

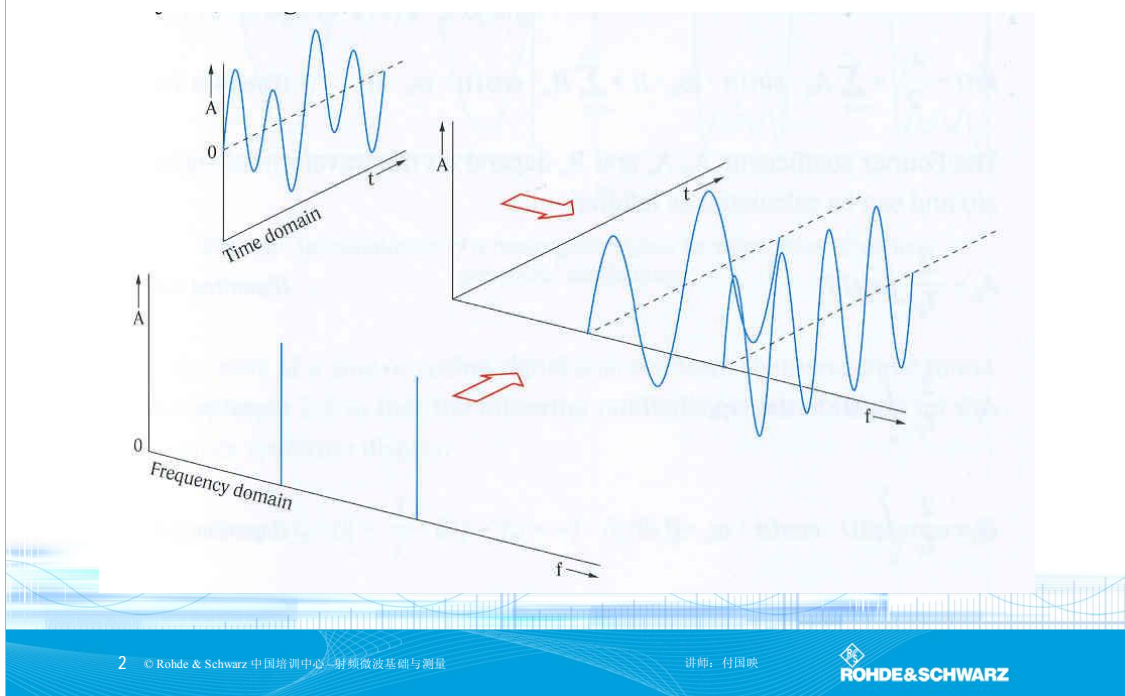
频谱分析仪原理

罗德与施瓦茨中国培训中心

© 2009

www.rohde-schwarz.com

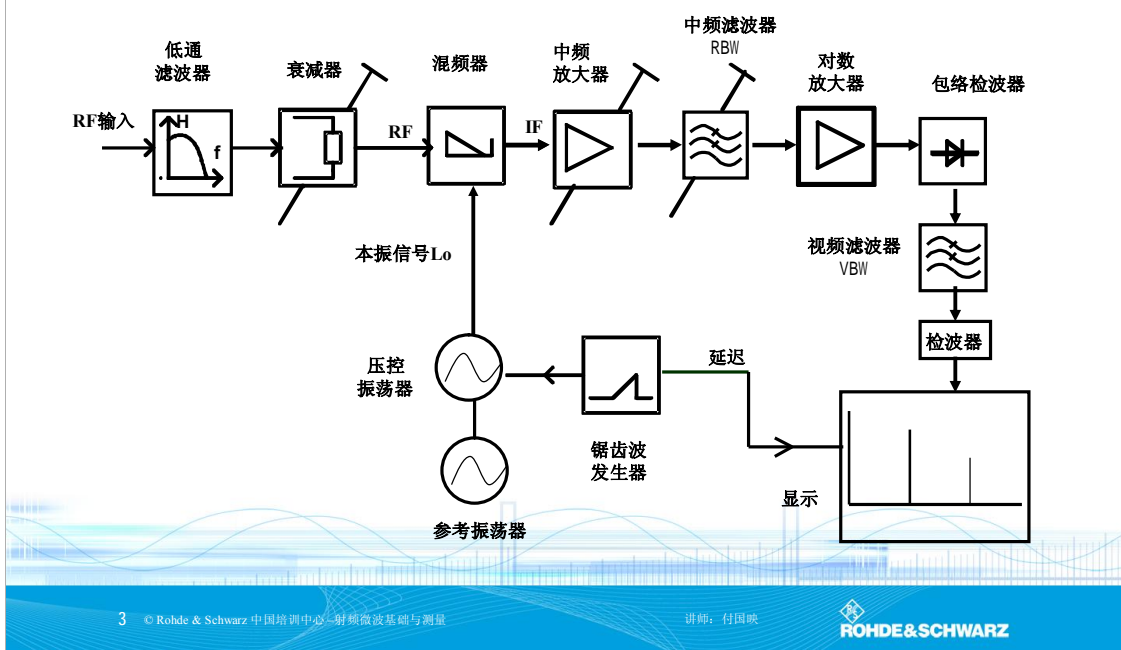
频域测量对信号分析的作用



时域得到的是信号的波形信息，不适合测量混合信号和复杂信号，如AM信号、QPSK信号。频域得到的是信号的频域分布信息。

左上图的信号幅度和相位无规则变化，在时域中测量很难获得有用的信息。可以把这个复杂的信号看作是两个不同频率和幅度的两个信号（右上图）的合成，然后在频域中表示出来（下图），这样就可以很清楚地了解该混合信号的构成。

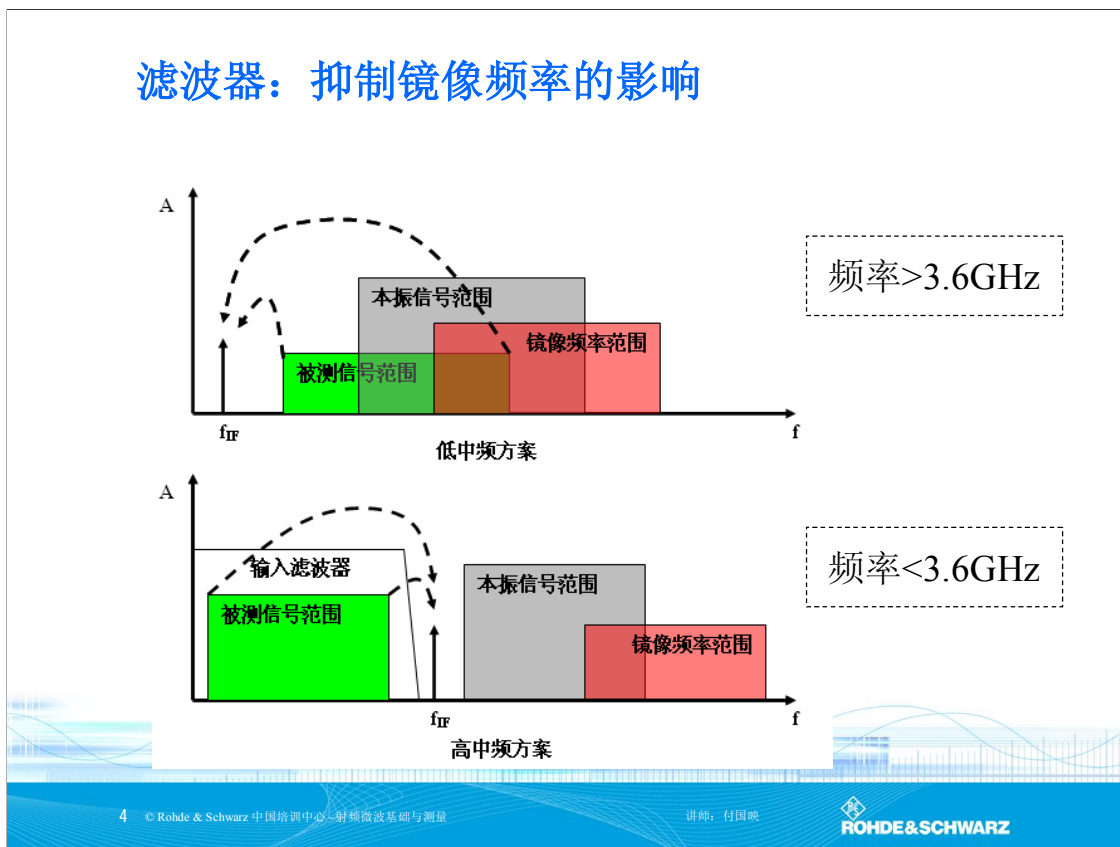
超外差式频谱分析仪结构



上图是测量范围为9kHz~3.6GHz频谱分析仪的内部模型。

- 1、超外差式频谱分析仪通过内部混频器和本地振荡器Lo信号将输入信号转换到固定的中频，然后在此基础上进行信号处理。通过扫描本地振荡器的中心频率达到在频率上扫描输入信号。
- 2、输入信号被转换成中频信号后信号需要经过放大和滤波，频谱仪的RBW就是中频滤波器，它是一个带通滤波器。
- 3、为了允许一个宽电平范围信号同时在屏幕上显示，中频信号用对数放大器来压缩。
- 4、中频信号经过包络检波后变成基带信号，频谱仪的视频滤波器VBW是基带信号滤波器，它是一个低通滤波器。
- 5、由于从起始频率到终止频率扫描点的数量远远大于仪器能够显示的象素点，测量点到显示点之间有个对应关系，称作检波。
- 6、现代的频谱仪都采用液晶显示来代替传统的阴极射线管，体积更小。
- 7、压控振荡器的振荡频率（本振频率）和实际的射频频率之间有一个对应关系，信号处理也有一定延迟，因此显示和压控振荡器之间需要同步。

滤波器：抑制镜像频率的影响



所谓接收机低中频方案，指第一次变频时将输入信号频率变低，高中频方案则是第一次变频时将输入信号频率变高，然后再将它变低。

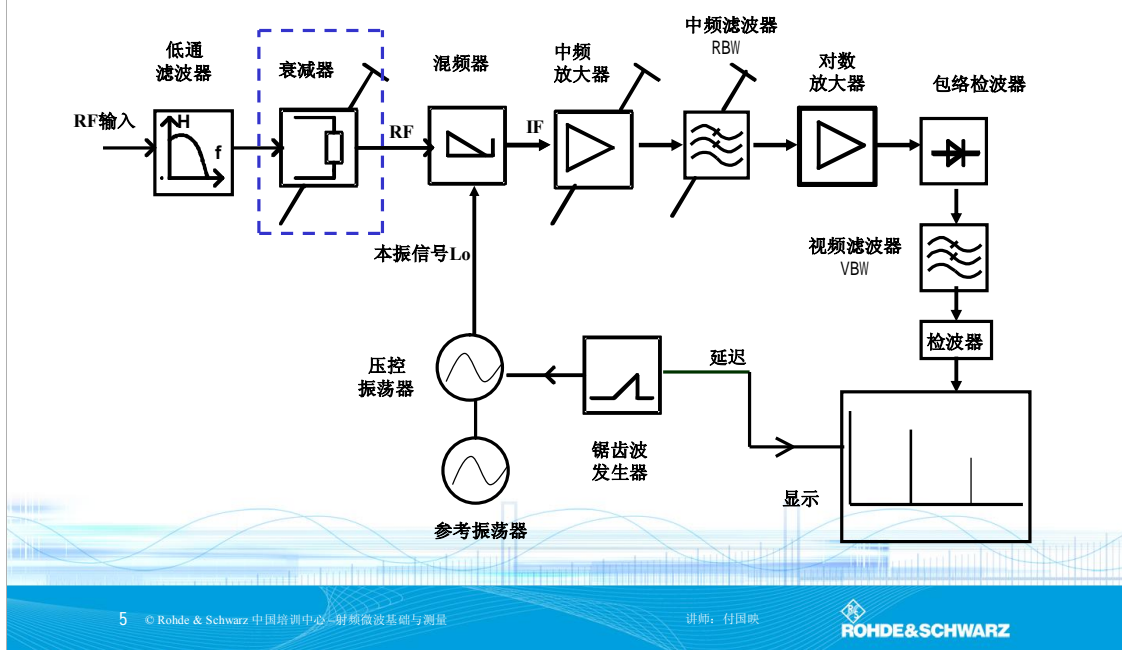
9kHz~3.6GHz频谱测量方法：

如果频谱仪采用低中频方案，当输入频率范围大于 $2f_{IF}$ ，那么被测信号范围和镜像信号范围将会重叠，采用低通滤波器不能将镜像频率信号滤除，所以对输入滤波器的要求为，在不影响主信号的情况下，应用一个可调谐带通滤波器以抑制镜像频率。为了覆盖（9kHz~3.6GHz）的频率范围，由于较宽的调谐范围（几十个倍频程）使滤波器变得极为复杂而不容易实现，因此必须采用高中频方案。第一中频频率比输入信号频率高，那么本振信号也比输入信号频率高，镜像频率和输入信号的频率间隔为 $2f_{IF}$ ，也就是镜像频率远远高于本振信号频率和输入信号的频率，因此设计一个固定的滤波器，其截止频率位于最高输入频率和中频频率之间就很容易解决镜像频率对有用信号的影响。此外，低通滤波器还可以抑制本振信号从频谱仪输入端口泄漏出去而影响被测件。

高于3.6GHz频谱测量方法：

现代频谱仪在射频前端采用一个滤波器，将低于3.6GHz和高于3.6GHz的信号分开。高于3.6GHz信号采用低中频方案，输入前端使用可调的YIG带通滤波器来滤除镜像频率的干扰，因为调谐范围比较小（ $13\text{GHz}/3.6\text{GHz}=3.6$ ），YIG带通滤波器很容易实现，但它的频率响应不好，调节有延迟。YIG滤波器通过调节的电流来改变电感，进而改变中心谐振频率。如果频谱仪分析频率在1GHz~5GHz的信号时，它是分段扫描的，1GHz~3.6GHz和3.6GHz~5GHz的扫描采用了不同的射频前端。

衰减器



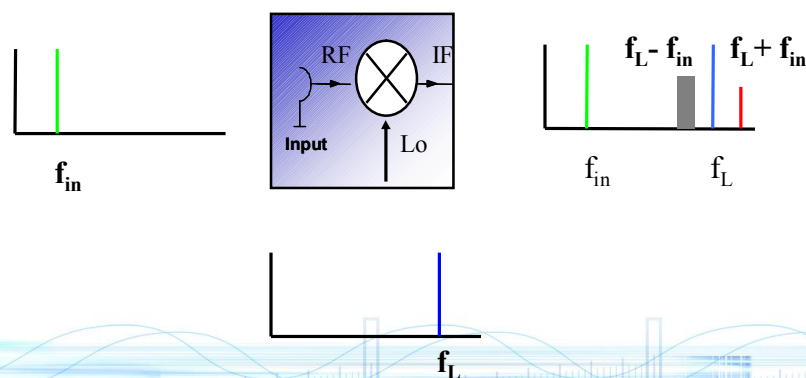
衰减器有机械的，也有电子的，其步进一般为10dB和5dB，有些频谱仪提供2dB步进调节。衰减器的作用如下：

- 1、当测量高电平信号时，对信号进行衰减，保护频谱仪不受损坏。
- 2、改善仪器端口的匹配特性。
- 3、提高测试的准确性，混频器是非线性器件，当混频器输入信号电平较高时，输出会产生许多产物，而且电平太高会干扰测试结果，使无互调范围减小。当输入信号电平在混频器1dB压缩点以上时，测试结果会不准确。
- 4、提高频谱仪动态范围：通过设置步进衰减器调节进入混频器的电平，可以得到较大的动态范围。

同时，衰减器设置过大，仪器的本底噪声被抬高。

混频器

- 中频频率调谐在 $f_L - f_{in}$



6 © Rohde & Schwarz 中国培训中心—射频微波基础与测量

讲师：付国映

ROHDE & SCHWARZ

频谱仪的上限频率取决于本振的调谐范围。

1、**基波混频**：输入信号通过本振的基波混频。但为了覆盖更高的频率范围，有必要进行倍频，如在混频器前加乘法器。

2、**谐波混频**：

由于混频器的非线性会使本振信号产生谐波，可用谐波来进行混频。

基波混频可获得最小的插入损耗，由此可以得到低的噪声系数。但这种方法要求对本振信号做复杂的处理。除了乘法器外，要求滤波器在作乘法运算后对谐波有很好的抑制作用。需要足够高的本振电平的大器必须是宽带放大器，因为它对应了高频输入部分的输入频率范围。

谐波混频虽然很容易实现，但会造成相对高的转换损耗，因此，要求加到混频器的本振电平要高于其在低频段的值，由于足够高的本振电平与混频器的非线性，高次谐波可以用于混频。转换损耗随谐波阶次的升高而升高，有如下关系。 $\Delta a_m = 20 \cdot \log m$

Δa_m 是相对于基波混频时的转换损耗增量；

m ：用于转换的谐波阶次。

以上这两个方案在实际中根据频谱仪的价格档次而定，两种方法同时使用也是可能的，比如，使用倍频得到本振信号，谐波实现的转换可以在一个可以接收的价格上进行复杂性与灵敏度的折中。

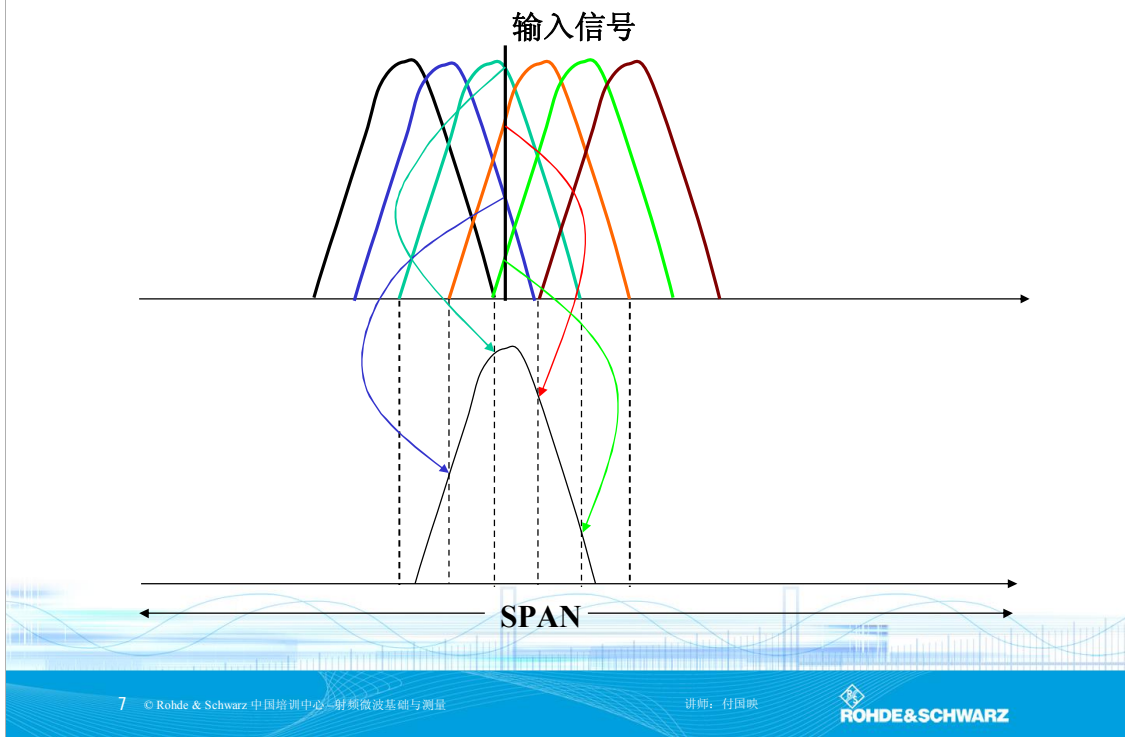
3、**外混频器**：

对于毫米波范围内的测试（40GHz以上），可利用外混频器来提高频谱仪的频带范围。这些混频器一般采用谐波混频，所以本振信号频率范围比输入信号频率范围小。

输入信号通过本振的谐波变频到低中频，并在频谱仪低端频率输入部分的中频信号链路适当的位置上插入。

在毫米波段经常使用波导，外混频器一般采用波导形式，这些混频器一般不采用预选器，因此对镜像频率没有抑制，无用的混频产物可以通过合适的算法分辨出来。

频谱仪的扫描过程



7 © Rohde & Schwarz 中国培训中心—射频微波基础与测量

讲师：付国映

ROHDE & SCHWARZ

输入信号频率、本振信号频率和中频信号频率有一个固定关系，比如本振频率－输入信号频率＝中频频率，中频频率是固定的，本振信号频率变化就等于输入信号频率变化，扫描式频谱分析仪是通过扫描本振（即调谐本振频率）来实现输入信号在一段频率范围内的扫描的。

上图说明当一个待测试的单载波信号输入到频谱仪，实际上测量到的是中频滤波器幅频特性的形状，即实际测量的结果是中频滤波器幅频特性和输入信号的卷积。

扫描时间

- T_{Sweep} 最小扫描时间
- Span 频率扫描跨度
- RBW 分辨率带宽 (3 dB 带宽)
- K 1 数字滤波器, 2.5 模拟滤波器

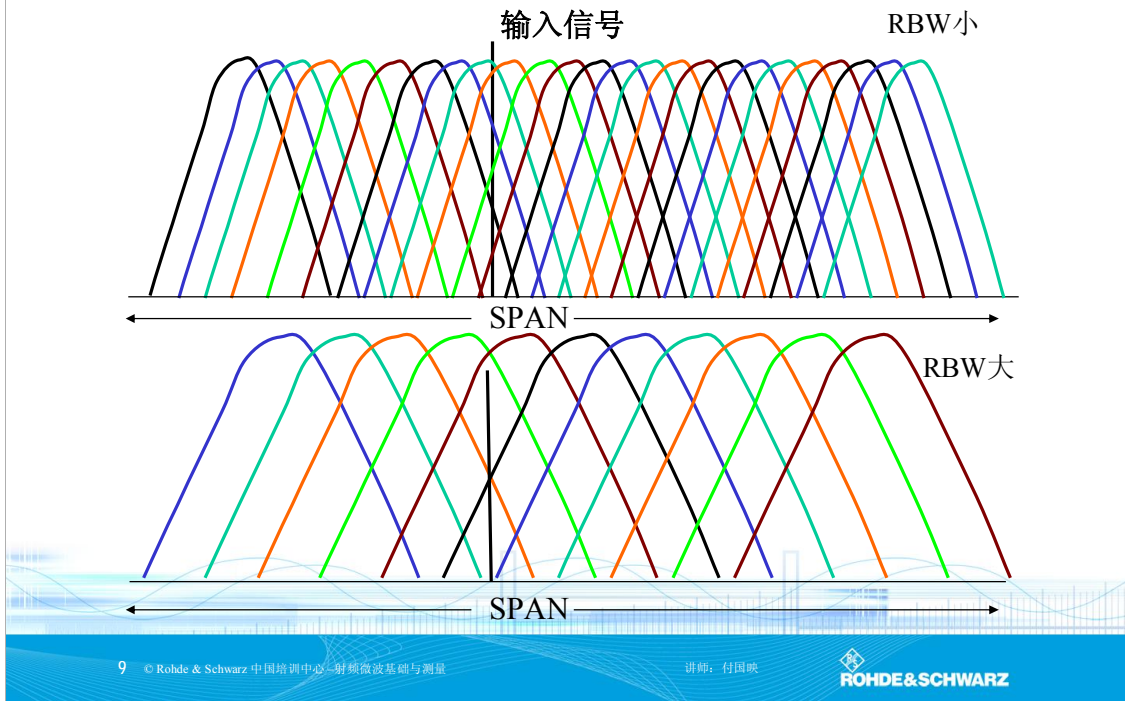
$$T_{\text{Sweep}} \cong k \cdot \frac{\text{Span}}{\text{RBW}^2}$$

采用窄带滤波器可实现高分辨率，但需要更长的扫描时间。

比例系数K取决于滤波器的类型和允许的瞬态响应误差。对于由4--5个单独电路组成的模拟滤波器，比例系数K=2.5（最大的瞬态响应误差大概为0.15dB）。

数字高斯滤波器的瞬态响应可知并能够精确再现，和模拟滤波器相比，可以通过与信号类型无关的合适修正系数来获得更高的扫描速度。

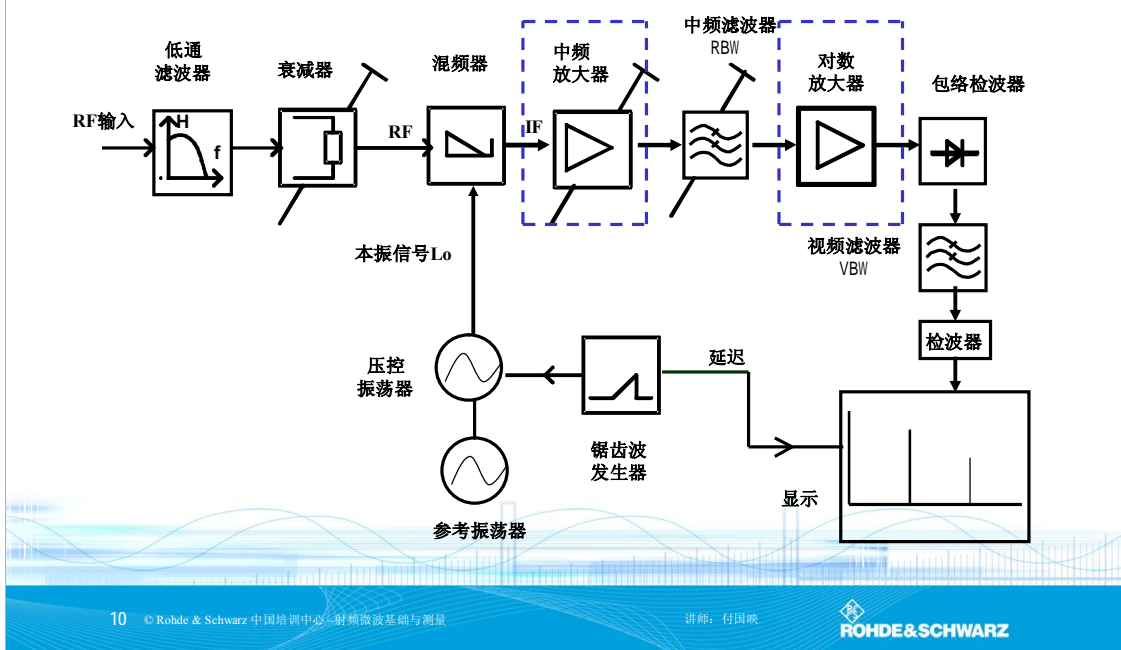
扫描时间 vs RBW



窄的中频滤波器可实现高的分辨率，所以中频滤波器带宽又称为分辨率带宽 (RBW)。

本振信号频率变化的一般以远小于RBW的频率步进扫描，比如 $RBW/10$ ，RBW变大，SPAN不变，那么本振调整的步进变大，测量的次数就变少了，整个扫描时间会变短。反之，RBW越小，扫描时间就越长。

中频放大器、对数放大器



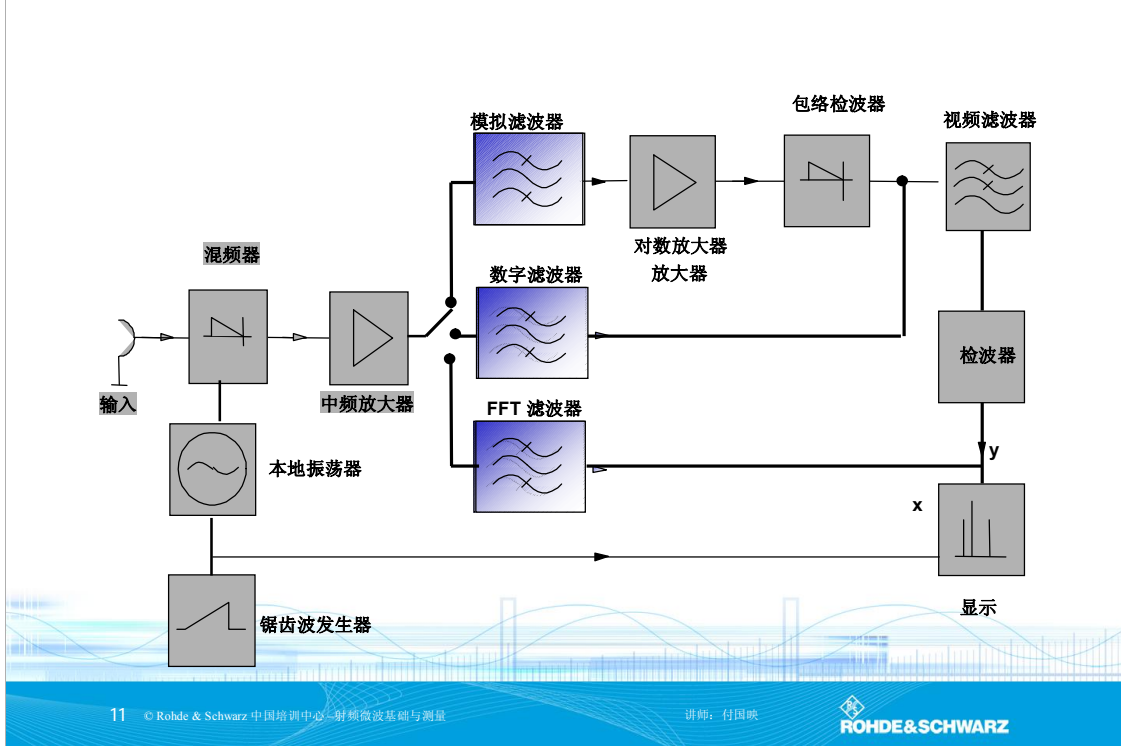
中频放大器：

输入信号经过了前置衰减器，电平降低，为了恢复信号幅度，补偿输入衰减器的变化，在混频器后对中频信号进行放大，在放大有用信号的同时，噪声和干扰信号也被同时放大。

对数放大器：

检波器之前有一个对数放大器，对数放大器按照对数函数来压缩信号电平（对于输入电压幅度 v ，输出电压幅度为 $\log v$ ），这大大减小了由检波器所检测的信号电平变化，而同时向用户提供校准成用分贝读数的对数垂直刻度，在频谱分析仪中，由于信号电平大幅度变化，故需要采用对数刻度。对数放大器的设计基于多级解调原理，将许多个具有固定增益（每一级的增益通常为10dB）的单元放大器级联起来。随后，将每一级放大器的输出逐个相加以提供线性输出电压，有些器件提供一个表示输入信号的相对相位的限幅输出。

中频滤波器RBW



中频滤波器可以减小噪声带宽，其带宽越窄，噪声带宽就越窄，进入频谱分析仪的噪声就越小，那么接收灵敏度就越高，即本底噪声越低。

当今的频谱仪的中频滤波器有以下三种形式：

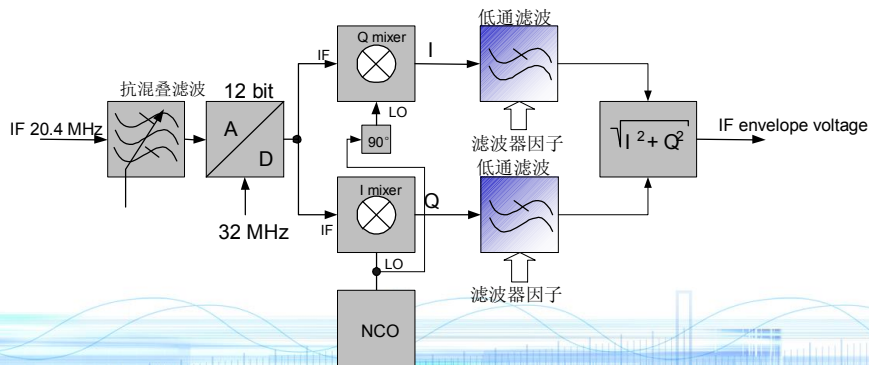
- 1、模拟滤波器
- 2、数字滤波器
- 3、FFT

模拟滤波器通常用来实现大的分辨率带宽。本例中频谱分析仪带宽从100kHz~10MHz是采用模拟滤波器来实现的，其选择性依赖于滤波电路阶数，一般频谱仪为4级滤波电路，也有5级滤波电路也产品，这样可分别得到14和10的形状系数。

理想的高斯滤波器的形状系数为4.6，不能用模拟滤波器实现，但是在20dB带宽内实现近似是可能的，这样瞬态响应几乎与高斯滤波器相同。

中频滤波器RBW:数字滤波器

- 真正的高斯形状，波形因子4.6，灵敏度更高。
- 扫描速度快，最小扫描时间 $k = 1$ 通过补偿可以达到。
- 带宽精度高，电平精度高。
- 用于噪声或类噪声信号。
- 没有温度或老化漂移。



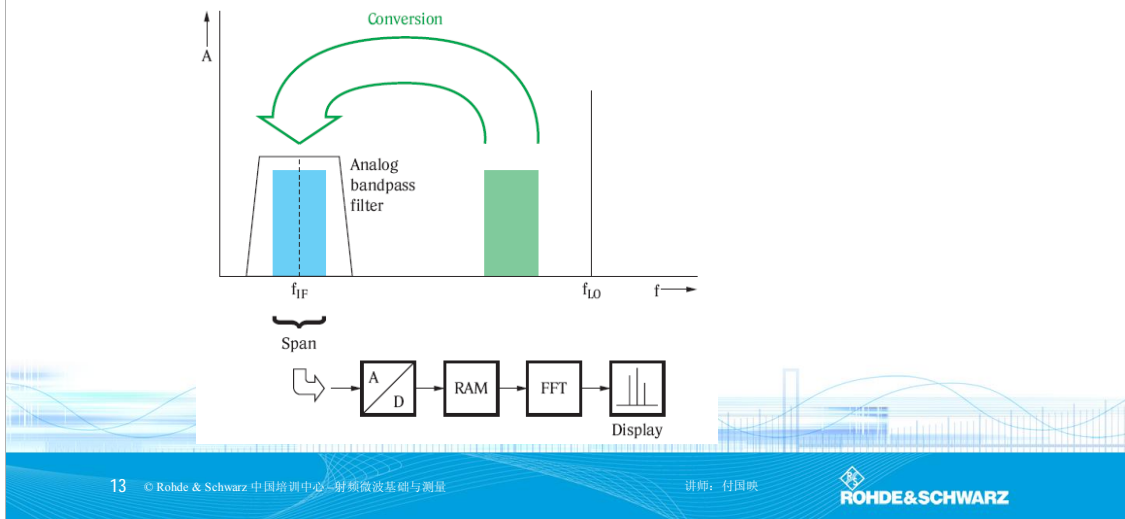
通过数字滤波器可以获得很窄的带宽。和模拟滤波器相比，理想的高斯滤波器可以实现。数字滤波器在可接受的价格内有更好的选择性。如5级电路模拟滤波器的形状系数为10，高斯滤波器为4.6。另外，数字滤波器有更好的温度稳定性，无需调整。因此，在带宽上它更为精确。

由于数字滤波器的瞬态响应已经确定，使用合适的修正系数可使数字滤波器获得比模拟滤波器在相同带宽的情况下更短的扫描时间。

从10Hz~30kHz的分辨率带宽是通过数字滤波器实现的。

中频滤波器RBW: FFT 滤波器

- 速度快，在窄的分辨带宽情况下较数字滤波器和模拟滤波器减少了扫描时间。
- 不适合做脉冲信号分析

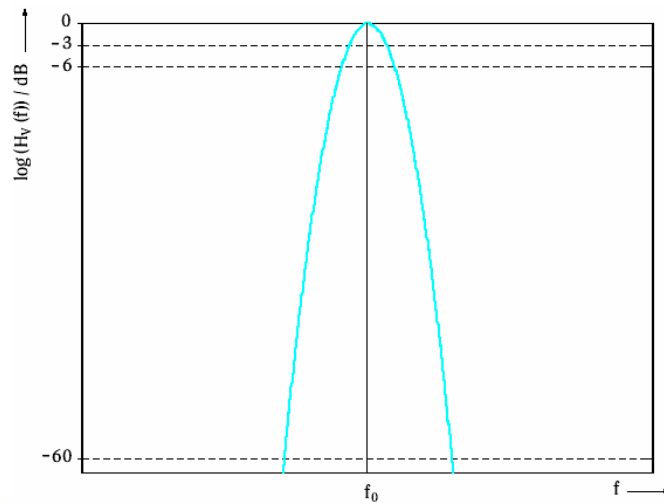


信号的频谱是由其时域特性决定的。时域和频域可借助傅立叶变换和傅立叶反变换来相互转换，因此可以计算出时域信号的频谱。为了精确计算输入信号的频谱，就需要无限期的观察。另外时域中每个点上信号的振幅都要知道。这种计算的结果将是一个连续的频谱，频率分辨率将是无限的。很明显，这么精确的计算在实际中是不可能的。假设某些前提条件，频谱仍然可在保证足够精确度的情况下确定。

实际上，傅立叶变换需要借助于数字信号处理，因此被分析的信号要用模数转换器采样及振幅量化。通过抽样可以使连续输入信号转换成时域上离散的点，但是关于时域特性的信息将会丢失。因此输入信号的带宽必须限制，否则会因为取样而产生不真实的信号。根据香农采样定律，采样频率 f_s 必须要至少高于输入信号带宽两倍。

实际上，被分析的信号通过模数转换器采样，变成离散信号，采样值被保存在一个存储器中，经过离散傅立叶变换计算，计算出信号的频谱。

中频滤波器（RBW）特性



中频滤波器用来界定已变换到中频的输入信号将显示在频率轴上确定位置上所对应的部分。由于高裙边选择性和由此产生的选择特性，需要矩形滤波器，但对频谱分析而言，这种矩形滤波器的瞬态响应是不合适的。由于这样的滤波器有较长的瞬态响应时间，输入信号的频谱应通过十分缓慢的本振调谐变到中频以避免幅度误差。使用优化瞬态响应的高斯滤波器可以获得相对短的测试时间。

由于有限的裙边选择性高斯滤波器必须定义带宽，在频谱分析中通常定义3dB带宽。

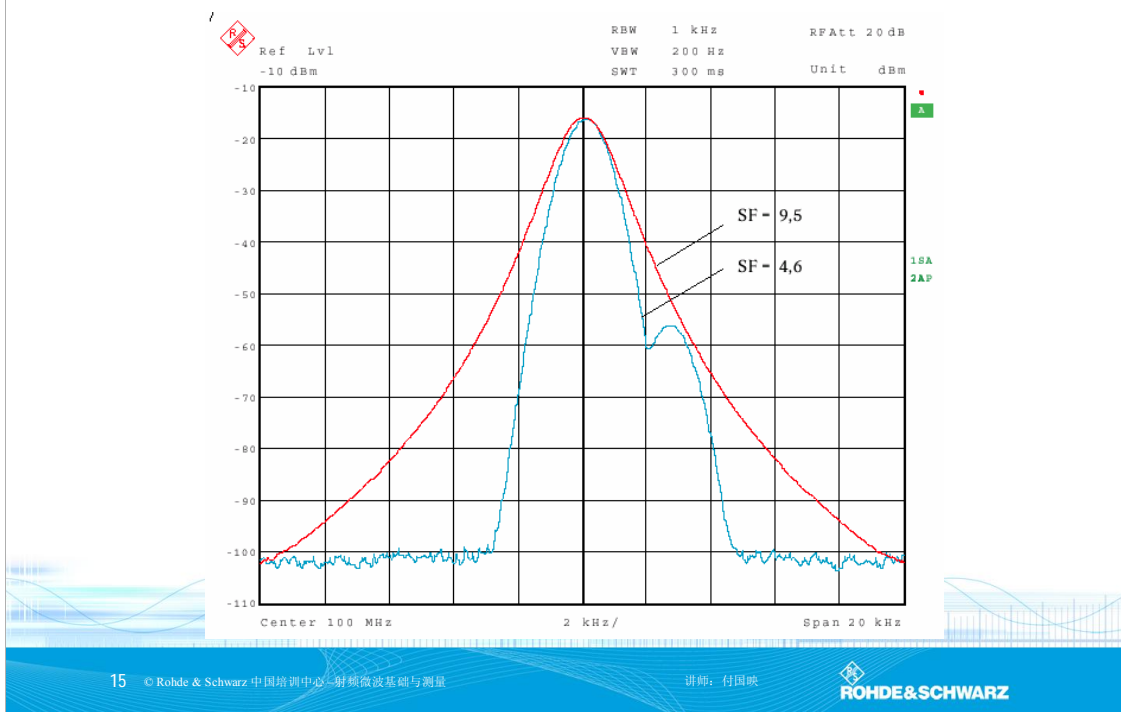
滤波器的裙边选择性用波形系数来定义：

$$SF_{60/3} = B_{60\text{dB}} / B_{3\text{dB}}$$

这里 $B_{3\text{dB}}$ =3dB带宽， $B_{60\text{dB}}$ =60dB带宽

在电磁兼容接收机里面的测量带宽指的是中频滤波器6dB带宽。

不同分辨带宽的滤波器对测试结果的影响



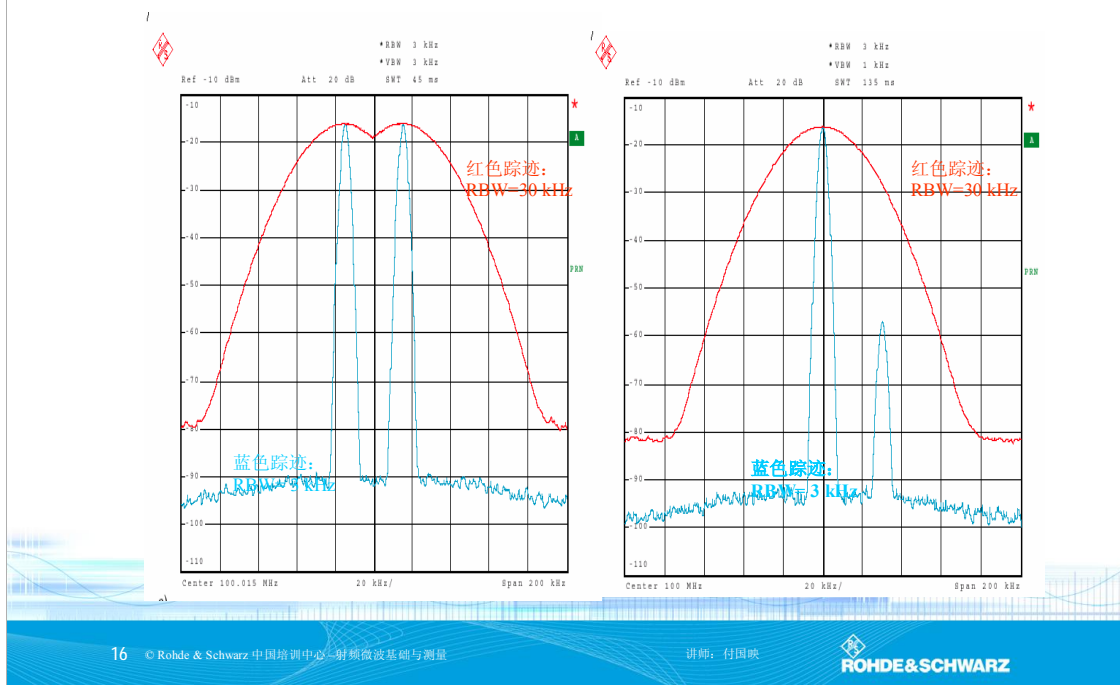
假定在一个强信号旁边有一个弱信号时，采用大波形系数的中频滤波器(RBW)可能检测不出来。

1kHz的分辨率带宽

当SF=4.6时（对应蓝色踪迹），可测出弱信号。

当SF=9.5时（对应红色踪迹）则分辨不出弱信号。

分辨相邻的信号

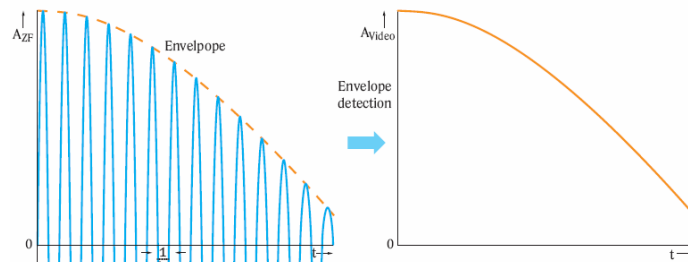


频谱仪的频谱分辨率主要决定于分辨率带宽RBW，即中频滤波器带宽。若使用取样或峰值检波器，频谱分辨率指在显示中通过3dB衰减来分辨两个等幅信号的最小频率偏移。如左图所示，红线对应30kHz分辨率带宽，减小带宽后，蓝线对应3kHz分辨率带宽,两个信号被明显分开。

如果相邻信号的电平有明显不同，小电平信号在大分辨率设置下不会显露出来。（见右图红色踪迹）。通过减小带宽，弱信号可被显露出来。（见右图蓝色踪迹）。

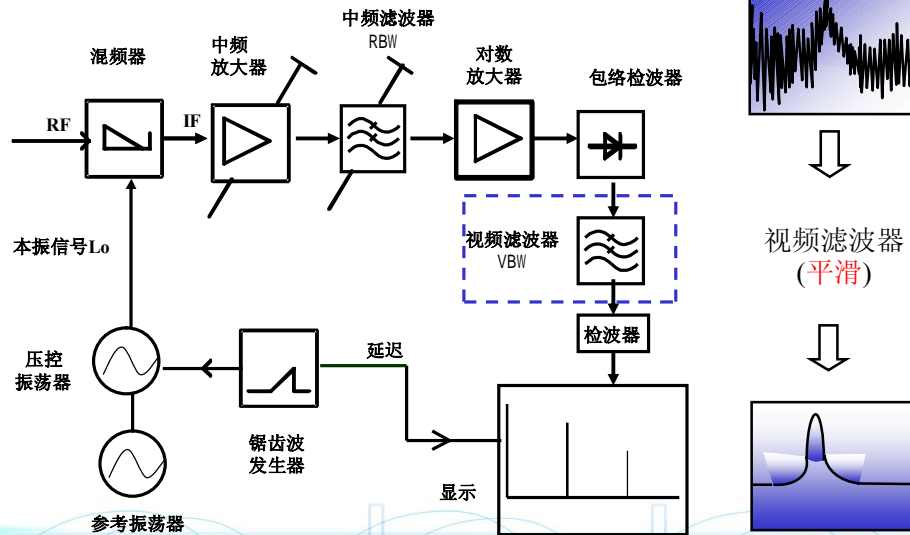
包络检波

- 中频信号到基带信号的过程



输入信号幅度的信息包含在中频信号的幅度中，通过使用模拟或者数字滤波器，在滤除高的中频信号之后，可以得到中频信号的包络。

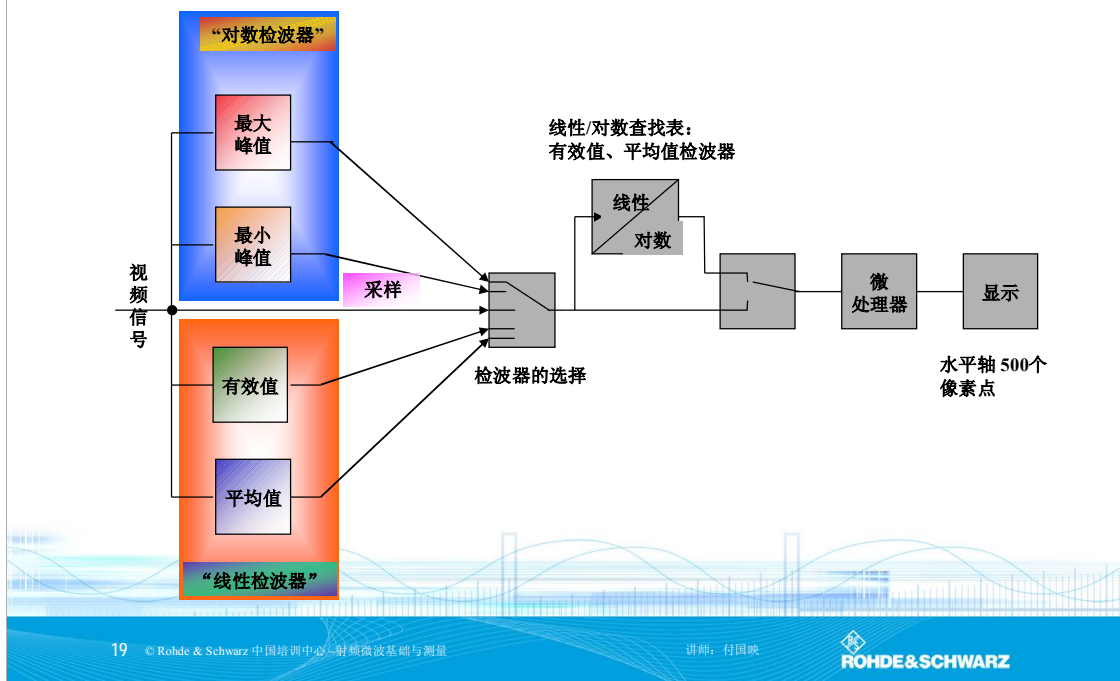
视频滤波器(VBW)



视频滤波器在包络检波器之后，视频滤波器决定了视频带宽。视频滤波器是一级低通配置，用于从视频信号中滤除噪声，平滑轨迹，从而使显示结果稳定。这里所述频谱仪的视频滤波器也是数字式的，因此视频信号在检波器输出处通过A/D变换器被取样及量化。和分辨率带宽类似，视频带宽也会限制最大允许的扫描速度，要达到最小的扫描时间需要增大视频带宽。

对于有足够信噪比的情况下测量正弦信号，经常选择VBW与RBW相等。在低S/N的情况下，可以通过减小VBW来稳定显示，弱信号会在频谱中突现出来并且稳定可再现。在测量正弦信号时，减小VBW，对电平无影响。

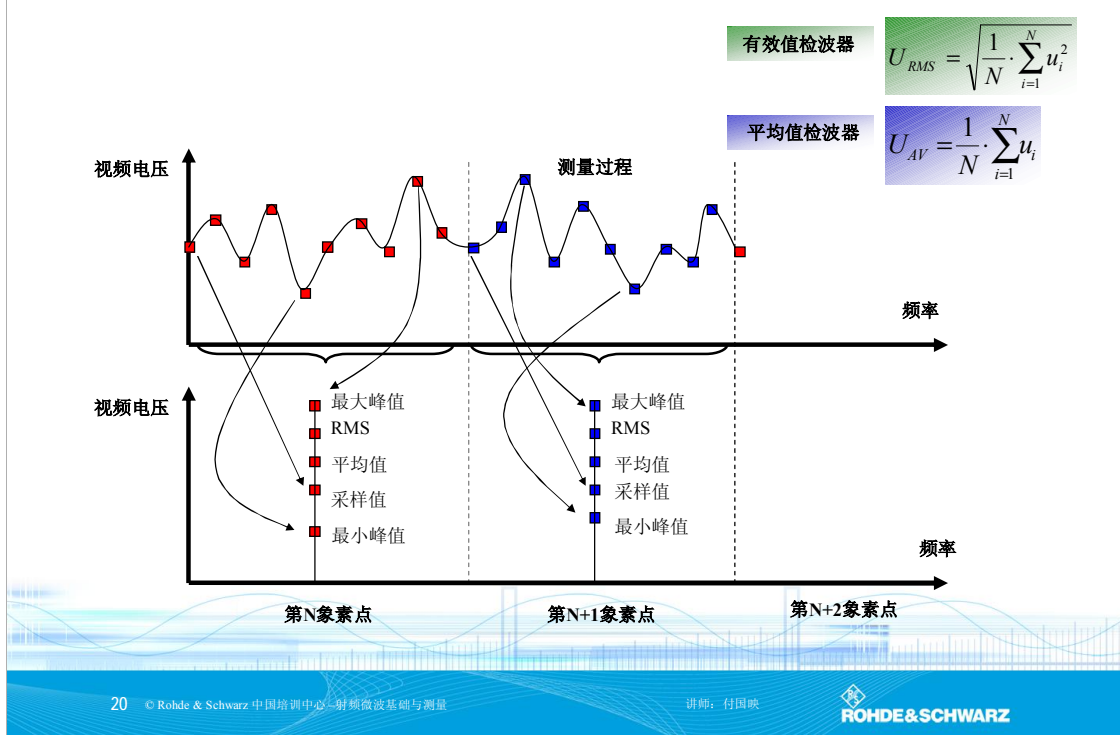
检波器



1、现代频谱仪使用液晶显示器来代替阴极射线管来显示记录频谱，相应地，幅度和频率显示的分辨率都受到限制。幅度分辨率的限制可用曲线处理来弥补，这样即可在很高分辨率的情况下来确定幅度。特别当显示大的频率跨度时，一个像素点包含了相对较大子段的频谱信息，由于频谱仪第一级本振的调整步长取决于分辨率带宽，这样多个取样点（测试结果值）会落在一个像素点上，像素点显示什么样的数值取决于检波器的检波方式。

2、举个例子，当测试1GHz~7.25GHz的频谱时，RBW等于10MHz，频率跨度为6.25GHz，频谱仪显示了625点，实际上一个显示点（像素点）代表了10MHz信号带宽内的频谱。假设本振以RBW/10为步进，那么每10MHz带宽的输入信号测试了10次，在整个带宽内一共测试了6250次，中心频率分别为1.001GHz、1.002GHz、1.003GHz..... 7.248GHz、7.249GHz、7.25GHz，但是显示点只有625个，那么一个显示点代表这10MHz频带内的10次测量结果值，到底代表哪一次或者哪几次结果的合成就由检波器来决定。

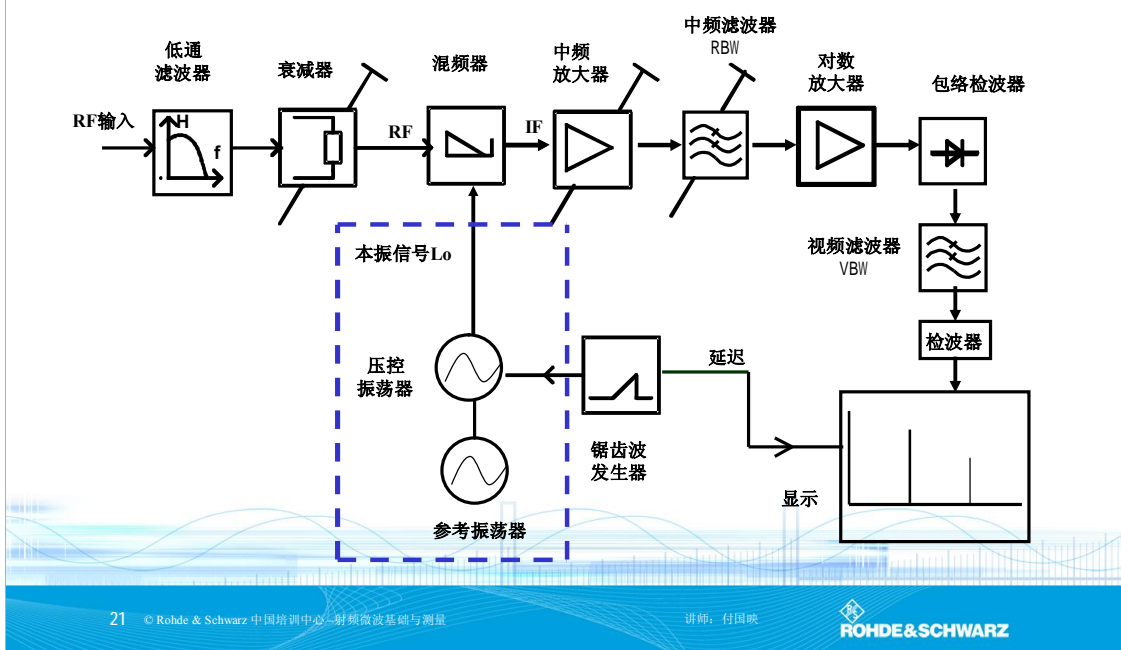
检波器选择与数据处理



一共有7种检波器：

- 1、最大峰值检波器：从分配到每个像素点的取样点中取一个最高电平并显示出来，如上例，将第9个点和第13个点的测试结果值显示出来，其它的无效。
- 2、最小峰值检波器：从分配到每个像素点的取样点中取一个最小电平并显示出来，如上例，将第5个点和第17个点的测试结果值显示出来，其它的无效。
- 3、自动峰值检波：同时显示最高电平和最小电平，两点之间用垂线相连。
- 4、取样检波：从分配到每个像素点的取样点中取固定位置的电平并显示出来，如上例，将第1个点和第11个点的测试结果值显示出来，其它的无效。在频率跨度远远大于RBW的情况下，输入信号将不再被可靠检测。
- 5、RMS检波器（均方根）：计算分配到每个像素点的所有取样值的均方根值，结果为像素点对应频宽内的信号功率。在RMS计算时，包络的取样值要求采用线性值来计算。
- 6、平均值检波：计算分配到每个像素点所有取样点的线性平均值。
- 7、准峰值检波：这是一种用于干扰测量应用并定义了充放电时间的峰值检波器，用于EMC方面的测试。

本地振荡器Lo



由于宽的可调范围与低相位噪声，YIG振荡器经常被用作本振。这项技术使用磁场来调谐。

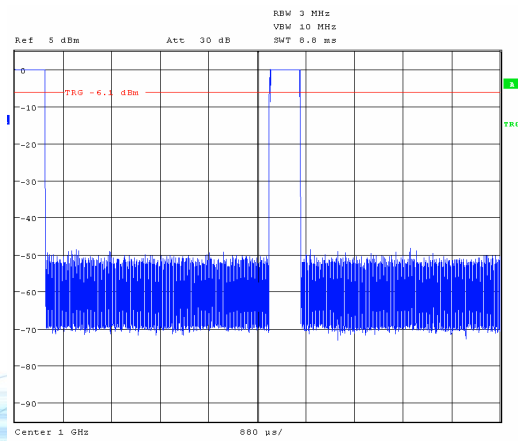
一些频谱仪采用压控振荡器来作本振，其调整范围较小，但较YIG调整起来更快。

为了增加频谱仪的频率精度，本振信号可以是合成信号。也就是说，本振经锁相环锁定在参考信号上。和模拟频谱仪相比，本振不能连续调节，但是可分为多个小的步长调整。步长依赖于分辨率带宽，小的分辨率带宽需要小的调整步进。

参考信号通常由一个温控晶振（TCXO）产生。为了增加频率精度与长期的稳定性，对大多数频谱仪来说，广泛采用恒温控制晶振(OCXO)。可以从频谱仪后面板的一个接头上得到10MHz的参考同步信号。也可以应用外参考时基来同步频谱仪。

频谱仪的时域功能

- SPAN=0，起始频率=终止频率，本振不扫描。
- 得到“功率vs时间”关系，横轴为时间，纵轴为包络功率。
- 中频带宽（RBW）必须大于被测信号的带宽。



示波器分析的是时间对瞬时幅度的关系。

频谱仪的触发

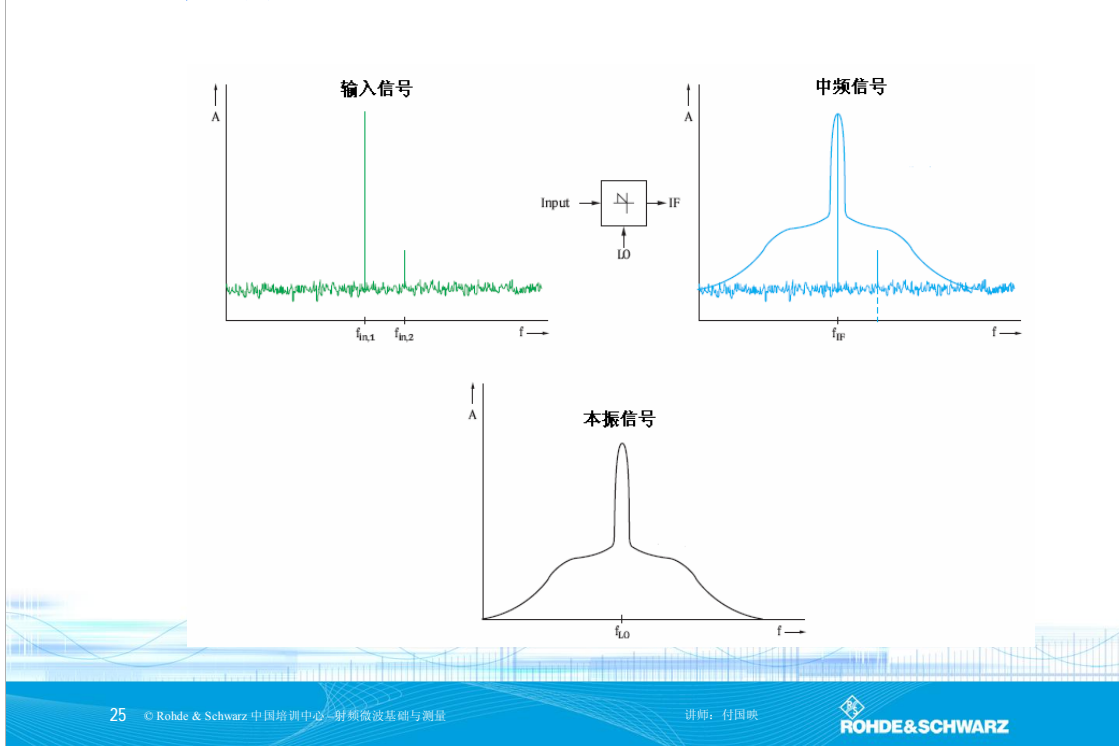
- **Free Run:** 自由运行，一次扫描结束后，开始下一次扫描
- **Video:** 视频触发，通过显示的电压/功率来激活触发
 - 设置视频触发电平
- **IF Power:** 中频功率触发，通过检测第二中频的功率触发
 - 设置中频触发功率
- **Extern:** 外部触发，通过外部触发端口的TTL信号触发
 - 需要外部触发信号
 - 设置触发电平
- **Gate:** 门控触发
 - 设置门的延迟和门的长度
- **Trigger Offset:** 触发偏移，设定触发信号和开始扫描的时间偏移。

频谱分析仪的性能

- 相位噪声（频谱纯度）
- 接收机的固有噪声
- 系统非线性
- **1dB**压缩点
- 动态范围
- 频率测量精度
- 幅度测量精度



相位噪声



- 1、频谱仪的相位噪声指本地振荡器短时间稳定度的度量参数。相位噪声通常是以一个单载波的幅度为参考，并偏移一定的频率下的单边带相位噪声。这个数值是指在1Hz带宽下的相对噪声电平，故其单位为dBc(1Hz)或dBc/Hz，c指的是载波，由于相位噪声电平比载波电平低，所以我们定义为负值。
- 2、频谱分析仪的本振信号的相位噪声经过混频器混频，将在输入信号上产生相应的相位噪声，这就意味着即使输入的是一个理想的正弦信号，频谱仪的本振相位噪声也将在显示的谱线上叠加，如果输入信号夹带相位噪声（实际上常有这种情况），频谱仪的显示轨迹就包含了输入信号和本振信号合成的相位噪声。本振的相位噪声太差，在输入信号邻近的小信号就无法检测出来。
- 3、相位噪声主要影响频谱仪的分辨率和动态范围。
- 4、用频谱仪来准确分析被测信号相位噪声条件：频谱仪的相位噪声要比被测信号的相位噪声明显好。
- 5、为了测试频谱分析仪的相位噪声指标，必须用一个相位噪声比频谱仪相位噪声好得多的源来测试。

频谱分析仪的固有噪声

$$L_{DANL} = DANL_{10Hz} - 10dB + (10 \cdot \lg \frac{RBW_{Noise}}{Hz})dB + RF_{ATT} - 2.5dB$$

L_{DANL} 平均显示噪声电平
 $DANL$ 规定的平均噪声电平 (R&S 数据表: $RBW=10\text{ Hz}$, $RF_{ATT} = 0\text{ dB}$)
 RBW_{Noise} RBW 滤波器的等效噪声带宽
 RF_{Att} RF 衰减器
 -2.5 dB 修正因子 (对数定标的平均)

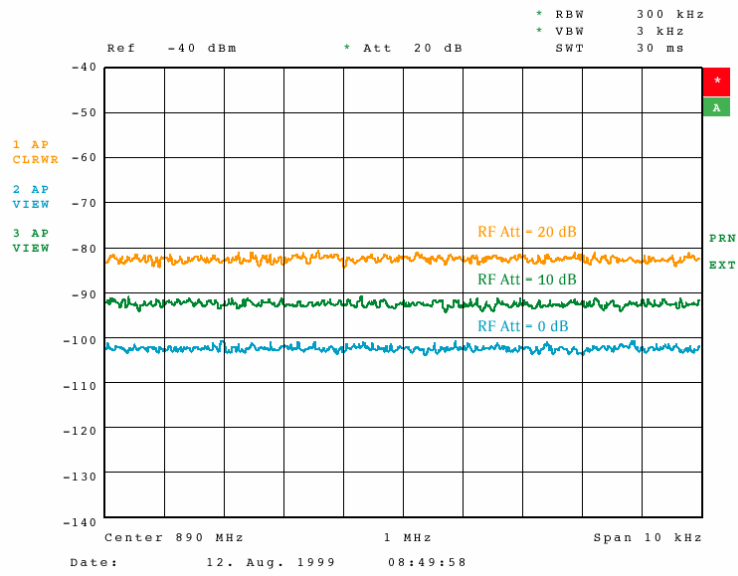
不同的滤波器6 dB带宽和等效噪声带宽与3 dB带宽的关系

滤波器类型	4-极点滤波器 (模拟)	5-极点滤波器 (模拟)	理想高斯滤波器 (数字)
6 dB 带宽	$1.480 * B_{3dB}$	$1.464 * B_{3dB}$	$1.415 * B_{3dB}$
等效噪声带宽	$1.129 * B_{3dB}$	$1.114 * B_{3dB}$	$1.065 * B_{3dB}$

- 1、固有噪声是频谱仪灵敏度的度量指标，决定了频谱仪的最小可检测电平。
- 2、为了稳定显示噪声电平，可通过窄的视频带宽和多踪迹进行适当的平均。
- 3、频谱仪的SPAN并不影响固有噪声。因为SPAN和RBW在默认设置下有一个相对固定的比值，调整SPAN后，RBW也随着变化，本底噪声也产生变化。
- 4、举例：FSU在1GHz中心频率处， $RBW=100\text{kHz}$ ，衰减器为30dB，其固有噪声为多少？被测信号为-80dBm，能够检测到吗？

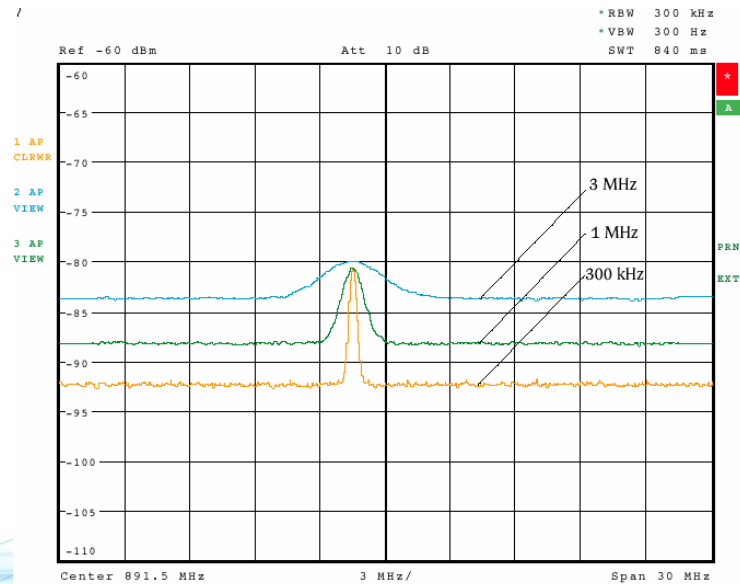
答：通过FSU的datasheet，FSU在1GHz中心频率的本地噪声为-148dBm@10Hz RBW,0dB 衰减，那么当前设置下，固有噪声为-148dBm-10dB+10lg (100kHz)+30dB-2.5dB=-80.5dBm，-80dBm的被测信号和本底噪声相当，是不能被检测的。为了准确地测试这个信号，可以减小RBW或衰减器的设置使得本底噪声小于-90dBm。

本底噪声与RF衰减器



频谱分析仪显示的噪声本底电平依赖于衰减器的设置，每增加10dB的衰减量，显示的噪声电平将提高10dB。

本底噪声与RBW带宽

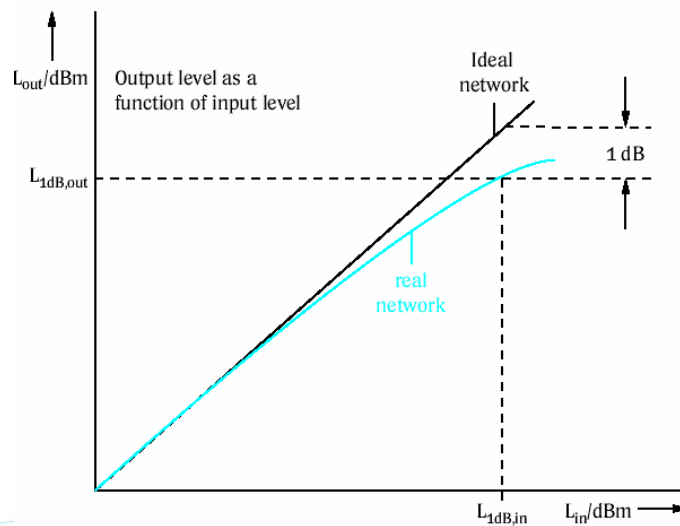


因为热噪声频谱功率密度在噪声带宽内是连续的，所以显示的本底噪声电平是与选取的中频滤波器（RBW）的带宽有关，可以通过计算而得。

RBW增大10倍，噪声电平增大约10dB。

上图中，RBW等于1MHz和300kHz时，本底噪声电平较低，S/N较高，信号的功率测试时基本不受RBW的影响，当RBW等于3MHz时，本底噪声电平与信号功率比较接近，使信号功率测量值偏高。

1dB 压缩点

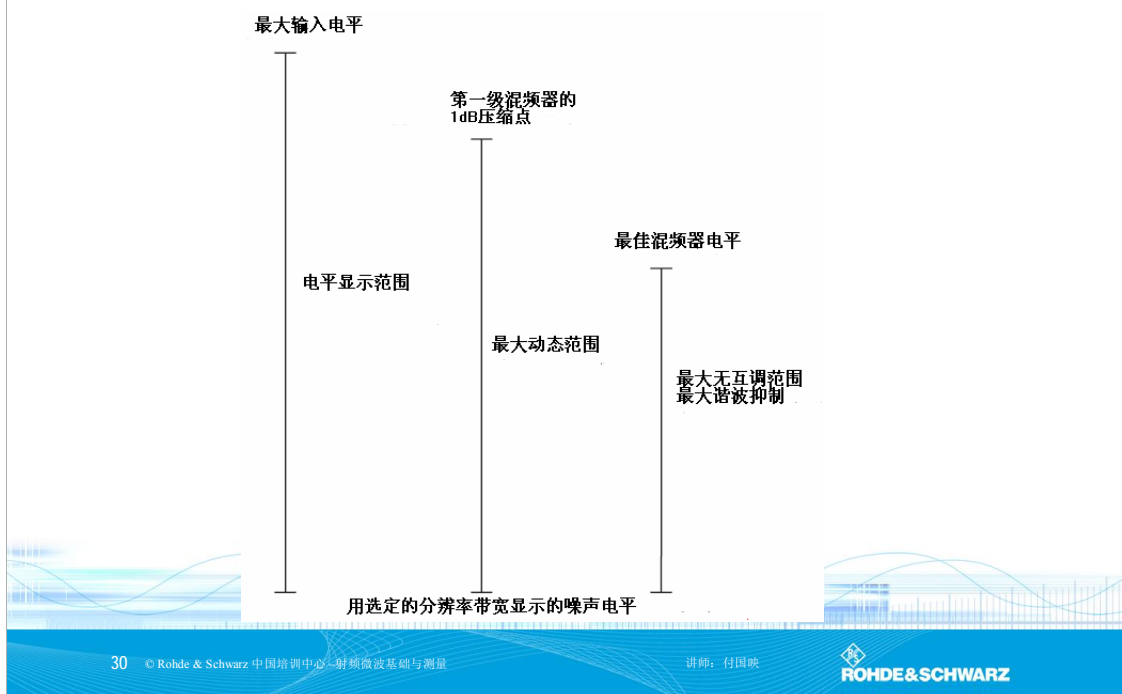


1dB压缩点定义：由于器件饱和区的影响，增益降低1dB的点。与截断点相类似，1dB压缩点可以指输入电平或输出电平。对于功率放大器来说，通常给出的是输出1dB压缩点，对于频谱仪来说，为输入的1dB压缩点。

频谱仪的1dB压缩点特性主要受第一级混频器（衰减设置为0dB）决定，标称的输入电平指的是混频器输入端口的电平。增加衰减器设置，1dB压缩点会随着衰减值的加大而以同样的数值增加。

为了避免过载失真，最大输入电平应该远低于1dB压缩点。

动态范围



动态范围：

动态范围是频谱分析仪同时处理不同电平信号的能力。动态范围的限值依赖于实际所要进行的测量，动态范围下限是由自然噪声或相位噪声决定的，动态范围的上限是由1dB压缩点或由频谱仪过载而造成的失真决定的。动态范围可以以不同的方式定义，它和我们所常说的显示范围概念并不一样。

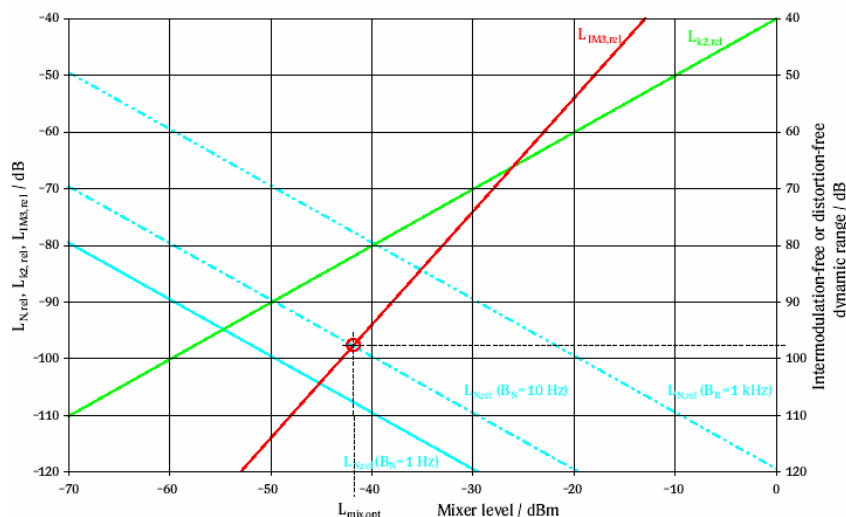
电平显示范围：

动态范围和指标中所提到的电平显示范围不是同一个概念，显示范围指的是从平均噪声电平到最大输入的电平。频谱仪为了显示最大输入电平的信号，常常要将RF衰减器设置得非常高，这样频谱仪显示的噪声就不可能是最小值。频谱仪为了显示接近平均噪声电平的信号，衰减器设置到足够小，这时就不能测量最大输入电平的信号。

最大动态范围：

最大动态范围通常是在最小分辨率带宽情况下，显示的噪声做为下限，1dB压缩点作为上限。如果到达第一级混频器的输入电平高出1dB压缩点，那么将产生混频器的非线性失真，使用较小的RBW时，失真产物就会明显地显示出来（它们不会被噪声淹没），此时的频谱测量就不能明确反映被测设备的真实频谱。现代频谱仪中，参考电平和衰减器设置是连动的，即使在手动衰减设置时，参考电平也是受限制的。

最大无互调范围、最大谐波抑制



最大谐波抑制、最大无互调范围：

对混频器电平的选择应该找到一个合适的折衷，如果衰减器过大，则混频器电平将降低，频谱仪产生的失真信号和互调产物就很微弱，但与此同时对于输入信号而言，信噪比降低了，在这种情况下，动态范围下限就由固有噪声决定。在另一方面，混频器电平如果过高可以看到，失真和互调产物超过自然噪声而在频谱仪很清晰分辨出来。实际测量中，无失真显示频谱范围是很重要的。它由互调产物或是高次谐波失真限制这个范围，我们称这个范围为无互调范围或者是最大谐波抑制，两者是由混频器电平和所选择RBW决定的，如果互调产物或者高次谐波电平与噪声电平相等时，则达到了相应的最大值。

理论上最大无互调范围为： $2 \times (IP3 - L_{DANL}) / 3$ 。

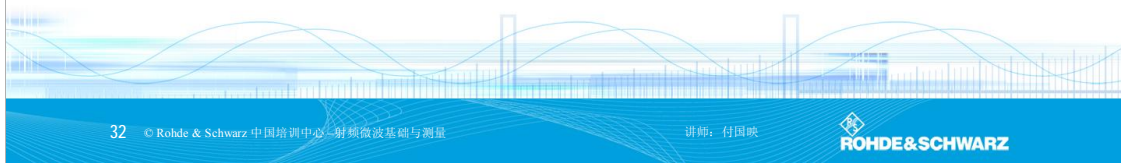
频率测量精度

- 光标读数模式

$\pm(\text{频率读数} \times \text{参考频率误差} + 0.5\% \times \text{频率跨度} + 10\% \times \text{分辨带宽} + \text{最后显示位} \times 1/2)$

- 计数器模式

$\pm(\text{频率读数} \times \text{参考频率误差} + \text{最后显示位} \times 1/2)$



参考频率误差：

现代频谱仪的本振通过锁相环同步到一个稳定的参考振荡器上，它的频率精度也就是参考振荡器的精度，并且受参考振荡器的温度和长期稳定度的影响。频谱仪默认使用内部的参考振荡器，也可以使用外部的参考振荡器，其参考振荡器信号可以输出。

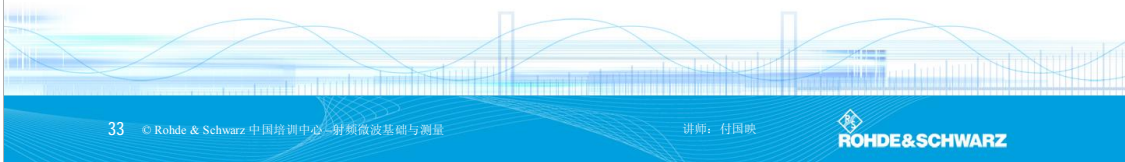
参考振荡器（一般是10MHz）通常采用用温度补偿晶体振荡器（TCXO）或恒温槽晶体振荡器（OCXO），采用OCXO作参考振荡器的频率精度要比TCXO高。产生的参考频率受到环境温度和操作期间老化的影响，要确保频谱分析仪频率精度绝对准确，就必须定期对它调整。

测量频率时在计数器模式下其精度要高。

幅度测量精度

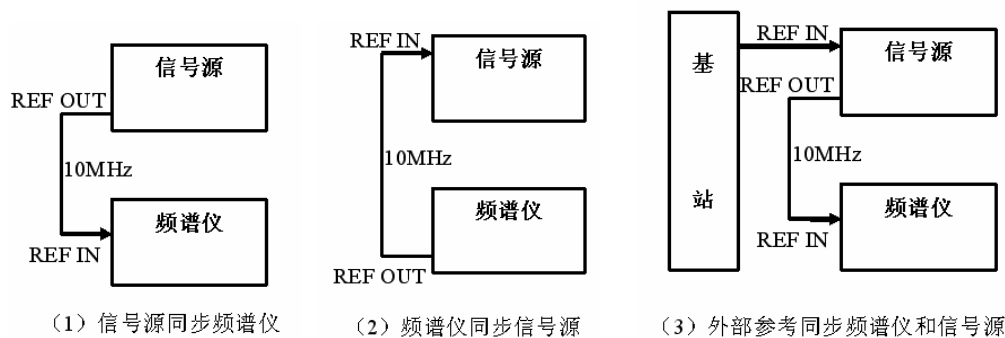
误差来源

- 绝对误差
- 频率响应
- 衰减器误差
- 中频增益误差
- 线性误差
- 带宽切换误差
- 失配误差



最大误差误差（最坏情况）是各个相关参数的简单相加，计算所得的最大误差的可信度为100%，实际误差永远不可能超过这一数值。然而最大误差极少发生。从统计学上讲，所有误差分量同时为最大值且符号相同几乎是不可能的事件。在一定的置信度下（典型值为95%或99%）去计算总不确定度更加符合实际。

参考时钟连接实例：



现实生活中，手表指示的时间有时会不准，为了解决这个问题，需要定期地参考电视台/广播电台的定点报时来做一定的调整，这就是一个同步的过程。

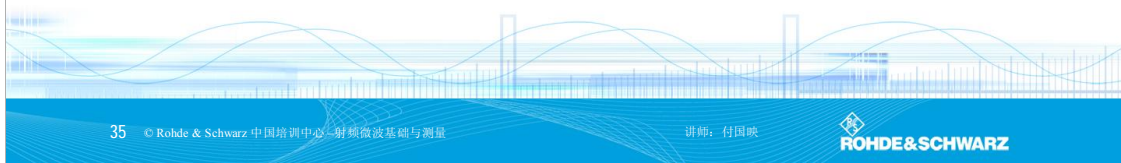
每台仪器的频率都有自己的参考基准，那么不同仪器在相同的频率设置情况下会不完全相同，因此需要将他们之间的参考基准进行同步。

射频仪器中广泛采用PLL技术，仪器一般有REF IN和REF OUT两个端口，当仪器的参考频率采用内部的源，REF OUT可以输出内部的参考源给其它仪器或者设备。当仪器的参考源采用外部的，需要一个外部的参考源连接到REF IN，绝大多数的外部参考源的频率为10MHz，有些情况下采用13MHz(如GSM基站)，此时REF OUT仍然能输出参考源。在工程上，常见如下仪器参考基准的同步方式：

- 1、信号源的REF OUT产生10MHz的参考信号，用它来同步频谱仪，在频谱仪上需要使能外部参考时钟。
- 2、频谱仪的REF OUT产生10MHz的参考信号，用它来同步信号源，在信号源上需要使能外部参考时钟。
- 3、被测件（如基站）参考信号连接到信号源（或频谱仪）的REF IN，信号源（频谱仪）的REF OUT连接到频谱仪（信号源）的REF IN，频谱仪的REF OUT出来的10MHz信号可以同步其它仪器。在频谱仪和信号源上需要使能外部参考时钟。

感谢您的参与!

Q&A



35 © Rohde & Schwarz 中国培训中心—射频微波基础与测量

讲师：付国映

 ROHDE & SCHWARZ

关于本教材有任何问题和建议，请和作者联系：guoying.fu@rohde-schwarz.com。