

【鼎阳硬件智库原创 | 测试测量】

频谱分析仪应用解惑之四 ——动态范围

文档编号：HWTT0052



鼎阳硬件设计与测试智库
群策群力，连接所有硬件人！



频谱分析仪应用解惑之四—动态范围

杨鼎

深圳市鼎阳科技有限公司

ThinkTank 按语

很多人都感到“动态范围”是非常难以理解的一个概念。杨鼎先生创作这篇文章花费的时间精力是之前三篇之和。前面写好了一遍，但是因为内容太难了，推倒，重新又写了一篇。

开篇中，杨鼎先生写道，“古人常说月明星稀，夜空中原本明亮的繁星，在月亮的周围却显得暗淡稀疏，只剩很亮的几颗才能够看到。”诗一样的语言啊！这样的诗意表达不是为了迎合互联网时代的浅阅读，这更表示作者对动态范围的理解达到了一个境界！有了这样的境界写出来的文章才不“糙”。

敬请阅读！敬请期待这个系列的下一篇，篇篇精彩！

在系列文章的上一篇《噪声》中，我们曾提到几个概念：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；只有目标噪声大于测量本身的噪声，才能够被测量出来。

如果将这里的噪声看成广义的干扰，也是可以类比的，因为电子测量系统的测量目标虽然是各种电信号及其干扰，但是测量系统本身也存在着各种和测量目标相似的干扰。

对于信号分析仪一类的测量仪器来说，其结构本质上通常是一台通用接收机。我们经常使用信号分析仪测量通信接收机的噪声，混频，压缩，交调时，万不要忘记分析仪本身作为一台接收机的特性，而且要求比测量目标要更广泛，更准确，更精细。

在前面系列文章的带宽，频率，噪声的基础上，本文将讲述频谱分析仪的另一个重要概念：动态范围（Dynamic Range）。动态范围在测试信号的谐波失真，三阶交调，以及通信信道的峰均比，邻道泄漏等





场景下都是非常重要的测试条件。但是鉴于定量的动态范围分析实在是篇幅太多，本文为定性的动态范围分析努力做一些解释。

通俗解释一下动态范围的概念，比如视觉的动态范围。古人常说月明星稀，夜空中原本明亮的繁星，在月亮的周围却显得暗淡稀疏，只剩很亮的几颗才能够看到。

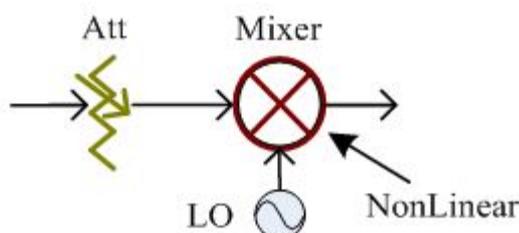


这是眼睛对亮度的适应，大多数星星只有在暗夜中才显得那么明亮，但是月亮附近提升了视觉动态范围的上限，从星星的亮度调整到了月亮的亮度，然而由于视觉的动态范围大小是有限的，从而下限也随之提高，暗一些星星的就无法再看到了。

同样，声音之于听觉、味道之于嗅觉等人类感触都存在类似接收分析的动态范围的概念。对比频谱分析仪，不同大小的测量信号常需要不同的设置，也就是我们常无法同时测量一个很大值和另一个很小值。所以，动态范围中的“范围”是指频谱分析仪在设置不变的条件能够同时测量的一个较大电平信号和一个较小电平信号的幅度差距，“动态”表明这个范围并不是固定不变的，它依赖于实际所要进行的测量，也就是这个动态要看测量的目标是什么。

通常我们所说的动态范围指的是无失真动态范围。先来看下频谱分析仪无失真动态范围的上限和下限分别是由什么决定的。

频谱分析仪作为一种通用接收机，动态范围和其的前端的非线性部件有密切的关系，例如混频器，放大器等，其中主要是混频器失真的影响。混频器（通常是二极管结构）属于典型的非线性器件，其实非线性器件响应结果中永远存在一定的失真，我们只是使用在某一段输入-输出近似线性工作区，也就是失真还没有足够大的条件下。





这里所述的混频器失真可以分两类：

幅度失真，混频器幅度输出不再随着输入按照原有的线性规律变化，衡量标准一般使用输出增益相对下降 1dB 时所对应的电平，称之为增益压缩。如图 2 所示，

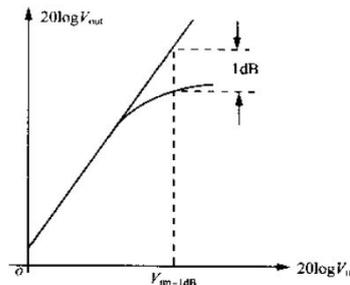


图 2 混频器等非线性器件的 1dB 增益压缩

频率失真，除了需要的中频，混频器产生了新的频率分量，常用相对基波频率的阶数来描述。在使用频谱分析仪测量单音信号及其谐波时，随着输入电平的增大，混频器产生的谐波（Harmonics）频率分量会越来越大；在使用频谱分析仪测量多音信号及其谐波和各种交调时，随着输入电平的增大，混频器产生的交调（Intermodulation）频率分量也会越来越大。

频率失真通常使用基波的阶数来表示。阶数越高的失真能量变化越剧烈，由于其变化率相对于基波高，所以当基波到达一定水平时，二阶和三阶失真分量会显著地发挥影响。四阶以上的失真虽然变化率更大，但是起点更低，在还未能显著发挥影响时通常输入已经到达了 1dB 增益压缩点，所以四阶以上失真通常不予考虑。

很多情况下，测量目标的失真和频谱仪本身的失真是很相似的，频谱仪的谐波和交调这些新增的频率分量常会和我们需要测量的信号落在非常接近的频率上，难以滤除；有的落在完全相同的测量频率上，增大了测量误差。频谱分析仪的这些失真决定了频谱分析仪动态范围的上限，也就是输入信号达到一定的电平，失真就会显著地影响到测量结果。

如图 3 所示，可以看到距离蓝色双音载波最近的红色三阶交调信号幅度最高，由于离载波很近，非常难以滤除；而二阶失真信号通常离载波较远，幅度也较低。三阶交调是衡量频谱分析仪抗失真性能的重要指标。



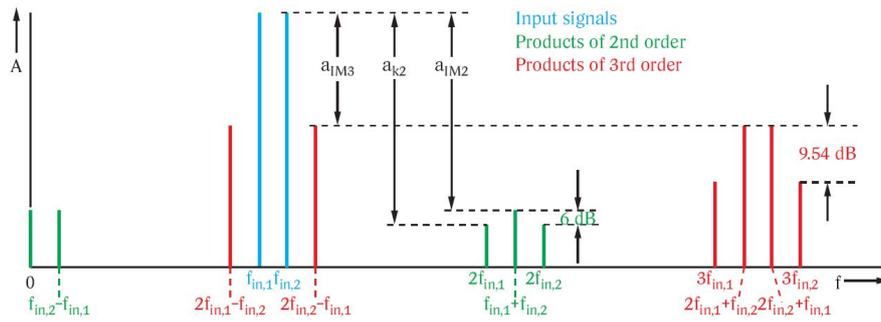


图 3 混频器对双音输入信号产生的各种频率失真

而动态范围的下限，由当前设置下的 DANL 大小决定。

从前面图 1 可以看到，输入衰减器在信号输入的过程起到了非常重要作用，它决定了输入端口的信号的衰减量，从而决定了进入混频器的信号电平，也就是决定了混频器产生的失真的大小，也同样决定了系统噪声系数的大小。

上篇文章中关于 DANL 的公式，

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

衰减器的衰减量很大时，DANL 会很高，但是混频器的失真很小，这时上限允许的输入更高，但不适合测量小信号；衰减器的衰减量很小时，DANL 会很低，但是到达混频器的信号电平相对就会很大，这种状态下上限允许的输入很低，不适合测量大信号，但是适合测试小信号。

所以衰减器的设置显著影响着到达混频器的输入电平的大小，也就是影响着动态范围的大小，它对底噪和失真的作用正好相反，而底噪和失真恰是频谱分析仪动态范围的上下限，那么如何寻找到一个最大的动态范围？如图 4 所示，通过调整衰减器设置，间接调整了混频器的输入电平，从而可以在 DANL 和失真寻找一个平衡点。这个点称为最佳混频器电平 指混频器产生的非线性失真的各种分量 正好和当前的 DANL 相等。增大衰减器，噪声就会变高而失真降低，减小衰减器，失真就会变高而噪声降低。



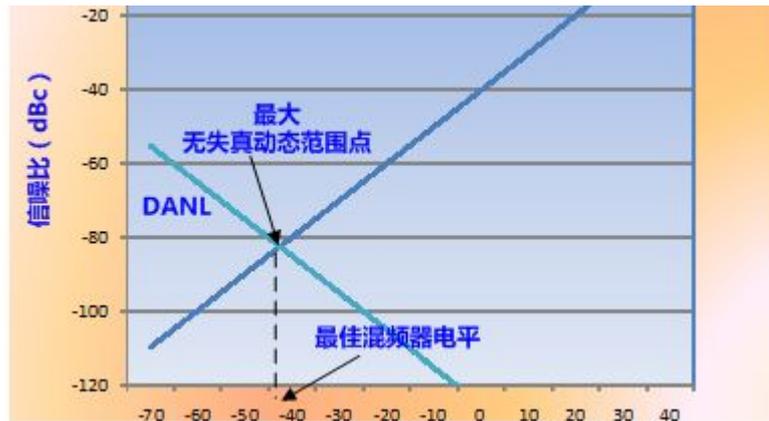


图 4 动态范围对失真和噪声

上面说明了噪声和失真对动态范围的折中关系，就像一个天平的两端，根据测量的目标来设置衰减器的不同设置。

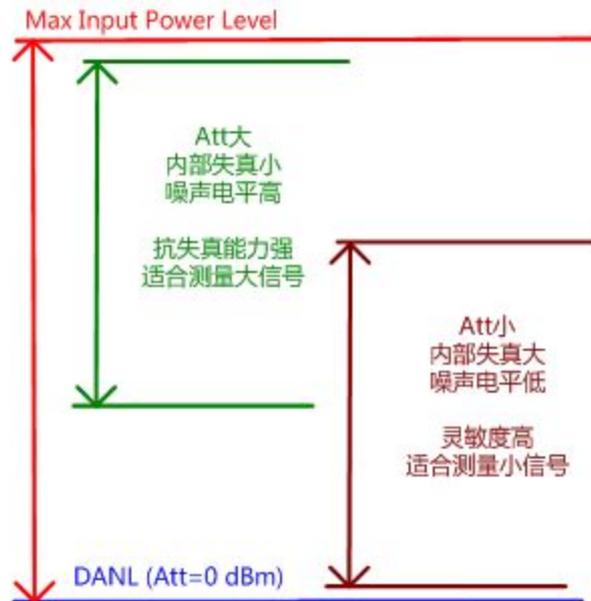


图 5 动态范围适合不同的测量目标

若您还对系列文章的前篇《频率分辨率》还有印象的话，应该会记得相噪和 DANL 的关系，由于在测量大信号的时候，载波近端的相位噪声通常高于 DANL，因此相位噪声不仅决定着近端的频率分辨率，也同时影响着近端的动态范围。通常情况下，测量三阶交调失真需要对载波近端的动态范围有要求，这就受相位噪声的影响。





如图 5 所示，载波附近的动态范围下限被相位噪声抬高了，在测量距离较近的三阶交调失真的时候，只有比较大的失真信号才能够被显示出来，否则会被相位噪声淹没；若此双音距离比较远，那么三阶交调失真就可以被清楚的观察到了。

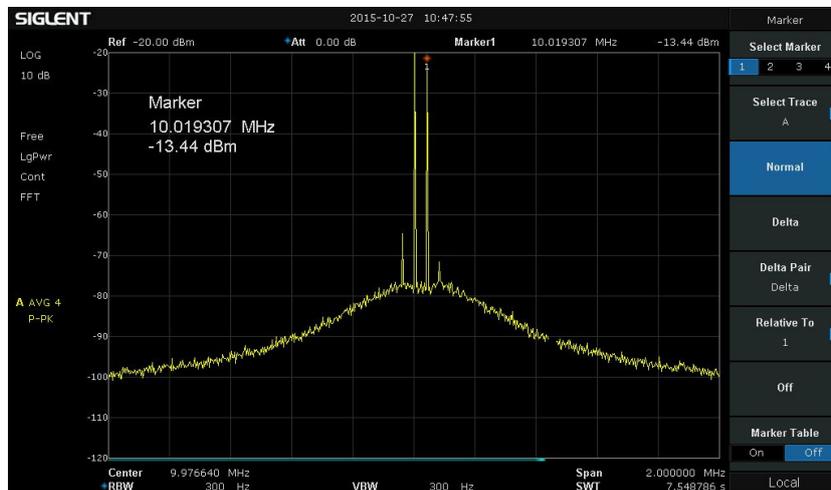


图 6 相位噪声对三阶交调测试的影响

并不是所有情况下都能够在最大无失真动态范围点进行测试，那么这些情况下，如果进行谐波，交调等项目的测试时，需要对被测载波信号的失真成分进行测量。在输入电平较大时，若此时动态范围设置的不合适，会造成频谱分析仪内部产生失真，这些失真和需要测量的信号叠加起来，无法判断真实的测量结果。如何判断失真是频谱分析仪内部产生的失真还是被测信号本身的失真呢？

最简便的方法是通过频谱分析仪的衰减器设置来快速判定。通过调整衰减器的衰减量，若失真分量的显示值保持不变，则失真分量是输入信号的一部分；若显示值改变，则失真分量就是由内部产生，或者是内部信号和外部信号之和。通过继续改变衰减器的值直到显示的失真不再改变，这时的测量才是可信的。

如果被测量信号的电平无法调整到最优的混频器电平范围，这就需要增加单独的外置衰减器或放大器。使用外置衰减器或放大器后，需要在测量结果中去掉这部分额外的差量。通常频谱分析仪中的幅度功能里有参考偏移来设置补偿。

在各种测量场景中，我们还会遇到各种关于范围的表述。如图 4 表示了频谱分析仪中的不同场景中的范围，最下边的蓝色底是 DANL，一般是在最小 RBW 和最小衰减给出。

分别显示的范围是：





红色是仪器允许输入的最大电平，这是频谱分析仪的标称测量范围；
 橘色是无混频器 1dB 增益压缩失真动态范围，
 粉色是三阶无交调失真动态范围，
 绿色是二阶无谐波动态范围，
 棕色是噪声边带无失真动态范围，

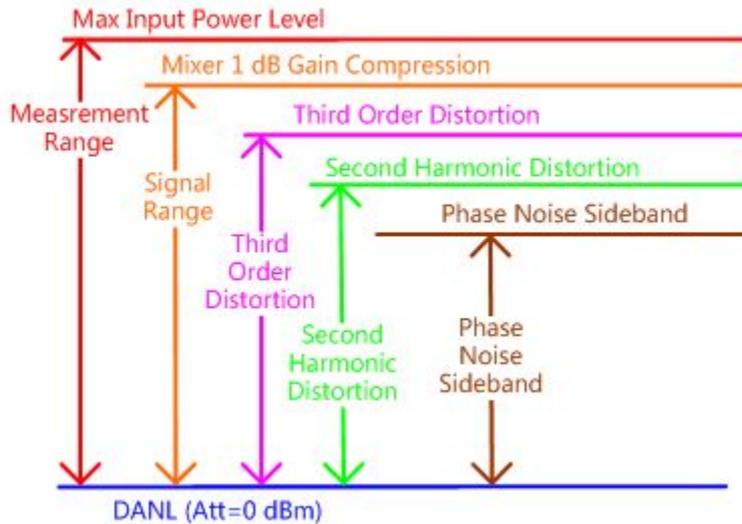


图 7 频谱分析仪中的几种动态范围

需要注意的地方是，在分析这些动态范围指标时，常是针对第一级混频器做的指标说明，因此通常在 0dB 衰减下给出。例如，1dB 压缩点的特性，在衰减器为 0 的时候，系统的 1 dB 压缩点就是混频器的 1dB 压缩点；而增加衰减器为 10dB 的话，系统的 1dB 压缩点会随之升高到 10dB，看似指标提升，其实暗含了特殊的条件。频谱分析仪的其他二阶，三阶失真指标等，基本上都是在 0dB 衰减下给出。

SSA3000X 系列频谱分析仪

失真和杂散响应	
二次谐波失真	$f_c \geq 50$ MHz, 混频器电平 -30 dBm, 输入衰减 0 dB, 前置放大器关, 20°C 至 30°C -65 dBc
三阶交调截断点	$f_c \geq 50$ MHz, 输入双音电平 -20 dBm, 频率间隔 100 kHz, 输入衰减 0 dB, 前置放大器关, 20°C 至 30°C $+10$ dBm
1 dB 增益压缩	$f_c \geq 50$ MHz, 输入衰减 0 dB, 前置放大器关, 20°C 至 30°C >-5 dBm, 标称值

图 8 鼎阳科技 SSA3000X 系列频谱分析仪的失真指标

最后总结一下，从上面几部分的分析中可以看出，频谱仪的动态范围受四个因素影响：





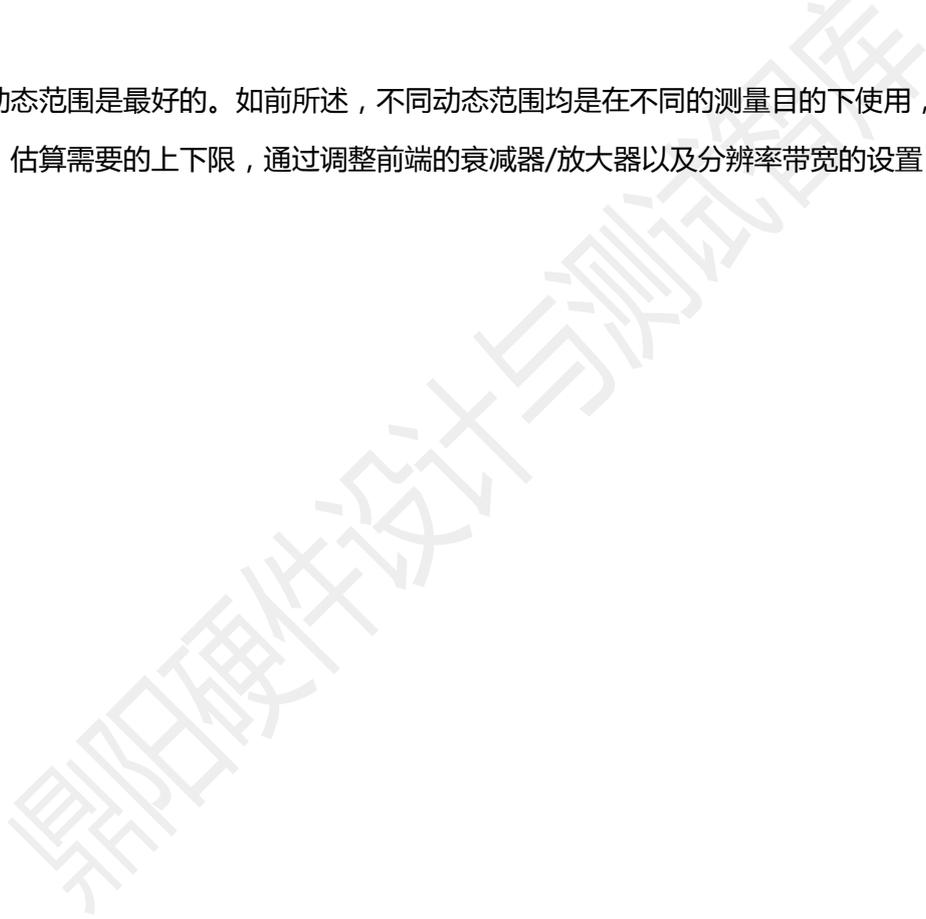
输入混频器的失真性能(非线性特性)：1db 增益压缩范围，二阶无失真范围，三阶无失真范围等，决定了动态范围上限。

系统的噪声系数(噪声特性)：影响着 DANL 的高低，决定了远端动态范围下限。

本振的相位噪声(近端特性)：高于 DANL 的相位噪声，决定了近端动态范围下限。

分辨率带宽 RBW 的性能：影响着 DANL 和相位噪声能够到达的最低水平，决定了动态范围的下限。

没有哪个动态范围是最好的。如前所述，不同动态范围均是在不同的测量目的下使用，一定要根据相应的测量场景，估算需要的上下限，通过调整前端的衰减器/放大器以及分辨率带宽的设置，找到最佳的动态范围。





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

