

# 频谱分析仪校准对信号源的要求

福禄克精密测量公司

英国 诺里奇

+44 (0)1603 256781

paul.roberts@fluke.com

*校准频谱分析仪通常要进行各种各样的测量，每一种测量都需要合适的输入信号。典型的校准过程一般采用一系列的信号发生器和其它设备来产生信号，并确保其准确度。本文摘要介绍了频谱分析仪的校准，并讨论了最常见的校准测试及其对信号的要求，以及满足这些要求的方法。*

## 概述

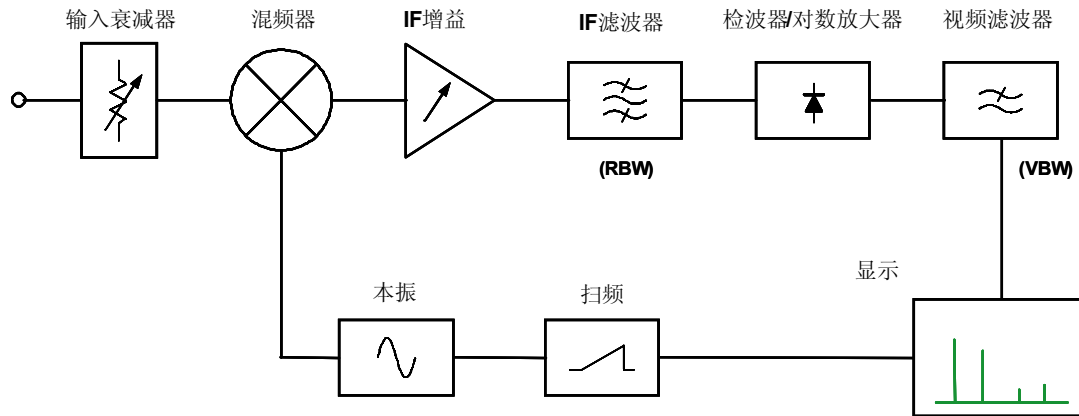
通过对来自 5 个不同制造商的 15 个型号的频谱分析仪的校准程序的分析，发现大约介绍了 80 项不同的测试。许多测试都是相同的，仅仅是其名称不一样——例如显示线性度（Display Linearity）、刻度保真度（Scale Fidelity）和对数一致性（Log Conformance），都是采用相同的方法在单一频率下测试分析仪准确测量相对信号电平的能力。考虑到这种重复特性，则大多数的校准程序就包括大约 20 项的核心测试项目，如下所列。通常认为这些测试项目是在校准频谱分析仪时应该进行的测试项目，也是足够、充分的。

- 频率准确度
- 电平准确度
- 频率响应
- 衰减器响应
- 显示线性度
- 显示的平均噪声电平
- 分辨率带宽准确度
- 分辨率带宽选择性
- 分辨率带宽转换准确度
- 扫描时间准确度
- IF 镜像响应
- 噪声边带
- 剩余调频
- 剩余响应和杂散响应
- 谐波失真
- 三阶交调（TOI）
- 跟踪发生器

对以上所列的测试项目全部进行详细介绍已经超出了本文的讨论范围，因此文中概要介绍了各项测试，并额外详细介绍了一些最为关键或困难的测试。

## 频谱分析仪的结构

本文中讨论的测试适用于典型的扫频调谐式超外差频谱分析仪。下图所示为这种类型频谱分析仪的简化结构框图。其结构类似于调幅（AM）超外差接收机的结构，其中采用了一个混频器来将输入信号下变频至一个较低的中频（IF）以便处理。大多数频谱分析仪采用两极或三极下变频，但是这里为了方便起见，仅画出了一级下变频。最近以来，实时频谱分析仪器已经可以利用，它采用了不同的结构，在这种频谱分析仪中，输入信号在一个宽频带内被数字化，然后采用数字信号处理技术来获得频域的信息。在这里不讨论实时频谱分析仪的校准要求。



如图所示，一台扫频调谐式超外差频谱分析仪一般包括以下组成部分：

- 一个 **RF 输入衰减器**，它降低了高电平输入信号的幅值，以防止混频器过载。
- 一个混频器，当本振扫描时，它使输入与本机振荡器频率相结合，对输入信号进行频移，使得窄带输入频率可以通过 IF 增益放大器并滤波，以便进行测量。
- 一个可调的 IF 增益电路，它在将混频器输出信号传输到 IF 滤波器之前将其进行放大，滤出感兴趣的信号。该增益是随参考电平设置而变化，使显示屏顶部的参考电平与所需的输入信号电平相对应。
- 一个 IF 滤波器，这是一个带通滤波器，其带宽可以从频谱分析仪的前面板进行调节。该带宽被称为分辨力带宽，它确定了仪器能够区分具有很小频率差异的输入信号的能力。
- 一个检波器/对数放大器，它响应 IF 信号电平，进行对数变换，获得以 dB/格为单位的显示。
- 一个视频滤波器，它采用了低通滤波，对显示的轨迹进行平均和平滑。
- 一个本机振荡器，它可以被扫频产生正常的显示，或在零频距模式下保持常数。对于采用了频率合成器作为本振的现代分析仪，合成器设置的分辨率将影响显示和光标频率的准确度。
- 一个扫频发生器，它控制着本振的频率，对于较老的模拟分析仪，它还控制着分析仪显示屏的刷新率。现代化分析仪在被用来产生本振频率的频率合成器的控制下产生扫频。
- 一个显示屏，它用来显示被测输入信号的频谱。当本振扫频时，频谱分析仪对被测信号电平进行数字化，并将其保存起来用于随后显示复频谱（较老的、没有数字存储功能的分析仪采用了长余辉 CRT 显示屏，在扫频时显示频谱轨迹）。现代化的分析仪往往也提供了各种标记、读出装置，以及使用了扫描期间获得的测量数据的测量功能，通常采用数字信号处理技术。

## 测试介绍和信号要求

### **频率准确度**

对于一台采用频率合成器作为本振的现代化分析仪，分析仪的基本频率准确度取决于其频率参考。这可以通过测试分析仪的 10 MHz 频率参考输出直接测量获得。显示频率和频带宽度准确度受其它因素的影响，例如合成器分辨率和分频器的性能，通常利用从经校准的频率合成器仪器获得的信号进行测试。

### **电平准确度**

该项测试测量分析仪显示一个信号电平时的绝对准确度。分析仪技术指标往往引用相对较低的单一频率下的绝对准确度。该项测试通常使用一个已知电平的信号，其电平值是通过在紧邻输入到分析仪之前使用一个功率传感器测量一个信号发生器的输出获得的，或者通过一个功分器连接信号源，利用一个功率传感器同时测量电平。

### **频率响应**

该项测试确定分析仪的频率响应或平坦度，是以一个参考频率下的响应为参考的。测试通常采用所需频率下的一个已知电平的信号，其电平值是通过在紧邻输入到分析仪之前使用一个功率传感器测量一个信号发生器的输出获得的，或者通过一个功分器连接信号源，利用一个功率传感器同时测量电平。

### **衰减器响应**

该测试检查输入衰减器步进的准确度。分析仪的性能一般也是在用来规定频率响应准确度的参考频率下规定的，因此该测试也是在该频率下进行的。该测试需要一个已知在参考频率下具有足够准确度衰减性能的信号源。也可以使用一台工作于恒定输出电平设置下的通用信号发生器，并采用外部经校准的步进衰减器。

### **显示线性度**

该测试检查分析仪在宽动态范围内的幅值线性度。性能是分析仪 IF 电路的一个函数，IF 电路工作于一个固定的频率。因此仅需要在单一频率，并且固定输入衰减器和参考电平设置下进行测试。测试需要一个具有高精度衰减线性度的信号源作为参考标准。也可以使用一台工作于恒定输出电平设置下的通用信号发生器，并采用外部高精度步进衰减器作为参考标准。

### **显示的平均噪声电平**

该测试测量分析仪在无输入信号时的噪声本底，并且在输入使用 50Ω 的端接器。为了减少测试时间，通常在相对较高的分辨力带宽设置下进行测试，将结果标准化至 1 Hz 或 10 Hz 的带宽，大多数的制造商通常在这样的窄带下规定分析仪的噪声本底。

### **分辨力带宽准确度**

该项测试测量 IF（分辨）带宽的 3 dB 带宽准确度，并且在每一分辨力带宽设置下重复测试。通常采用幅值和频率（一般为 50 MHz 或 100 MHz）恒定的输入信号，调整分析仪的中心频率来确定滤波器响应。

### **分辨力带宽选择性**

该项测试测量 IF（分辨）带宽滤波器的特性，以确保截断是足够深的，使得分析仪能够分辨在频率上非常接近高电平信号的任意低电平信号。该项测试确定 60 dB 带宽，结果表示为 3 dB 和 60 dB 带宽之比，被称为波形因数。测试方法与分辨力带宽准确度测试相同。

### **分辨力带宽转换准确度**

该项测试评估当分辨力带宽滤波器设置发生变化时残余增益的变化。该项测试通常采用幅值和频率恒定的输入信号，在中心频率（一般为 50 MHz 或 100 MHz）和频距设置恒定时调整分析仪的分辨力带宽，确定显示信号电平的变化。

### **扫描时间准确度**

在零频距模式下，分析仪仍然保持调谐至一个固定频率，并显示信号电平的时域特性，非常像一台示波器。该项测试确定水平时间轴的准确度，一般采用一个调幅信号，这样就能够显示指定数量的调整率周期，并能够确定时间/格。

### **IF 镜像响应**

当本振和输入信号在混频器内进行外差（混频）时，即会产生两个信号的和频与差频信号，IF 滤波器选择相应的组合（一般为和频）。但是，如果同时出现了另一信号，并且频率非常高，它就会和本振进行混频，产生一个等于 IF 中心频率的差频，分析仪也会响应这一不利信号，该频率被称为 IF 镜像频率。在实际应用中，采用双极或三极管变频技术，谐波混频器和预选器使情况变得复杂，但是仍会存在 IF 镜像频率，并且通常测试分析仪在这些频率下的响应。该项测试需要在宽频率范围内已知幅值的信号。

### **噪声边带**

该项测试评估分析仪在不增加会加宽显示响应旁瓣的邻近噪声时显示信号的能力。性能通过分析仪本振的相位噪声确定，该项测试也往往被称为相位噪声测试。该项测试需要一个具有足够低相位噪声的信号，这样就不会明显影响测量结果。该项测试通常在单输入频率下进行，在相对于输入频率（一般指载频）一系列偏移频率下测量边带水平。分析仪列出的技术指标单位可能会是 dBc（低于载波的噪声水平），或者为了规定分辨力带宽设置而以 dBc/Hz（低于载波的噪声电平，标准化至 1 Hz 带宽）。通常可以从分析仪的显示屏上直接获得以 dBc 为单位的的结果，为了获得 dBc/Hz 值，则必须采用一系列的修正因子。如下所述：

1 Hz 带宽标准化，减去  $10 \log$  (以 Hz 为单位的带宽值) dB。

修正非矩形的带宽滤波器，减去  $10 \log 1.2$  dB。

修正对数放大器的噪声峰值压缩，以及测量结果为噪声平均值而非有效值（RMS），增加 2.5 dB。

修正在低信噪比（SNR）时分析仪噪声本底的影响，10 dB SNR 会产生 0.4 dB 的误差，3 dB SNR 会产生 1.8 dB 的误差（或者可以看作是不确定度的影响）。

参考源相位噪声的影响，10 dB 的阈值产生 0.4 dB 的误差，0 dB 的阈值（与分析仪相当的源噪声）产生 3 dB 的误差，因此可以看作是为分析仪噪声建立了上限值。

或者，大多数现代化的分析仪包括相噪测量功能，可以直接读出以 dBc/Hz 为单位的相噪，分析仪本身完成全部必需的标准化和修正。

### **剩余调频**

分析仪的这一特性与其本振在接近载频时的相位噪声有关系，但是通常以剩余调频加以考虑（并测量）。在进行测试时需要一个具有低剩余调频的信号源。测量方法一般使用分析仪的中频滤波器响应和斜波调频调制器。通过将信号频率调至与滤波器的线性响应部分相一致，在输入信号上产生一个小的频率变化，并测量显示的幅值变化，即可首先确定以 dB/Hz 为单位的滤波斜率。接下来，将分析仪置于零频距模式，工作于分析仪中频滤波器相同的频率点，因此所观察到的任意信号电平变化都是由剩余调频产生的。所以，通过将峰-峰幅值变化与 dB/Hz 斜率值相乘，即可计算获得剩余调频。

### **剩余响应和杂散响应**

根据具体的分析仪型号，这些测试会稍有不同，取决于其设计结构和制造商的建议。某些测试需要一个输入信号来研究邻近显示信号的响应，要求输入信号本身没有邻近的剩余信号，具有足够低的噪声边带和相噪。其它测试可以研究无信号条件下的低电平剩余响应，仅需要在分析仪的输入上加一个 50Ω 的端接器。

### **谐波失真**

该项测试检查分析仪内部在输入信号上产生的谐波。在分析仪的混频器内会产生有害的谐波，并且与混频器输入信号的电平有关系。分析仪的性能指标可能规定的是在一个给定输入信号电平和衰减器设置下的谐波响应，更常见的是给定一个与混频器电平无关的技术指标，以 2 次谐波交调截止点 (SHI) 给出。确保用于测试的输入信号具有足够低谐波是非常重要的，并且通用信号发生器往往不能提供足够低的谐波分量，因此就需要使用外部低通滤波器，以正确确定分析仪的性能。

### **3 阶交调截止点 (TOI)**

如果输入信号包括两种或多种输入频率，分析仪的混频器也会产生不利的交调产物。如果出现两个频率稍有不同的信号，就会产生二阶和三阶交调产物。二阶交调产物的产生与不利的谐波有关系，并且通过谐波失真测试进行有效地测试，因此就近测试三次谐波交调产物。和谐波性能一样，三阶交调性能通常以一个截止值给出。在进行测量时，需要两个频率稍有差异、电平相等的信号。信号来自于两台信号发生器，通过功分器同时连接到分析仪。由于三阶交调产物依赖于输入信号电平，因此就必须获得输入信号详细信息，而这一准确度往往超出了一般信号发生器和功分器的技术指标，所以就需要利用一个功率传感器测量输入到分析仪的输入。

### **跟踪发生器测试**

如果分析仪安装了跟踪发生器（通常为选件），则需要对其输出信号频率和幅值进行一些测试。

## **总结**

许多项测试都使用相类似的测试设置，例如连接到分析仪输入的信号发生器，但是却研究不同的分析仪性能特性。这样就无需重新配置即可进行多项测试，当进行自动测量时，这是非常大的优势。但是往往必须使用不同的信号发生器来覆盖所需的频率范围，或使用信号特性适合于特定测试项目的信号源。

测试项目之间也有一定程度的相互依赖性，某项测试结果可能取决于在此之前的一项或多项测试。例如，分辨力带宽准确度测试就依赖于具有准确中心频率和准确电平线性度的分析仪，这些参数是在频率准确度和显示线性度测试中进行测试的。

在说明测试结果时需要注意一些事项，例如对于噪声边带/相噪需要进行修正。

频谱分析仪的校准是一项复杂的过程，但是理解所需的信号源就能确保获得有效的结果。