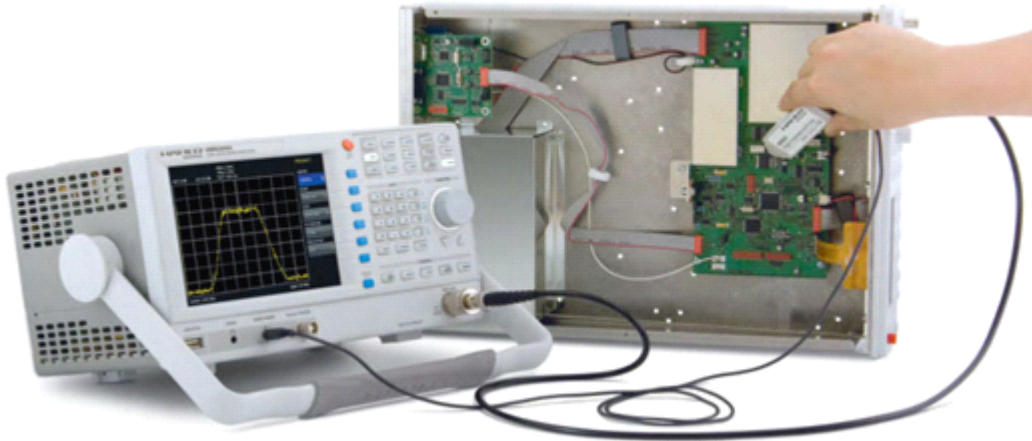
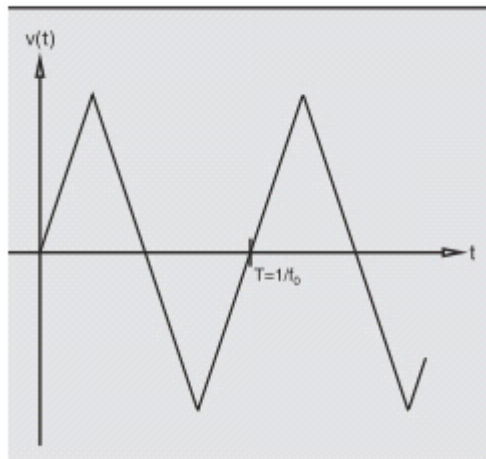


## 频谱分析仪简述

对许多人来说，频谱分析是被少数专家掌握的一种“神秘知识”。人们可能从阅读文献上得到这种印象。它充满着你所看到的原理，构成和不同的等式。应用工程师主要关心的集中在两个问题上：“它是如何工作的和利用它我们能做什么？”

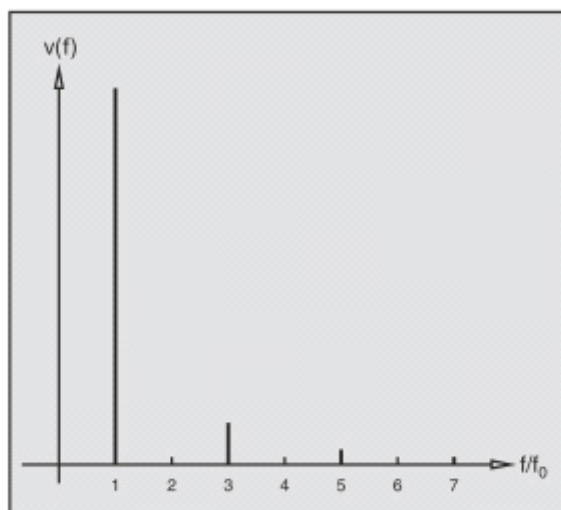


在这篇文章中，HAMEG 采用“实用的”途径来解释这些问题。我们将证明使用频谱分析仪进行测量并不比使用示波器难。如果恰当地使用，频谱分析仪在研究和开发，质量保证和电磁兼容方面的应用是多元化的。下面我们将尽可能把原理和数学计算降低到最小。 本文将概述信号分析以及设备和应用种类。例子来自于EMI和频响测量(使用惠美公司的[HM5014-2频谱分析仪](#))的实际应用。 **介绍** 高性能现代电子(半导体元件，微处理器，振荡器等)发展的一个原因是不断增长的处理速度。信号频率扩展到更高的范围，在这一范围也采用频谱分析。在以下章节，我们将介绍示波器和频谱分析仪各自特殊的优势和劣势。 **示波器** 电子信号传统的分析方法是显示幅度随时间的变化。示波器正常的Yt工作模式(图1)显示这种变化。人们熟悉这种时间的显示方式。由于这个原因，示波器也用在数字电子中。示波器垂直或幅度刻度是线性的，因此示波器具有低的动态范围(30dB到50dB)。



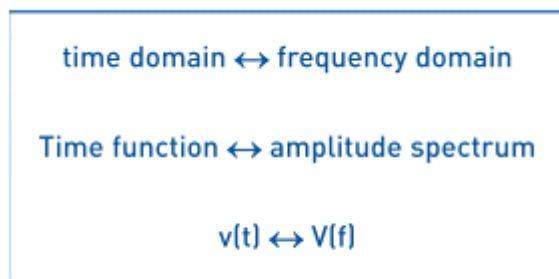
**图1：示波器显示：幅度与时间（Yt工作模式），信号：三角波**

用来测量电磁干扰的示波器必须非常快速，而且具有几个纳秒上升时间的特性。因此它们是非常昂贵的。 **频谱分析仪** 简单的例子是调谐显示收音机。在原理上这是一个“小的”频谱分析仪。当调谐频率时，场强计显示调谐频率的功率密度。从天线得到的收音机的输入信号包含所有电台的频率。当人工在所有频率带宽内调谐一次后，结果显示幅度随频率变化的图形。频谱分析仪就是基于这个原理（图2），在第二次世界大战中第一次使用频谱分析仪快速得到敌人活动的带宽概况。



**图2：频谱分析仪显示：幅度与频率（Yf工作模式），信号：三角波**

频谱分析仪可以分析信号频率分量到非常高的频率（300GHz）。由于信号进行对数处理，频谱分析仪具有极其高的动态范围（>80dB），输入阻抗50Ω。频谱分析仪非常脆弱而且容易被高电平信号毁坏（请注意观察其最大输入电压）。因此，当被测信号未知时，第一次测量时建议假设信号电平非常高。在进行任何测量时，进一步强调使用最大衰减和最大频率范围。牢记标准频谱分析仪仅仅能显示信号的幅度是非常重要的，时间和相位信息丢失，然而在实际应用中大多没有影响。 **相同信号不同表示** 每一个周期信号可以表示为时间或频率的函数。正如以上提及的，这两种表示方法具有不同的品质。因为普通频谱分析仪只保留单一频率分量的幅度，时间和相位信息丢失。因此，频谱分析仪的幅度与频率的显示不能重建时域信号。信号时域和频域表示与傅里叶变换有关。



下面信息原理章节将对其进行详细说明。

	Oscilloscope	Spectrum Analyzer
display:	Yt-operating mode (amplitude versus time)	Yf-operating mode (amplitude versus frequency)
x-direction/scale	linear (time)	linear (frequency)
y-direction/scale	linear (amplitude)	logarithmic (amplitude)
frequency range	DC to 12 GHz	0 to 300 GHz (no DC component)
dynamic range	30 to 50 dB	larger than 80 dB
phase information	yes	lost
prices	from a few thousand EURO to 100,000.00 EURO	a few thousand EURO up to 100,000.00 EURO

表1：示波器/频谱分析仪对比

表1是示波器和频谱分析仪的最重要的特性。图1显示时域信号，图2显示相同信号的频域特性。**信息原理—时域** Jean Joseph Fourier 在1808年指出任一周期信号可以分解成一个基波和它的谐波。电子学上意味着：每一个周期信号（方波，三角波，锯齿波和其它波形）都可以用一系列不同幅度和相位的正弦波来重建。图3中曲线1到4相叠加得到一个三角波形。基波（曲线1）与信号的周期相同。曲线2到4被称为谐波，谐波频率总是基波频率的整数倍。考虑的谐波越多，显示越接近真实的三角波形。

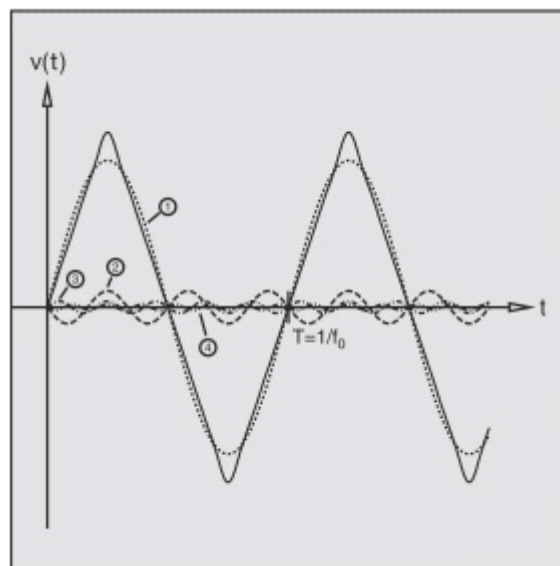


图3：曲线1-4叠加构成三角波

**频域** 为了在频域查看三角波，要用到一个实时分析仪。该仪器输入端包含大量并行带通滤波器。如果三角波施加于输入端，只有那些与曲线1到4频率相一致的谐振频率的滤波器输出响应。每一滤波器的输出电压为单一频率的幅度。

表2

Curve 1	Frequency	$f_0 = 10 \text{ kHz}$	Amplitude = 1
Curve 2	Frequency	$3f_0 = 30 \text{ kHz}$	Amplitude = 0.111
Curve 3	Frequency	$5f_0 = 50 \text{ kHz}$	Amplitude = 0.04
Curve 4	Frequency	$7f_0 = 70 \text{ kHz}$	Amplitude = 0.02

**傅里叶分析** 正如前面所呈现的示波器显示的时域三角波信号（图1）和频谱分析仪显示的

频域信号（图2）。用傅里叶变换进行时域和频域变换，这需要积分。由于频谱分析仪为我们作傅里叶变换，我们可以放弃进行原理上的数学处理。**频谱分析仪 Y-刻度** 示波器 Y 轴是线性的。每格对应相同的量。例子：1格=2v 那么5格显示=10v 相比之下，频谱分析仪 Y 轴是对数的。因此每格对应相同的 dB 值。例子：1格=10dB 那么5格显示=50dB 对数刻度的优点是屏幕能够显示非常大的范围。dB (decible) 等于1/10 Bel 单位。一个 Bel 为两个功率比值取10的对数。它是一个纯数值。（见表3）。

表3:

Decade logarithm (dB-value) and ratio of power		In practice:
0 Bel	$\cong 10^0 = 1$	signal is transmitted 1:1, i. e. there is amplification nor attenuation
1 Bel	equals a ratio of powers of $10^1 = 10$	amplification of the signal by a factor of 10
-1 Bel	equals $10^{-1} = 0.1$	attenuation of the signal by a factor of 10
1 dB	equals $10^{0.1} = 1.259$	amplification by a factor of 1.259
3 dB	equals $10^{0.3} = 1.995 \approx 2$	amplification by a factor of 2
10 dB	equals $10^1 = 10$	amplification by a factor of 10
<b>Mathematics:</b> 1 Bel = $\lg 10^1 = \lg (10^{0.1})^{10} = 10 \lg 10^{0.1}$ <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <span>Bel</span> <span>10 dB</span> </div>		

**dB 功率计算** 图4显示一个双端口：输入电压  $V_i$ ; 输出电压  $V_o$ . 输入电阻  $R_i$  等于负载电阻  $R_L$  。双端口功率放大系数 dB 表示为： $A_p = 10 (P_L/P_i) \text{ dB}$  等式1

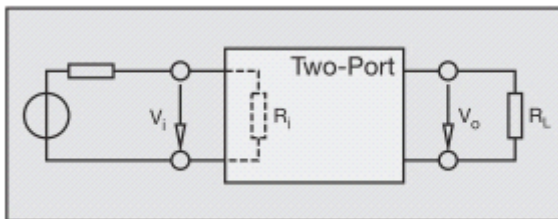


图4：双端口功率放大系数 dB 表示

**电压 dB 表示** 如果电压 (V) 施加于电阻 (R) 上，将产生等于  $V^2/R$  的功率。 $P_i = V_i^2/R_i$  和  $P_L = V_o^2/R_L$  如果代入等式1，那么  $A = 10 (V_o^2 \times R_i / V_i^2 \times R_L)$  当  $R_i = R_L$ , 那么  $A = 10 (V_o^2 / V_i^2)$   $AV = 20 (V_o / V_i) \text{ dB}$  等式2 **dB 计算举例** 假设  $V_o = 10V, V_i = 2V$   $AV = V_o / V_i = 10/2 = 5$  代入等式2:  $AV = 20 \log 5 = 13.98 \text{ dB}$  如果一个 +19dB 放大器后面接入一个 -10dB 衰减器，那么整个链路的放大系数等于它们之和:  $-10\text{dB} + 19\text{dB} = +9\text{dB}$  **基于参考电平 dB 值 (=绝对电平)** 单位 dB 不是一个度量单位，它仅仅表达为两个值的比率；例如电压。对于绝对电平的应用，参考电平引入到技术应用中。通常 1mW 作为功率输出的基本参考功率。

0 dBm	$\cong 10^0 \text{ mW}$	= 1 mW
30 dBm	$\cong 10^3 \text{ mW} = 1000 \text{ mW}$	= 1 W
-30 dBm	$\cong 10^{-3} \text{ mW} = 1/1000 \text{ mW}$	= 1 $\mu\text{W}$

既然  $P = U^2/R$  对任何电阻有效，人们也可以用 dBm 表示电压。对于参考电阻为 50 $\Omega$ ，那么

$$V_{\text{ref}} = \sqrt{50 \Omega \times 1 \text{ mW}} = 224 \text{ mV}_{\text{rms}} \quad \text{等式3}$$

作为参考电压。为了避免 dBm 电压的不确定性（参考电阻 50Ω, 75Ω, 600Ω），通常参考电压电平为 1μV。对于大电压，1V 作为参考电平。

0 dBμV	≅ 10 <sup>0</sup> μV	= 1 μV
60 dBμV	≅ 10 <sup>3</sup> μV = 1000 μV	= 1 mV
-60 dBμV	≅ 10 <sup>-3</sup> μV = 1/1000 μV	= 1 nV

例如：0 dBμV ≅ 1 μV ≅ -120 dBV

其它应用：dBμV 是以参考电平（1μV）为基础的信号电压大小的度量。也许没有特别的用途，但是电源电压也可以用 dBμV 来表示。 AV=20 (230V/1μV)

dB=167dBμV 对于功率同样有有效的表达方式，这里要使用等式1.参考值是1mW.如果输出功率为4mW，那么可计算出输出为6dBm. **dBm 与 mW 转换** 在频谱分析仪上 AP 直接用 dBm 表示。如果读数为-47dBm，那么输出功率可以转化为：Mw. 等式1是：

$$P_L/P_i = 10^{A_p/10}$$

$$\rightarrow P_L = P_i \times 10^{A_p/10}$$

$$P_L = 1 \text{ mW} \times 10^{-47/10} \rightarrow P_L = 2 \text{ nW}$$

即：如果频谱分析仪读数为-47dBm，那么相应的频率-输出功率为2nW. **dBm 与 mV 转换** 为了把功率转化为电压，必须参考固定的端接电阻。频谱分析仪为50Ω的输入阻抗。根据等式3：

根据等式2： AV=20 (VO/Vref)

$$A_v = 20 \log(V_O / V_{ref})$$

$$A_v/20 = \lg V_O/V_{ref} \text{ or}$$

$$10^{A_v/20} = 10 \lg (V_O/V_{ref}) = V_O/V_{ref}$$

$$\rightarrow V_A = V_{ref} \times 10^{A_v/20}$$

$$V_A = 224 \text{ mV} \times 10^{-47/20} = 1 \text{ mV}$$

**dBm 与 dBμV 转换** 从等式3可以得到：

$$0 \text{ dBm} \cong 1 \text{ mW} \cong 224 \text{ mV}_{eff} (50 \Omega)$$

代入等式2：

$$A_v = 20 \lg (224 \text{ mV}/1 \mu\text{V}) \text{ dB} = 107 \text{ dB}\mu\text{V}_{eff}$$

因此总的关系为：

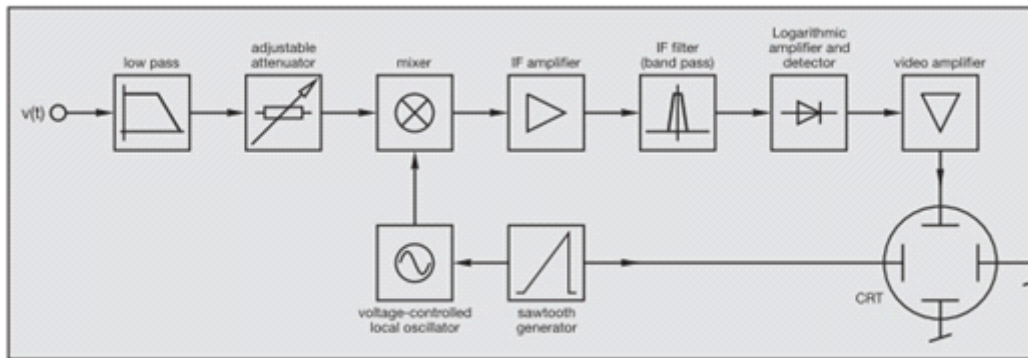
$$0 \text{ dBm} \cong 1 \text{ mW} \cong 224 \text{ mV}_{eff} \cong 107 \text{ dB}\mu\text{V}$$

总结：dBm 增加107dB 得到 dBμV 值；相反，dBμV 减去107dB 得到 dBm 值。（见表 4）

Size Reference value	Letter symbols	Level definition	Unit	
Power level Reference value 1 W	$A_p/W$	$= 10 \lg [P_L/1 W] \text{ dB}$	dBW	$P_L = 1 W \cdot 10^{A_p/W/10}$
Power level Reference value 1 mW	$A_p/mW$	$= 10 \lg [P_L/1 mW] \text{ dB}$	dBm	$P_L = 1 mW \cdot 10^{A_p/mW/10}$
Voltage level Reference value 1 V	$A_v/V$	$= 20 \lg [V_0/1 V] \text{ dB}$	dBV	$V_0 = 1 V \cdot 10^{A_v/V/20}$
Voltage level Reference value 1 $\mu$ V	$A_v/\mu V$	$= 20 \lg [V_0/1 \mu V] \text{ dB}$	dB $\mu$ V	$V_0 = 1 \mu V \cdot 10^{A_v/\mu V/20}$

**表4: 参考幅值电平定义**

**频率范围** 这个参数是频谱分析仪价格最重要的决定性因素。具有1GHz的仪器大多可以测量业余频带, ISM频带(433MHz), D蜂窝电话系统频率范围, 低GSM频带, 无线电和TV频带以及EMI测量频带。高于1GHz成本显著增加, 例如在第一级混频器中需要稳定频率的YIG(钇铁石榴石)振荡器。**分辨率** 分辨率定义频谱分析仪区分两个邻近信号的能力。这种能力依赖于IF部分的特性, 即滤波器的带宽和斜率(见图5)。例如如果最小带宽为9kHz, 那么两个谱线的最小频率间隔也是9kHz, 否则不能单独识别。然而带宽小于10kHz需要高品质的振荡器。例如FM信号需要这样的品质。



**图5:超外差频谱分析仪方框图**

**频率稳定性** 当然, 频谱分析仪的频率稳定性必须比被测信号高。整个仪器的稳定性取决于本地振荡器的稳定性。需要长期和短期稳定性指标。**幅度精度** 通常频谱分析仪的垂直系统是校准的对数刻度。假设标准8cm可以显示幅度80dB, 这等于电压比率1:10,000。幅度测量的精度受频响和频率放大器的影响。 $\pm 1\text{dB}$ 的总误差可以认为是非常优秀的。**动态范围/压缩** 频谱分析仪的动态范围是一个重要的特性, 它决定可显示的低和高幅度范围。最大电平受限于混频器的线性制约, 它可能产生失真和错误信号。可用的最低信号电平由仪器噪声电平决定。噪声可以通过降低滤波器带宽来降低, 由等式4和5举例证明, 这样可以增加动态范围。**输入灵敏度** 灵敏度定义最小的信号测量和噪声电平限值。只有大于噪声的信号可以测量。噪声可以分为热噪声和非热噪声。热噪声为:

$$P_{\text{therm}} = K \times T \times B$$

等式4

其中  $P_{\text{therm}}$ : 噪声功率  $K$ : 波尔兹曼常数  $= 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$   
 $T$ : 绝对温度  $B$ : 带宽  $B(\text{dB}) = 10 \lg [B(\text{IF})/B(\text{HZ})]$  等式5  
 等式4表明噪声功率与带宽成正比。减小滤波器带宽10倍, 噪声功率降低10dB, 也就是灵敏度提高10dB。所有其它噪声假设是非热噪声。前面描述的频谱分析仪可以扫描宽频带和窄频带。所有在频谱分析仪频率范围内的信号可以转换为中频和通过IF滤波器。滤波器后的检测器只响

应滤波器带通内的噪声，而且只显示这个噪声。因此，可以通过使用最小滤波器带宽得到最大灵敏度。当对比频谱分析仪时，注意滤波器带宽是否相同是非常重要的。在室内温度，原理上10kHz 带宽灵敏度可达-134dBm,而且具有优质的平方滤波器响应。接近-131 dBm 的信号可以看到，相当于信噪比为3dB.当然，这样的数值很难得到。-100dB 是非常实际的，可以认为通过努力达到-115dBm。