

▶ 您要打印的文件是：[频谱分析仪的工作原理](#)

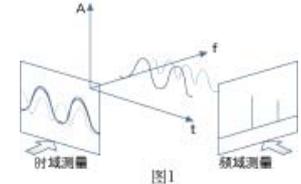
 打印本文

频谱分析仪的工作原理

作者：中央电视台传送部 汪惟平 转贴自：本站整理

频谱分析仪对于信号分析来说是不可少的。它是利用频率域对信号进行分析、研究，同时也应用于诸多领域，如通讯发射机以及干扰信号的测量，频谱的监测，器件的特性分析等等，各行各业、各个部门对频谱分析仪应用的侧重点也不尽相同。下面结合我台DSNG卫星移动站的工作特点，就电视信号传输过程中利用频谱分析仪捕捉卫星信标，监控地面站工作状态等方面，简要介绍一下频谱分析仪的工作原理。

科学发展到今天，我们可以用许多方法测量一个信号，不管它是什么信号。通常所用的最基本的仪器是示波器，观察信号的波形、频率、幅度等。但信号的变化非常复杂，许多信息是用示波器检测不出来的，如果我们要恢复一个非正弦波信号F，从理论上来说，它是由频率F1、电压V1与频率为F2、电压为V2信号的矢量迭加（见图1）。从分析手段来说，示波器横轴表示时间，纵轴为电压幅度，曲线是表示随时间变化的电压幅度。这是时域的测量方法，如果要观察其频率的组成，要用频域法，其横坐标为频率，纵轴为功率幅度。这样，我们就可以看到在不同频率点上功率幅度的分布，就可以了解这两个（或是多个）信号的频谱。有了这些单个信号的频谱，我们就能把复杂信号再现、复制出来。这一点是非常重要的。



对于一个有线电视信号，它包含许多图像和声音信号，其频谱分布非常复杂。在卫星监测上，能收到多个信道，每个信道都占有一定的频谱成份，每个频率上都占有一定的带宽。这些信号都要从频谱分析的角度来得到所需要的参数。

从技术实现来说，目前有两种方法对信号频率进行分析。

其一是对信号进行时域的采集，然后对其进行傅里叶变换，将其转换成频域信号。我们把这种方法叫作动态信号的分析方法。特点是比较快，有较高的采样速率，较高的分辨率。即使是两个信号间隔非常近，用傅里叶变换也可将它们分辨出来。但由于其分析是用数字采样，所能分析信号的最高频率受其采样速率的影响，限制了对高频的分析。目前来说，最高的分析频率只是在10MHz或是几十MHz，也就是说其测量范围是从直流到几十MHz。是矢量分析。

这种分析方法一般用于低频信号的分析，如声音，振动等。

另一方法原理则不同。它是靠电路的硬件去实现的，而不是通过数学变换。它通过直接接收，称为超外差接收直接扫描调谐分析仪。我们叫它为扫描调谐分析仪。

在工作中通常所用的HP-859X系列频谱仪都是此类的分析仪。其优点是扫描调谐分析法受器件的影响，只要我们把器件频率做得很高，其分析能力就会很强。目前的工艺水平，器件可达到100GHz，最高甚至可做到325GHz。其频率范围要比前一种分析方法大很多。只是在达到较高分辨率时，其分析测量的时间会有所增加。

在实际工作中，无线信号卫星信号的监督，由于其频率很高，都是采用扫描调谐的方式。它所能给我们的信息没有相位参数，只有幅度、频率。它是一种标量的分析方法。另外，这种方法有很高的灵敏度，它受到前端扫描调谐器件的控制，还有很高的动态范围。

下面我们着重介绍一下扫描调谐分析仪的基本原理，从图2中，我们不难看出，它是用超外差接收机的方式来实现频谱分析的。



最基本的核心部分是它的混频器。基本功能是将被测信号下变至中频21.4MHz，然后在中频上进行处理，得到幅度。在下变频的过程中，是由本振来实现下变频的。本振信号是扫描的，本振扫描的范围覆盖了所要分析信号的频率范围。所以调谐是在本振中进行的。全部要分析的信号都下变频到中频进行分析并得到谱频。这与日常所用的电视机、收音机的原理是一样的。

但是有线电视输出信号范围很广，比如有50个频道播放。这50个信号是同时进入接收机的，其总功率是迭加的。而所看的电视节目只能是其中之一。同理，送入频谱仪的输入端口信号是所采集信号的总和，其中包括所要分析的特定信号，所输入到频谱仪的功率是总功率。由此要引入一个参数-最大烧毁功率。这一值是1瓦或是+30dBm。也就是说输入到频谱仪的信号功率总和不能超过1瓦，否则将会烧毁仪器的衰减器和混频器。

例如，我们要监测一个卫星信号，假设其频率为12GHz，其功率可能只有-80dBm左右，这是很小的。但要知道输入信号是由很多信号迭加组成的，若是在其它某一频率上包括一个很强的信号，即使你没有看到这个大功率信号，若输入信号功率的总和大于1瓦，也是要烧毁频谱仪的，而其中的大功率信号并不是你所要分析的信号。这是我们在日常工作中需多加小心的，因为更换混频器的费用是很高的。

当然，频谱仪在输入信号时并没有直接将其接入混频器，而是首先接入一个衰减器。这不会影响最终的测量结果，完全是为了仪表内部的协调，如匹配、最佳工作点等等。它的衰减值是步进式的，为0dB、5dB、10dB，最大为60dB。

还有的频谱仪是不能输入直流的，否则会损坏器件。另外，还应注意不能有静电，因为静电的瞬时电压很高，容易把有源器件击穿。日常工作中把仪表接地就会有很好的效果，当然要有保护接地会更好。

在中频，所有信号的功率幅度值与输入信号的功率是线性关系。输入信号功率增大，它也增大，反之相同。所以我们检测中频信号是可行的。另外，为了有效检测，要有一个内部中频信号放大。混频器本身有差落衰减，本频和射频混频之后它并不是只有一个单一中频出来，它的中频信号非常丰富，所有这些信号都会从混频器中输出。在众多的谐波分量中，只对一个中频感兴趣。这就是前面所说的21.4MHz。这是在仪器器件中已做好的，用一个带通滤波器把中心频率设在21.4MHz，滤除其它信号，提取21.4MHz的中频信号。通过中频滤波器输出的信号，才是我们所需检测的信号。

滤波器在工作中有几个因素：中心频率是21.4MHz，固定不变，其30dB带宽可以改变。比如对广播信号来说，其带宽一般是几十kHz，若信号带宽是25kHz，中频的带宽一定要大于25kHz。这样，才能使所有的信号全部进来。如果太宽，就会混入其它信号；如果太窄，信号才进来一部分，或是低频成份，或是高频成份。这样信号是解调不出来的。

中频带宽设置根据实际工作的需要来决定的。当然它会影响到其它很多因素，如底噪声、信号解调的失真度等。

经过中频滤波器的中频信号功率就是反应了输入信号的功率。检测的方法就是用一个检波器，将它变为电压输出，体现在纵轴的幅度。当然还要经过D/A转换和一些数据处理，加一些修正和一些对数、线性变换。这足以给我们带来信号分析上的许多方便。

频谱分析是要分析频域的。一个信号要分析两个参数，一是幅度，二是频率。幅度已经得出，而频率和幅度要对应起来，在某一频率是什么幅度。下面介绍一下频率是如何测量的，如何与幅度对应起来。

其实很简单。它是通过本振与扫描电压对应起来的。本振是一个压流振荡器。本振信号是个扫描信号。扫描控制是由扫描控制器来完成的。它同时控制显示器的横坐标。从左到右当扫描电压在0V时，在显示器上是0点，对本振信号来说是F1点，即起始频率点。当扫描电压到10V时，在显示器上是终止频率点，本振电压就是在终止频率点，中间是线性的。通过这样的方法，使得显示器坐标的每一点与本振F1、F2的每一点对应起来（射频信号是本振信号减去中频信号21.4MHz。当我们操作频谱仪进行分析时，实际是在改变本振信号的频率）。

下面简单介绍一下用频谱分析仪来评价发射机的方法。先了解一下发射机最基本的框图，见图3。首先是一个调制部分将基带信号调制到中频信号，然后将中频信号上变频到射频信号上，还有一个与之相对的本振信号，对射频信号进行预放，再进行功率放大之后送到天线上发射。



如何用频谱仪对这样一个发射机进行测量。首先对它的发射信号从测量端口进行测量（若是把发射信号直接送入频谱仪，必然会把仪器烧坏）。在这里我们要测其功效的失真，发射信号的频率、功率。对发射机内部预放失真、增益、噪声系数，混频器的输出功率，输入功率进行测量，得到混频器的差落损耗。对混频器的输出功率进行准确测量，了解其工作点。对混频器的本振信号进行测量，得出本振信号的输出频率，了解其频率精度。这个频率精度也就决定了发射机的精度。通过以上这些测量，可以得到对于发射机内部信号、器件和输出信号的多项参数，以描述这个发射机的性能。作为通讯的监测，一般不去检测其内部的器件，只检测其频率、功率。只要这两项指标正常，就可以判定这部发射机是正常工作。

了解频谱仪的功能，必须要考察频谱仪的内部噪声、失真等等。一个放大器，要测它的失真、三阶交调失真和谐波失真。三阶交调失真是对一个放大器输入二个频率相近（如差10kHz）的信号，幅度一样，由于放大器是非线性器件，在对这两个信号进行功率放大时，也会产生一些其它信号，如2F1-F2和2F2-F1，这两种信号就是三阶交调失真（见图4上）。它的特性非常靠近中间的信号，上面和下面都相差10kHz均匀排开。

输入 → 输出

假设这个信号的带宽是20kHz，这两个交调失真的信号肯定会进到信号的带宽内，对信号产生干扰。为了不干扰正常的通讯，我们必须测量这失真信号的大小。描述的方法是这失真信号的幅度与正常的信号幅度之差，称之为失真量。另外一种放大器的失真是谐波失真。当对放大器输入一个点频信号F1，这个放大器会造成F2、F3，两倍或三倍的多次谐波。若是正好在2F1等处有其它信号，就会造成干扰（见图4下）。

一个放大器存在以上两种失真。我们用频谱仪去测量这些失真的大小。定义三阶交调失真与失真信号的功率差。定义谐波失真与载波信号与某次谐波的功率差。

输入被测放大器两个信号F1、F1+10kHz，然后送入频谱仪进行测量。用两个信号源通过混合器再经过衰减器进入一个带通滤波器，以确保进入放大器的信号只是F1和F1+10kHz，没有其它成份。这个放大器产生交调失真的值是大于50dB，也就是失真信号与要放大的信号之间的差值幅度为50dB。它的二次谐波相差40dB，三次谐波相差50dB（测量谐波失真要关闭一个信号发生器的输出），见图5。

由于频谱仪内部含有混频器，其特点是与有源器件放大器一样的。当输入信号为两个信号或是点频信号时，这个混频器也会产生以上所述的失真，并在频谱仪上反应出来，给测量带来误差。如何把频谱仪误差降低变为可测？对于一种测量，可以使它成为可测，也可以使它成为不可测。这完全取决于频谱仪的设置。包括对衰减器、频率范围、分辨率带宽的设置。

频谱仪的设置主要有频率范围、分辨率和动态范围，而动态范围又会涉及到最大的输入功率即烧毁功率，增益压缩使小于1W的输入信号如果超过线性工作区也会有误差。还有灵敏度。要从以上几个主要方面来考虑频谱仪对输入的信号是否可测。

现在来看第一项参数频率范围。这个参数要从两个方面看，一是频率范围的设置是否足够的窄，具有足够的频率分辨能力，也就是窄的扫描宽度（见图6）。二是频率范围是否有足够的宽度，是否可以测到二次、三次谐波。

当我们用一个频谱仪测量一个放大器的谐波失真的时候，若这个放大器工作点是1GHz，那么它的三次谐波就是3GHz。这就是要考虑频率范围的最大可测宽度。如果频谱仪是1.8GHz的，那么就不能测量；如果是26.5GHz的频谱仪，当然可以测到它的三次、四次谐波。

第二类指标是分辨率。这是频谱分析仪中非常重要的参数设置。分辨率表示当要测量的是F1、而在F1的附近有另一个F2（见图7）。但它们的功率不一样，这时看能不能将它们区分开。将这个中频带宽设置成三种不同的宽度，下面所对应的就是在这一带宽设置时所看到的曲线（显示线）。很显然中频带宽越窄分辨率越高，中频带宽越宽分辨率越低。分辨率带宽直接影响到小信号的识别能力和测量的结果。

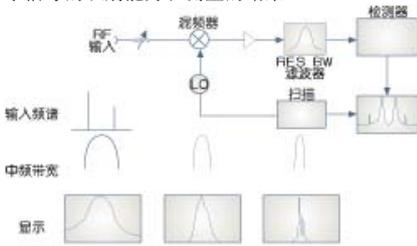


图7

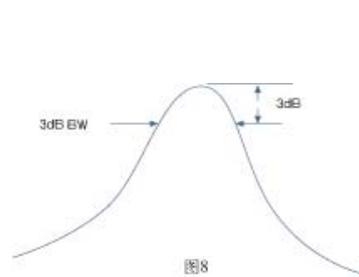


图8

分辨率实际上就是分辨两个信号的能力，中频滤波器的3dB带宽就是分辨率带宽（见图8）。

对信号的分辨除了分辨率带宽会影响之外，还有一个参数，滤波器的形状因数（见图9），即滤波器60dB对3dB带宽之比值。形状因数越小越接近3dB带宽。越陡峭就越接近于矩形，这时分辨能力就越强。所以说形状因数越小，分辨能力越强。

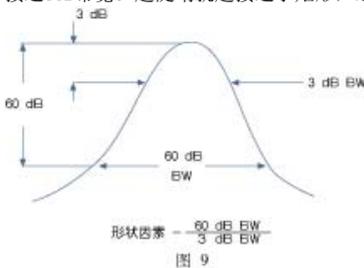


图9

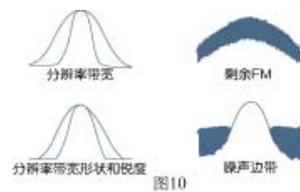


图10

模拟滤波器一般为15:1或是11:1，而数字滤波器是5:1。对于一个信号的分辨能力还有两个因素：剩余调频和噪声边带（见图10）。

剩余调频是本振信号的抖动，这是无法避免的工艺问题。这种抖动决定了它能分辨信号间的小频率范围。如果两个信号相差频率是小于这个抖动范围，那么就无法把这两个信号分辨出来。所以剩余调频这个指标就决定了频谱分析仪的最小可分辨的频率差。对于HP-859X来说是20Hz，对于ESA来讲是10Hz。

噪声边带在信号响应基底上表现得不稳定，这个噪声可能掩盖近端（靠近载波）的低电平信号。这个噪声是由本振的抖动引起的，在频率域上的体现。这个边带噪声降低了分辨能力。

对于频谱分析仪来说降低边带噪声是很困难的，这涉及到其压控振荡器的制作工艺。而把滤波器的形状因数做小是相对比较容易实现的。所以我们评定一个频谱仪的时候不仅要考虑它的边带噪声，也要考察它的形状因数。

对于HP-859X的频谱仪，当分辨率带宽变得很窄，在300Hz以下时，其滤波器就自动切换到数字滤波器上。对于859X的频谱仪其内部的滤波器全是模拟的，没有数字滤波器。数字滤波器的测量速度要高于模拟。

用不同设置的分辨率带宽去测量交调信号。如图11所示。

当测量F1和F1+10kHz（F2）信号时，分辨率带宽BW设置成10kHz，与两个信号频率差别是一样的，这种情况下我们看到的是最外面的曲线，正好将两个信号分开。但不容易分辨，只是知道是有两个信号存在。我们将BW下调一级，变成3kHz，图11中的中间那条曲线，就可以将两个信号分辨得非常清楚。但它的交调失真还是看不出来。我们再把BW进一步降低成为1kHz（实际是提高了分辨率），我们就可以更清晰地看到F1和F2，同时也看到两个失真信号。

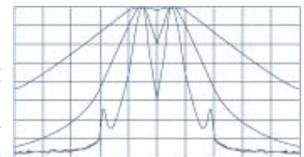


图11

分辨率带宽降低能提高分辨率，但对测量来说分辨率降低会增加扫描时间。这时我们可以对扫描时间进行人为设置，加快其扫描速度，提高测量速度。但是，由于扫描时间的改变会造成测量上的误差，具体就是频率升高，而幅度降低（见图12）。

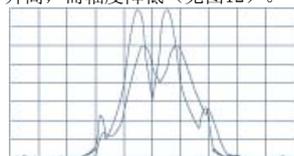


图12

所以作为一种快速测量而不要求太高测量精度时，可以采用这种方法，但若要求较高精度的测量，必须要使BW与测量时间置于自动联动，方可满足准确测量的要求。

频谱分析仪第三个重要指标-动态范围。动态范围表示当两个信号同时出现时，测量其幅度差的能力。影响它的因素有最大输入功率、非线性工作区域、1dB压缩点（有时为0.5 dB）。

频谱仪内部的混频器有一定的线性工作区域，如果超过线性区域，输入功率的变化与输出功率的变化即呈非线性。输出功率的变化量比输入功率的变化量小，造成功率压缩。如果功率压缩存在，我们所测得的功率值就是不准确的。

那么我们如何判断是否存在压缩呢？可以利用频谱仪内部的衰减器或外接衰减器来进行判断。将衰减器的衰减量设置在10dB时，测量混频器的输出功率。再将衰减器的衰减量增加10dB，再去测量混频器输出功率也应线性地减小10dB。若变化量不是10dB，只有7或8dB，说明混频器已工作在非线性区域，存在功率压缩区。

即使当频谱仪工作在线性区域的时候，混频器仍然产生内部失真，因为它是有源的非线性器件。在最差的情况下，内部失真完全可以覆盖被测件的失真产物或是外来的谐波失真。即使当内部失真低于要测信号的失真，也会引起测量误差。因为当基波信号进入到频谱仪时，它同样会产生二次和三次谐波。这种失真是由频谱仪内部产生的。这一失真会与输入信号的失真混叠起来，最后输出的谐波分量要比真实的失真高。这就造成了一定的测量误差。这要求频谱仪所产生的内部失真要尽量地小，使最后迭加出来的信号，趋近于被测信号。如何降低频谱仪内部的谐波失真和交调失真。这可利用失真特性，二次或三次谐波在数学公式上都存在这样的特点，即若存在一个频率为F的信



号，其二次谐波为2F，三次谐波为3F。当两个信号F1、F2存在，其交调失真有2F1-F2、2F2-F1等等，见图13。

当F信号功率变化1Δ时，2F功率会变化2Δ，它的三次谐波会变化3Δ。变化量分别是其2倍和3倍。也就是说当输入功率降低1dB，二次谐波和三次谐波分别会降低2dB和3dB。交调失真是当F1、F2分别变化1Δ，2F1-F2和对应的2F2-F1均变化3Δ，这就是其特点。在测量时，频谱分析仪本身产生的二次谐波信号越高，它测量的范围越差。我们用输入信号F0的功率值和产生信号谐波功率值之差来进一步定义动态范围。凡是被测信号落在这一范围之内，都可以测出。

如何使动态范围增大（见图14），我们可以利用上面所说的数学特性，只要将F0的功率降低1dB，2F0会降低2dB。这就使动态范围增大了1dB。若F0的功率降低10dB，其动态范围也会随之增大10dB。三次失真的降低速度会更快。二次谐波和三次谐波的动态范围是呈线性变化的，只是斜率不一样。

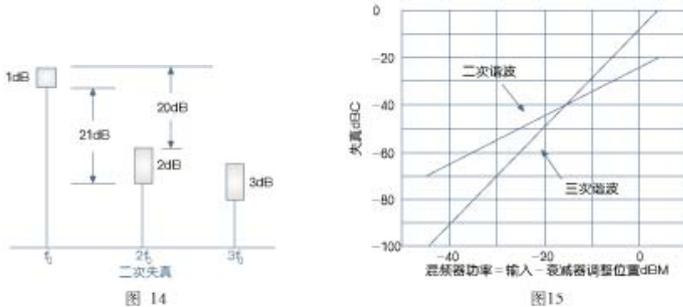


图 14

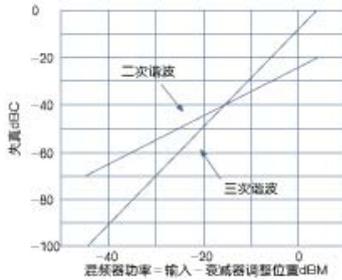


图15

我们用动态范围和功率值建立一个坐标系，可以得到图15的曲线，横坐标实际是混频器F0输入功率值，纵坐标就是内部失真电平。在动态范围的图上划出由基波产生的二次和三次失真产物与基波信号的相对关系。当一个混频器F0的功率为0dB，它的二次谐波失真信号的功率是固定的，差值也是固定的。可以看出，当功率降低越低，动态范围就越大。三次谐波更是如此。由此得出，混频器输入的功率越小，其动态范围就越大。

对于小信号的测量还有一个影响因素是它的噪声底。一个被测信号在仪器本身的失真范围之下是不可测的，若隐含在仪器本身的噪声底之下也是无法检测的。那么噪声底由谁来决定？噪声底的第一个因素是衰减量（见图16）。当衰减器的衰减量为10dB时，我们可以看到这些噪声曲线，同时看到一个小信号。当衰减量变成20dB，噪声底会抬高10dB，小信号就会被覆盖在平均噪声功率之下，变成不可测量。所以衰减量会影响仪器的噪声底，并降低了信噪比。所以要用尽可能小的输入衰减以获得最好的信噪比。

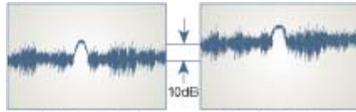


图16

在实际的测量中，显示的信号电平不会随衰减的增加而下降。这是因为当衰减降低了加到检波器的信号电平时，中频放大器会增加10dB来补偿这个损失，这使荧光屏上的信号幅度保持不变。但噪声电平被放大、增加了10dB。

另一个因素是中频滤波器的带宽（见图17），带宽越宽，进来的噪声越多，功率当然也就越高。带宽降低10倍，噪声功率也会降低10倍；带宽降低100倍，噪声功率也会降低100倍。BW从10KHz变成10KHz，其噪声平均显示电平会降低10dB。



图17

所以说频谱仪的噪声是在一定的分辨带宽下定义的。广义上说，频谱分析仪的最低噪声电平是在最小分辨率带宽下得到的。

当频谱仪设置的分辨带宽以及衰减量固定时，那么它的噪声底也就固定了。这时信号的检测能力也决定了。当小信号低于噪声底时就不可测量，高于噪声底就变得可测。这个测量范围就是被测信号与噪声底的比值。信号若比噪声底高10dB，可测范围就是10dB。这一信噪比我们置于纵坐标上，输入功率在横坐标上。（见图18）当噪声底固定的话，假设把BW设置在1kHz时，衰减量不变，那么它的噪声是不变的，这时设输入功率为-40dB，信噪比是75dB。当输入功率为-30dB时，信噪比为85dB。从此看出，信号的降低，信噪比是降低的。

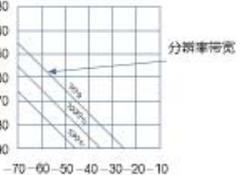


图18

噪声底对动态范围的影响。把信号对噪声和信号对失真的曲线置于同一坐标系上，横坐标是输入功率，纵坐标是动态范围（见图19）。最大的动态范围处于曲线的交点。这时内部产生的失真电平等于显示的平均噪声电平。

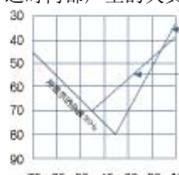


图19

频谱仪是否产生了失真？我们可以通过改变衰减器来判断。输入两个信号F1和F1+10k，当衰减量增大，混频器的输入功率降低，理论上失真也会降低。如果我们看到这些信号是降低的话，说明失真信号是频谱仪内部产生的；如果不变，那么它是外来的信号（见图20）。这是因为在调节衰减器的衰减量时，它后面有一个放大补偿（本文前面曾讲过）。所以频谱仪显示的外来失真信号是不变的，但自身的失真会有明显的变化。这个方法可简单明确的看出频谱仪是否工作在失真状态。

在测量时为了使噪声曲线平滑，在检波之后，放置了一个低通滤波器，即视频滤波器。这就是BW键中VBW软键的设置（见图21）。它的作用是将检测信号中的高频部分滤掉，使我们从显示屏上看到一个光滑的曲线。这对小信号的测量是非常有效的，它可使读数更为稳定。

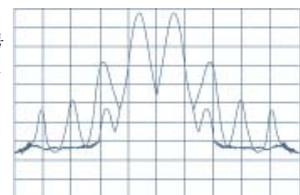


图20

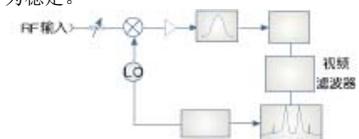


图21

最后谈一下灵敏度。简单地讲，灵敏度就是最小可检测信号，定义为在一定分辨带宽下显示的平均噪声电平。“平均”就是足够窄的视频带宽VBW，去平均信号加噪声或噪声（见图22）。若一信号的电平等于显示的平均电平，它将以近似3dB突起显示在平均噪声电平之上。这一信号被认为是最小的可测量信号电平。

如果要使频谱分析仪得到最好的灵敏度，有以下三个方法：

- (1) 最窄的分辨率带宽；
- (2) 最小的输入衰减；
- (3) 视频带宽VBW应是分辨率带宽的百分之一。

但是最好的灵敏度可能与其它测量设置有矛盾，如测量时间大增，0dB的衰减会增加输入的驻波比，降低测量精度。总之，频谱仪的最佳工作状态是由诸多因素、参数决定的，不能片面追求某一指标的完美，需统筹考虑，对本文所述的基本因素和所要作的测量类型进行分析，尽力趋向于完美的组合。如对小信号测量，要提高灵敏度，对失真测量要调节衰减，同时要会判断频谱分析仪的工作状态等等。这在我们实际的工作中会遇到并要细心实践。

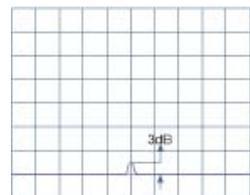


图22