



射频电路测试原理

第六讲 频谱分析原理

guolinli@tsinghua.edu.cn



参考文献

- Agilent 资料
- 吕洪国，《现代网络频谱测量技术》，清华大学出版社，2000
- 刘国林，殷贯西，《电子测量》，机械工业出版社，2003

目录

- 通过本章节的讨论，能了解频谱分析仪的工作原理，明确频谱仪的基本指标，包括频率分辨率、灵敏度和动态范围在频谱分析仪测量中的重要性，掌握进行精确失真测量的步骤，并能够对测量中出现的现象给予合理解释
 - 时域和频域
 - 频谱分析仪工作原理
 - 频谱分析仪基本指标
 - 频谱分析仪其他问题





一、时域和频域

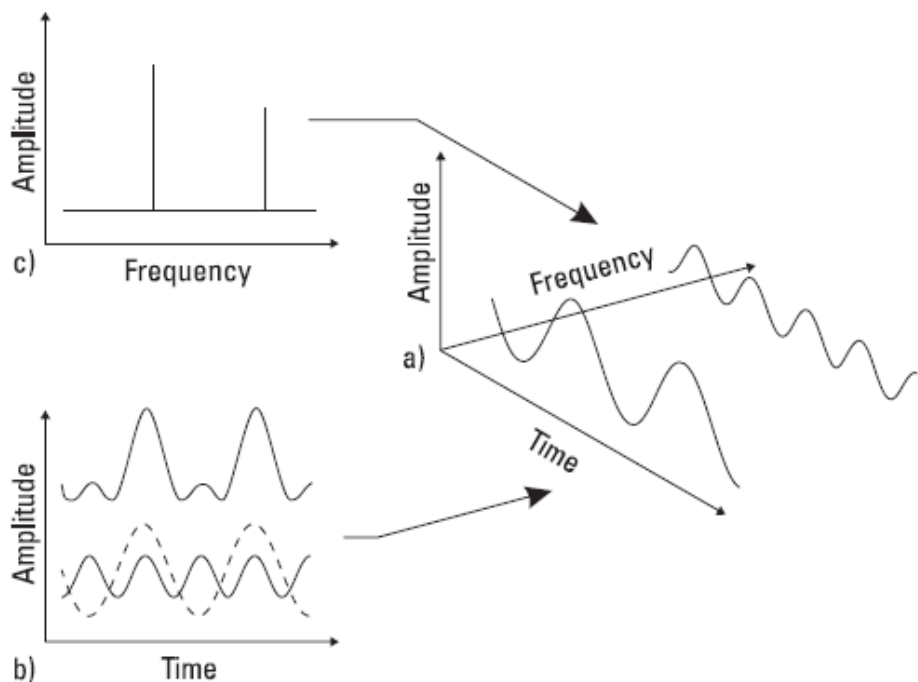
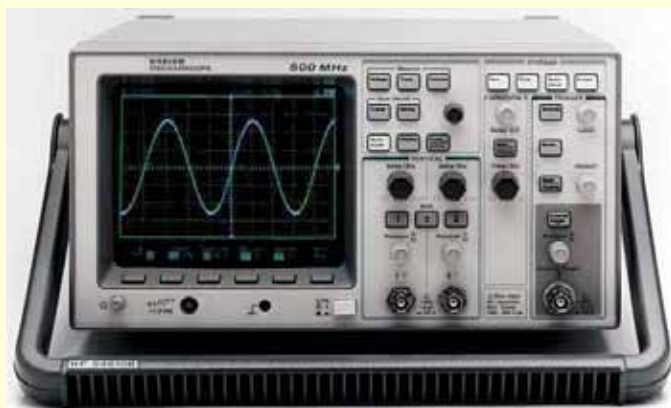
- 射频测量对象是宽频带内信号与网络系统的特性参数，而同一个物理系统或信号可以分别在时域和频域描述
 - 时域测量以被测信号和网络系统在时域内的特性为依据，研究的是被测对象的幅度时间特性
 - 时域测量常用的测试信号是脉冲或阶跃信号，研究的是待测信号的瞬变过程或网络输出的冲激或阶跃响应：关键是时域信号的采集和分析
 - 频域测量以被测信号和被测网络系统在频域的特性为依据，研究的是被测对象的幅频特性和相频特性
 - 频域测量常用的测试信号为正弦波，研究的是待测信号或网络输出的稳态响应：关键是特定频率的产生和选择
- 射频测试中，时域测量和频域测量是相辅相成的
 - 从一个域到另一个域，如果测试是完全的，则无任何信息损失，仅仅是同一信号的不同表述方法

频谱分析

- 由傅立叶变换知，时域电信号可以分解为一个、多个、甚至是连续的不同频率、不同幅度和不同相位的正弦波

- 因此，用适当的方法，我们可以把时域波形分解为相应的正弦波分量，然后对它们分别进行分析与测量

- 每个正弦波的性质由幅度和相位决定，换句话说，他们可以把时域信号等效到频域中去进行分析和测量，这就是频谱分析



为什么 频谱分析

为什么要进行频谱测试

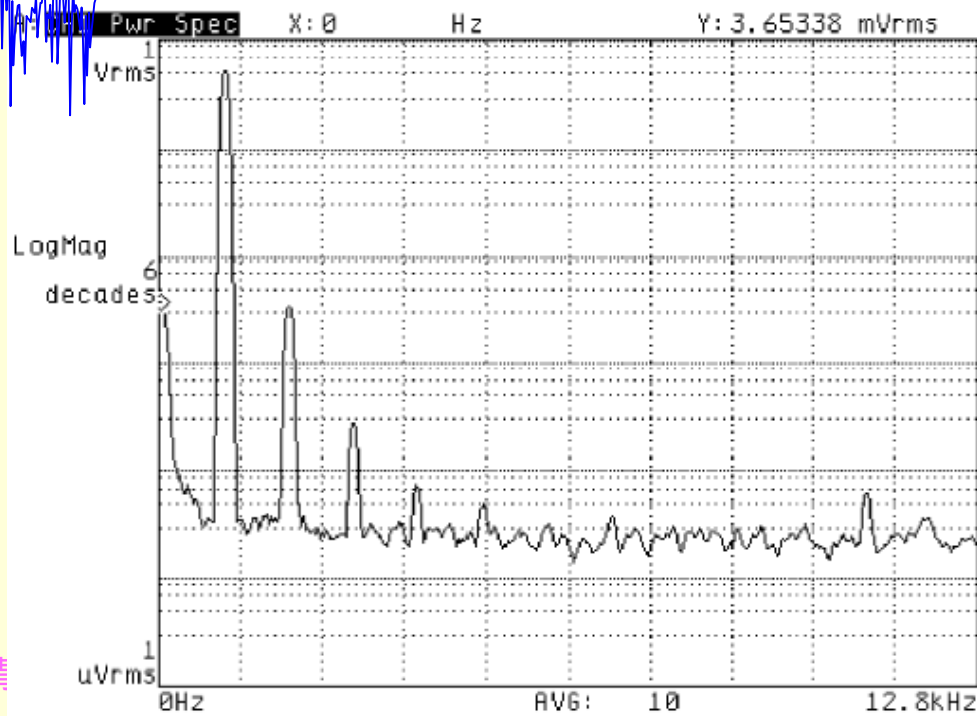
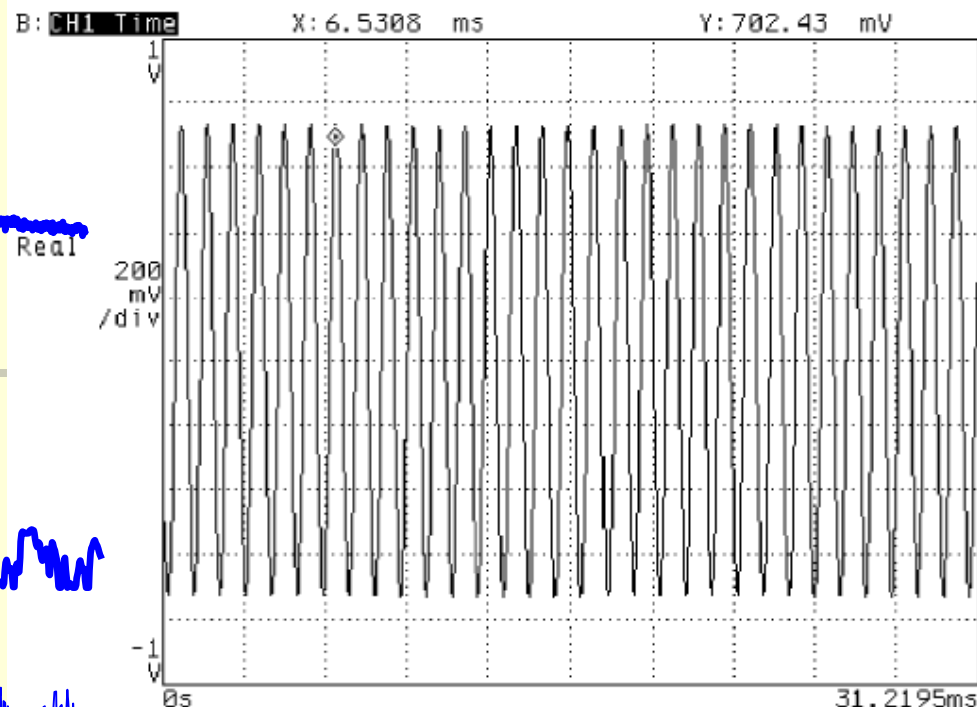
- 从事通信工程的技术人员十分关心信号的谐波失真、交调失真、噪声背景、调制等各种频谱情况，因为这些对通信质量都有重要的影响

- 频域分析有时更清楚

- 通过频谱测试还可以了解信号的频谱占用情况

- EMC

- EMI





频谱分析其实很自然

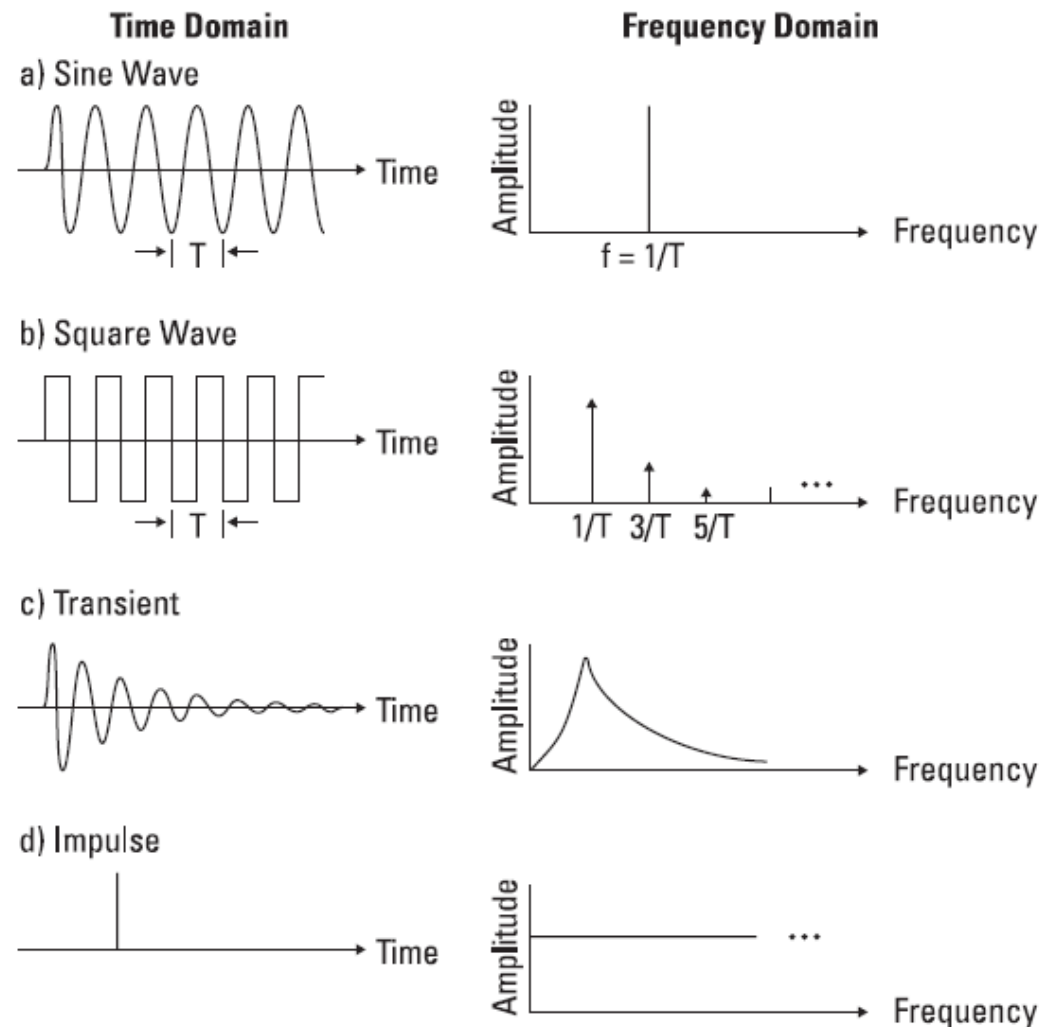
- 频谱分析看起来似乎不如时间波形自然，这是由于我们相信自己的眼睛。然而，生物对自然的感触并非只用眼睛
 - 人耳和脑的组合就是一个工作良好的频谱分析仪，它将音频分解并确定每个分量的强度，可以在嘈杂的噪声基底中捕捉到希望听到的声音频率
 - 医生对患者的心音听诊，通过对心跳和呼吸声音的分析，判断是否有问题
- 频谱分析并非奇异，只是我们没有无法用眼睛来看到频率特性曲线而已

- 频谱分析如果用于信号，则是频谱分析仪的主要功能；如果用于分析网络系统，则是网络分析仪的主要功能。

- 时域分析仪器对应示波器和时域反射计

典型例子

- 正弦波在频域内是一根谱线
- 方波在频域内是无穷根谱线，谱线间的距离固定为方波周期的倒数
- 一个瞬变过程的频谱是连续的
- 冲击函数的频谱是平的
 - 需要无穷大的能量才能产生一个冲击



二、频谱仪



- 扫描调谐式频谱分析仪 (Swept-tuned)
 - 大多采用超外差式，其工作原理和超外差式接收机基本类同
 - ‘外差’就是变频/混频的意思

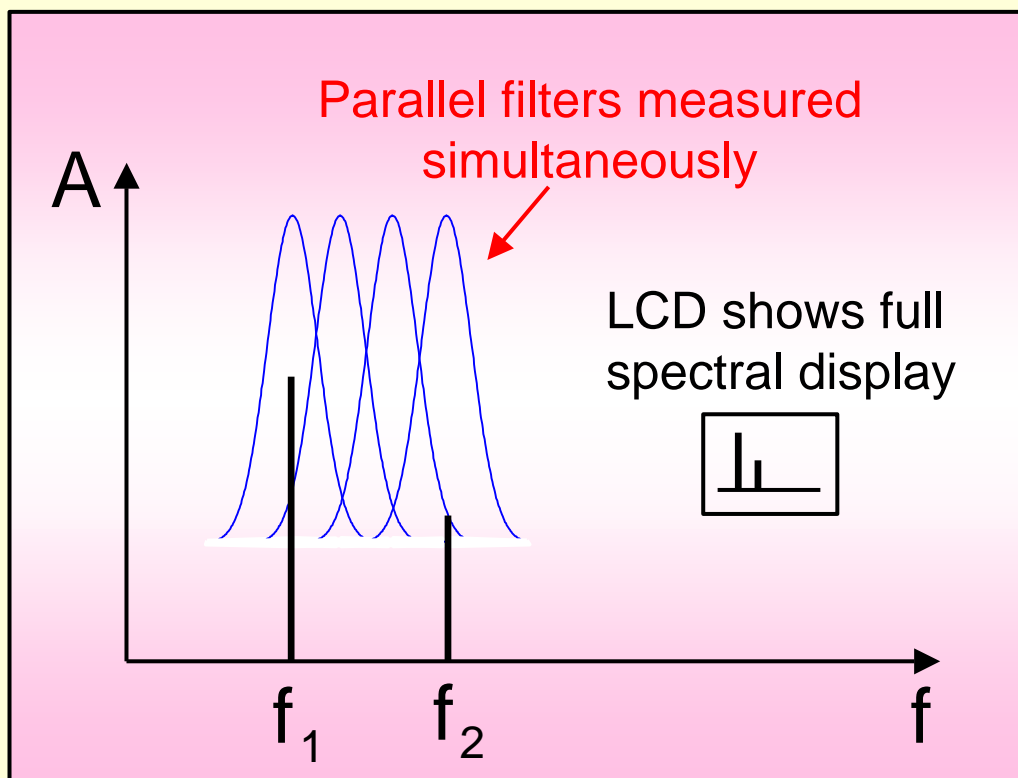
- 傅立叶变换频谱分析仪 (Fourier)
 - 首先对时域的信号数字化，然后进行快速傅立叶变换 (FFT)，并显示变换后各频谱分量
 - 可分析单次出现信号
 - 可同时获得测量信号的幅度和相位
 - 目前技术条件下，其频率范围、灵敏度和动态范围都不如超外差式频谱分析仪



2.1 简单的频谱分析方法

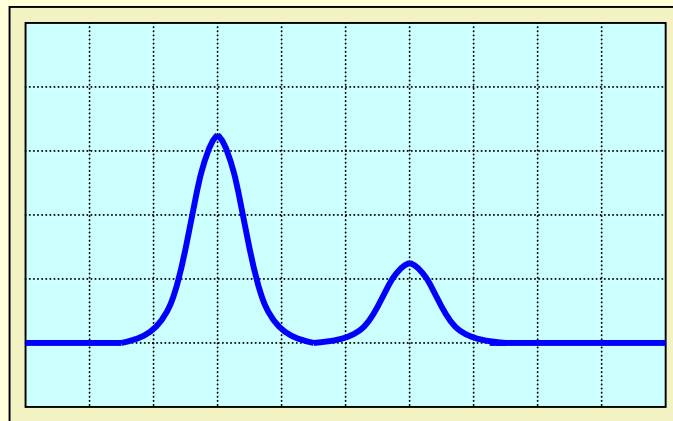
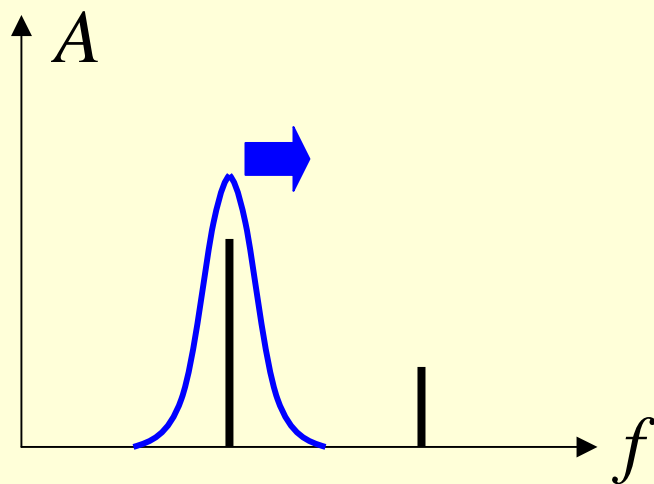
■ 并行滤波器组

- 如果需要精细分离两个频率，就需要窄带滤波和很多的滤波器，频谱仪的成本随之上升
- 音频频谱分析仪采用32个滤波器，每个带宽占1/3的八度音阶



移动滤波器

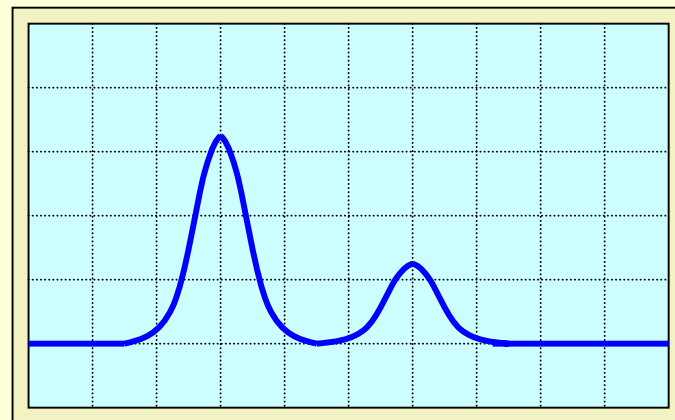
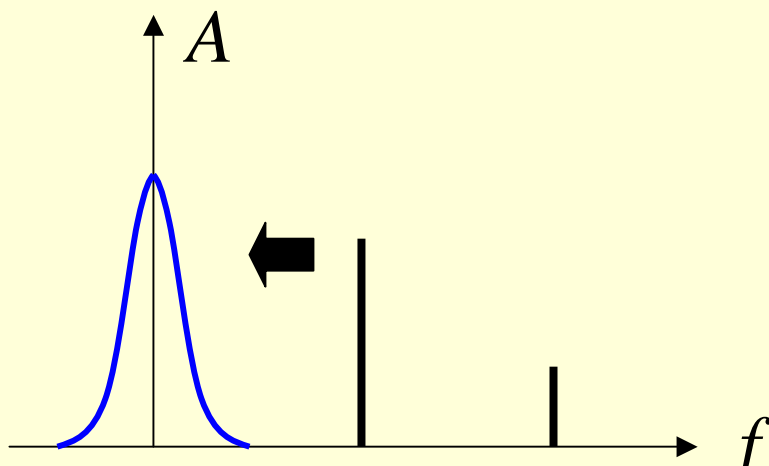
- 用一个中心频率可调谐的滤波器扫描整个频谱
 - 在各个频率点上的输出表明信号在这个频率点的信号分量大小，这样就可以获得一个信号的频谱分析图谱了
 - 大频率范围的可调谐滤波器难以实现



显示的输出结果

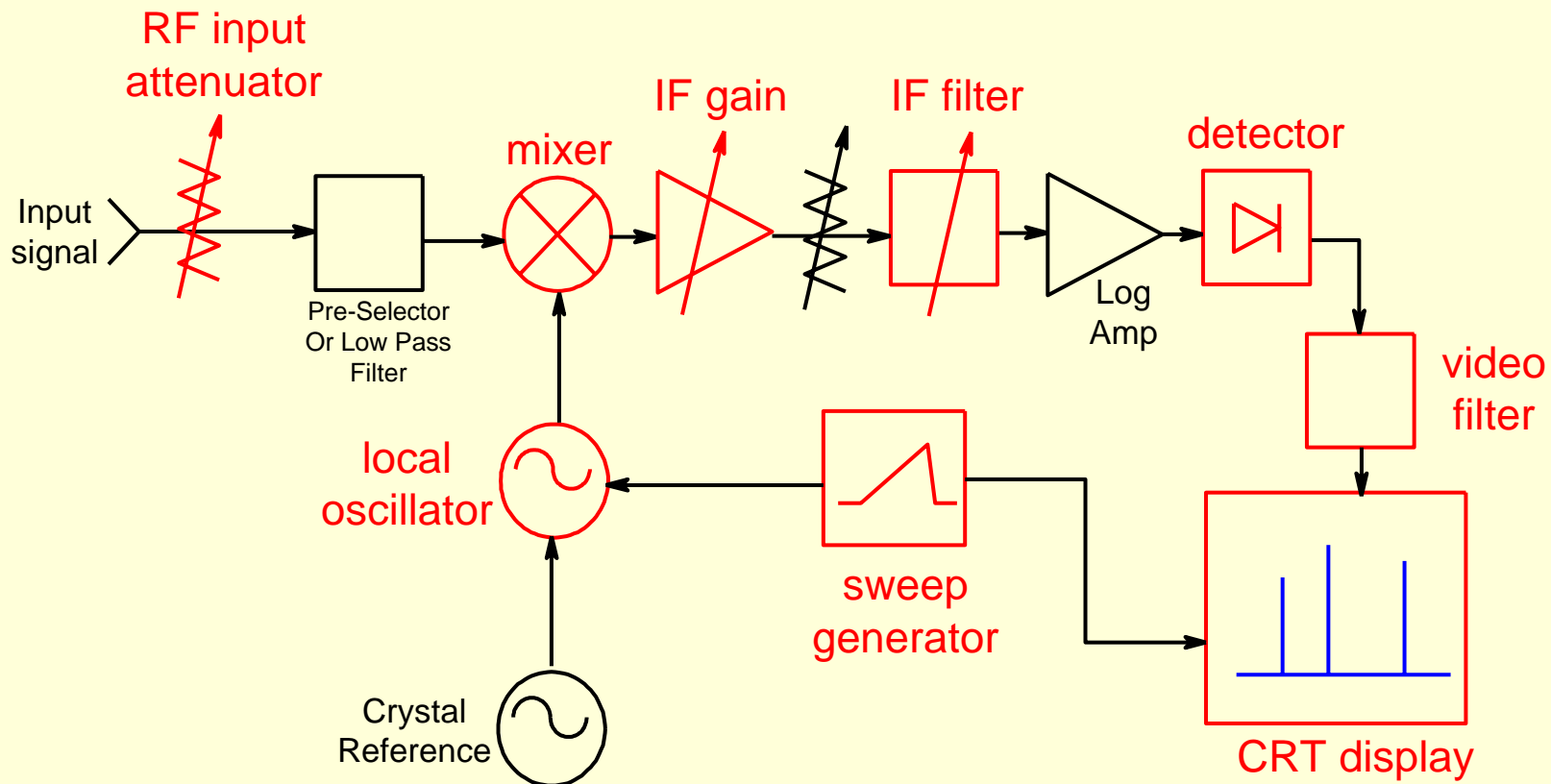
换个思路：固定滤波器

- 很大频率范围的滤波器调谐是不现实的，如果我们固定滤波器的中心频率不变，如是想办法让信号的频谱移动起来，也可以获得信号频谱分析
 - 如何将频谱移动起来？

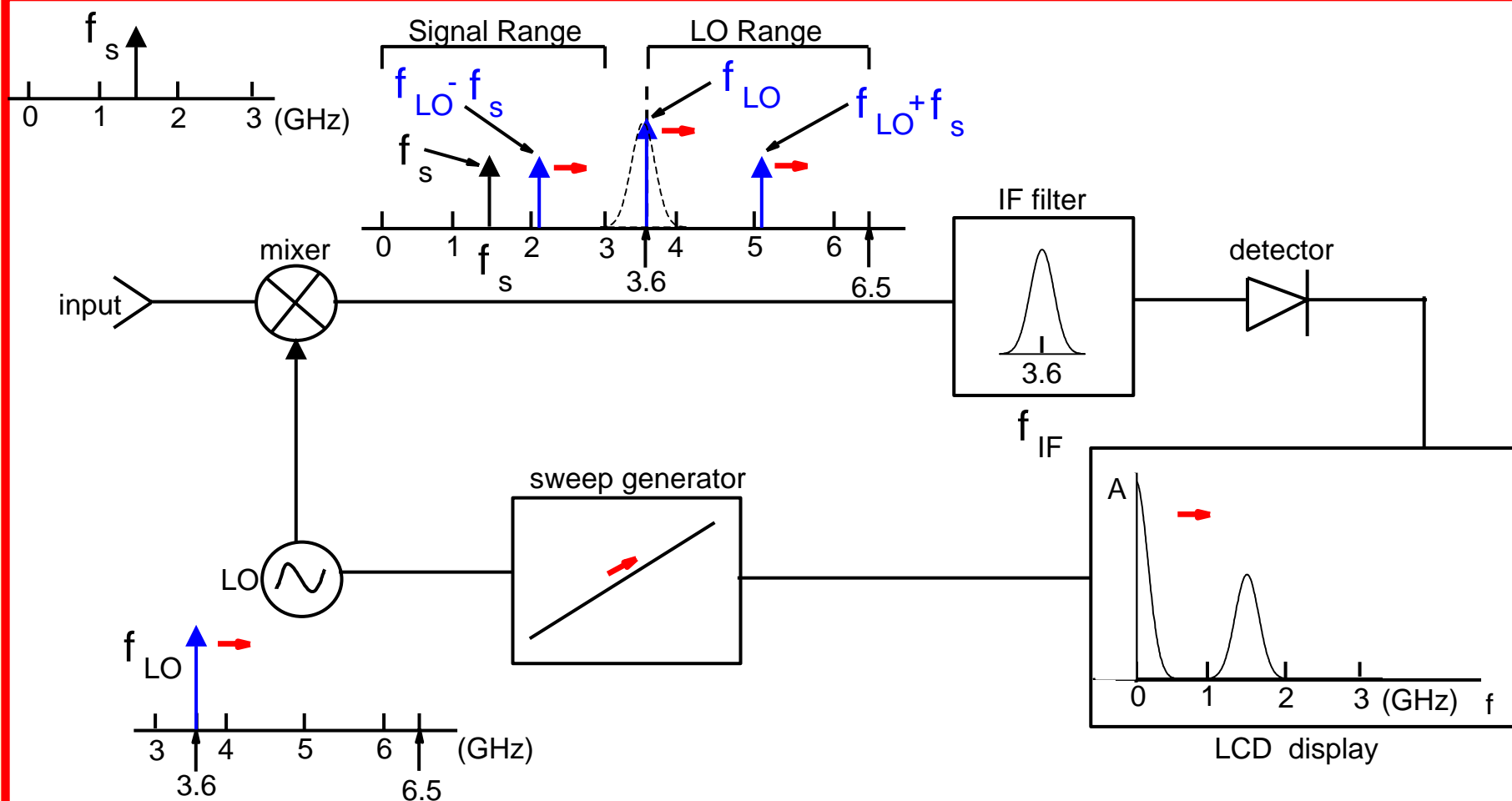


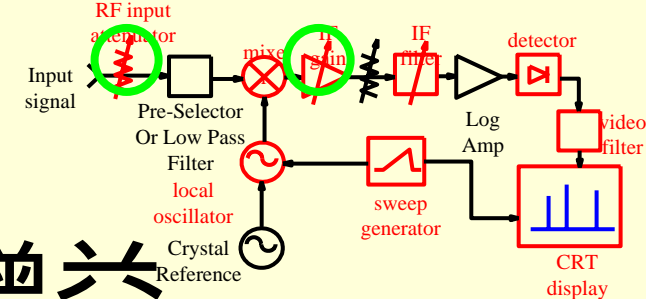
显示的输出结果

2.2 超外差式频谱分析仪原理框图



信号流

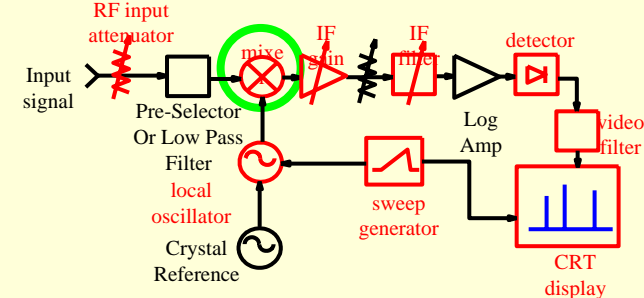




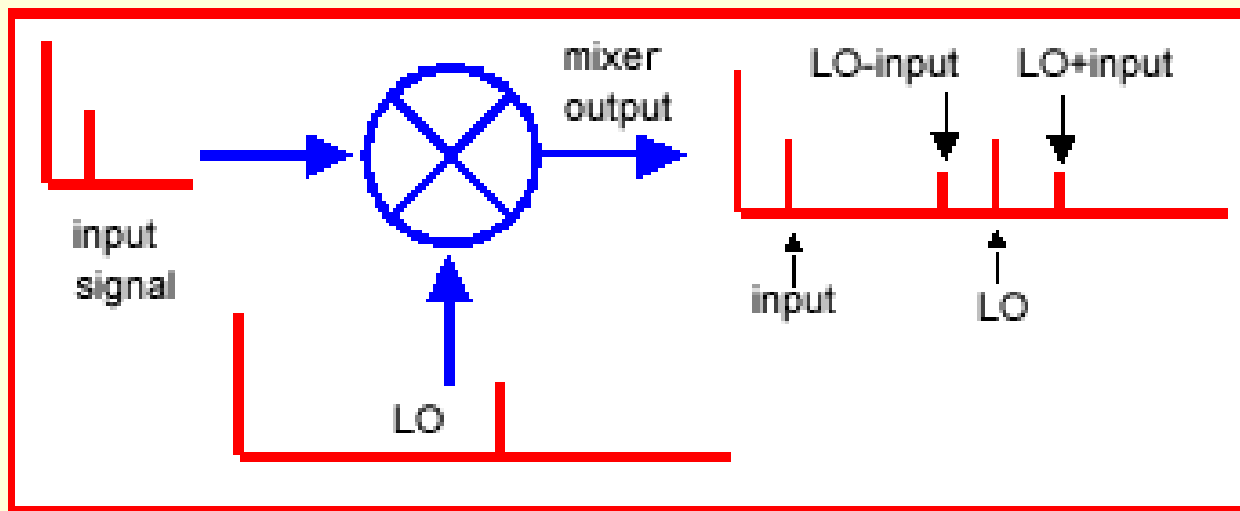
输入衰减器和中频增益

- 输入衰减器调节输入到频谱仪的输入信号的幅度大小
 - 保护电路
 - 输入最大信号一般小于30dBm
- 中频增益一般和输入衰减器联调，以保持信号频谱输出的显示位置不变
 - 尽量让输入到中频滤波器的中频信号幅度保持不变
 - 信号幅度的校准

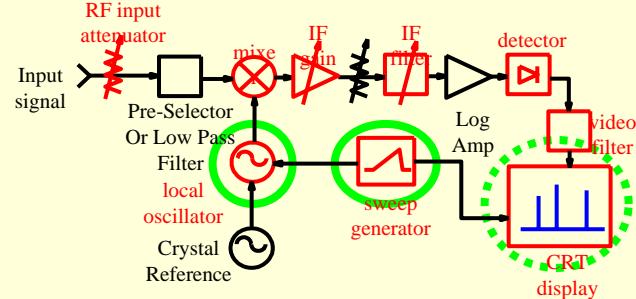
混频器



- 把信号频谱变换到更高的频率点上
 - 混频器是实现频谱分析仪宽频带的关键

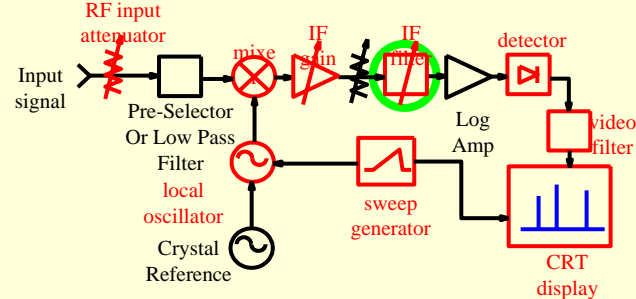


本振和扫频发生器

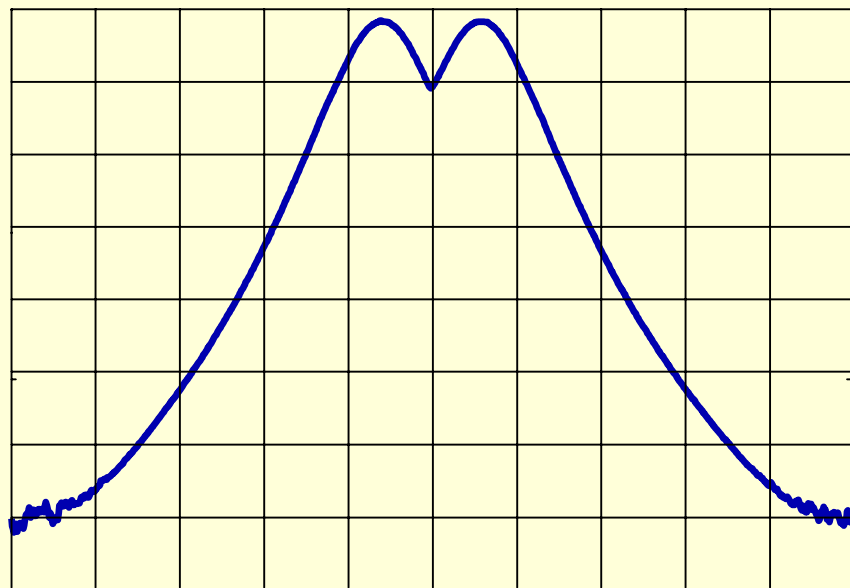


- 本振是一个压控振荡器
 - 其控制电压由扫频发生器产生
- 扫频发生器同时控制显示器的水平偏转
 - 保持同步，提供扫频显示
- 显示器为阴极射线管CRT
 - XY显示方式，水平方向（代表频率）有10格，垂直方向（代表幅度）一般有8格或10格
 - 屏幕最上面的标度线为校准过的一个绝对数值，作为参考电平用

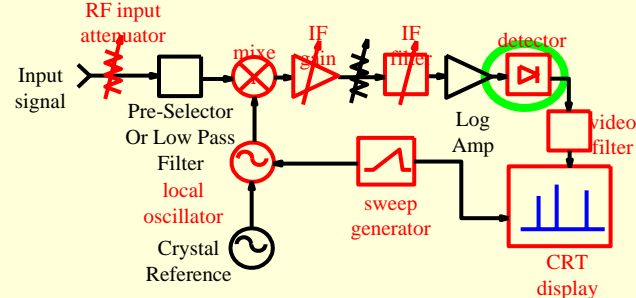
中频滤波器



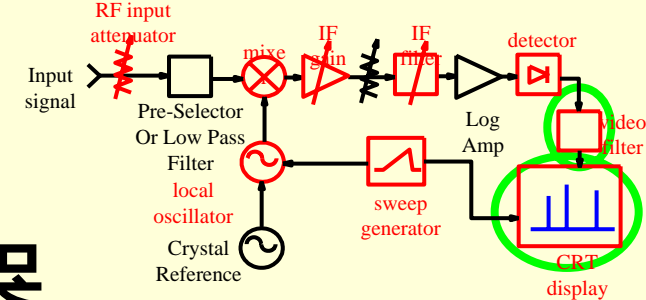
- 中频滤波器是中心频率固定的带通滤波器
 - 混频后的频率如果落在中频滤波器通带内，显示器上才会显示该频率
 - 如果混频后频率不等于中频，则被中频滤波器所阻挡
 - 由于显示器上的单频谱形状为中频滤波器的幅频特性，因此又称中频滤波器的3dB带宽为频谱分析仪的分辨率带宽Resolution Bandwidth (RBW)



检波器

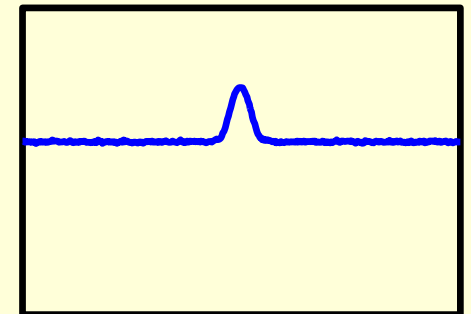
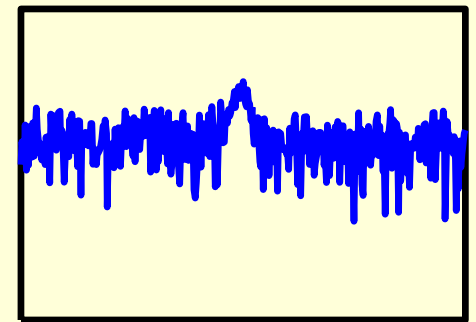


- Detector检波器一般是峰值检波器
 - 正峰值检波、负峰值检波、样本检波
- 它对中频滤波器的输出进行峰值检波
 - 中频滤波器输出为中频，并非信号本身
 - 但是，只要混频器不失真，中频信号的幅度和信号幅度之间具有线性关系，因此峰值检波结果和输入信号幅度成正比关系
 - 对于一般的二极管峰值包络检波，频谱仪实质上是一个电压表
 - RC电路需要充放电时间，扫描时间不能太快



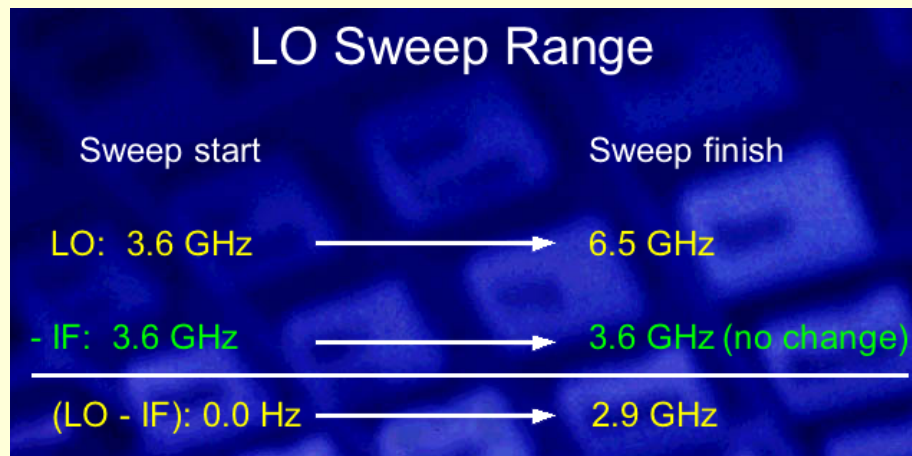
视频检波器和显示器

- 视频检波器的作用是通过对信号取平均来平滑显示器输出
 - 使得微弱信号更容易读出
 - 减小随机噪声的影响
 - 其带宽由VBW (Video BandWidth) 控制
- 显示器相当于超外差式收音机的扬声器
 - 如果信号使得混频器过载发生失真，那么显示器上的显示结果就不会正确



测试频率范围、中频频率 和本振扫频范围

- 刚才的例子中，频谱仪的可测试频率范围为0-2.9GHz，中频滤波器中心频率为3.6GHz，为什么这样取法？
 - 信号不能通过中频滤波器 ($3.6 \notin (0, 2.9)$)
 - 本振可以通过中频滤波器 (获取基准零频)



三、频谱分析仪的指标

■ 频率指标

■ 频率范围

- 最大可观察的频率范围

■ 频率分辨率

- 是否可分辨相距很小的两个不同频率，可分辨频差最小值

■ 幅度指标

■ 灵敏度

- 能够检测到多么微弱的信号

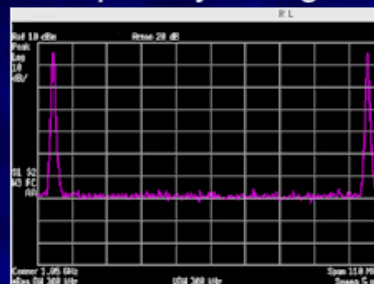
■ 失真

- 大信号使频谱仪出现非线性失真

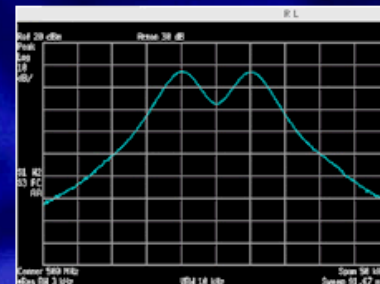
■ 动态范围

- 可同时检测信号的最大幅度和最小幅度相差多大

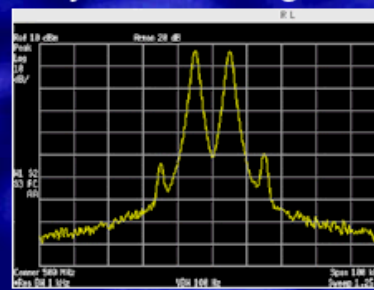
Frequency Range ?



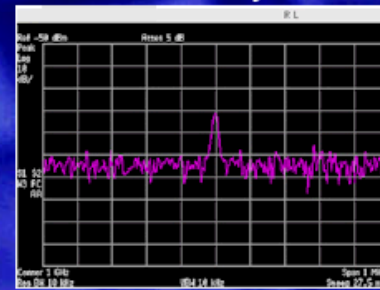
Resolution ?



Dynamic Range ?

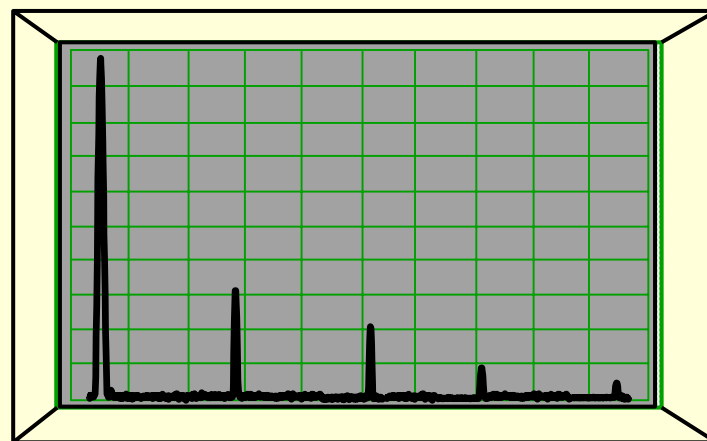
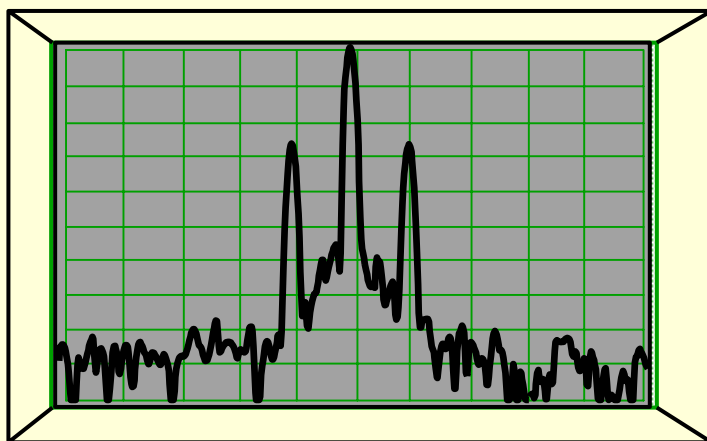


Sensitivity ?

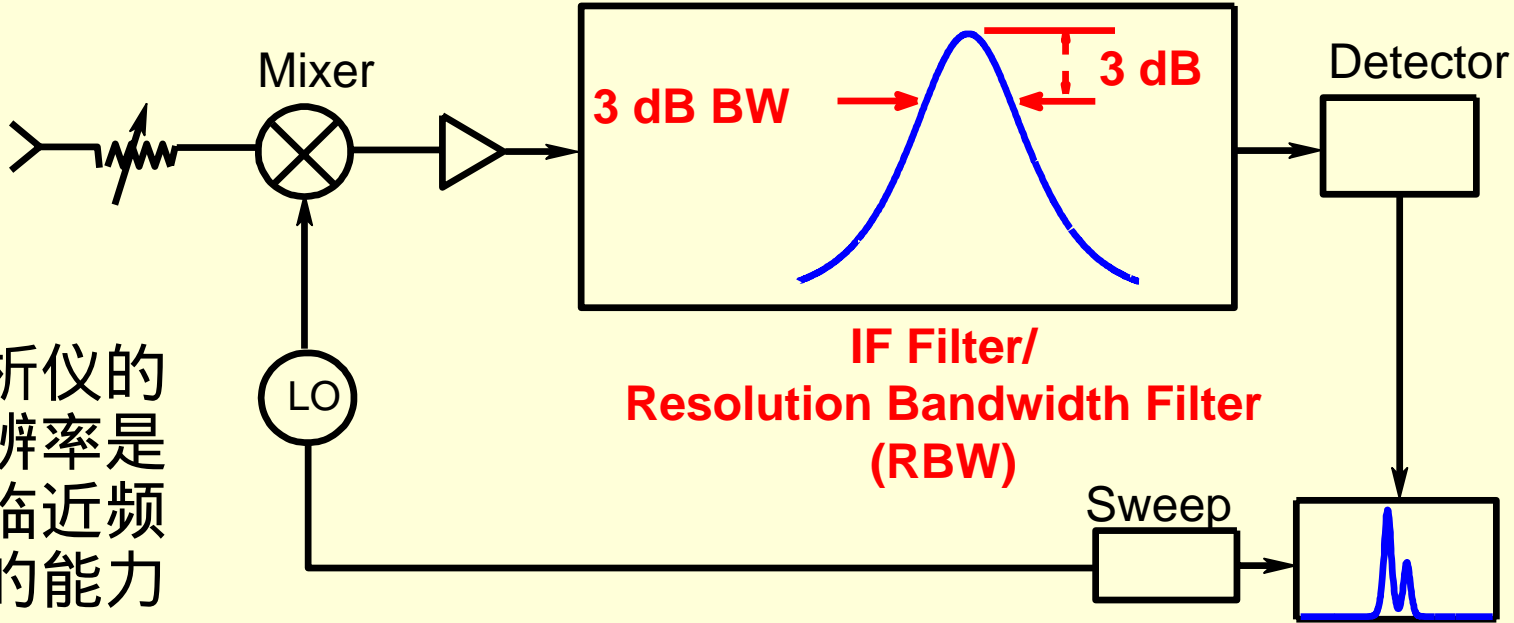
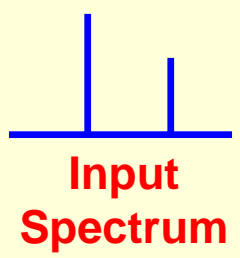
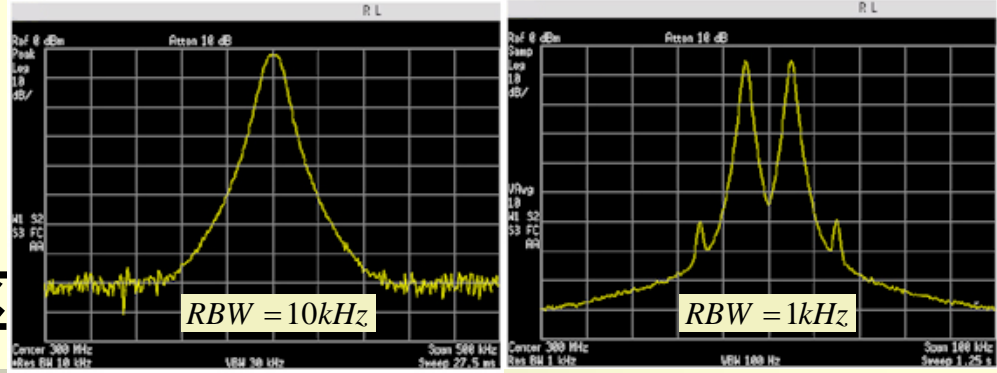


3.1 频率范围

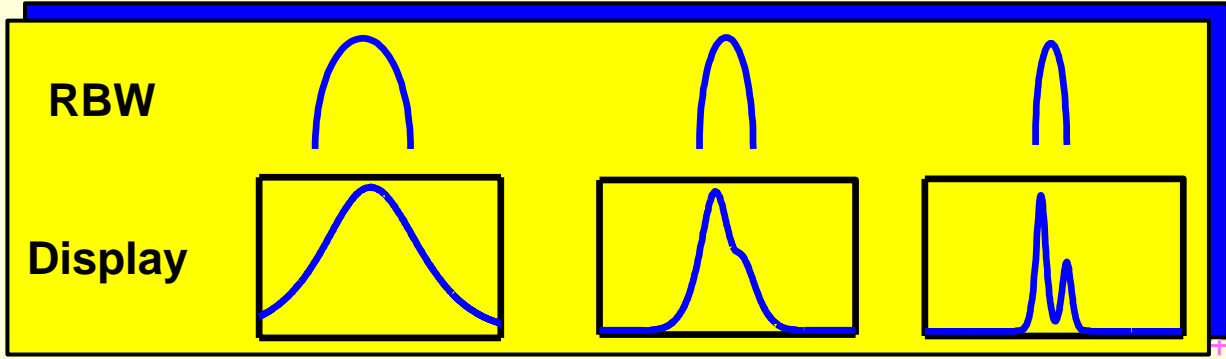
- 频谱仪的频率范围告诉我们频谱仪可以调谐观测的最小频率和最大频率
 - 低频端：观测基带和中频信号
 - 高频端：观测（已调制）信号及信号谐波和杂波干扰



3.2 频率分辨率



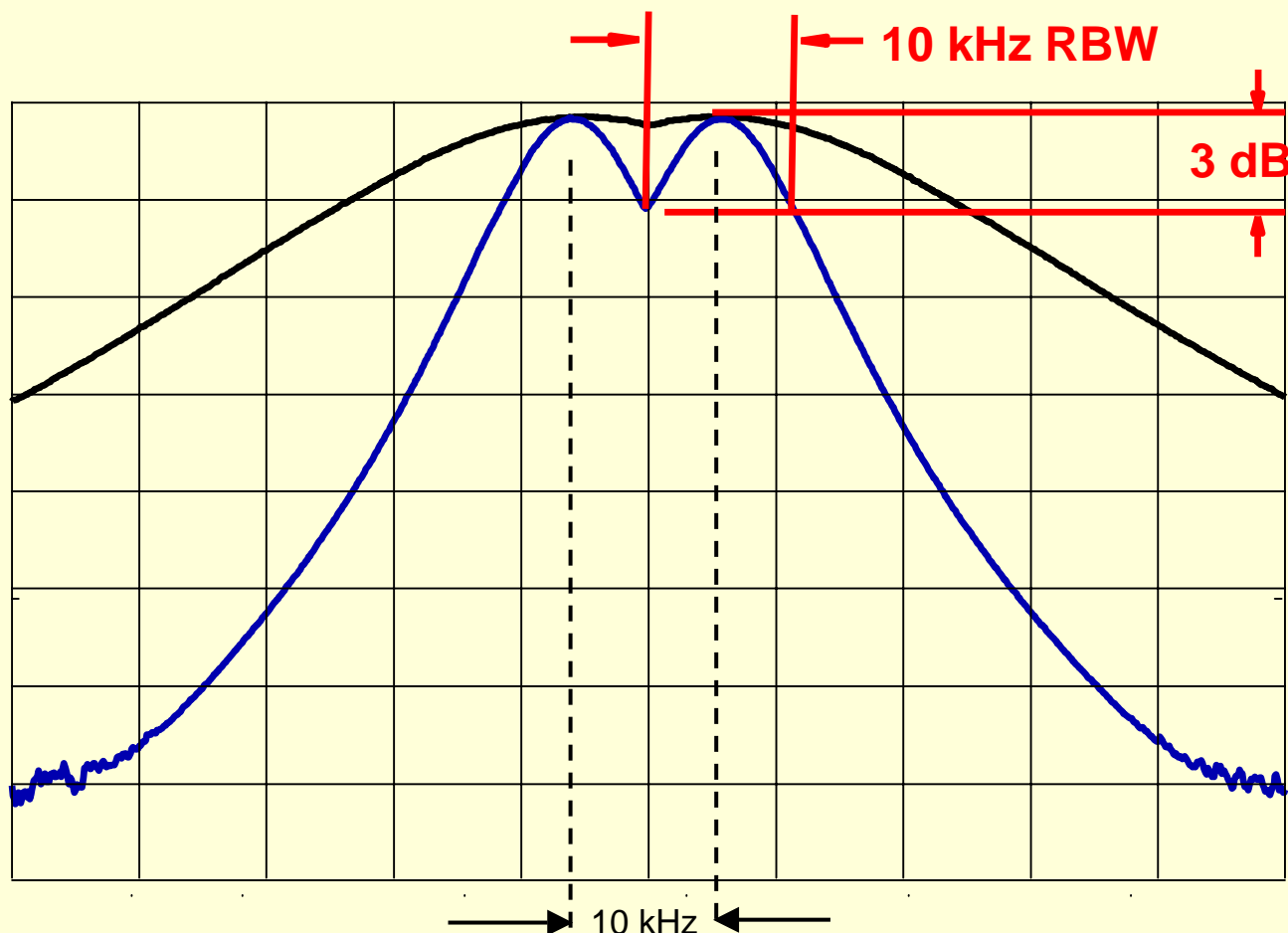
■ 频谱分析仪的频率分辨率是它区分临近频率分量的能力



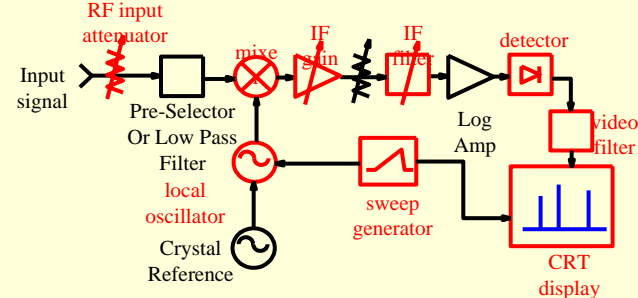
RBW : 中频滤波器的3dB带宽

两个等幅信号之间频率差为中频滤波器的3dB带宽时，合成响应曲线仍有两个峰值，中间下沉大约3dB

- 我们认为它们是可分辨的，因此称中频滤波器的3dB带宽为频谱仪的分辨率带宽RBW

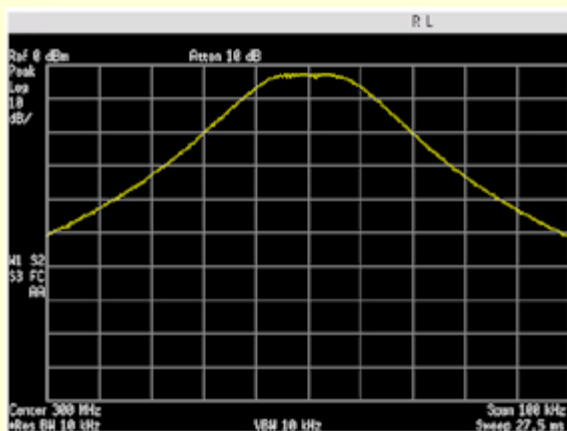


VBW的最佳值

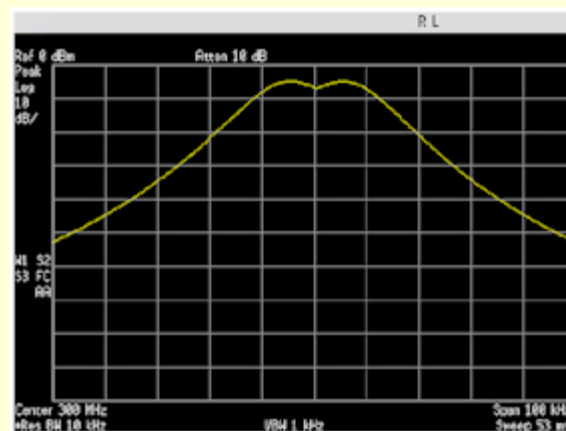


- 为了获得最佳的分辨结果显示效果，VBW一般取RBW的0.1倍
 - 处于自动档的频谱分析仪一般自动设置为该比例关系

$$RBW = 10kHz$$

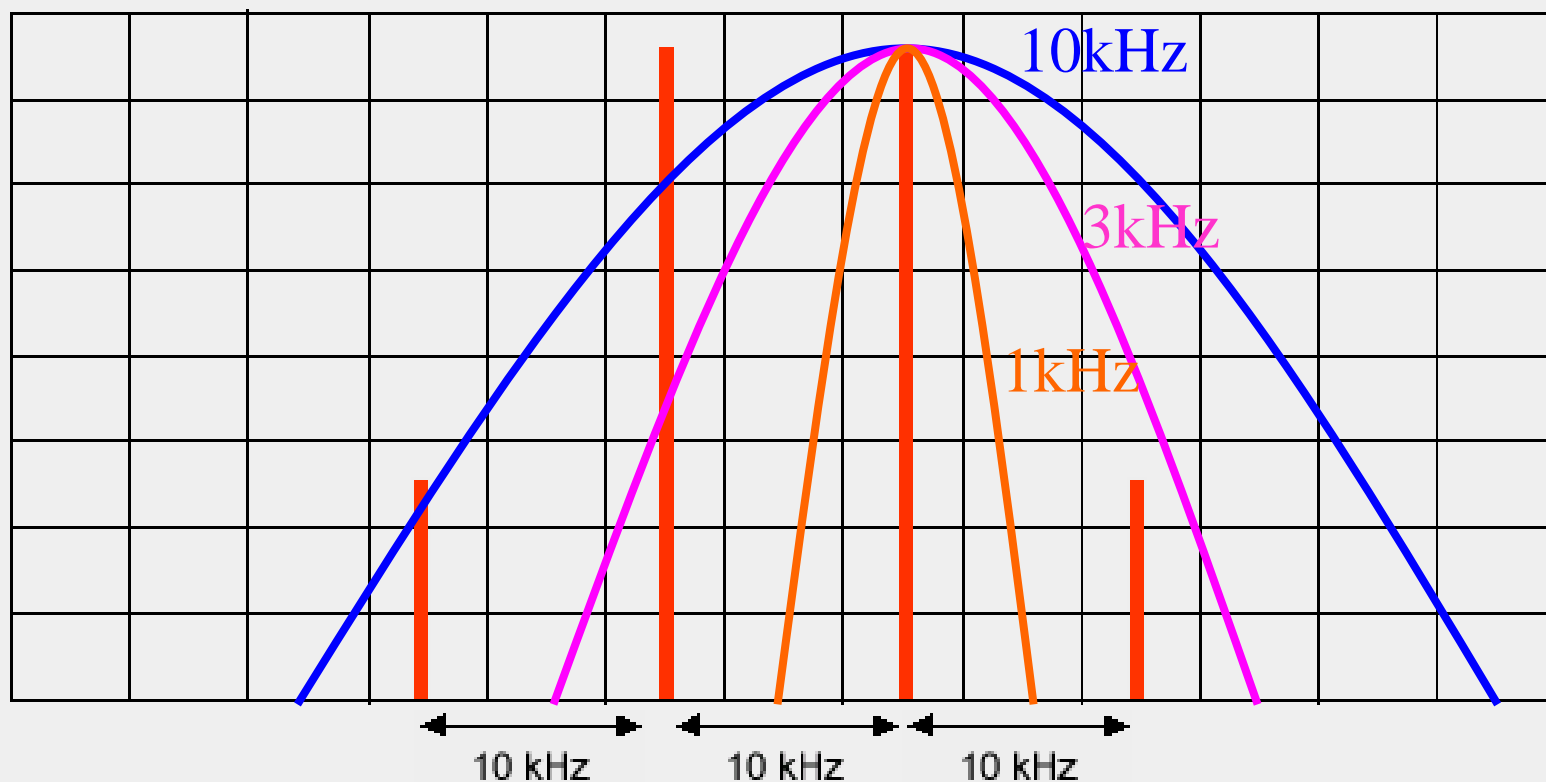


$$VBW = 10kHz$$



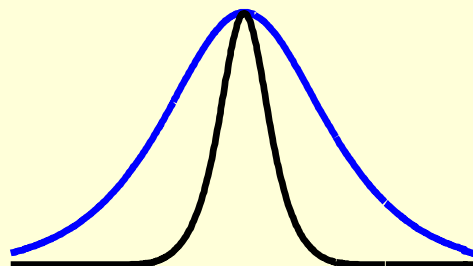
$$VBW = 1kHz$$

非等幅信号分辨需要更小的RBW

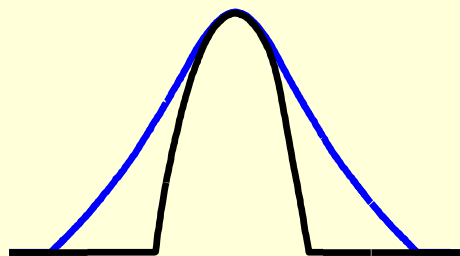


还有哪些因素会影响到频率分辨率

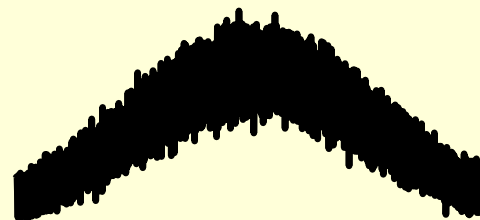
- 除了RBW外，中频滤波器的类型和选择性、残留调频、以及本振的相位噪声也影响到频谱仪的频率分辨率



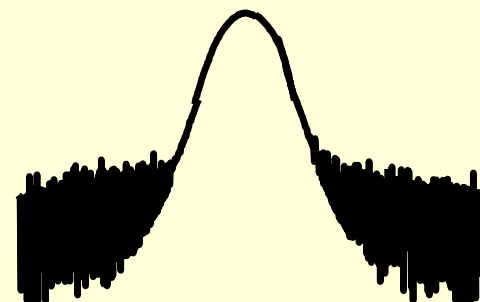
Resolution Bandwidth



RBW Type and Selectivity

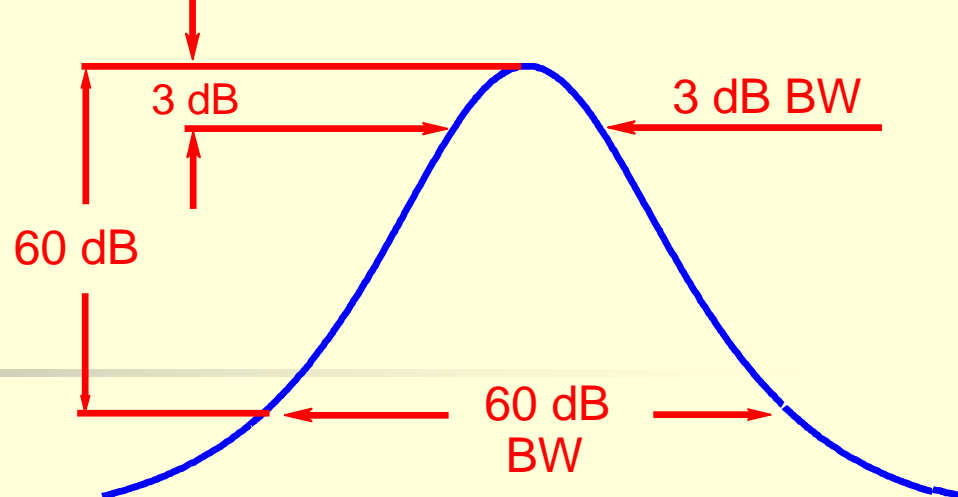


Residual FM

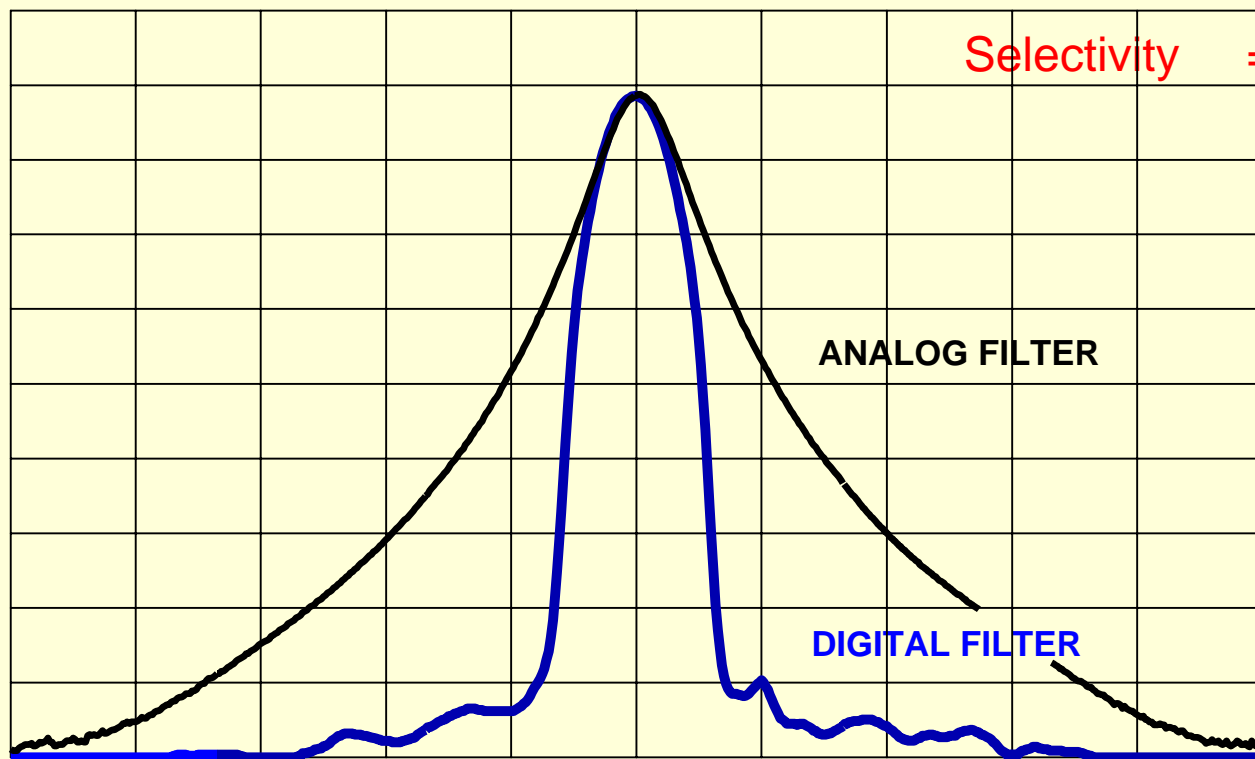


Phase Noise

带宽选择性



$$\text{Selectivity} = \frac{60 \text{ dB BW}}{3 \text{ dB BW}}$$



Analog 15:1

Digital 5:1

3dB到60dB之间的信号是否可以显示出来，一般假设滤波器特性曲线在3dB频点到60dB频点之间是线性变化的（线性频率标度，对数幅度标度情况下）

选择性是如何影响分辨率的

■ 选择性为15:1

- $RBW=3\text{kHz}$ ---- $3\text{dB Bw} = 3\text{kHz}$
 - $SEL=15:1$ ---- $60\text{dB Bw} = 45\text{kHz}$
 - 60dB带宽的一半为22.5kHz
 - 距离大信号22.5kHz以外的-60dBc的小信号可能被检测到

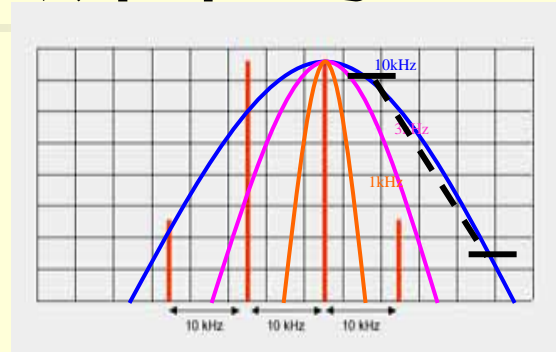
- $RBW=1\text{kHz}$ ---- $3\text{dB Bw} = 1\text{kHz}$

- $SEL=15:1$ ---- $60\text{dB Bw} = 15\text{kHz}$
- 60dB带宽的一半为7.5kHz
- 距离大信号7.5kHz以外的小信号可能被检测到

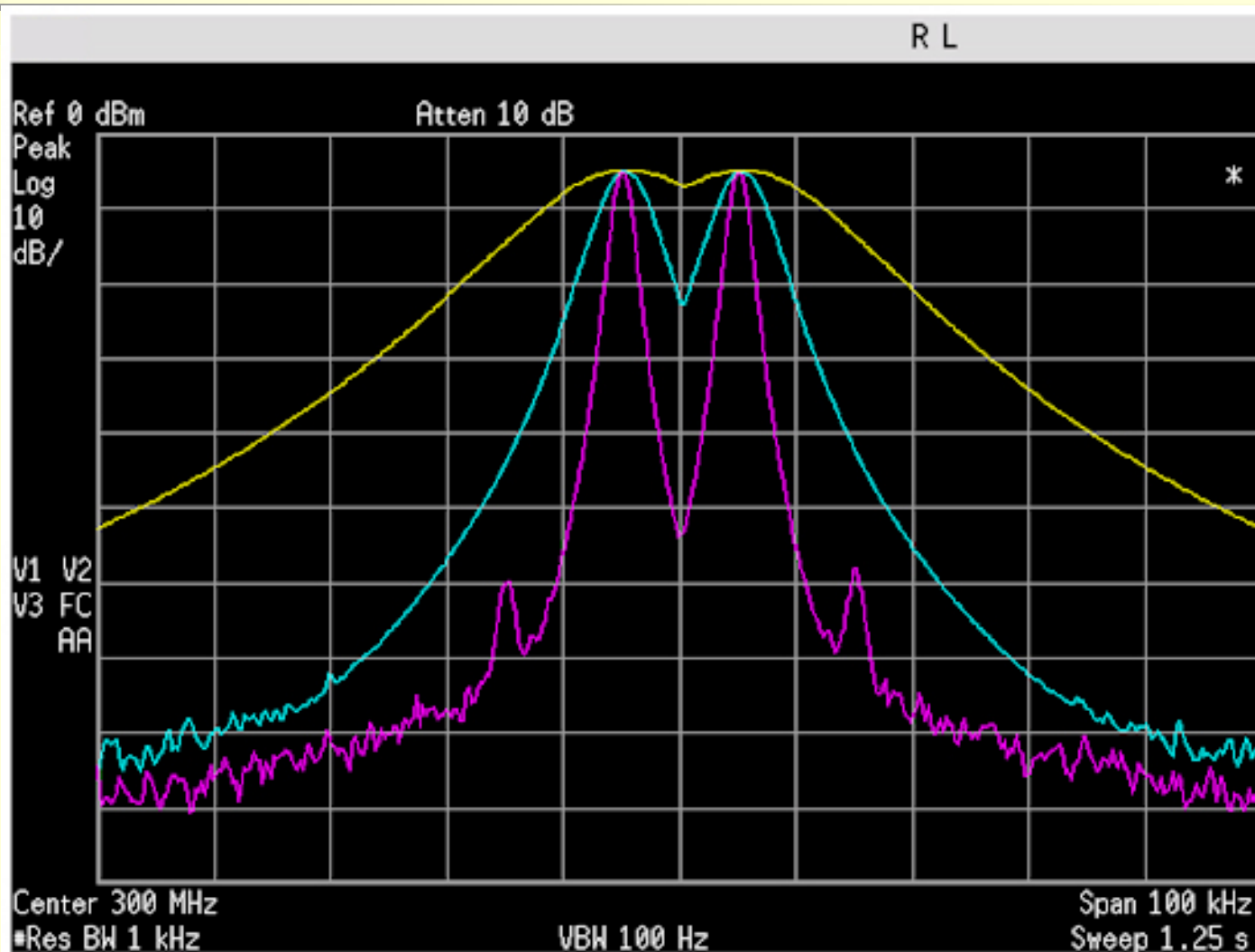
■ 选择性为5:1

- $RBW=3\text{kHz}$ ---- $3\text{dB Bw} = 3\text{kHz}$

- $SEL=15:1$ ---- $60\text{dB Bw} = 15\text{kHz}$
- 60dB带宽的一半为7.5kHz
- 距离大信号7.5kHz以外的小信号可能被检测到



不同RBW显示下的等幅双信号



分辨率带宽

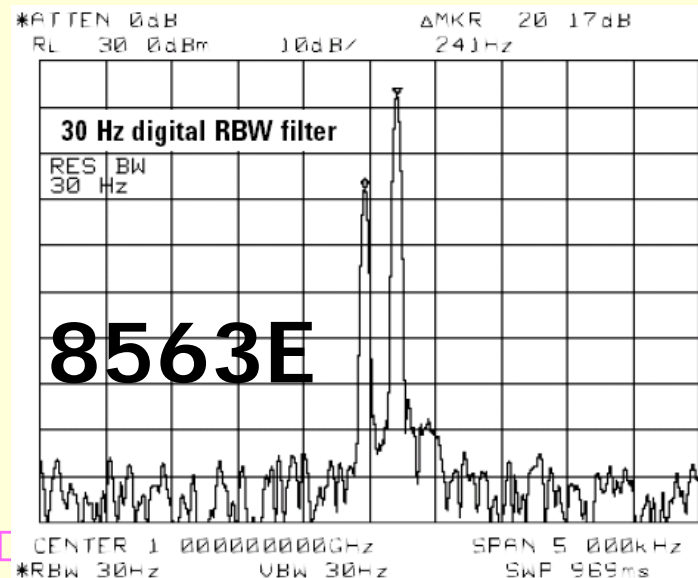
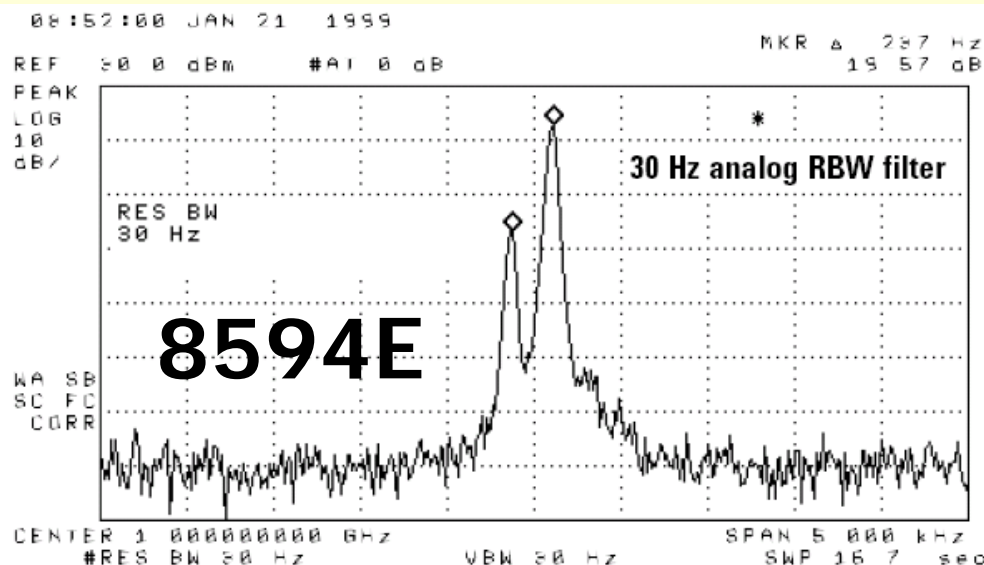
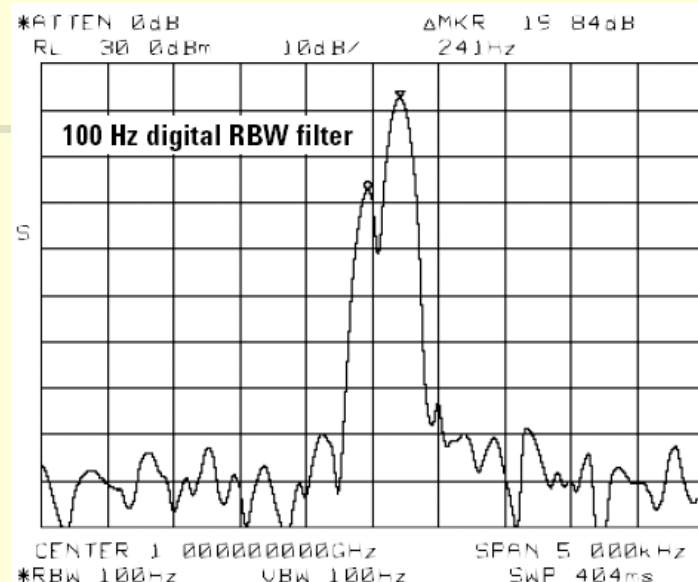
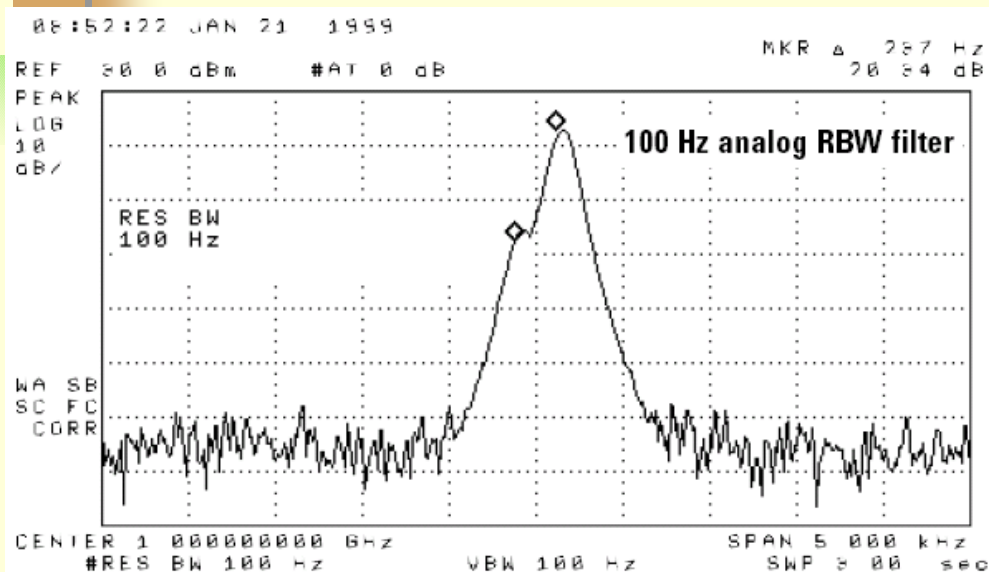
856XEC family

- 30 Hz up to 50 GHz
- high performance
- color display
- W-CDMA test set
- fast, digital 1 Hz RBW



- 1MHz、100kHz、10kHz、1kHz、100Hz、10Hz、1Hz
- 数字化技术实现窄带的带通滤波器
 - 采样、ADC、FFT
 - 频谱仪步进扫频的，不能连续扫频
 - 带宽选择性可以做到5 : 1
- HP的频谱仪中，模拟滤波器极点个数为4或5，形状类似高斯分布
 - 旧式模拟滤波器带宽选择性25 : 1
 - 新式模拟滤波器带宽选择新11 : 1

模拟滤波器和数字滤波器



频谱仪的最小分辨带宽，在一定程度上是由LO的稳定性决定的：
低成本：1kHz；中等性能（稳频）：100Hz；高性能（频率合成技术）：10Hz

残余调频

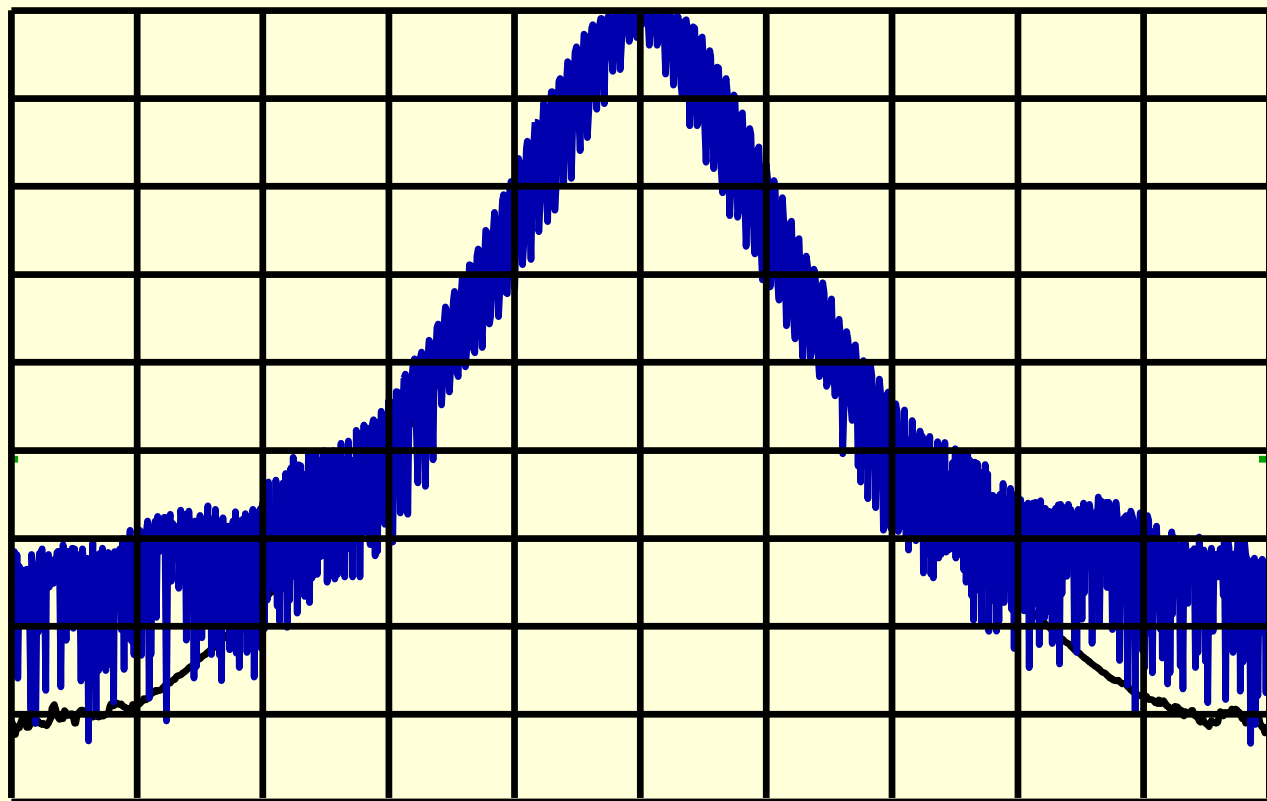
- 本振残留调频的影响在RBW很宽时是看不到的，只有当RBW接近残余调频的最大频偏时，才会有明显的显示

- 频谱边缘粗糙而不规则

- RBW很小时，出现尖峰，即使是单频谱分量上也可看到尖峰毛刺，这就是残余调频

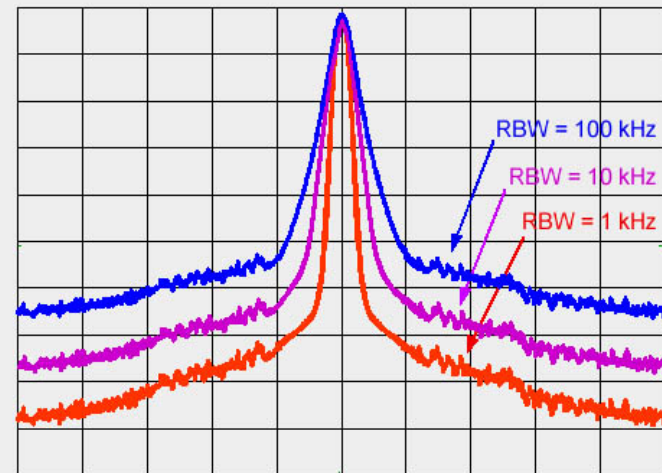
- Residual FM是描述本振稳定性的一个指标，对于一般的2-6GHz调谐的YIG微波振荡器，其残留调频大约为1kHz或更大

- 中频中出现的这种不稳定性很难判断是出自信号本身还是本振
- YIG: Yttrium Iron Garnet: 钇铁石榴石：微波铁氧体器件



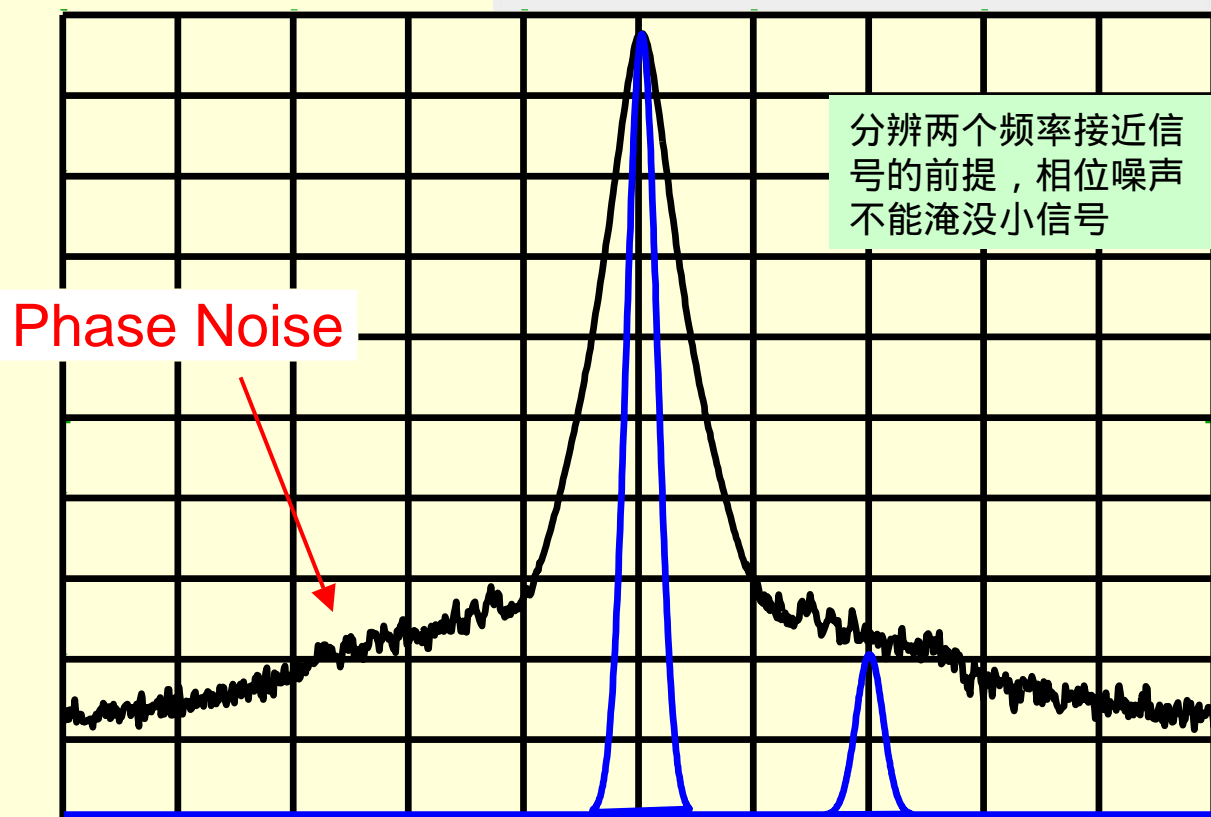
$$N_{RBW2} - N_{RBW1} = 10 \log \frac{RBW2}{RBW1}$$

本振相位噪声



■ 本振相位噪声主要影响不同幅度的频率分量之间是否可分辨

- 相位噪声显示和分辨率带宽RBW相关



为什么不用最小的RBW 来获得最佳的频率分辨率？

- 这就牵扯到扫描时间问题
 - 扫描时间：扫描一次整个频率量程并完成测量所需要的时间
- IF滤波器是带宽有限电路，它需要一定的时间来充放电
 - 如果信号扫描太快，滤波器来不及反应，则显示出来的幅度就会将低，频率发生偏移

$$\text{带内扫描时间} = \text{SweepTime} \times \frac{RBW}{\text{span}}$$

$$\text{带内扫描时间} \geq \text{反应时间}$$

$$\text{反应时间} = \frac{K}{RBW}$$

$$\text{SweepTime} \geq K \frac{\text{span}}{RBW^2}$$

K : 和滤波器形状有关：高斯2~3；矩形10~15

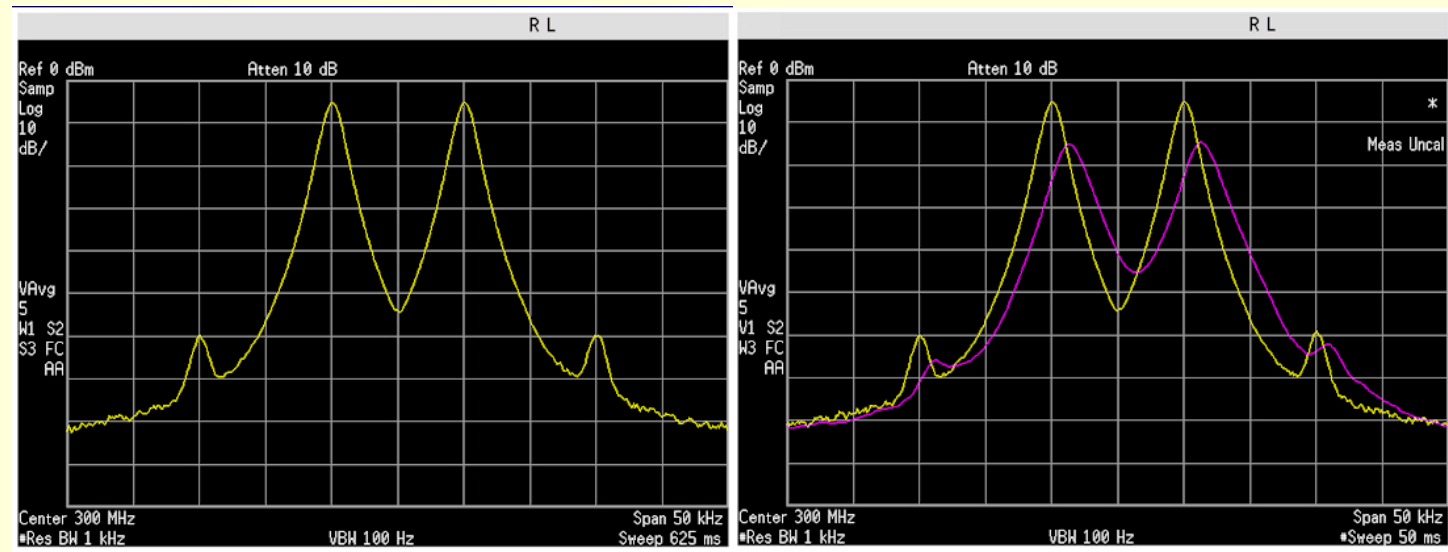
采用数字滤波器可以降低扫描时间

RBW	8566B Opt. 002 (analog filters)	ESA-E series (analog/digital filters)
1 kHz	300 milliseconds	275 milliseconds (analog)
10 Hz	300 seconds	4.025 seconds (FFT/digital)
Sweep time comparison (span = 10 kHz @ 1 GHz)		

扫描时间

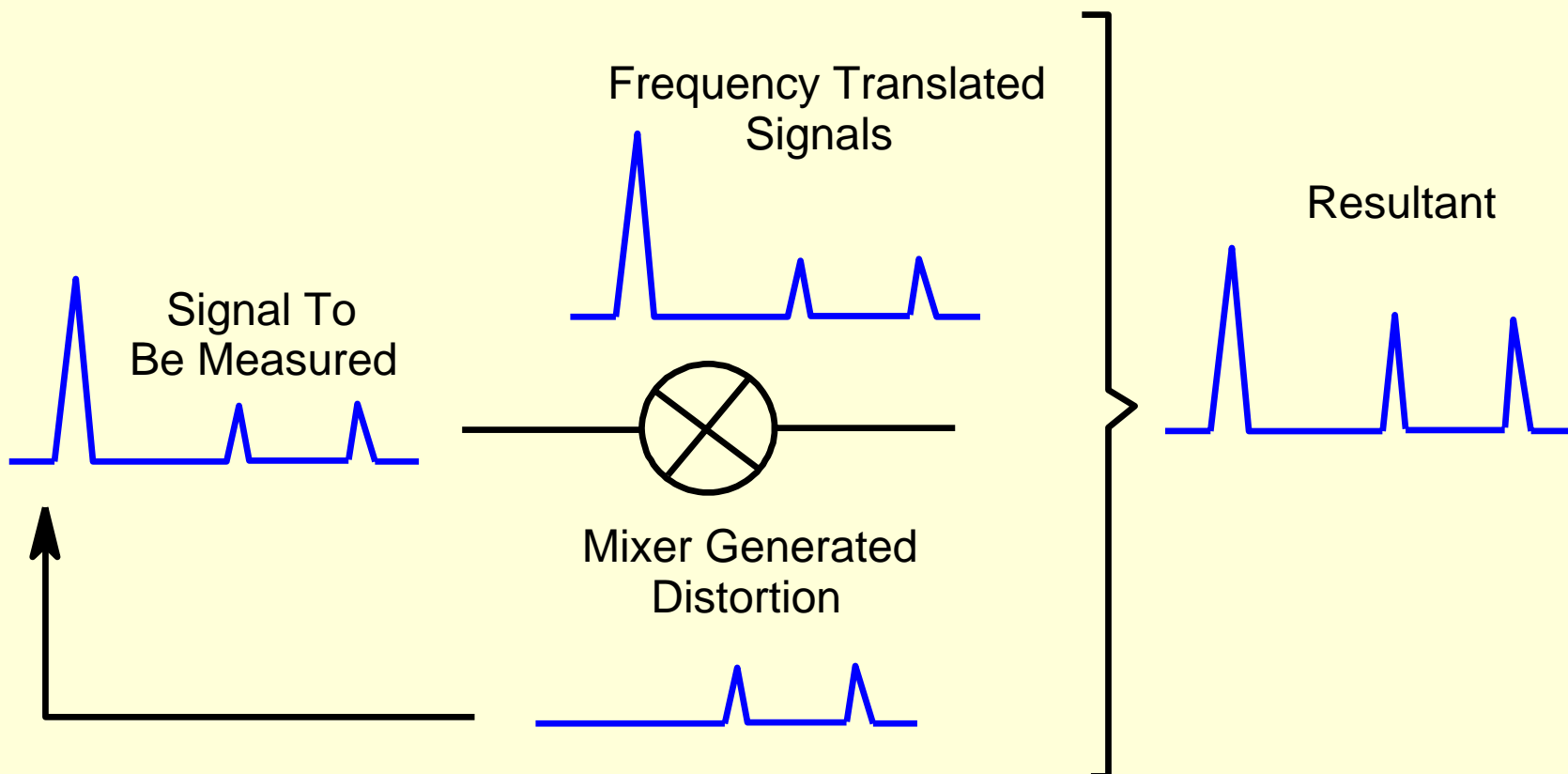
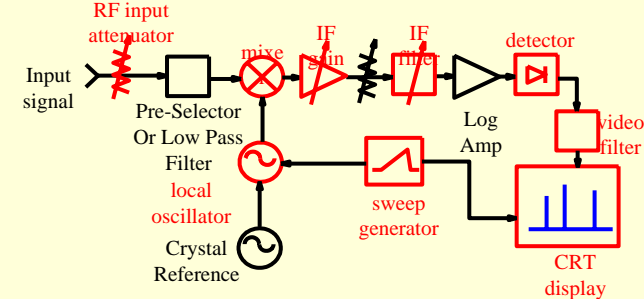
$$SweepTime = K \frac{Span}{RBW^2}$$

- 扫描时间将随着RBW的减小而迅速上升
 - 频谱仪自动选择扫描时间适应频率范围和分辨率带宽的设定
- 如果手动设置加快扫描时间，则显示出来的幅度就会将低，频率会发生偏移
 - 右上角显示‘Meas Uncal *’，表示显示未校准

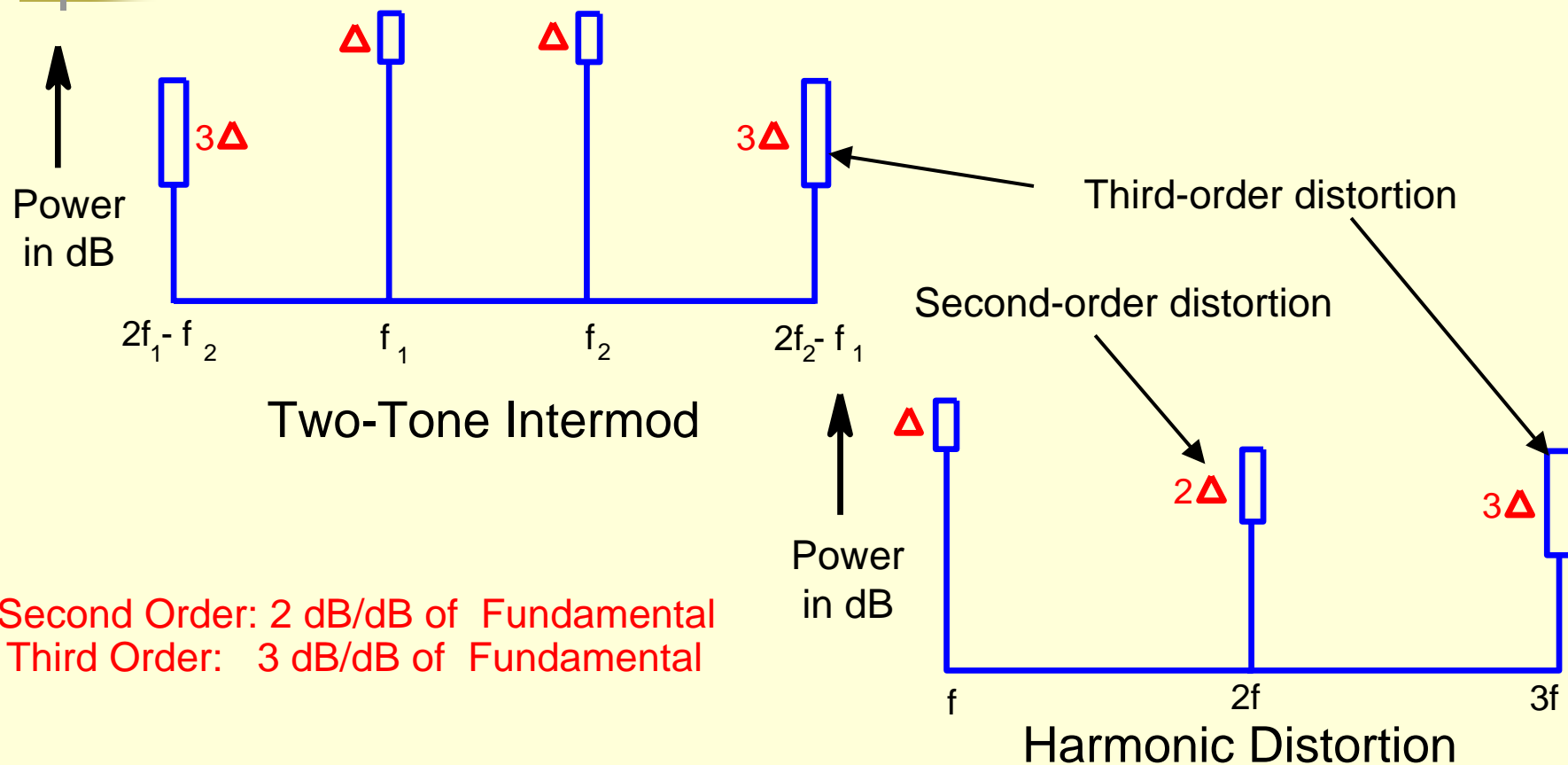


3.3 内部失真

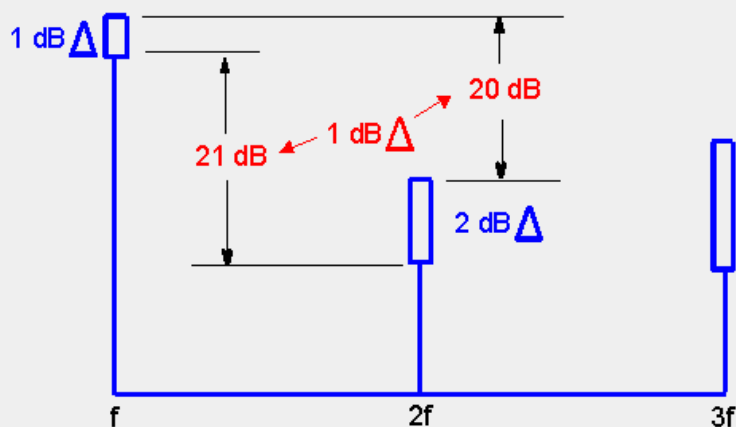
- 混频器是频谱仪内部失真贡献的主要非线性器件



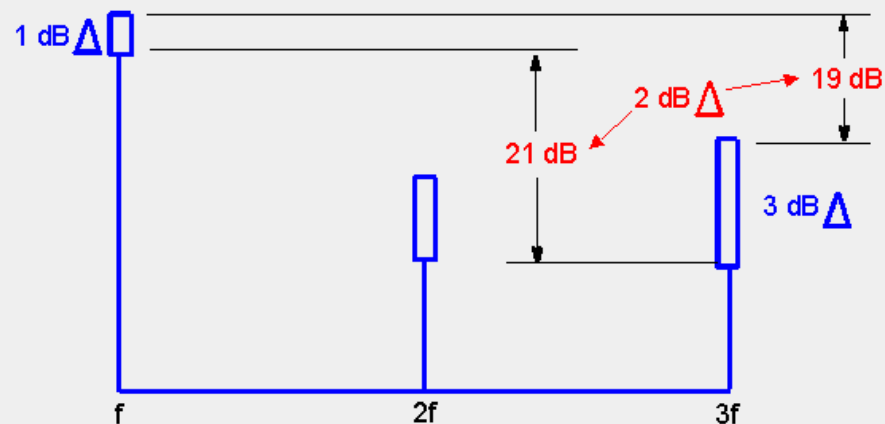
内部失真由混频器输入决定

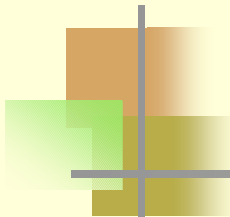


失真测量是相对的



■ 随着输入幅度的变化而变化





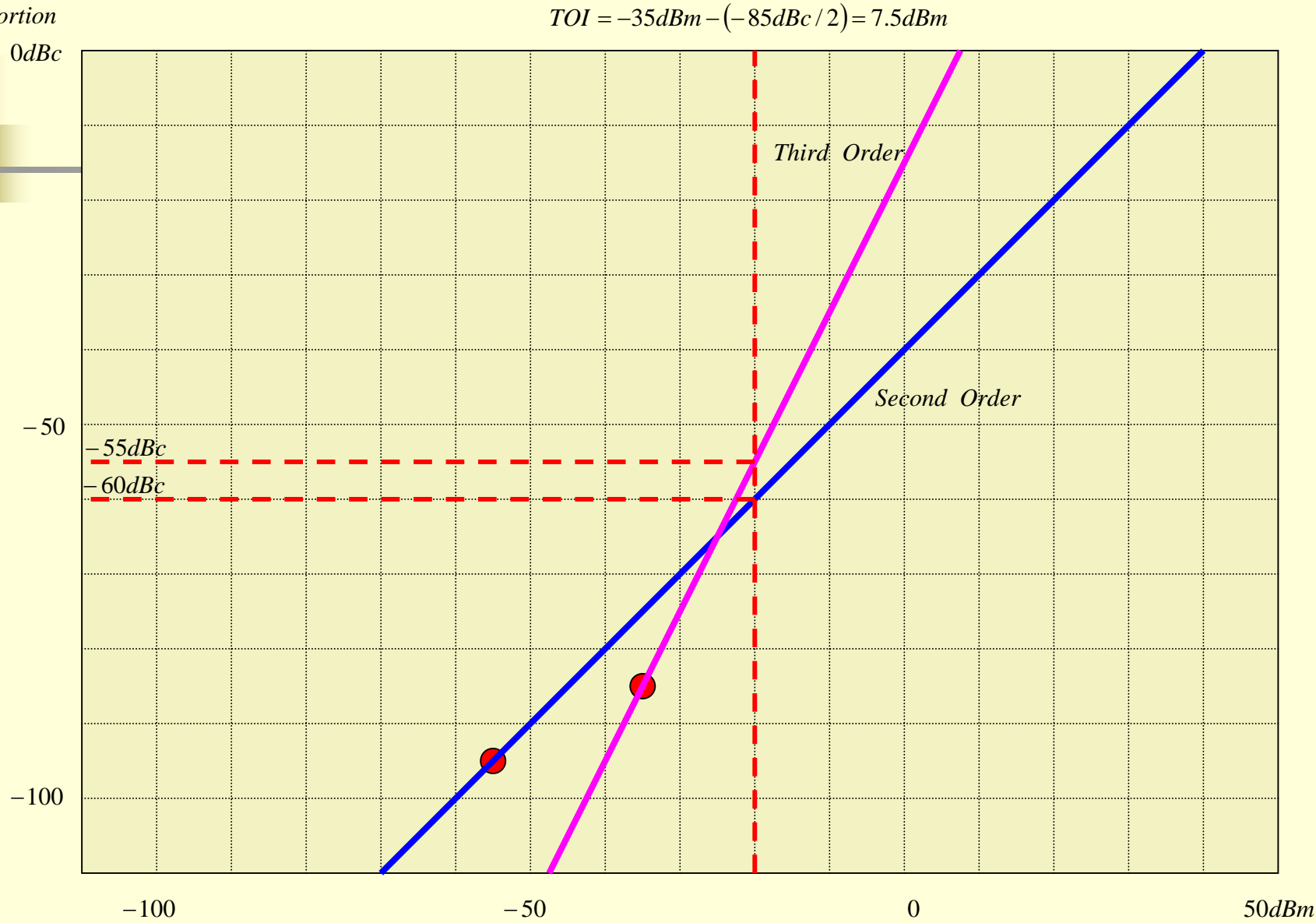
失真例题

- 频谱分析仪的使用说明书上对其内部失真有如下指标描述：当输入到混频器的功率为 -55dBm 时，二阶失真将小于 -95dBc ；当输入到混频器的功率为 -35dBm 时，三阶失真将小于 -85dBc 。现在如果输入信号功率为 -10dBm ，而输入衰减器的衰减被设置为 10dB ，那么此时频谱仪的二阶失真和三阶失真各为多少？

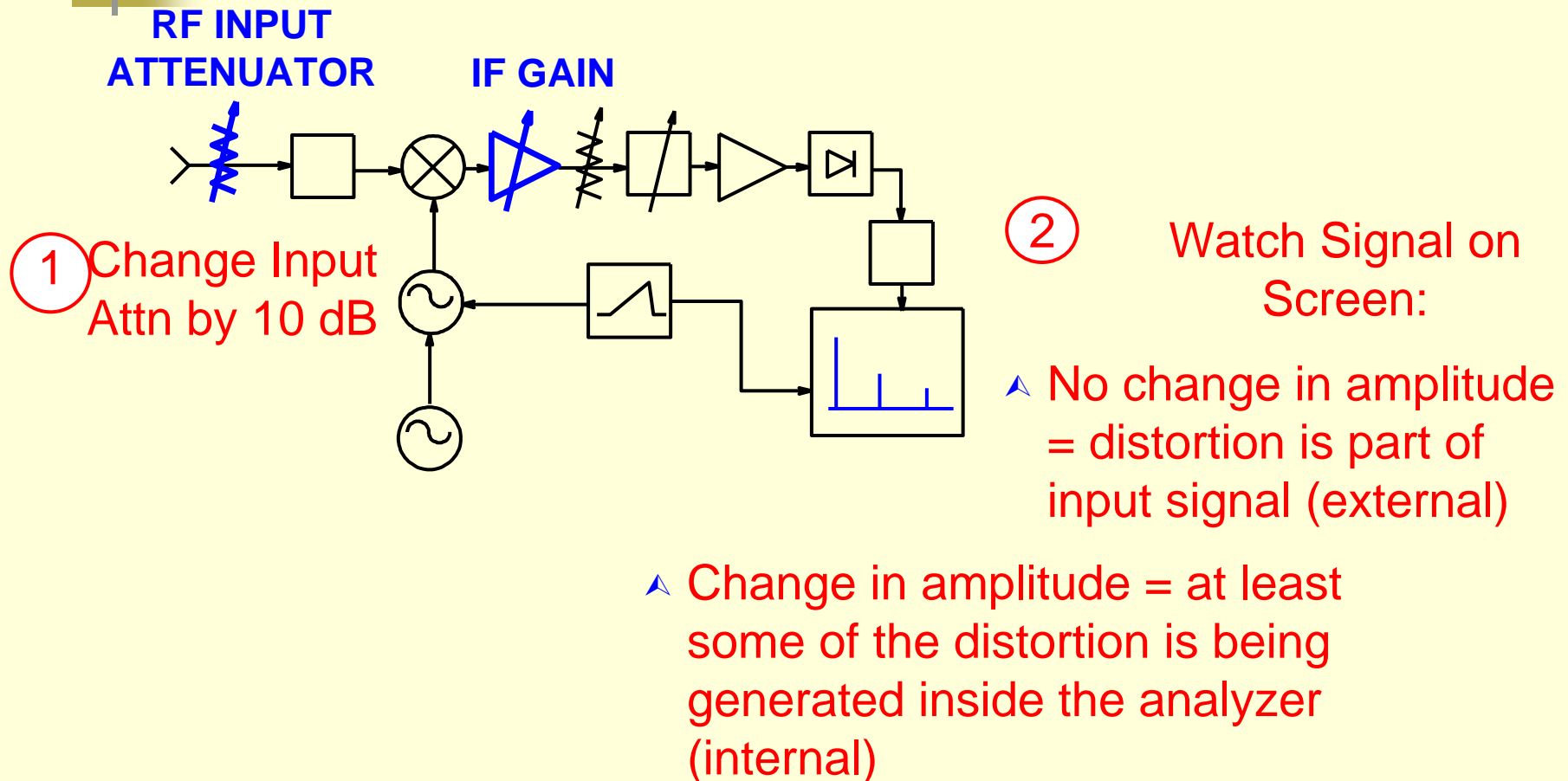
解答

$$SOI = -55\text{dBm} - (-95\text{dBc}) = 40\text{dBm}$$

$$TOI = -35\text{dBm} - (-85\text{dBc} / 2) = 7.5\text{dBm}$$



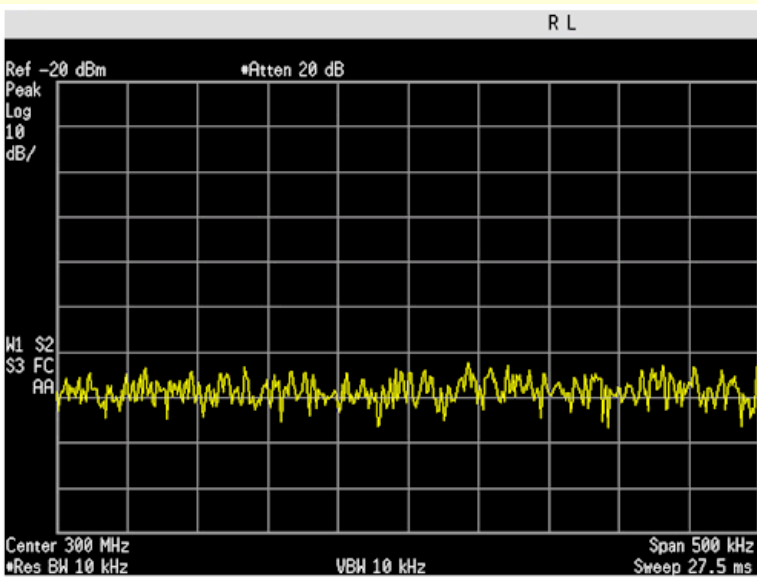
显示的失真来自信号本身 还是出自分析仪？



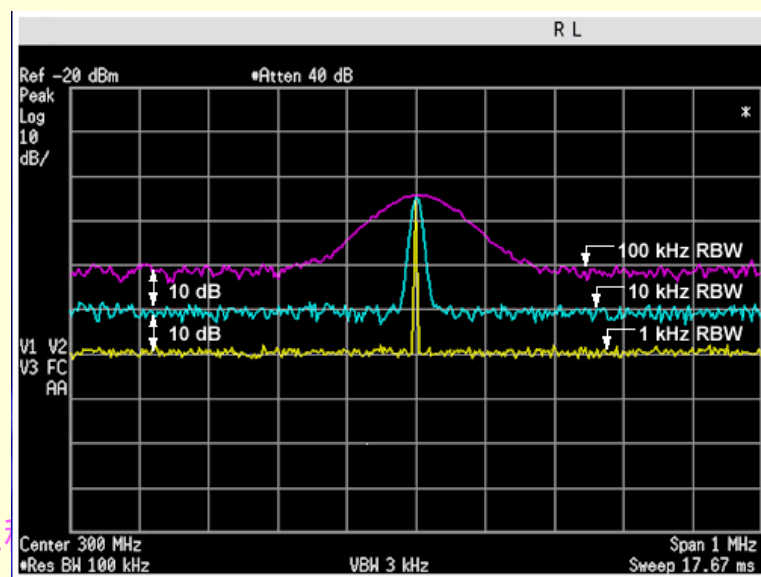
$$N_{flr} = 10 \log kT = -174 \text{ dBm/Hz} @ 25^\circ\text{C}$$

3.4 灵敏度

- 灵敏度是频谱仪能够测量的最小信号
 - 频谱仪本身产生的随机噪声限制了测量能力
- 噪声基底
 - 是RBW的函数



Displayed
Average
Noise
Level



灵敏度与噪声系数

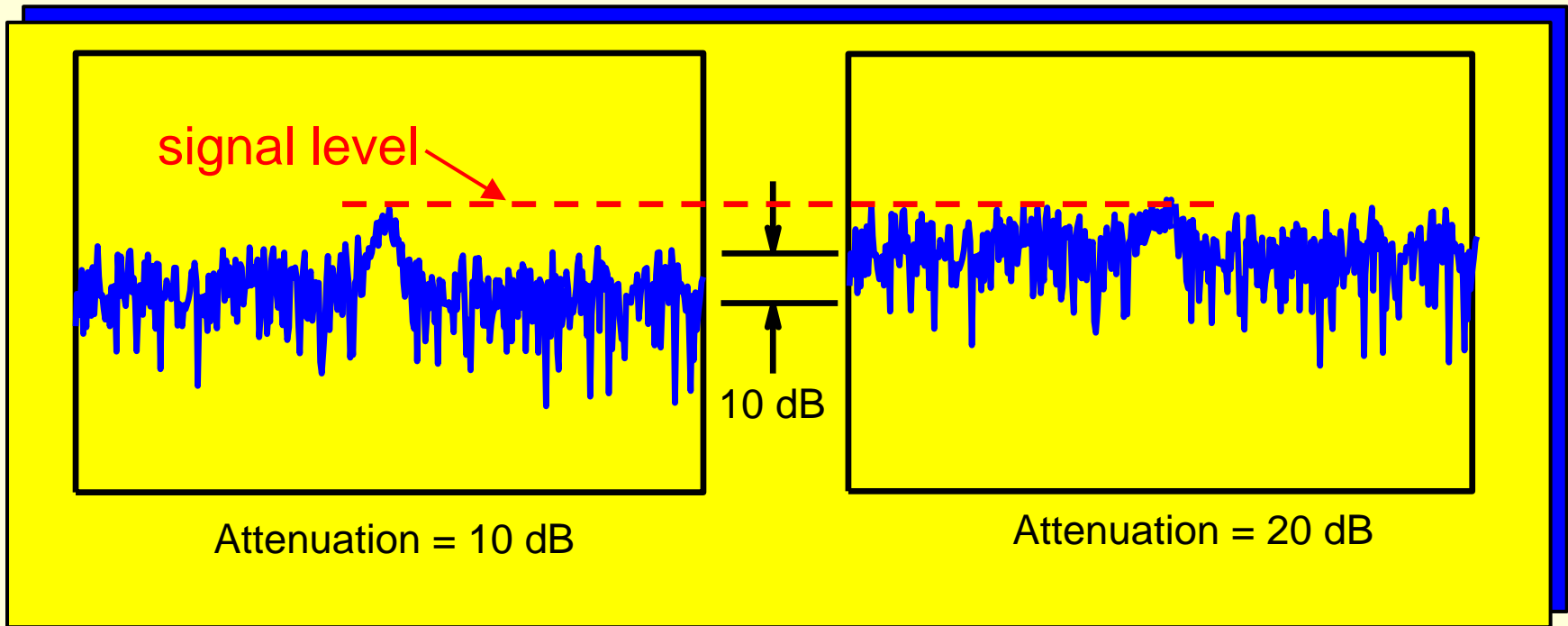
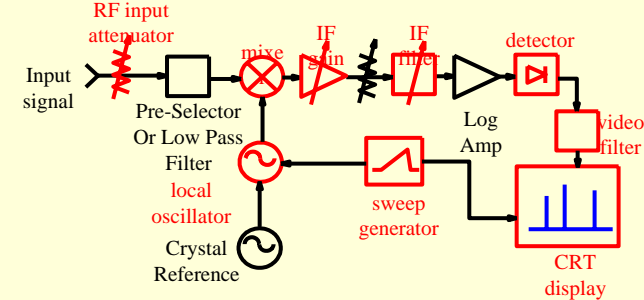
- 灵敏度是频谱仪能够检测到的最小信号电平，有时用噪声系数来描述频谱仪的这个特征
 - 噪声系数为混频器口看入的噪声系数
- 例：测得10kHz分辨率带宽下的噪声功率为-110dBm，则有

$$\begin{aligned} NF &= -110 - 10\log RBW - kT \\ &= -110 - 40 - (-174) \\ &= 24dB \end{aligned}$$

- 对于该频谱仪，正弦信号必须比kTB高24dB，才有可能被检测出来

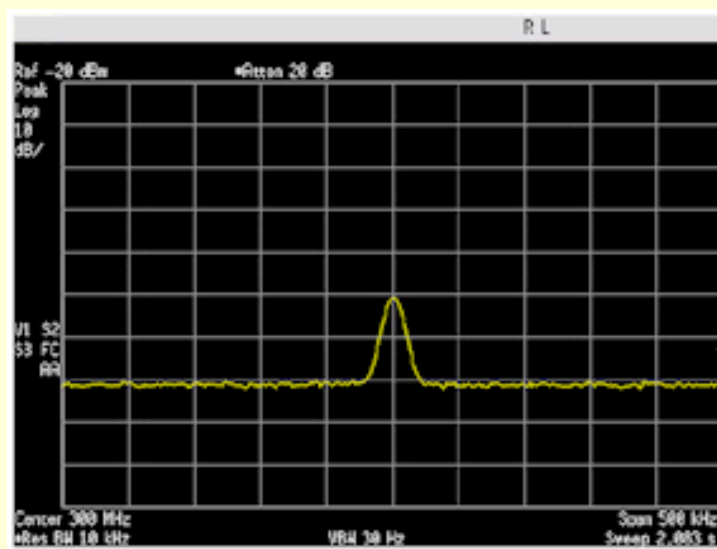
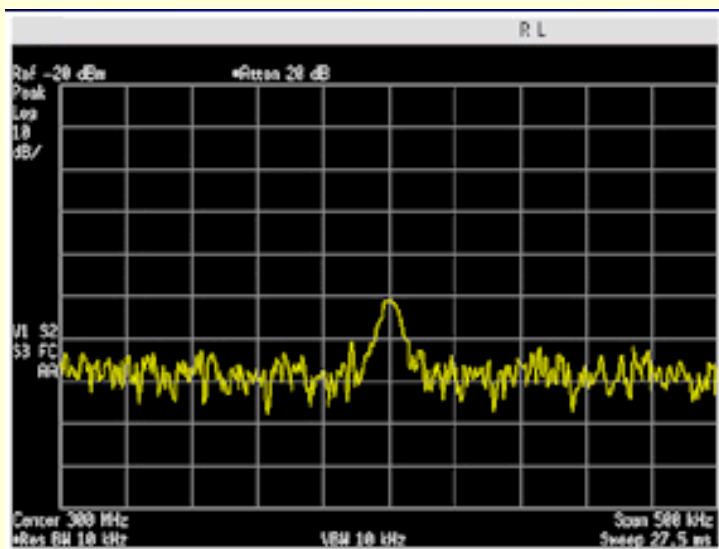
$$P_{si,\min} = kT + 10\log RBW + NF$$

DANL还取决于 射频衰减器



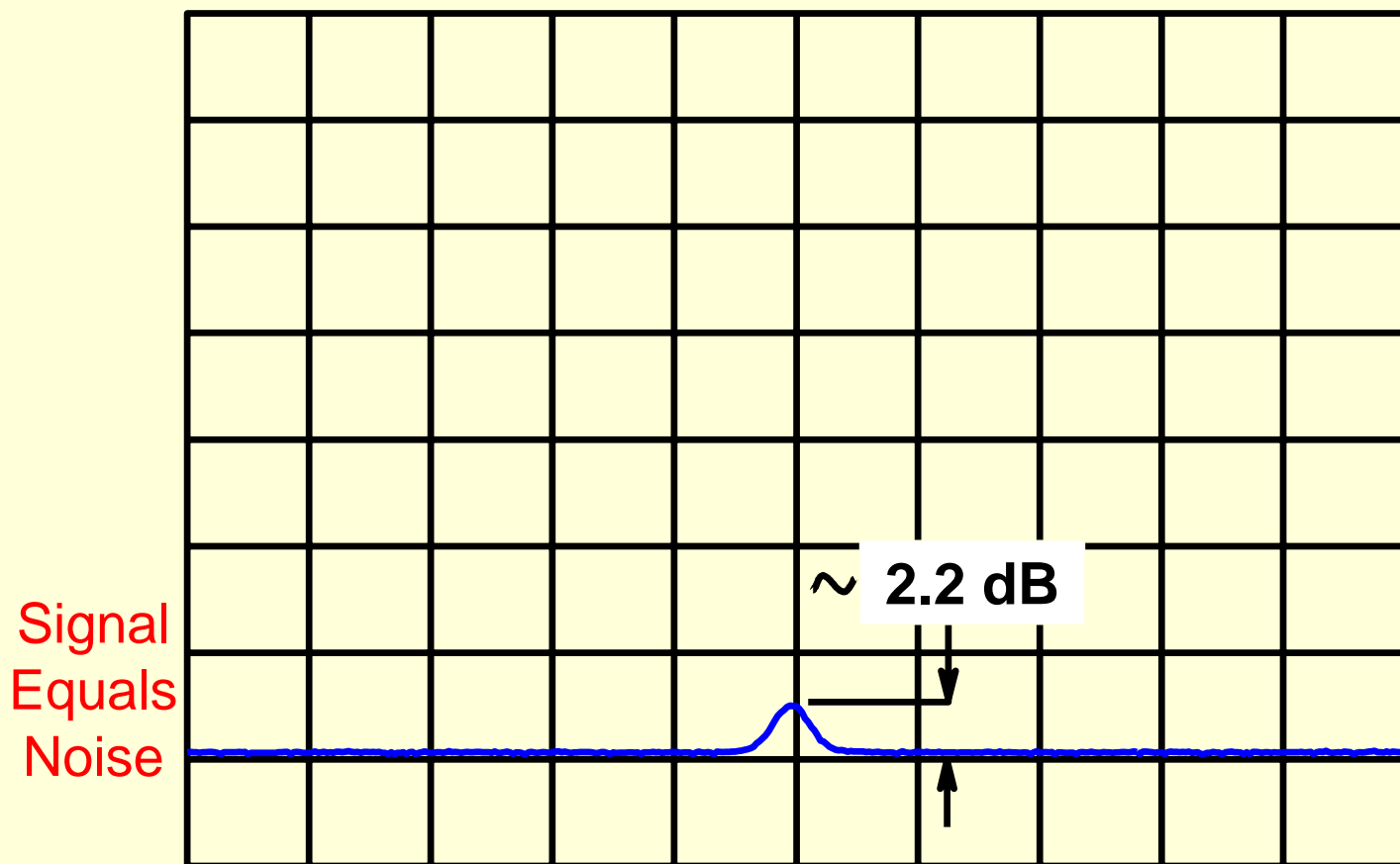
- 混频器前加多大的衰减器，就相当于整机噪声系数增加多少，噪声基底就抬高多少dB

用视频滤波器改善显示



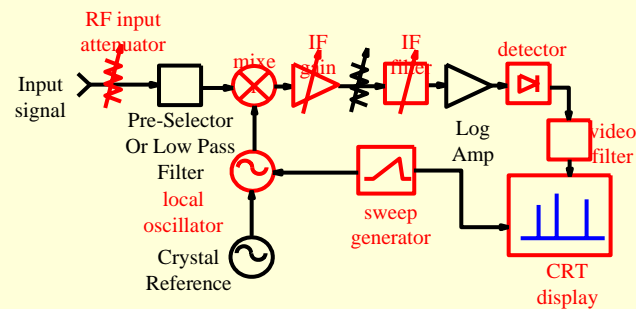
- 仅仅是显示上的改善，并不会提高信噪比
 - 也有采用视频平均的方式，多次扫描叠加
 - 对于频谱随时间变化的信号，如FM信号，视频滤波和视频平均效果不一样

最小可检测信号电平等于噪声基底



如何观测小信号

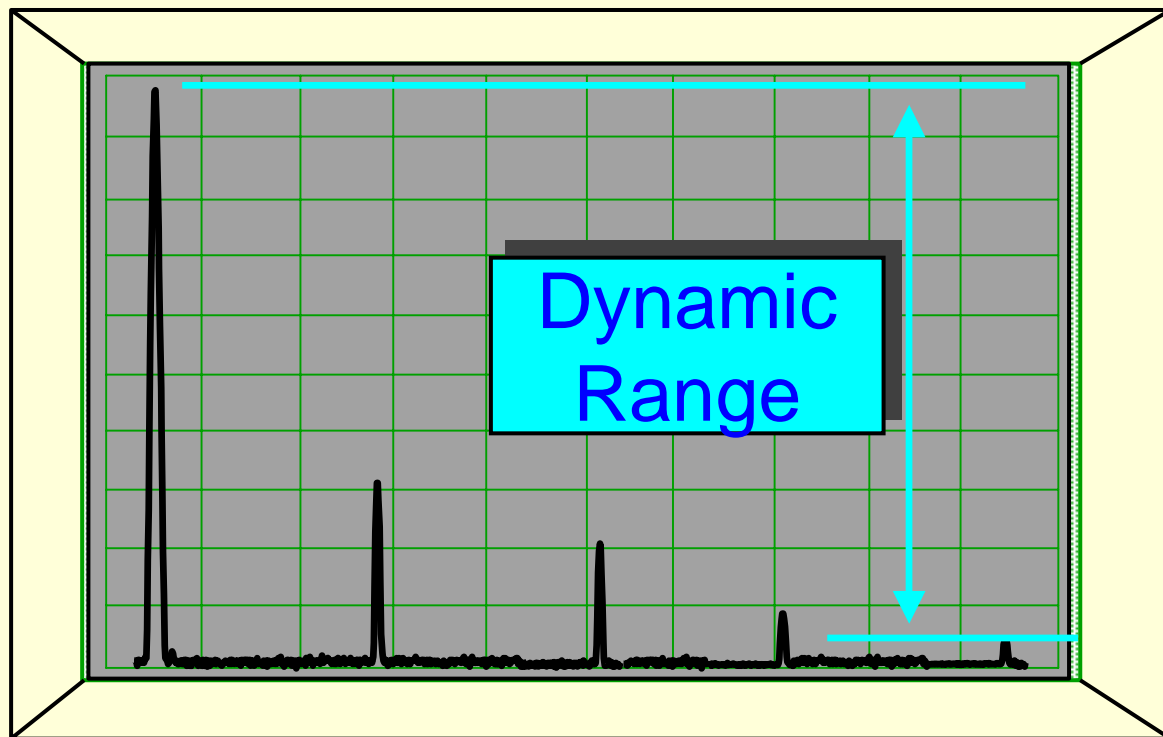
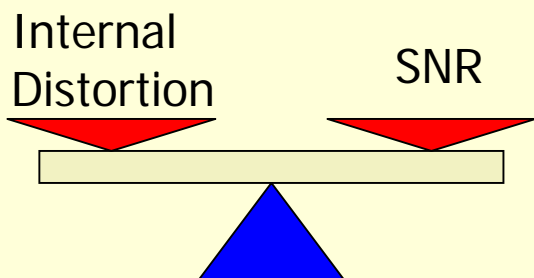
- 尽量小的RBW
 - 可能测试时间很长
- 尽量小的射频衰减
 - 可能引起失配和测试不精确
- 足够的视频平滑



3.5 动态范围

■ 动态范围是频谱仪能够同时测试的最大信号和最小信号之比 (dB)

- 要想获得最大的动态范围，需要对内部失真和信噪比进行平衡



最大动态范围

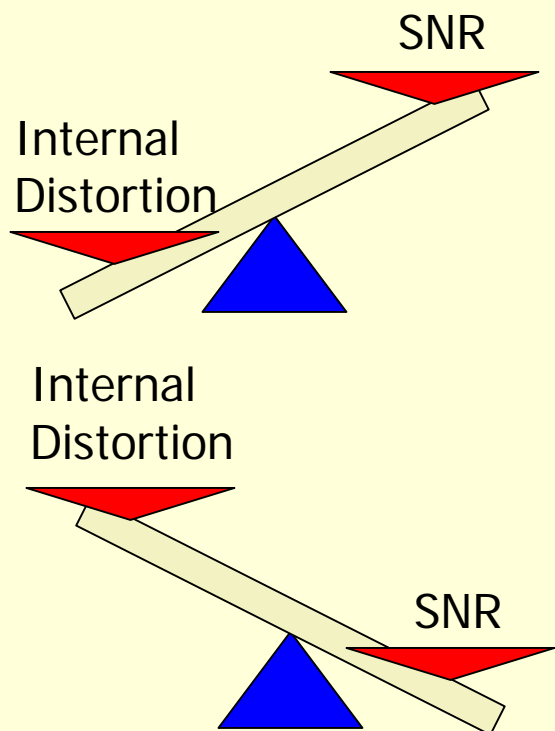
$$\text{二阶失真} : DR = \frac{1}{2}(SOI - DANL)$$

$$SOI = V_{im} - V_{distortion} \quad (dB)$$

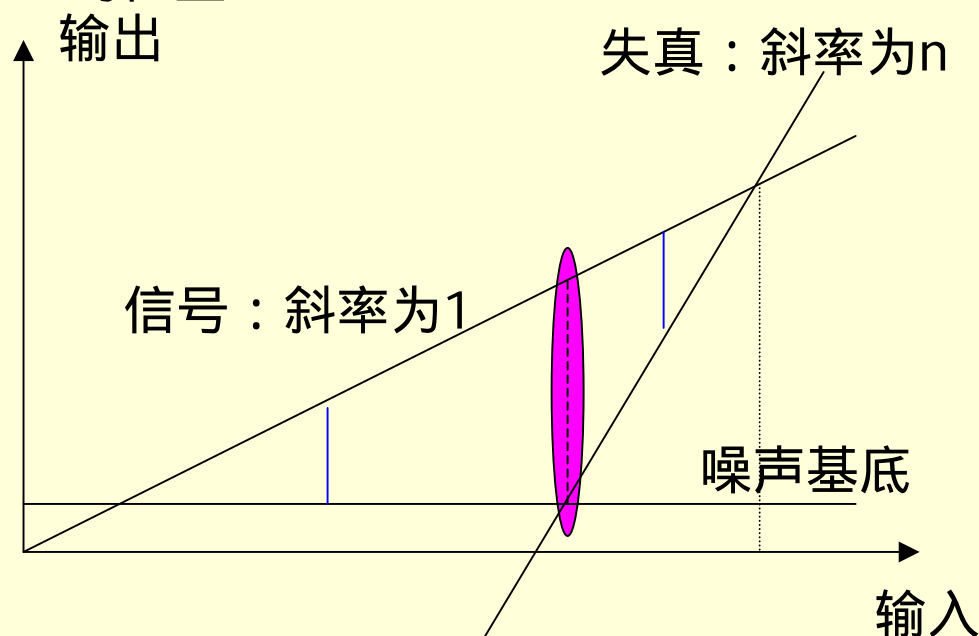
$$\text{三阶失真} : DR = \frac{2}{3}(TOI - DANL)$$

$$TOI = V_{im} - V_{distortion} / 2 \quad (dB)$$

- 减小输入信号，失真小，但信噪比降低
- 增加输入信号，信噪比增加，失真变大



- 最大动态范围出现在失真等于噪声基底的位置



动态范围确定

■ 例

■ 三阶交调失真

■ -30dBm: -70dBc

■ DANL

■ -115dBm@1kHz

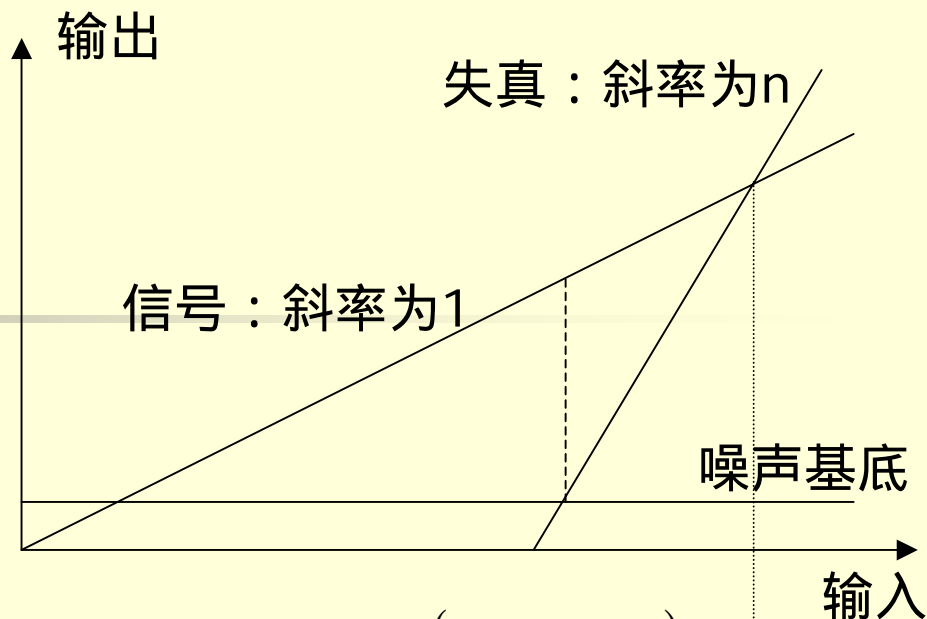
■ 动态范围

■ 80dB

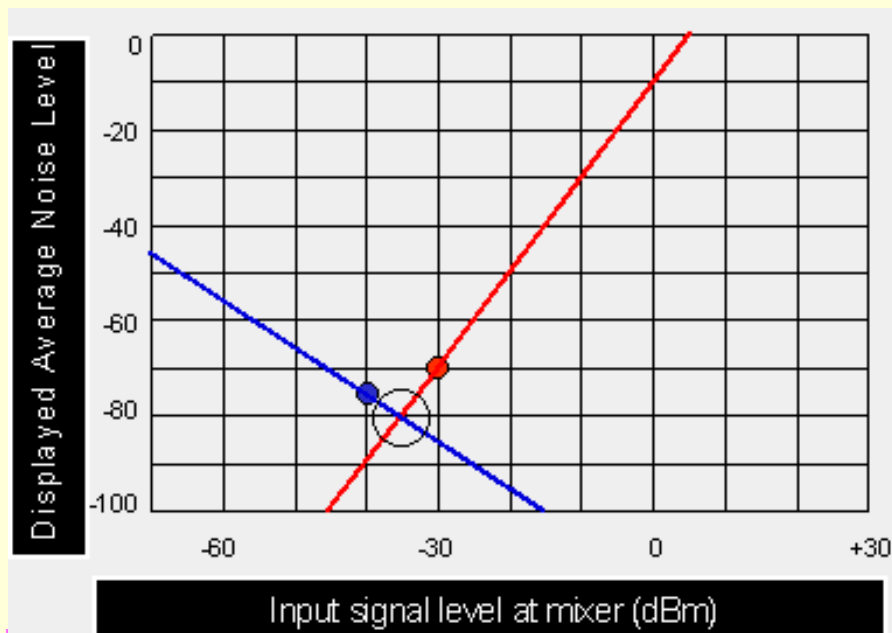
■ 可用动态范围

■ 70dB

■ 10dB的保护



$$TOI = -30dBm - (-70dBc / 2) = 5dBm$$

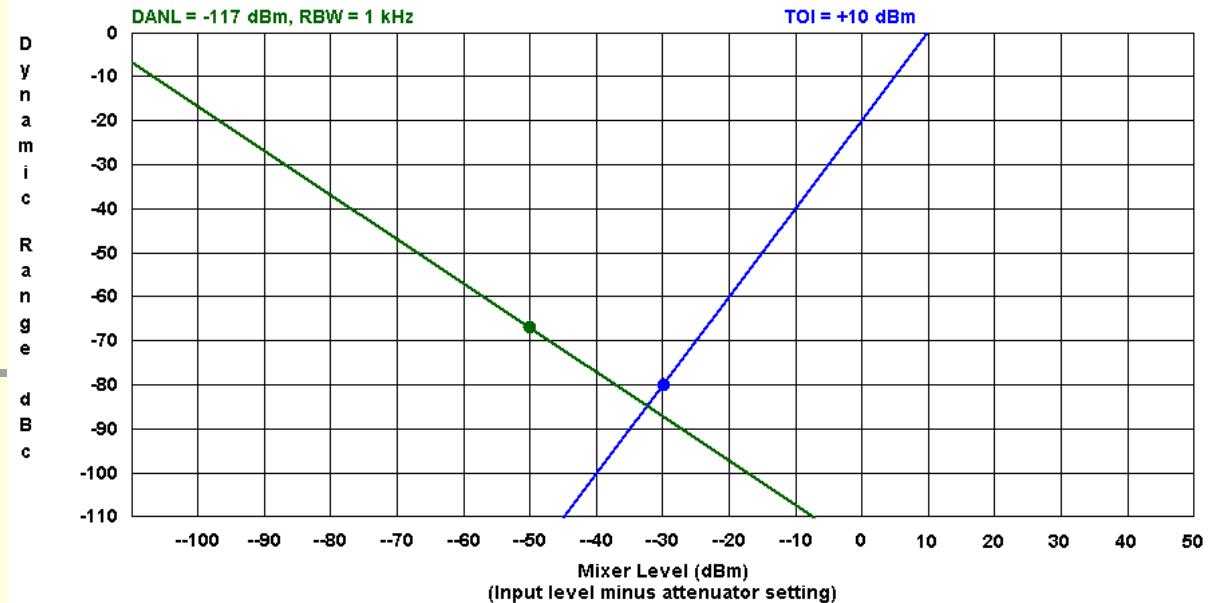


$$DR = \frac{2}{3}(5dBm - (-115dBm)) = 80dB$$

用输入衰减获得最大动态范围

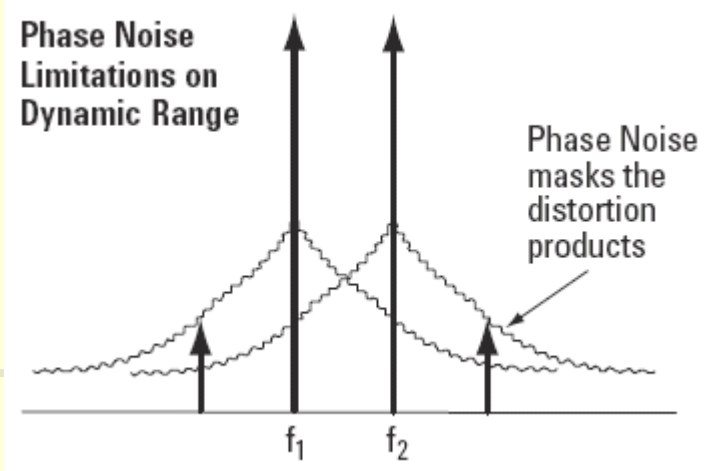
- 通过设置输入衰减器的衰减，可以得到最大动态范围
 - 假设已确定达到最大动态范围的输入为-35dBm，现在输入信号电平为-30dBm，那么衰减器应设置为5dB衰减
 - 最佳混频器输入 = DANL+最大动态范围
 - 衰减 = 射频输入 - 最大动态范围混频器输入

例

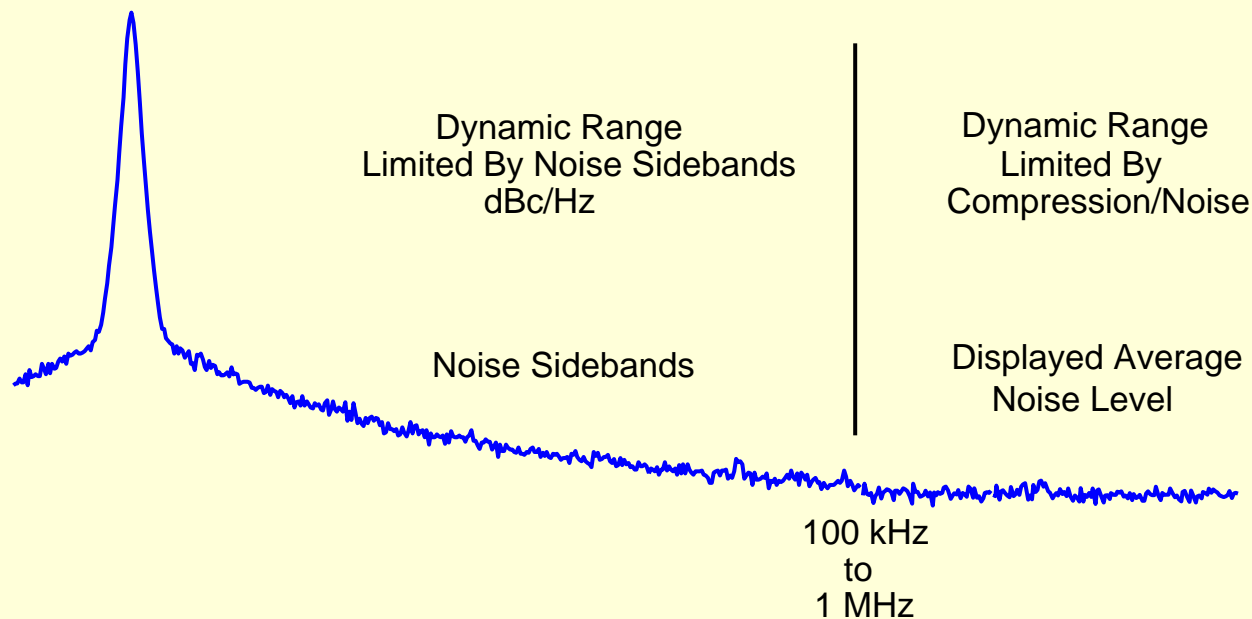


- 可否测试得出放大器（1GHz）的三阶交调失真
 - - 50dBc
- 查频谱仪的datasheet，获得如下信息
 - 1GHz，1kHzRBW，HP E4401B的DANL为-117dBm
 - 1GHz，- 30dBm双音（>50kHz）输入的三阶交调失真-80dBc
- 确定最大动态范围
 - 85dB：可用75dB
- 结论：可以测试

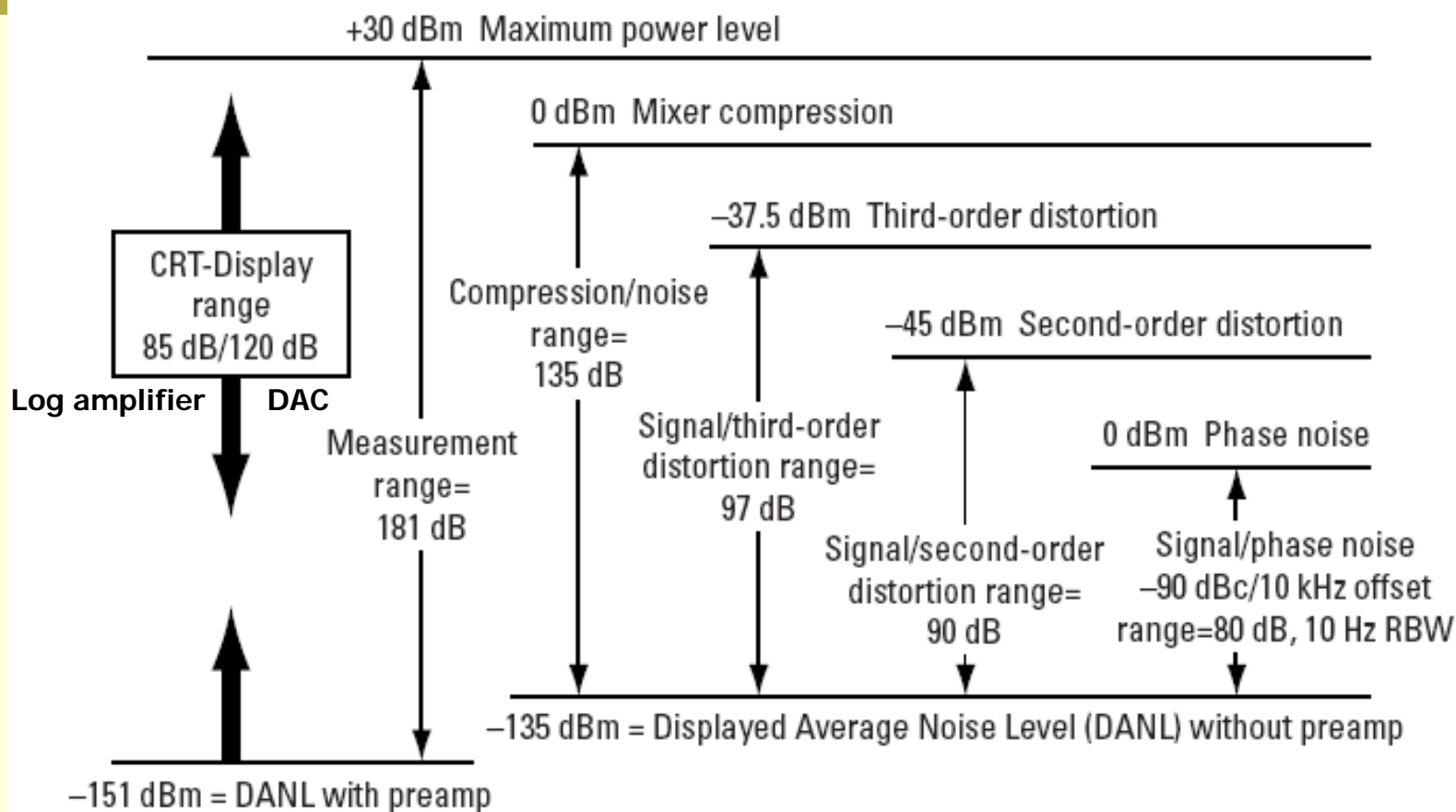
杂波离载波很近

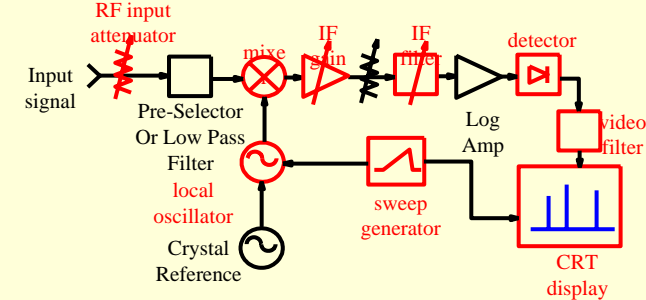


Dynamic Range for Spur Search Depends on Closeness to Carrier



不同的动态范围定义





频谱仪工作原理总结

- 常用的频谱仪是超外差结构的
- 中频带宽就是RBW，是频谱仪最重要的测量参量
- 如何避免内部失真
 - 加大衰减，发现失真项不随衰减变化时，此时测试的就是信号的失真
- 最大动态范围是内部失真和信噪比两者之间的平衡



四、测试问题

- 前置放大器
- 扩展频率范围
- 观察时域波形
- 调幅波调制指数测量
- 突发信号的门控观测
- 噪声测量中的修正

$$F_n = 3.548 + \frac{250.19}{3981.1} = 3.611$$

(5.576dB)

4.1 前置放大器

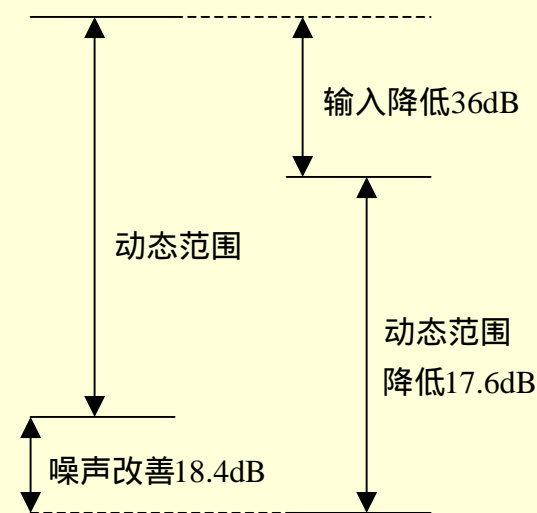
- 在频谱仪前面加一个前置放大器（选件），可以使频谱分析仪系统的噪声系数降低，灵敏度改善

- 例：

- 频谱仪噪声系数为24dB，前置放大器噪声系数为5.5dB，增益36dB，于是频谱仪的噪声系数改善为5.6dB，10kHz下的灵敏度-110dBm变为-128.4dBm

- 缺点：动态范围降低

- 增加频谱仪后面的射频衰减器的衰减量，可以兼顾动态范围和灵敏度



4.2 频率扩展

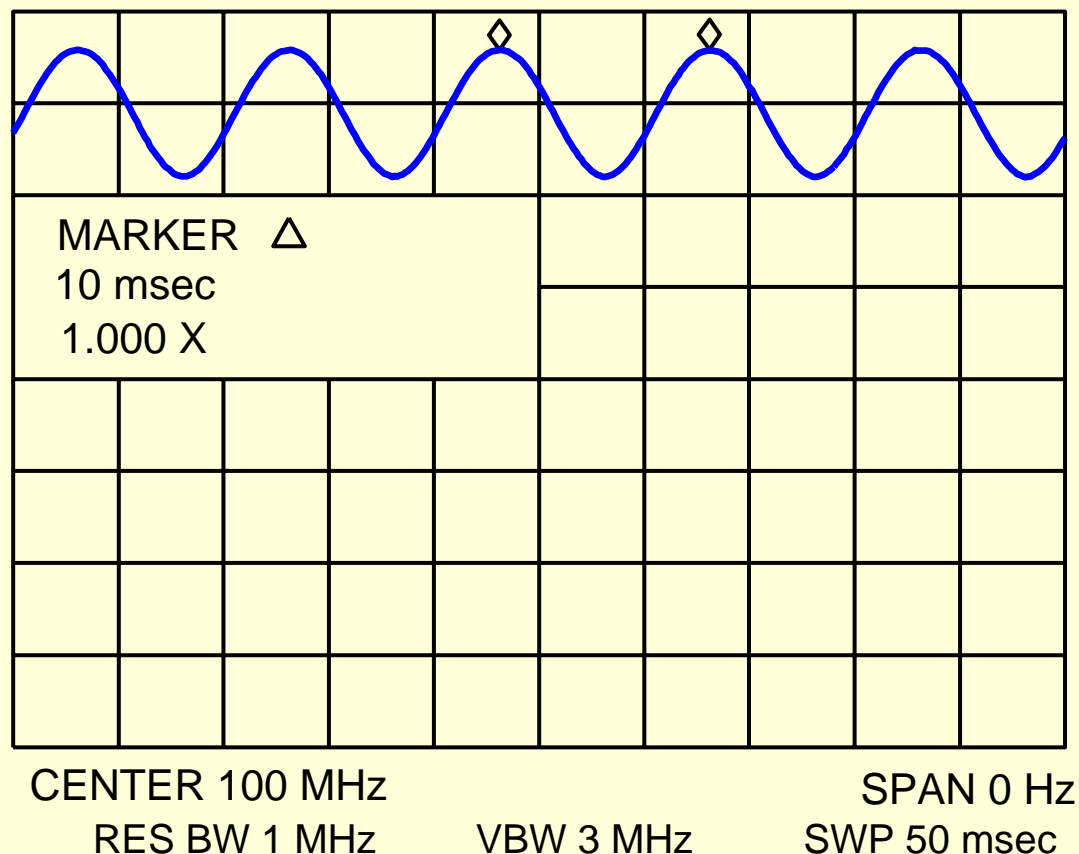
- 前面介绍的是单频段频谱分析仪，信号频率可调谐到2.9GHz，如果需要调谐到更高频率，可采用谐波混频技术来扩展频率范围
- LO和IF选择
 - 测试范围为0-2.9GHz，中频选择要高于2.9GHz
 - 为3.6GHz
 - 中频不能在测试频率范围之内，否则该频点将无法正确测量
 - 测试范围为2.9-22GHz，中频选择要低于2.9GHz
 - Agilent高频带的频谱分析仪，中频一般选择为321.4MHz

$$f_{IF} = nf_{LO} - f_s$$

4.3 观察时域波形

■ 将span设置为0Hz，可观察时域波形，如调制波形的观察

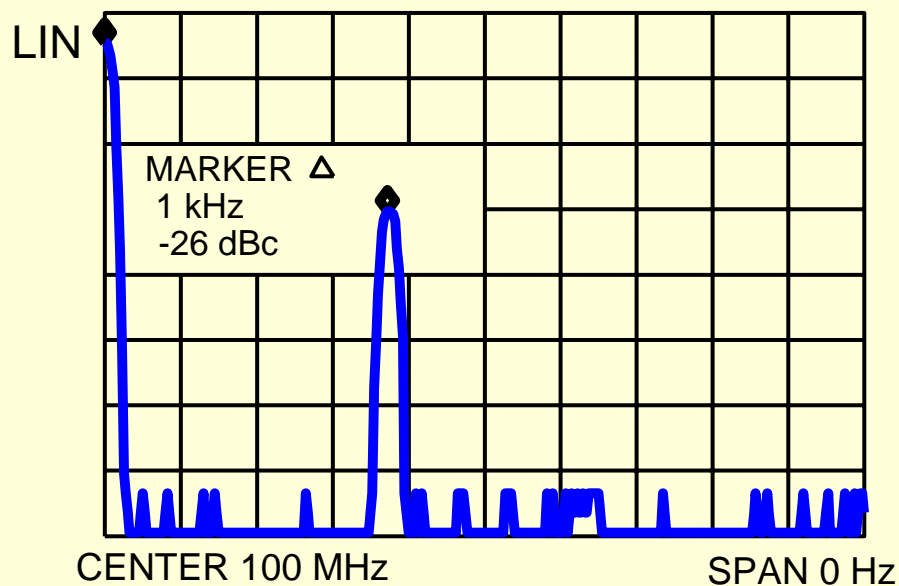
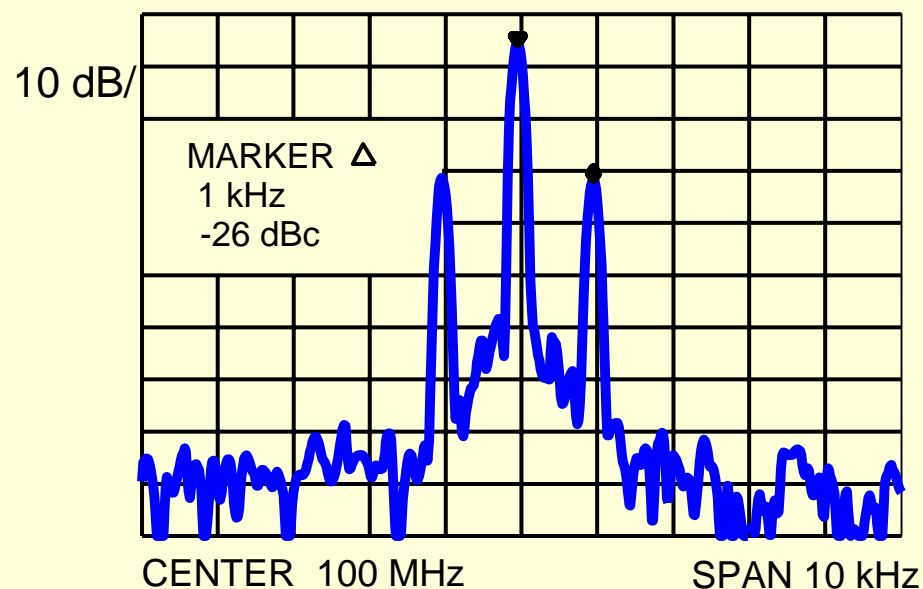
- 扫描时间设置为0，中心频率设置为载波频率，RBW必须足够的大以允许调制波的边带能够通过，此时频谱分析仪是一个频率选择示波器，其选频带宽为最大RBW
- 注意：频谱仪显示的是包络，而非载波，因而显示的是幅度解调后的波形
- 除了调幅波外，还可观察幅度缓变的任何信号



4.4 AM调制指数测量

Swept Frequency Domain

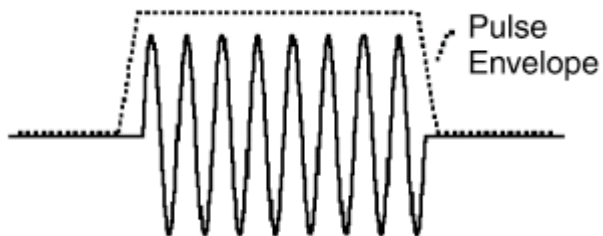
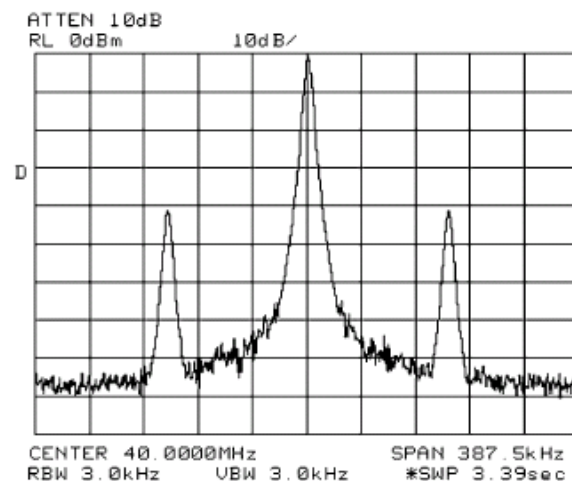
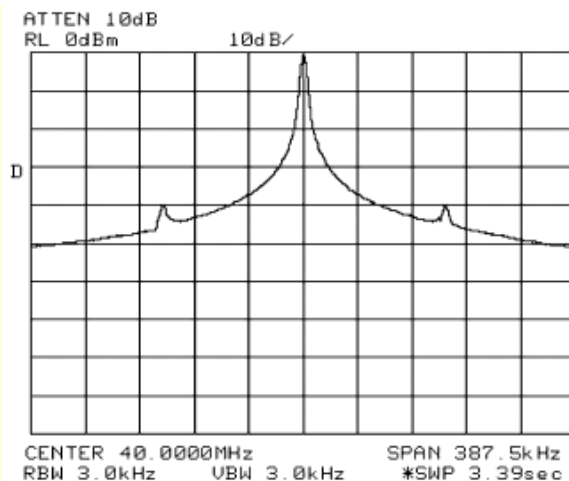
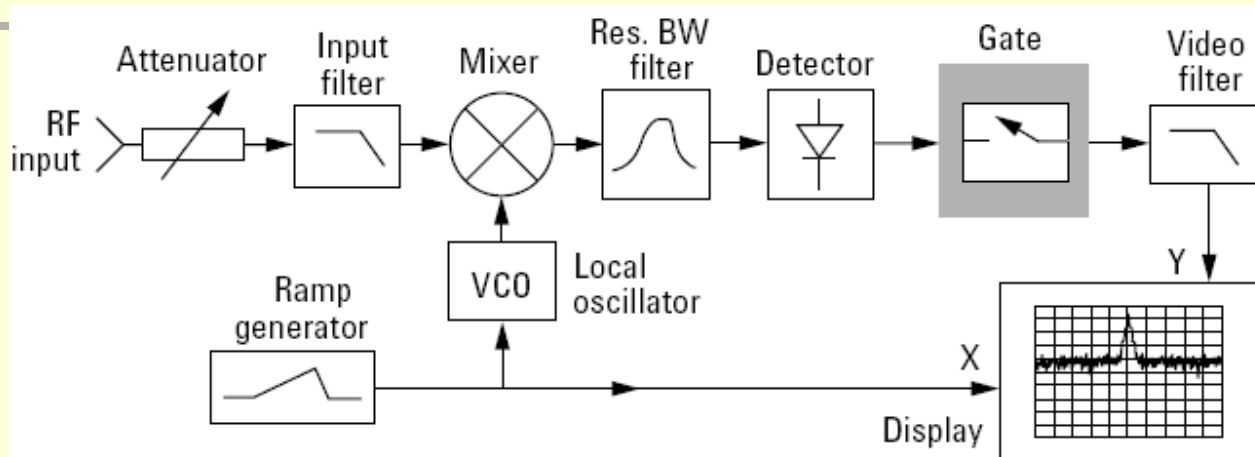
FFT Frequency Domain

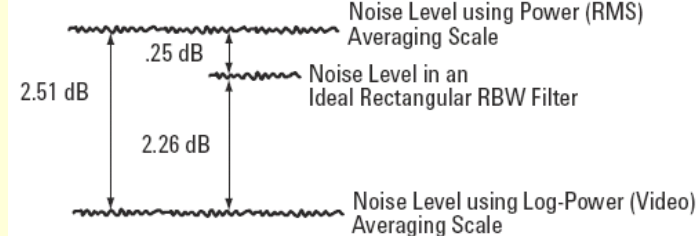


■ 练习：调制指数为多少？

4.5 突发信号的门控观测

- Burst Signal with/without time gating
 - 回避脉冲频谱的影响
 - TDMA, pulsed RF, Burst modulated, ...





4.6 噪声测量问题

- 当随机噪声是我们的测量信号时，超外差式频谱仪显示的噪声数值比实际的噪声电平小
 - 线性显示
 - 输入高斯白噪声被IF限带，成为窄带正态随机变量，包络呈现瑞利分布，均方根值为 1.253σ 。由于频谱仪是峰值响应的电压表，对正弦波校准为均方根值，换算时乘以系数0.707，因此频谱仪读数为 0.886σ 。因此实际高斯白噪声的噪声功率需要加1.05dB来进行修正
 - 对数显示
 - 对数显示时瑞利分布被扭曲，显示进一步降低了1.45dB，因此需要加2.5dB来进行修正
 - 滤波器形状修正
 - 滤波器不是理想矩形，噪声带宽和3dB带宽之间不等，需要修正。考虑了滤波器形状修正后的修正因子大约为2dB



练习题

- 频谱分析仪采用了超外差式结构，是否必然存在着镜像频率的问题？如果没有，做何解释？如果有，会出现什么样的现象？如何解决？
- 中频滤波器带宽是超外差式频谱仪的分辨率带宽RBW。在3.6GHz中频上是否可以实现1kHz的带宽（ $RBW = 1\text{kHz}$ ）？如果可以，如何实现？如果不可以，频谱仪结构上如何改进？
- 测试AM信号，载波频率为100MHz，边带频率幅度为-26dBc，则调幅波的调制指数为多少？