

关于数字示波器测量参数的 第一算法

—— 兼答 “一周一问” 之 No.001 问

文档编号：HWTT0057



鼎阳硬件设计与测试智库
群策群力，连接所有硬件人！



关于数字示波器测量参数的第一算法

——兼答“一周一问”之 No.001 问

汪进进

鼎阳硬件设计与测试智库发起人之一

深圳市鼎阳科技有限公司

“一周一问”之 N0.001 问:示波器测量算法

为了准确测量上升时间，屏幕上的波形是只有一个脉冲好，还是越多越好？单脉冲测量准确度如何？例如，对于一个标准幅值为 100mv,脉宽 50ns 的信号,用示波器测量其幅度和脉宽的最大偏差是多少？相同的示波器测得结果离散性(或稳定性)如何？不同示波器测量结果离散性如何？

数字示波器区别于模拟示波器的重要区别是：数字示波器具有很多测量参数，如上升时间、下降时间、峰峰值、幅值等。即使工程师入门级的数字示波器如鼎阳科技的 SDS2304X(即将公开发布，敬请期待)标配的测量参数就有 37 个。高端示波器的测量参数多达几百个。但是模拟示波器没有任何测量参数。（下文中示波器一词即表示数字示波器）

每种参数的含义在示波器的操作手册上一般都有说明。但是，如果我们深究每个参数底层算法的源头是什么，答案其实并不简单。如果能深刻理解示波器的基本算法，这会有助于我们理解使用示波器过程中的一些莫名其妙的问题，譬如示波器测量频率为什么测不准？示波器测量不规则的信号测量上升时间为什么跳变范围很大？为什么光标测量结果和参数测量结果差别很大？屏幕上的波形是只有一个脉冲好，还是越多越好？.....

什么是示波器的第一算法？我想**将示波器中确定高电平和低电平的算法称为示波器垂直量测量的第一算法。将示波器中确定波形任意一电压阈值和波形交叉点对应的时间轴的位置的算法称为示波器水平量测量的第一算法。**

一、示波器垂直量测量的第一算法：确定高电平和低电平

峰-峰值表示所有采样样本中的最大样本值减去最小样本值，这好理解，在示波器算法中也好实现；而





幅值表示被测信号的“高电平”减去“低电平”。高电平和低电平分别在哪里？这就需要定义算法。这个算法的确定将不只是直接影响到“幅值”这个参数值，还将影响到绝大多数水平轴的参数值，如上升时间，下降时间，宽度，周期等，因为水平轴的参数要依赖于垂直轴的参数。

不同示波器厂商给出的“高电平”和“低电平”算法可能不尽相同，但一般会采用公认的 IEEE 定义的算法，如图 1 所示，首先对图示中“LEFT CURSOR” (左光标)和“RIGHT CURSOR” (右光标)时间范围内的波形数据样本向垂直方向做“轨迹直方图”，从图中看上去，轨迹直方图的垂直方向和原始波形的各采样点在垂直方向的位置一一对应，水平方向则表示在各位置上采集到的数据样本点的个数。图例中有两个位置的数据样本出现的概率最高，这两个位置就分别被确定为“高电平 (图示中表示 top 的位置)”和“低电平(图示中表示 base 的位置)”。

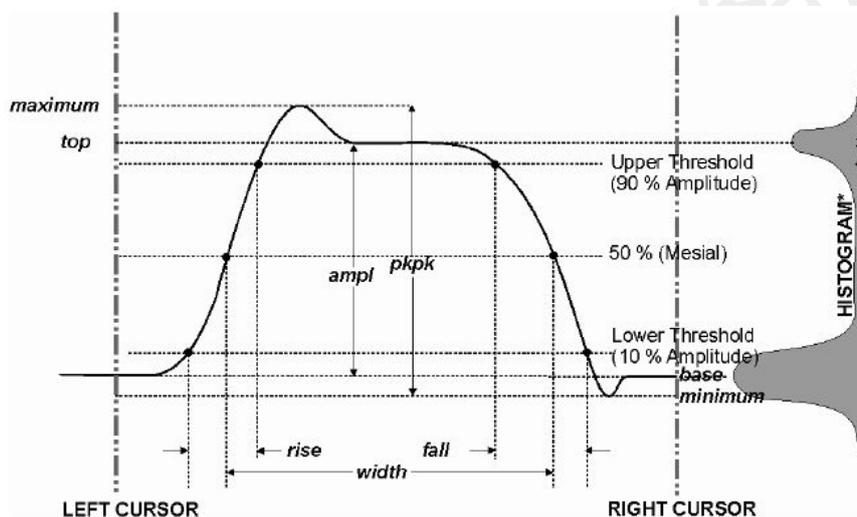


图 1 IEEE 定义的高电平和低电平算法成为其它一些参数算法的“源头”

在示波器算法中，一般默认是根据屏幕最左边到最右边的全部波形数据来确定“高电平”和“低电平”，因此，示波器每捕获一次，仅能得到一个“高电平”和一个“低电平”的参数值，如图 2 所示为鼎阳科技智能示波器 SDS3054 测量一个脉冲方波得到高电平和低电平及幅值的结果。





图2 鼎阳科技SDS3054测量一个脉冲方波获得高电平(top),低电平(base)和幅值(amp)

IEEE 定义的这种算法给我们的提示是：

1, 测量一个脉冲方波和测量多个脉冲方波得到的“高电平”和“低电平”的结果可能是不一样的，因为统计的样本数不一样，获得的“轨迹直方图”就会有些差异。如果信号上有一点点的过冲或下冲就可能影响到直方图分布的最大概率状态的确定，那么很多参数测量的结果都会受到影响。在实际测量中要对此尤为关注。如图3所示，利用鼎阳科技 SDS3054 示波器测量 1 个脉冲方波和测量 5 个脉冲方波的高电平和低电平及幅值的比较。测量 1 个脉冲方波的幅值是 10V,测量 5 个脉冲方波的幅值是 9.97V，对于这样的规则信号，差异并不大。



图3 鼎阳科技 SDS3054 测量 1 个脉冲方波和 5 个脉冲方波的比较

2, 测量“顶部”数据样本很少的波形，统计之后形成的“轨迹直方图”可能无法形成明显的概率密度很高的位置，譬如测量一个正弦波，“顶部”数据量很少，没有概率密度很高的位置，这时候有些示波器算法会将“最大值”当作“高电平”，“最小值”当作“低电平”。鼎阳科技 SDS3000 示波器的测量





参数显示界面中会有一个“小方波打叉”的提示，如图4所示，说明当前的波形不是一个规则的方波，隐含的信息就是这种状态下测量得到的“高电平”等于“最大值”。

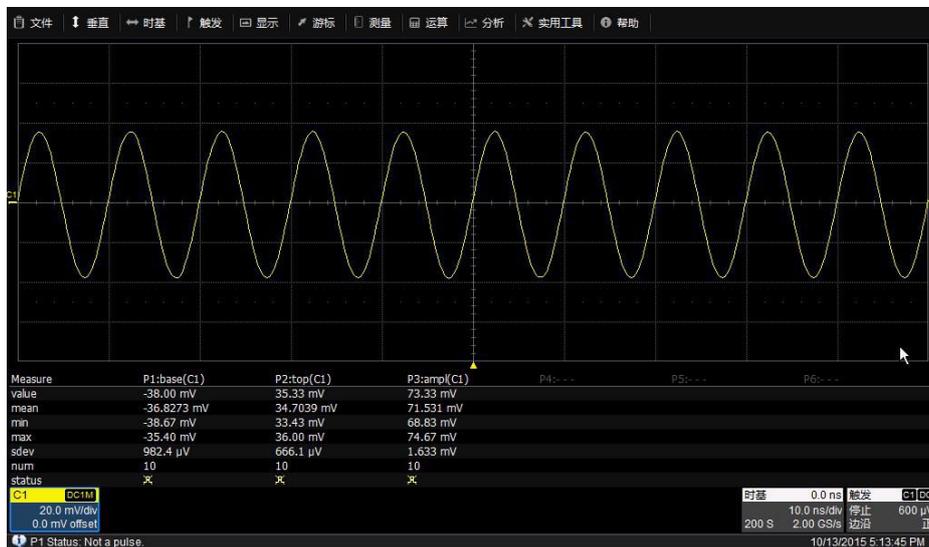


图4 鼎阳科技 SDS3054 提示出当前波形不是规则的脉冲方波

在测量正弦波时，在采样率足够的情况下，示波器上捕获尽可能多的波形，测量得到的高电平和低电平更稳定、更准确，相应由之影响的水平轴参数上升时间、下降时间、周期、频率等也就更准确。对于正弦波测量，还可利用正弦插值或等效采样模式来提高待分析的样本数，测量得到的结果可能也会更准确。

二、示波器水平量测量的第一算法：确定波形中任意一电压阈值和波形交叉点对应的时间轴的位置

水平方向上常见的测量参数如上升时间定义为幅值的10%-90%。在具体算法上，如图1所示，就是先根据上述的垂直量第一算法，先确定高电平和低电平从而得到幅值，再由幅值的10%得到对应的电压阈值和幅值的90%得到另外一个电压阈值，计算两个电压阈值和波形交叉点对应的水平位置之间的时间差就是上升时间。

现在面临的一个相对比较复杂的问题是，怎么确定某个电压阈值和波形交叉位置处对应的时间轴的位置？这就是示波器水平量测量的第一算法。

一种比较简单的算法是，在电压阈值处划一条线，以这条线和波形相交处最接近的那个采样点对应的





时刻作为时间轴的位置。但是，这种算法带来的误差可能会很大，特别是在上升沿一般只包括了几个数据样本点，采样率不是特别高的情况下。另外一种算法如图 5 所示，**在电压阈值和波形交叉处相邻的两个采样点之间进行立方插值，然后连接最接近交叉点的上、下两个插值点或采样点，根据这两个确定的点可以获得 $y=ax+b$ 这个二元一次方程的 a 和 b ，然后再根据交叉点已知的电压阈值获得 x ，即获得了水平轴对应的位置。**

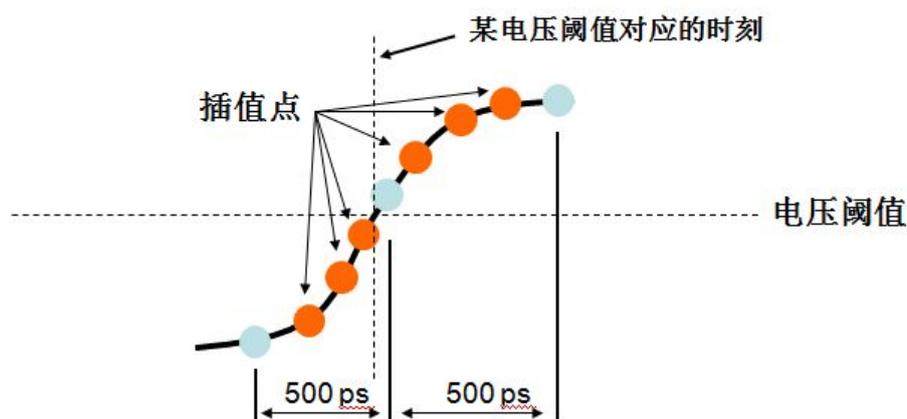


图 5 在交叉点相邻的两个采样点之间进行立方插值，再计算交叉点对应水平轴的精确位置

后一种看起来比较复杂的算法误差显然会小于前一种，但仍然会存在误差，**误差的大小和采样率大小及示波器本身的时基稳定性有关。**具体测量精度可以用这个公式描述： $\pm((0.06 * \text{采样间隔}) + (1 \text{ ppm 的测量间隔}))$ 。

重复强调的是，电压阈值是由幅值决定的，譬如周期表示上升沿 50%到相邻上升沿 50%之间的时间间隔，上升沿的 50%这个电压阈值就是由幅值得来的。因此，**垂直量的算法会对水平量的参数结果产生影响。**

示波器的时基稳定性（示波器时钟的特性之一）和捕获时间相关。**捕获时间越长，时基稳定度越差。**从这个角度来说，单脉冲测量的精确度会更高一些。这就产生了矛盾：**捕获时间长，轨迹直方图的统计结果更稳定，测量结果应该更准确，但捕获时间长，时基稳定度降低了。**

结论：**对于低速信号，上升沿不是很快的脉冲信号的测量，在采样率足够而且采样率保持不变的情况下，时基稳定度随捕获时间的的影响不大，捕获更长时间，测量准确度更高。对于 10GHz 以上带宽的示波器，**





时基稳定性是个不可忽略的指标，要查看时基稳定度指标来判断捕获多长时间是合适的。另外一种方法请参考下面回答汇总中“大卫”说明的方法，可以通过捕获单个脉冲，多次测量，查看测量统计结果的方式。

"一周一问"之 NO.0001 问回答汇总

雾里望月

应该显示至少一个周期，情况允许的话两个周期更好，可以做对比。频率越高，测量的误差就高。仅个人意见。

疯子

第一问：屏幕上的波形只有一个脉冲时候测量的准确度好，因为在我看来，示波器每屏的采样点数是一定的，要想将一个想分辨的信号准确的分辨出来，在保证能准确采到信号所有信息的前提下，采样点数越多越好。第二问：假设示波器的 AD 为 8 位，ENOB 也为 8，采样率为 1GSPS，在忽略时钟抖动等其他给采样带来额外噪声的条件下，那么幅度最大偏差应该为 0.39mV，脉宽偏差为 1ns。第三问：同一个示波器的稳定性应该由时钟稳定性来决定。

刘伟城

示波器误差比较大的是其幅度，如果使用示波器测试幅度，那么无论你怎么设置，3%的误差是允许的，而频率周期相关的参数，主要是看时基部份（X 轴），不同档位精度会有所差异，单波形的采样精度会更高，采样误差会更小，从采样精度上看，单波形精度会更高。（网文搜集整理，尚未完全消化，仅供参考）

Moore Mo

要测量上升沿，需要两个条件，一是知道高电平和低电平的位置值，二是需要有至少一个边沿，最后还有一个默认条件，边沿上的采样点要足够多。由于高低电平是通过统计计算得到（除非用 max-min 定义），几个高电平和低电平的波形是需要的，碰到码型组合多的情况，通常会更多一点，这样高电平和低电平的数值会比较准一些，减少了过冲和单脉冲（如长 0 中的一个 1）带来的误差。如果有多个上升沿，能够得到上升沿统计分布情况，这样更为准确一点。因此一句话，视信号来确定周期的个数，在采样率足够的情





况下，周期尽量要多一些。

在路上

小时基的采样率大于等于大时基，所以屏幕上显示一个脉冲应该比多个有更高的精度，即使采样率一样，有插值的测量也会比没插值的测量更高的分辨率（等同于采样率提高）。当然，如果采样率一样，测量数据也没插值，那就一样。单脉冲测量的精度为等效采样率的分辨率。对于一个 100mv，50ns 的脉冲信号，其垂直分辨率（即幅度精度）和所处示波器垂直档位相关，要选择 100mv 尽量接近采样 ADC 的满量程，最大的偏差等于这时候采样 ADC 等效到输入信号的分辨率。水平精度等于等效采样率。

雨季不再来

上升时间的定义是幅值的 10% 处到 90% 处的时间，幅度的确定是统计结果，若然只有一个单脉冲，实时采样率下，该结果可能会不太准确。但是又因为要保持足够的采样点，单脉冲显示无疑是很好的选择。所以我认为最好是能够框定一个合适的范围来测量其上升时间，并不是一个好，或者越多越好

达

针对第一问测量上升时间，我有两个考虑：一是单个样本是否足够准确，二是选定的样本是否足够多，足够多的样本可以得到更为准确的结果。所以，我的意见是在充分利用示波器存储深度的情况下选择要测量的样本数，而不是只选择单个样本进行测量。

Lib 邓

个人认为在保证示波器最高采样率的情况下应使得屏幕上显示波形越多越好，示波器的测量值是根据采样点进行软件计算得出的，最高采样率保证了脉冲上升沿采到足够的点，而更多样本数则保证更高精度。第二问如果理想化利用 ADC，那么测量误差应该为 0.39mv，至于不用示波器的稳定性应该受制于使用的硬件及时钟的稳定度，使用的时钟好不好直接关乎示波器测量稳定性。

Levi_yu

对于测量脉冲信号的上升时间，也就是信号从幅值 10% 上升到幅值 90% 所需要的时间。这里涉及到的幅值测量和时间测量。充分利用 ADC 的有效位数和采样率（测量一个脉冲）。可以保证我们测量数据的精确度。但是对于幅值，示波器所测量幅值是 top 和 base 的差值。而 top 和 base 是示波器的一个统计结果。如果只测量一个脉冲我们就不能保证 top 和 base 值的准确度，进而影响到幅值的准确度。所以说保证足够的





采样率时，测量两以上的周期，这样得到的上升时间会准确一点。二问:对于有效位数七位的 ADC。幅值测量偏差在 $\pm 0.39\text{mV}$ 。而时间数据的测量准确度取决于示波器的系统时钟精确度。

大卫

单脉冲更好，且在保证高低电平一定水平格子的基础上，尽量拉开上升段。保证足够的水平分辨力才能使上升时间测量准确。如果是多个波形，每个波形的上升段采样点偏少从而影响波形复原及测量。 **[注：在采样率足够的情况下，多个脉冲测量更好。]**

根据上升时间测量定义与高低电平的确定也有关系，考虑到高速波形有过冲或欠幅现象，即高电平不平度更差，所以高电平要保证最大几率幅度的充分显示。

当然一般采样长度是在屏幕内，采样长度超出屏幕时，再看示波器算法定义，如果计算把全部采样点算进去，则按上述在同一屏幕内显示的原则一样考虑。

采样长度加长又采集单脉冲计算是有利的。

脉冲幅度在纵向也要尽量接近满刻度显示，减少幅度量化误差，从而既有利于幅度准确测量，也有利于上升时间测量。注意，有的示波器满刻度是屏幕纵向八格，有的就不是哦。

重复性同一台示波器可以利用一般具有的统计功能进行统计，有均值，标准偏差，测量次数甚至概率分布图显示。统计前保证波形已稳定显示，清零后进行。标准偏差即为离散度评价，3 倍其值即基本把各结果包进去了。

不同示波器离散性一般说来比单台差，因为同一台各次测量消除了系统误差影响（都相同），不同示波器系统误差不一样，会叠加进离散性。当然，不同示波器其重复性也是有差异的，所以说一般结论是这样，不排除有的示波器重复性很差，超过其他不同示波器间的差异。

测量准确度一般可以达到百分量级，一般百分之三左右，当然采取措施可以更高些。脉冲幅度可以采取比较法达到万分之几的准确度。 **[注：这个可能需要进一步的说明，比较难以理解为什么可以达到这个准确度]**

以上前提条件是示波器带宽足够，其自身上升时间为被测信号三分之一以内。这是最低要求，过于靠近时采样点偏少大大影响拟合以及测量的准确度，重复性也差，需要多次测量，这时只显示单个波形的优势就不明显了，此时真正采样点达不到常规的 500 或 512 个。能达到常规采样点时拟合方式的影响就不重要了。





如果波形自身重复性好而又能达到常规采样点显示，充分展示单个波形就可以准确测量。否则要显示多次或多个波形。重复性是否良好实测容易评价，从而确定一次要准确测量是显示单个还是多个波形，一般说来是单个。

该信号对应 7 兆赫兹带宽，至少要 20 兆带宽示波器测量，采样率至少 50 兆，采样间隔 20 纳秒，上升段才不到三个采样点，显然准确度低。50 纳秒如果占两格半，即设为 20 纳秒每格，按达到常规采样点数计算，每格 50 点，则每点间隔 400 皮秒，采样率为 2.5G/s，相当于 250 兆到 1000 兆示波器测量效果好。不到每格 50 点有十个以上效果就不错了。所以采样率至少 500 兆，一般是一两百兆带宽的示波器。以上说的是实时采样。如果是重复采样下获取波形，波形本身重复性一致性好才行。

100 毫伏信号即使不考虑过冲部分设置为 10 毫伏每格显示十格，太满；20 毫伏则只有 5 格，偏少。可利用数字示波器的垂直偏转系数几乎可以连续调整的功能来设，如设置为 15 毫伏每格，显示近 7 格。

更正一下，脉宽看成了脉冲上升时间。脉宽 50 纳秒上升时间会更快哈，原则同样适用。

脉宽测量与上升时间准确测量技巧不同，考虑到数字示波器水平时间间隔测量准确度高，轻易达到十万分之一以内。利用其大延迟功能可以显著提高测量准确度，在高扫描速度下先水平居中显示上升沿，再延迟 50 纳秒显示下降沿，根据偏离中心的位置可得脉宽，该方法准确度高。

脉宽的常规测量就可以达到千分量级的准确度，而脉冲幅度和上升时间则是百分量级。同屏幕内观察的准确度。





关于鼎阳硬件智库

鼎阳硬件设计与测试智库（简称鼎阳硬件智库）由深圳市鼎阳科技有限公司领衔创办，是中国第一家“智力众筹”模式的硬件智库。

鼎阳硬件智库顺时顺势，倡导“连接-分享-协作-创造”的理念，高举志愿者服务的大旗，相信互联网是“爱”的大本营，相信人们都有发自内心分享的愿望。

鼎阳硬件智库选择硬件领域最普遍的七类问题：电源，时钟，DDR，低速总线，高速总线，EMC，测试测量进行聚焦。寻找“最针尖”的问题进行研讨，针对“最针尖”的问题组织专家答疑，将硬件大师积累的宝贵知识和经验变成公众财富，惠及更多硬件人。

鼎阳硬件智库的运作载体包括“线上”的微信公众号分享，微信群，网站，网络社区论坛，博客，邮件群等多种互联网工具和“线下”的专家论坛和专家把脉。“线上”的分享坚持原创，坚持干货，保持专注和深耕。“线下”专家论坛邀请硬件相关的一线实战派专家分享“最干货”的硬件设计与测试知识与经验，面对面相互研讨；“线下”的专家把脉，通过大数据连接，促使具体问题和最熟悉这个具体问题的专家“精准匹配”，远程问诊和现场解决问题相结合。

鼎阳硬件智库，群策群力，连接所有硬件人。

有硬件问题，找鼎阳硬件智库。





关于鼎阳

鼎阳科技（SIGLENT）是一家专注于通用电子测试测量仪器及相关解决方案的公司。

从 2005 推出第一款数字示波器产品至今，10 年来鼎阳科技一直是全球发展速度最快的数字示波器制造商。历经多年发展，鼎阳产品已扩展到数字示波器、手持示波表、函数/任意波形发生器、频谱分析仪、台式万用表、直流电源等通用测试测量仪器产品。2007 年，鼎阳与高端示波器领导者美国力科建立了全球战略合作伙伴关系。2011 年，鼎阳发展成为中国销量领先的数字示波器制造商。2014 年，鼎阳发布了中国首款智能示波器 SDS3000 系列，引领“人手一台”型实验室使用示波器由功能示波器向智能示波器过渡的趋势。目前，鼎阳已经在美国克利夫兰和德国汉堡成立分公司，产品远销全球 70 多个国家，SIGLENT 正逐步成为全球知名的测试测量仪器品牌。

鼎阳硬件设计与测试智库

