

# 频谱分析仪技术基础

## 第一章 基本理论

罗健

R&S 中国培训中心

© 2002

[www.rohde-schwarz.com.cn](http://www.rohde-schwarz.com.cn)

# 信号分析及频谱分析概述

---

## 一、基本理论

- 信号分析及频谱分析概述
- 频谱仪的工作原理
- 频谱仪的特性

## 二、工程应用

- 仪器操作
- 常用功能与测试

## 1、信号分析及频谱分析概述

### 周期信号

- 单载波信号
- 扫描信号

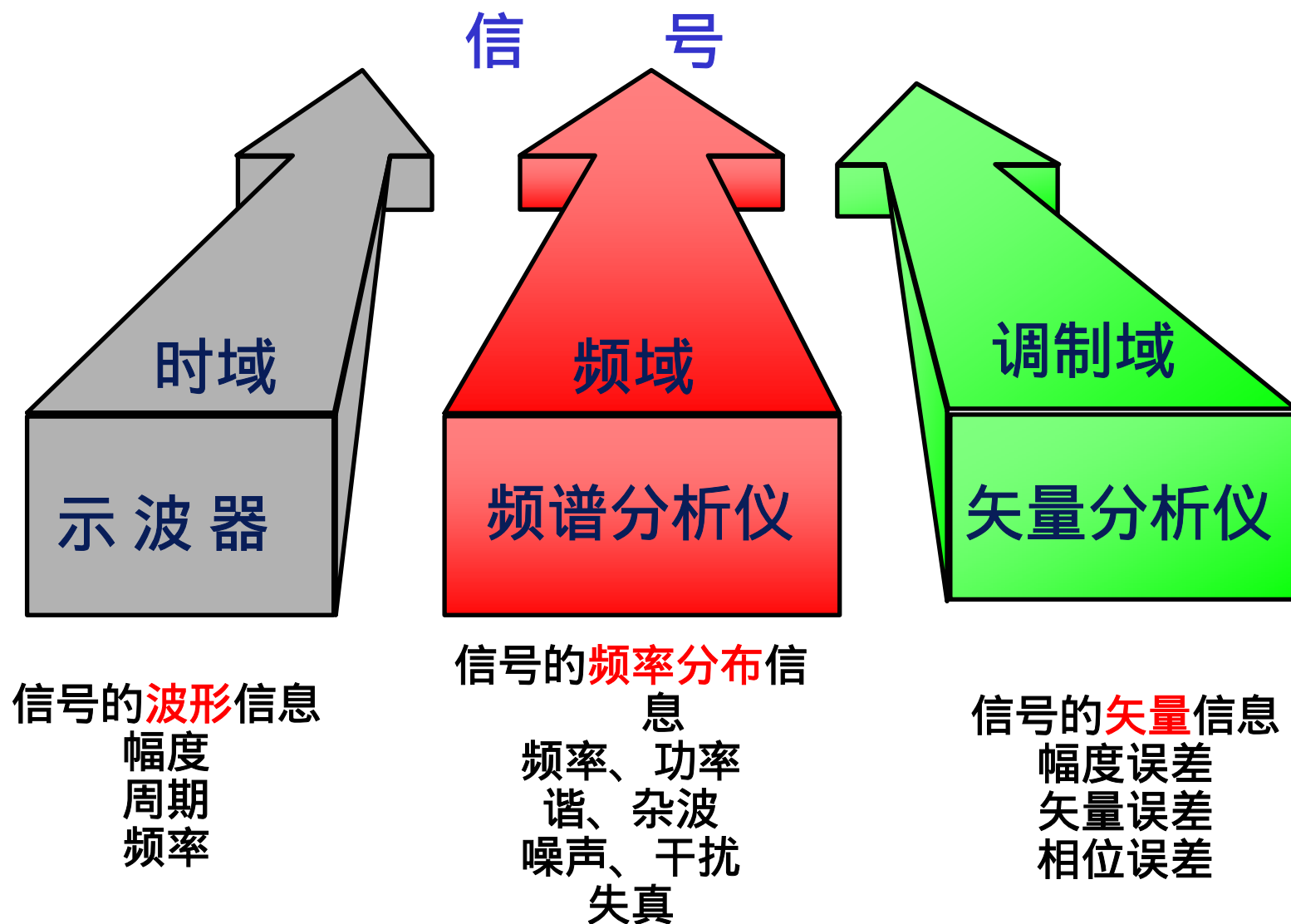
### 非周期信号

- 噪声信号
- 瞬态信号

### 调制信号

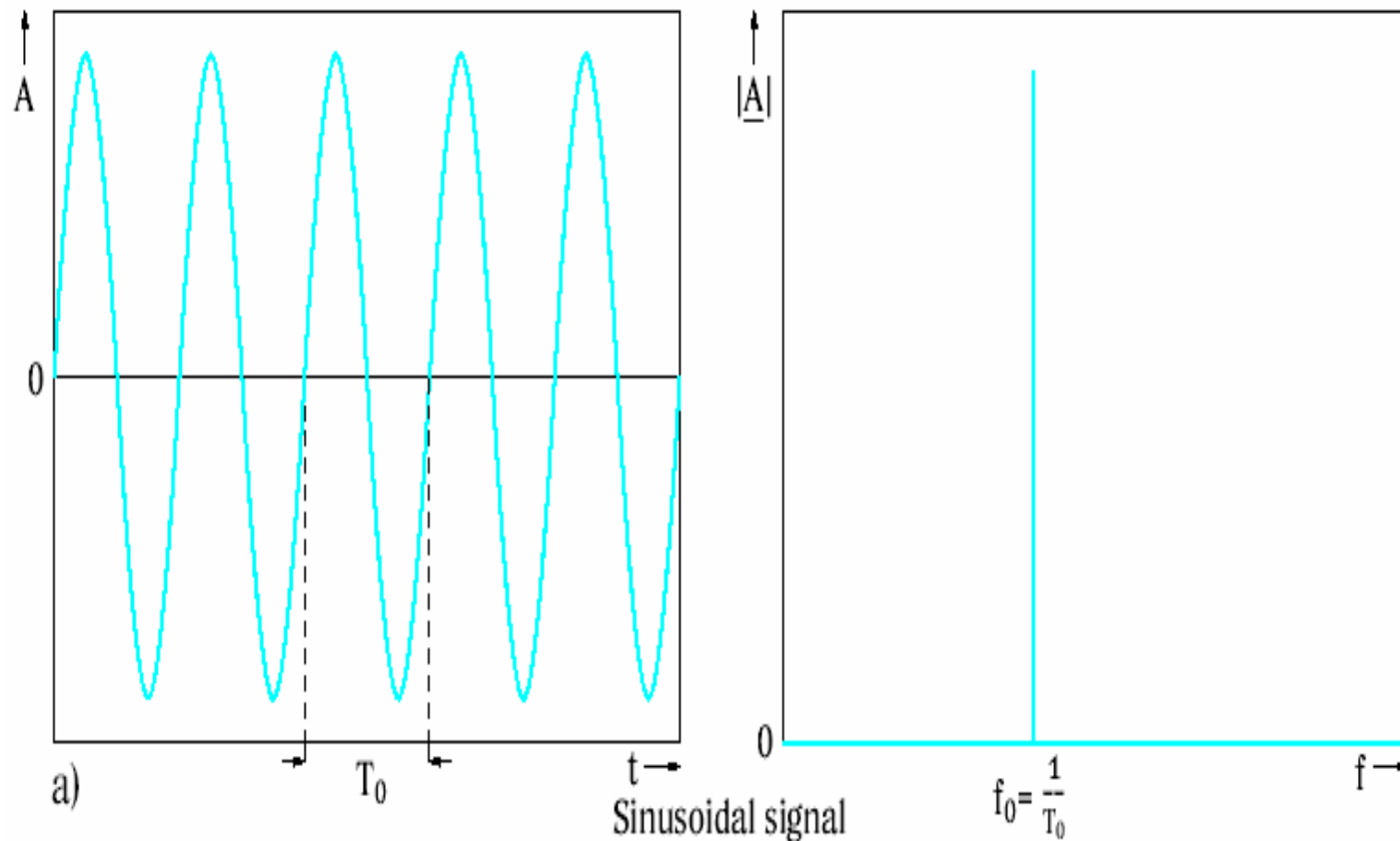
- 模拟调制
- 数字调制

# 信号分析及频谱分析概述

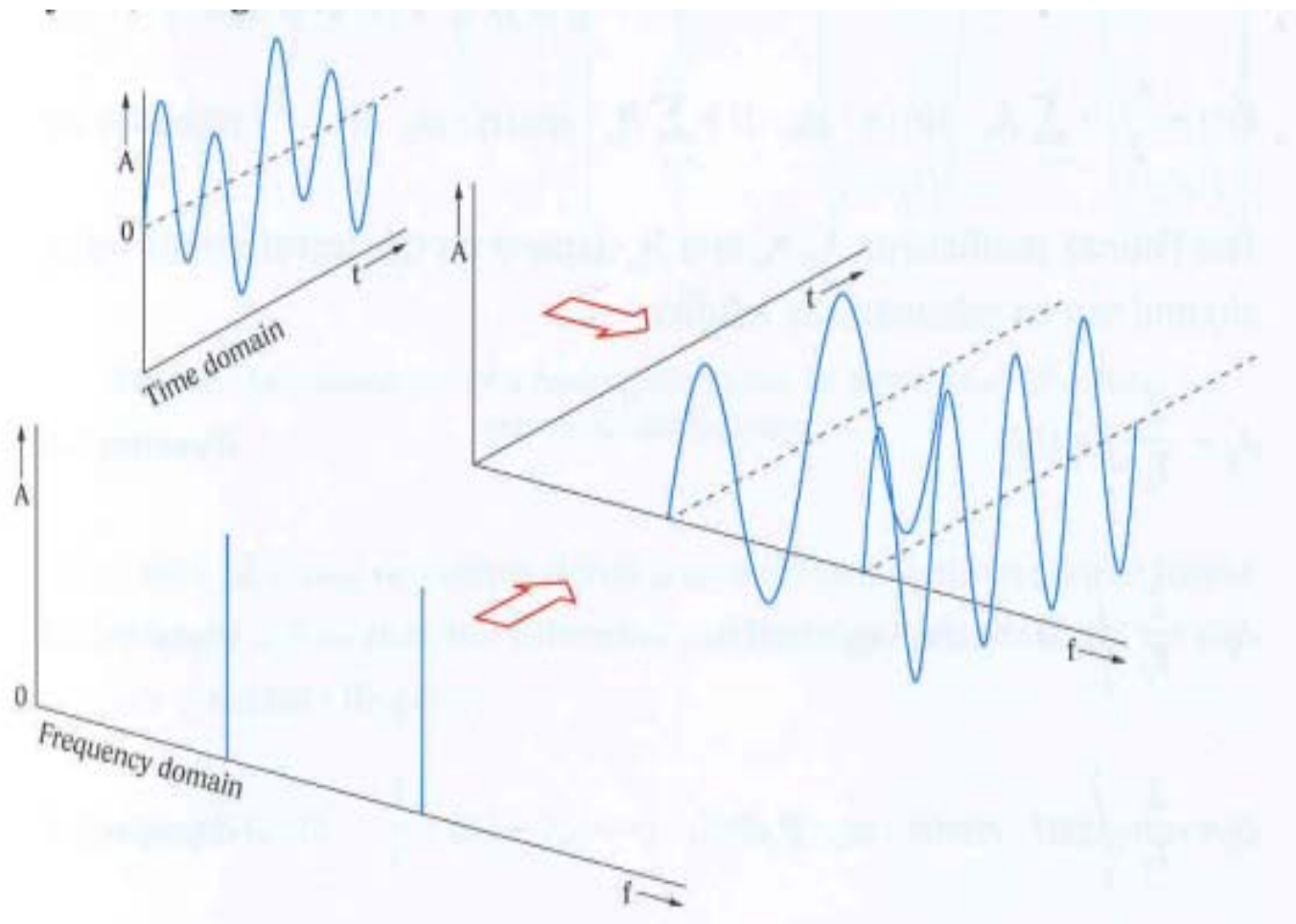


# 信号分析及频谱分析概述

## 理想单载波信号在时域和频域的测量结果

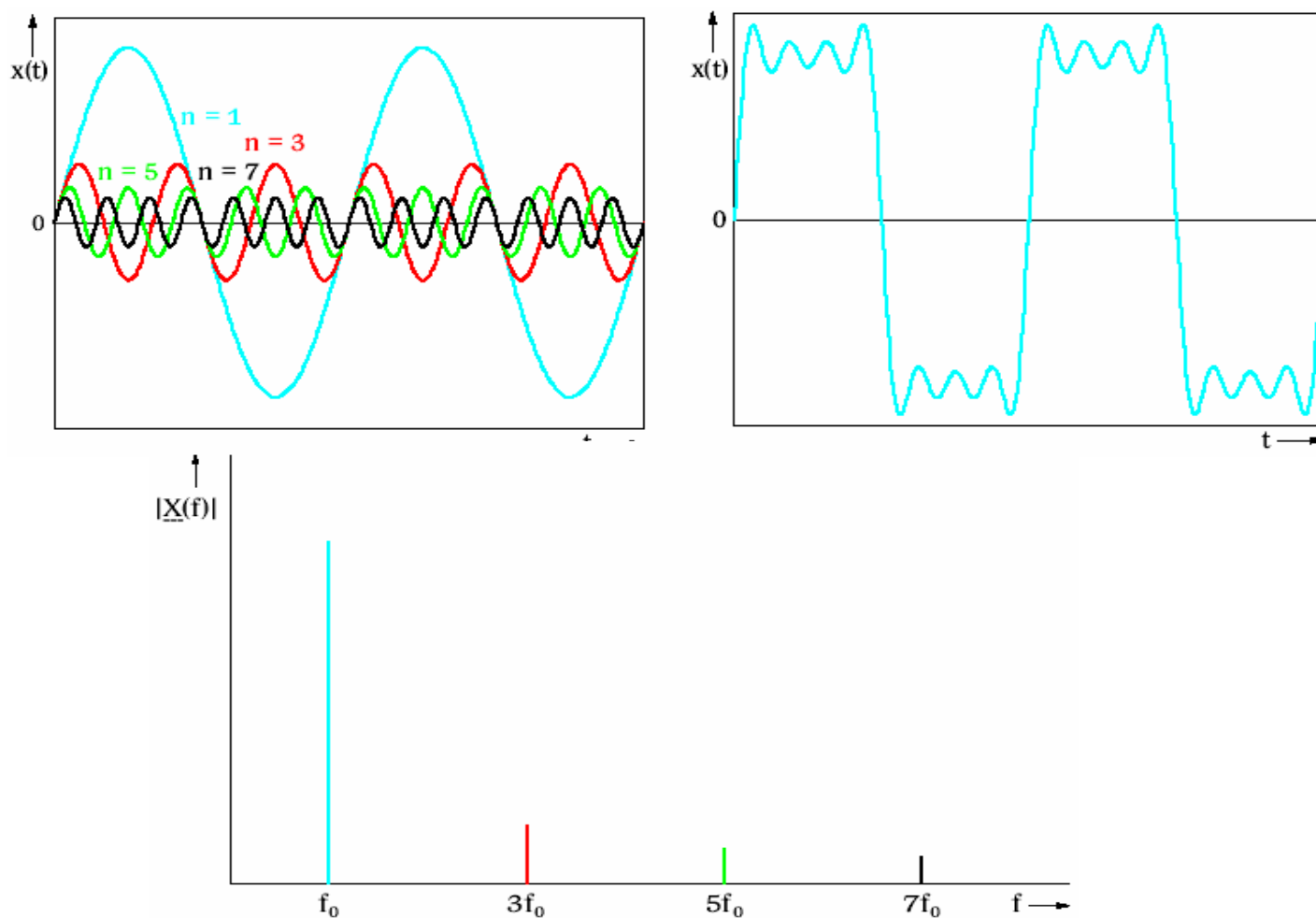


## 频域测量对信号分析的作用



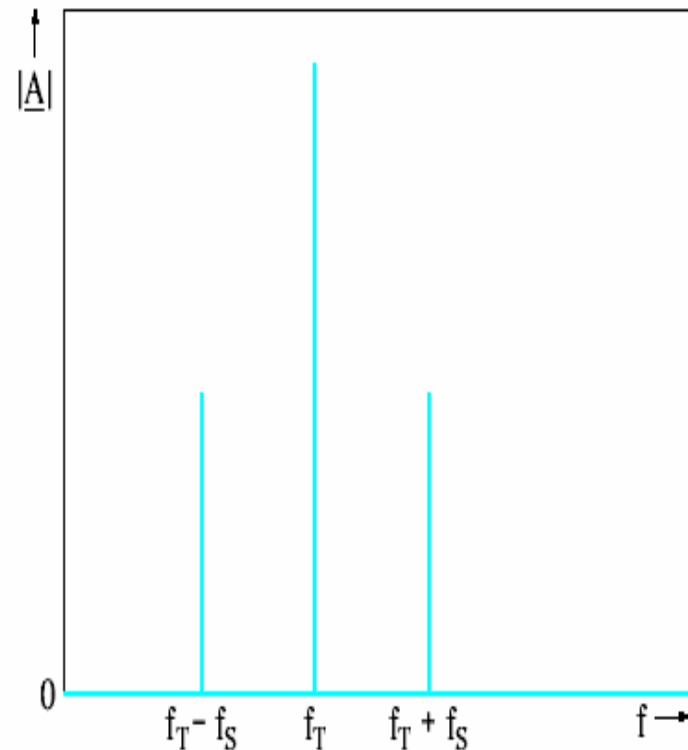
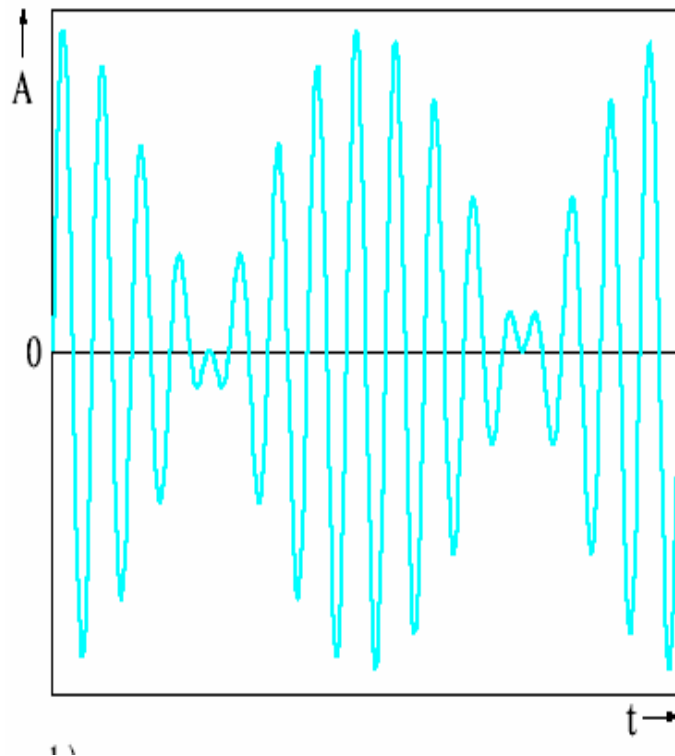
# 信号分析及频谱分析概述

## 周期信号的频谱



## 信号分析及频谱分析概述

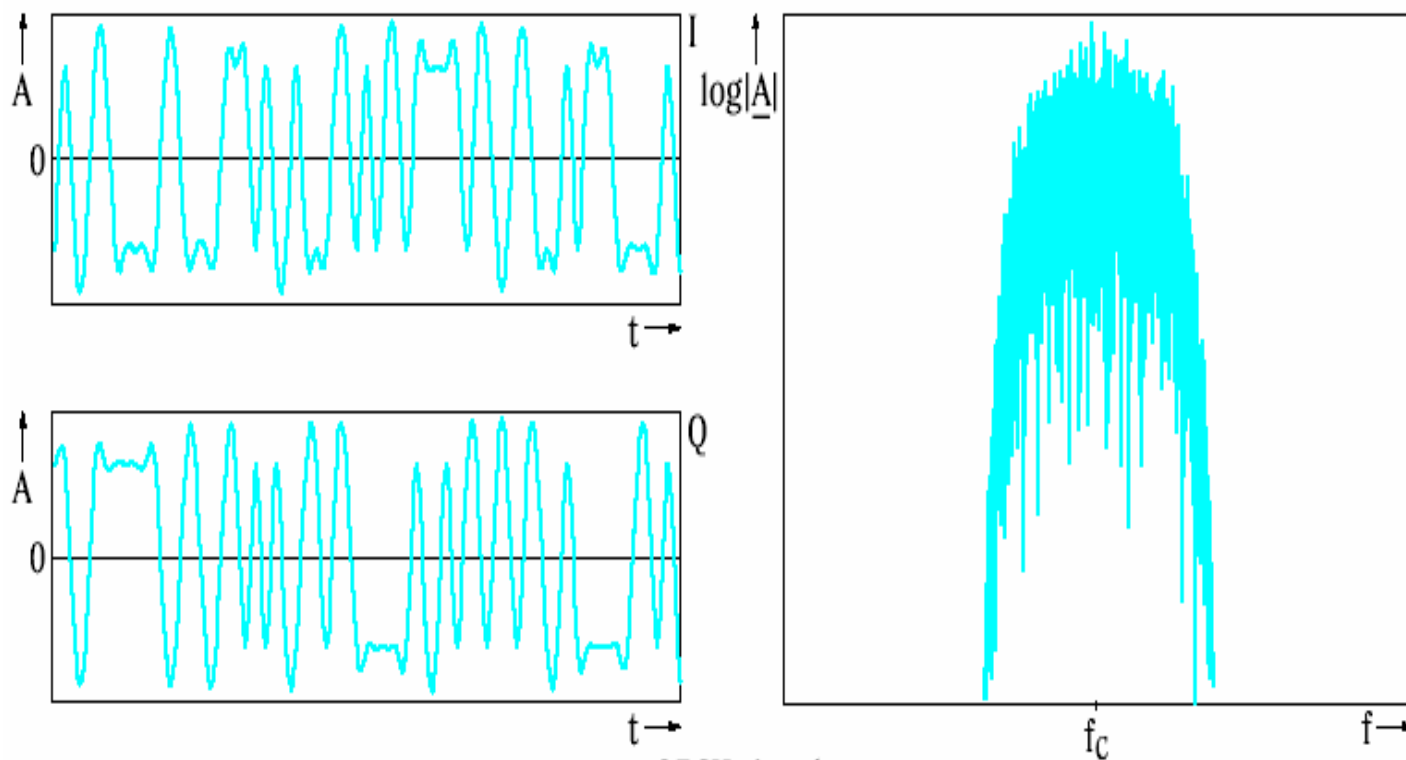
模拟调制信号：AM、FM、PM的调制指数和调制频率等





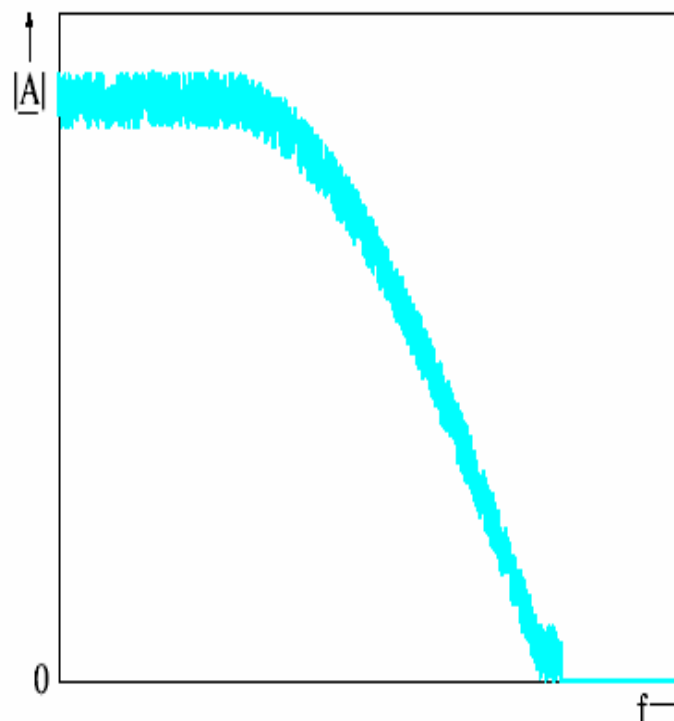
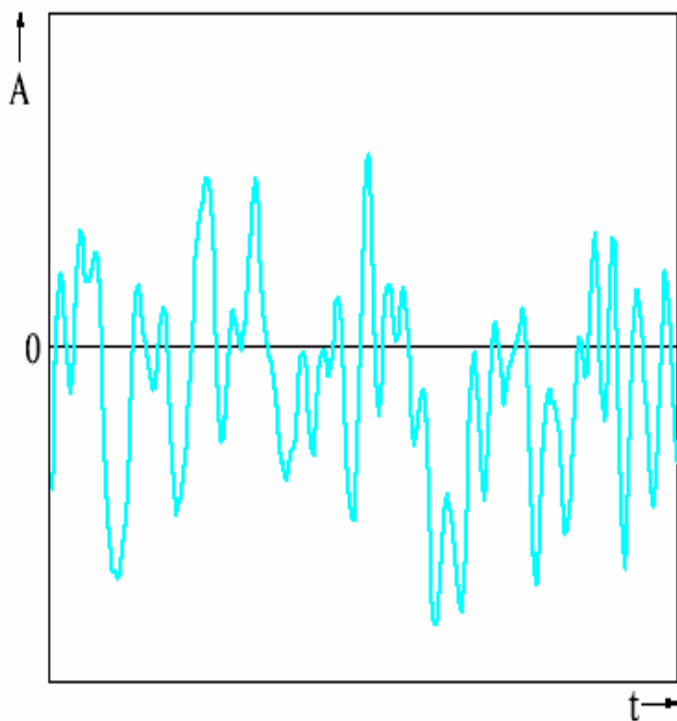
## 信号分析及频谱分析概述

数字调制信号：信道功率、相邻信道功率比、占有带宽等



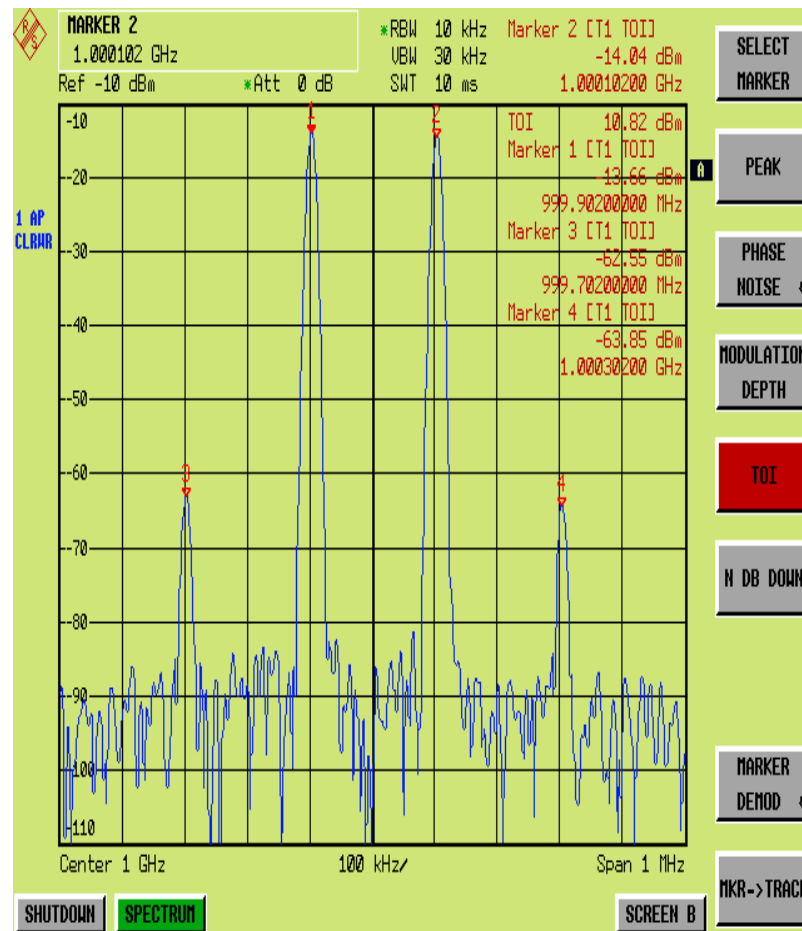
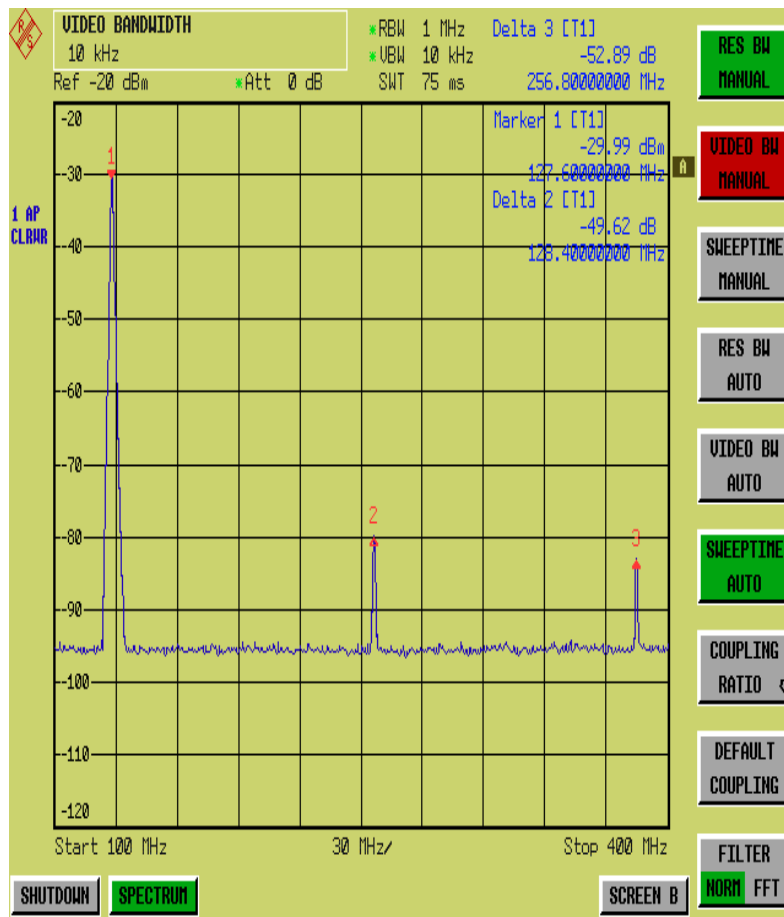
# 信号分析及频谱分析概述

## 噪声信号：噪声功率、相位噪声



# 信号分析及频谱分析概述

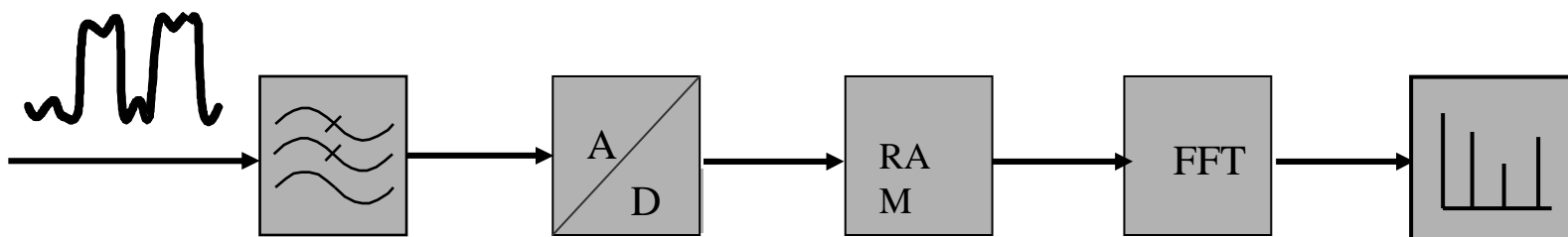
## 失真信号：谐波失真、非谐波失真、杂散



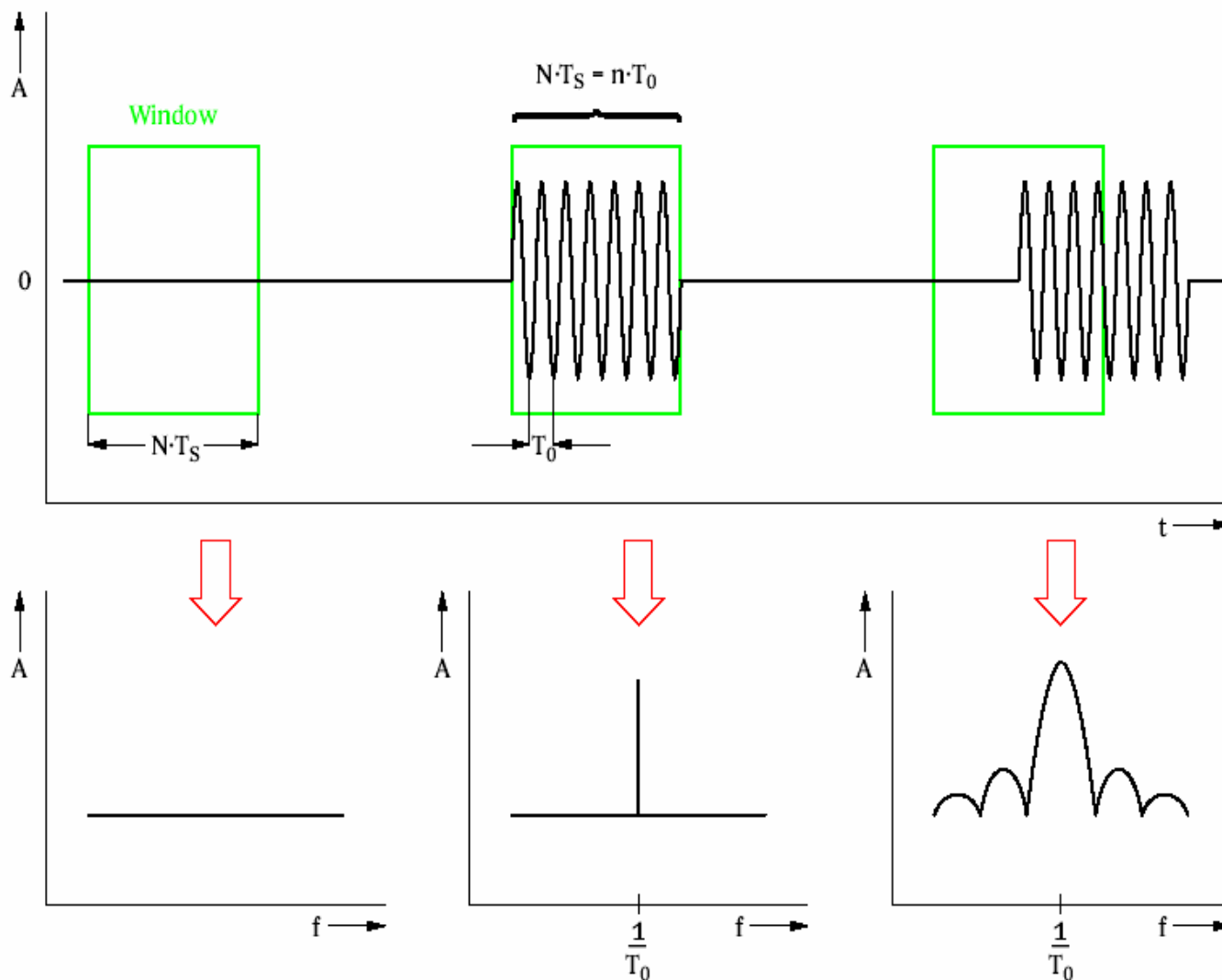
# 频谱分析仪工作原理

## 频谱仪的类型

### 1、傅立叶分析仪

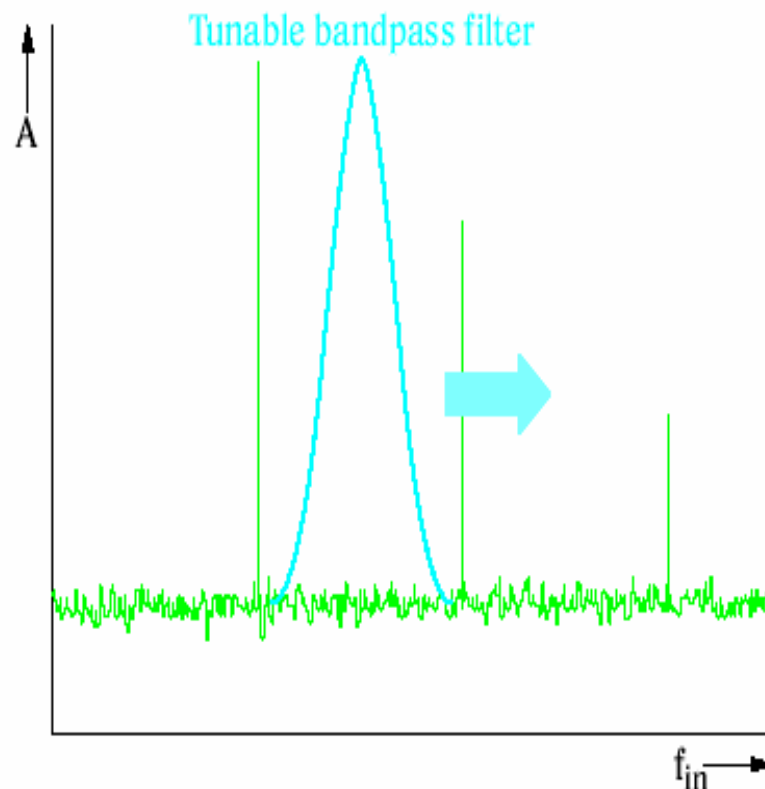
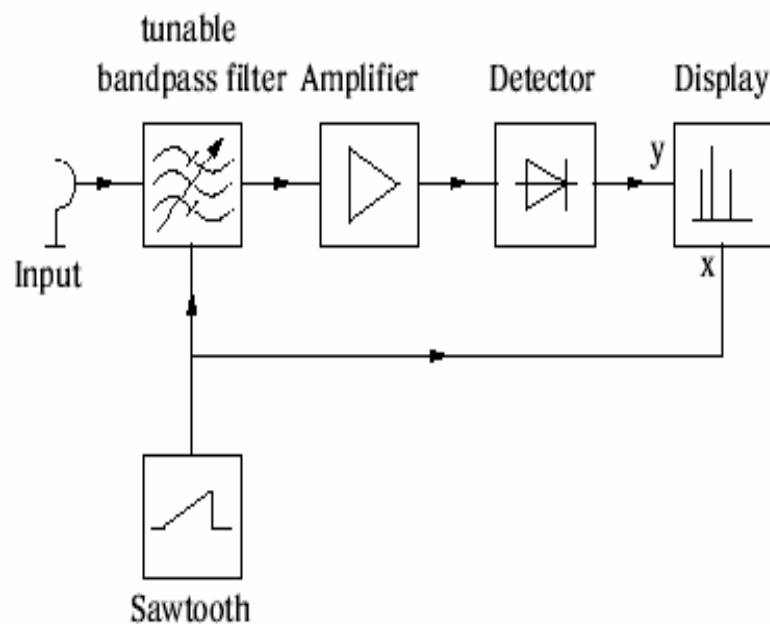


# 频谱分析仪工作原理



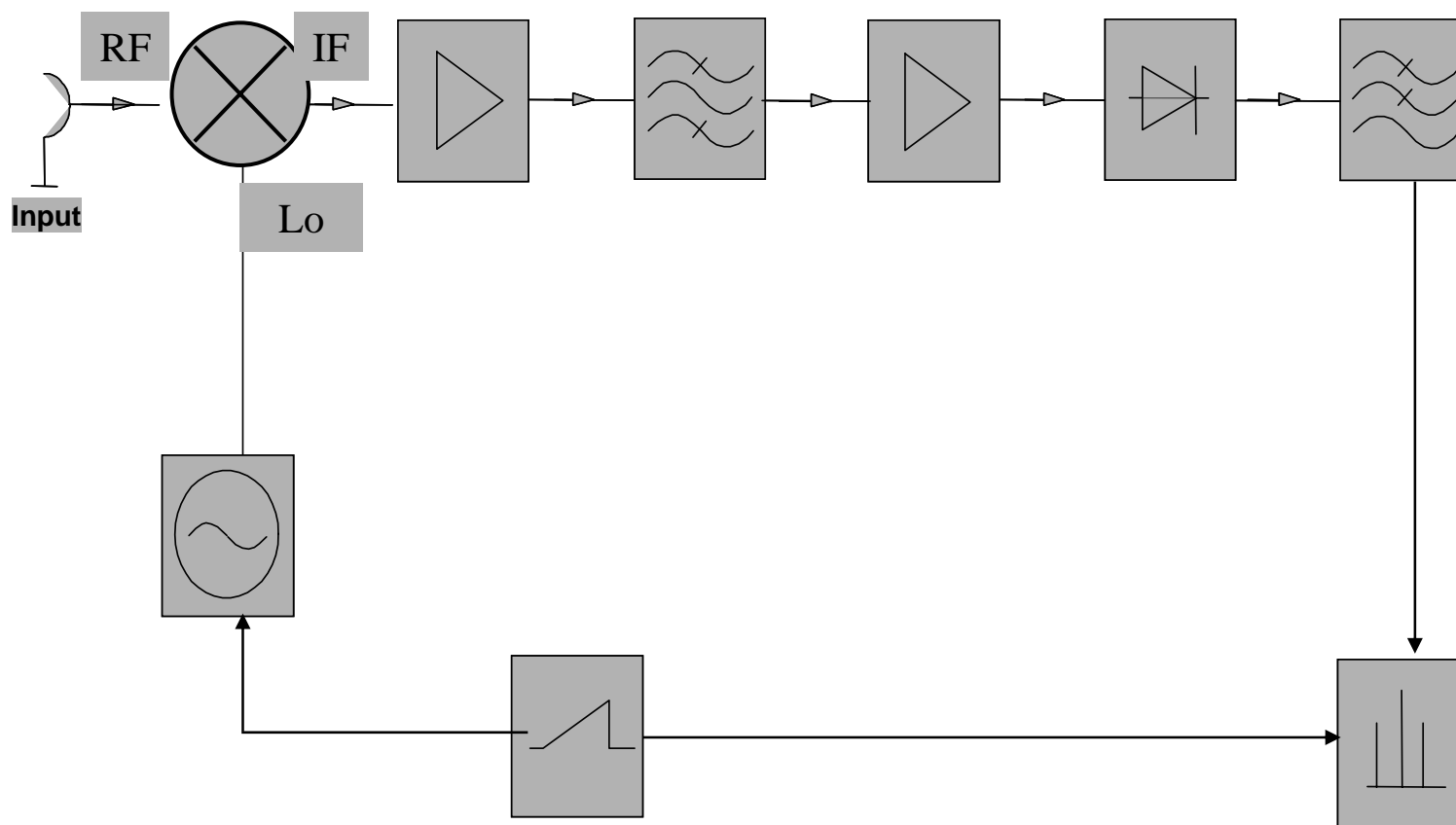
# 频谱分析仪工作原理

## 2、外差式扫描分析仪



# 频谱分析仪工作原理

## 超外差式扫描调谐分析仪



# 频谱分析仪工作原理

---

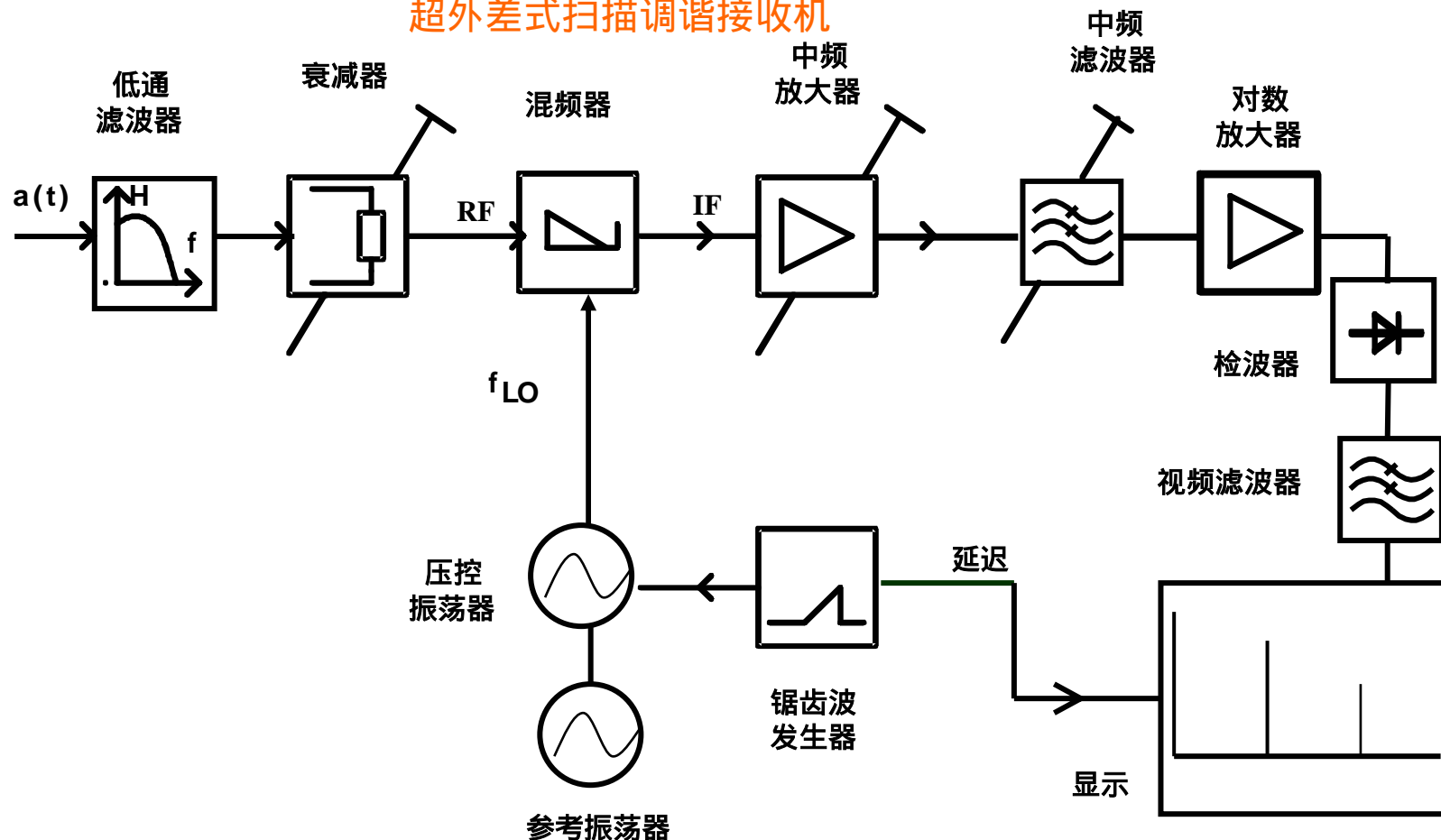
## 频谱仪的主要设置参数

- 频率显示范围
  - ↗ 中心频率和频率跨度
  - ↘ 起始频率和终止频率
- 电平显示范围
  - ↗ 参考电平和量程跨度
- 频率分辨率
- 分辨带宽
- 扫描时间

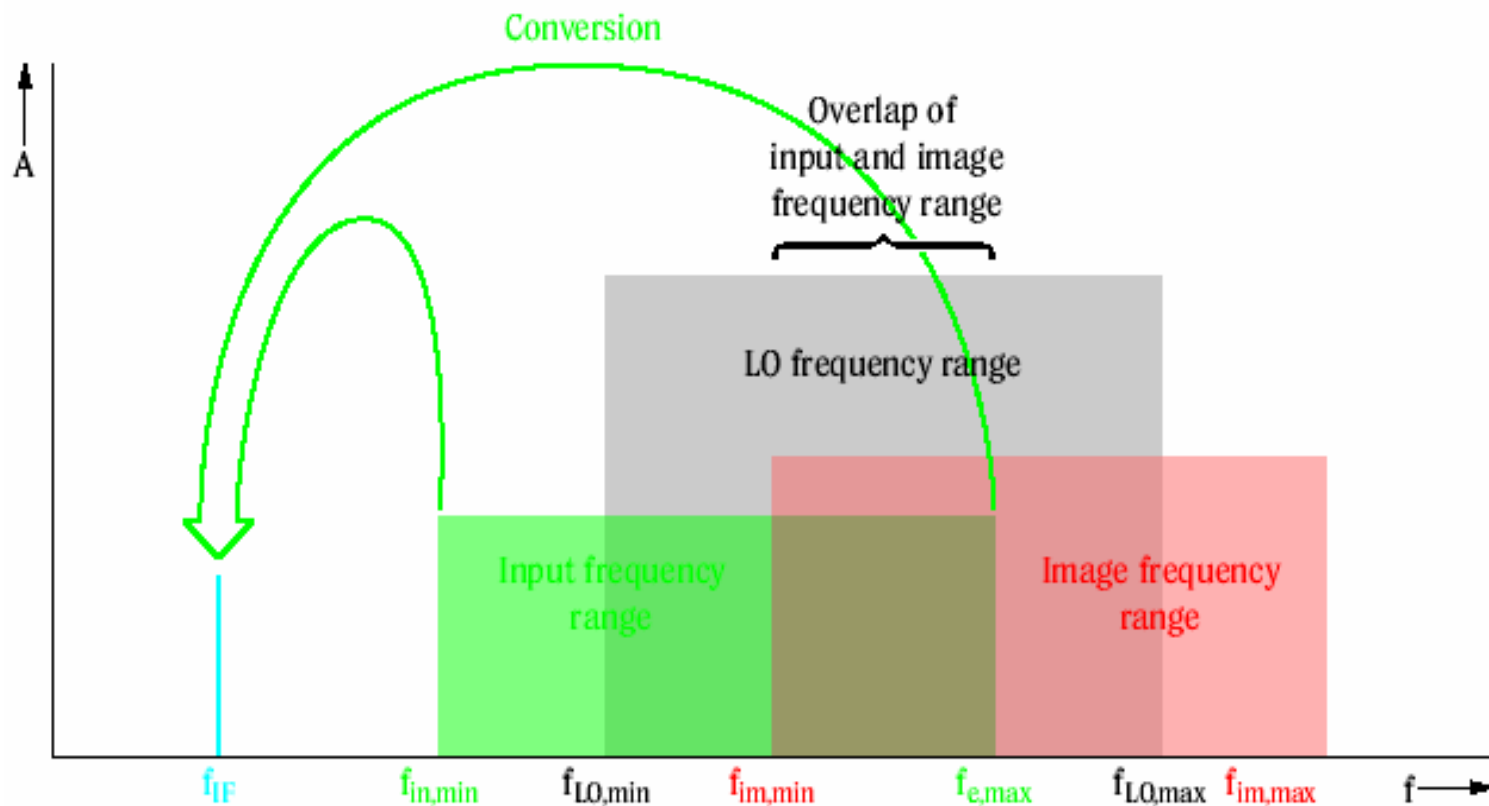


## 2、频谱分析仪的工作原理

### 超外差式扫描调谐接收机

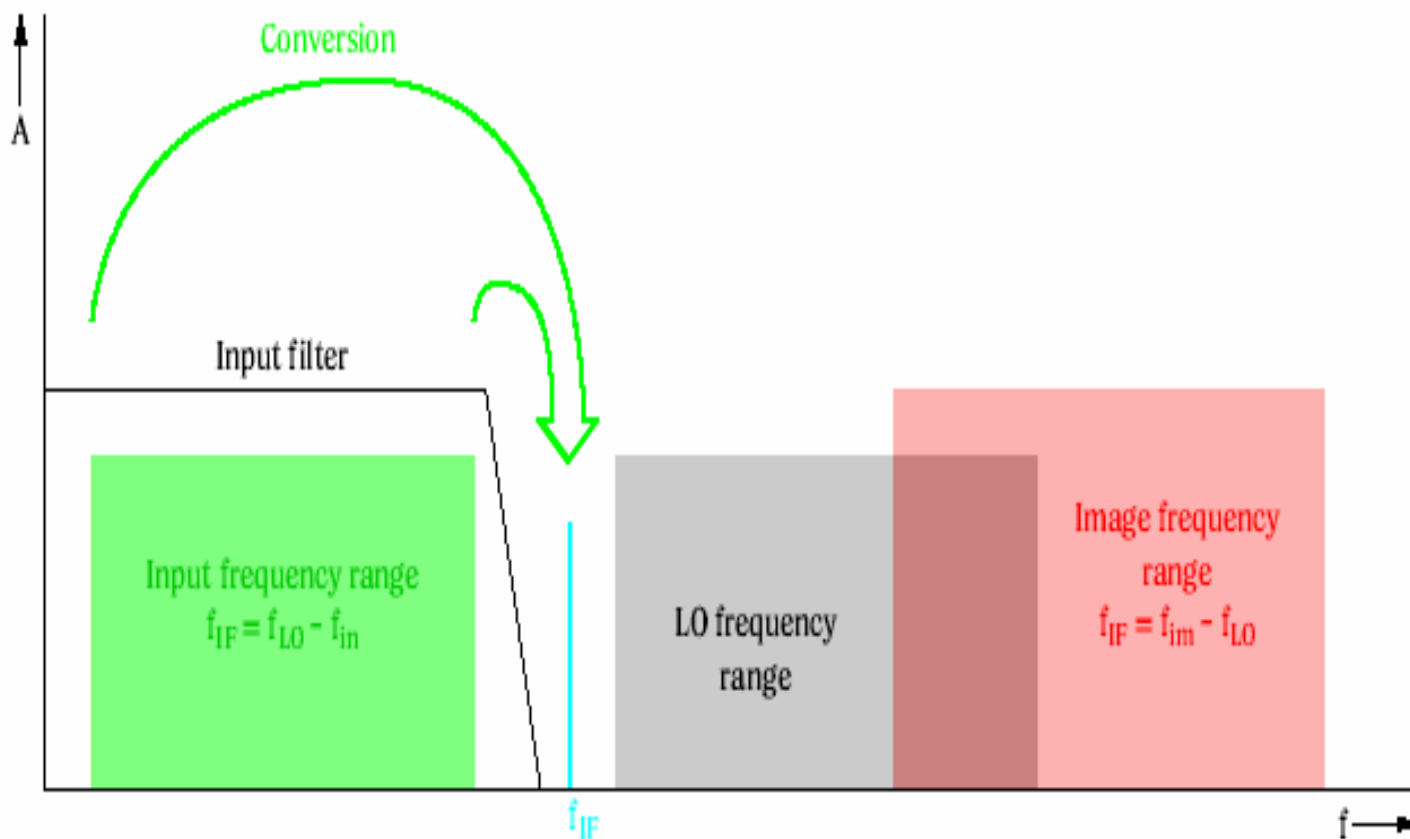


## 镜像的影响

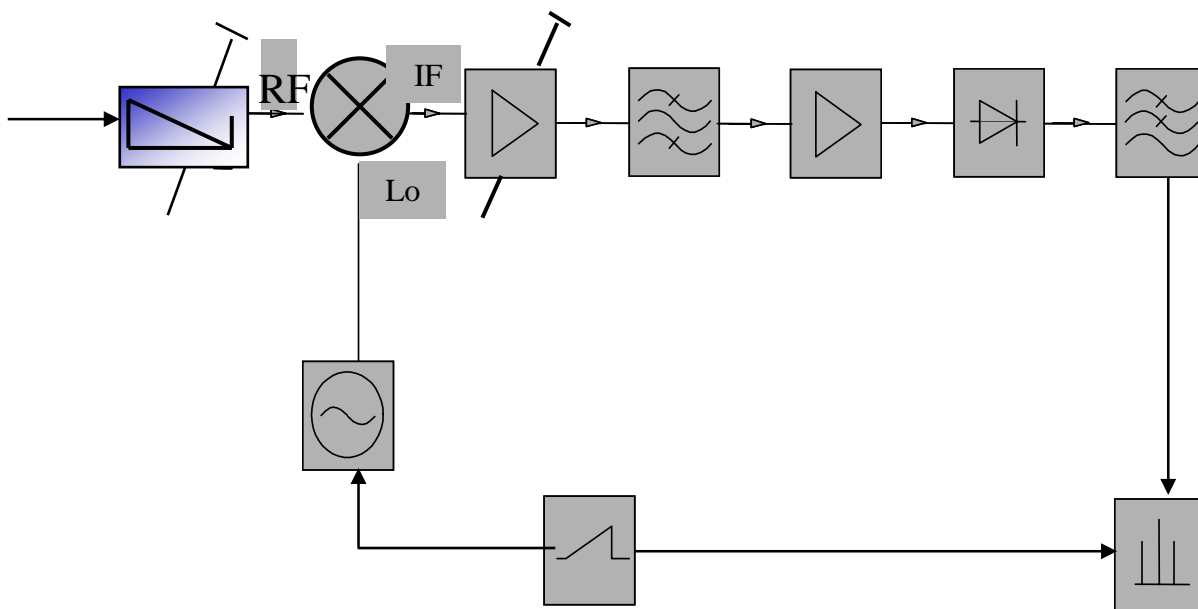


# 频谱分析仪工作原理

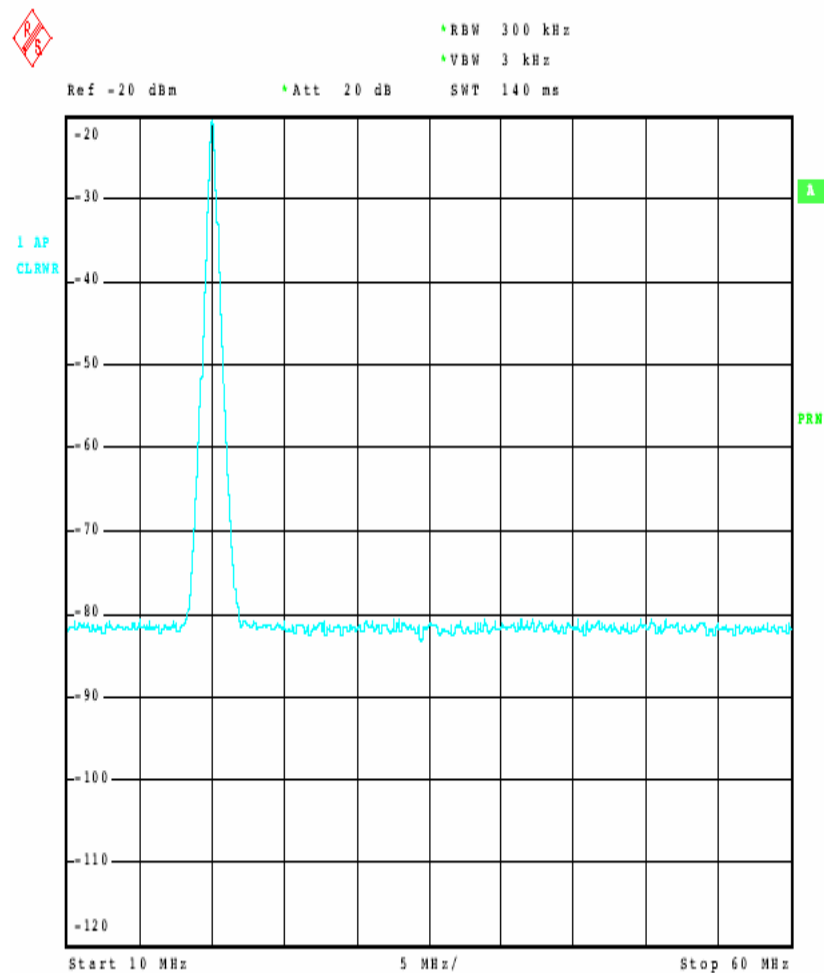
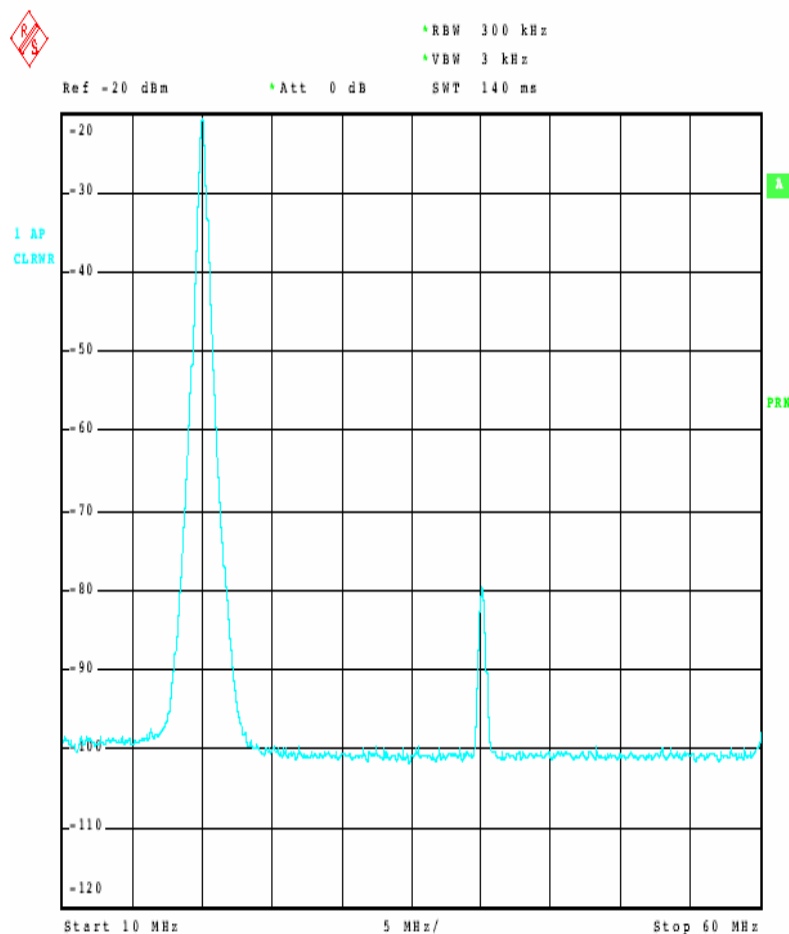
## 镜像的抑制



## 衰减器

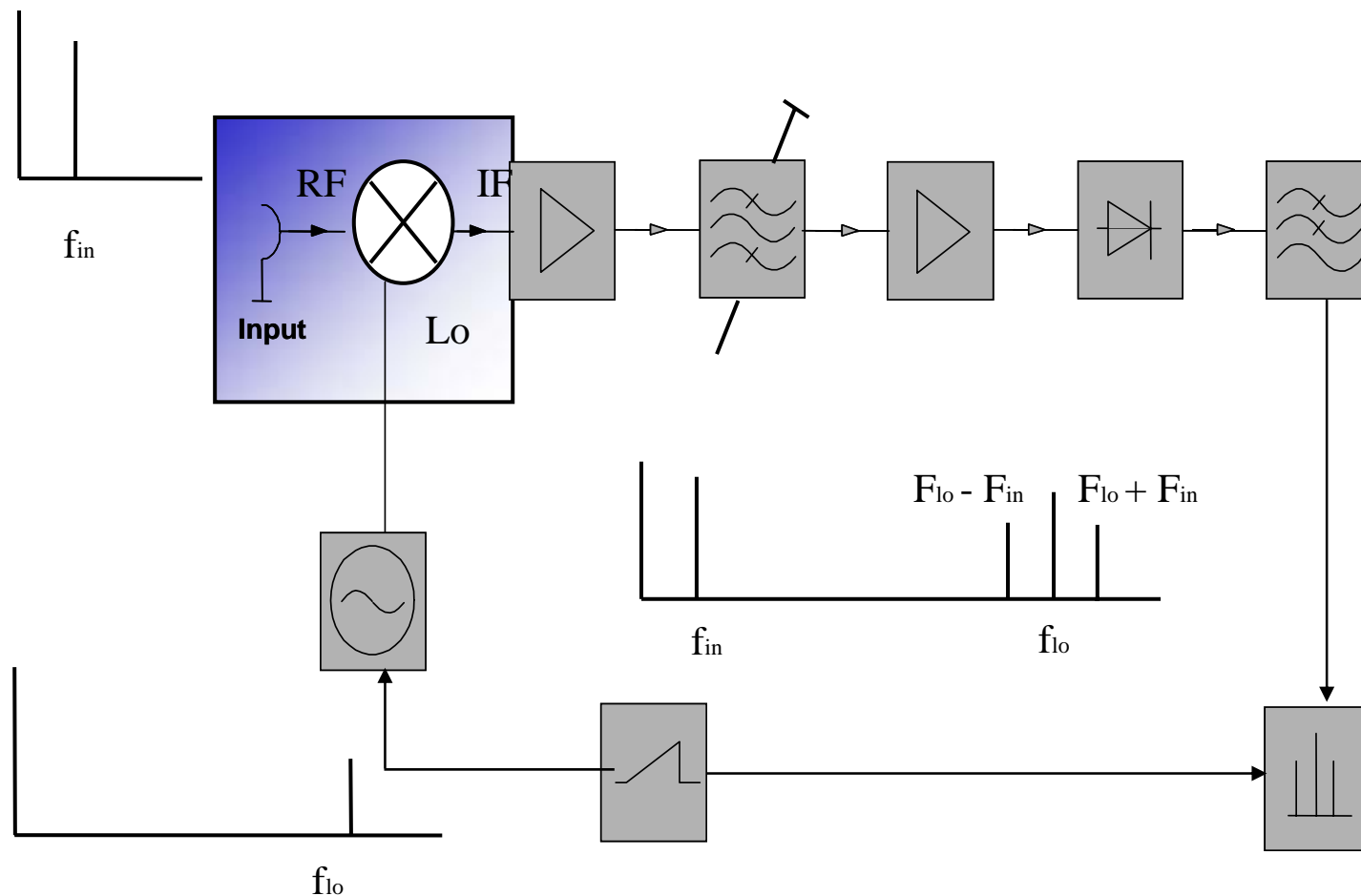


# 频谱分析仪工作原理



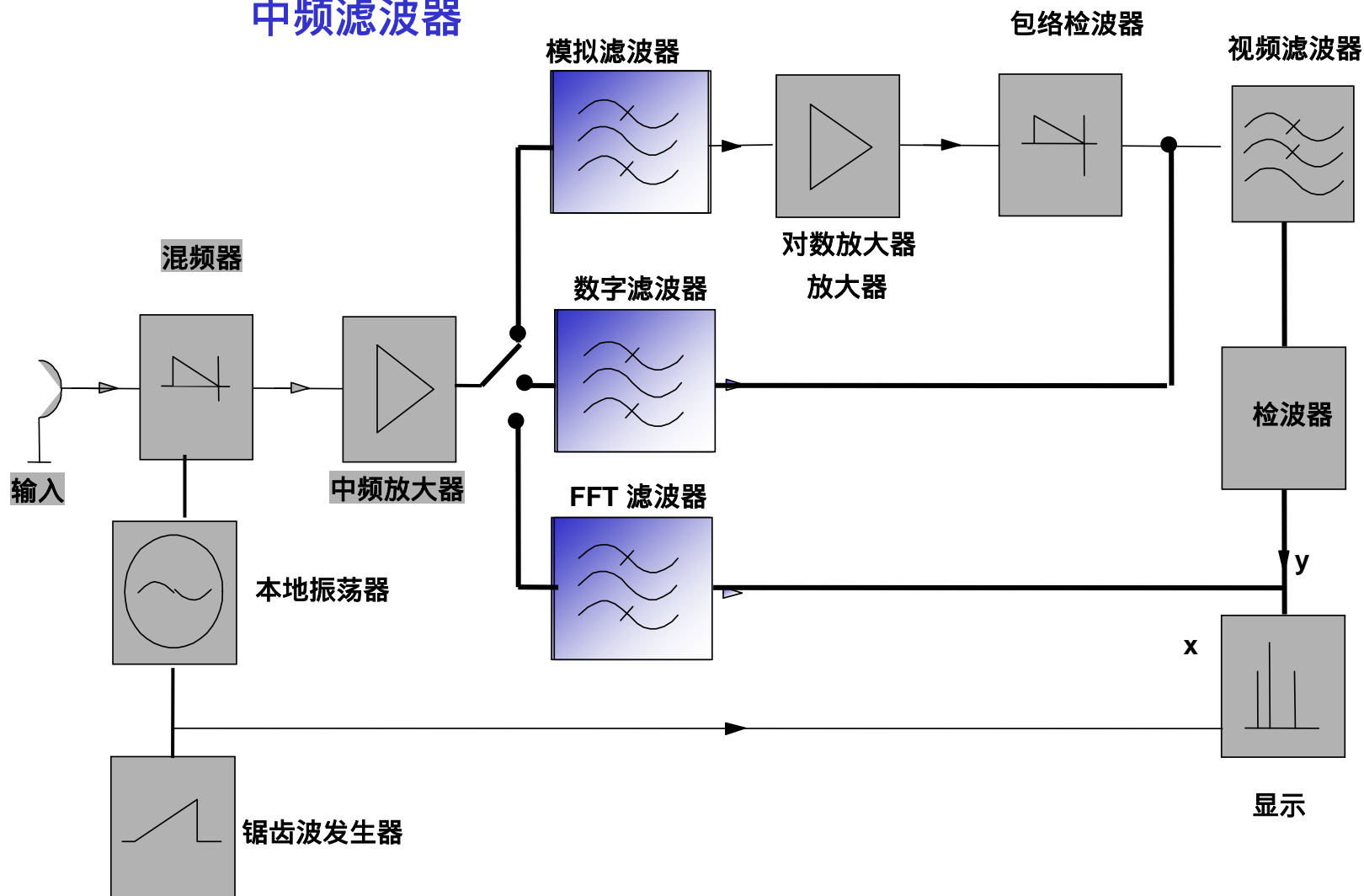
# 频谱分析仪工作原理

## 混频器



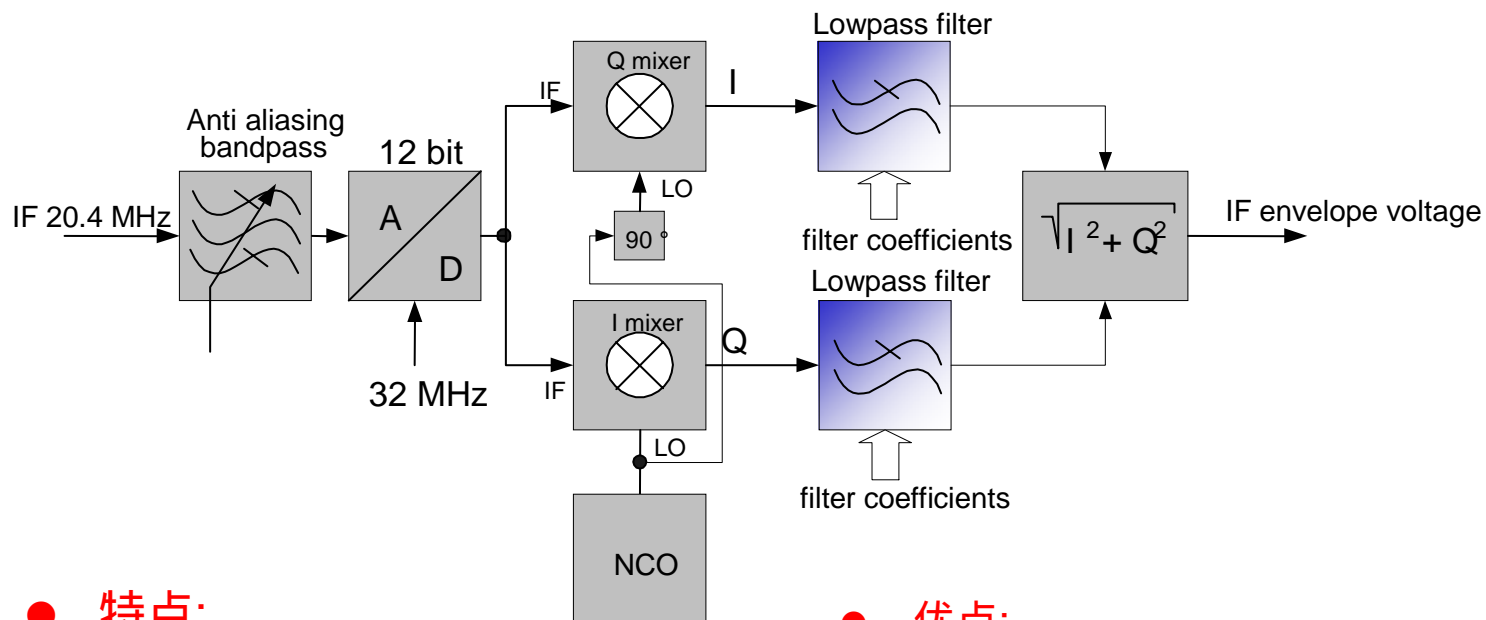
# 频谱分析仪工作原理

## 中频滤波器



# 频谱分析仪工作原理

## 中频滤波器:数字滤波器



### ● 特点:

- ✈ 真正的高斯形状
- ✈ 波形因子4.6
- ✈ 最小扫描时间
- $k = 1$**  通过补偿可以达到

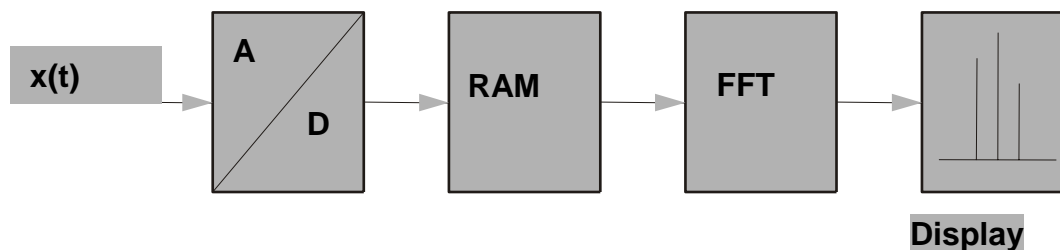
### ● 优点:

- ✈ 小波形因子 => 更高的灵敏度
- ✈ 快速扫描
- ✈ 更高的带宽精度
- 测量可以得到更高的电平精度
- 用于噪声或类噪声信号
- ✈ 没有温度或老化漂移



# 频谱分析仪工作原理

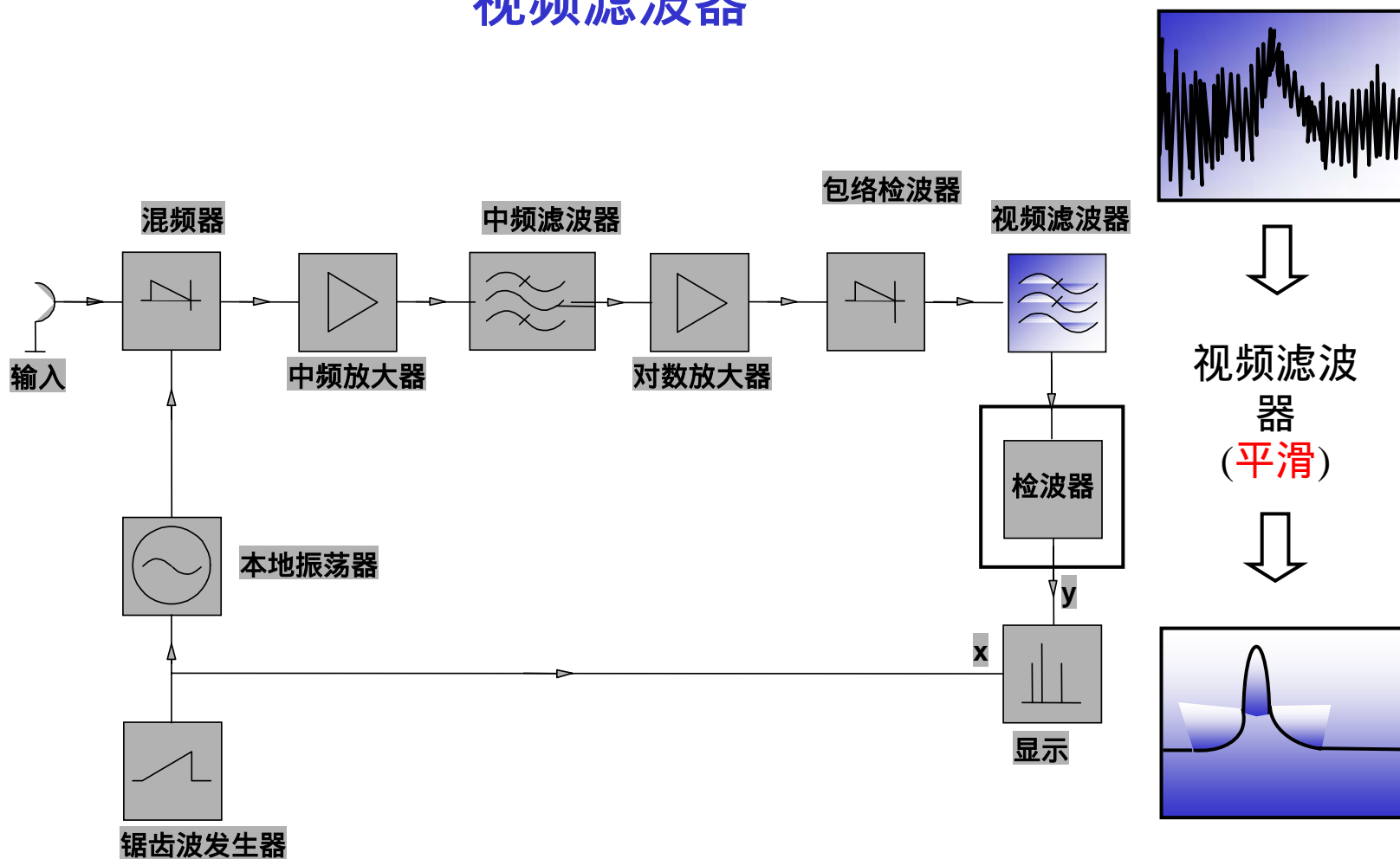
## 中频滤波器: FFT 滤波器



- 最大频率范围受限于AD变换器的带宽
- 快速的信号处理要求合理的更新率
- 窄的分辨带宽减少了扫描时间

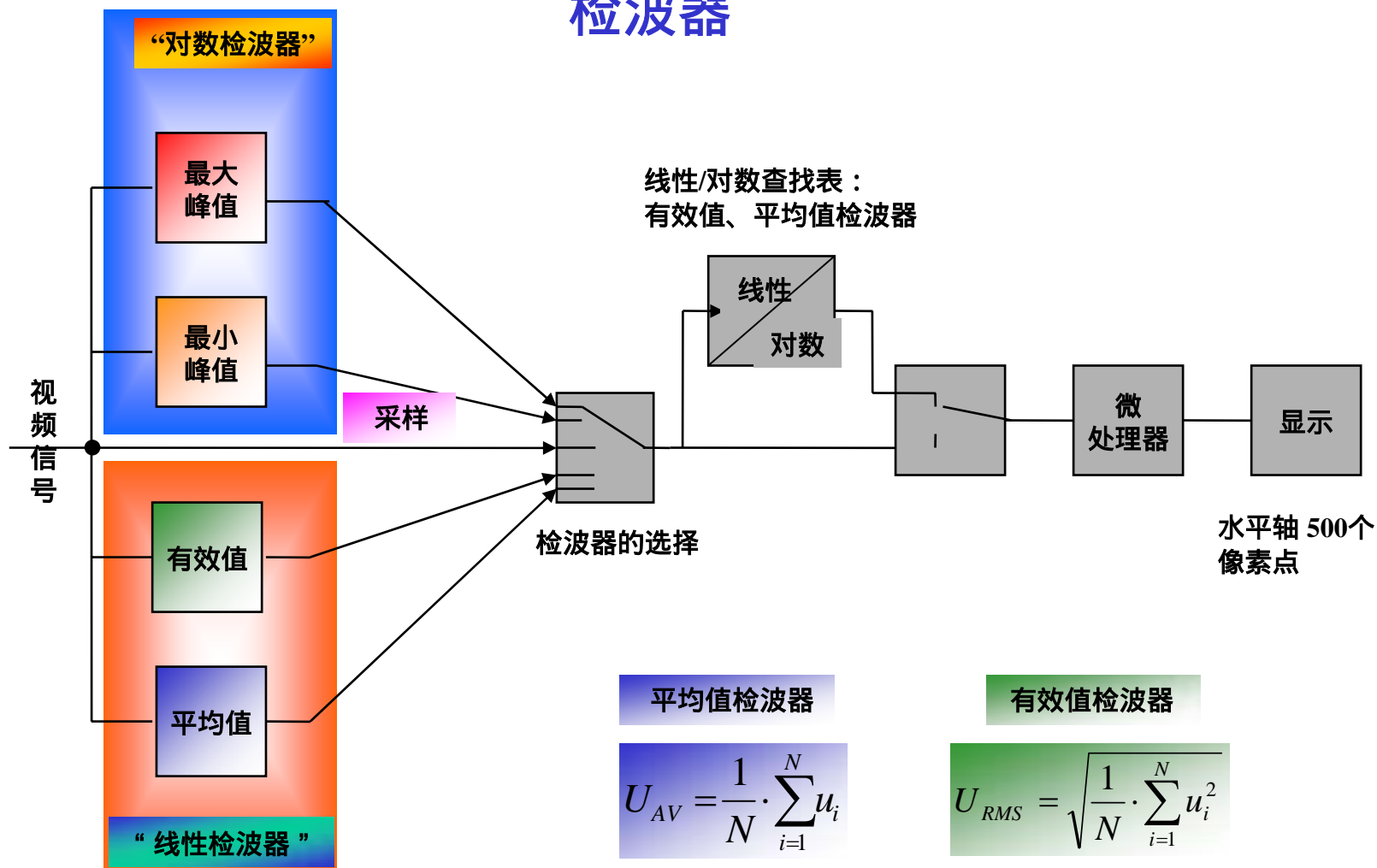
# 频谱分析仪工作原理

## 视频滤波器



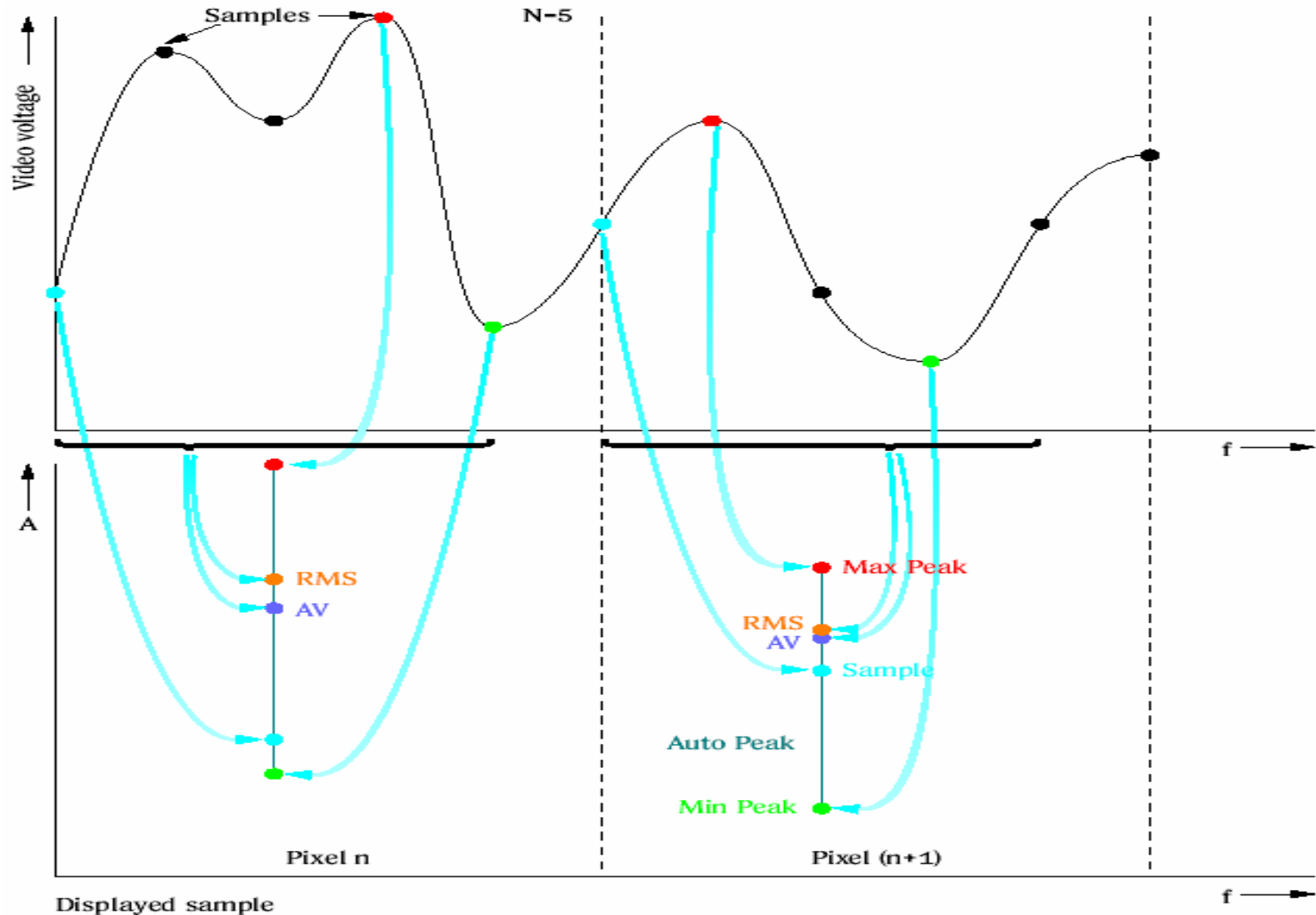
# 频谱分析仪工作原理

## 检波器

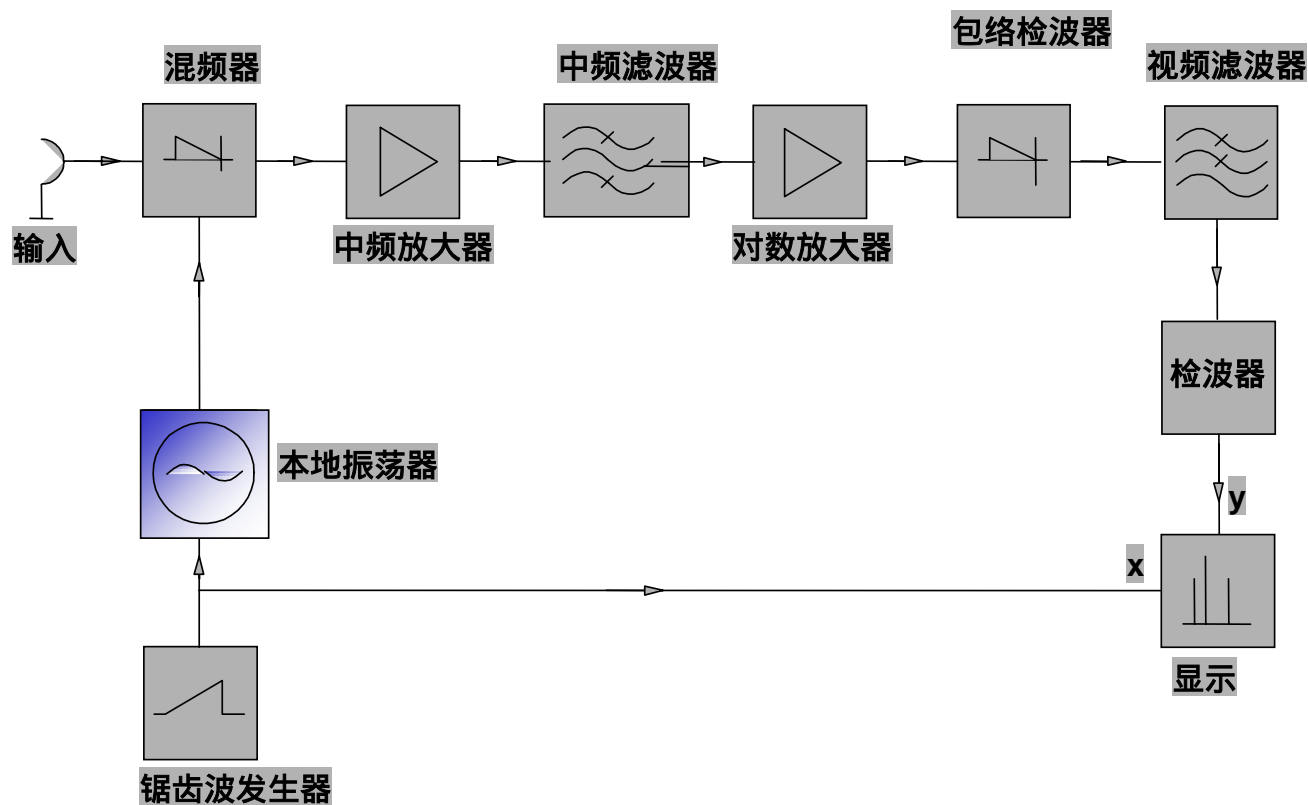


# 频谱分析仪工作原理

## 不同的检波器在显示屏上不同的数据处理



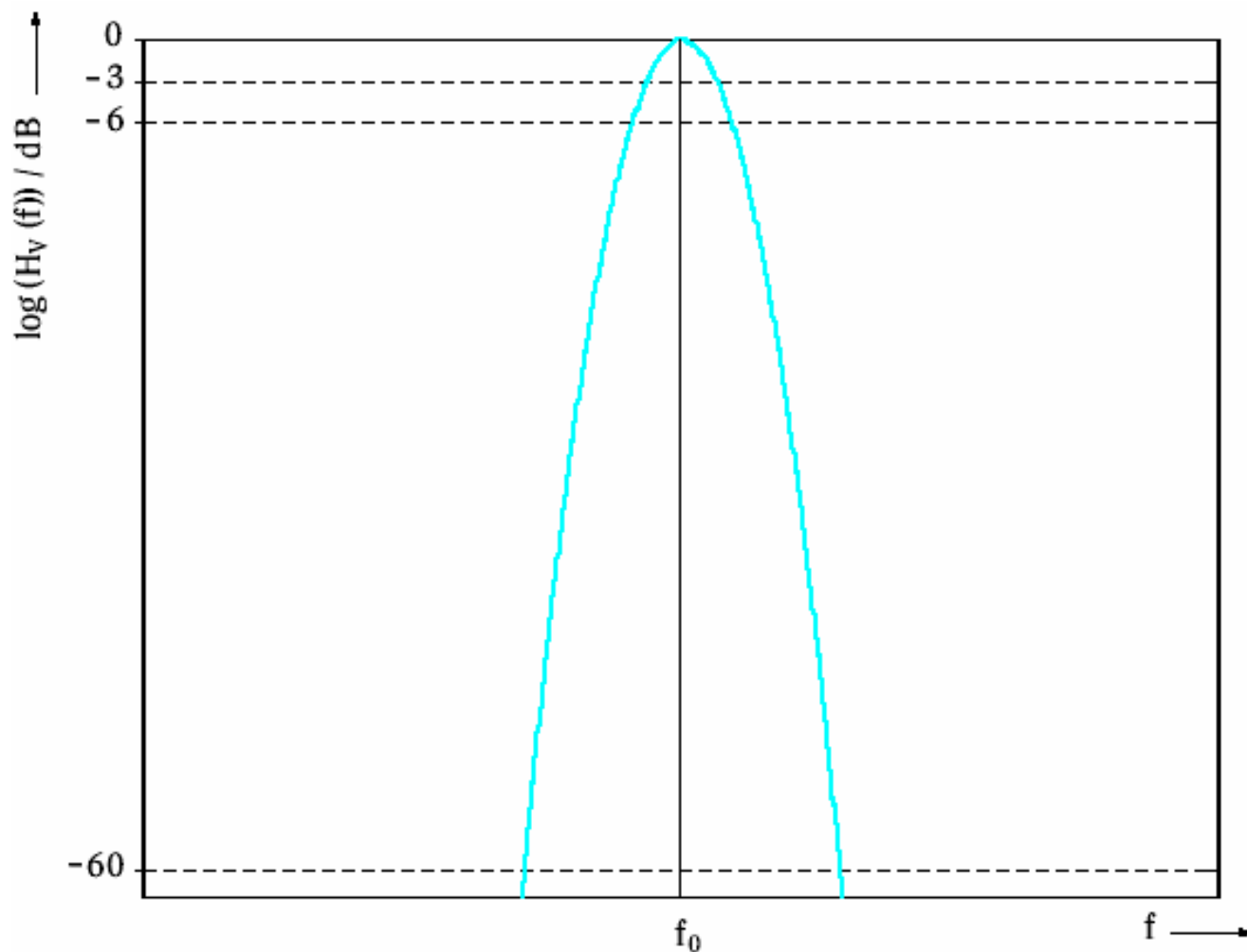
## 本地振荡器



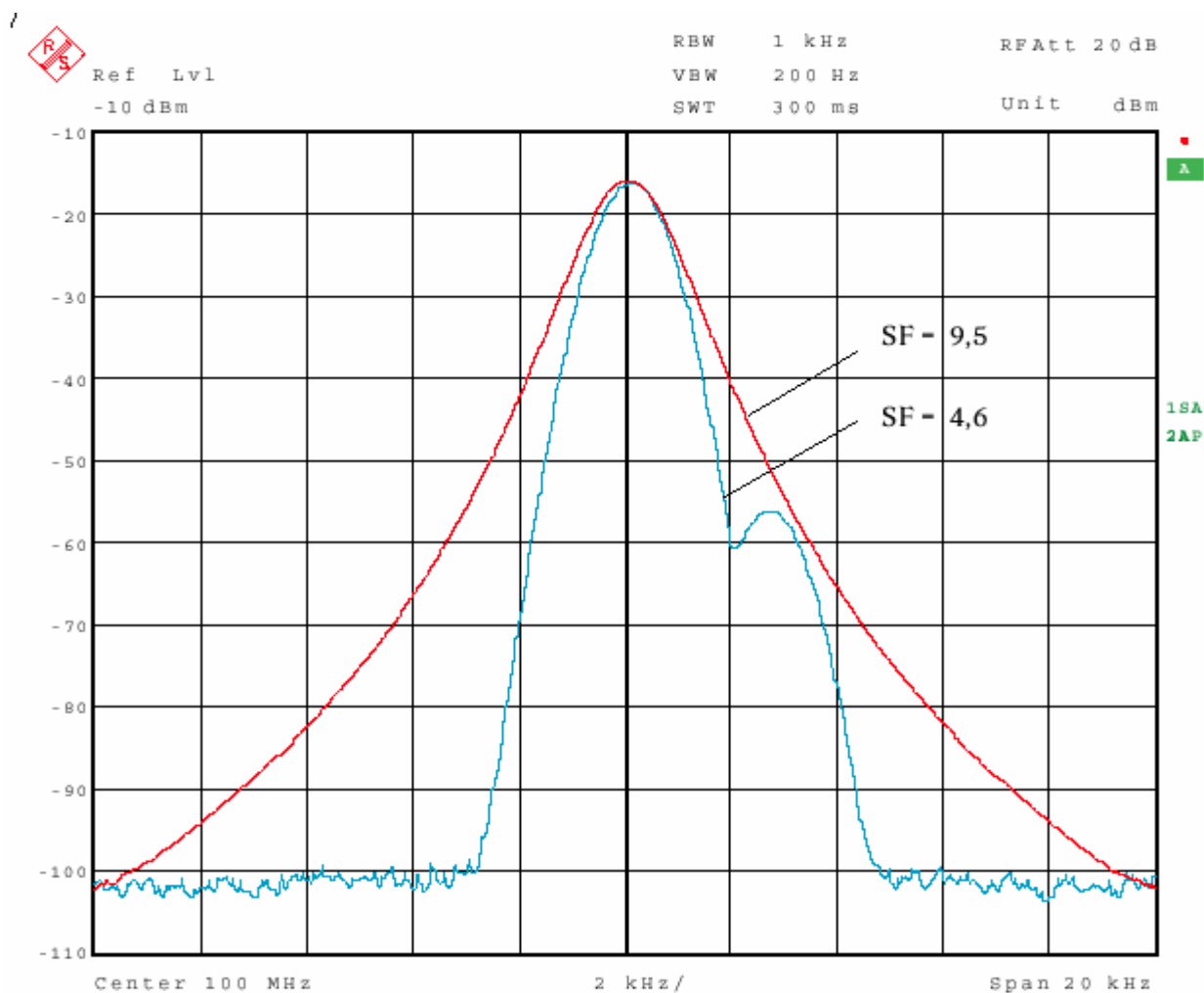
## 3、频谱分析仪的特性

- 滤波器特性
- 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
- 测量精度

## 分辨滤波器特性



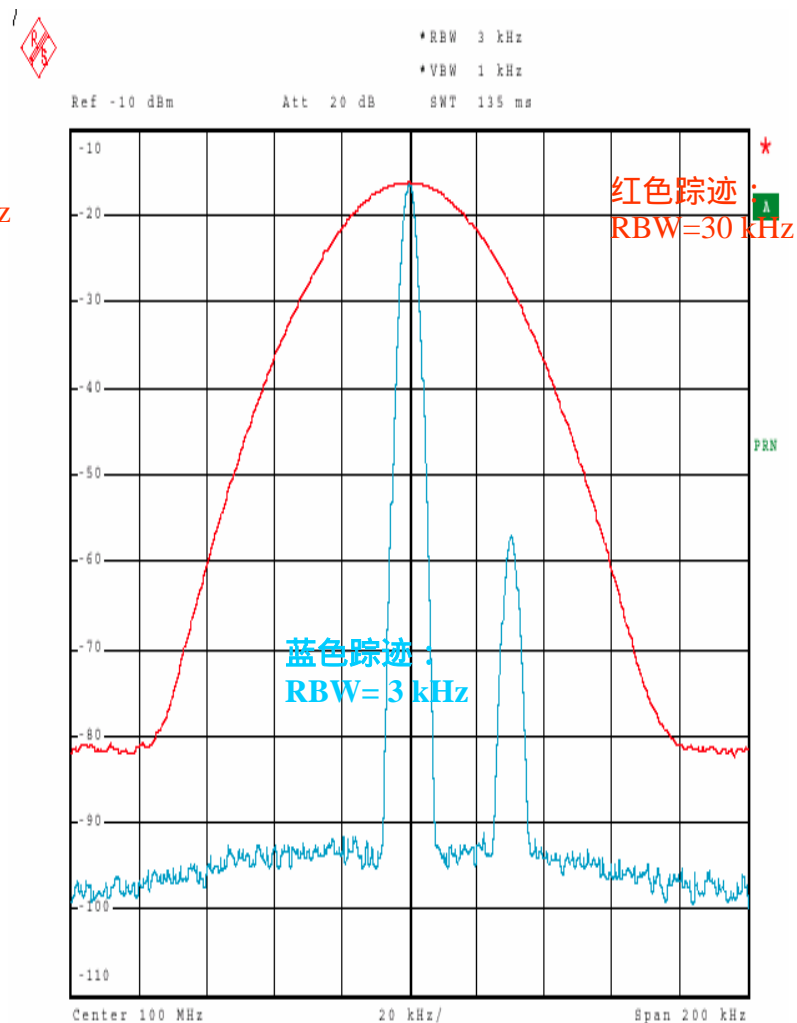
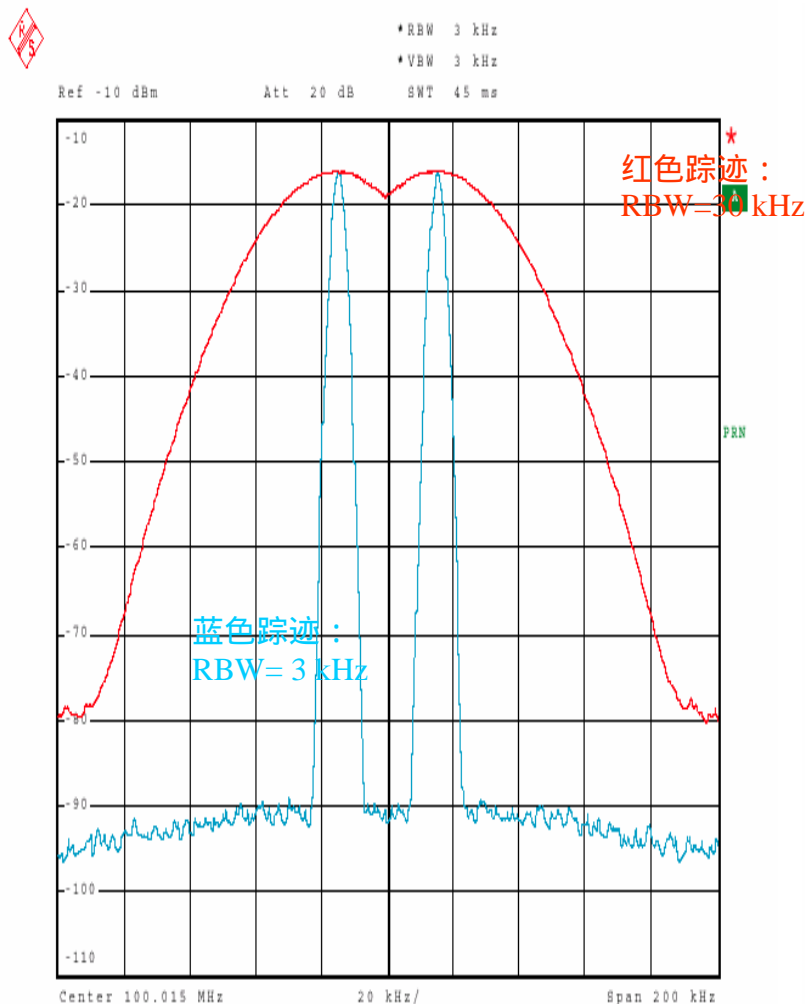
## 不同分辨带宽的滤波器对测试结果的影响





# 频谱分析仪性能指标

## 分辨相邻的信号

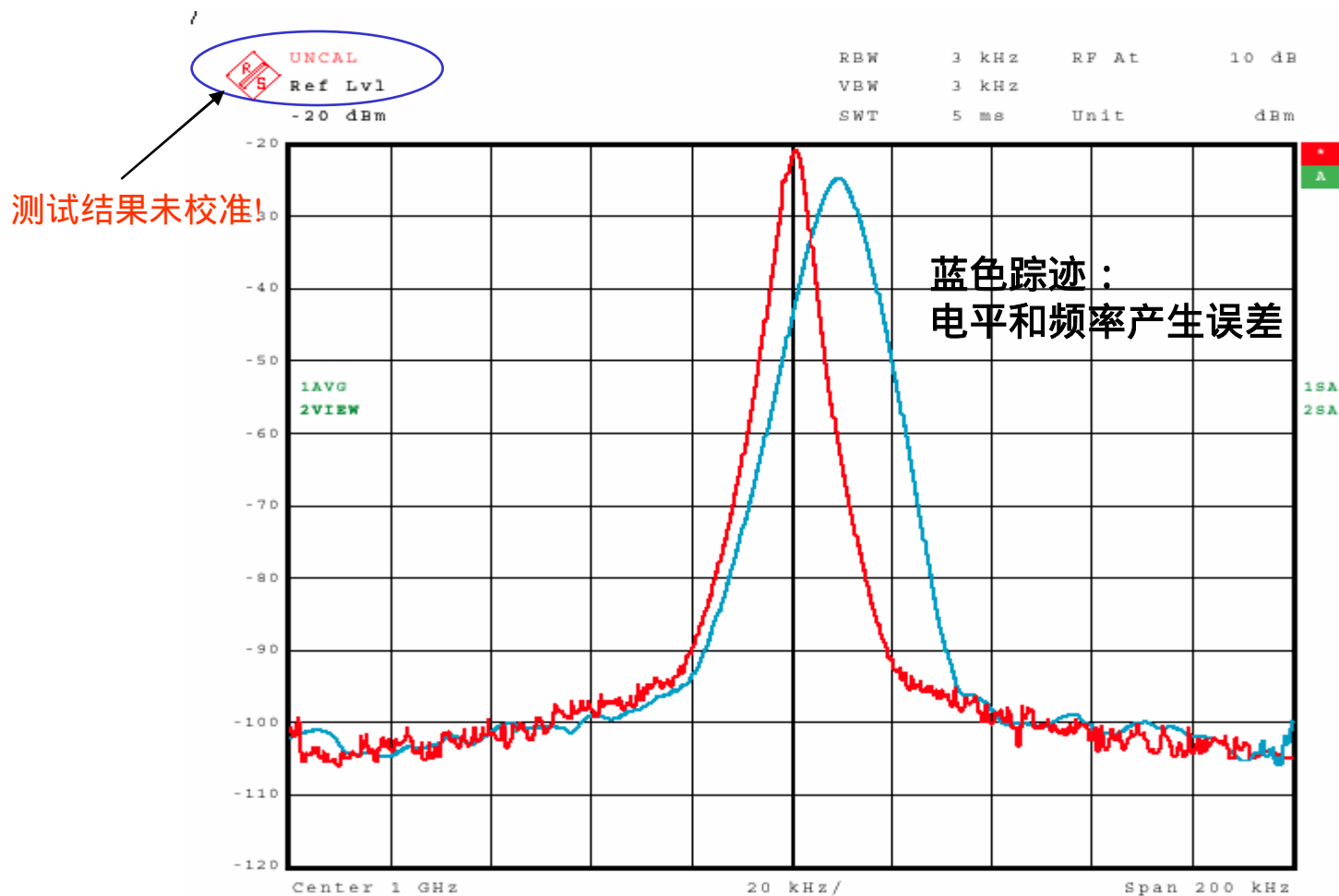


## 最小扫描时间

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

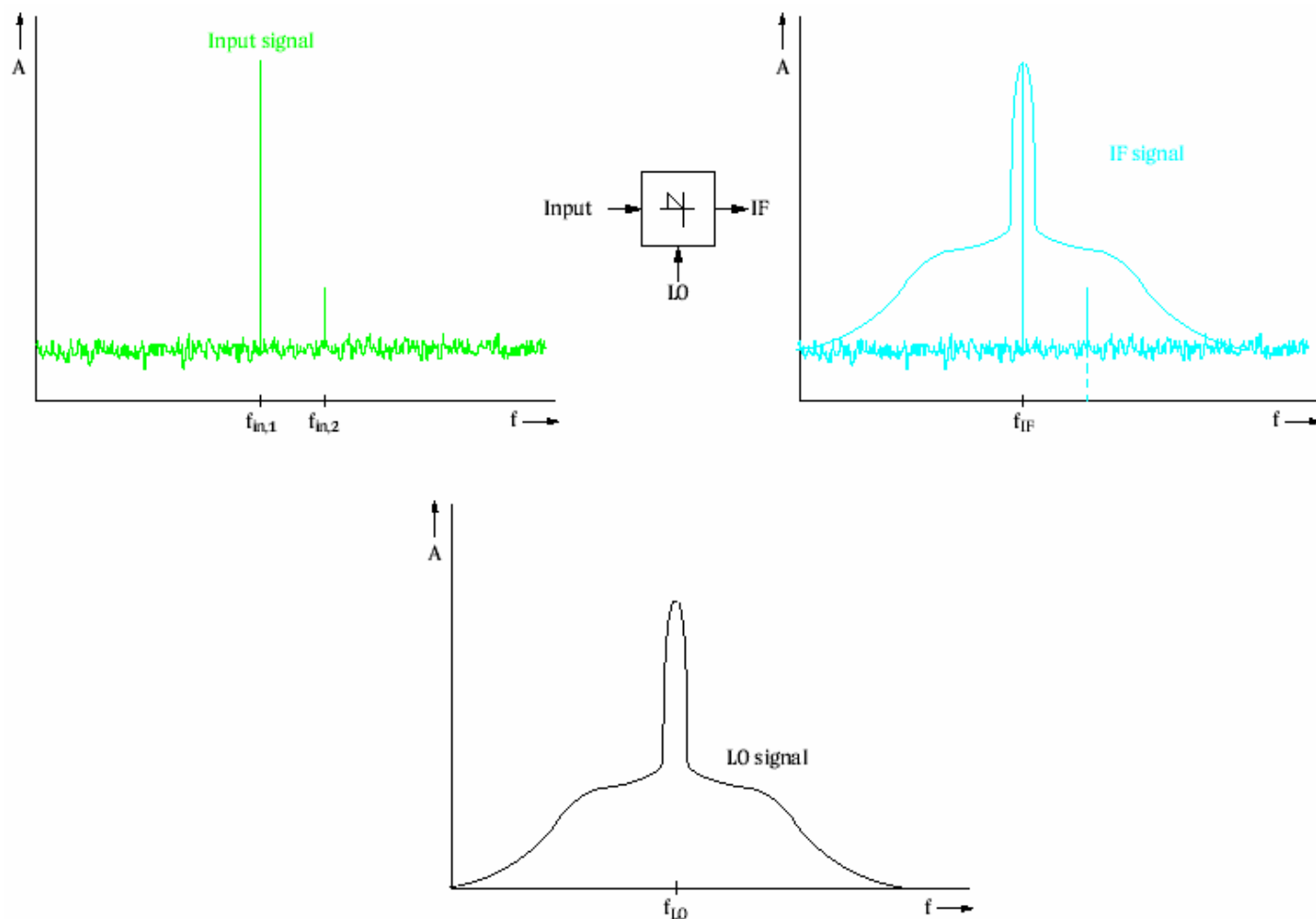
$T_{Sweep}$	最小扫描时间
Span	频率扫描跨度
RBW	分辨带宽 (3 dB 带宽)
k	k 因子, 2.5 模拟滤波器

## 扫描时间对频率和电平测量误差的影响



# 频谱分析仪性能指标

## 相位噪声



# 频谱分析仪性能指标

## 频谱分析仪的固有噪声

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

- $L_{DANL}$       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  
 $-2.5\text{ dB}$       修正因子 (对数定标的平均)

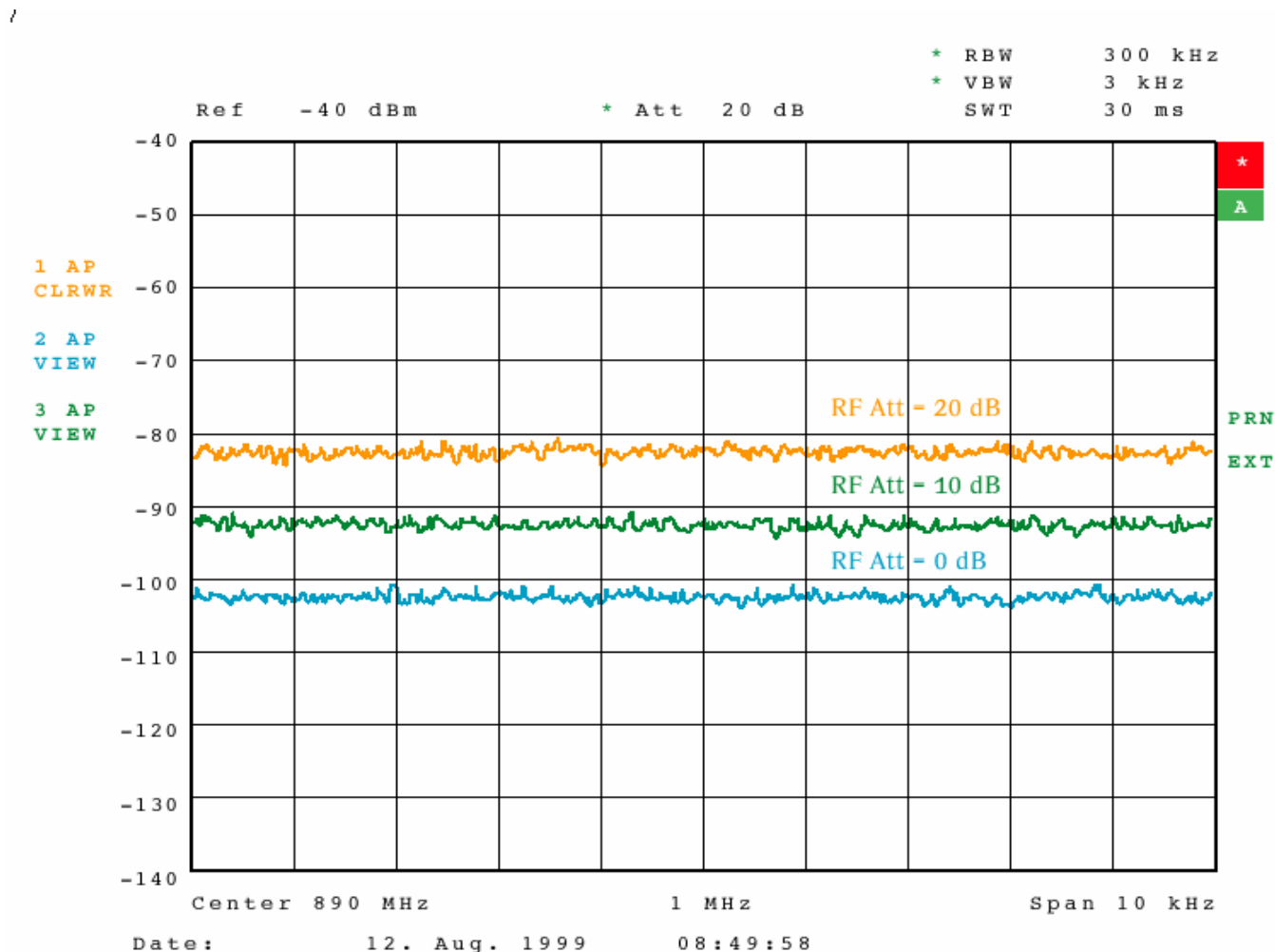
不同的滤波器6 dB带宽和等效噪声带宽与 3 dB带宽的关系

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	$1.129 * B_{3dB}$	$1.114 * B_{3dB}$	$1.065 * B_{3dB}$

# 频谱分析仪性能指标



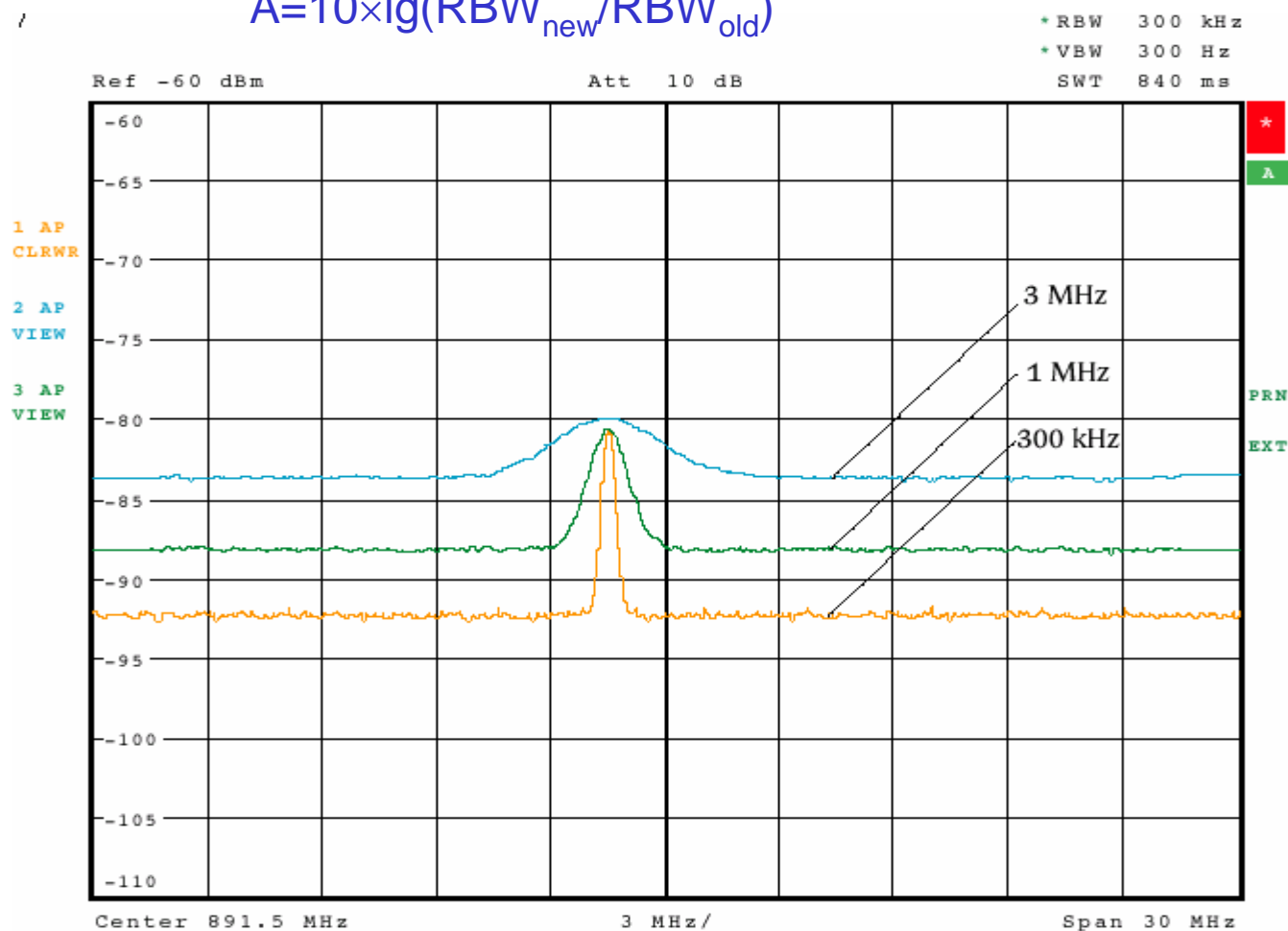
## 显示的噪声本底依赖于RF衰减器



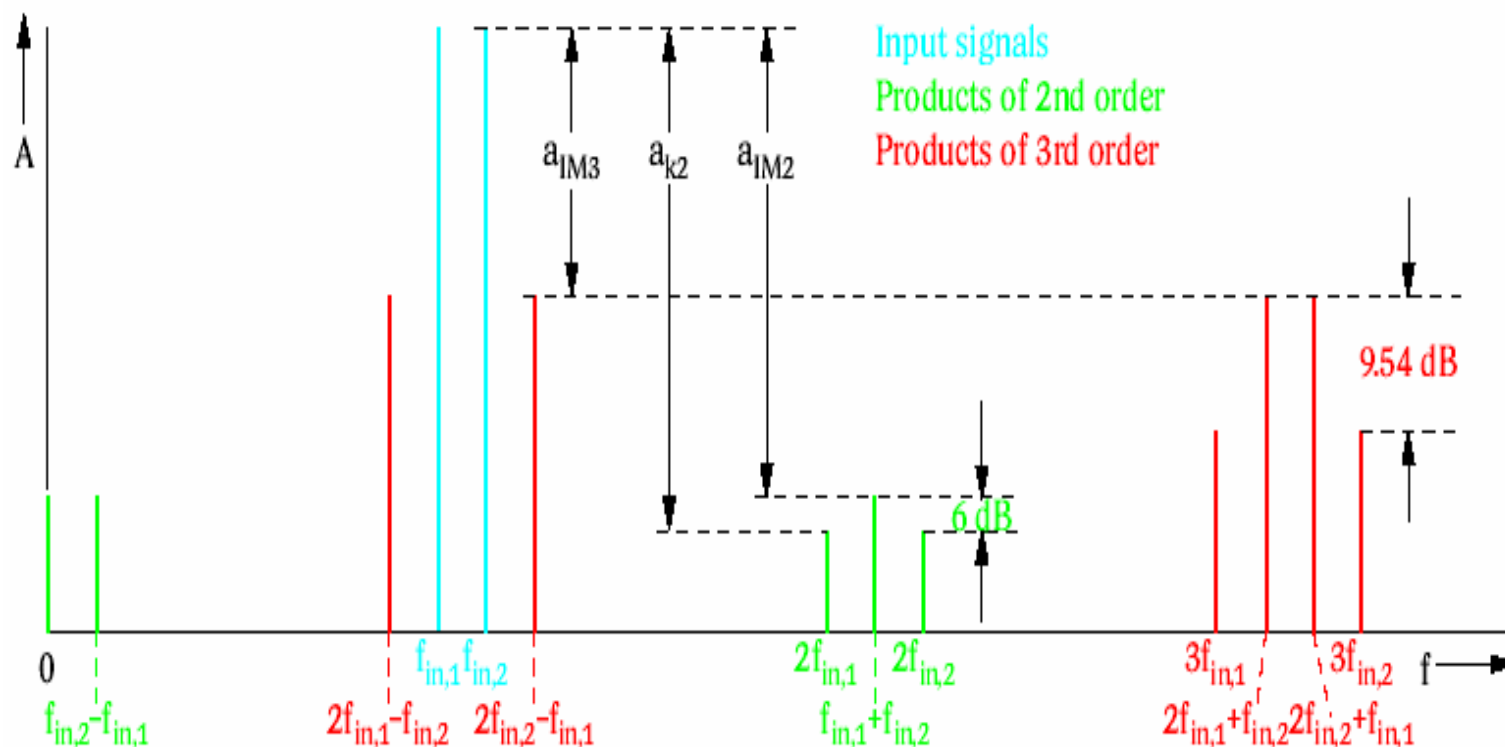
# 频谱分析仪性能指标

## 显示的噪声本底依赖于与RBW带宽

$$A = 10 \times \lg(RBW_{\text{new}} / RBW_{\text{old}})$$



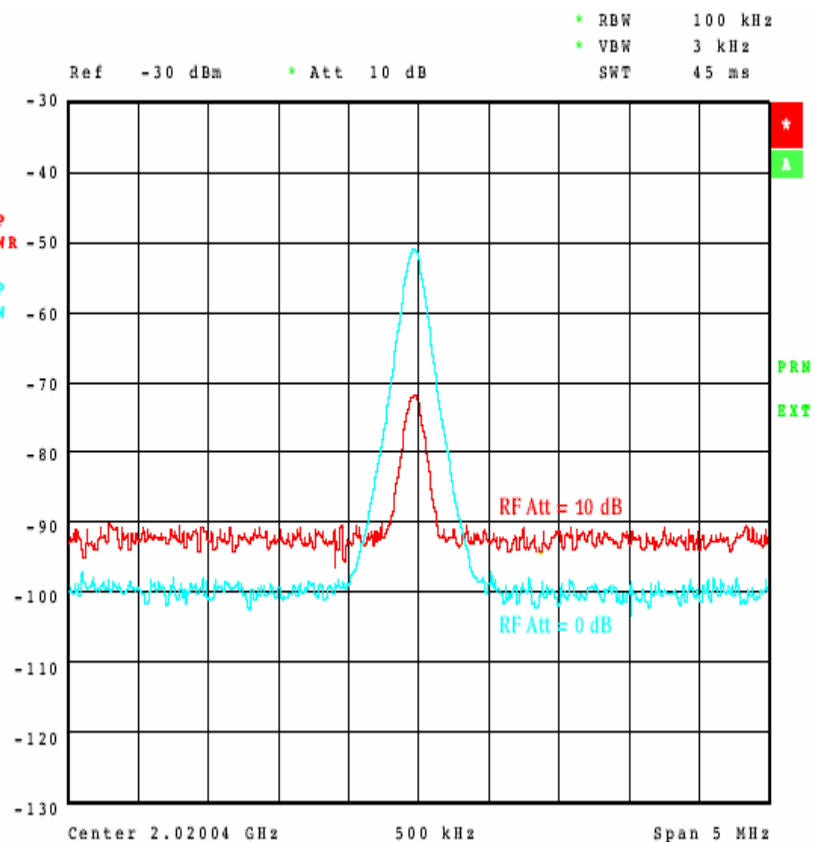
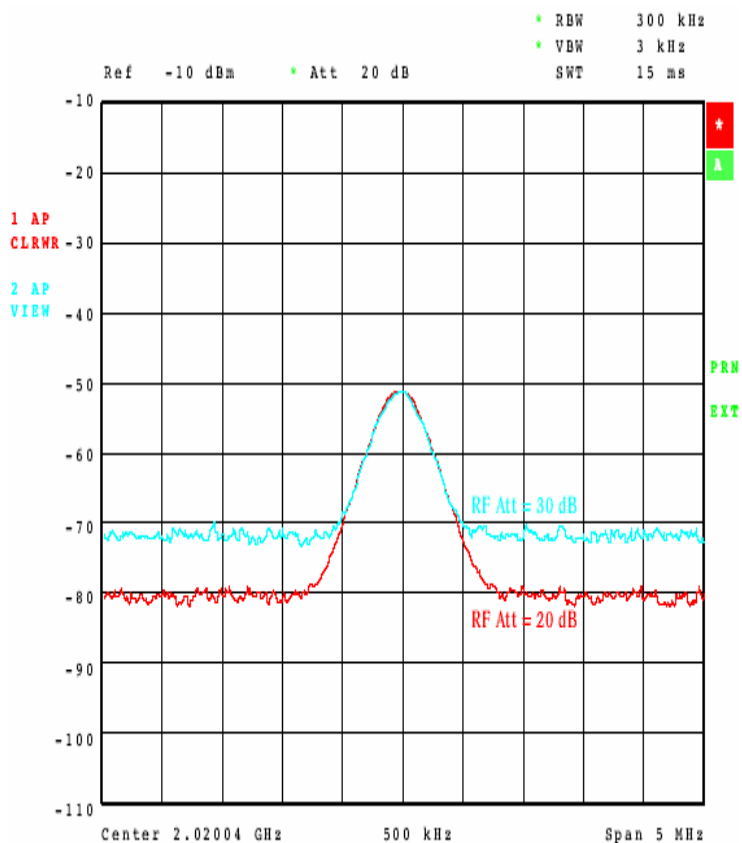
## 接收机的非线性特性





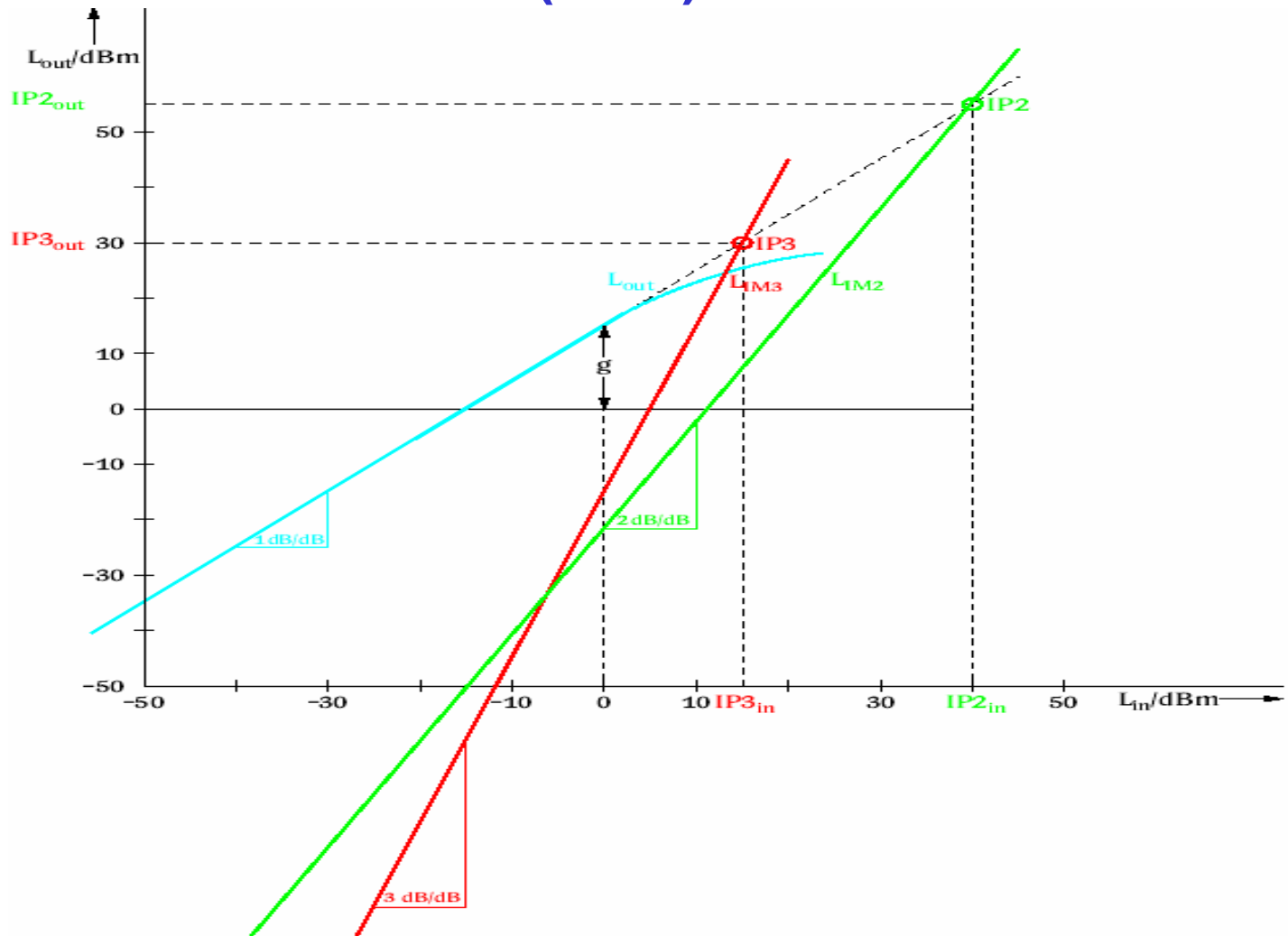
# 频谱分析仪性能指标

## 三阶互调产物的鉴别



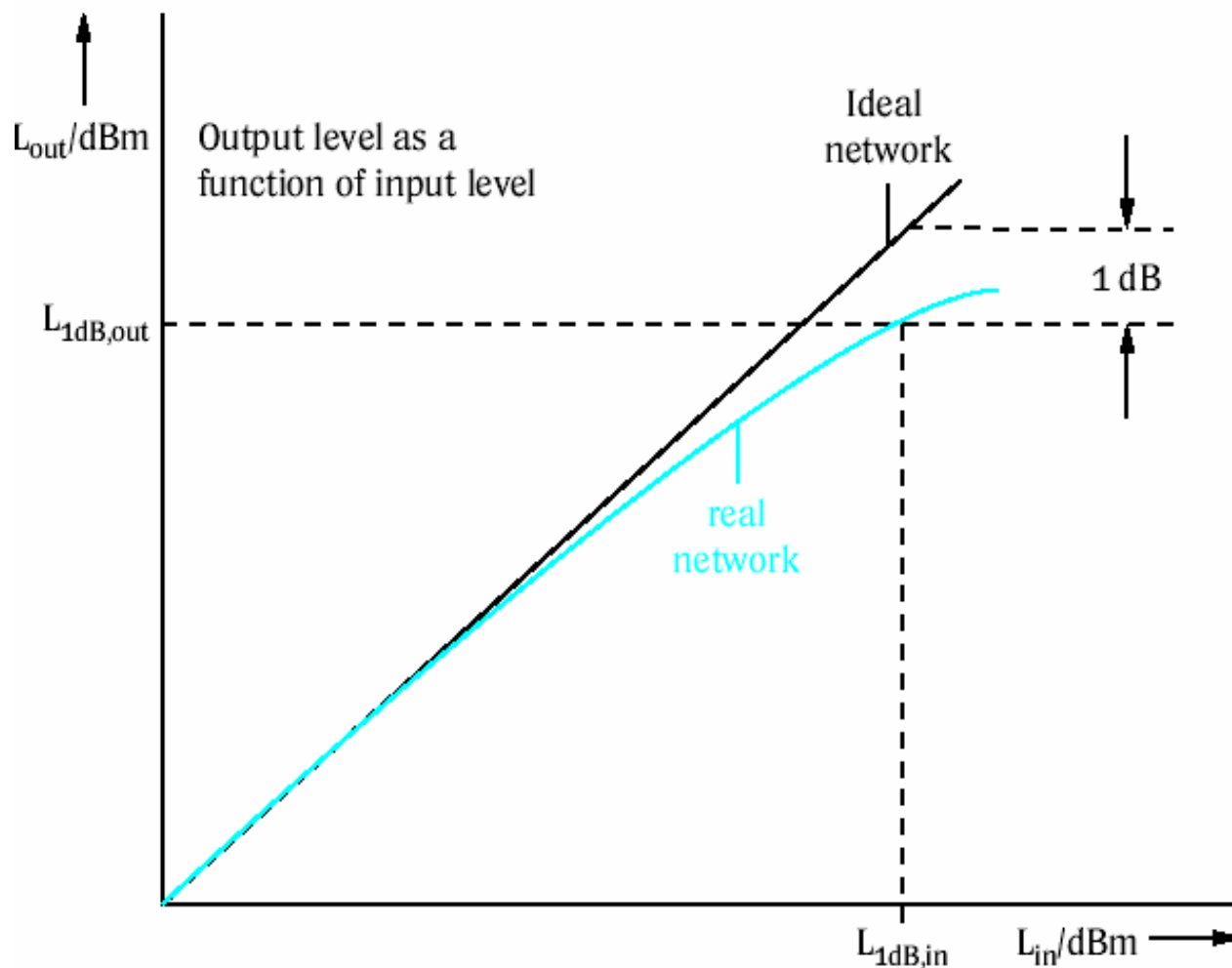
# 频谱分析仪性能指标

## 截止点(T.O.I)



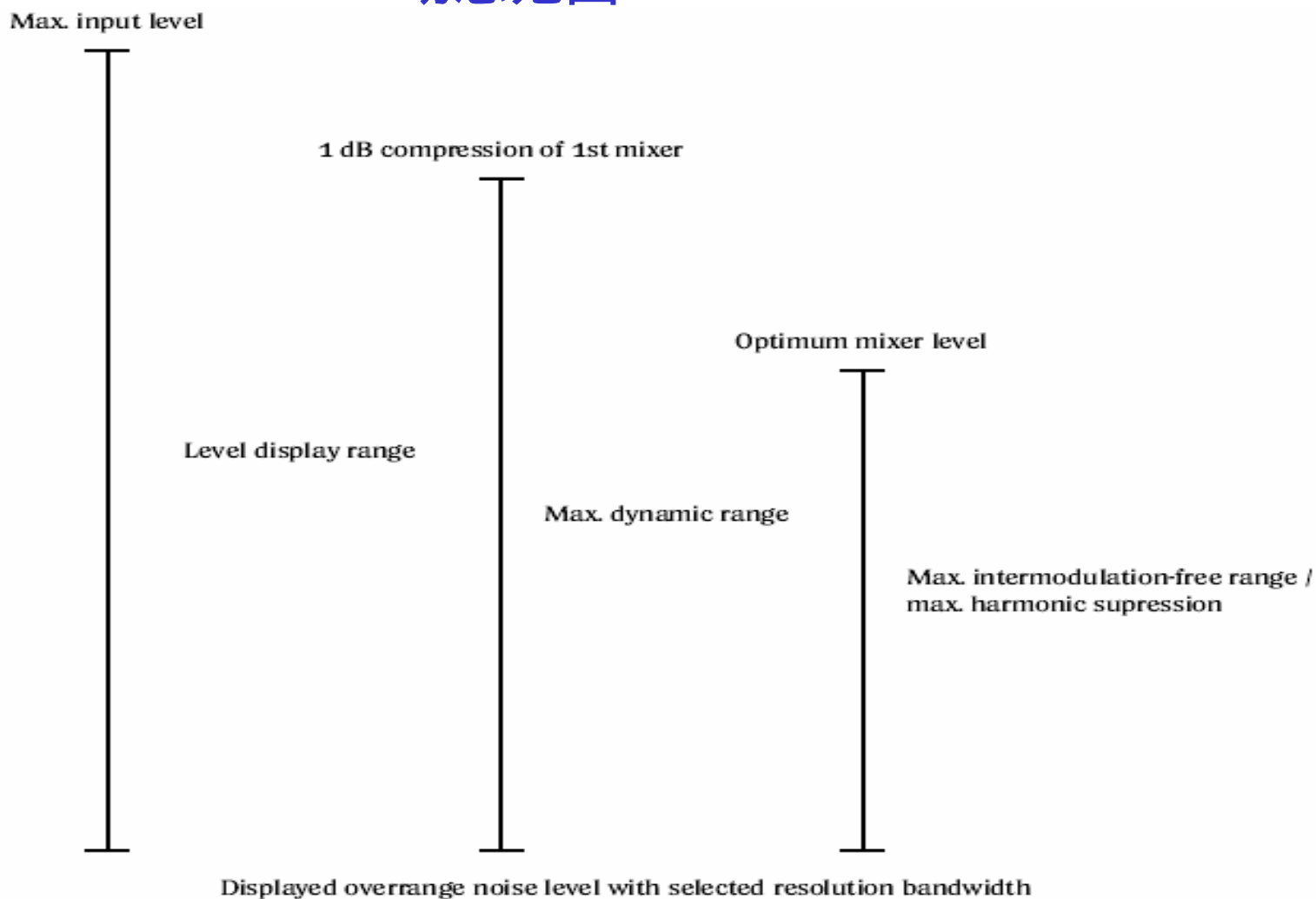
# 频谱分析仪性能指标

## 1-dB 压缩点

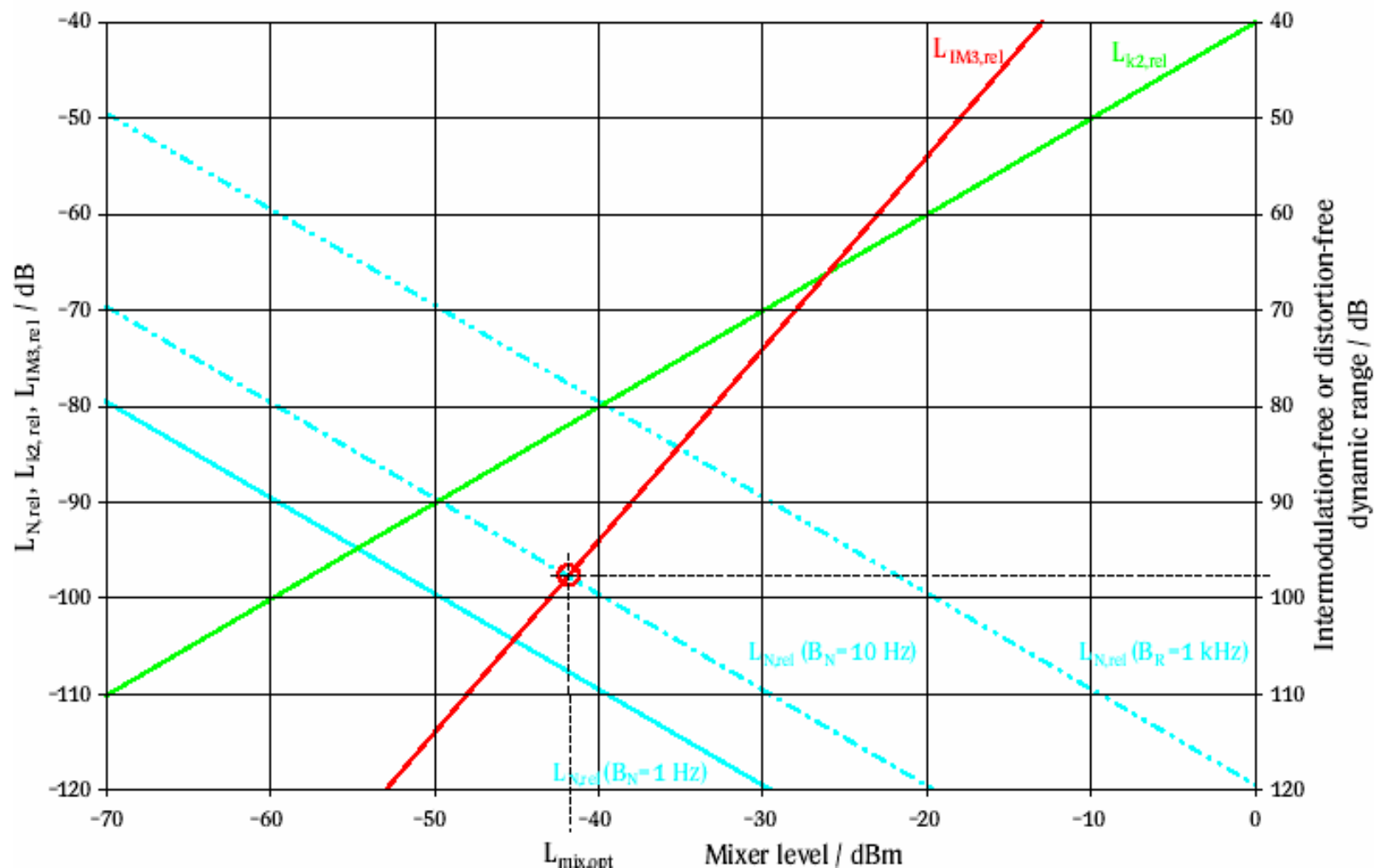


# 频谱分析仪性能指标

## 动态范围



## 最大无互调范围或最大谐波抑制



# 频谱分析仪性能指标

---

## 频率测量精度

- 光标读数：

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

- ✚ 计数器读数：

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

# 频谱分析仪性能指标

---

## 幅度测量精度

- 误差来源：
  - 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

# 频谱分析仪性能指标

## 具体指标

### ● 各项误差

- 128 MHz绝对误差 <0.2 dB
- 频率响应 ( $f < 3$  GHz) <0.5 dB
- 衰减器误差 <0.2 dB
- 对数显示非线性(0 to -70 dB) <0.2 dB
- RBW 切换误差 ( $RBW < 100$  kHz) <0.1 dB
  
- 驻波比 <0.55dB

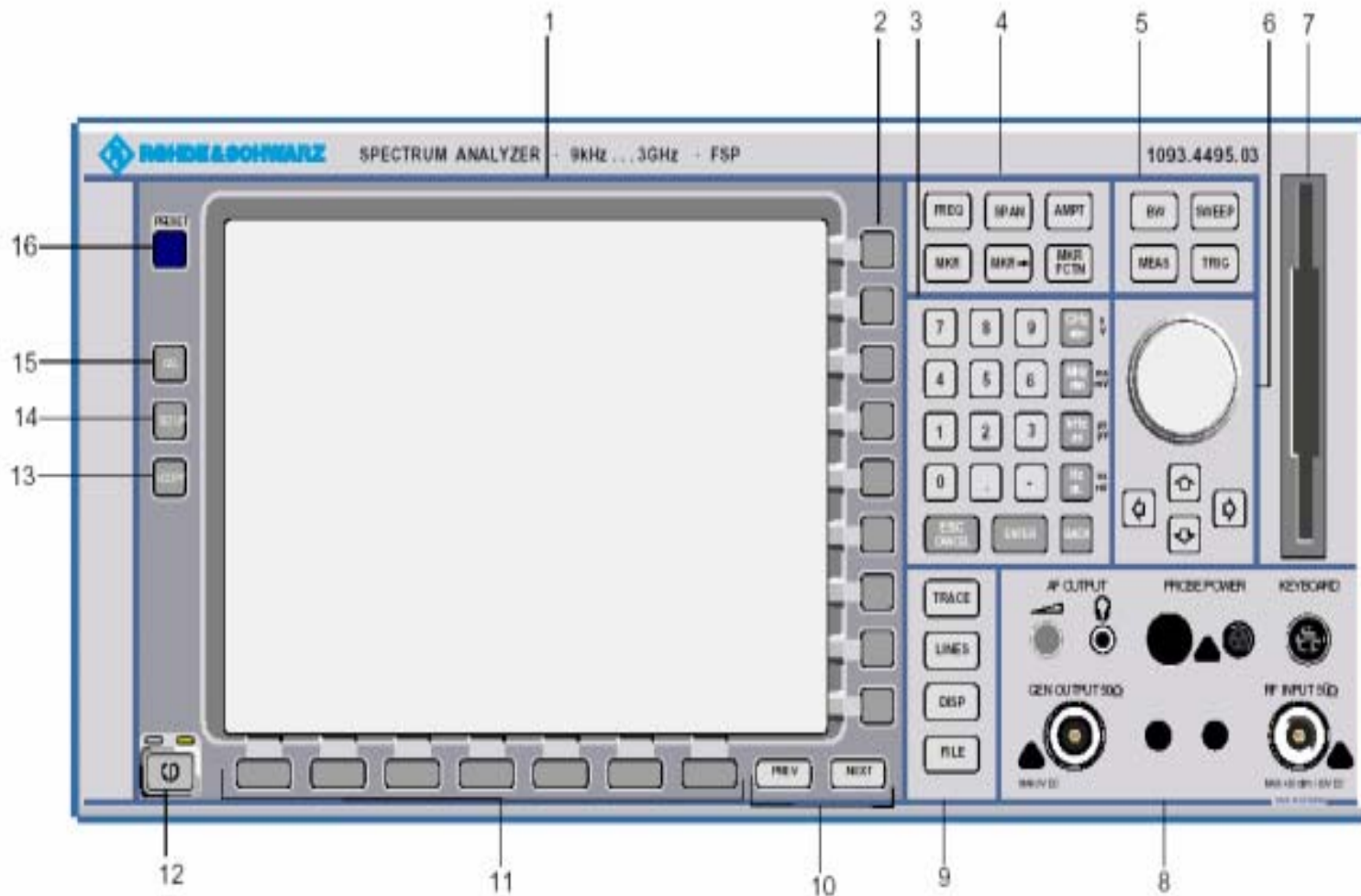
✚ 总的电平不确定度: **0.5 dB( $f < 3$ GHz)**  
(95 % 置信度 @  $2\sigma$ )



## 第二章、实际应用

### 1、仪器操作

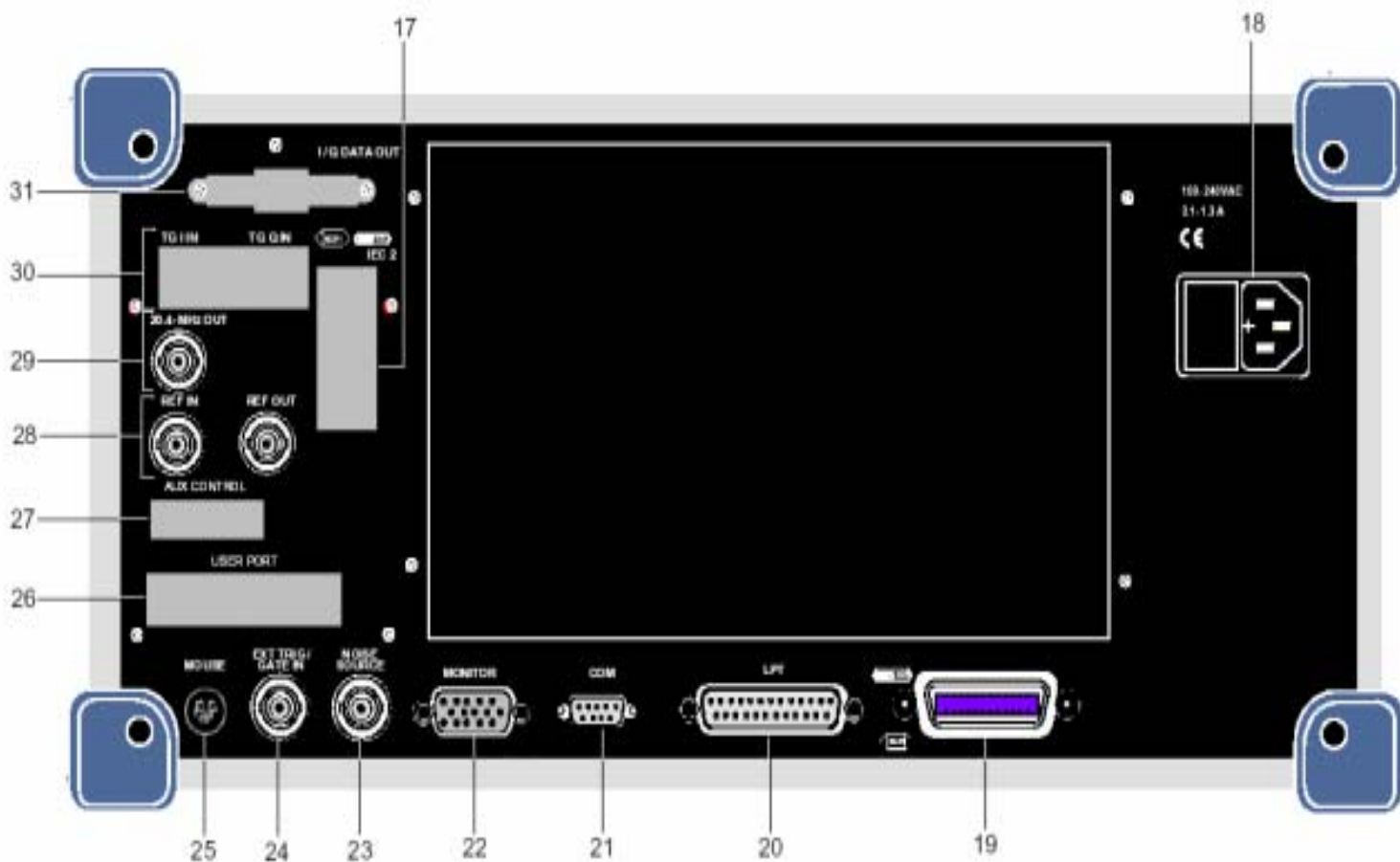
## FSP频谱分析仪前面板



## FSP频谱分析仪前面板说明

- 1、显示屏
- 2、软按键
- 3、数据输入键
- 4、仪器状态和功能控制键
- 5、仪器状态和功能控制键
- 6、数据和光标改动控制键
- 7、3 1/2"磁盘驱动器(1.44M)
- 8、硬件输入输出区
- 9、仪器状态和功能控制键
- 10、菜单变换键
- 11、热键
- 12、开机/预热键
- 13、硬拷贝配置和打印功能键
- 14、一般配置键
- 15、校准键
- 16、预置键

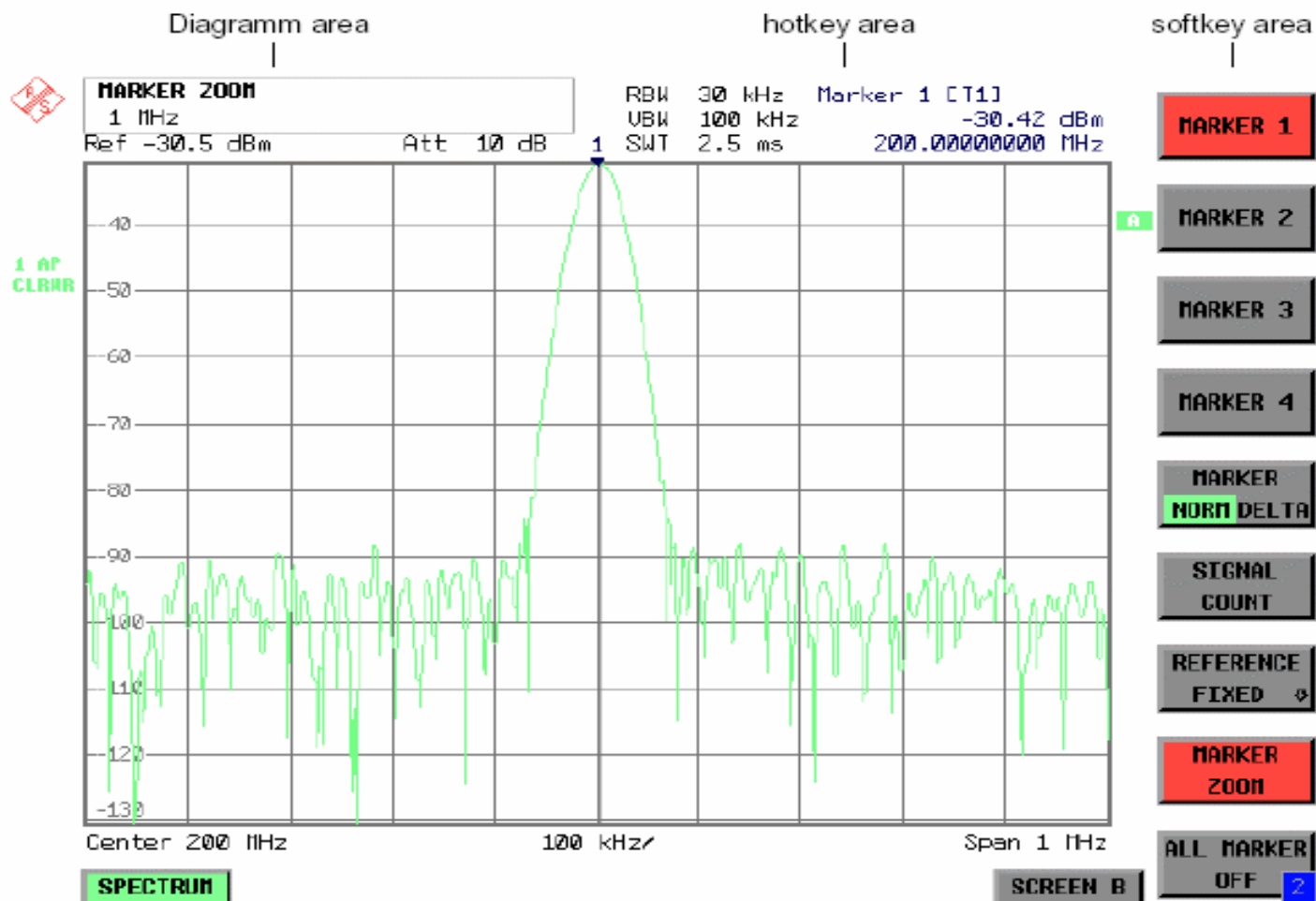
## FSP频谱分析仪后面板



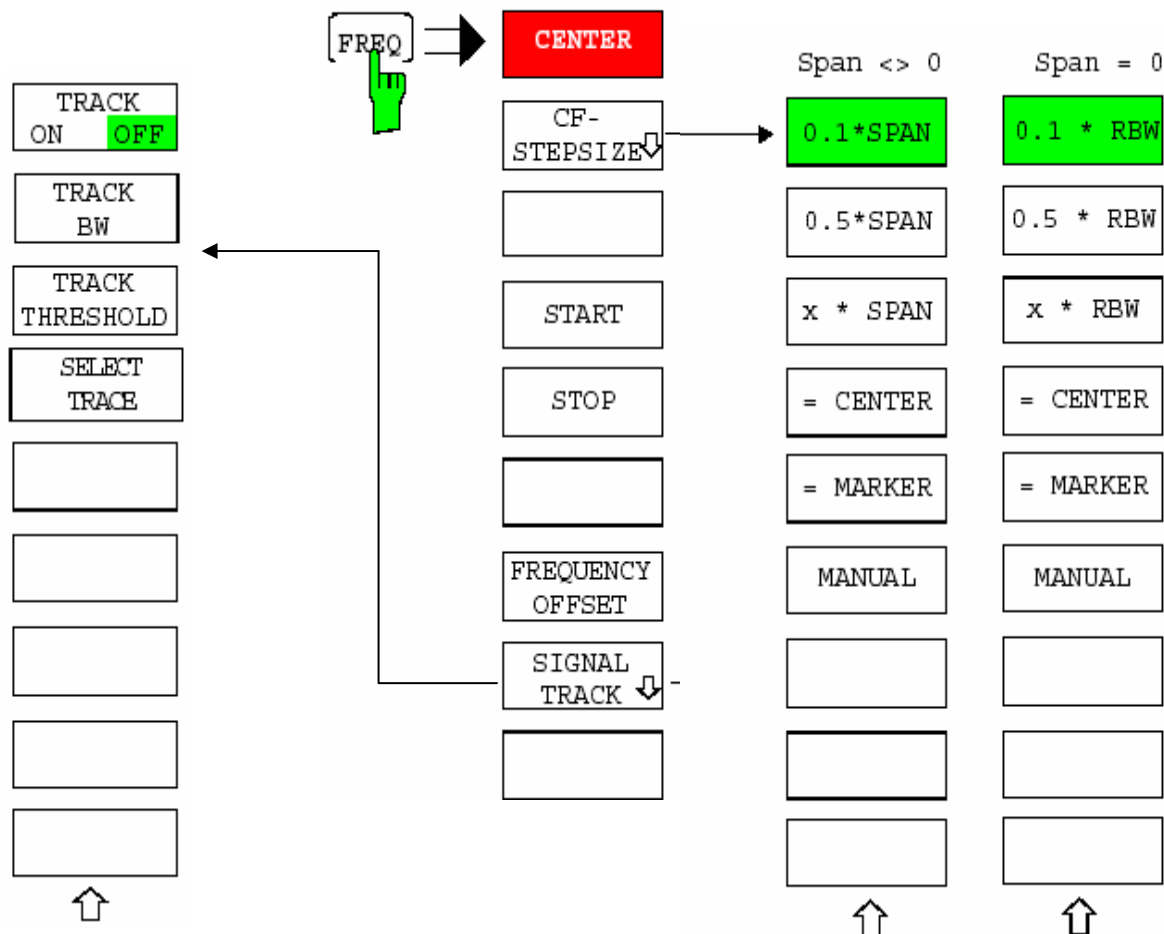
## FSP频谱分析仪后面板说明

- 17、选件预留口
- 19、IEC/IEEE接口
- 21、串行接口
- 23、外部噪声源输出口
- 25、PS/2鼠标接口
- 27、选件预留口
- 
- 29、20.4MHz中频输出口
- 31、选件预留口
- 18、电源与开关
- 20、并行接口（打印机连接口）
- 22、外部显示器接口
- 24、外部触发或外部门信号输入口
- 26、选件预留口
- 28、内部参考输出口和外部参考书入口
- 30、选件预留口

## FSP频谱分析仪显示屏

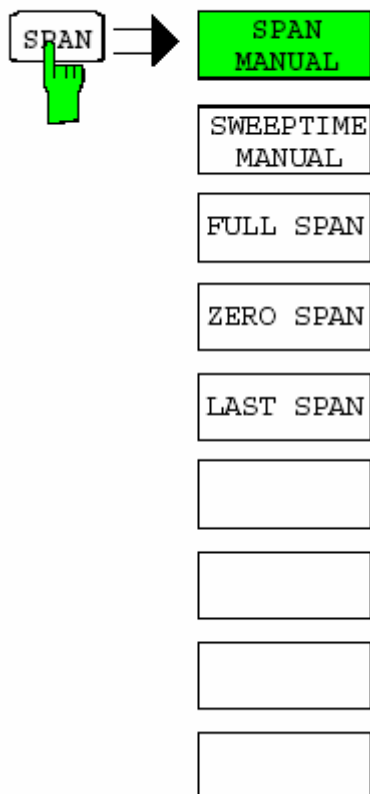


## 频率按键 FREQUENCY Key



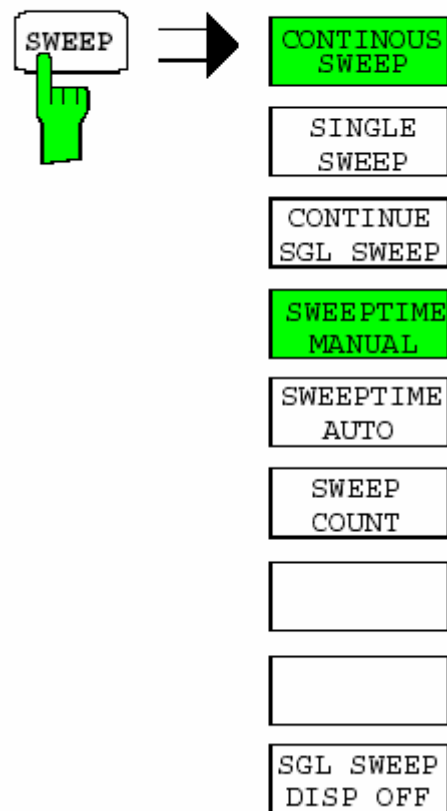
## 频率跨度按键

### SPAN Key



## 扫描按键

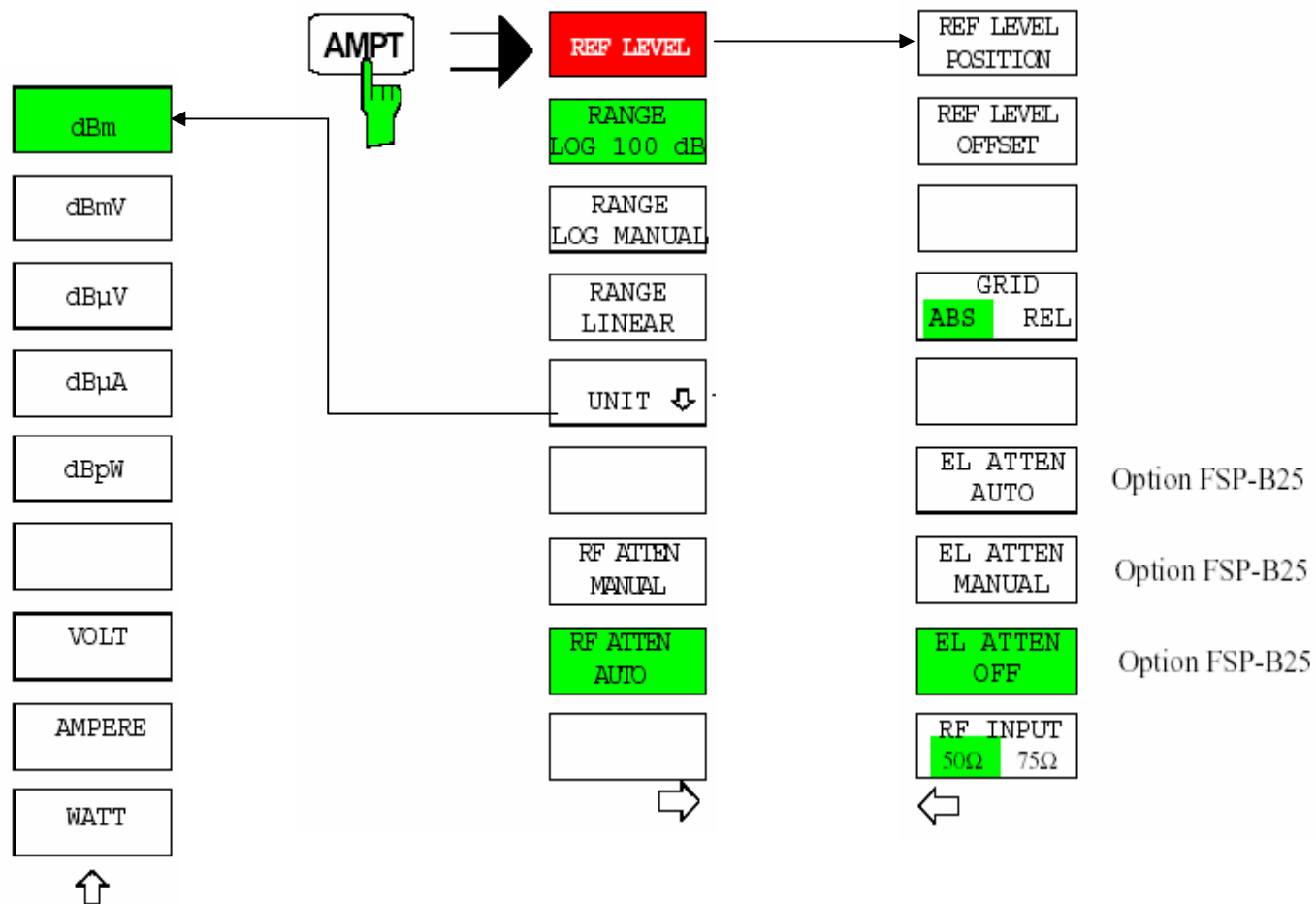
### SWEEP Key



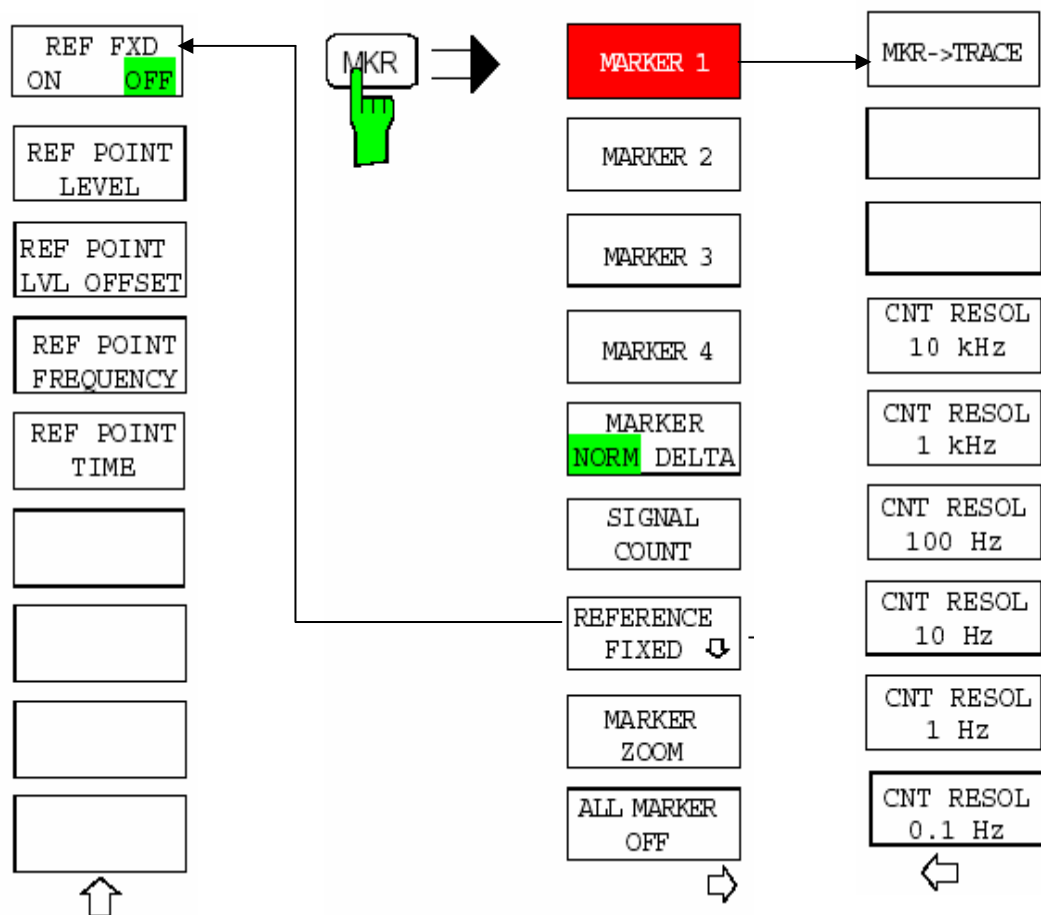


## 幅度按键

### AMPT Key

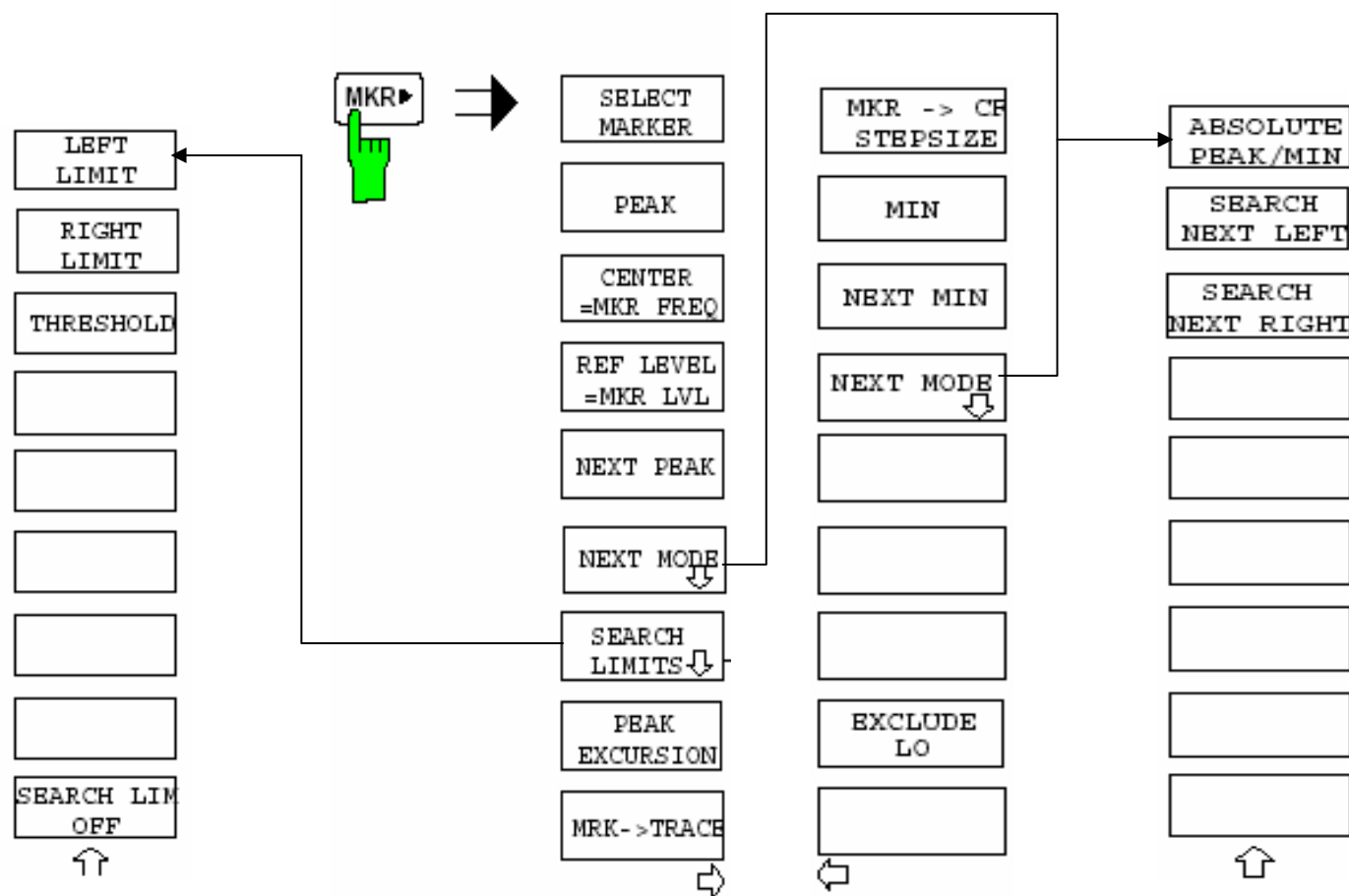


## MKR Key



## 光标到按键

MKR-> Key



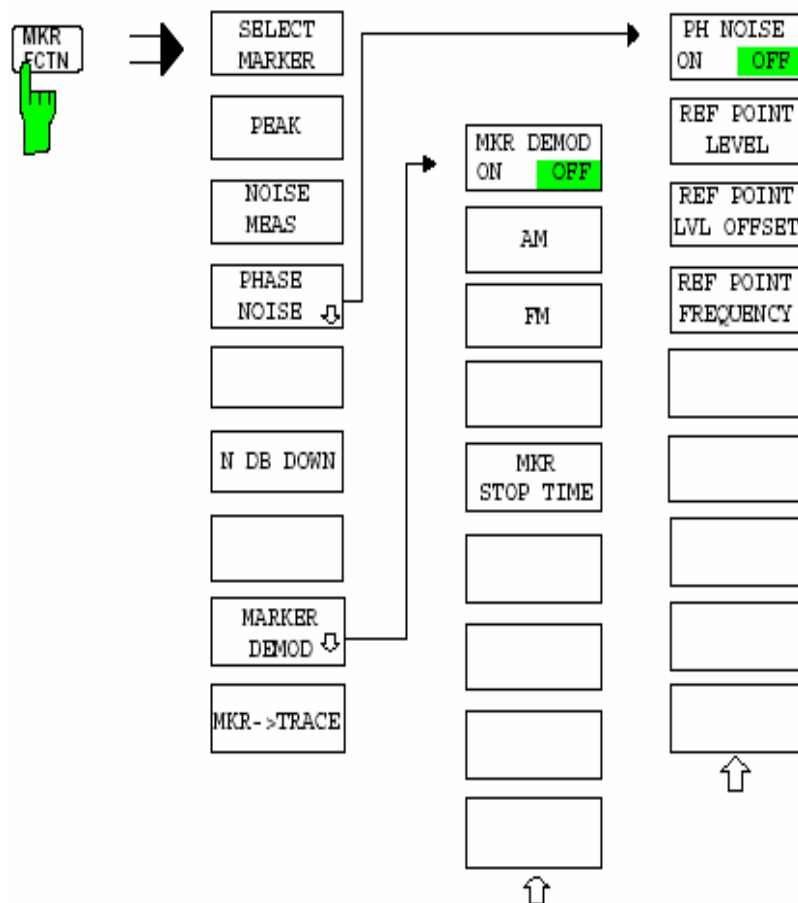
# 仪器操作



ROHDE & SCHWARZ

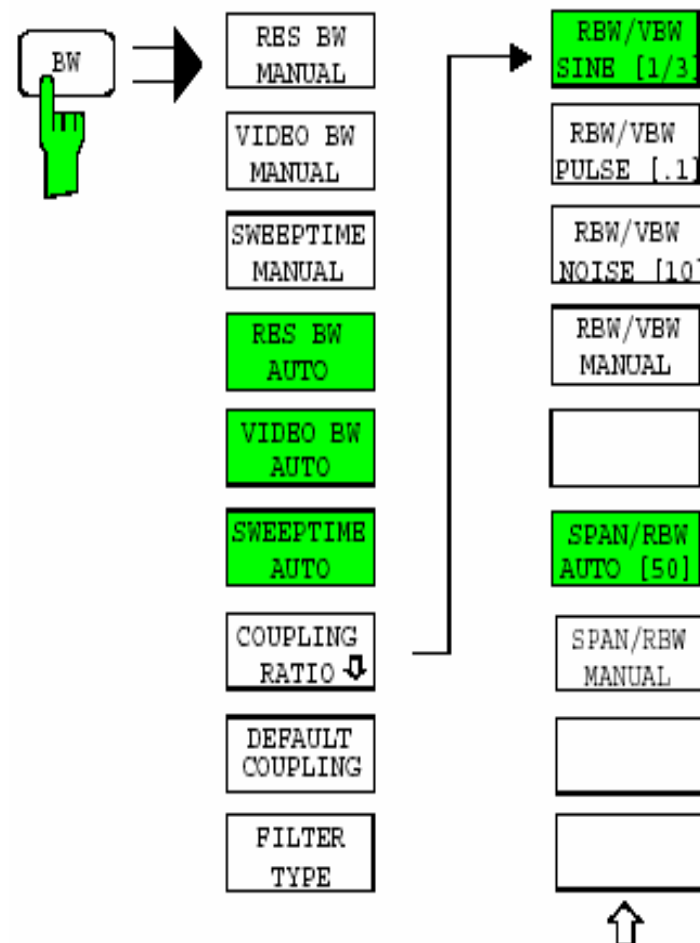
## 光标功能按键

MKR FCTN Key



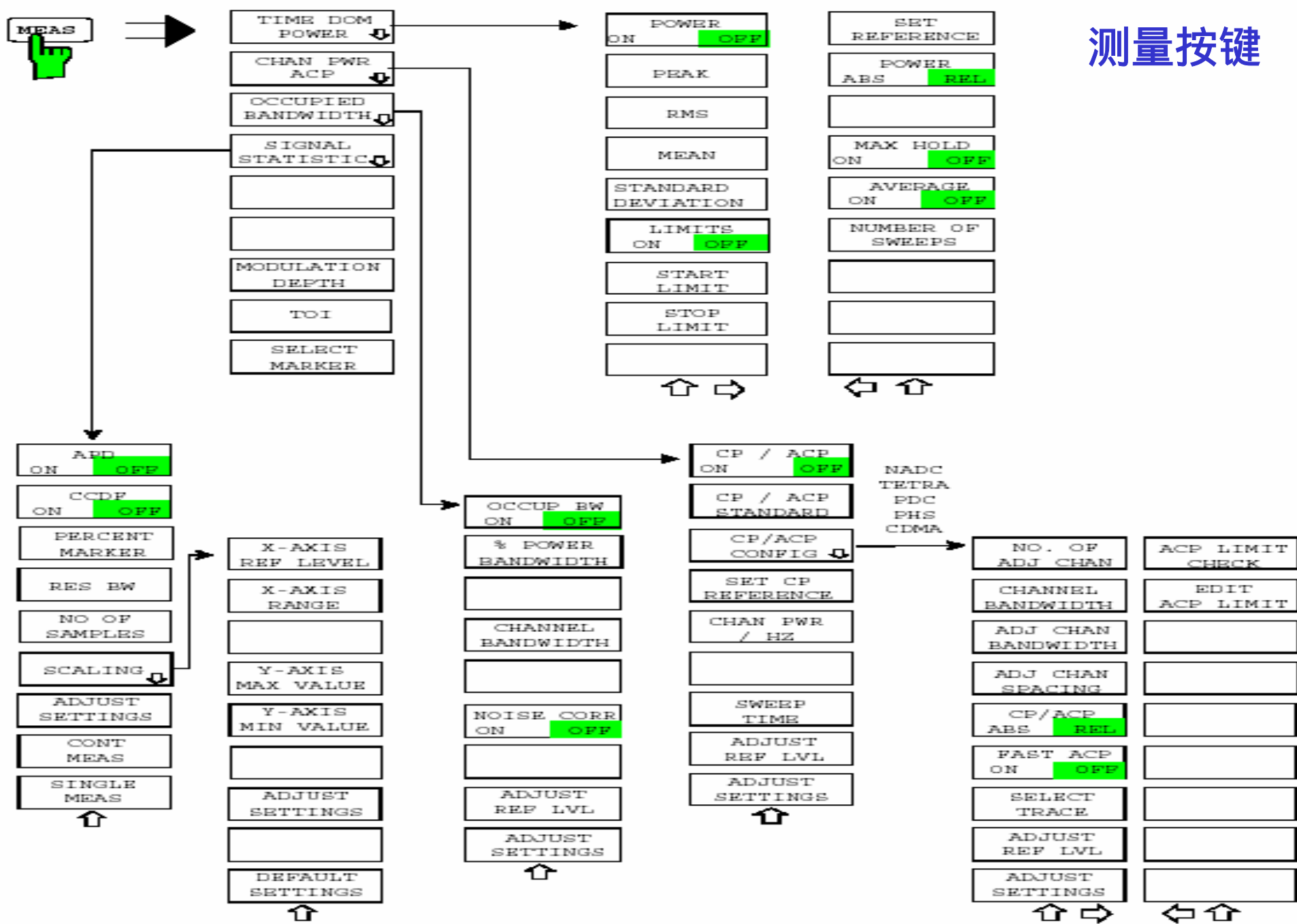
## 分辨带宽按键

BW Key



# MEAS Key

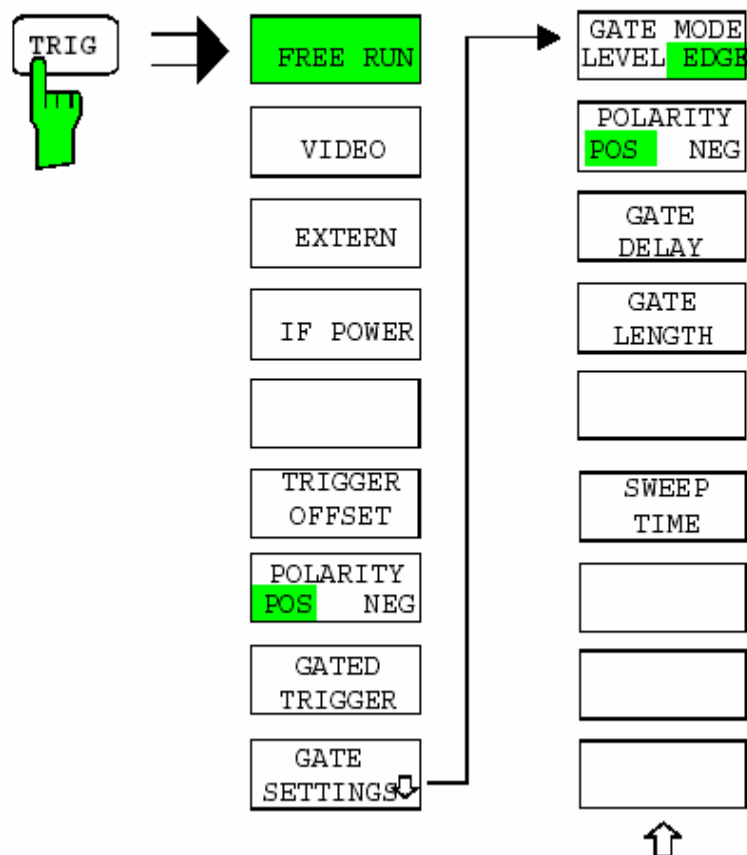
测量按键



# 仪器操作

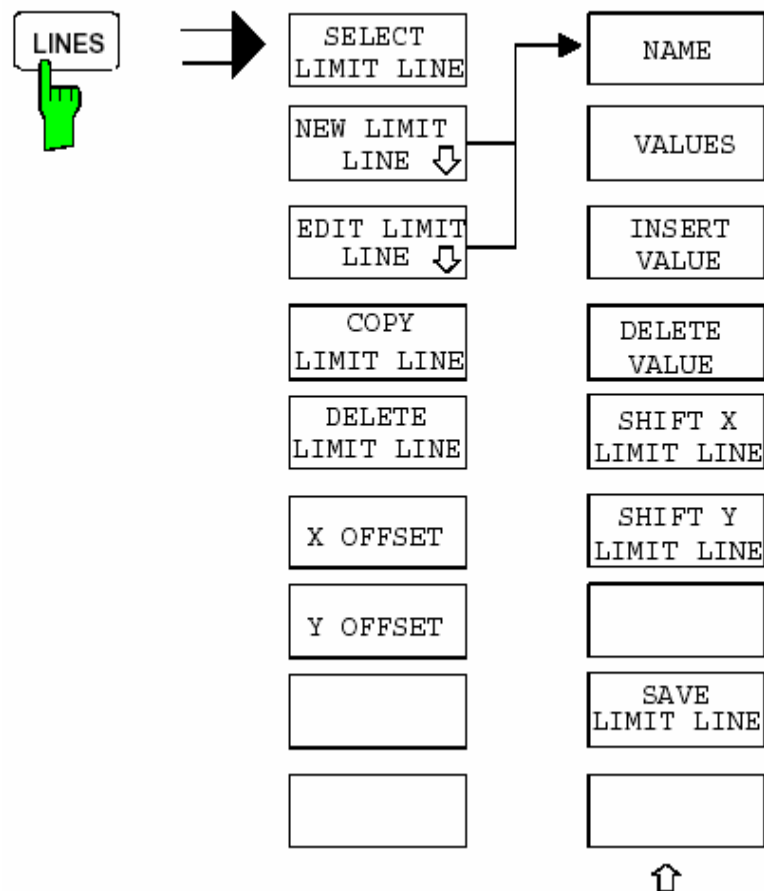
## 触发按键

### TRIG Key



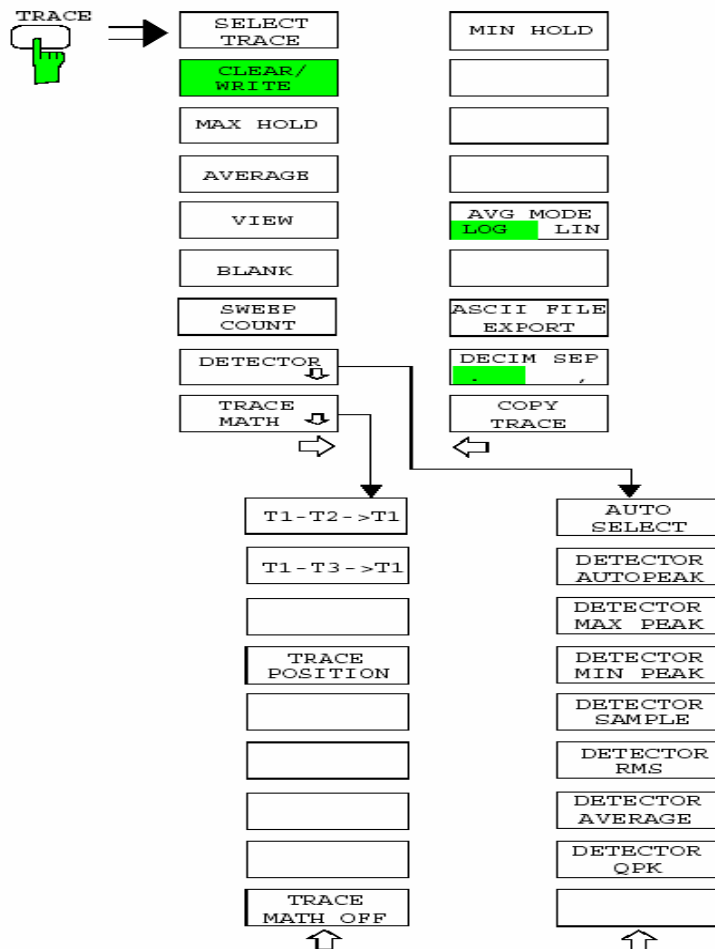
## 极限线按键

### LINES Key



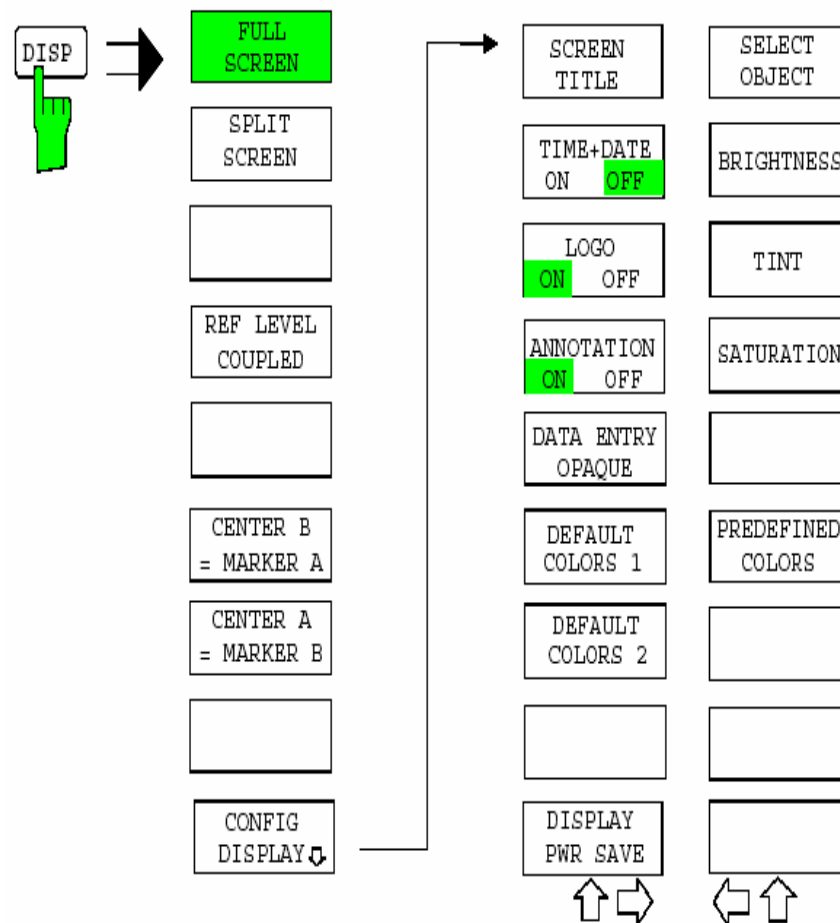
### 踪迹按键

#### TRACE Key

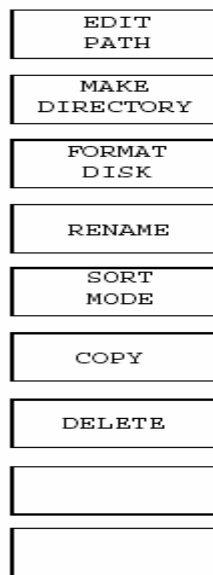
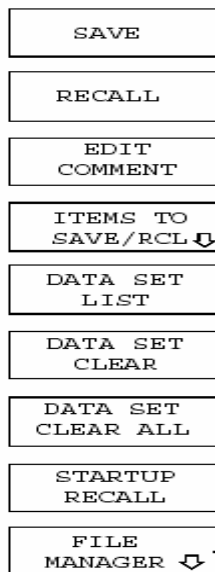


### 显示按键

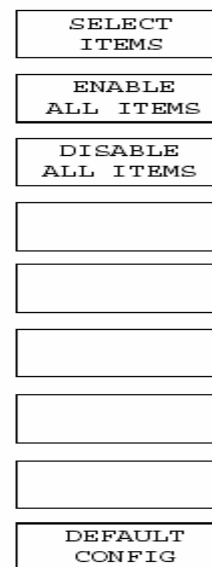
#### DISP Key



## FILE Key



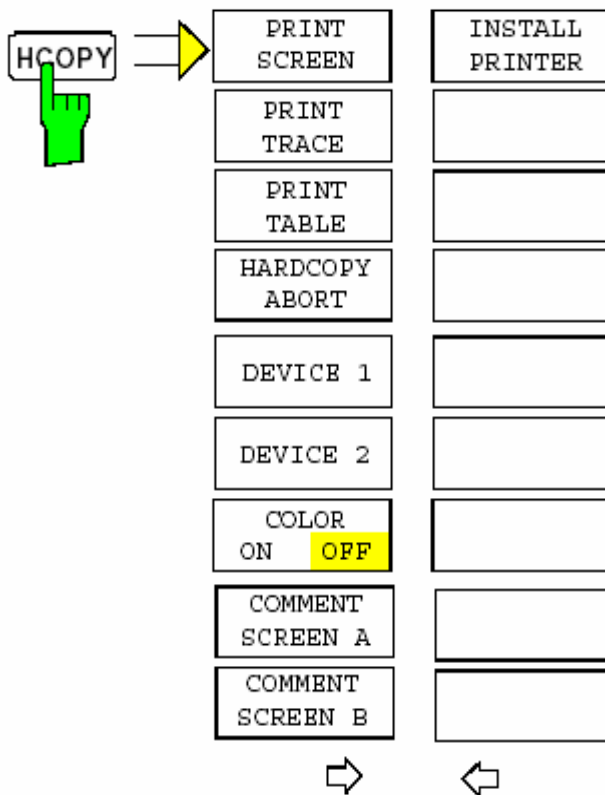
## 文件按键





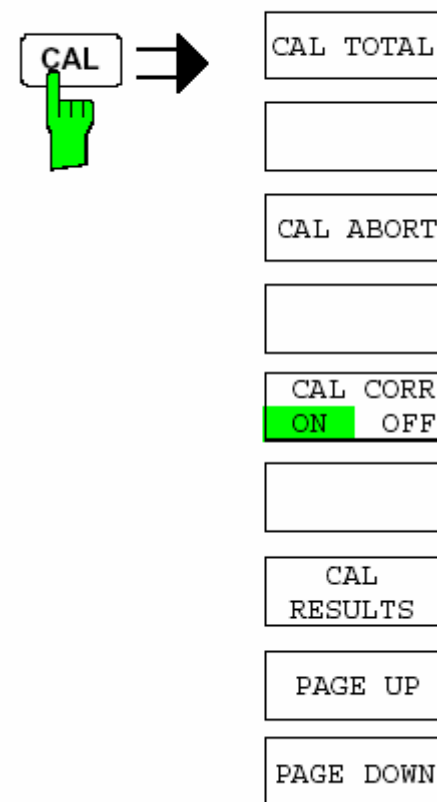
## 硬拷贝按键

### HCOPY Key



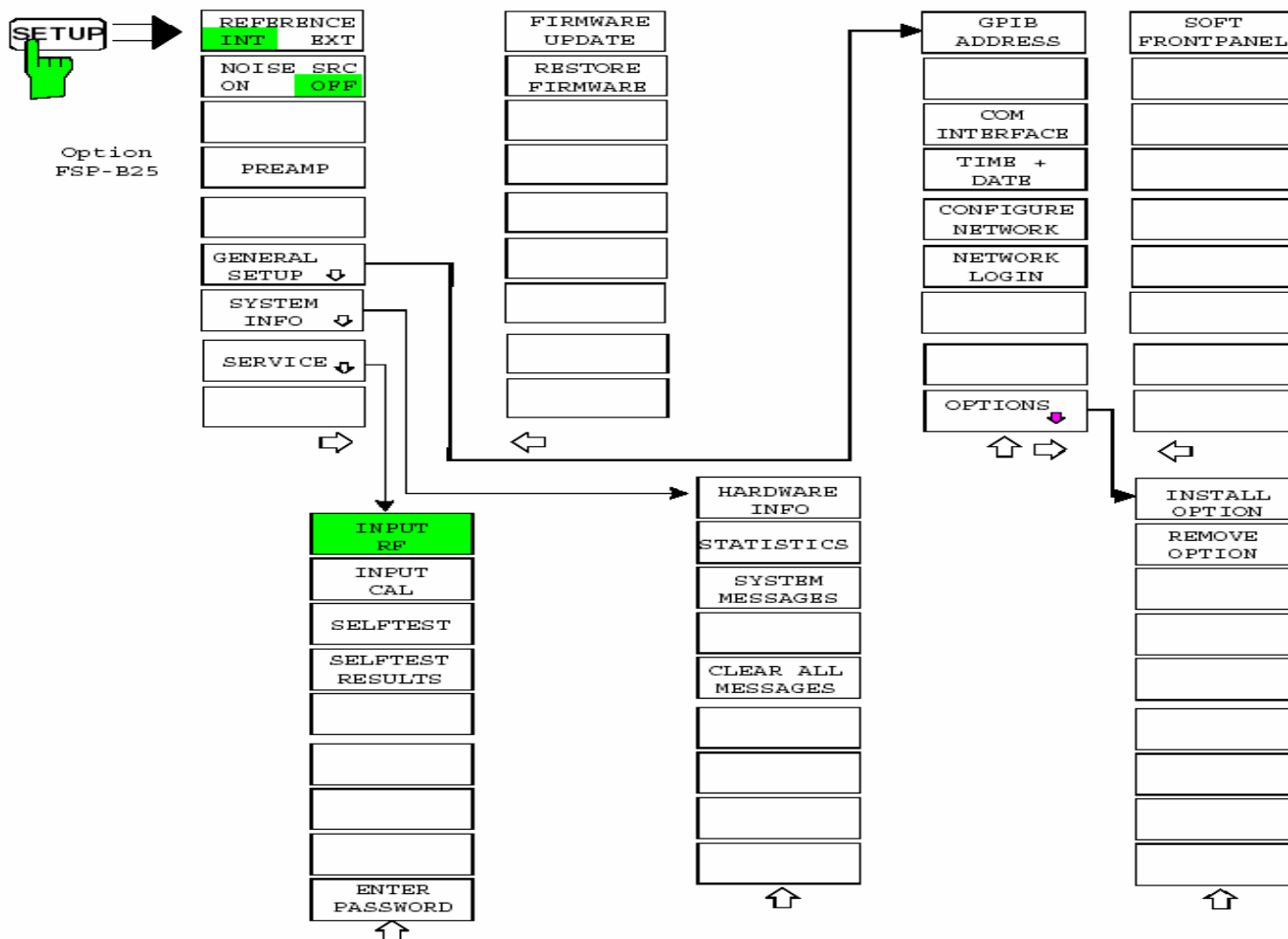
## 校准按键

### CAL Key

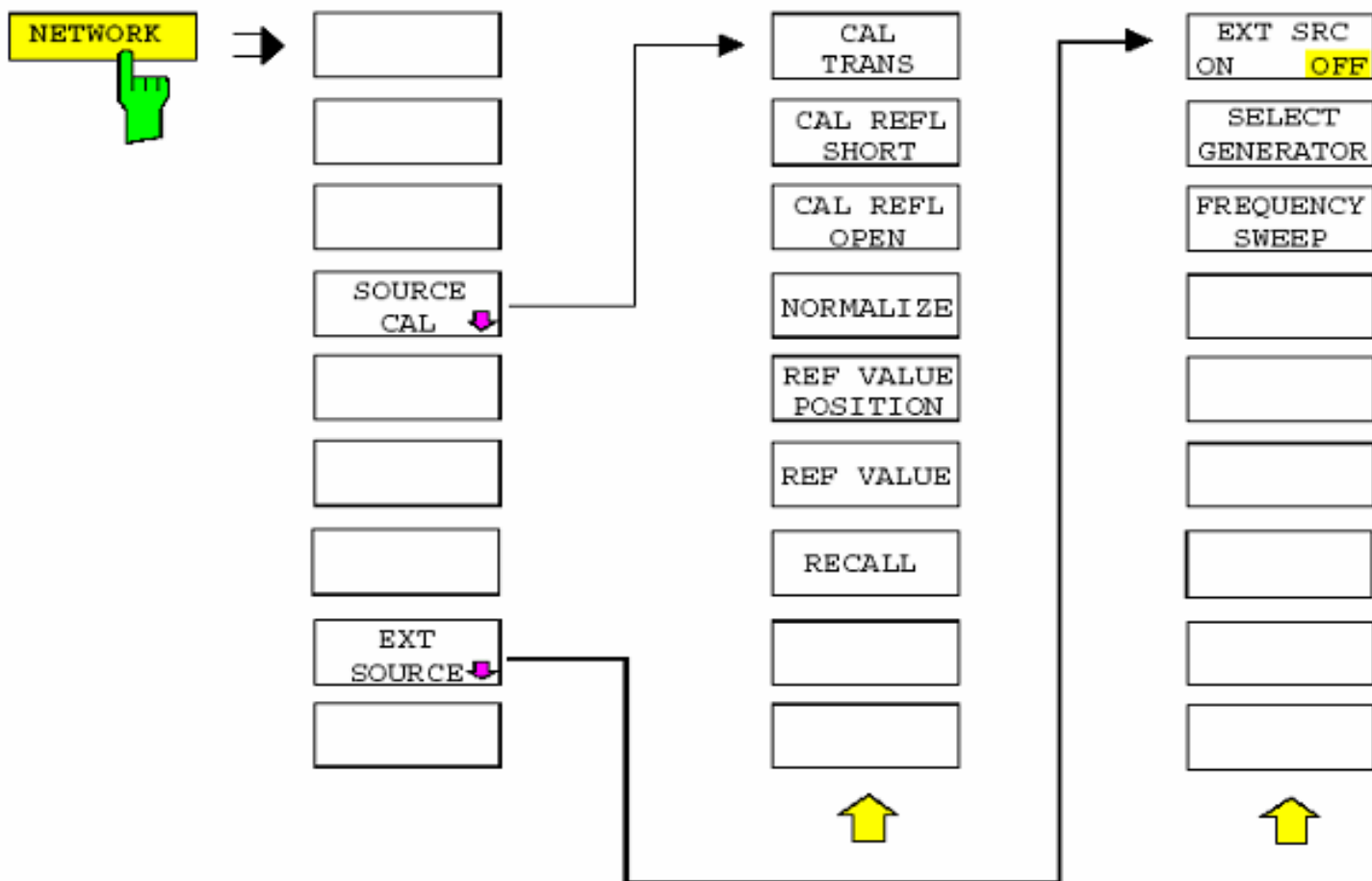


## 设置按键

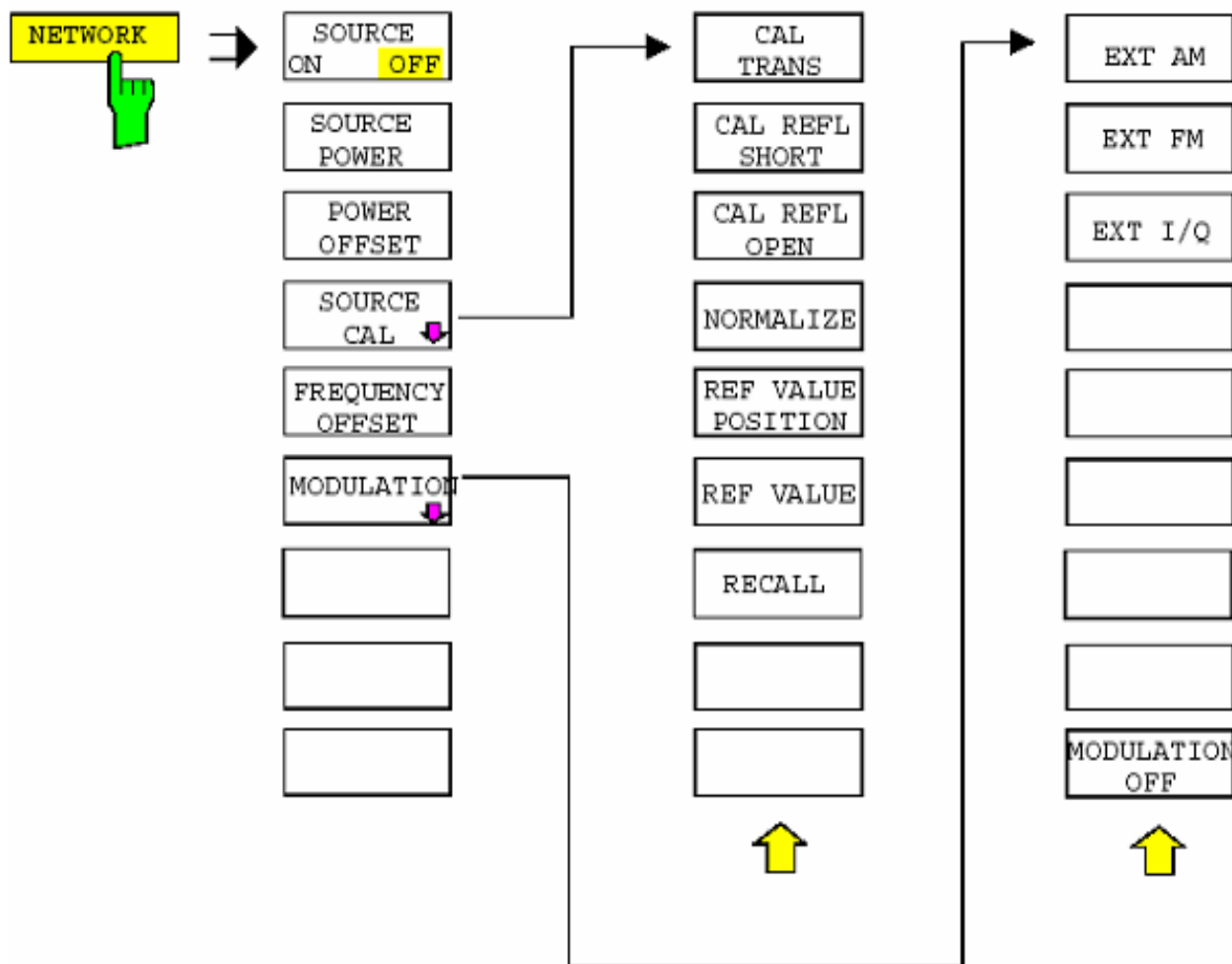
### SETUP Key



## 网络分析仪模式下的操作菜单



## 网络分析仪模式下的操作菜单



## 2、常用功能与测试

- 频率和幅度的测试

- ↪ 测量**绝对**频率和**绝对**幅度

- ↪ 频谱仪频率轴、幅度轴、分辨带宽的设置，光标的使用，

- ↪ 频率计数器的使用

- ↪ 测量**相对**频率和**相对**幅度

- （谐波失真的测量）

- 频谱仪频率轴、幅度轴、分辨带宽的设置，光标的使用

- （互调的测量）

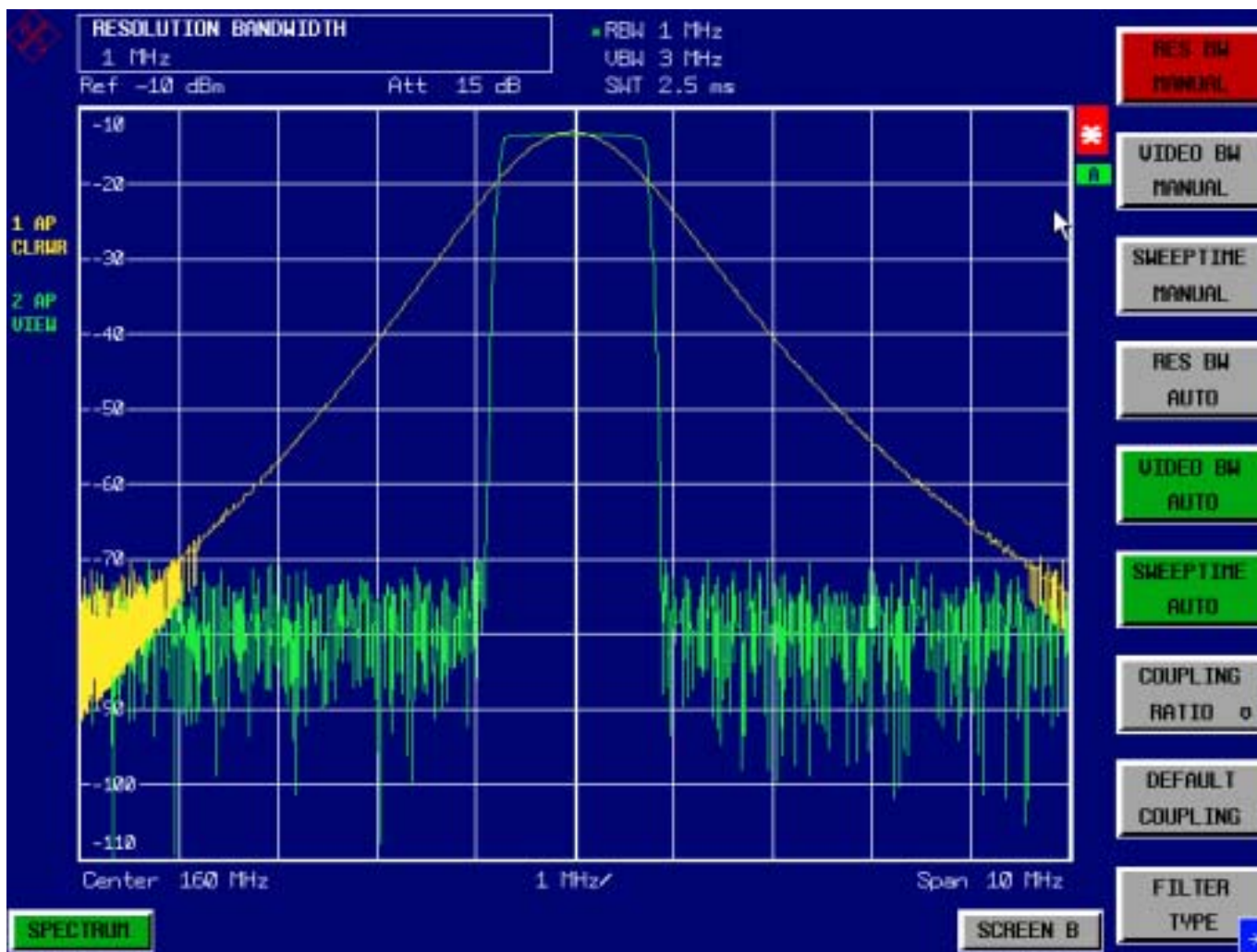
- 频谱仪频率轴、幅度轴、分辨带宽的设置，光标的使用

## ❏ 信道功率和相邻信道功率的测量

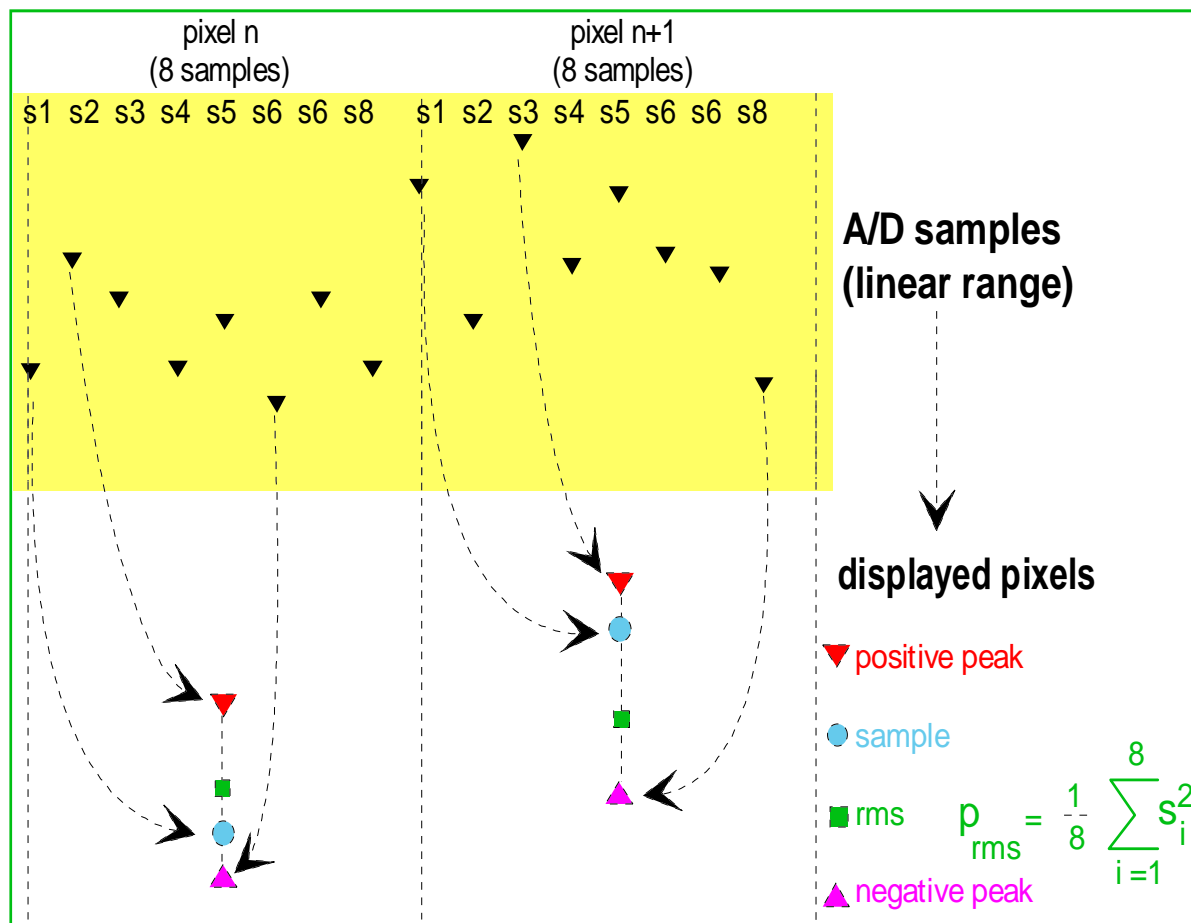
### ◆ 测量标准的选择

ACP STANDARD	
✓	NONE
	NADC IS136
	TETRA
	PDC
	PHS
	CDPD
	CDMA IS95A FWD
	CDMA IS95A REV
	CDMA IS95C Class 0 FWD
	CDMA IS95C Class 0 REV
	CDMA J-STD008 FWD
	CDMA J-STD008 REV
	CDMA IS95C Class 1 FWD
	CDMA IS95C Class 1 REV
	W-CDMA 4.096 FWD
	W-CDMA 4.096 REV
	W-CDMA 3GPP FWD
	W-CDMA 3GPP REV
	CDMA 2000 DS
	CDMA 2000 MC1
	CDMA 2000 MC3

## 信道滤波器的选择

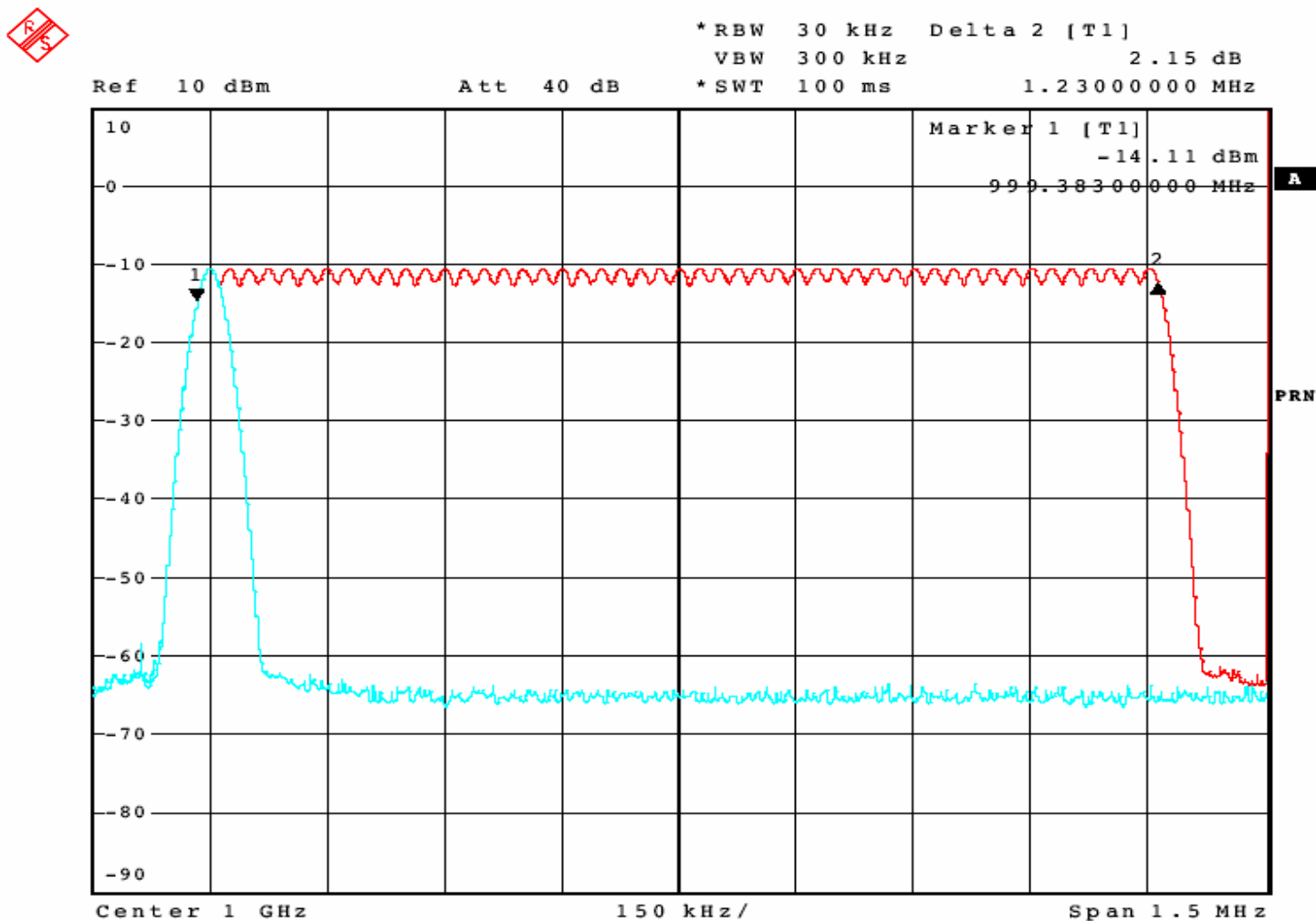


## 检波器的选择

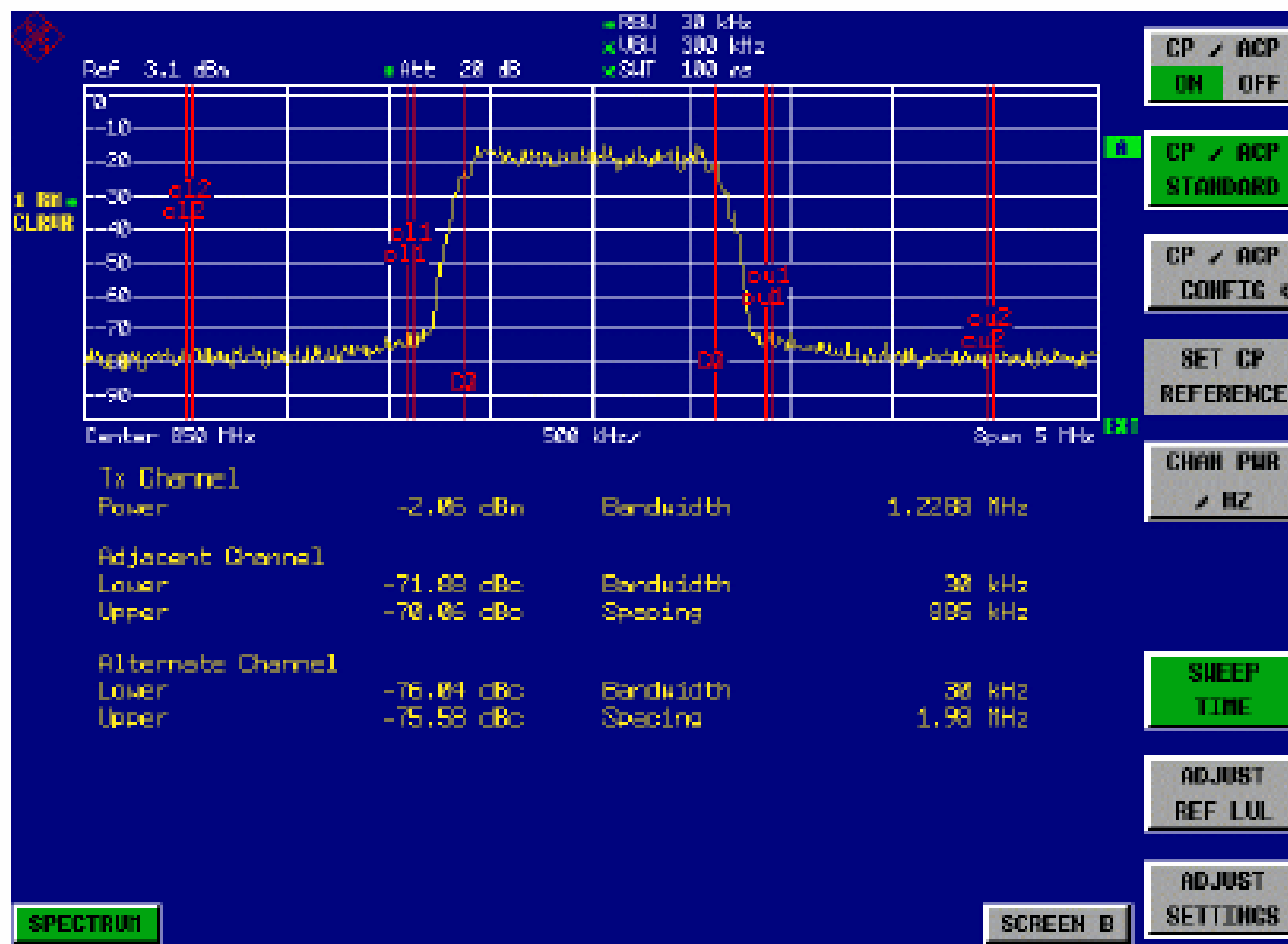




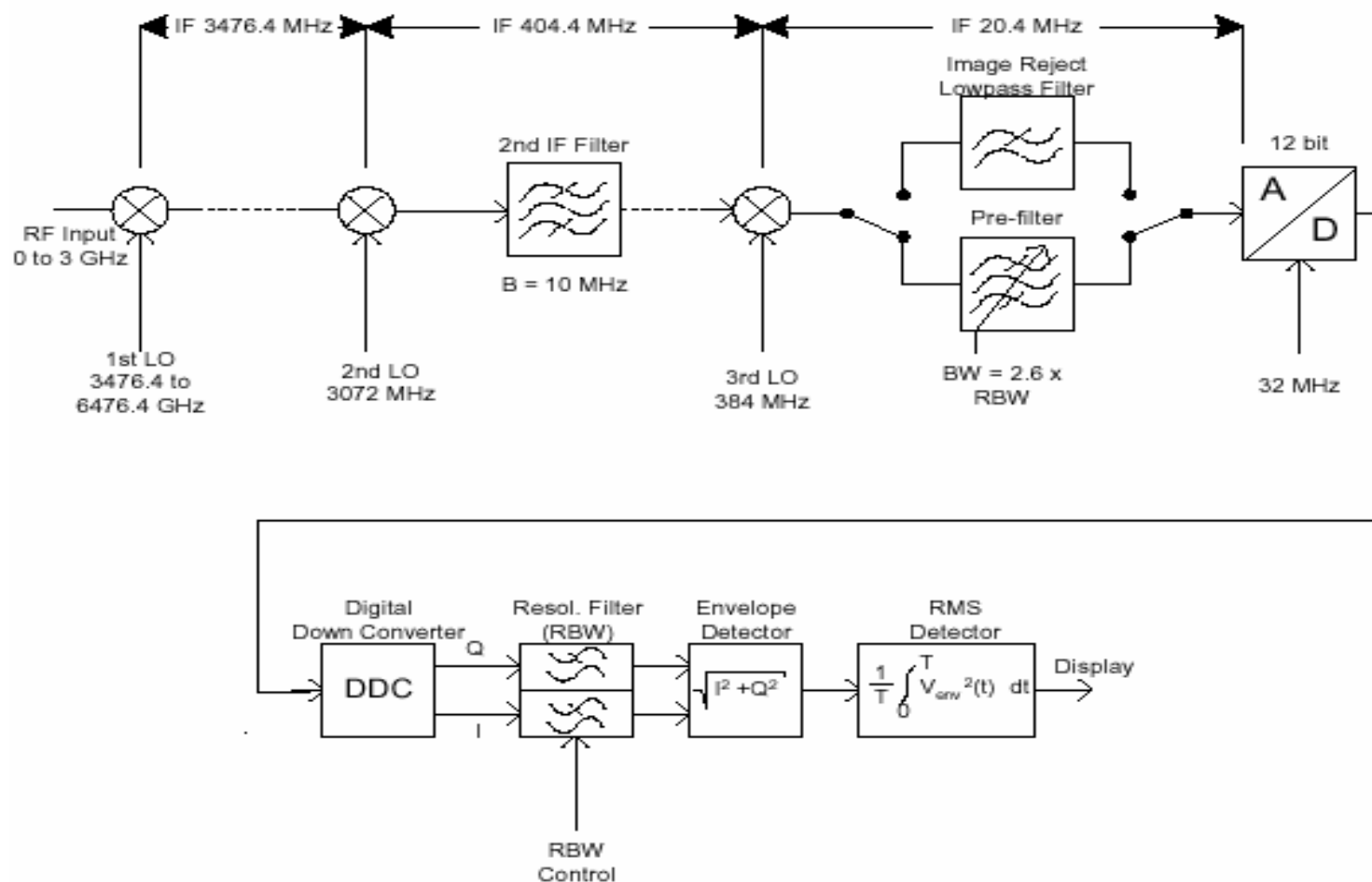
## ACP的测量方法（积分带宽法）



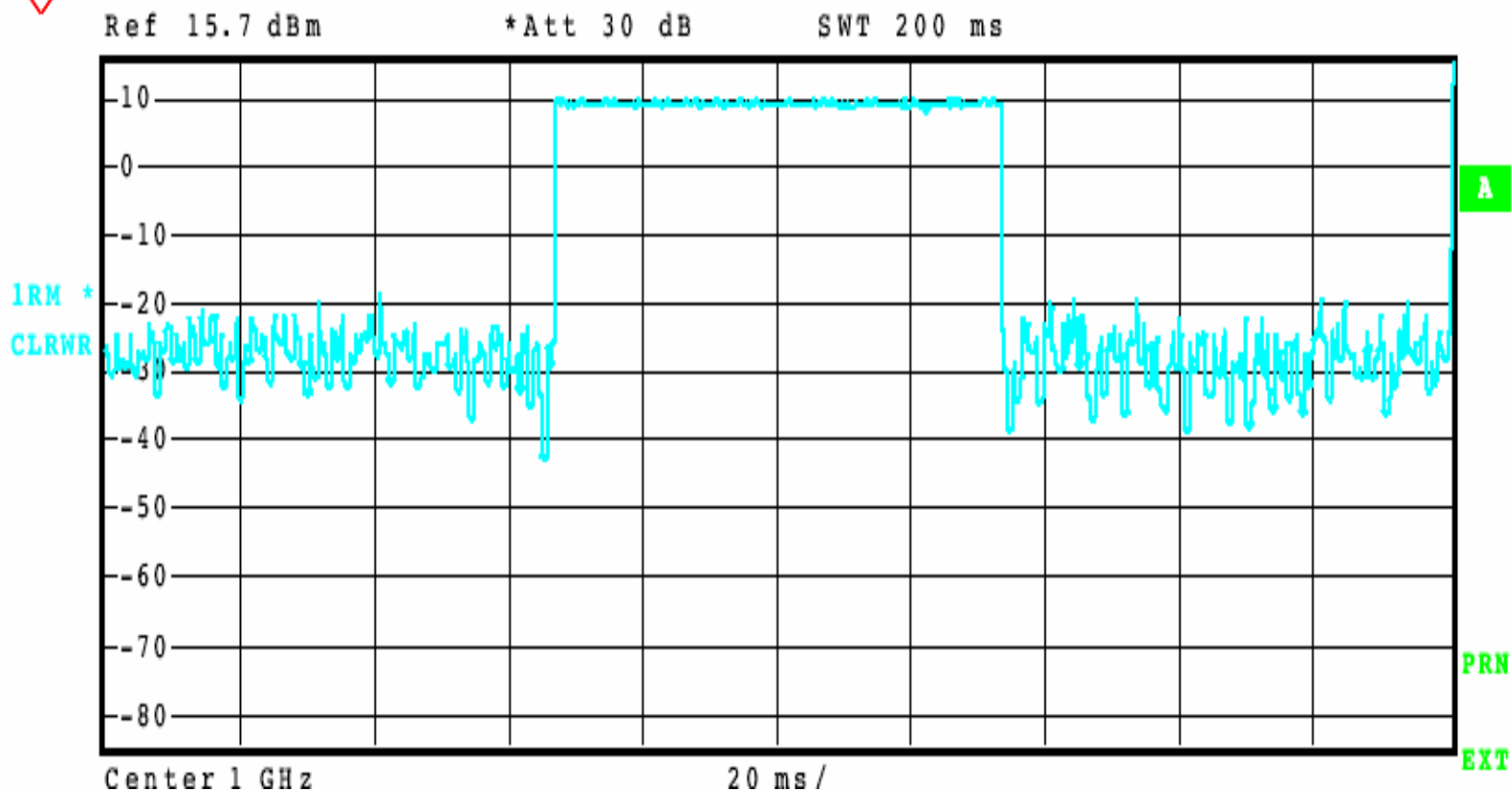
## 信道功率的测量结果



## ACP的测量原理（时域法）



## 时域法测量CP的结果

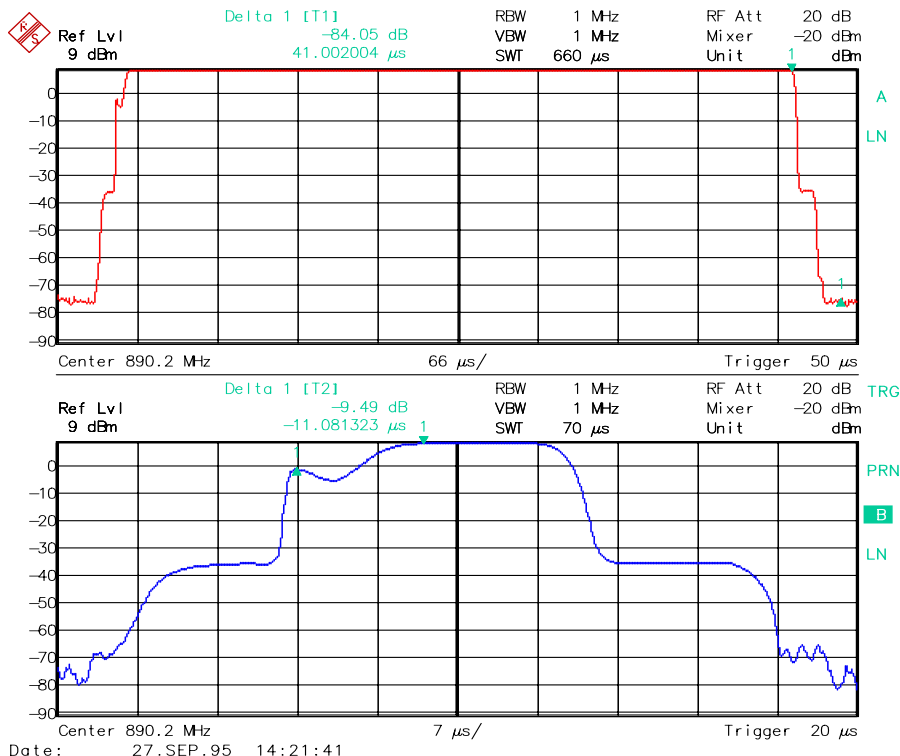


## 测量 GSM 的突发信号

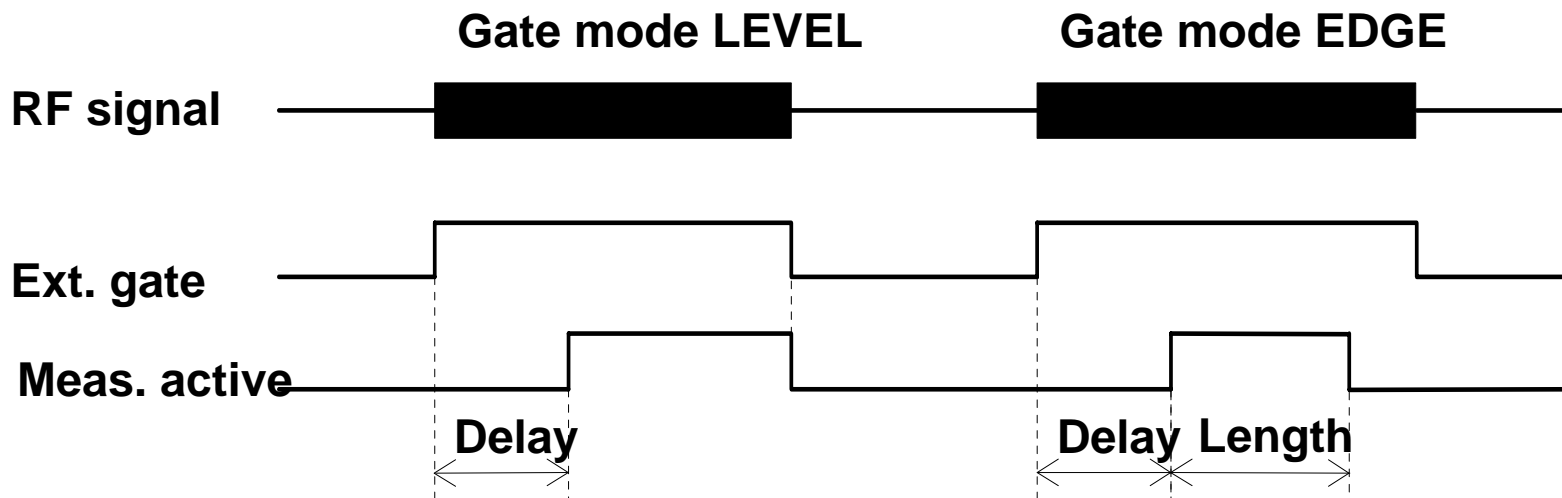
### ● 待测的功率作为时间的函数

:

- 高动态/低失真
- 快速A/D变换器满足精确的测量突发时间
- “窗口” 功能可以对上升/下降的侧面达到很高的分辨率
- 1 MHz 分辨率 (300 kHz 带宽使信号失真)

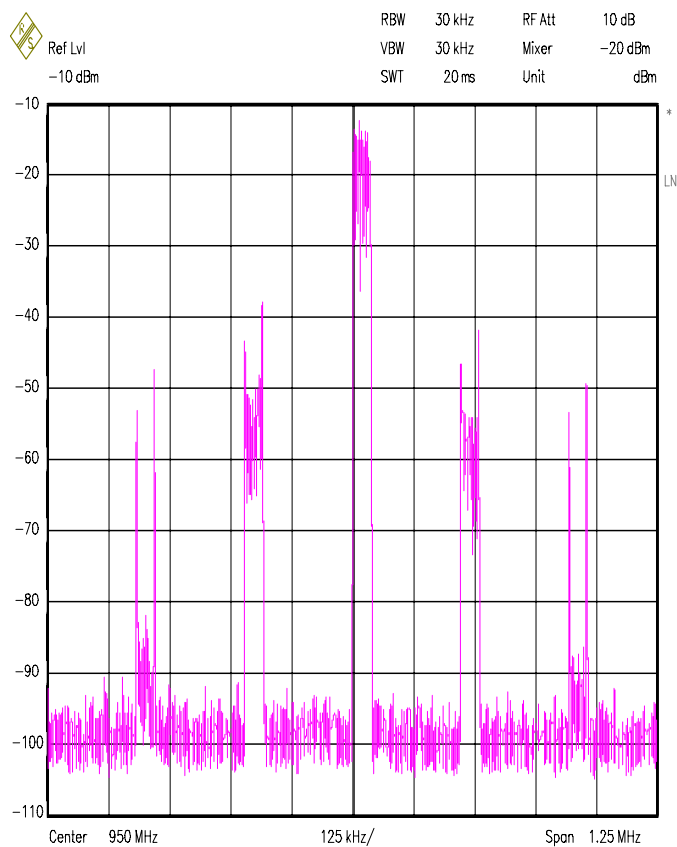


## FSP的门扫描

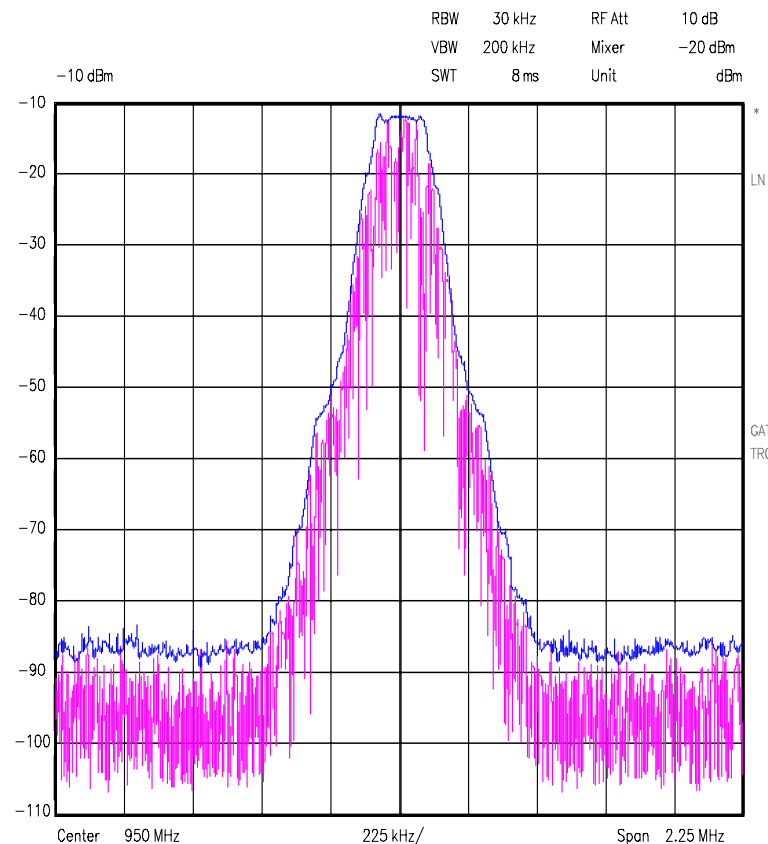


- TDMA信号的分析受到覆盖脉冲频谱包络的干扰
- 门触发功能允许估计在突发信号激活阶段的调制频谱纯度
- 最大峰值检波器捕获随机调值峰值

## 频谱有无GATING 的结果比较



Date: 31.MAR.95 14:04:31

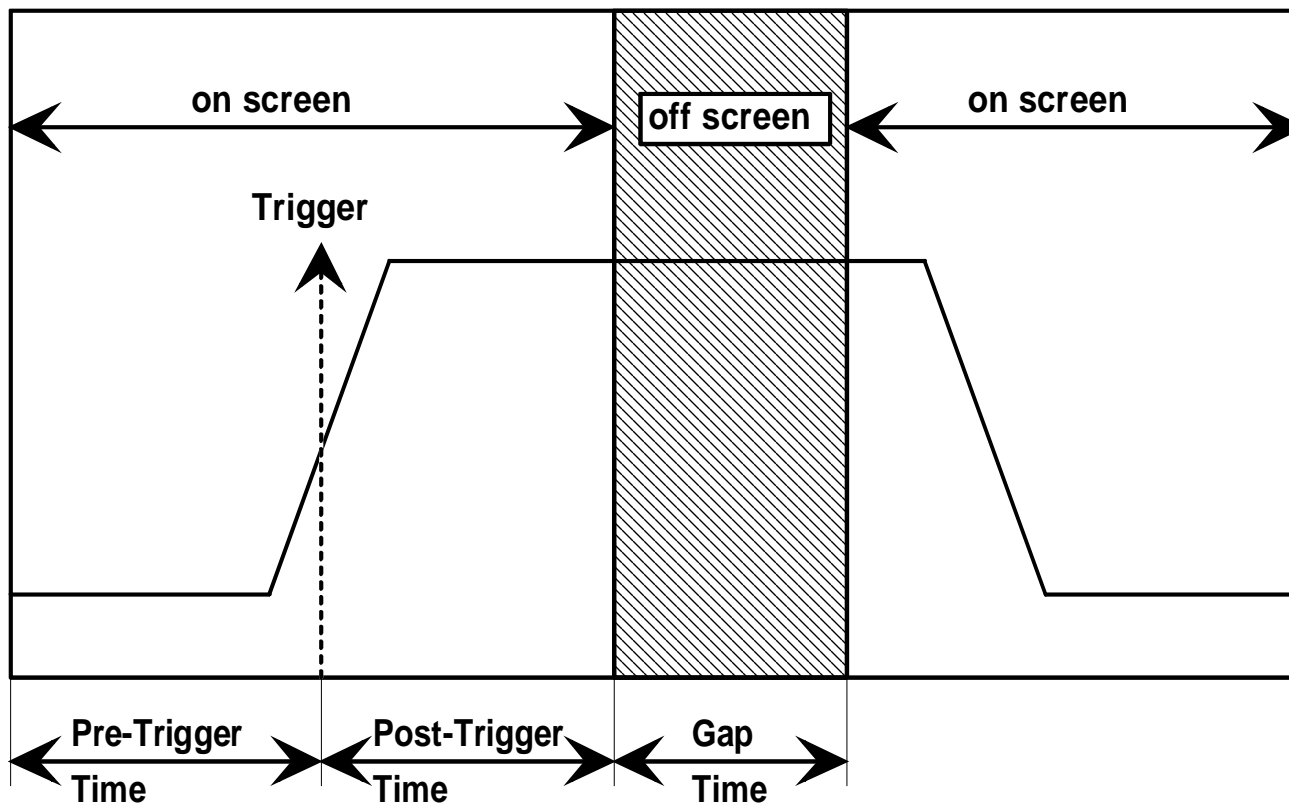


Date: 31.MAR.95 14:15:19

没有 GATING 的GSM信号的测量结果

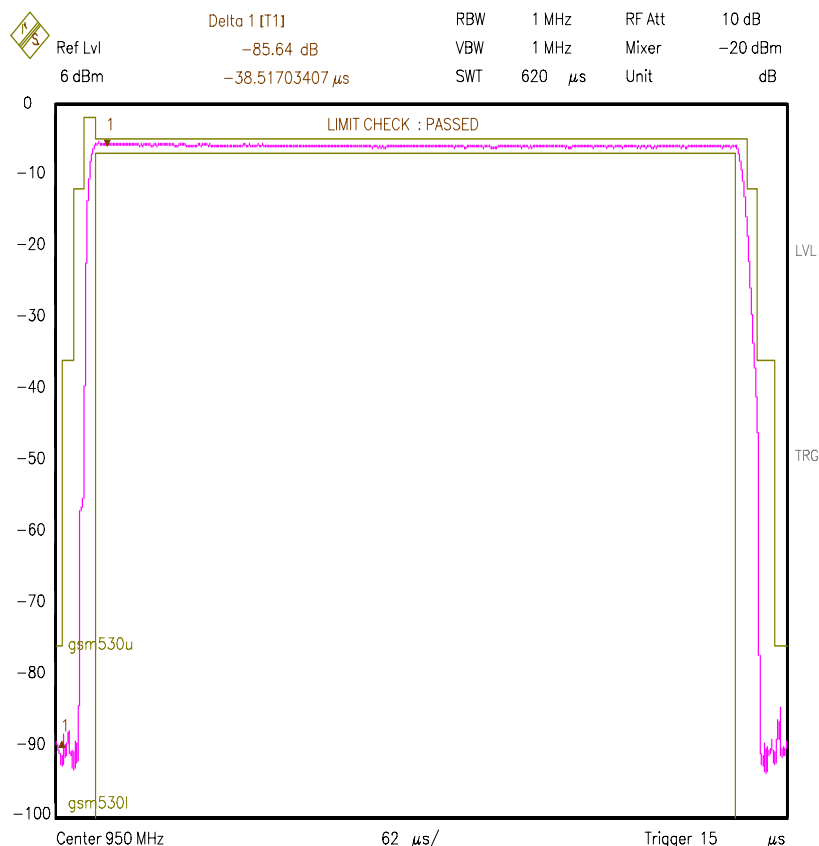
使用 GATING 的GSM信号的测量结果

## FSP的GAP扫描



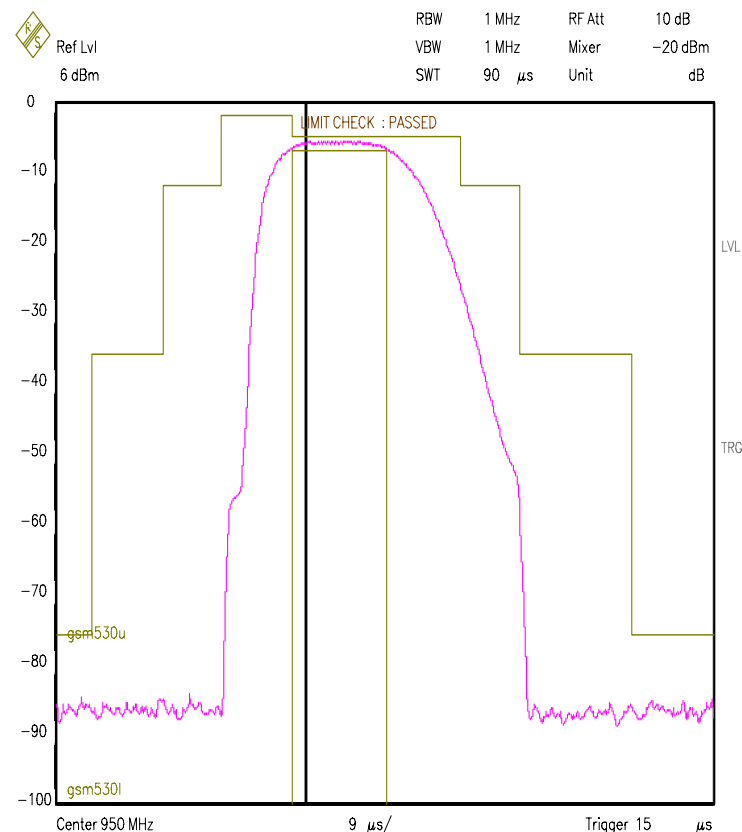


## GAP扫描的结果 (GSM-burst)



Date: 29.MAR.95 16:32:44

**GSM-Burst 85 dB的动态范围**



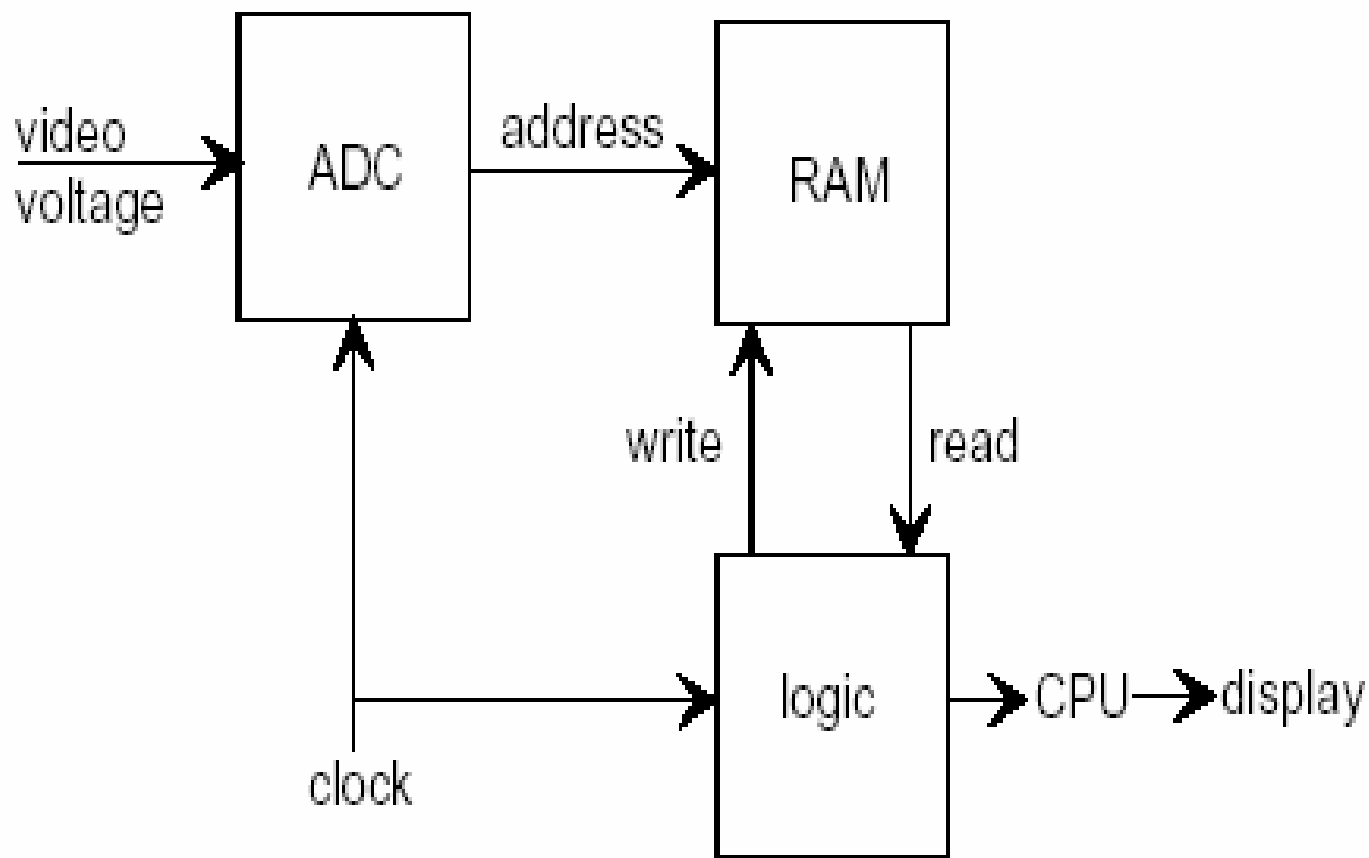
Date: 29.MAR.95 17:04:56

**使用GAP的Burst => 更好的分辨率**

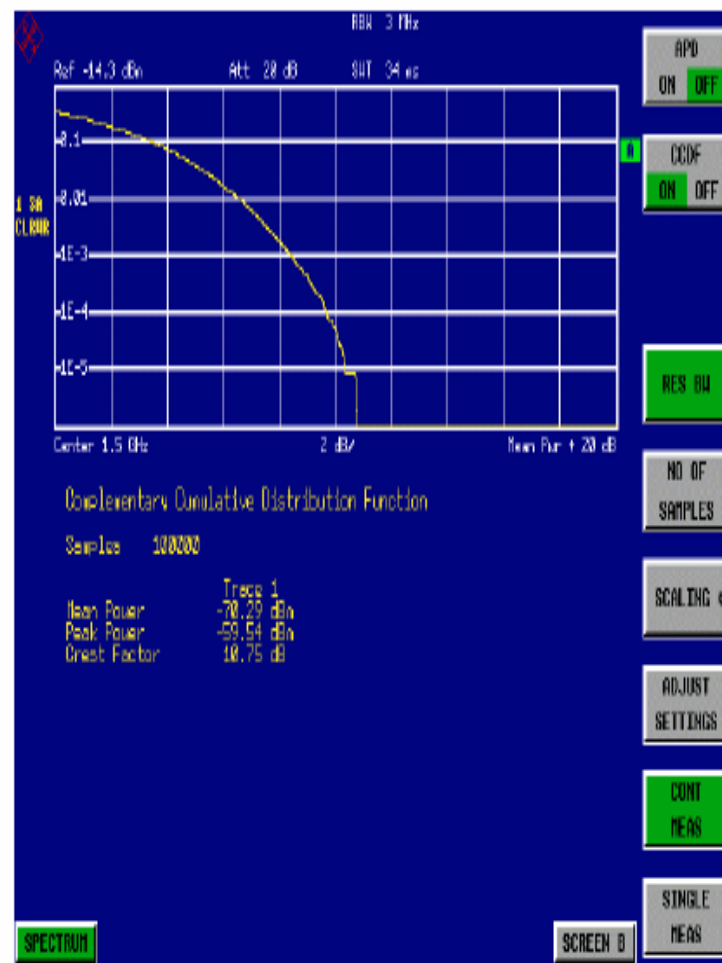
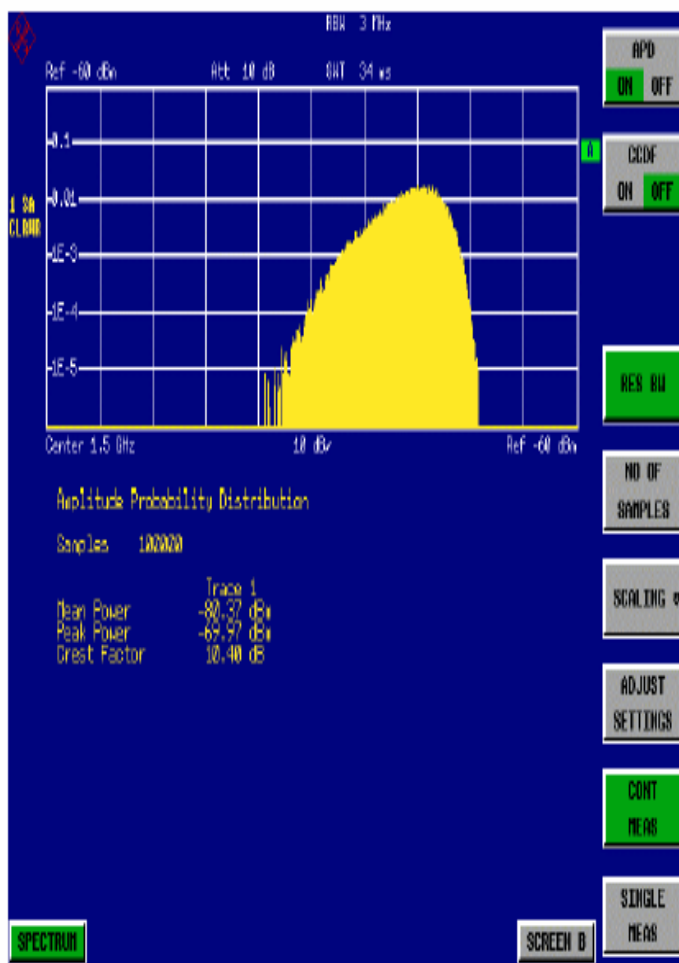
## □ 幅度统计特性的测量

- 幅度概率分布 (APD)
- 互补累积分布函数 (CCDF)
- 频谱仪的设置
  - ◆ 分辨带宽的选择
  - ◆ 采样点数的选择

## 幅度统计特性的测量原理



## CCDF和APD的测量结果（白噪声）



## FSP-B10 为FSU & FSP设计的外部信号发生器控制

### 传输测量



GEN OUTPUT



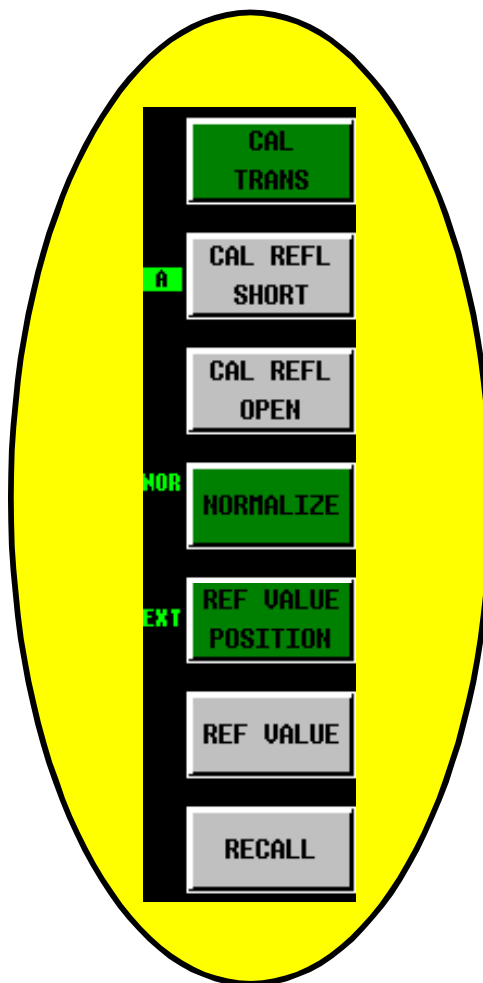
RF INPUT

**DUT**

- 通过校准和归一化消除测试设置的频率响应

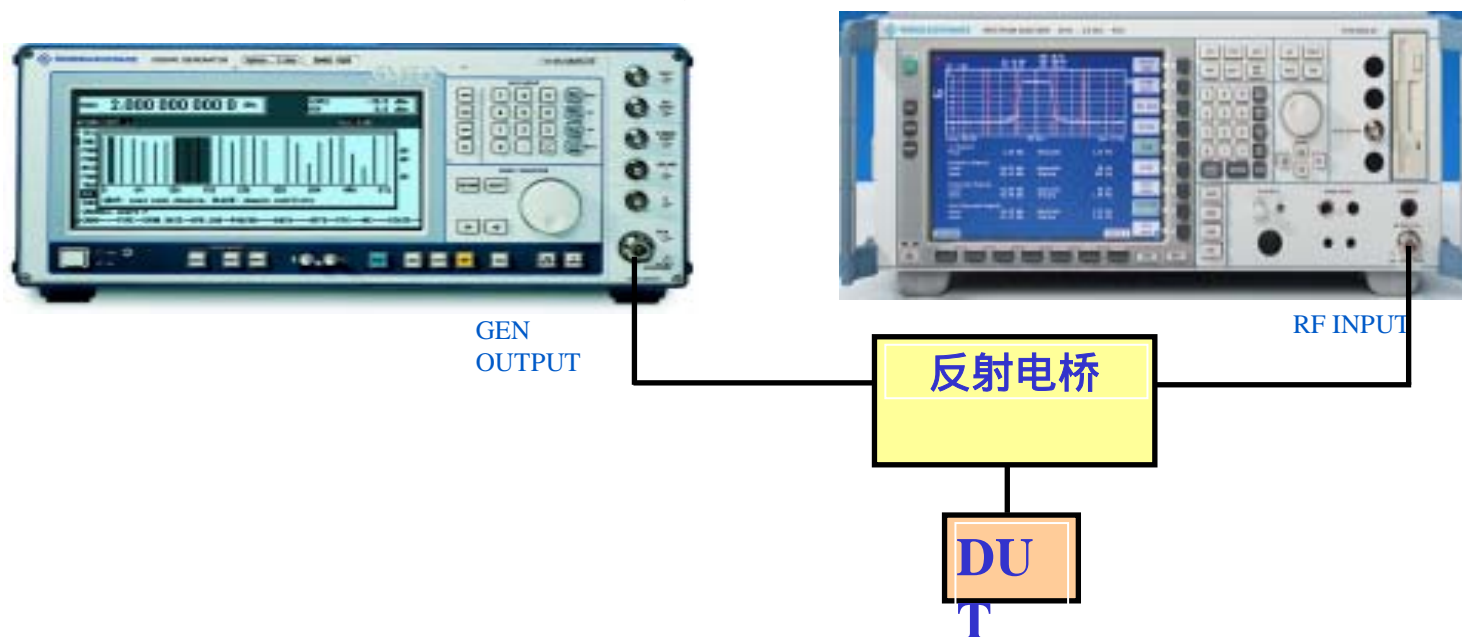
执行传输测试的校准，整个测试设置是“直通”连接

## 传输测试的操作菜单



## FSP-B10 为FSU & FSP设计的外部信号发生器控制

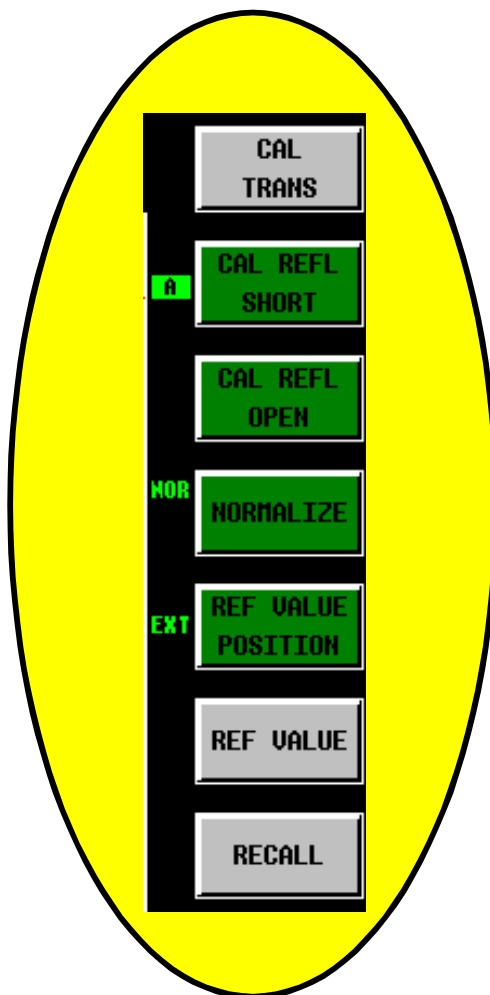
### 反射测量



标量反射测量需要附加一个方向性好的SWR电桥或是定向耦合器

- 内置校准和归一化功能  
[CAL REFL OPEN, CAL REFL SHORT]

## 反射测量的操作菜单



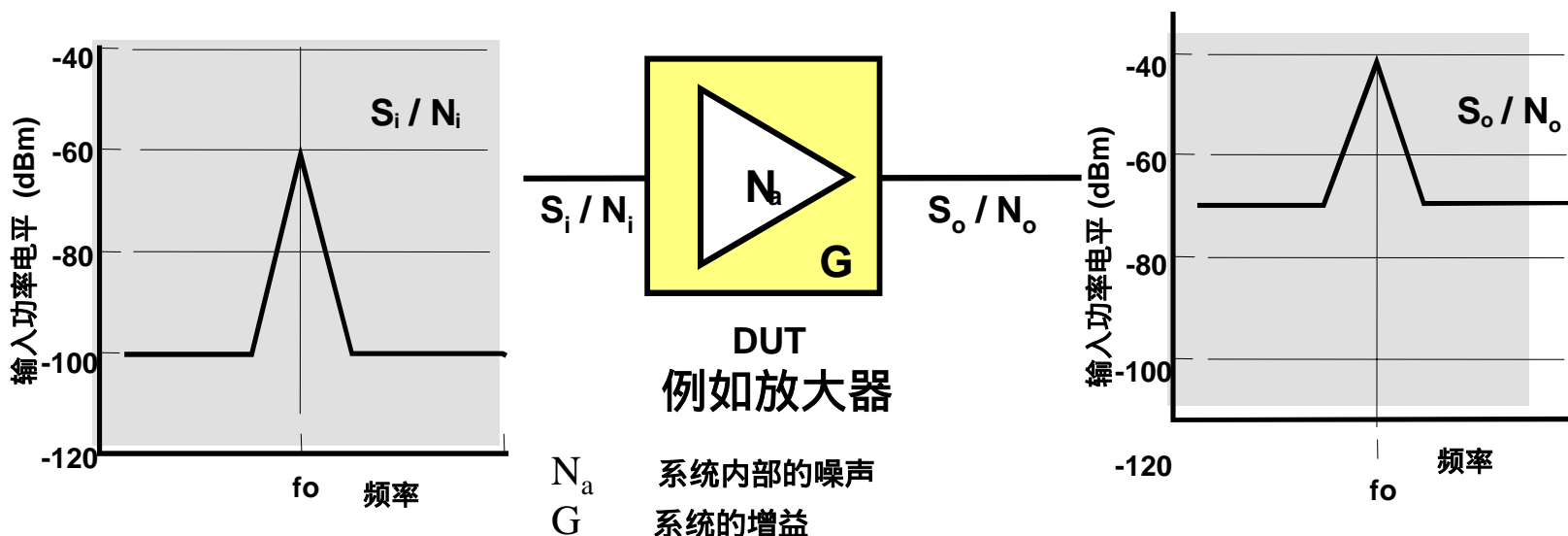


## ● 噪声系数的测量

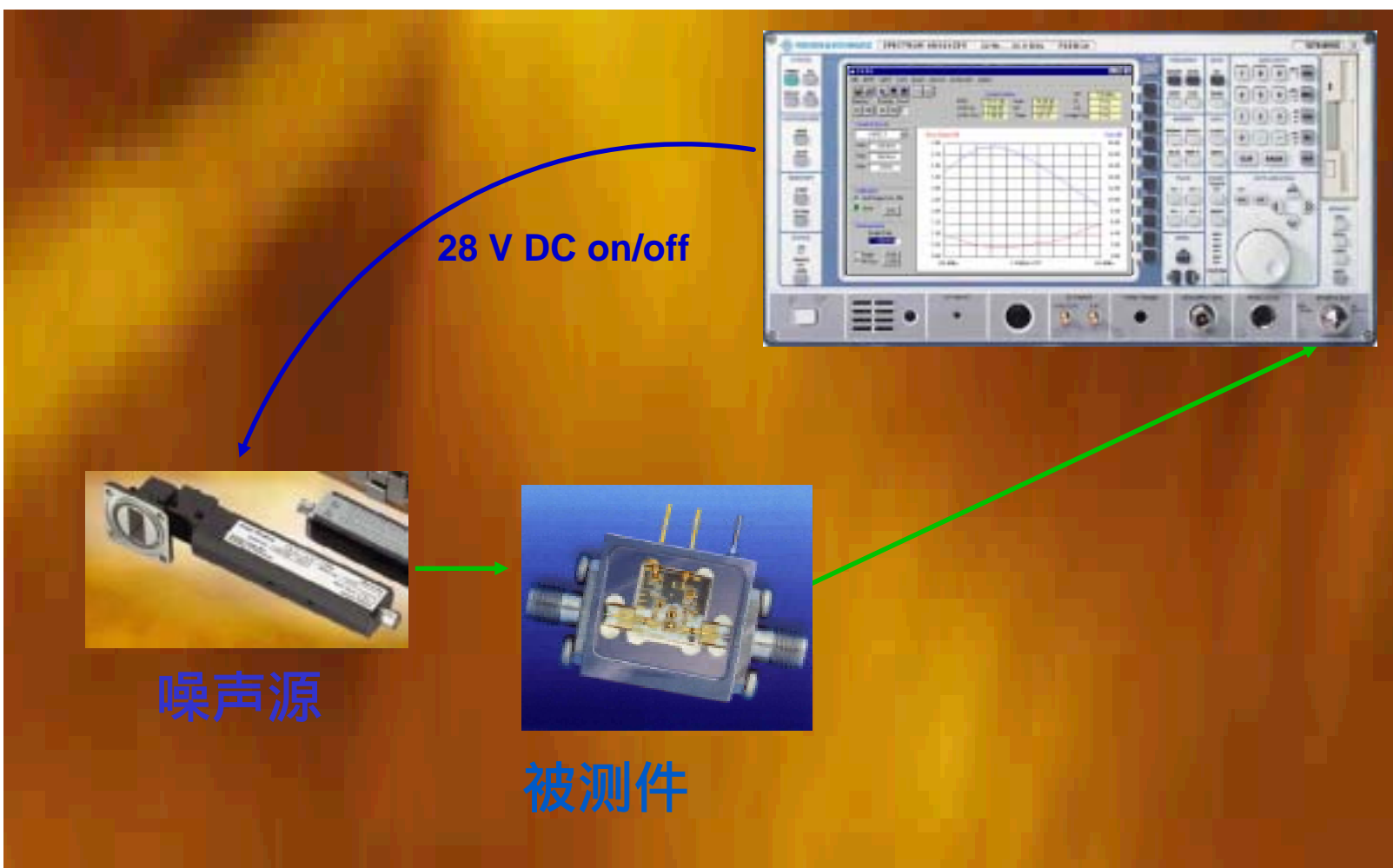
一般定义：

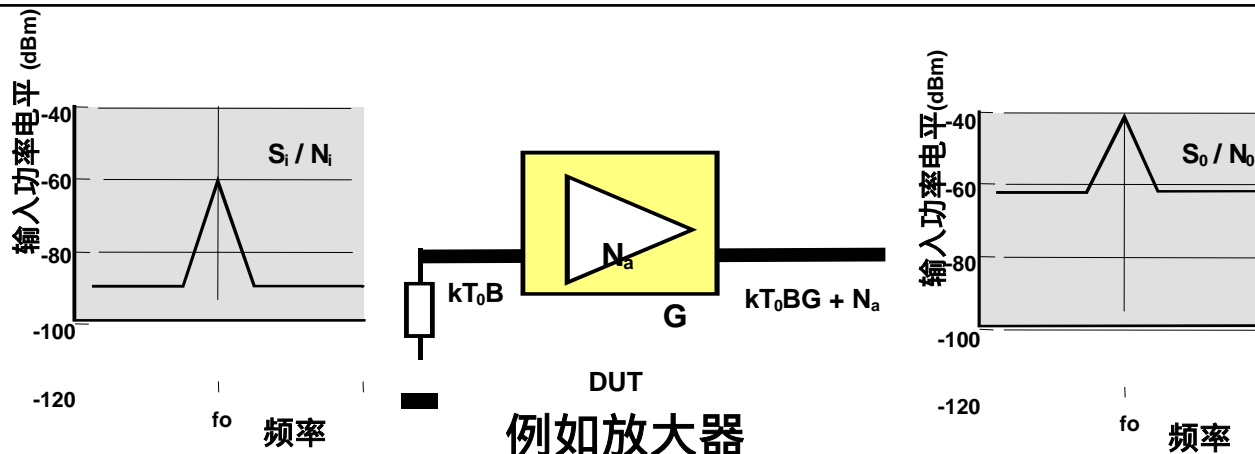
一个系统或网络的噪声系数F定义为：系统或网络的输入端口的信噪比和输出端口的信噪比之比。

$$F = \frac{S_i / N_i}{S_o / N_o}$$



## 利用FS-K3测量噪声和增益





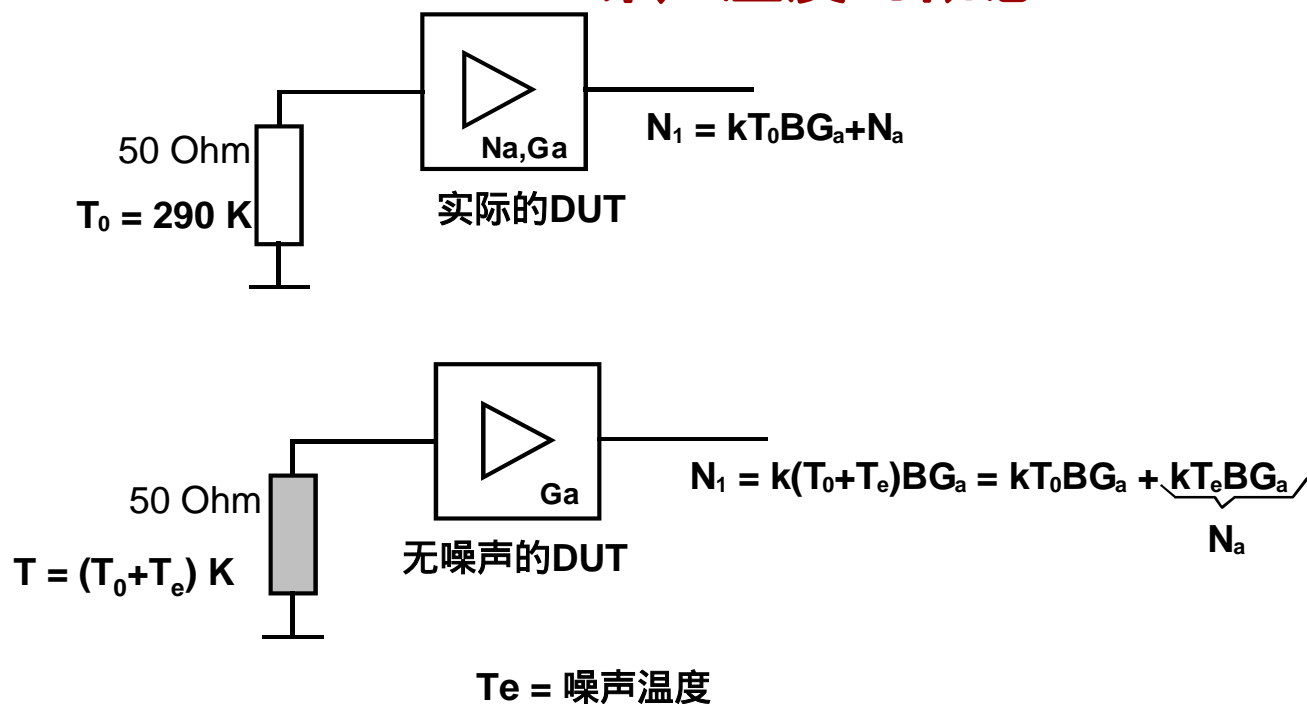
$$F = \frac{S_i / N_i}{S_o / N_o} = \frac{S_i / N_i}{GS_i / (N_a + GN_i)} = \frac{N_a + GN_i}{GN_i} = \frac{N_a + kT_0 BG}{kT_0 BG}$$

$kT_0$   $4.00 \times 10^{-21} \text{ W/Hz} = -174 \text{ dBm/Hz}$   
 $N_a$  系统的内部噪声  
 $B$  系统的噪声带宽  
 $G$  系统的增益  
 $T_0$  噪声参考温度 (定义为290K)

## IEEE 标准的定义:

噪声系数F是全部的输出噪声功率 ( $N_a + kT_0 BG$ )和输出噪声的一部分功率 ( $kT_0 BG$ )之比, 这部分功率  $kT_0 BG$  是由于输入噪声 ( $kT_0 B$ )引起的。这是在输入源的温度为290K的条件下得到的。

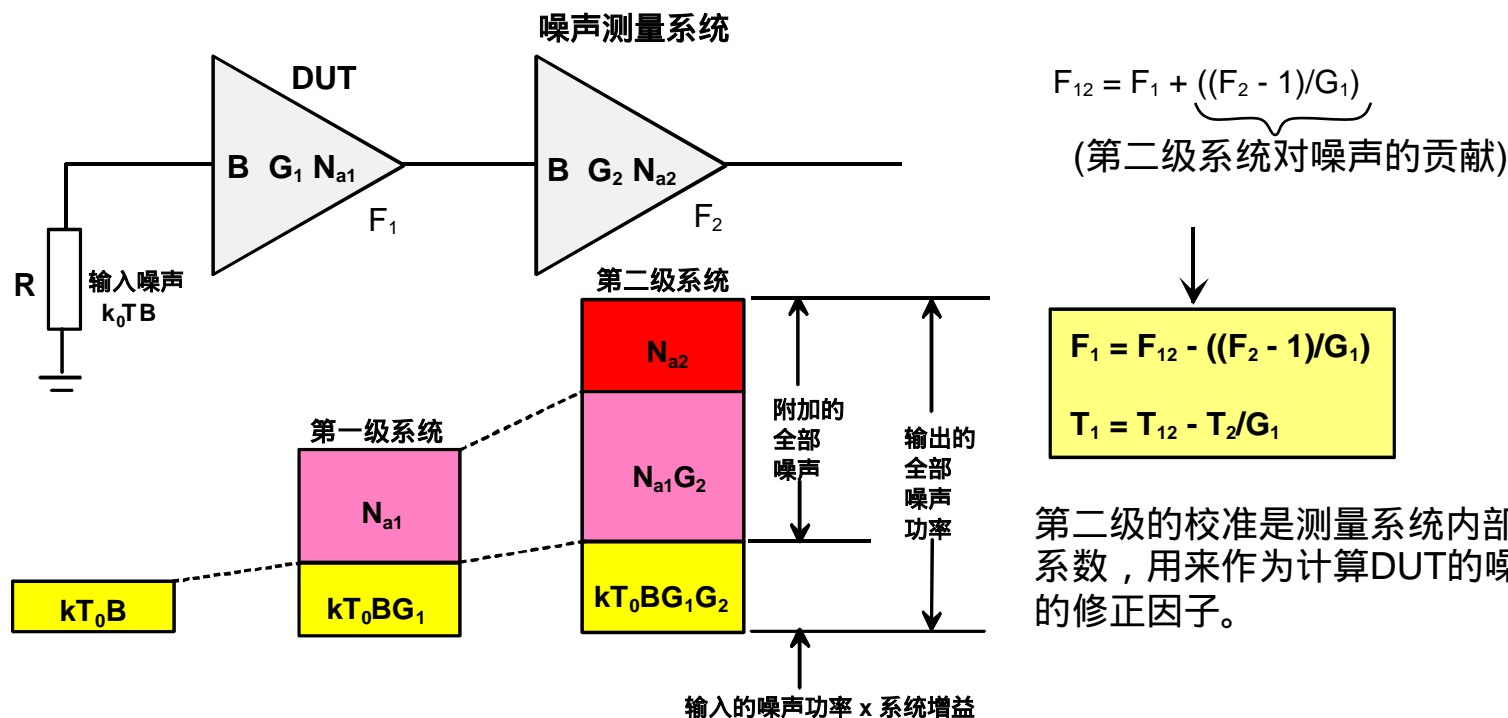
## 噪声温度的概念



$$F = 1 + \frac{T_e}{T_0}$$

由于有效噪声温度 $T_e$ 是源电阻产生的附加温度,因此即使是无噪声的DUT也会产生同样的噪声功率谱密度。

## 两级系统的噪声



第二级的校准是测量系统内部的噪声系数，用来作为计算DUT的噪声系数的修正因子。

利用频谱分析仪和噪声系数仪测量噪声系数的基本等式。

## Y系数法测量噪声系数

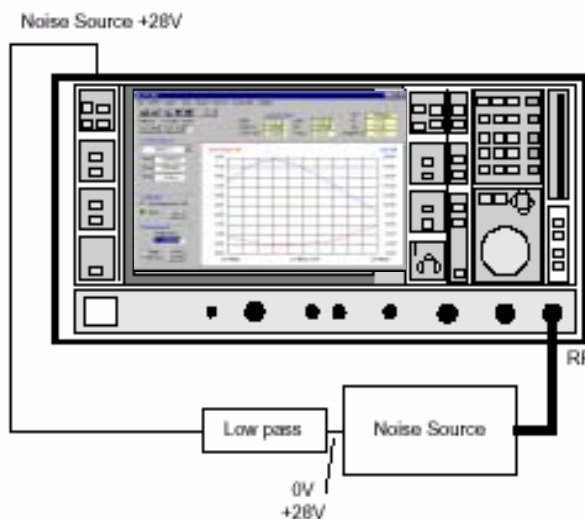
使用的噪声源对其输出噪声电平进行校准，用超噪比(ENR)表示。  
ENR 校准信息由噪声源提供，在 $T_0 = 290\text{ K}$ 条件下有效。

$T_S^{\text{OFF}}$  = 噪声源的物理温度 (通常定义为 290 K)

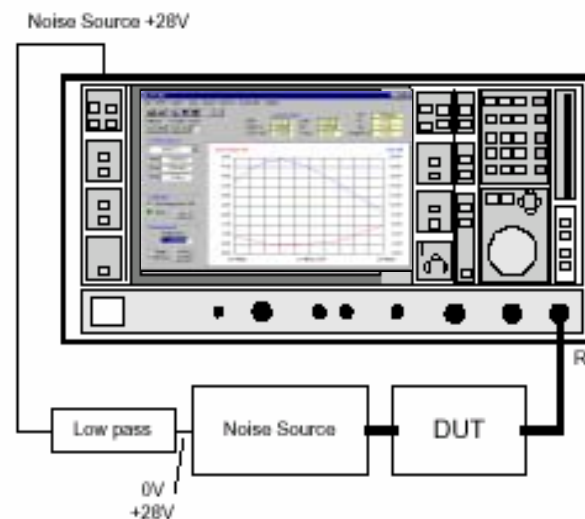
$T_S^{\text{ON}}$  = 噪声源在“ON”状态时的噪声温度。

$$ENR_{dB} = 10 \log_{10} [(T_S^{\text{ON}} - T_S^{\text{OFF}}) / T_0]$$

- Y系数法测量噪声系数通常分为两步：**校准**和**测量**



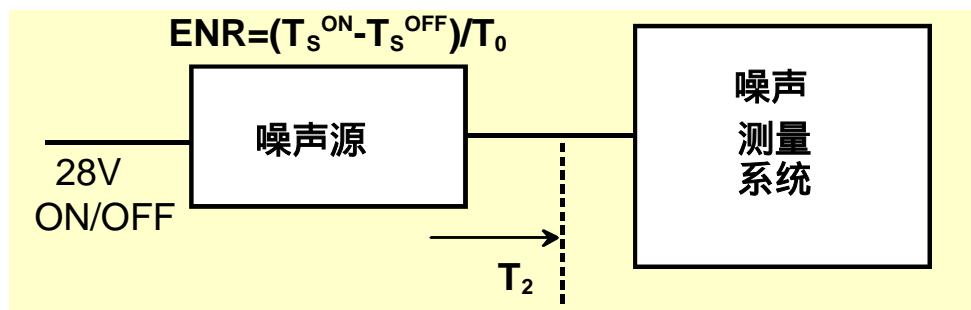
**校准**



**测量**

## Y系数法测量噪声系数

校准步骤:



$$Y_2 = \frac{N_2^{ON}}{N_2^{OFF}} = \frac{T_2^{ON}}{T_2^{OFF}} = \frac{T_s^{ON} + T_2}{T_s^{OFF} + T_2} \quad \text{其中: } ENR = 10 \log_{10} \left( \frac{T_s^{ON} - T_s^{OFF}}{T_0} \right)$$

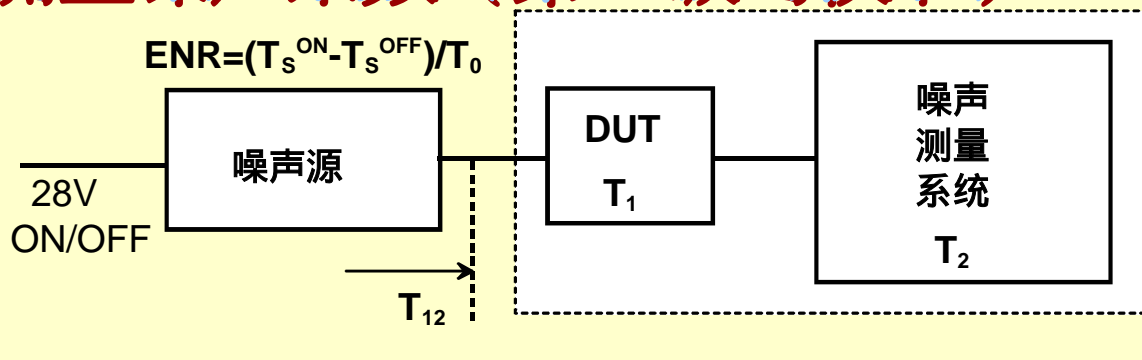
ON 噪声二极管在工作  
 OFF 噪声二极管不工作  
 $N_2^{ON}$  测量的噪声功率 (噪声二极管处于 “ON” 的状态)  
 $N_2^{OFF}$  测量的噪声功率 (噪声二极管处于 “OFF” 的状态)  
 $Y_2$  校准期间的Y系数  
 $T_2$  噪声测试系统的噪声温度  
 $T_s^{OFF}$  噪声源的物理温度  
 $T_s^{ON}$  通过噪声源的ENR值计算得到

$$T_2 = \frac{(T_s^{ON} - Y_2 T_s^{OFF})}{(Y_2 - 1)}$$

校准周期结束后, 仪器存储  $N_2^{ON}$ ,  $N_2^{OFF}$  和  $T_2$  的计算值

## 系数法测量噪声系数（第二级的校准）

与DUT一起测试:



$$Y_{12} = \frac{N_{12}^{ON}}{N_{12}^{OFF}} = \frac{T_{12}^{ON}}{T_{12}^{OFF}} = \frac{T_S^{ON} + T_{12}}{T_S^{OFF} + T_{12}} \longrightarrow T_{12} = \frac{(T_S^{ON} - Y_{12} T_S^{OFF})}{(Y_{12} - 1)}$$

$$G_1 = \frac{(N_{12}^{ON} - N_{12}^{OFF})}{(N_2^{ON} - N_2^{OFF})}$$



$$T_1 = T_{12} - T_2 / G_1$$

第二级的校准有必要作为单独的校准步骤，在校准过程中测定仪器自身的噪声温度。这个校准值需要用来在测试步骤中去修正测定的噪声温度。这项技术用于进行非常精确的测量。



## 结束语

感谢您的参与!