} \sin(10\pi ft) + \dots \right).\end{aligned}\quad (\text{公式 1})$$

因此，我们可以认为测量系统采集脉冲信号的过程，也就是先采集其各个正弦谐波分量然后再合成脉冲的过程。现在测试测量设备包括数字示波器的前端输入带宽和模/数转换电路的带宽都是有限的（力科 WaveMaster 830Zi 拥有目前实时示波器的最高模拟带宽 30GHz），也就决定了能采集到的谐波分量频率是有限的，下图 1 表示最高到 21 次谐波的频率成份叠加后的结果：

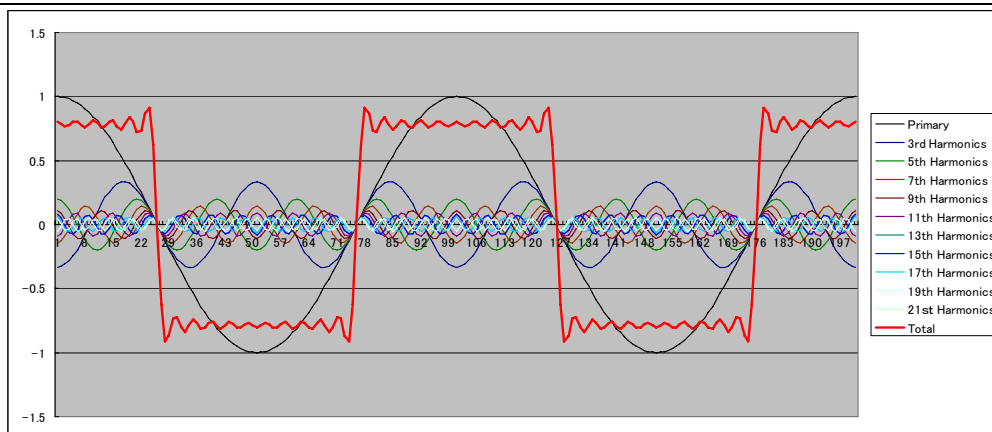


图 1、21 次正弦谐波分量叠加后的脉冲波形

一般来说，高速串行数据分析对仪器带宽的最低要求是能采集到信号基频的 5 次谐波，比如 PCI Express 2.5Gbps 数据率对应的时钟频率为 1.25GHz，5 次谐波则为 6.25GHz，最低配置应为 6GHz 带宽示波器或串行数据分析仪（比如力科 SDA 760Zi）。下图 2 为最高到 5 次正弦谐波合成后的脉冲结果。

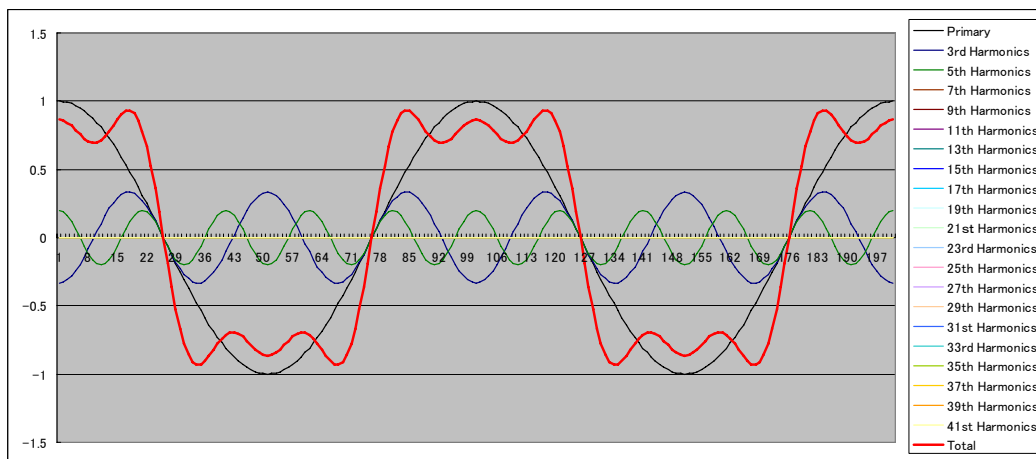


图 2、5 次正弦谐波分量叠加后的脉冲波形

从以上可看出，信号采集的最高谐波分量不仅决定了方波脉冲的形状，而且影响了脉冲幅度和上升时间测量的结果，反应信号测量幅度与频率的对应关系称为“幅频响应”。

由于示波器前端模拟部件呈现出低通滤波特性，对输入信号的不同频率成份的通过能力不一致，高频分量的幅度衰减率要大于低频分量衰减率，因此幅频响应曲线不是线性变换，而是呈滚降（RollOff）趋势，尤其对高于示波器-3dB 带宽的频谱成份更是表现出急剧滚降特征。根据幅度响应曲线的不同滚降方式，目前业内主流高性能示波器主要提供两种响应类型，分别是平坦化响应(Flat Response)和贝塞尔响应(Bessel Response)。

平坦化响应有两大优点。第一是信号在 -3dB 带宽之前的幅频响应较为平坦，衰减较

小，可进行非常精确的测量。第二是超过-3dB 带宽后，频响曲线急剧下降，高频成份被有效截止（呈现出“砖墙”效应），通过的低频成分都能被后端 ADC 高保真采样，因而可大大减小数字示波器中的采样混叠机会，降低了波形失真度。平坦化响应示波器尽管有这些突出的优点，但也有非常显著的缺点：图 1 和图 2 的脉冲效果对比可看出，由于缺少更多的高频成份，5 次谐波叠加的脉冲比 21 次谐波叠加的脉冲有更大的过冲和振铃。平坦响应截止了大量的谐波，因而表现出比较大的过冲和振铃现象，尤其是在信号上升时间很快，远远超过示波器可精确测量范围时，这种负面效应更为突出。

贝塞尔幅频响应对超过-3dB 带宽的高频成分衰减速率相对较慢，因而表现出较小过冲和振铃的较好脉冲效应。但由于在-3dB 带宽内对信号幅度响应相对来说不是很平坦，而且在-3dB 带宽外会拖出一条较长的尾巴，这样使得后面的 ADC 需要更高的采样率才能确保不发生频率混叠现象。图 3 是贝塞尔响应和平坦响应对同一脉冲激励的形状对比，从中可以看出，平坦响应带来的过冲和振铃都相对较大。

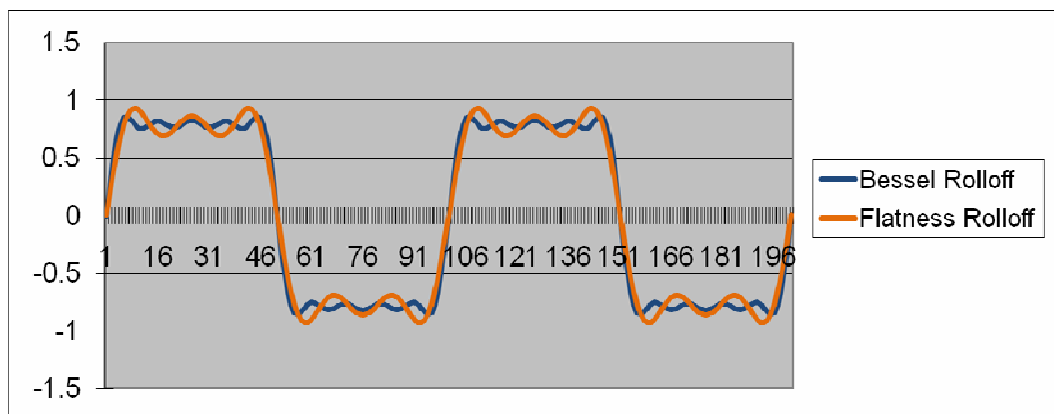


图 3、贝塞尔响应和平坦响应的对比

除了幅度响应外，与脉冲响应紧密相连的另外一个概念是相位频响。输入信号从数字示波器前端输入传递到屏幕显示之间，有很多模拟放大器构成一个放大器链，信号通过这些模拟器件需要一定的时间，或称为相位延迟(Delay)。不同频谱的信号在通过示波器内部通道时会产生不同的延迟，因而方波脉冲的不同谐波频谱的不同传播延迟会导致脉冲相位发生畸变，这种负面效应称为群延迟 (Group Delay)。对于较低频率信号，群延迟的破坏性效应可以忽略不计，随着频率越高，这种负面效应是不可逃避的问题。群延迟会使示波器的实际上升时间比标称值更慢，而且会带来更大的抖动噪底。很显然，用户需要他购买的高性能示波器群延迟尽可能小，最好为零。以力科 SDA 系列为代表的高性能示波器普遍采用 DSP 修正仪器的群延迟效应，根据不同的测试应用需要，主要有两种相位响应模型：第一个模型是线性相位 (Linear Phase)，第二个模型是最小相位 (Minimum Phase)。

理想的线性相位概念源自群延迟概念。群延迟有时称为包络延迟，不应把它与相位延迟混淆。群延迟和相位延迟都与系统的相位相关，公式如下：

$$P(\omega) \stackrel{\Delta}{=} -\frac{\Phi(\omega)}{\omega} \text{ or } P(f) = -\frac{\Phi(f)}{2 \cdot \pi \cdot f}$$

公式2 - 相位延迟

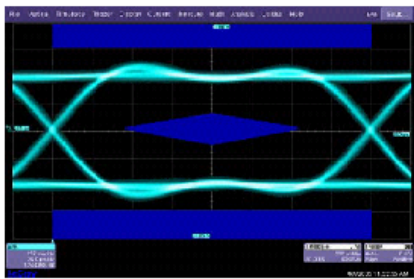
$$D(\omega) \stackrel{\Delta}{=} -\frac{d}{d\omega} \Phi(\omega) \text{ or } D(f) = -\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{d}{df} \Phi(f)$$

公式3 - 群延迟

相位延迟是正弦曲线在频率 f 上的时间延迟，它假设正弦曲线一直保持不变。群延迟是 f 周围一组窄频率的幅度包络。可以看到，在相位 $\Phi(f)$ 随着频率线性变化时，相位延迟和群延迟的解都是一个恒定的延迟。在相位与频率的关系非线性时，相位延迟和群延迟都不会对频率保持恒定。在经常遇到的带限系统中，群延迟在频段边沿附近上升，这意味着在其通过示波器通道时，信号的高频成分一般会延迟。在阶跃响应中，这表现为较慢的上升时间和较高的过冲，因为高频成分没有和边沿同时到达，而是在边沿传送后才到达。而理想的线性相位响应（或群延迟）则克服了这些问题。

在控制理论和信号处理中，如果系统及其倒数具有因果关系且稳定，那么随时间变化的线性系统有最小相位。生成最小相位设计的方式是设计 FIR 滤波器，是带宽有限系统可以实现的最佳响应，因为它具有因果效应，时间 $t < 0$ 时，所有输入激励均无响应，是一种更接近自然情况的相位响应方式。下图 4 说明了力科 SDA11000 串行数据分析仪对 30ps 阶跃和 5Gb/s 串行数据信号的响应。可以看出，线性相位系统表现的非因果关系的阶跃响应转换成对称的眼图。最小相位更加自然的阶跃响应转换成略微不对称的眼图。注意，眼图测试使用的模板不是为处理任何不对称设计的，不对称是标准一致性测试中的典型情况。正是基于这些原因，最小相位响应和线性相位响应都有其优点和缺点

Linear Phase



Minimum Phase

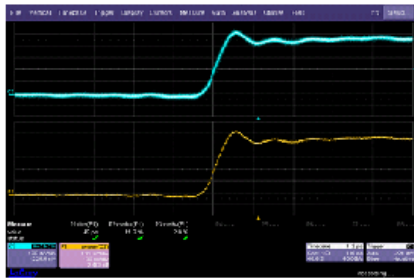
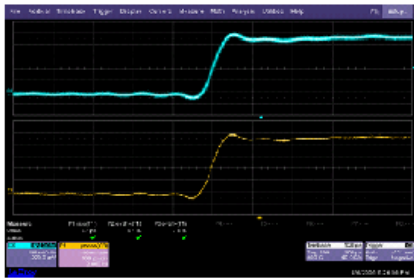
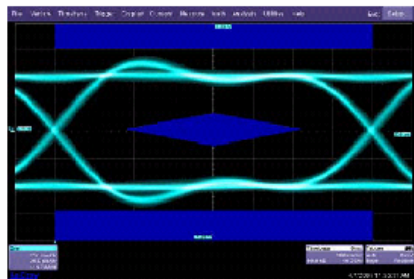


图 4，线性相位和最小相位在力科 SDA11000 示波器的眼图效果对比

总之，对涉及眼图的测量，线性相位拥有更好的响应特点。但对于其他通用信号测试而言，最小相位响应对信号保真度效果更好。

2、脉冲响应优化类型

示波器对阶跃脉冲的响应(Step Response) 需要从两个方面来分析，一个是幅度响应，另一个就是相位响应（或群延迟）。用户在评估一台高带宽示波器性能时，会希望采集到的信号：
1、更小的过冲 Overshoot；
2、更小的前冲 Preshoot；
3、更快的稳定时间也就是更小的振铃；
4、与示波器标称带宽所一致的上升时间。

根据以上分析，贝塞尔幅度响应有更小的过冲或振铃，但上升时间也较慢，也会在-3dB 带宽外引起采样频率混叠的负面效应；而平坦幅度响应上升时间更快，但会带来更大的过冲和振铃。至于相位响应方面，线性相位响应修正群延迟至零，降低了不同频率成分的相位不一致性，非常适合串行数据的测试和分析，比如眼图和抖动等。最小相位响应是一种“因果”响应，阶跃发生前的所有效应包括前冲都为零，是一种最接近真实世界的响应，适合通用信号测试领域，尽管它会带来最慢的状态翻转速率。

目前业界主要厂家研制的高性能示波器，对脉冲的幅度响应和相位响应可以组合成三种脉冲响应优化方式，分别是：
Pulse Response 采用四阶贝塞尔幅度响应和最小相位响应；
Eye Diagram 采用四阶贝塞尔幅度响应和线性相位响应；
Flatness Response 采用平坦化幅度响应和线性相位响应。

这三种响应优化类型不存在哪个更好的问题，而是分别适应了不同信号的测试应用需求。下表 1 总结了三种响应优化模式的不同特点和适用领域。

响应模式	幅度响应	相位响应	优点	缺点	典型应用
Pulse Response	4th order Bessel-Thompson	Minimum Phase	“因果”响应最接近自然情况.	最慢的边沿速率	通用信号测试
Eye Diagram	4th order Bessel-Thompson	Linear Phase	线性相位响应降低了过冲, 提高了边沿速率.	增加了前冲因为前冲和过冲是均衡对成的	串行数据一致性测试
Flatness	Brickwall	Linear Phase	带通范围内最大的幅度响应平坦度.	最高的过冲	频谱分析

表 1 三种阶跃响应优化模式特点总结

下图 5 显示了三种示波器响应方式对输入阶跃脉冲响应效果的对比总结。

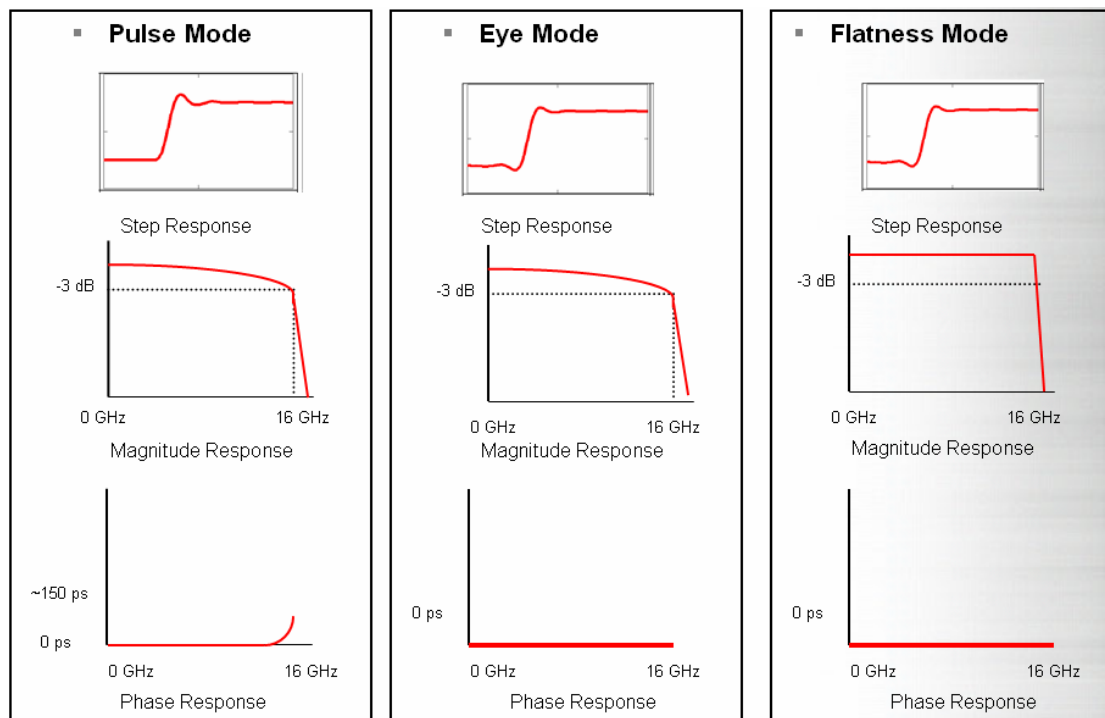


图 5 三种脉冲优化方式对比总结

从上图可分析出 **Pulse Mode** 阶跃脉冲跃迁速率最慢，前冲为零，-3dB 带宽内幅度有一定衰减，-3dB 带宽外幅度滚降速率较慢，在高频点群延迟不为零；**Eye Mode** 阶跃脉冲跃迁速率较快，前冲被显著提高，因为需要达到与过冲一致的对称性，在整个带宽范围内都保持群延迟为零，特别适合眼图等串行数据分析方法，同样在-3dB 带宽内幅度有一定衰减，-3dB 带

宽外幅度滚降速率较慢；Flatness Mode 阶跃脉冲跃迁速率最快，但也有最大的过冲和前冲以及振铃等，-3dB 带宽内幅频响应较平坦，超过-3dB 带宽后，频响曲线急剧下降，其在通频带内能保持线性相位响应，对于纯粹正弦信号和调制波形测试来说非常合适。

3、如何选择合适的示波器响应模式

以上分析了了了几种示波器响应的不同特点，以及它们的适用领域。示波器响应优化如何提高信号采集的保真度，我们可以做出以下结论：

- 1、用户输入信号与屏幕上显示的波形之间的拟合程度“永远”受到示波器响应方式的影响；
- 2、任何示波器都有非理想的行为，包括幅度衰减，相位偏差，噪声波动等；
- 3、每个示波器厂家都会采取某种手段去最小化示波器响应对被测信号的负面影响，通常会带来性能的折中。而且需要认识到没有哪种示波器响应是理想的，最好的响应永远取决于用户的实际应用。

一般情况下，每个示波器厂家会根据自身仪器的市场侧重点，为高带宽示波器配置上述三种脉冲响应优化的一种，比如有的仪器厂商侧重于射频信号或矢量调制信号测试领域，它的示波器就只提供平坦化的响应优化模式，而有的仪器厂商为追求更高的眼图生成效果，就只提供 Eye Mode 响应方式，实际上用户的需求可能是多方面的，既需要测试信号通用特性，也可能需要分析串行数据信号质量，还可能需采集射频信号等，仅提供一种响应模式无法满足客户希望使用示波器全部价值的需求。

力科最新推出的 WaveMaster 8Zi 系列高端示波器不仅具有业界最好的性能指标，包括最高的 30GHz 模拟带宽，最快的 80GSa/s 实时采样率和最深的 512Mpts 可分析存储深度，而且还首次实现了在同一台示波器上同时支持三种脉冲响应优化模式的功能，从而为用户的不同测试需求提供了最高的信号采集保真度。

以 16GHz 带宽的 WaveMaster 816Zi 为例，标称的仪器典型上升时间(10%-90%)为 28ps，而三种响应优化模式分别实测的上升时间值为(Pulse Mode)29ps，(Eye Mode)27ps，(Flatness Mode)25ps；过冲值分别为 2%，6%，8%，符合本文以上的分析结果。

下图 6 和图 7 显示的是 WaveMaster 816Zi 示波器分别采用 Flat Mode 和 Eye Mode 响应优化方式对同一阶跃脉冲实际测量结果的对比，可以看出，Flat Mode 可以得到更快的上升时间，但过冲和前冲也都相对较大；Eye Mode 测量的上升时间较慢，但过冲和前冲也都相对较小。

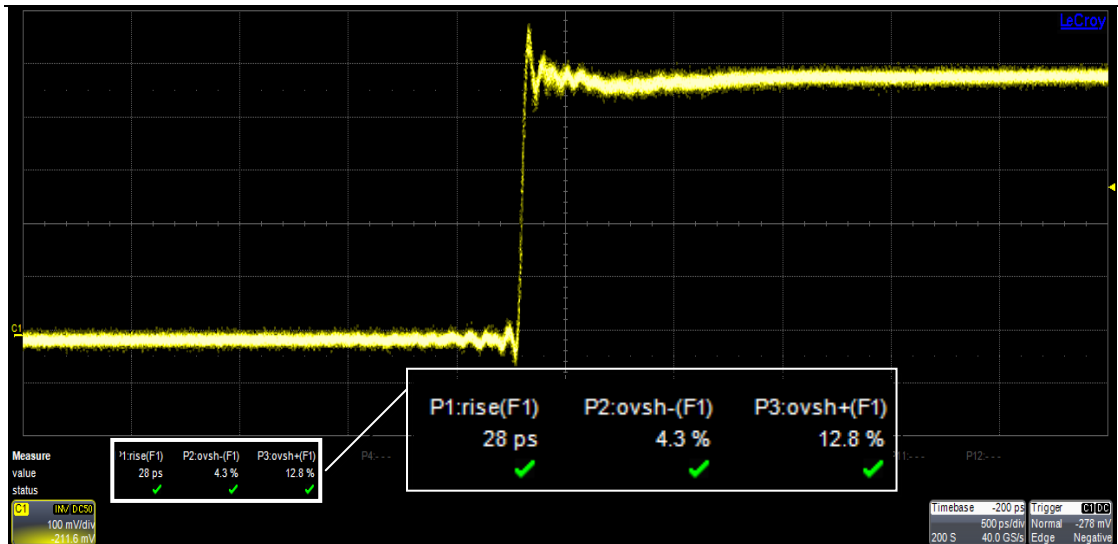


图 6 Flat mode 阶跃响应实测测量结果

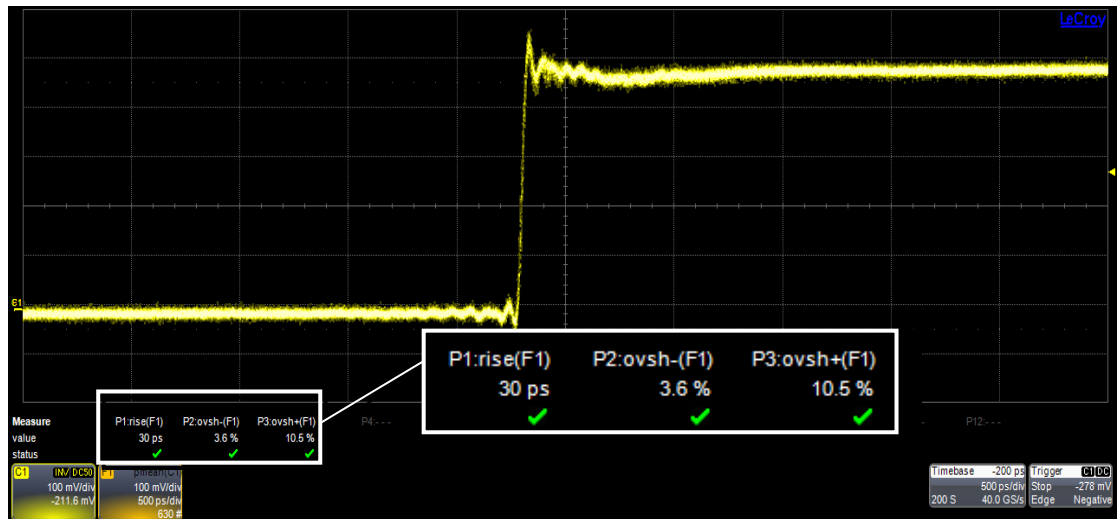


图 7 Eye mode 阶跃响应实测测量结果

4、结语

主流的高性能示波器厂家都会采取某种脉冲响应优化方式去降低幅频响应或相频响应对被测信号的负面效应，力科最新的 WavMaster 8Zi 系列是唯一能同时提供三种响应优化方式包括 Pulse Mode、Eye Mode 和 Flatness Mode 的高带宽示波器，用户可根据不同的应用测试需求而灵活的选择使用其中一种响应方式，从而达到了最高的信号采集保真度。

参考文献

- 1 Eye_Patterns_in_Scopes-designcon_2005.pdf, Peter J. Pupalaikis, LeCroy Corporation
- 2 Group_Delay-designcon_2006.pdf, Peter J. Pupalaikis, LeCroy Corporation