

【鼎阳硬件智库原创 | 频谱分析仪】频谱分析仪应用解惑之三—噪声

文档编号：HWTT0050



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 | 频谱分析仪】频谱分析仪应用解惑之三—噪声

杨鼎

深圳市鼎阳科技有限公司

ThinkTank 按语

《频谱分析仪应用解惑》这个系列被那些关注频谱仪的读者“追剧”了！好吧，今天放送第三集！

文章中偶尔蹦出些时髦的句子，如“噪声仍将任性地出现并坚持抢镜”，“细心的同学可能会问”，“热噪声最终穿越重重险阻显示出来”，“所谓有无相生”，……这毫不做作地增强了文章的可读性；更重要的是，文章本身彰显的“底蕴”成就了她“被追剧式”热捧的特质！

本篇谈的是频谱仪三大指标中的另外一个重要指标：DANL，但话题远不止于此！

阅读本篇之后大呼快哉和豁然开朗者请不要吝惜你的举手之劳，转发到你的朋友圈并且点赞！

为了满足快阅读的需要，我们将一些重要的话句用蓝色标识了，但这篇文章本身并不拒绝你的快阅读——我们相信你会带着解渴的快感享受愉悦的快阅读，然后又细阅读之！

和那些热剧一样，这个作品也是发布一集之后再创作下一集。下一集正在创作中……

噪声无处不在。

仅前两篇关于频谱分析仪带宽和频率分辨力的文章中，几乎所有提到过的概念都和噪声相关：





RBW 影响显示平均噪声电平的高低，从而影响着测量幅度的灵敏度；

VBW 在视觉上对随机噪声平滑而对稳定信号无效果，从而影响测量结果的显示形状；

RBW 滤波器的高斯形状拥有着接近 1 的等效噪声带宽，从而对于测量随机噪声的功率有较小的累计误差；

参考源的短时抖动会在载频周围形成随频率距离衰减的相位噪声，从而同时影响着单音信号近端的频率分辨率和幅度分辨率；

参考源受噪声调制形成剩余调频，从而影响着系统能够达到的 RBW 的下限；

噪声还影响着非常多频谱分析仪内的重要概念，灵敏度，动态范围，平均检波结果，矢量解调 EVM，信噪比误差.....

就像上一篇《频谱分析仪应用解惑之频率分辨率》中提到，即使经过了校准，噪声在统计上仍决定着系统工作的精确度。因为校准决定的是准确度，和精确度没有什么关系，而且校准本身也是有噪声的！

噪声的概念很广，本文讨论将限于频谱分析仪中噪声的基本原理和测量。在很多情况下，我们都将频谱分析仪看做一台接收机，噪声和信噪比常常代表相同的含义，所以有时会看到用信噪比代表噪声的表述。当然，在后续系列文章中，噪声仍将任性地出现并坚持抢镜。

噪声在频谱分析仪中并不是直接出现的，作为测量结果的一部分，被称为显示**平均噪声电平（DANL，Display Average Noise Level）**。如图 1 所示为鼎阳科技 SSA3032X 频谱分析仪在 3.2 GHz 范围，Att=20dB，RBW=3MHz，前置放大器关闭状态下的 DANL。

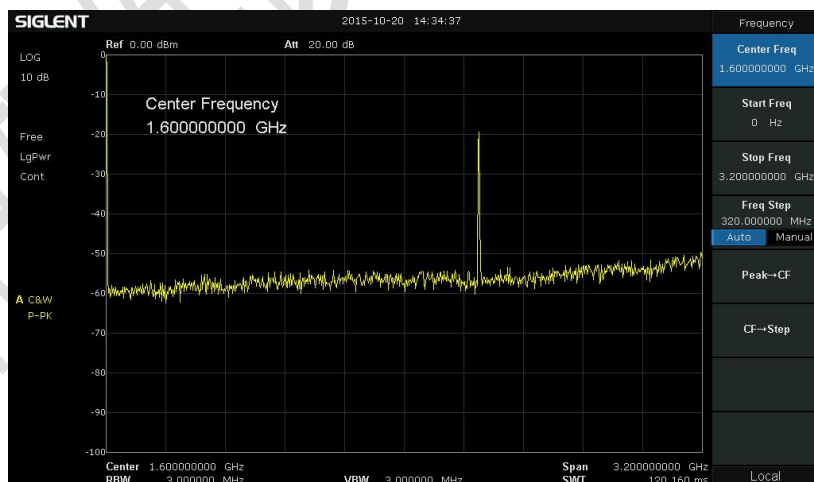


图 1 鼎阳科技 SSA3032X 在 3.2 GHz 范围内的 DANL

一个 50 欧姆的匹配负载连接在频谱分析仪的输入端（或者不在意空间辐射的话直接将输入接口悬空也可以），在频谱分析仪的屏幕上将会看到横跨整个频段的噪声底，这就是 DANL。**DANL 并不能代表射频输入端实际输入的噪声电平，而是输入端的噪声穿越了仪器内部的层层噪声后，在一定的平均方式和分辨率带宽下显示出来的电平；其实频谱分析仪的所有测量显示都是输入端的真实信号叠加内部噪声后的结果。**





如果输入端的电平没有仪器内部的噪声高，那么它就显现不出来。所以 DANL 的水平反映了频谱仪能够测量到的最小电平，也反映了频谱分析仪内部噪声的高低。

影响 DANL 的因素很多，为了便于比较，DANL 采用归一化功率密度来表示就是 dBm/Hz，也就是在 RBW=1 Hz 时测量到的平均功率，在各种测试条件下都要统一到此单位表示。

频谱分析仪中的这些噪声能消除吗？首先要看这些噪声是从哪里来的。

电子测量系统中的噪声一般来源于两个部分：目标本身和测量本身。如果较真的话，测量结果的统计过程也会引入“噪声”，这个不在本文的讨论范围。

目标本身的噪声容易理解，原始的信噪比，过程干扰都属于这部分。

测量本身的噪声可以分为硬件（采集）噪声和软件（算法）噪声。硬件噪声包括接头，线缆，器件，采样，串扰等，软件噪声包括滤波器的混叠，显示的精度，FFT 的泄露，有限字长效应等。硬件噪声主要来源于电子器件中电子的随机运动，常称为起伏噪声，或热噪声。这种噪声是电子器件固有的，不能用接地或屏蔽的方式消除。

热噪声的特点，在时域上看，幅度的分布是正态的，也就是高斯分布（此高斯分布和高斯滤波器意义不同），如图 2 所示。高斯分布信号的一个重要性质是，功率（也就是 RMS 均值）为一个标准差，这为我们计算高斯分布信号的功率提供了便利。

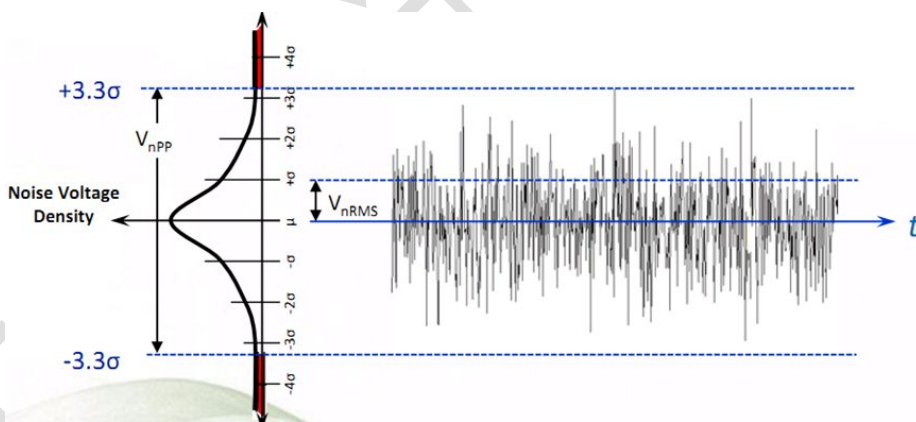


图 2 热噪声的幅度遵循高斯分布

在频域上看，热噪声理论上在所有频带都会存在，且功率谱密度为均匀分布，是功率为时间不相关的常数，称之为白噪声，如图 3 所示。实际情况下通常是带宽有限的，不考虑带外的话在应用的整个频带内为常数，同样称之为白噪声。



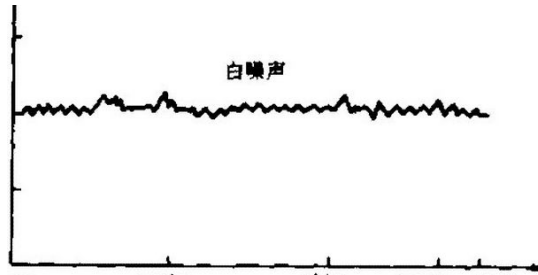


图 3 热噪声的功率谱是常数

所以热噪声是高斯白噪声。——请不要将高斯和白噪声这两点混淆。

细心的同学可能会问，为什么频谱分析仪的 DANL 是个随频率向上斜的？噪声的频谱不是不随频率变化吗？

热噪声的频谱是均匀分布的常数，但是频谱分析仪内部的器件对于信号的频率响应是变化的，所以 DANL 在大范围内不可能是一个水平的常数。

既然热噪声存在于频谱分析仪内部所有的器件中，那么输入端口的热噪声最终穿越重重险阻显示出来，沿途要受到多大的影响？

答案是基本只受到第一增益级及其之前器件的影响。

频谱分析仪内部的第一个增益级（一般是混频后的第一级放大器，或前置放大器）将仪器输入口的热噪声连同此增益级内部的一部分热噪声加在一起进行了放大，放大后的这两部分噪声信号到达后级链路时，输入口的热噪声已经变成了信噪比很高的功率信号，相对于后级链路中的噪声此时的信噪比已经足够大，因此后级链路中的热噪声的影响会变小。

可以得出结论，第一增益级的放大倍数越多，增益级本身的热噪声被同时放大的比例越小，频谱分析仪后级链路就对输入热噪声影响的越小，则 DANL 就会越接近输入端的热噪声。如图 4 所示一个噪声级联网络，第一增益级对整个系统的噪声水平影响最大。同样，若是链路中存在衰减器，则热噪声无法被衰减，仍然保持原有电平，这时后级链路的噪声就会对其产生显著的影响。专业同学会看出，本段是在解释噪声系数（NF，Noise Factor）。

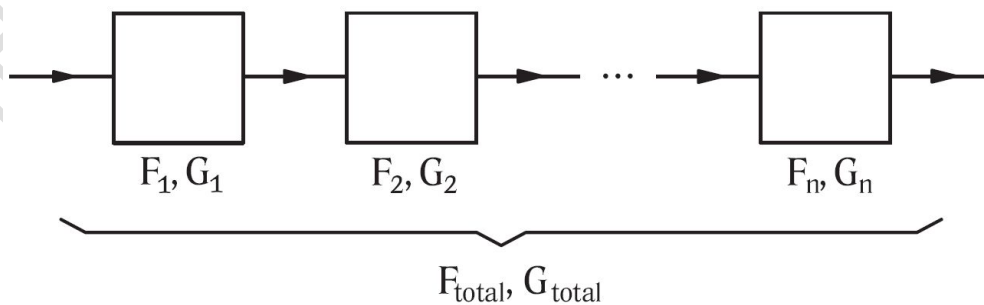


图 4 级联的噪声网络

噪声系数代表了系统对信噪比的恶化程度，噪声系数越小，噪声就会越真实地显示在测量结果中。回





到前一个问题，由于噪声系数是随频率变化的，所以 DANL 也是随频率变化的。

如何确定热噪声的功率？下面直接给出热噪声功率的计算公式，不要问我从哪里来~

$$P_{\text{noise}} (\text{Watt}) = kTB$$

k 为波尔兹曼常数 ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)；T 为绝对温度开尔文 (K)， $0\text{K} = -273.15^\circ\text{C}$ ；B 为测量系统的频带宽度(Hz)，单位是 Watt。

从这个公式中得到的结论是：**热噪声与频率无关，与阻抗无关，只与温度和带宽相关。**

若确定了带宽的使用标准，那么只剩下一句话：**热噪声就是温度。或者说，热噪声都可以转化为温度。**只有在绝对零度 0K 时，电子停止振荡，才会没有热噪声。在室温 (27°C ，约 290K) 时，我们将频谱分析仪输入端的 50 欧姆匹配负载看做一个 290K 的热噪声源，这个噪声功率为

$$P_{\text{noise}} = 10 \log(kTB) = 10 \log(1.38 \times 10^{-23} * 290) + 10 \log B = -174\text{dBm} + 10 \log B$$

归一化到 B=1 Hz 带宽时， $P_{\text{noise}} = -174\text{dbm}$

这就是说，**-174dbm 是 290K 环境温度下 1Hz 带宽内的噪声功率，这是理论上常温下能够测量到的绝对最小噪声电平，也是常温下 DANL 的理论最小值。**

在频谱分析仪这样的有噪声系统里，噪声还应考虑仪器的噪声系数和带宽对噪声的改变。我们给出 DANL 的计算公式：

$$P_{\text{-danl}} = -174\text{dBm} + 10 * \log\left(\frac{\text{RBW}}{1 \text{ Hz}}\right) + \text{NF}$$

从这个公式看出，**要想降低频谱分析仪内部的噪声，需要在两个方面着手，一是降低整体仪器的噪声系数，二是降低 RBW。**

仪器的噪声系数反映了频谱分析仪本身对信噪比的恶化程度，如上文所述，增加第一级放大器的倍数并减小放大器本身的噪声系数，可以显著减小仪器的噪声系数。所以，**频谱分析仪增加前置放大器（通常是低噪放），以及减小衰减器（效果相当于放大），可以使仪器的噪声系数减小。当前置放大器打开，并且衰减器为 0 时，仪器的噪声系数达到最小值。**

如图 5 所示，鼎阳科技 SSA3032X 频谱分析仪的 DANL 为 -161dBm/Hz，在 RBW=10 Hz，Att=0，前置放大器（20dB）打开，我们将看到 -151dBm 的 DANL 电平。



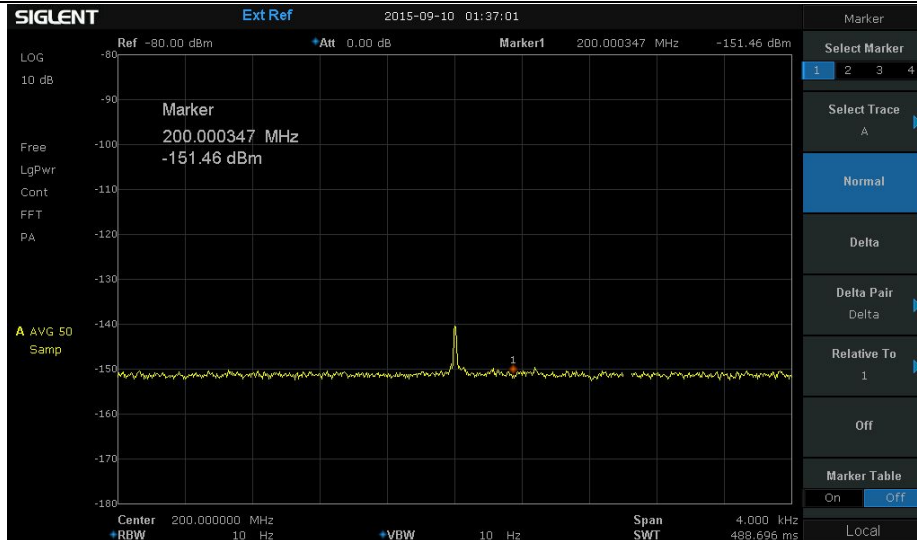


图 5 SSA3032X 的 DANL 为-161dBm/Hz 在 RBW=10 Hz 时为-151dBm

衰减器对 DANL 的影响如图 6 表示。测量同一个信号，衰减越大，噪声越高，但是信号峰值不变。请注意一个细节，当 Att=0dB 时，DANL 已经很低，这时载波旁边的相位噪声开始超越 DANL，影响到了这里的幅度测试灵敏度；而在 Att=10dB 时，相位噪声还淹没在 DANL 之下，RBW 是一个较理想的高斯形状。

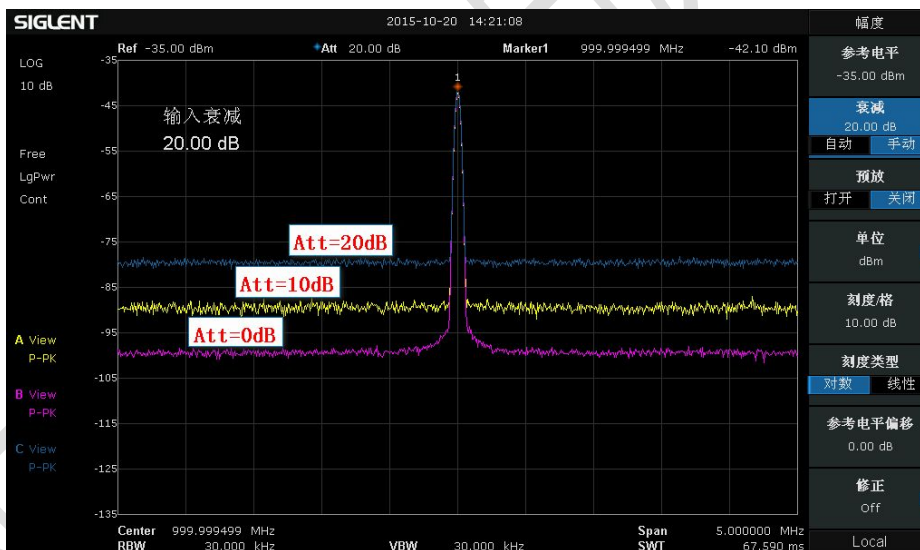


图 6 DANL 随衰减器变化

RBW 是分辨率带宽，是频谱分析仪频率选择滤波器的响应性状，这和 kTB 中的测量带宽本不是同一个概念。但由于频谱分析仪中使用的 RBW 滤波器是高斯滤波器，高斯滤波器的重要性质是其等效噪声带宽接近 1，也就是说使用高斯滤波器测量噪声，和噪声的真实功率非常接近，几乎不需要做额外的补偿。因此拥有高斯滤波器的频谱分析仪既可以用来测量功率信号，也可以准确测量噪声电平。

RBW 对噪声的影响如图 7 所示





$$\Delta \text{danl} = 10 * \log\left(\frac{\text{RBW1}}{\text{RBW2}}\right)$$

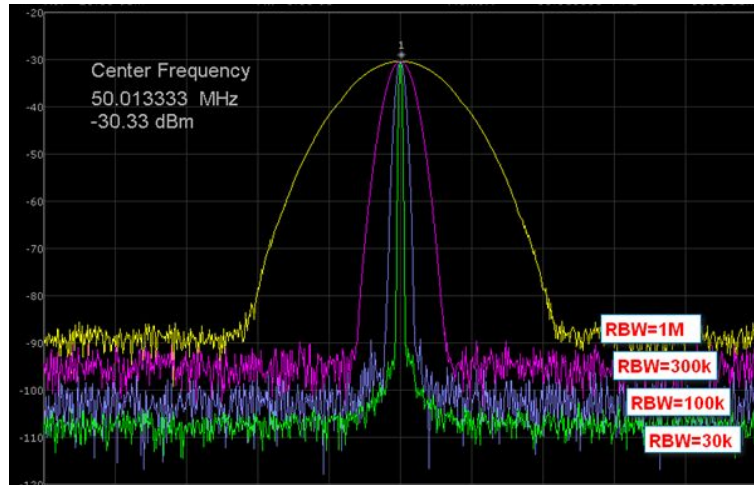


图 7 DANL 随 RBW 变化

严格地说，VBW 对平均噪声电平并没有影响，不会提高分析仪的灵敏度。如图 8 所示，VBW 影响显示电平的方差，减小 VBW 有利于噪声背景下检测连续稳定信号。

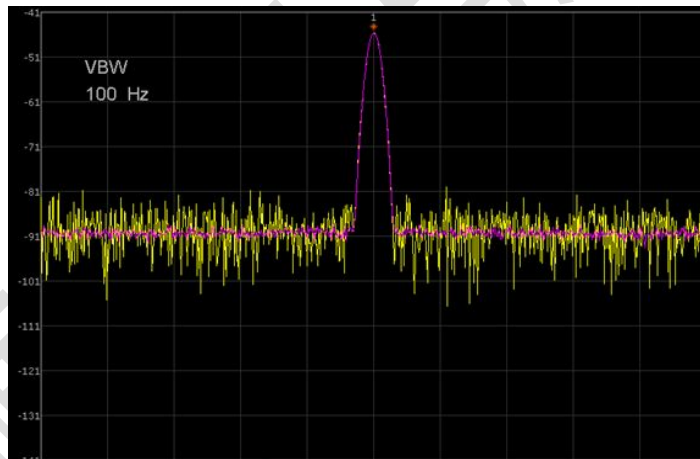


图 8 DANL 被 VBW 平滑后改变显示效果

使用统计方法。如果测量的目标不是噪声，而是非噪声的小信号，那么我们可以不关注噪声的真实功率，只需要使其尽量低。使用视频（对数功率）平均显示方式的 DANL，比使用功率（RMS）平均显示方式的 DANL 低 2.5dB，比使用电压（Voltage）平均显示方式的 DANL 低 1.45dB，所以这种场景尽量使用视频平均模式。如果测量的目标就是噪声本身，例如测量信道功率，那么就要使用 RMS 平均，这时得到的测量结果将是高斯噪声的标准差，等同于其功率。这涉及到高斯噪声的平均特性，将在后续文章中阐述。

如图 9 所示，DANL 在三不同平均方式下的测量功率：

迹线 A（黄色）：Video（对数功率）平均，测量功率最低，灵敏度最高

迹线 B（紫色）：Linear（电压）平均，测量功率比迹线 A 高 1.45dB





迹线 C（蓝色）：RMS（功率）平均，测量功率比迹线 A 高 2.50dB，这代表 DANL 的真实功率



图 9 DANL 在三不同平均方式下的测量功率

以上我们介绍了频谱分析仪 DANL 的影响因素以及提高灵敏度的几种方法，所谓有无相生，**提高灵敏度的代价是：**

系统固有噪声系数越低越好，但低噪声系数的器件成本高；

前置放大器可以降低系统噪声系数，但是也大大降低了幅度动态范围，限制了对大信号的测量，要防止系统过载；

衰减器的 0dB 输入衰减会使频谱分析仪的前端失去部分保护，增加输入驻波比，降低测量精度，也可能带来失真，降低了动态范围；

较小的 RBW 会降低噪声带宽，但会以平方倍率大大增加测量的时间；

使用对数功率平均方式，虽然降低了 2.5dB 的 DANL，但这种情况下测量噪声功率需要手动补偿这 2.5dB。

最后要再次提到信噪比。前文提到频谱分析仪最终显示的所有信号都是输入端信号叠加内部噪声的结果。当输入信号很大时，内部噪声没有明显的影响；但如果输入端信号很小，输入信噪比很差，则测量误差不可忽略。例如当输入信号与 DANL 同样大小的信号，也就是信噪比为 1 时，将会显示出一个比 DANL 高 3dB 的测量结果。要想使测量误差在 1dB 以内，信噪比至少要达到 10dB 以上，所以 **DANL 反映了频谱分析仪的灵敏度，但是不能代表其准确测量信号的能力。**

本文从比较杂乱的角度阐述了噪声在频谱分析仪中的各种影响及其应对措施，但是只要掌握热噪声的来源及其性质，其在频谱分析仪中的作用是可以逐步梳理出来的。作为噪声的一个对立面，失真其实也是无处不在，这一对矛盾体如何作用，请看后文《频谱分析仪应用解惑之动态范围》

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“最指尖”的问题进行研讨，针对“最指尖”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。

鼎阳硬件设计与测试智库

