

【鼎阳硬件智库原创 | 频谱分析仪】频谱分析仪应用解惑之带宽

文档编号：HWTT0048



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带宽

杨鼎

深圳市鼎阳科技有限公司

ThinkTank 按语

如果提出频谱仪的三大指标，应该是：SPAN，RBW 和 DANL。这篇文章也许是你看过的对 RBW 讲得最透彻的一篇，适合于所有在使用频谱仪的人们，即使是玩频谱仪的高手，看了也会有启发的。

鼎阳科技似乎有雄心掀起频谱仪应用知识普及的风暴哦。

带宽是频域分析中的常见指标，频谱分析仪中常见的带宽有分辨率带宽和视频带宽，本文将全面讲解这些概念，以及之间的联系和区别。

分辨率带宽 RBW(Resolution Bandwidth)，代表频谱分析仪将两个不同频率的信号清晰分辨出来的能力。两个不同频率的信号的距离如低于频谱分析仪的 RBW，此时该两信号将部分重叠难以分辨。就像一幅图画在电脑上使用不同的分辨率去观察，清晰度是完全不同的。这里的“清晰”只是主观感受，普遍量化的标准是分辨率带宽定义在距离载波峰值衰减 3dB 的地方。在电磁干扰 (EMI) 测试标准中，分辨率带宽的标准为 6dB。可以说 6dB 的选择性比 3dB 要强。

如图 1 所示是基于鼎阳科技 SSA3032X 频谱仪测量两个距离约 20 kHz 的单音信号，在使用带宽为 30kHz，10kHz，3kHz 的 RBW 观察时，这两个频率相近的信号测量的功率完全不变，信号被清晰分辨出来的程度是完全不同的。





图 1 不同 RBW 的分辨能力

但是 3dB 带宽这个量化标准仍然是不够严谨，因为它只约束了 3dB 这一个点的位置。在相同的 RBW 下，还需要“矩形系数”这个参数，如图 2 所示。有的地方称为形状因子，就是衰减 60dB 时的带宽和衰减 3dB 时的带宽的比值。这个值越小越好，表明这个选择形状细长，能够将频率临近的信号完整地分离出来。一般来说，常见的数字频谱分析仪的矩形系数普遍为 5: 1 左右。一个极端情况，如果 3dB 带宽和 60dB 带宽相同，那么矩形系数为 1，这就是一个长方形了！

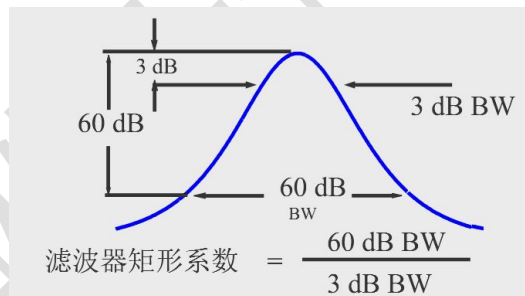


图 2 矩形系数示意

RBW 的带宽和矩形系数，基本上决定了一个频谱分析仪的频率分辨能力，也就是将不等幅信号分辨出来的能力；反过来看，一旦 RBW 确定，那么是不能够观察到窄于 RBW 的频率谱线的。如图 3 所示，随着频率分辨能力的变化，两个临近的不等幅信号的分辨程度是不同的。

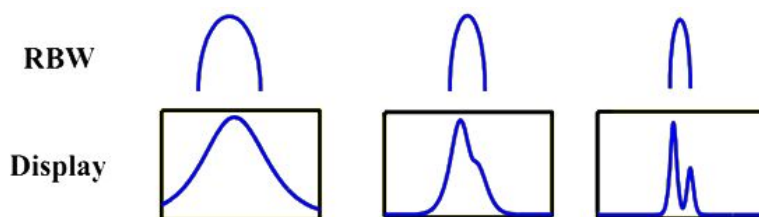


图 3 RBW 分辨不等幅信号的能力

当然，影响频谱分析仪频率分辨能力的因素不止这两个，在测量距离一个载波信号非常近的小信号时，即使 RBW 设置的相当小，也有可能分辨不出来

。这是因为频率分辨能力还受到近端的相位噪声和本振的剩余调制的限制，这两点将在后续文章中阐述。

那么问题来了，为什么频谱分析仪的分辨率带宽的形状是一个脉冲的形状，而不能将理论上一个本来就干净的正弦波检测为一根同样干净的细细的谱线？另一个相似的问题是，既然分辨率越清晰越好，为什么不直接使用最精细的分辨率带宽去检测信号？

面对这样的情况，一个训练有素的工程师对于很多理想化的测量场景，一定会给出的回答是：工程折中的实现。想以合适的代价得到测量结果，就不可避免丧失精度；反过来，想测得无比精确，结果就要付出很大成本才能得到。套用这个思路，我们给出一个官僚的解释：成本。

先回答第一个形状问题。这首先涉及到频谱分析仪的频率检测原理。从基础的角度考虑，我们可以把频谱分析仪理解为一种频率选择、峰值检测的电压表。“峰值检测”的表述，说明频谱分析仪的测量结果将是稳定的峰值，而不是变化的波形；“频率选择性”的表述，则说明频谱分析仪的对正弦波的频率是选择出来的，那么选择的方法其实就决定了频率分辨能力的大小。对于一些以 FFT 分析步进实现的频谱分析仪，只是每次选择的范围变大了一些，但是基本过程是没有根本变化的。

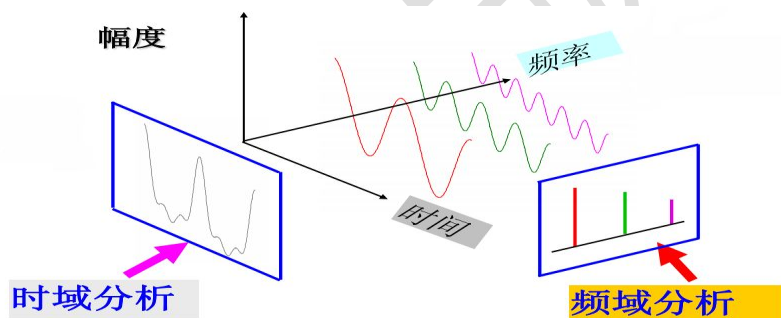


图 4 频域和时域的关系

在某个特定测量频率上看，我们对于频率的测量，就是用一个特定形状的滤波器去选频，一个细细的干净的正弦波经过选择滤波器，从而得到这个频率点的响应幅度，那么这个选择成型滤波器的选择能力就基本代表了频谱分析仪的频率选择能力。在整个频带测量过程上看，频谱分析仪的测量过程其实是使用穷举法，一个频点接一个频点地通过选择成型滤波器并测量峰值，然后遍历所有频点，拼凑出整个频率范围的能量分布。

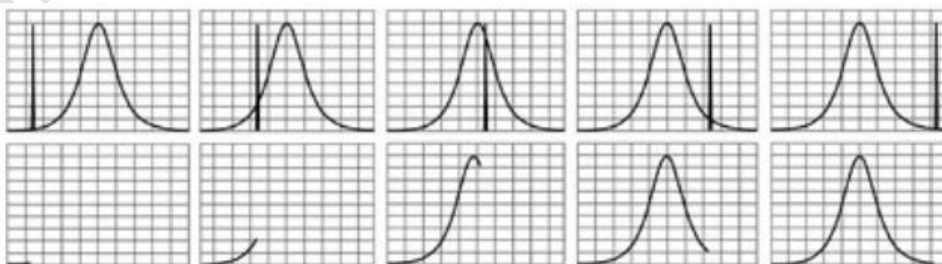


图 5 成型滤波器移动选择频率





如此来说，极端细致分辨能力的滤波器，相当于使用一个冲击函数去选择出需要的频率。如何构造一个冲击函数形状的滤波器呢，它在时域上是时间无穷幅度不变的，也就是不可能构造出来。退一步讲，使用一个矩形（形状因子为极限 1）作为选择的形状，仍然面临非常长的响应时间。也就是说矩形系数越好，分辨能力越细的滤波器实现成本越高，所以说，把一个理论上本来就很干净的正弦波检测为一根同样干净的细细的谱线，实现成本是非常巨大的，我们的工作就是在理想和现实之间寻找一个成本合适的平衡点：这个滤波器既要有良好的形状选择性，又要易于实现，还要对于各种测量场景（功率，噪声，分析等）表现较为一致的结果。

这时候高斯（Gaussian）滤波器闪亮登场了！是的，就是那个历史上最伟大没有之一的数学天才高斯，拿破仑东征曾经因为他在哥根廷大学执教而放弃了炮轰这座城市。我们小学时有高斯计算 $1+2+3+...+99+100$ 等差数列的故事，中学时有高斯函数 $[x]$ ，大学时有高斯分布，高斯不等式，高斯过程.....那么频谱分析仪中的高斯滤波器是什么样子，为什么频谱分析仪的频率选择使用了高斯滤波器？

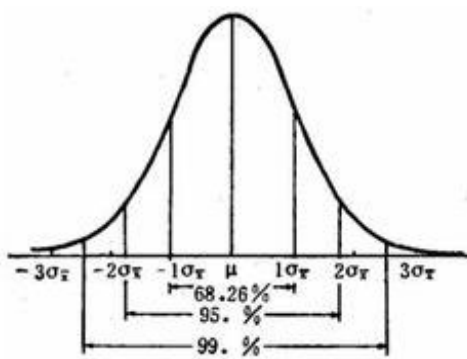


图 6 高斯分布曲线

形状选择有很多滤波器可供选择，例如通信中常见的升余弦滚降滤波器，常见分析仪器中有 Hanning、Blackman、平顶滤波器、高斯滤波器等。通信系统中滤波器的目标是实现最小带宽下的无码间干扰，也就是根据奈奎斯特抽样准则设计的，用于通信调制信道的滤波器，这样的滤波器因为只考虑抽样判决时刻点，所以带宽较宽，截止较慢，过冲较大，脉冲形状难以控制。分析仪器中根据测量目的不同来选择滤波器，如果重点考虑幅度精度，最好使用平顶滤波器；如果重点考虑分辨率，最好使用 Blackman 滤波器等。

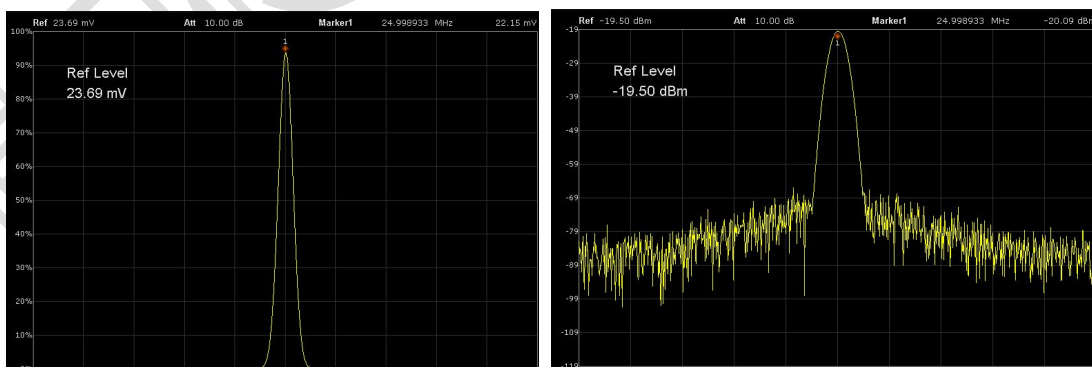


图 7 高斯滤波器的线性和对数形状

高斯滤波器有哪些优点适合频谱测量呢？总体来说，高斯滤波器可能不是选择性最好的，也不是实现最方便的，但是它在频域性能（理解为选择性或形状因子）和时域性能（理解为复杂度或响应速度）之间



较为均衡。高斯滤波器的等效噪声带宽与其归一化的等效高斯带宽几乎相同，这是对噪声测量的一项重要需求指标；高斯滤波器的幅频响应是单瓣的，没有过零点的震荡，在各个方向上的平滑形状是完全相同的，这对于扫频测量幅度而不是相位是重要需求。

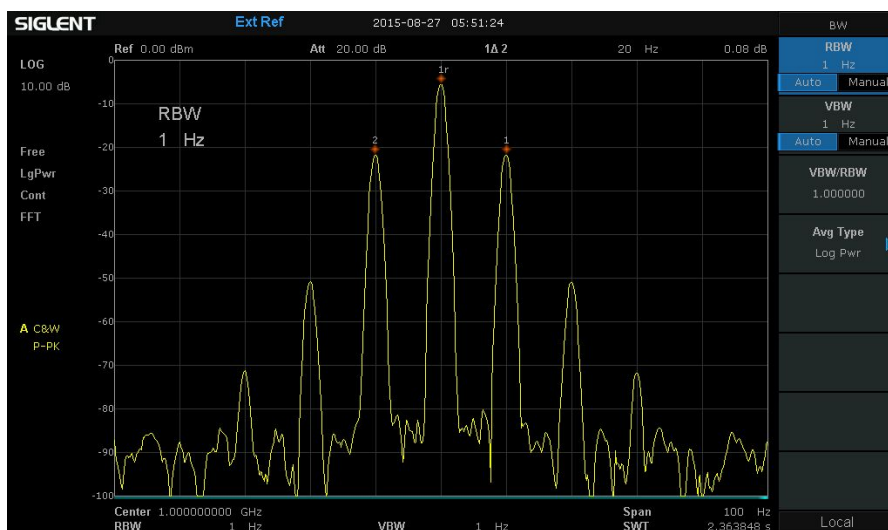


图 8 在 RBW=1Hz 下的高斯形状滤波器

为什么不直接使用最小的高斯滤波器分辨率检测信号呢？这个问题的答案也呼之欲出。即使是使用高斯滤波器，仍然是越细致的分辨率响应时间越长。具体的时间公式如下，

$$\text{Sweep Time} = \frac{k * \text{SPAN}}{\text{RBW}} \cdot \left(\frac{k_{\text{RBW}}}{\text{RBW}}, \frac{k_{\text{VBW}}}{\text{VBW}} \right)_{\text{max}}$$

此式中，第一个因子的含义是在 SPAN 下进行频率选择的个数，每次的步进是 RBW 的 1/k，以保证幅度测量的精度；第二个因子的含义是每次选择需要的时间，取决于 RBW 和 VBW 之间的较小值。通常当我们不关注噪声时，VBW 常设置大于等于 RBW，则时间公式简化为

也就是说扫描时间和 SPAN 成正比而和 RBW 的平方成反比，这意味着在相同 SPAN 的情况下 RBW 缩小 100 倍，扫描时间将扩大 10000 倍，因此在选择 RBW 的时候遵循够用原则即可。

$$\text{Sweep Time} = \frac{k_{\text{total}} * \text{SPAN}}{\text{RBW}^2}$$

那么问题又来了，怎样才叫“够用”呢？RBW 作为频谱分析仪最重要的指标之一，它的设置不仅影响着频率轴上的观察细节，也同样影响着幅度轴上的灵敏度，也就是底噪的高低。因此“够用”的选择标准要兼顾频率选择性，幅度选择性和扫描时间。

关于 RBW 和幅度底噪之间的关系我们将在后文详细阐述。在这里需要了解两个 RBW 设置之下底噪的高低变化规律是：

$$\text{Floor Noise dB} = 10 * \log\left(\frac{\text{RBW1}}{\text{RBW2}}\right)$$

简单地说，RBW 每变化 10 倍，底噪功率将变化 10dB；RBW 每变化 3 倍，底噪功率将变化约 5dB，如图 9 所示，基于鼎阳科技 SSA3032X 频谱仪，我们设置不同的 RBW，可以测量出底噪的差别很明显。较低的 RBW 有助于不同频率信号的分辨，同时使底噪降低，可以测量更低功率的信号，观察到更小的杂散，但是扫描时间将显著延长。较高的 RBW 有助于快速测量宽频带信号，但是将增加底噪，降低量测灵敏度，因此设置“够用”的 RBW 宽度是正确使用频谱分析仪重要的测试技巧。

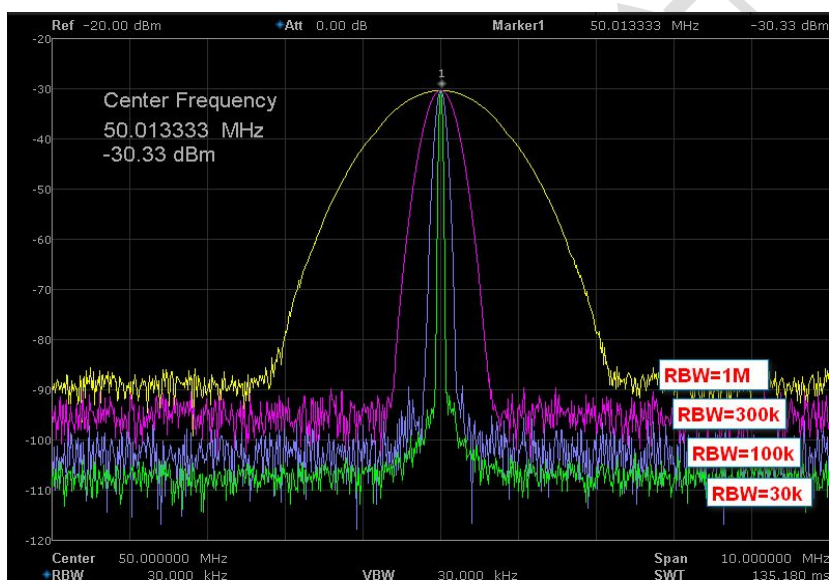


图 9 不同 RBW 的底噪高低

在测量靠近中心频率的发射分量时，需要采用较窄的分辨带宽。RBW 设置的大小能决定是否能把两个相临很近的信号分开，只有设置 RBW 大于或等于工作带宽时，读数才准确；但是如果信号太弱而底噪又太高，频谱仪则无法准确分辨信号，此时即使 RBW 大于工作带宽读数也会不准。

测试信道的功率或是链路噪声时，既不能太大，也不能太小，应该与信号的带宽相对应，一般的测试规范中会给出相应的 RBW 条件。分辨率带宽常小于参考信道的带宽时，测量结果应为参考带宽内各分量的总和（其和应为功率求和，除非特别要求杂散信号按照电压求和），此时通常会使用频谱分析仪中 Meas 的 Channel Power 或 ACPR 等功能。



图 11 不同 VBW 对随机信号的平滑效果

通常的测量场景下，我们常常定义视分比（VBW/RBW）这个参数，通过两个带宽的联动来匹配相应的场景进行测量。

当噪声是测量的一部分时，诸如积分噪声（信道）功率，调制解调等场景，我们需要计算噪声的能量，此时要尽可能地使噪声全部参加运算，这时的 VBW 应大于 RBW，以使噪声全部显示出来，即视分比大于 1。或者完全不关心噪声时，也可以将视分比设置很大，以减小扫描时间。

当我们特别关注载波功率时，诸如测量杂散，边带噪声抑制比例等场景，就要尽量滤除噪声及其波动的影响，这时的 VBW 应远小于 RBW，视分比远小于 1，噪声平滑使测量结果稳定，但是会噪声扫描时间的增长。一般情况下视分比和 RBW 是自动关联的，为了兼顾扫描时间，通常默认为 1。

以上对 RBW 和 VBW 这两种带宽的描述，仅着眼于频率分辨率和部分幅度分辨率的概念，完整的带宽和频率之间的关系分析，请看文章的后续篇《频谱分析仪应用解惑之频率分辨率》

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。

