

- 锁相放大器
  - 实验目的
  - LIA基本原理重述
    - 噪声测量处理技术
    - LIA的具体工作原理
    - 微小电阻
  - 仪器设备
  - 实验方法设计
  - 实验步骤
    - 实验准备
  - 思考题

# 锁相放大器

---

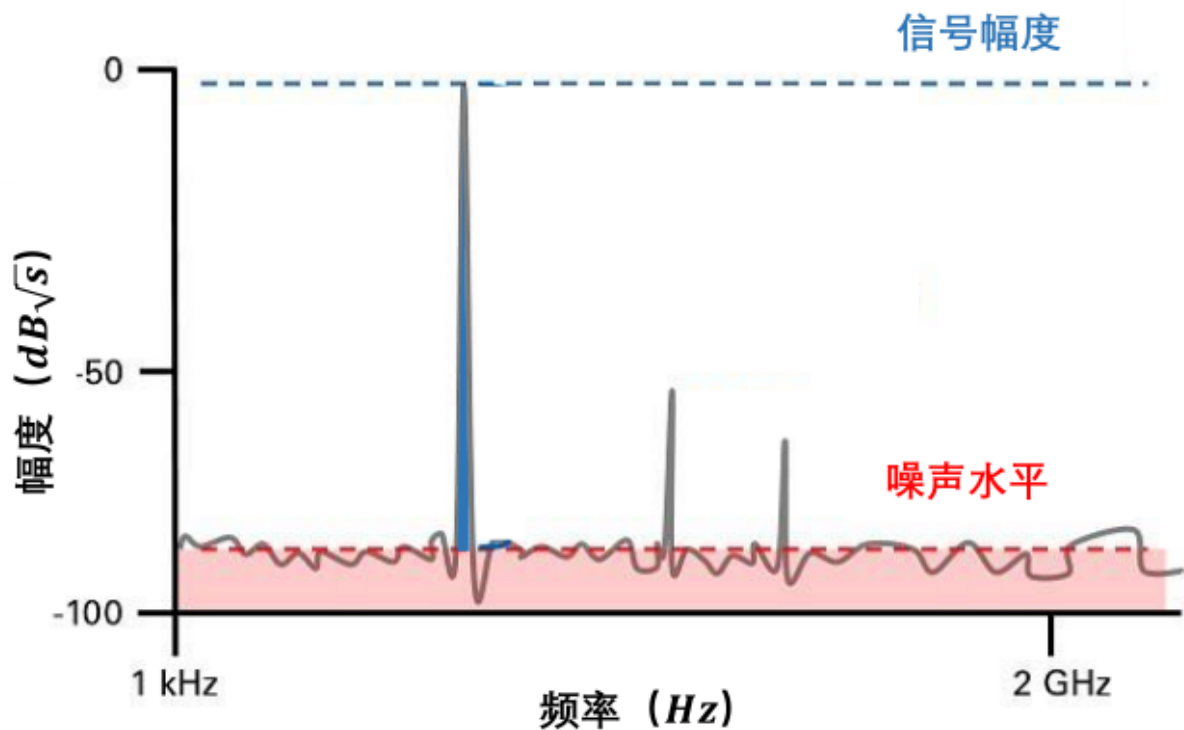
## 实验目的

- 学习使用锁相放大器
- 了解用锁相放大器测量微小阻抗（或微小阻抗变化）的方法，包括四引线法、分压法、电桥法，熟悉其中一种方法以及相应锁相放大器参数的正确设置；
- 了解交流测量中常用的接地隔离方法；
- 理解相位的物理含义，掌握电压与电流之间相位差的测量方法，学习从具体器件上分离电阻、电感、电容；
- 学习 VISA 接口协议，通过 LabVIEW 设置锁相放大器参数和进行数据采集。

## LIA基本原理重述

锁相放大器(Lock-in Amplifier), 对于弱毫伏量级的信号有较好的测量效果。我们主要的测量过程在锁相和噪声滤除上。下面阐述基本原理 热噪声:

对于一项实验，无规的热噪声既可来自于实验对象本身，也可来自于测量系统，包括传感器和测量仪器。信噪比: 信噪比是科学与工程中常用的一种度量，用于表征相对于背景噪声的信号强度，或信号的覆盖程度。为方便在宽范围内表述，以信号强度与噪声强度之比( $I_S/I_N$ )定义的信噪比(SNR: signal noise ratio)取常用对数，以分贝为单位



$$SNR = 10 \log \frac{I_S}{I_N}$$

我们再定义信号改善比

$$SNIR = \frac{SNR_o}{SNR_i}$$

噪声测量处理技术

现在我们来滤除噪声，

- 简单滤波法 滤波法只适用于测量信号和噪声  $f_s = f_n$  的小信号情况。一个有噪的直流信号可以用低通滤波器除噪。用工频陷波器来给(50Hz)。带通滤波适用于高频率小信号。一般地示波器会采用这种方法。



设输入信号  $x(t) = s(t) + n(t)$ , 用  $s$  表示待检信号。

$$x(t) = a \cos \omega_s t + f_{oo}^b_a(\text{other waves})$$

我们对总体进行带通滤波(BPF), 信号为:

$$x(t) = a \cos \omega_s t(\text{remain still}) + f_{oo}^{b+\Delta\omega/2}_{a-\Delta\omega/2}(\text{other waves})$$

其中  $\Delta\omega$  为带同宽度。其余方法如LPF同理, 锁相放大器也采用LPF. 对于LPF的实现, 我们根据RLC串联电路的特性。

$$H(\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

## • 调制解调技术

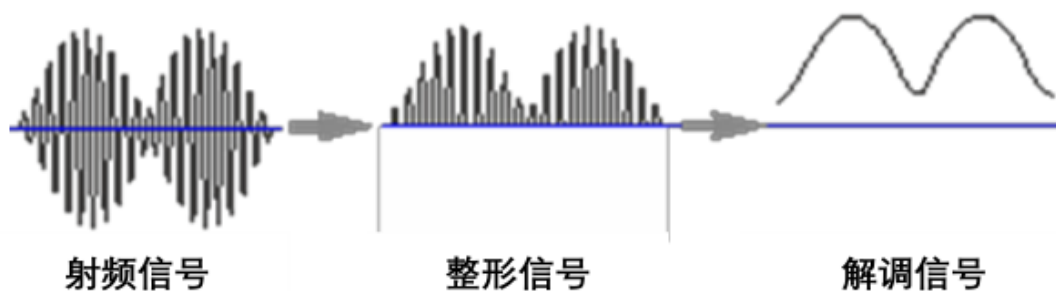


图 D1-8 传统振幅调制（AM）解调原理，在时域的表示的主要过程。

有AM/FM之分。

## • 相敏检测

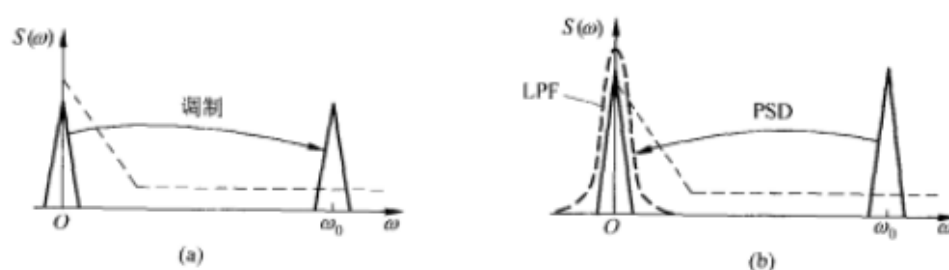


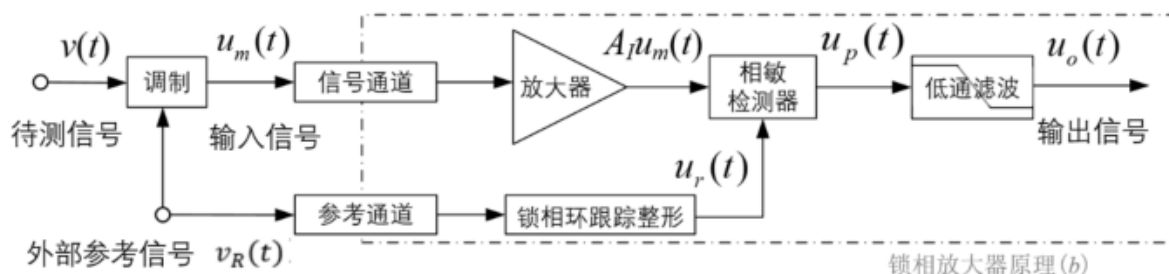
图 D1-9 锁相放大器对信号频谱进行迁移的过程

## • 锁相放大法

LIA

也是采用LPF，所以直流或者慢变信号对他来说需要额外处理。LIA与一般地LPF的最大不同在于其使用了高质量的相敏检波技术

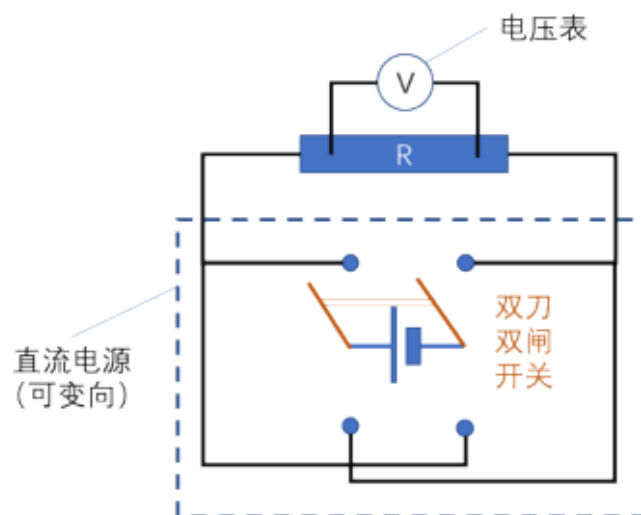
1. 它先将直流或者慢变信号的频谱迁移到 $\omega_m$ 处，再进行放大。
2. 利用相敏检测器PSD对被调制信号解调，可以同时利用频率 $\omega$ 和相角 $\theta$ 检测信号,因为噪声与信号既同频又同相的概率很低
3. 用低通滤波器来抑制宽带外的噪声。低通滤波器的频带可以做得很窄,而且其频带宽度不受调制频率的影响 锁相环内部的参考信号（实际与放大输入信号一起通过PSD的信号）是和输入的外部参考信号 $v_R$ 同频率且相位差锁定的参考信号 $u_{ref}$ 。产生原理:



当然这个参考信号不一定都得是内部在生成的，它也可以是直接的外部参考信号，我们引入内部的整形主要是为了保证参考信号的稳定。

## LIA的具体工作原理

输入信号 $u_i(t)$ 放大  $\rightarrow A_I u_i \rightarrow PSD(A_I u_i u_{ref}) \rightarrow LPF \rightarrow u_o$



- 四引线法

$$V_+ = IR + V_T + V_C$$

$$V_- = -IT + V_T + V_C$$

$$R = \frac{V_+ - V_-}{2I}$$

- 分压法

$$\tilde{V}_{out} = \frac{Z_X}{Z_S + Z_X} \tilde{V}_{in} = \frac{r_x + j\omega L_x}{r_s + r_x + j\omega L_x} \tilde{V}_{in}$$

$$\frac{V_{in} e^{i\omega t}}{r_s + r_x + j\omega L_x} = \frac{V_{out} e^{i(\omega t + \varphi)}}{r_x + j\omega L_x}$$

$$V_{in} \frac{r_x^2 + \omega^2 L_x^2}{r_s^2 + r_x^2 + \omega^2 L_x^2} (r_s + r_x + j\omega L_x) = V_{out} (r_x \cos \varphi + \omega L_x \sin \varphi + j(r_x \sin \varphi - \omega L_x \cos \varphi))$$

$$\text{Re} \{Left\} = \text{Re} \{Right\}, \text{Im} \{Left\} = \text{Im} \{Right\}$$

$$\Rightarrow$$

$$r_x = \frac{V_{out} (r_s \cos \varphi - \omega L_x \sin \varphi)}{V_{in} - V_{out} \cos \varphi}$$

## 仪器设备

表 D1- 5 微小阻抗测量实验仪器用具

编号	仪器用具名称	数量	主要参数（型号，规格等）	备注
1	锁相放大器	1	OE1022	
2	配套教学实验箱	1		
3	压控电流源	1	OE4201	
4	示波器	1	RIGOL DS2202A	
5	信号发生器	1	RIGOL DG4162	
6	BNC-BNC 信号线	若干		
7	PC 机	1	LabVIEW 环境及有 VISA 接口协议	
8	精密电阻/厚膜电阻	若干	(1.0Ω、0.1Ω) / (1.0Ω、10Ω、50Ω)	
9	自备电阻/电感	2	用 500mm 长的φ1.0 的电线顺绕或对折后 绕在直径 10mm 的圆管上	选
10	间距可调金属平板	1	平行板电容器	选
11	并行线、双绞线	2	0.5m~1.0m 漆包线、或其他自选线缆	选
12	变容二极管器件	1		选

# 实验方法设计

## 实验步骤

### 实验准备

1. 测量小电阻/小电感
1. 区分精密电阻和厚膜电阻，并通过实验判断用于测量电流相位的电阻（ $R_S$ ，如精密电阻或厚膜电阻）是纯电阻

2. 按实验方案的示意图接好线路；

3. 手动测量；
2. 测量小电容及其变化
1. 在教学实验箱上连接待测电容，如变容二极管、或自制电容（如可调间距的平板电容、双绞线电容等）；

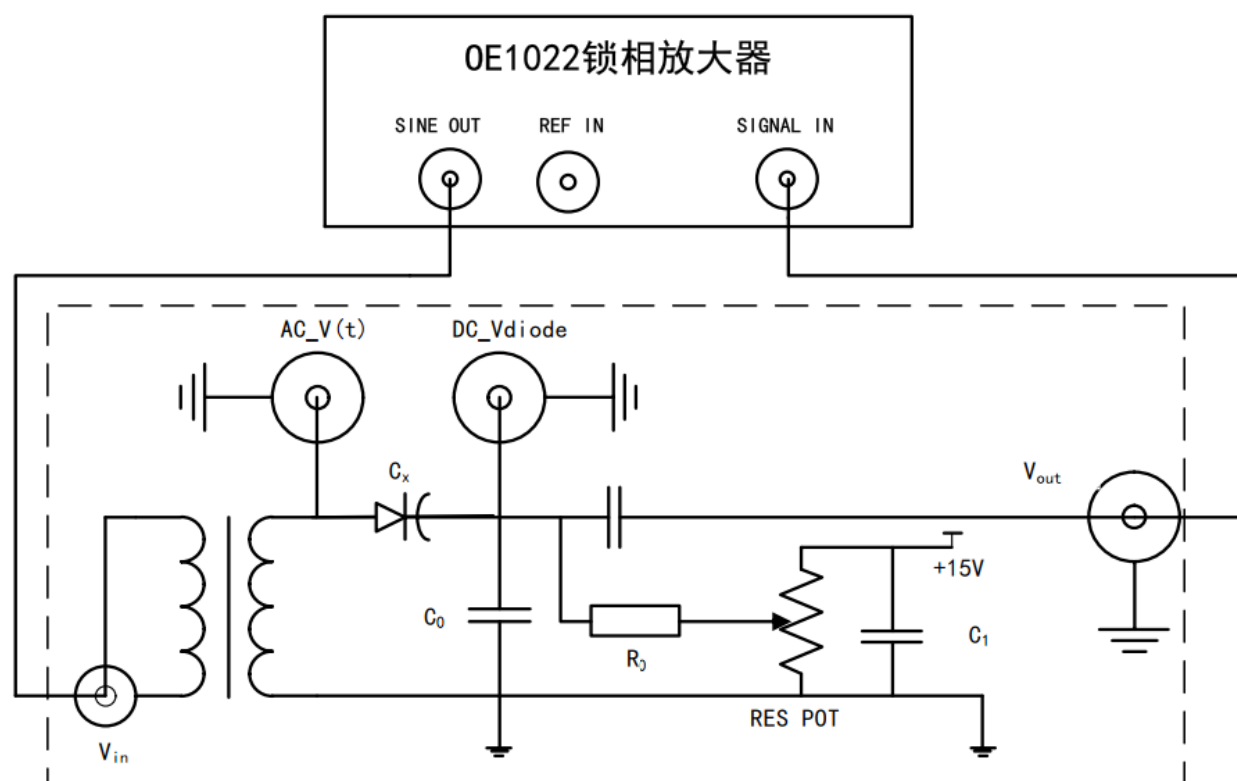
2. 按实验方案连线示意图对教学实验箱与锁相放大器接线：包括锁相放大器信号输出、输入，反偏直流电压点 DC-Vt 电位测量（查 OE1022 说明书，注意单通道与双通道锁相放大器的不同。）

3. 设置参考信号频率与振幅；

4. 小心缓慢调节教学实验箱上的电位器，使得变容二极管的反偏直流电压DC-Vt 从1至 7.9V 逐渐变化，变化步长为 0.2V，逐点记录 DC-Vt 和锁相放大器 R 值；

5. 记录测量值，结束后利用(D1- 55)式计算二极管电容，并作 DC-Vt 的曲线 关系图。

3.  $C_x = \frac{V_{out}}{V_{in} - V_{out}} C_0$  如图所示，用教学实验箱给二极管加偏置电压，用OE1022提供信号源（式中的 $V_{in}$ 为SINE OUT信号发生器输出信号，经实验箱变压器提压以及直流隔离，加载测量电路上；式中的 $V_{out}$ 为输入锁相放大器 $signal_{in}$ 的信号，即 $V_{out}$ 是OE1022测得值幅值R， $C_0 = 6.8nF$



## 思考题

1. 市频 50Hz 干扰通常通过电源耦合，影响仪器的测量结果；对于 997Hz 的待测信号，50Hz 干扰是噪声吗？对锁相放大器的测量会有影响吗？
2. 如何用锁相放大器检测到待测的直流信号或慢变信号？(图 D1-9 中的 $v(t)$ 为直流或慢变信号)
3. 如用斩波器调制直流信号（如光强），被斩制后的信号（图 D1-9 中的 $u(t)$ 信号）仍然包含有直流分量（即平均值不为零），但该直流分量随交流信号输入锁相放大器不会被锁相放大器检测，请从数学推导上说明。
4. 相位以及相位差的含义是什么？锁相放大器输出的 是待测信号的相位还是待测信号与参考信号之间的相位差？