

【鼎阳硬件智库原创 | 测试测量】

关于示波器的采样率

文档编号：HWTT0019



鼎阳硬件设计与测试智库
群策群力，连接所有硬件人！



【鼎阳硬件智库原创 | 测试测量】关于示波器的采样率

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

进进按语：

很多年前，我刚学习示波器时，看到了一句英文，叫“Keep an eye on the Sampling Rate”。我将之翻译成“时刻警惕采样率”。这成为我一直在强调的高保真捕获的6大原则之一。

采样率这个概念是如此的简单，以致人们觉得专门辟文谈它都不是很必要。我想将我的“关于”系列写成经典，硬着头皮将这个基本概念作为我来鼎阳后的“第三碗剩饭”炒将起来。

如果您是刚开始学习示波器，我的这篇文章和我的其它文章一样，可以成为最好的教材，没有之一。因为我有热情、有耐心将这些基本概念写出来，写清楚，写透彻，写到位。有些水平一般的，写不透彻；水平高的，不屑于写，怕是被人误认为水平太差。这就给我留下了坚持“炒剩饭”的意义感。也是因为我坚持“不装X”，强调自己写的东西是浅浅的东西，是“炒剩饭”，压力也没有大。

为了满足快阅读的需要，列出这篇文章的6个小标题如下：

- 1, 采样过程反应了数字示波器的本质：将模拟信号离散为一个一个的采样点
- 2, 最高采样率 VS 当前采样率
- 3, 实时采样率 VS 等效采样率（随机采样模式，插值算法）
- 4, 欠采样的影响
- 5, 时刻警惕采样率
- 6, 采样率和模拟带宽及数字带宽之间的关联

我将有更多普及性文章发表，敬请期待！



采样率 (Sampling Rate), 顾名思义就是“采样的速率”, 就是单位时间内将模拟电平转换成离散的采样点的速率, 譬如采样率为 4GSa/s 就表示每秒采样 4G 个点。Sa 是 Samples 的缩写。有些示波器厂商写作 4GS/s。当然, 采用不同量纲的单位就是 MSa/s、MS/s, KSa/s、KS/s, Sa/s, S/s。

1, 采样过程反应了数字示波器的本质: 将模拟信号离散为一个一个的采样点

数字示波器区别于模拟示波器的一个最大不同是**将模拟信号进行离散化**。我们常说的话是, “在数字世界里, 永远只有 0 和 1”。如何将那些各种不同形状的模拟信号转换成为 0 和 1 呢? 图 1 和图 2 表示了示波器将模拟信号离散化的过程。采样-保持电路根据采样时钟将连续的模拟信号“等时间间隔地”、“实时地”转换为离散的电平, 离散的电平再经过模数转换器 (ADC) 转换为一系列的 0 和 1。对于 8 位 ADC 来说, 8 个连续的 0 和 1 组成一个采样点, 代表了一个电平值。示波器将这些离散的采样点直接显示或将点和点通过某种方式相连显示为示波器屏幕上的波形。示波器保存的离散的采样点的个数就是“存储深度 (memory)”。

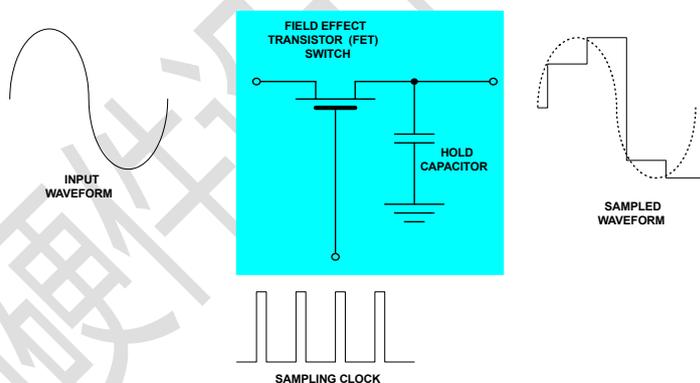


图 1 采样-保持电路将模拟信号转换成一个个离散的电平

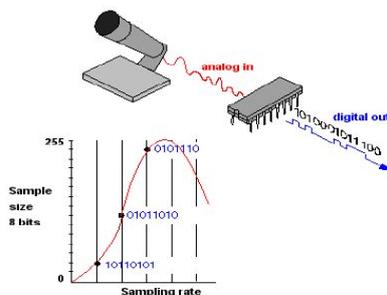


图 2 ADC 将模拟信号离散化为 0 和 1 组成的采样点

将图 1 和图 2 的离散化过程换个示意图来表达，如图 3 所示，离散的采样点之间的间隔就是采样周期，采样周期的倒数就是采样率。采样率 4GSa/s 就表示两个采样点之间的间隔为 500ps。在“点显示”方式和“线性插值”模式下，将示波器屏幕上的波形展开，有些示波器能看出屏幕上等时间间隔的采样点，打开示波器光标可以测量出两个点之间的间隔即为采样周期。

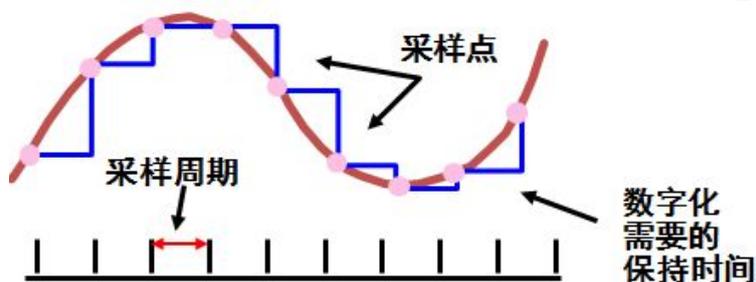


图 3 采样周期表示相邻两个采样点之间的间隔

2, 最高采样率 VS 当前采样率

在示波器的前面板上通常都会标识采样率，如图 4 所示是中国首款智能示波器 SDS3000 系列中的一款 SDS3054，她的面板上标识了采样率为 4GS/s，该采样率就是指这台示波器可以工作到的最高采样率。



图 4 中国首款智能示波器 SDS3054 的面板上标识了最高采样率 4GS/s

但是，实际上示波器的“当前采样率”受到存储深度的限制，可能小于最高采样率。随着示波器采集时间的增加，采样率会被强迫地自动下降。在图 5 所示的设置下，当前的采样率只有 100MS/s。也因此，我们要特别强调高保真捕获的这个原则：时刻警惕采样率。就是时刻警惕当前的“实时采样率”。



图 5 示波器实际工作中的当前采样率是受限于存储深度的

3, 实时采样率 VS 等效采样率（随机采样模式，插值算法）

前面提到的最高采样率和当前采样率及采样率都默认为“实时采样率”（real-time sampling rate），最高采样率即为最高实时采样率，当前采样率即为当前实时采样率。和实时采样率相对应的一个名词是“等效采样率(effective sampling rate)”。等效采样率一般是指示波器工作在一种特别的采样模式（被称为随机采样模式或等效采样模式）下的术语。

如图 6 所示为随机采样模式的工作原理示意图。示波器在该模式下的实时采样率如图示上方的一组图形的第 1 次捕获，第 2 次捕获，……，第 N 次捕获，这些单次分别捕获的过程中，采样点之间的时间间隔的倒数符合我们前面所述的的采样率概念，是实时采样率。将这 N 次实时采样的采样点“合成”在一起的结果如图 6 的下图所示。这种随机采样模式要求被测信号是“周期的、重复的”信号，示波器要能识别出这种信号每一帧的“起始”和“结束”，在“起始”位置开始第 1 次采样，然后间隔 Δt 进行第 2 次采样，再



间隔 $2\Delta t$ 进行第3次采样，……。那么这个 Δt 就是等效采样周期，它的倒数就是等效采样率。这种模式下等效采样率可以达到几十GSa/s。这种采样模式也正是采样示波器的基本工作原理。采样示波器的实时采样率只有200Ksa/s，但等效采样率可以做到很大。对于纯粹的正弦波信号的测量，使用等效采样模式是有效的。但是，实际被测信号往往并不是“周期的、重复的”的信号，该工作模式的使用场合并不多。

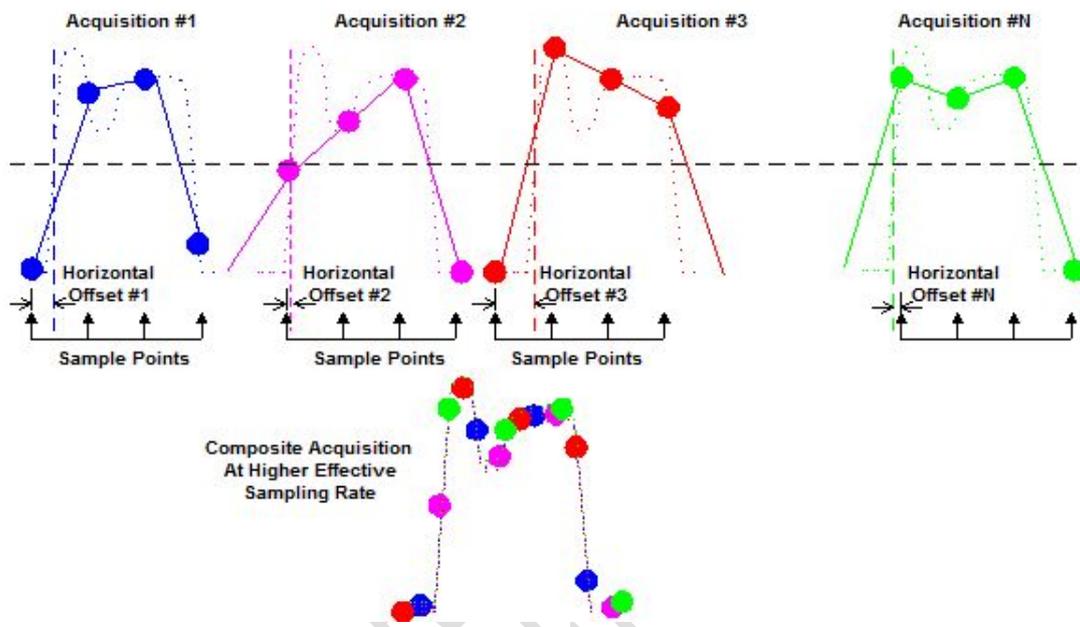


图6 随机采样模式工作原理示意图

另外一种等效采样率的说法和示波器的插值有关。在实时采样得到的离散的点和点之间插入若干个通过某种算法获得的“假点”的方法就叫插值。这里用“假点”这个说法是区别实时采样的点，便于理解。两个实时采样的点之间增加了9个点，等效采样率就相当于增加了10倍。

在实时采样率是足够的情况下，插值可以增加计算结果的精度；但在实时采样率不够，而且被测信号是脉冲方波的情况下，插值会带来过冲和下冲的“假象”，让用户误以为被测信号并没有失真，但其实已经严重失真了。如图7所示信号有过冲和下冲，这是否代表了信号的真实情况呢？实际上该信号并不存在这些过冲和下冲，只是实时采样率不足，又采用了正弦型插值算法。提高实时采样率之后的信号如图8所示。



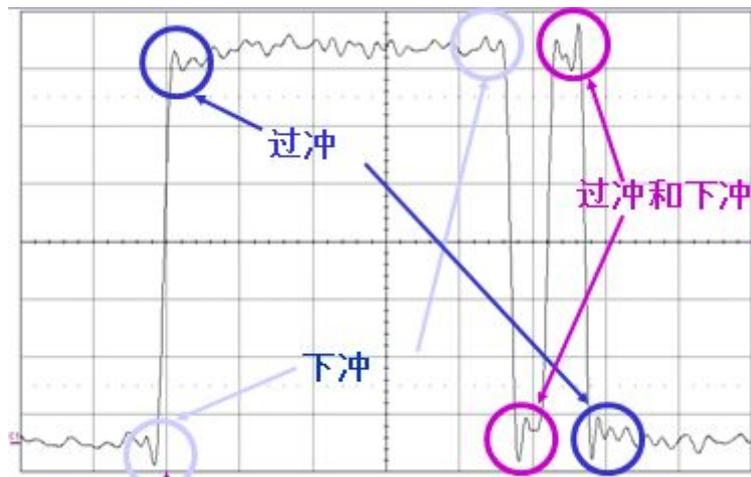


图7 带有过冲和下冲“假像”的信号

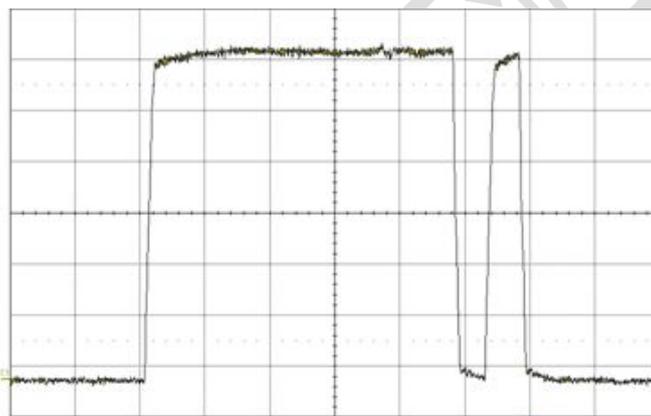


图8 实时采样率足够的情况下，信号的真实情况

正弦型 ($\sin(x)/x$) 插值是示波器中最常用的一种插值算法。该算法就是根据已有的 N 个点来计算第 $N+1$ 个点，算法的物理意义就是假设信号在按正弦规律变化。因此图 7 在采样率不够的情况下会出现局部正弦型的过冲和下冲。当被测信号是正弦型信号时，即使实时采样率不够，利用 $\sin(x)/x$ 插值算法，获得的插值后的波形看起来就更接近真实的正弦型信号了。如图 9 所示就是这种插值算法的好处的体现。

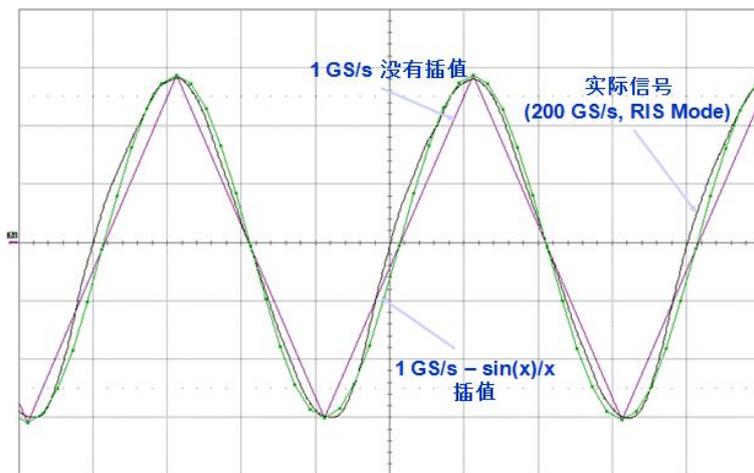


图9 对于正弦型信号，采用 $\sin(x)/x$ 插值可以弥补实时采样率的不足

4, 欠采样的影响

要确保过采样，而不要欠采样。**欠采样就是指采样率不够，示波器不能真实地还原原始波形，表现为波形局部细节丢失、失真、混叠等现象。**如图 10 所示采样率不够导致脉冲消失，因为这个脉冲很窄。如图 11 所示采样率不够导致波形失真，信号上本来存在的“震荡波形”不能真实地还原。如图 12 所示采样率严重不够导致混叠，信号本来是左图中黑线表示的正弦波，测量到的信号也仍然是正弦波，但频率发生了改变。

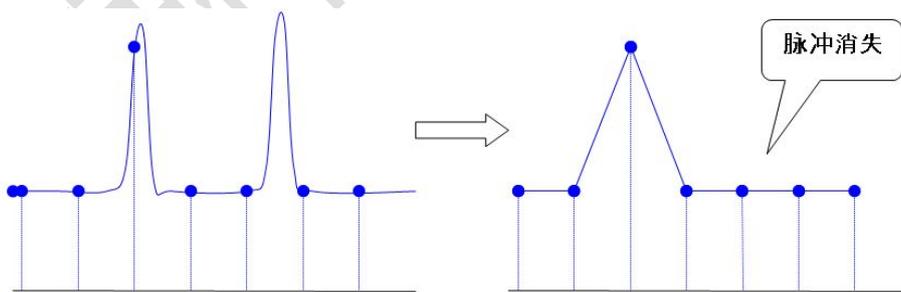


图 10 采样率不够导致“脉冲消失”

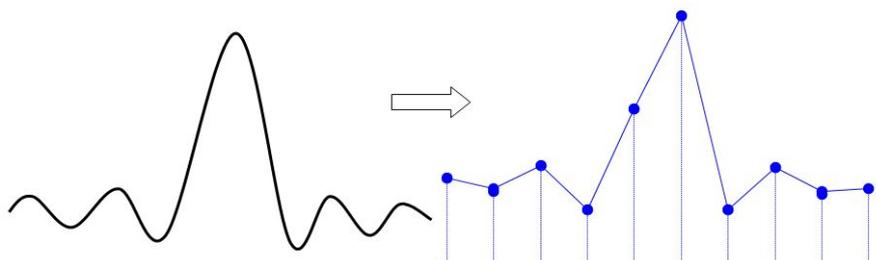


图 11 采样率不够导致“失真”

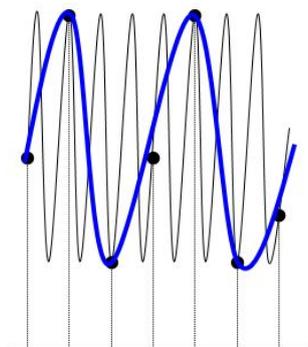


图 12 采样率不够导致“混叠”

在采样率严重不足的情况下，示波器无法稳定触发。如图 13 所示为使用中国首款智能示波器 SDS3000 测量一个普通的 1KHz 方波的效果，虽然触发方式为上升沿触发，触发的各项设置都正常，但触发电平并没有和触发点相交，信号有明显的过冲震荡。在欠采样的情况，测量到的参数存在误差，特别是峰峰值和上升时间、下降时间等参数误差很大，图中的上升时间测量项提示有黄色的感叹号，就表示当前采样率不够，显示的测量结果中有“<”的符号，表示当前信号实际上升时间应小于这个数值。对比图 14 是采样率足够的情况下的测量结果，上升时间只有 68ns，峰峰值的测量结果误差也和图 13 的测量结果不一样。这个对比让我们深刻体会到采样率不足带来的影响。信号整体看起来仍然是方波，只是波形上有过冲震荡，但其实是严重失真了。

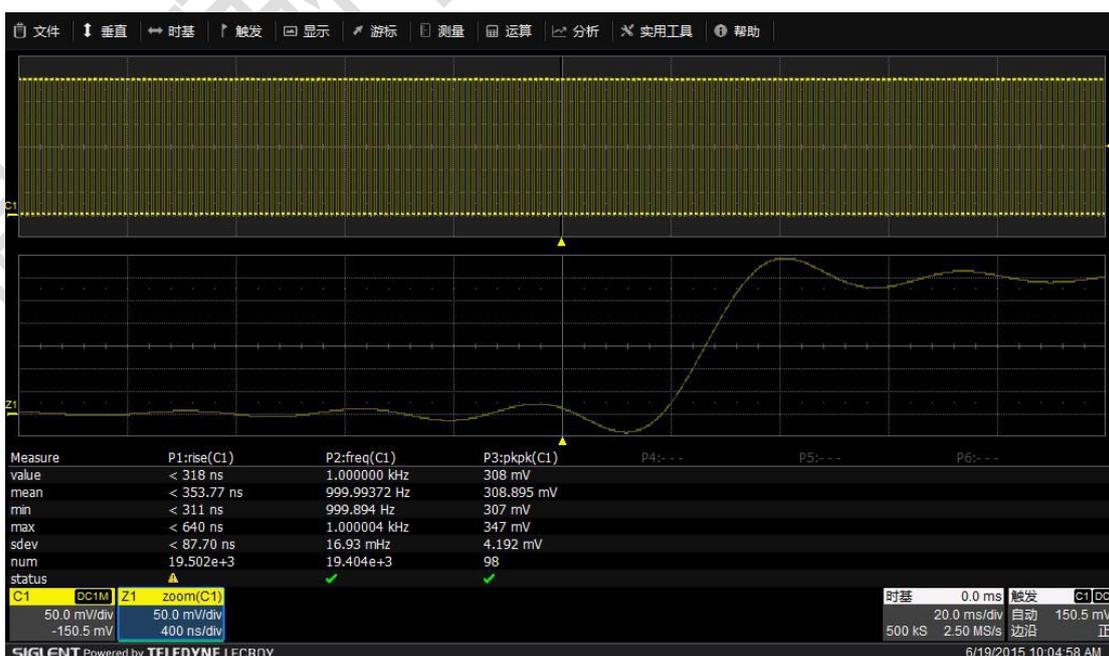


图 13 利用鼎阳 SDS3000，采样率不够时测量 1KHz 方波的结果

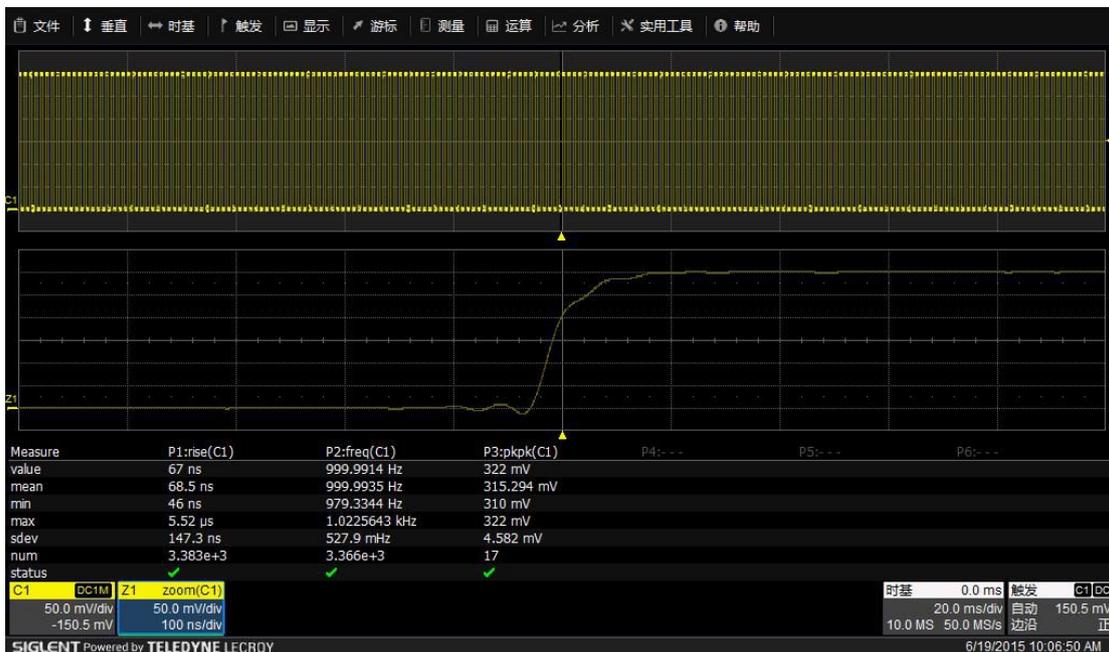


图 14 利用鼎阳 SDS3000，采样率足够时测量 1KHz 方波的结果

5. 时刻警惕采样率

关于采样率的选择依据，人们自然会想到那伟大的“奈奎斯特采样定律”：采样率要达到被测信号最大频率的两倍以上，才能保证不失真地重构原来的波形。问题来了，在实际示波器的使用中，示波器输入一个干净的单一正弦波，我们用两倍采样率，但很明显采样到的波形是严重失真了。在实际应用中，要求采样率远大于最高频率。在参考文献[1]中笔者看到这样来解释这个现象：“如果采样率等于信号的最高频率，由于不太好的采样条件，不太可能从采样值中重建信号。而且，由于波段限制就需要无限裙边选择性的低通滤波器，所以在实际应用中要求采样率远大于信号最高频率的 2 倍”。（抱歉，笔者对这看得似懂非懂。）

在示波器的使用上到底该如何选择采样率呢？笔者一直强调的一个原则是：感兴趣的信号上升沿能采样 3-5 个点。上升沿能采样最少有 3 个点，达到 5 个点就足够了，采样更多的样本点意义也并不大。如表 1 所示，对于上升时间为 1ns 的信号，如果上升沿采样 5 个点，也就是每隔 0.2ns 采样一个点，采样率需要 5GS/s 以上，表中可以看出当采样率为 5GS/s 时和 10GS/s 时，测量上升时间的统计平均结果是一样的，方差值都是 0.02ns。



采样率	时间/ 采样点	采样率 /带宽	平均上 升时间	方差
200 MS/s	5 ns	0.2	4.7 ns	1.3 ns
500 MS/s	2 ns	0.5	2.3 ns	0.6ns
1 GS/s	1 ns	1.0	1.6 ns	0.1 ns
2 GS/s	0.5 ns	2.0	1.27 ns	0.03 ns
5 GS/s	0.2 ns	5.0	1.16 ns	0.02 ns
10 GS/s	0.1 ns	10.0	1.15 ns	0.02 ns

表 1 使用不同采样率测量上升时间的比较

总之，判断采样率是否足够，首先还是要看您**感兴趣的信号的细节的上升时间**是多少。以感兴趣的上升时间除以 5 得到采样周期，采样周期的倒数就是采样率。或者说是“5 除以上升时间”就得到要求的采样率。譬如对于开关电源中的 MOS 管，虽然漏源极电压 V_{ds} 信号的上升时间整体可能是 100ns，但 V_{ds} 的局部细节上升时间可能只有 2ns，甚至更小，因此准确测量 V_{ds} 的采样率按 2ns 来考虑就要 2.5GS/s 的采样率。这只是举例，具体 V_{ds} 的采样率的选择，通常是先用最高的采样率进行采样，再逐渐降低采样率来进行比较，判断什么样的采样率是合适的。

但是，始终牢记“时刻警惕采样率”！

6. 采样率和模拟带宽及数字带宽之间的关联

最高采样率和模拟带宽之间似乎存在着某种关联，但没有非常明确的说法。可以举例来理解这种关联性。譬如示波器的带宽 100MHz，意味着测量 100MHz 的单一正弦波带来的信号幅度的偏差最大将近达到 30%，但是如果在 100MHz 时的最大采样率只有 250MHS/s，那么对正弦波的采样将严重失真，正弦波的幅度可能降低到不到 70.7%。如果从上升时间的角度来理解，100MHz 带宽对应的示波器自身的上升时间大约 3.5ns，可以准确测量被测信号的上升时间大约 10ns；准确测量上升时间为 10ns 的信号，则需要至少 500Ms/s 的采样率。具体关于带宽的理解请参考阅读[2]，[3]。因此，如果 100MHz 带宽示波器只有 250MHz 的采样率是不合适的。从这个数字化例子来理解，建议最高采样率是带宽的 5 倍是有一定道理的。

还有一个“生造”出来的概念叫数字带宽，定义为采样率的 1/2。这个概念在实际中没多大意义，也提





得很少。当采样率不足的时候，测量出来的上升沿变缓，和带宽不足的效果一样。

参考文献：

- [1] 频谱分析原理，Christoph Rauscher
- [2] 关于示波器的幅频特性曲线，汪进进，鼎阳硬件设计与测试智库
- [3] 示波器的带宽越高越好吗，汪进进，鼎阳硬件设计与测试智库

欢迎交流：

如果您想和本文作者进行进一步的技术交流，敬请发送电子邮件到 specialist@hwthinktank.com。如果您想要本文章的 PDF，请直接在微信对话框中回复您的电子邮箱地址，工作人员将在两个工作日内发送本文的 PDF 版本给您。

版权声明：

本微信所有文章皆为鼎阳硬件设计与测试智库专家呕心沥血之原创。希望我们的经验总结能够帮助到更多的硬件人，欢迎转载！我们鼓励分享，但也坚决捍卫我们的权益。引用请注明出处——“鼎阳硬件设计与测试智库”微信号（SiglentThinkTank）。鼎阳硬件设计与测试智库将保留追究文章非法盗用者法律责任的权利！”

【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。

【关于鼎阳硬件设计与测试智库】

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。

鼎阳硬件智库顺势顺势，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的分享的愿望。





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。

