

第六章 频率特性测试仪

6.1 概述

频域测量是把信号作为频率的函数进行分析，主要讨论线性系统频率特性的测量和信号的频谱分析。

主要仪器：频率特性测试仪；外差式频谱分析仪；失真度测试仪。

6.2 线性系统频率特性的测量

6.2.1 测量方法

1、1、点频测量法

是一种静态测量方法，比较繁琐。

2、2、扫频测量法

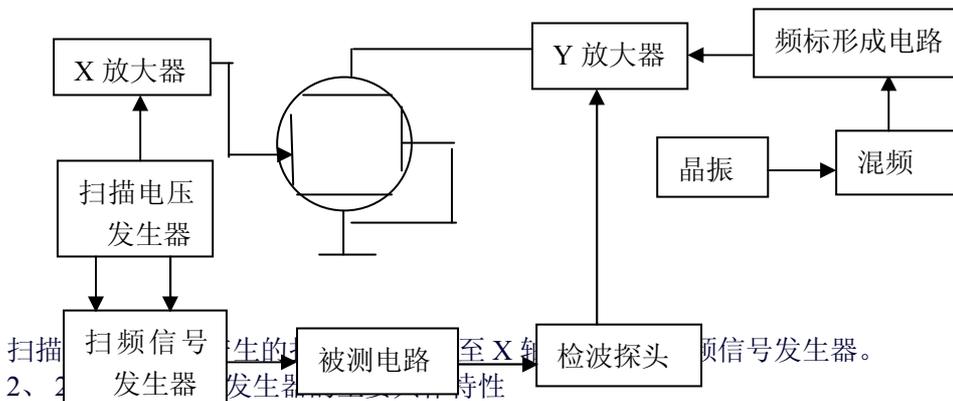
是一种动态测量方法，较好。

6.2.2 频率特性测试仪的工作原理

是根据扫频测量法的原理设计、制造而成的。它是将扫频信号源及示波器的 X--Y 显示功能结合为一体，用于测量网络的幅频特性。

1、1、基本工作原理

扫频仪的原理框图如图所示：



2、2、产生扫频信号的方法

3、3、频标电路

6.3 频谱分析仪

要求：

重点掌握频谱分析的基本内容、频谱分析仪的分类方法和分类；了解各种信号的付氏变换及信号频谱的特性

6.3.1 频谱分析的基本概念

广义上，信号频谱是指组成信号的全部频率分量的总集，频谱测量就是在频域内测量信号的各种频率分量，以获得信号的多种参数。狭义上，在一般的频谱测量中常将随频率变化的幅度谱称为频谱。对信号进行频域分析就是通过研究频谱来研究信号本身的特性。从图形来看，信号的频谱有两种基本类型：①离散频谱，又称线状谱线；②连续频谱。实际的信号频谱往往是上述两种频谱的混合。

1) 1) 信号频谱分析的内容

信号的频谱分析包括对信号本身的频率特性分析，如对幅度谱、相位谱、能量谱、功率谱等进行测量，从而获得信号在不同频率上的幅度、相位、功率等信息；还包括对线性系统非线性失真的测量，如测量噪声、失真度、调制度等。

2) 2) 频谱分析仪的基本原理

频谱分析仪就是使用不同方法在频域内对信号的电压、功率、频率等参数进行测量并显示的仪器。一般有 FFT 分析（实时分析）法、非实时分析法两种实现方法。非实时分析方法有扫频式、差频式（或外差式）两种。外差式分析是频谱仪最常采用方法。

3) 3) 频谱分析仪的分类

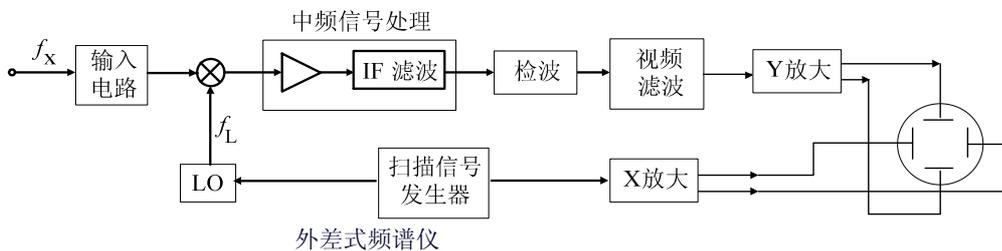
按照分析处理方法的不同，可分为模拟式频谱仪、数字式频谱仪和模拟/数字混合式频谱仪；按照基本工作原理，可分为扫描式频谱仪和非扫描式频谱仪；按照处理的实时性，可分为实时频谱仪和非实时频谱仪；按照频率轴刻度的不同，可分为恒带宽分析式频谱仪、恒百分比带宽分析式频谱仪；按照输入通道的数目，可分为单通道、多通道频谱仪；按照工作频带的高低，可分为高频、射频、低频等频谱仪……等等。

6.3.2 外差式频谱仪

外差式频谱仪是目前应用最广泛的一种频谱仪，它利用无线电接收机中普遍使用的自动调谐方式，通过改变本地振荡器的频率来捕获欲接收信号的不同频率分量。其频率变换原理与超外差式收音机的变频原理完全相同，只不过把扫描振荡器用作本振而已，所以也被称为扫描外差式频谱仪。在高频段扫描外差式占据优势地位。

1) 1) 外差式频谱仪的组成

原理框图如图所示，主要包括输入通道、混频电路、中频处理电路、检波和视频滤波等部分。



外差式频谱分析仪频率范围宽、灵敏度高、频率分辨率可变，是目前频谱仪中数量最大的一种，尤其在高频段应用更多。但由于本振是连续可调的，被分析的频谱依次被顺序采样，因此外差式频谱分析仪不能实时分析信号的频谱。

2) 2) 输入通道

频谱仪输入通道的作用是控制加到仪器后续部分上的信号电平，并对输入的信号取差频以获得固定中频。输入通道主要由输入衰减、低噪声放大、低通滤波及混频等几部分组成，功能上等同于一台宽频段、窄带宽的外差式自动选频接收机，所以也叫接收部分。

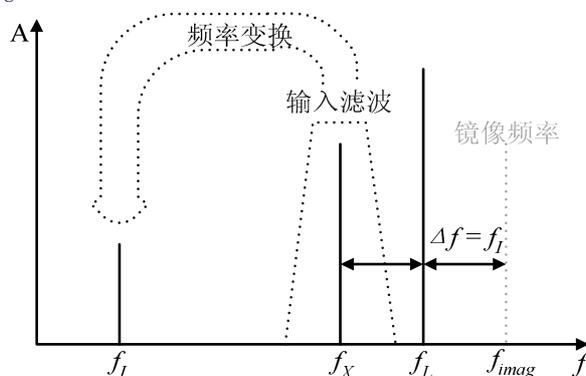
外差式接收机使用混频器将输入信号频率变换到固定的中频上，如下式所示：

$$|m \cdot f_L \pm n \cdot f_x| = f_I$$

其中 f_L 为本振频率， f_x 为被转换的输入信号频率， f_I 为中频信号频率， m 、 n 表示谐波的次数，可取值 1、2、……。如果仅考虑输入信号和本振的基频，即取 $m = n = 1$ 时，上式简化成

$$|f_L \pm f_x| = f_I$$

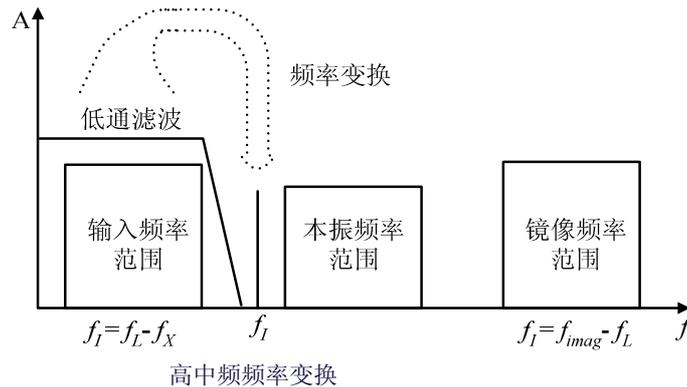
用一个在宽频率范围内连续调谐的扫描本振可实现固定的中频频率。当存在较高的频率分量 $f_L + f_I$ 时，同样可以通过混频得到相同的中频信号，这个高频信号与输入频率关于本振频率对称，称为镜像频率 f_{imag} 。



外差式频率变换原理

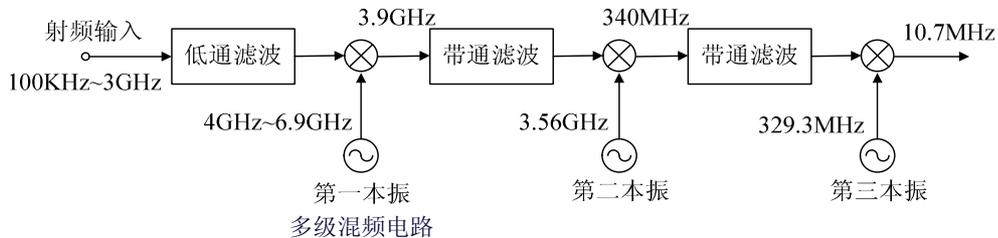
为了抑制不需要的镜像频率进入混频器，必须使用适当的滤波器将它滤掉，所选滤波器应该能够具有可调谐的带宽以抑制镜频、保留输入频率。然而通常的频谱仪输入频率非常宽，

一般的滤波器难以达到。解决的办法是选择高中频，本振频率也应相应提高，如图所示。



此时镜频的频率范围远在输入频率范围之上，两者不会有交叠。使用固定调谐的低通滤波器就可以在混频之前滤去镜频。

由于后续电路需要的是窄带中频，而过高的中频很难实现窄带带通滤波和性能良好的检波器，因此需要进行多级变频（混频）处理。在下图所示的实例中，高中频变换由第一混频实现，由第二级、第三级甚至第四级混频将固定的中频频率逐渐降低，每级混频之后都有相应的带通滤波器抑制混频之后的高次谐波交调分量。



3) 中频信号处理

中频信号处理部分进行的是被检测之前的预处理，主要完成对固定中频信号的放大/衰减、分辨率滤波等处理。通常具有自动增益放大、多级程控衰减的功能。中频滤波器的带宽也可程控选择，以提供不同的频率分辨率。

4) 检波器 (Detector)

中频滤波器的输出接到检波器上，由检波器产生与中频交流信号的电平成正比的直流电平。检波器可能有几种不同的类型，如包络检波器、有效值检波器、平均值检波器等，常用的是包络检波器。

5) 视频滤波器 (Video Filter)

为了减小噪声对所显示的信号幅度的影响，常常对显示结果进行平滑或平均，这就是视频滤波器的作用。视频滤波的效果在测量噪声时表现得最为明显，特别当是采用较宽的分辨率带宽时。减小视频带宽，噪声的峰-峰值变化将被削弱，其被削弱的程度或平滑程度与视频带宽 (Video Bandwidth, 简作 VBW) 和分辨率带宽 (RBW) 之比有关。

6) 踪迹处理

踪迹 (Trace) 是指频谱仪进行一次扫描所得的频谱图的迹线，也有“扫迹”、“轨迹”、“轨迹线”等不同译法。

标记 (Marker) 是踪迹上特定的幅度点或频率点，通常在不同测量功能下可以代表不同的测量值。标记功能是一种非常有用的踪迹处理，通过标记可以非常方便、直观地实现诸如查找最大/最小值、测量两点间的幅度差或频率差等功能，并有助于改善相对测量精度、减小读数误差。

踪迹平均处理是对同一输入信号多次扫描得到的踪迹进行处理，以达到平滑图像、降低噪声的目的。踪迹平均的思路是将来自多个踪迹的相同频率点上的数据一一进行线性加权或指数加权平均，形成一个平滑踪迹。有线性加权踪迹平均、指数加权踪迹平均两种基本算法。

7) 参数之间的相互关系

为了避免引入测量误差，在正常工作模式下一些参数相互之间以某种方式“联动” (Coupling) 设置。

A.扫描时间、扫描宽度、频率分辨率和视频带宽

B.输入衰减、中频增益和参考电平

6.3.3 外差式频谱仪的主要性能指标

1) 1) 输入频率范围 (Frequency Range)

频谱仪能够进行正常工作的最大频率区间, 由扫描本振的频率范围决定。

2) 2) 频率扫描宽度 (Span)

不同的文献有其他叫法, 如分析谱宽、扫宽、频率量程、频谱跨度等。表示频谱仪在一次测量 (一次频率扫描) 过程中所显示的频率范围, 可以小于或等于输入频率范围。

3) 3) 频率分辨率 (Resolution)

表征了能够将最靠近的两个相邻频谱分量 (两条相邻谱线) 分辨出来的能力。频率分辨率主要由中频滤波器的带宽决定, 但最小分辨率还受到本振频率稳定度的影响。

4) 4) 频率精度 (Frequency Accuracy)

即频谱仪频率轴读数的精度, 与参考频率 (本振频率) 稳定度、扫描宽度、分辨率带宽等多项因素有关。通常可以按照下式计算:

$$\Delta f = \pm \left[f_x \times \gamma_{ref} + Span \times A\% + \frac{Span}{N-1} + RBW \times B\% + CHz \right]$$

其中 Δf 为绝对频率精度, 以 Hz 为单位; γ_{ref} 代表参考频率 (本振频率) 的相对精度, 是百分比数值; f_x 表示显示频率值或频率读数; $Span$ 为频率扫描宽度, N 表示完成一次扫描所需的频率点数; RBW 为分辨率带宽; $A\%$ 代表扫描宽度精度, $B\%$ 代表分辨率带宽精度, C 则是频率常数。不同的频谱仪有不同的 A、B、C 值。

5) 5) 扫描时间 (Sweep Time)

指进行一次全频率范围的扫描、并完成测量所需的时间, 也叫分析时间。

6) 6) 相位噪声/频谱纯度 (Phase Noise / Spectrum Purity)

简称相噪, 反映了频率在极短期内的变化程度, 表现为载波的边带, 所以也叫边带噪声。相位噪声通常用在源频率的某一频偏上相对于载波幅度下降的 dBc 数值表示。

7) 7) 幅度测量精度 (Level Accuracy)

有绝对幅度精度和相对幅度精度之分, 均由多方面因素决定。绝对幅度精度都是针对满刻度信号给出的指标, 受输入衰减、中频增益、分辨率带宽、刻度逼真度、频响以及校准信号本身的精度等几种指标的综合影响。相对幅度精度与相对幅度测量的方式有关, 在与标准设置相同的理想情况下, 相对幅度仅有频响和校准信号精度两项误差来源, 测量精度可以达到非常高。

8) 8) 动态范围 (Dynamic Range)

即同时可测的最大与最小信号的幅度之比。通常是指从不加衰减时的最佳输入信号电平起, 一直到最小可用的信号电平为止的信号幅度变化范围。动态范围受限于输入混频器的失真特性、系统灵敏度、本振信号的相位噪声。

9) 9) 灵敏度/噪声电平 (Sensitivity)

规定了频谱仪在特定的分辨率带宽下、或归一化到 1Hz 带宽时的本底噪声, 常以 dBm 为单位。数值上等于显示平均噪声电平 (Displayed Average Noise Level, 简作 DANL)。

10) 10) 本振直通/直流响应 (LO Feedthrough)

指因频谱仪的本振馈通而产生的直流响应。

11) 11) 本底噪声 (Noise Floor)

来自频谱分析仪内部的热噪声, 也叫噪底, 是系统的固有噪声。本底噪声在频谱图中表现为接近显示器底部的噪声基线, 常以 dBm 为单位。

12) 12) 1dB 压缩点和最大输入电平

1dB 压缩点 (1dB Gain Compression Point) 是指在动态范围内, 因输入电平过高而引起的信号增益下降 1dB 的点。1dB 压缩点提供了有关频谱仪过载能力的信息。

最大输入电平 (Maximum Input Level) 反映的是频谱仪可正常工作的最大限度, 其值一般由处理通道中第一个关键器件决定。

本节小结

本节着重介绍了经典的外差式频谱仪的原理及组成。

本节思考题与练习题

1. 如何理解“实时”频谱分析的含义？扫频式频谱仪为什么不能进行实时频谱分析？
2. 什么是频谱分析仪的频率分辨率？在外差式频谱仪，频率分辨率和哪些因素有关？
3. 要想较完整地观测频率为 20KHz 的方波，频谱仪的扫描宽度应至少达到多少？

6.4 谐波失真度测量

要求：掌握谐波失真度等基本概念；了解谐波失真的失真模型、测量方法及失真度测试仪。

6.4.1 谐波失真度的定义

非线性失真亦称谐波失真，简称失真。

失真度被定义为全部谐波能量与基波能量之比的平方根值。对于纯电阻负载，则定义为全部谐波电压（或电流）有效值与基波电压（或电流）有效值之比的平方根。

$$D_0 = \frac{\sqrt{\sum_{m=2}^M u_m^2}}{u_1} \times 100\% \quad (6-1)$$

其中 u_1 、 u_2 、……、 u_m 分别表示基频及其各次谐波的均方根值。失真度 D_0 以百分比（%）或分贝（dB）为单位，亦称失真系数。

谐波失真度的测量方法：

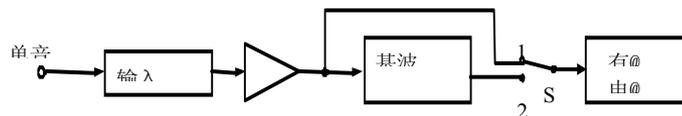
测量方法有谐波分析法、基波抑制法（又称静态法）、白噪声法（又称动态法）。

6.4.2 基波抑制法

由于基波难以单独测量，当失真度较小时，定义式可以近似为：

$$D = \frac{\sqrt{\sum_{m=2}^M u_m^2}}{\sqrt{\sum_{m=1}^M u_m^2}} \times 100\% \quad (6-2)$$

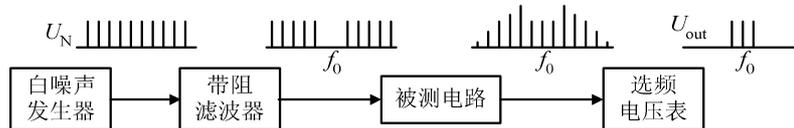
在基波抑制法中通常按照 6-2 式来测量失真度，亦即实际测得的失真度是谐波电压的总有效值与被测信号的总有效值之比。测量电路如图所示，图中的基波抑制网络实质上是一个陷波滤波器，专用于滤掉基波信号而使其余谐波分量通过。



基波抑制法测量谐波失真度

6.4.3 白噪声法

这种动态测量方法使用白噪声发生器产生均匀频谱密度分布的白噪声，相当于将一系列不同频率、不同相位的正弦信号加到被测电路上，可以得到被测电路在通带内的任一频率分量所产生的谐波及其互调结果，是一种广谱测量技术，测量电路如图 6-24 所示。



白噪声法测量谐波失真度

最终的谐波失真度 D 按照下式计算：

$$D = \frac{U_{out}}{U} \times 100\% \quad (6-3)$$

其中 U_{out} 为选频电压表在频率 f_0 处的读数， U 为选频电压表在同一带宽下其他频率处的读数。