

【鼎阳硬件智库原创 | 频谱分析仪】频谱分析仪应用解惑之频率分辨力

文档编号：HWTT0049



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频率分辨力

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系列文章第一篇令人惊呼，在移动互联网的 DT 时代，Data 太多，但高品质的 Data 并不多，鼎阳硬件智库提供了好 Data，读之如久旱逢甘霖矣！不亦快哉！更何况频谱分析仪的高品质文章之严重贫乏久矣！

应用解惑系列的第二篇谈到了“频率分辨力”，频率分辨的能力。文中提出影响频谱仪的频率分辨能力有四个因素：RBW，矩形系数，相位噪声和剩余调频并进行了深入阐述。

文中还饶有趣味地解释了分辨率，准确度和精确度的区别。甚至还介绍了 Marker 的分辨和精确度问题。

值得提及的是，文中显示鼎阳科技 X 系列新成员、SSA3032X 频谱仪的频率分辨率带宽 (RBW) 居然达到了 1Hz。

带宽是频域分析中的常见指标，在上一部分的文章《频谱分析仪应用解惑之带宽》中，我们讲述了频谱分析仪中常见的分辨率带宽和视频带宽，文中提到 RBW 的带宽和矩形系数是影响测量频率分辨力的两个主要因素，另外还有近端的相位噪声和本振的剩余调制。相位噪声是一个复杂的因素，本文仅从频谱分析仪的频率分辨力这个角度来阐述。在具体操作上，仪器的显示点数也在形式上影响着观察到的频率分辨力。如图 1 所示为影响频率分辨力的四个因素。



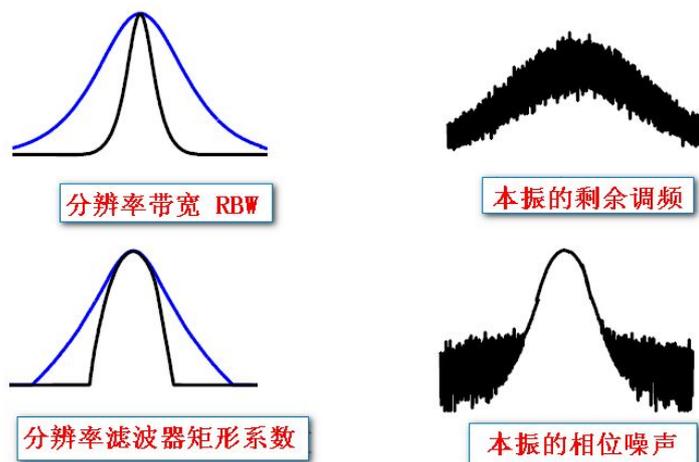


图 1 影响频谱分析仪频率分辨力的四个因素

我们先来解释几组测量中容易混淆的概念，一组是分辨率（Resolution），准确度（Accuracy）和精确度（Precision），一组是频谱分析仪的频率分辨率和频率分辨力。频谱分析仪是个复杂的测量系统，其准确度和精确度须要测量不确定度表示，本文不在此详述。

分辨率是个显示度量单位，通俗讲就是测量刻度的精细程度，是一个静态参数。准确度和精确度是用来度量测量值和真实值之间差别的参数。准确度表示测量值和真实值之间偏离的程度，是对系统误差和校准的度量；精确度用来表示多个测量值分布的离散程度，是对测量过程中随机噪声的度量。

我们举一个例子：多次测量一个值然后求平均。见图 2，平均值和真值之间的偏差表明了这次测量活动的准确度，多次测量值分布的位置表明了这次测量活动的精确度。而分辨率，准确度和精确度之间其实是没有什么关系的，准确度差的测量系统可能拥有很高的精确度，分辨率高的测量系统可能也完全不具备好的精确度和准确度。例如，一把尺子的分辨率到 1 mm，但是由于刻度分布不均，测量值和真实值的差别达到了 10 mm，准确度认为比较差，这种情况下这把尺子分辨率再高也并卵，然而由于测量系统的科学严谨，若干次测量的偏差都在 2 mm 左右分布，表明这个测量过程的精确度还是比较高的。

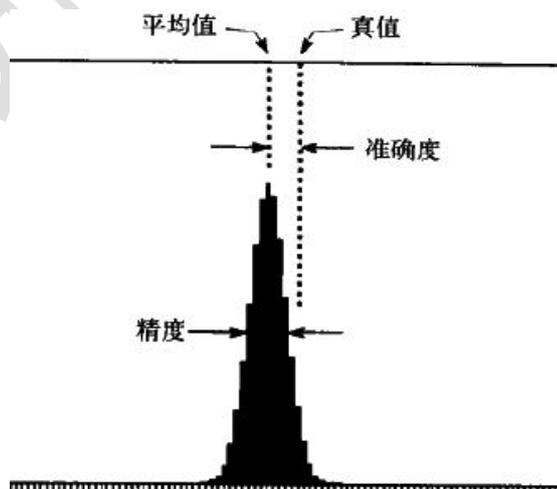


图 2 准确度和精确度

再来结合频谱分析仪的基本概念，频率分辨率就是频率轴的最小刻度单位，通常的频谱分析仪的频率



分辨率都能够达到 1Hz。但这并不是指拥有区分出频率相差 1Hz 的两个正弦波的能力，分辨率仅仅指显示刻度。实际的频率分辨力要靠分辨率带宽（RBW）来完成，也就是实际能够区分出的频率是个在某个频率点上具有一定带宽的信号，而不是落在某个频率点上的一条细线，通常的频谱分析仪的分辨率带宽能够达到 1 kHz，100 Hz 等。

分辨率带宽原理上是选频高斯滤波器的形状，量化的定义是距离滤波器峰值衰减 3dB 处的带宽，同时还约束了矩形系数的要求，作用上指将两个不同频率的信号清晰分辨出来的能力，这两个概念已经在上一篇文章中详细阐述。

通常，频谱分析仪的矩形系数都能够达到 5: 1 左右,如图 3 所示。

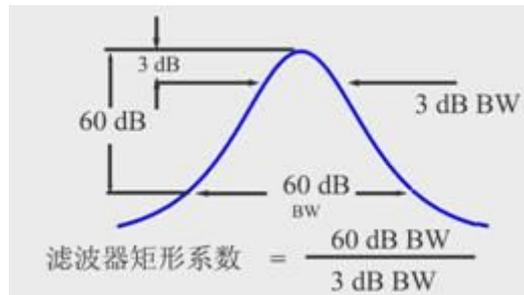


图 3 矩形系数示意

如下图 4 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。

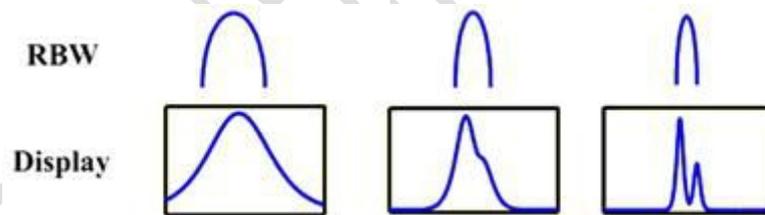


图 4 RBW 分辨不等幅信号的能力

如图 5 表示了鼎阳科技 SSA3032X 在 RBW 为 1 Hz 时的频率分辨能力。



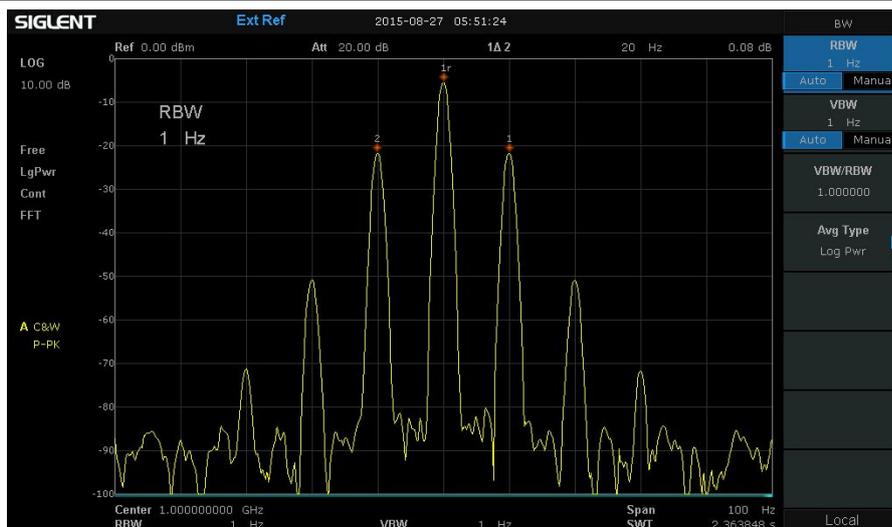


图 5 鼎阳科技 SSA3032X 在 RBW 为 1 Hz 时的频率分辨能力

细心的同学可能会问，为何 RBW 滤波器的矩形系数定义会以 60dB 为界？如果矩形系数代表了频谱分析仪分辨不等幅正弦信号的能力，那如何约束高于底噪而低于 60dB 的不等幅信号的测量能力？这就要涉及到频谱分析仪本地振荡器（后文简称 LO，Local Oscillator）的稳定程度，因为本振本身的不稳定，也就是频谱“纯度”不足，其相位噪声可能将靠近载波频率附近 60dB 以下的信号全部淹没，这时矩形系数已经没有测量意义了。

什么是相位噪声？相位噪声如何会影响频谱分析仪的频率分辨能力？

频谱分析仪的 LO 都是由参考源（通常是晶体振荡器，XO）倍频而来。没有哪种参考源是绝对稳定的，它们都在某种程度上受到随机噪声的频率或相位调制的影响，这个影响程度随时间在变化。时间的稳定度可以分为两类：长期稳定度和短期稳定度。长期稳定度是指时钟频率偏离绝对值的多少，一般用 ppm（百万分之一）来表示；短期稳定度是时钟相位瞬态的变化，在时域上称抖动（jitter），在频域上称相位噪声（Phase Noise），表示为指相对于载波一定频偏处的 1Hz 带宽内的能量与载波电平的比值，相应的单位为归一化的 dBc/Hz。如图 6 所示为抖动和相位噪声的关系。

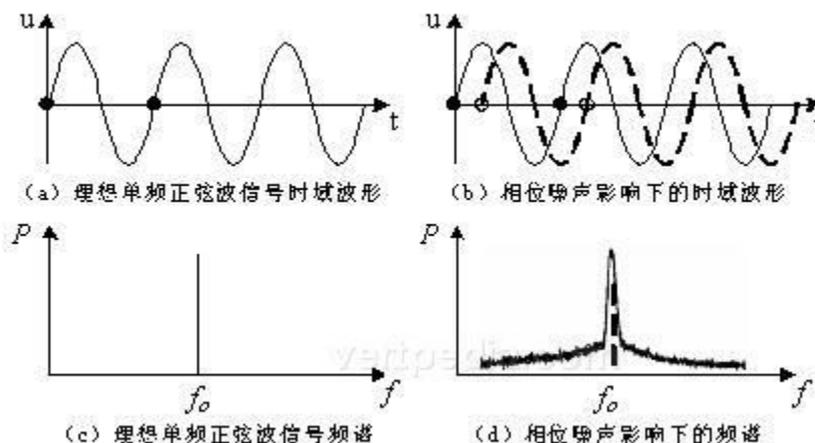


图 6 抖动和相位噪声



在系统层面，相位噪声反映了仪器整个时钟环路的稳定度，数字部分的 ADC 与数字中频处理也会有影响，但是对相位噪声最主要的影响因素仍是参考源及时钟环路，选型和设计需要谨慎。

现代频谱分析仪普遍基于外差（Heterodyne）接收机“频率选择”的结构，混频器将输入的射频信号和本振信号相乘然后滤波，得到变频后的中频信号。即使输入的射频信号是一个很纯净的正弦波，混频器也会将本振的相位噪声忠实地带入混频结果，形成一个具有相同相位噪声的中频信号。

并不是所有的测量都会受到相位噪声的影响。相位噪声和中频的能量是固定的比例关系，当信号电平远大于系统底噪时，这个相位噪声才会大于系统的底噪，那么它将会明显地出现在载频的周围，如图 7 所示。

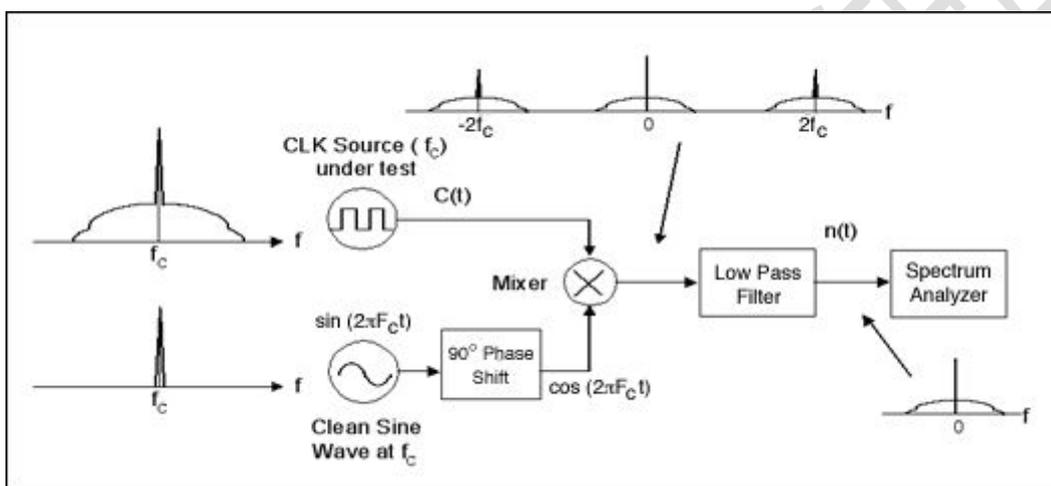


图 7 本振的相位噪声体现在对能量信号的测量结果中

在矢量信号分析中，信号的相位也包含着重要的信息，本振的抖动将恶化中频相位的信噪比，所以相位噪声对矢量信号的 EVM 也有着重要的影响。

因此，当我们对包含了本振相位噪声的中频进行“峰值检测”时，相位噪声就会体现在测量结果中。在某个 RBW 下，距离这个频率很近同时幅度又高于系统显示平均噪声电平的另一个信号，虽然可被 RBW 在频率轴分辨出来，但仍会隐藏在相位噪声之下，如图 8 所示。当然，相位噪声也是一种随机噪声，它和系统的显示平均噪声电平一样，随分辨率带宽的变化规律一致，若将分辨率带宽缩小 10 倍，显示相位噪声电平将减小 10 dB。这个原理将在后续文章中阐述。这种情况下需要使用超过实际分辨率的 RBW 来测量，代价就是增加了系统的扫描时间。



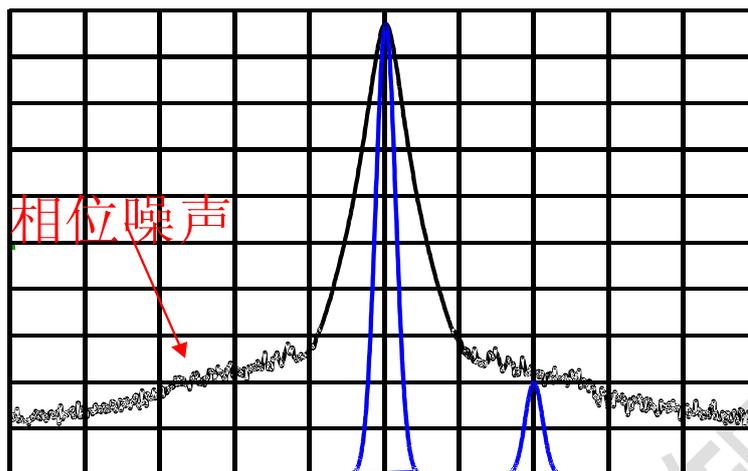


图 8 相位噪声会影响不等幅信号的分辨能力

相位噪声只会影响载波附近的小信号的分辨。随着距离载波的频率而逐渐衰减，近端的相位噪声固然影响了频率分辨能力和幅度动态范围；但是当距离载波足够远时，远端的相位噪声会低于系统的显示噪声平均电平，这时就看不到相位噪声的影响了。如图 9 所示为基于鼎阳科技 SSA3032X 在 SPAN=4MHz 时观察到的相位噪声和显示平均噪声电平。

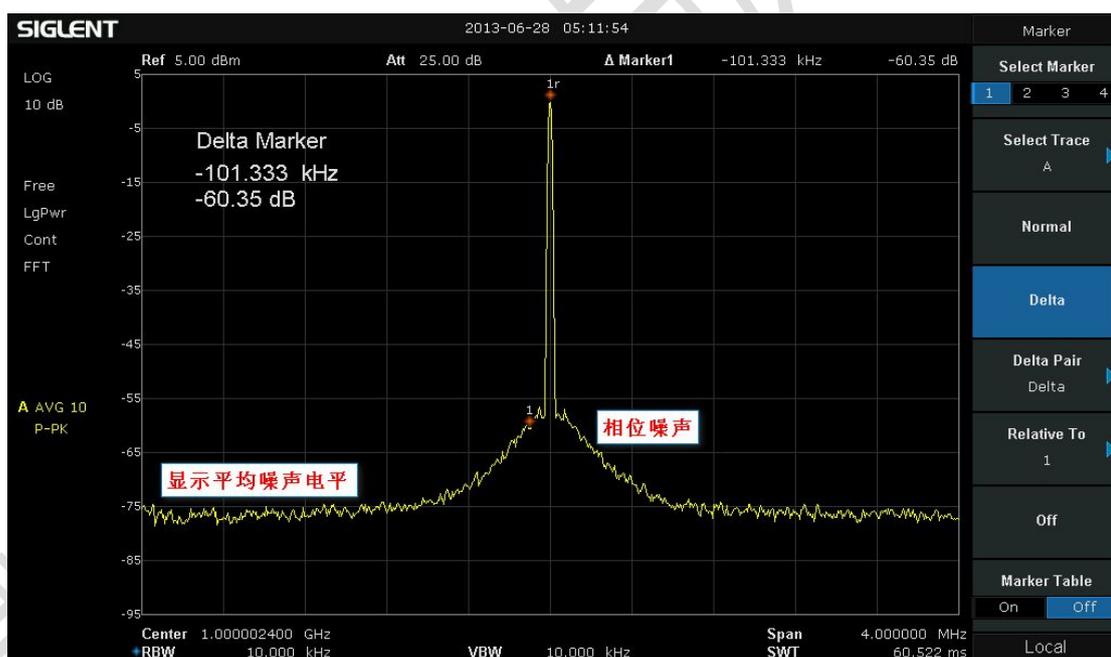


图 9 鼎阳科技 SSA3032X 在 SPAN=4 MHz 时观察相位噪声和显示平均噪声电平

需要说明，在将参考源倍频得到本振的过程中，稳定度也将按倍频比例恶化，其结果是相位噪声变差。因此相位噪声的标定通常要对应特定的测量频率，例如在 500 MHz，1 GHz 等频率点测量；典型的相位噪声曲线经常要提供多个频率点的情况，例如偏离 1 kHz，10 kHz，100 kHz 分别给出测量值，便于横向比较。

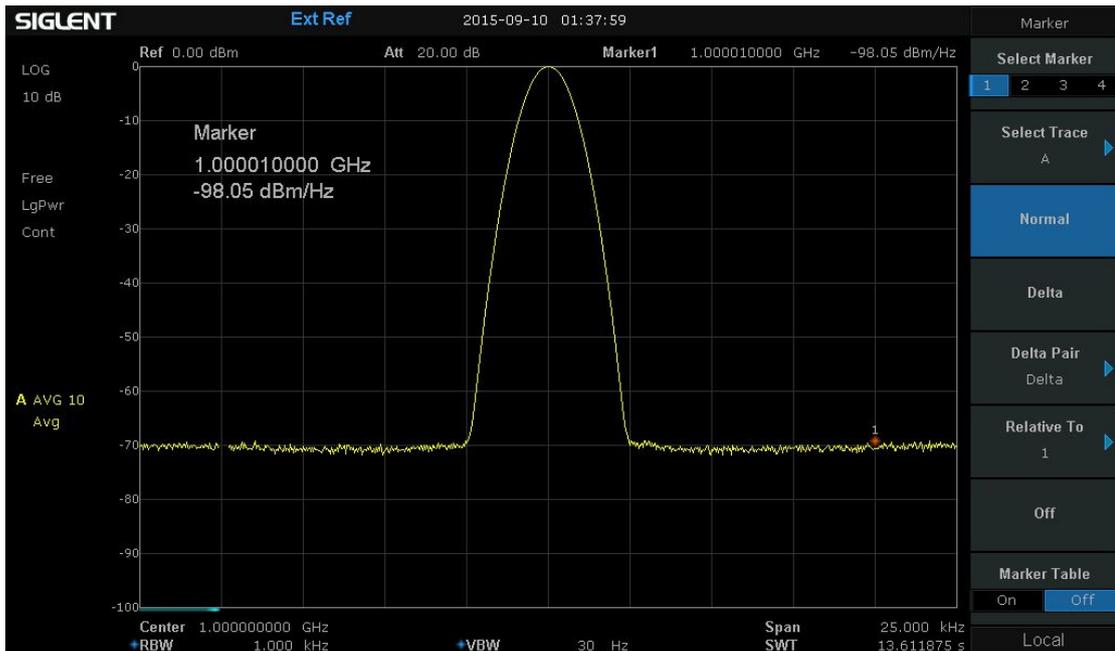


图 10 鼎阳科技 SSA3032X 在 1 GHz 偏移 10 kHz 处的相位噪声

如何确定一台频谱分析仪的相位噪声呢？

一般情况下我们关注的是近端相位噪声，也就是距离载频 1 MHz 以内的相位噪声。使用一个高精度信号源（此信号源的相位噪声必须小于频谱分析仪的相位噪声）设置 1 GHz，0dBm 的正弦波，频谱分析仪设置的 RBW 在合适的扫描时间例如 1 kHz，此时分别观察距离峰值 10 kHz，100kHz 位置的差值，根据 RBW 归一化到 1Hz 即可得到在 1 GHz 下偏移 10 kHz，100kHz 的相位噪声水平。如图 10 所示为鼎阳科技 SSA3032X 在 1GHz，偏移 10KHz 处的相位噪声。

下面来说下剩余调频（Residual FM）。调制在时钟上的噪声，造成 RBW 滤波器的高斯形状上有波浪一样的凸起，就像频率调制的效果。这个现象限制了频谱分析仪能够做到的最小 RBW，也就是限制了频谱分析仪的频率分辨率，因为不知道在这种情况下这种波浪到底来源于被测信号还是来源于本振。本振信号精确的剩余调频需要使用相噪仪来测量。现在我们使用的参考源的剩余调频已经很小，在 1 kHz 的 RBW 和视分比为 1 的条件下测试，剩余调频只有十几 Hz，相比于当前 RBW 几乎可以忽略。

最后要注意频谱分析仪显示点对于实际观察到的频率分辨率的影响。由于频谱分析仪的测量结果只能通过 Marker 来读出某个确定点的频率和幅度，所以观察结果的分辨率和精确度都受到 Marker 的影响。

Marker 的分辨率通常和仪器的分辨率一致，常为 1 Hz。而 Marker 的精确度则由 Span 和扫描点数所决定，关系为 $\text{Span}/(\text{扫描点数}-1)$ 。例如，鼎阳科技 SSA3032X 的屏幕显示像素点为 751，那么在 3GHz 扫宽情况下，每个 Marker 的精确度能到 $3\text{ GHz}/750=4\text{ MHz}$ ，我们称这个宽度范围为数据桶“Bucket”，数据桶中所有的数据经过检波最终显示为一个点。这时我们看到的所有显示结果和 Marker 读数都是在 4 MHz 为步进单位。

在这种情况下还能够分辨出数据桶内的数据吗？如何能够提高频率分辨率呢？很多频谱分析仪提供了 Marker 的频率计数器功能，可以在 Marker 步进单位很低的情况下，识别出数据桶内部最大峰值所在的真实频率点。如图 11 所示，在 3 GHz 扫宽下，每个 Marker 的分辨率虽然已经到了 4 MHz，然而此点的频率计数器可以精确指示此数据桶内精确到 Hz 的频率。



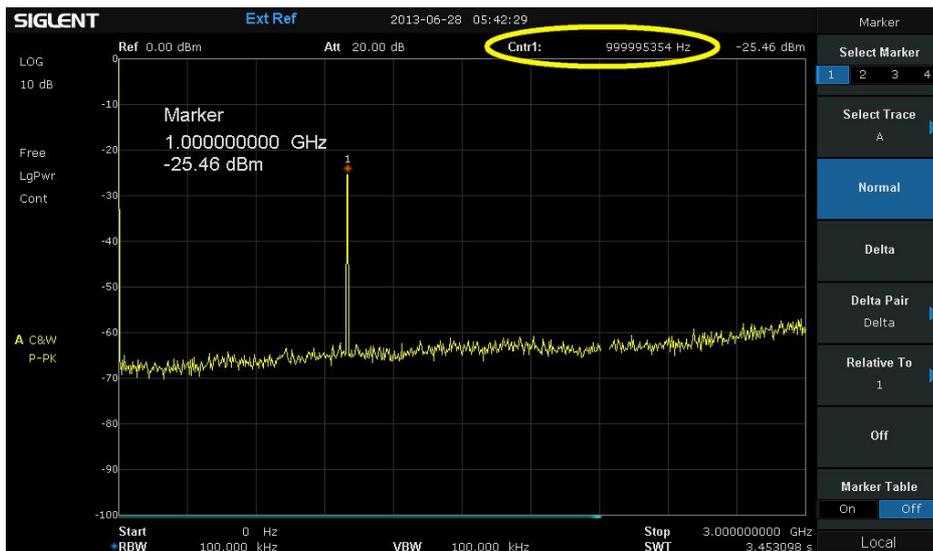


图 11 鼎阳科技 SSA3032X 的频率计数器

本文虽然主要讲述频谱分析仪频率轴的分辨力，但是其中也涉及到了各种噪声，包括相位噪声，本底噪声（也就是显示平均噪声电平），这些噪声同时影响着频率分辨力和幅度的动态范围，请继续阅读下一篇《频谱分析仪应用解惑之噪声》。

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。

