

# 锁相放大器

## ——一种检测微弱信号的手段

中国科学院物理研究所微弱信号检测小组 江西省庐山电子仪器厂

### 一、实验物理中的有力工具

随着科研和生产的发展,越来越需要测量微弱的信号,恢复及记录其变化。特别是各种物理量的精细结构以及在临界点附近的异常现象,往往引起人们的关心,这些情况下的被测信号常常是深埋在噪声中的微弱信号。例如俄歇谱仪是用来进行表面分析的一种新型分析仪器,它可以鉴定厚度仅几个到等效于几分之一一个分子层或5—100 Å的固体表面。但是由于俄歇电子发射是一个二次效应,俄歇峰处于非弹性散射电子的背景中,虽然1925年即已发现了这个效应,可是直到1968年工作进展甚微。用锁相放大器成功地解决了深埋在噪声中的俄歇峰的检出。又如,光谱测量中环境辐射常常是产生测量误差的主要原因。特别是吸收光谱的测量,弱谱线常常被其它与之交叠的吸收带所淹没,为提取我们感兴趣的弱谱线也必须解决噪声中微弱信号提取的问题。

应该指出,各种物理量常常是通过传感器变换为等效电压信号而进行测量的,例如光、声及热等。如果我们定义等效噪声功率为产生等于均方根输出噪声电压所需的信号功率,则光传感器 GeSb, InSb 在4°K时等效噪声功率为 $10^{-11}$ W/Hz;热传感器高莱池工作于室温时等效噪声功率为 $10^{-12}$ W/Hz, Gc 电阻测温计在4°K时,等效噪声功率为 $10^{-11}$ W/Hz;而光电倍增管在干冰低温下暗电流约为 $10^{-9}$ A,即使不考虑引线感应进来的噪声电压,这些噪声就足以淹没被测信号了。

因此,要求检测仪器必须具有灵敏度高,能抑制噪声使信噪比改善的良好性能,以满足提取深埋在噪声中微弱信号的需要。

当前,解决弱信号提取技术的二种常用仪器是锁相放大器(Lock-in amplifier)和取样积分器(Boxcar,或 Sampling integrating system)。它们可以用来测量

深埋在噪声中的周期重复信号。锁相放大器采用相敏检波器及积分器来压缩等效噪声频带宽度以抑制噪声,从而检出周期重复信号的幅值和相位。取样积分器采用门取样及积分器进行同步积累来筛选噪声,从而恢复重复周期信号的波形。这二种仪器统称信号处理系统,在国外已有产品,是实验物理中的有力工具。

本文讨论锁相放大器的一般原理,基本参数的概念以及我们试制的一台锁相放大器的概况。

### 二、锁相放大器的工作原理

在讨论锁相放大器之前有必要简单回顾一下放大器噪声的问题。

1. 测量中噪声是一个我们所不希望的扰动和杂乱信号,它是被测信号的自然背景和限制测量仪器性能的重要因素。

通常,电磁干扰、机械振动等环境噪声可以合理安排系统的电学和机械结构,通过屏蔽、接地等措施予以排除。

对微弱信号放大和传递影响最大的是热噪声和器件内部的固有噪声。因此,这些噪声正是需要解决的对象。

热噪声是由于电荷的无规则运动和导体中电子密度的热涨落而产生的一种噪声。

如任一内阻为 $R$ 的传感器,在温度 $T$ 情况下达到热平衡时产生的噪声电压为

$$E_{rms} = (4KT\Delta fR)^{1/2} (V_{rms}), \quad (1)$$

式中  $K$ ——波尔兹曼常数,  $1.38 \times 10^{-23}$ (J/°K),

$T$ ——源电阻温度(°K),

$R$ ——源电阻值( $\Omega$ ),

$\Delta f$ ——频带宽度(Hz)。

弹散噪声是由于电子器件不均匀结构的电子流的统计特性或载流子的发射、复合速度不均匀而产生的一种噪声。

在低频段,这个电流的变化与频率无关,由 Schottky 公式所决定。

$$I_s = (2eI_0\Delta f)^{1/2}(\text{A}), \quad (2)$$

式中  $e$ ——电子电荷,  $1.602 \times 10^{-19}$ (coul),

$I_0$ ——平均电流(A);

$\Delta f$ ——频带宽度(Hz)。

由式(1),(2)可见,这二种噪声仅与测量频带宽度有关,而与频率无关,即它们由直流直至红外频率范围分布都是均匀的。这种噪声称为白噪声。对于这类噪声,我们可以通过压缩带宽,进行积分来减少。

器件的另一种噪声,它产生于导电物质内部,是频率的函数,称之为闪烁噪声或  $\frac{1}{f}$  噪声。这种噪声的分布与  $\frac{1}{f^n}$  ( $n$ 从0.8—1.35)成正比。几乎每一种电子元件和器件都有这种噪声。在低频段,特别是在100Hz以下,  $\frac{1}{f}$  噪声大大超过热噪声。所以,实验尽量选择不在这些频率范围之内。

2. 采用窄带滤波器压缩频带来提高信噪比是早期的一种手段。但是,由于这种滤波器对噪声抑制能力不理想,中心频率不稳定,带宽与  $f_0$  有关,所以不能满足更高的要求。随着电子技术及器件的进一步发展,使30年代即已产生的锁相原理获得了完善的应用。近十余年,在国外生产了一系列各种类型的锁相放大器。

因为这种放大器的被检测信号和参考信号的相位锁定,因此称为锁相放大器。

目前国外先进的锁相放大器测量频率可从十分之几个 Hz 到 1MHz, 满刻度灵敏度达 1nV ( $1\text{nV} = 10^{-9}\text{V}$ ), 非相干信号输入过载电压达 60db 或更高, 即噪声可大于信号一千倍以上不过载而被检出。

3. 实际上, 锁相放大器是一种采用相敏检波器(PSD)的交流电压表。为使锁相放大器工作, 必须有一个与输入信号同步的参考信号同时送入 PSD。普通的电压表是信号和噪声一同检出的, 而锁相放大器由于

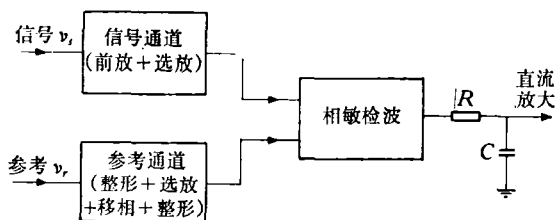


图1 锁相放大器基本方框图

采用了 PSD 以及其它措施, 只检出与输入信号同频(或倍频、分倍频)、同相的噪声和输入信号本身。结果噪声成份就大幅度地被降低了。

原则上, 锁相放大器可分为三个主要部份, 即信号通道, PSD 及低通滤波器(LPF)、参考通道(见图1)。

信号通道是使伴有噪声的输入信号放大, 并经选频放大对噪声作初步处理, 以满足 PSD 的要求使 PSD 具有更好的性能。低指标的锁相放大器没有选频放大。

参考通道提供一个与输入信号同相的方波(或正弦波), 使 PSD 能择取希望检测的有用信号。经过处理后的输入信号和参考信号电压适合 PSD 工作电压要求, 它们进入 PSD 进行相位检波, 得到输入信号与参考信号的和频与差频, 经变换得到与输入信号成比例的电压值。若参考信号与输入信号同相, 输出为最大值。这个电压送入低通滤波器, 滤除和频成份, 这时等效噪声带宽很窄, 从而可以提取深埋在噪声中的微弱信号。

4. 由上可见, 在锁相放大器中, 输入信号与参考信号是二个同样频率的信号相关。应用相关原理可以找出输入信号与输出信号之间的关系。最简单的情况是  $V_s, V_r$  皆为正弦波。

$$v_s = V_s \cos\{(\omega_0 + \Delta\omega)t + \theta\}, \quad (3)$$

$$v_r = V_r \cos\omega_0 t, \quad (4)$$

而输出信号  $v_o$  为

$$v_o = V_s v_r. \quad (5)$$

由式(3),(4)可得

$$v_o = \frac{1}{2} V_s V_r \{ \cos(\theta + \Delta\omega t) + \cos[(2\omega_0 + \Delta\omega)t + \theta] \}.$$

即输入信号通过与参考信号相关, 使输出信号的频谱由  $\omega_0$  转换成 0 与  $2\omega_0$  二部份。  $2\omega_0$  频率的信号被低通滤波器滤除, 则在 LPF 输出端得

$$v_o = \frac{1}{2} V_s V_r \cos(\theta + \Delta\omega t). \quad (6)$$

由式(6)可见:  $\Delta\omega \approx 0$ , 若落在 LPF 带宽内, 得到与输入信号成正比的交流输出。  $\Delta\omega = 0$ , 得直流输出, 其幅值与参考信号和输入信号的相位差有关。  $\Delta\omega = 0$ ,  $\theta = 0$ , 输出最大;  $\Delta\omega = 0$ ,  $\theta = \frac{\pi}{2}$ , 输出为 0。输出幅度与输入电平成正比。

因为用正弦波作参考信号会产生不稳定的误差, 所以实际常用的  $v_r$  是方波。

对与零交叉两点间隔相等的方波, 其富氏展开为:

$$v_r = V_r \cos\omega_0 t + \frac{1}{3} V_r \cos 3\omega_0 t + \frac{1}{5} V_r \cos 5\omega_0 t + \dots \quad (7)$$

即如改变输入信号的频率, 可在  $\omega = \omega_0, 3\omega_0, 5\omega_0$  处得到差频为零的信号, 则在输出端将得到附加噪声。为此, 在信号通道中插入一个简单的低通滤波器, 滤除高频成份即可将此类噪声减至不可测量的程度。

对于  $v_r$  为方波的情况, 我们可以把它等效为一个

按输入信号  $v_r$  频率来改变极性的双刀双掷开关 (见图2)。由图可见,如  $v_r$  与  $v_s$  同时改变极性,即相位差  $\theta = 0$ , 则  $v_o'$  为全部“+”或“-”的脉动,否则  $v_o'$  就是

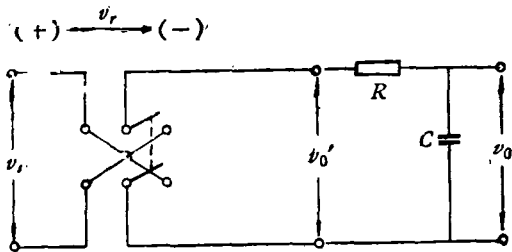


图2 相敏检波的等效开关电路

“+”、“-”交替的交流信号。经过  $RC$  滤波之后,得到一定幅值的直流成份  $v_o$ 。  $\theta = 0$  时,  $v_o$  最大,  $\theta = \frac{\pi}{2}$  时,

$v_o \approx 0$  (见图3)。

这种等效的开关电路可用场效应晶体管斩波器或晶体管开关电路来实现。

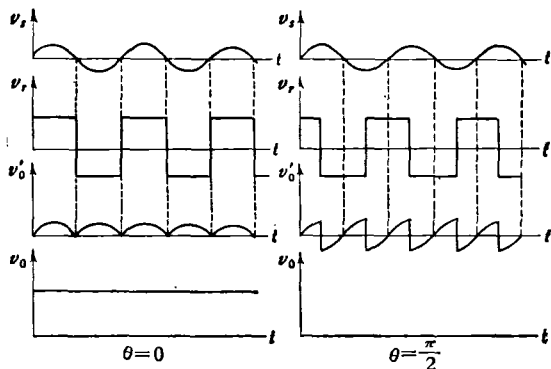


图3 相敏检波器的输出波形

所以,我们可以通过调节移相器使参考信号对输入信号之相位改变,从输出端得到一个最大值,亦即  $\theta = 0$ ,或参考与信号同相,相位被锁定,从而除去不相干的噪声信号。

### 三、锁相放大器的特性

除一般放大器所共有的特性外,锁相放大器具有若干特殊的特性。

#### 1. 等效噪声带宽(ENBW)

如前所述,白噪声可借压缩频带宽度予以减少。由伴有噪声的输入信号的功率谱(图4)可见,滤波器的频带越窄,信噪比值越高。因此,为测量深埋在噪声中之微弱信号,必须尽力压缩频带宽度。锁相放大器最后检测的是与输入信号幅值成正比的信号与参考的差频

电压,原则上与被测信号的频率无关。因此,频带宽度可以作得很窄。从而,可用一简单的  $RC$  滤波器来作频带压缩。而调谐滤波器由于中心频率不稳,就不可能达到这种效果。

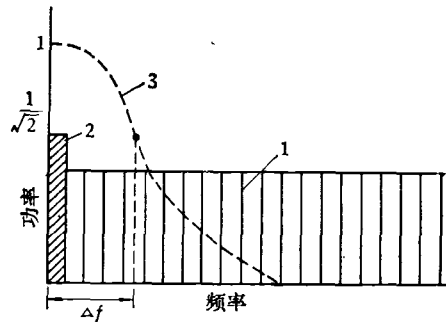


图4 伴有噪声的输入信号功率谱  
1——噪声谱;2——信号谱;3—— $RC$ 滤波器的频率特性

对一个滤波器的(ENBW)的定义为:

假定有一个与它等效的理论上绝对陡的滤波器我们以相同的宽带噪声输入,在其输出端得到一个与原来滤波器的输出相同的噪声幅值(rms),于是此理想化滤波器的等效无衰减带宽定义为原滤波器的等效噪声带宽。

对于一个倍频程衰减 6db(6db/oct) 的普通的一级  $RC$  滤波器,其传输函数为

$$K = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}}$$

故其等效噪声带宽

$$\Delta f = \int_0^{\infty} K^2 df = \int_0^{\infty} \frac{df}{1 + \omega^2 R^2 C^2} = \frac{1}{4RC} \quad (8)$$

例如  $RC$  时常数  $T_0$  为 30秒,  $\Delta f = 0.0083\text{Hz}$ 。如用二级  $RC$  滤波器,可得 12db/oct 的滤波器其等效噪声带宽

$$\Delta f = \frac{1}{8RC} \quad (9)$$

#### 2. 信噪比的改善

对给定的白噪声,噪声电压正比于噪声带宽的平方根,所以放大器得到的信噪比  $\left(\frac{S}{N}\right)$  改善是输入信号的噪声带宽与锁相滤波器噪声带宽比的平方根。即:

$$\frac{\text{输出 } \frac{S}{N} \text{ 电压比}}{\text{输入 } \frac{S}{N} \text{ 电压比}} = \frac{\sqrt{\Delta f_{\text{输入}}}}{\sqrt{\Delta f_{\text{输出}}}} \quad (10)$$

如  $\Delta f_{\text{输入}} = 10\text{kHz}$ ,  $T_0 = 1\text{sec}$ , 即  $\Delta f_{\text{输出}} = \frac{1}{4T_0} = 0.25$

Hz, 则信噪比改善 200 倍(46db)。

### 3. 动态范围

任一信号处理系统都包括三个临界电平，用此三个电平来确定系统的适应性，即：

- (1) 满刻度信号输入电平(FS)，
- (2) 最小可分辨信号(MDS)，
- (3) 最大过载电平(OVL)，即最大噪声输入。

由这三个电平确定输入总动态范围、动态贮备、输出动态范围(见图5)。

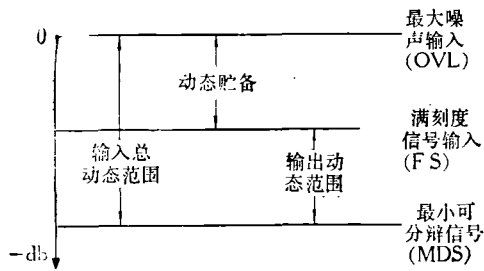


图5 锁相放大器的动态范围和动态贮备

输入总动态范围是评价锁相放大器从噪声中提取信号能力的主要因素，它定义为“在确定灵敏度条件下，允许的最大不相干电压与最小能检出的相干输入电压之比”。

动态贮备的定义是“在确定灵敏度条件下，允许的最大不相干电压与给出满刻度输出所需的相干输入电压之比”，它表示干扰比满刻度读数大多少db锁相放大器还不过载。

输出动态范围的定义是“在确定灵敏度条件下，满刻度输出与最小能检出的相干输入电压之比”，它表示能测量的最小讯号为满刻度读数的多少分之一。

由上可见，

动态贮备 + 输出动态范围 = 输入总动态范围(对数和)。

综上所述，输入总动态范围一般取决于前置放大器，往往是给定的。选择低噪声器件可以扩大输入总动态范围。然而满刻度信号输入位置的选择则根据所测量对象要求而定。例如当噪声较小时，可增大输出动态范围，相对压缩动态贮备而获得低漂移的准确测量值。当噪声大时，则应增加动态贮备，使放大器不因噪声而过载，当然，它以增大漂移为代价。同时，输出动态范围的确定也决定了PSD前后的放大器增益的分配。因此，一般的锁相放大器根据常用测量合理地选择输出动态范围，先进的锁相放大器则可因测量而改变。

### 4. 前置放大器的噪声系数

对于锁相放大器，除频宽、灵敏度、输入阻抗等基本特性外，前置放大器的噪声系数是关系到最小能检

出信号的重要因素，它定义为

$$NF = 20 \log_{10} \left( \frac{\text{热噪声} + \text{放大器的噪声}}{\text{热噪声}} \right), \quad (11)$$

即被放大器所增加的噪声量对已被放大的源热噪声之比。由式(1)可知NF是R、f的函数。每一个放大器都有自己的NF(f,R)曲线，可由实验得到。图6给出某一前置放大器的噪声系数图。由噪声系数图和式(11)可以找出最小能检出电压值。

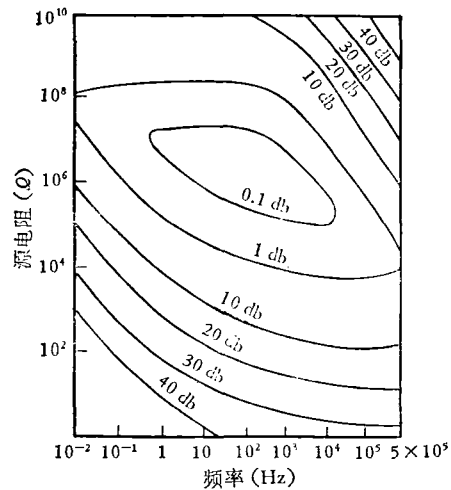


图6 噪声系数图一例

由(11)式可得

$$V_{s, \min} = \text{热噪声} + \text{放大器的噪声} \\ = \text{热噪声} \times 10^{NF/20} \quad (12)$$

设工作频率为1kHz，源电阻为10kΩ，求最小能检出电压。由关系式(1)可以算出10kΩ源电阻的热噪声为12.8nV/√Hz。由图6找出频率为1kHz源电阻为10kΩ的噪声系数为1db，则10<sup>NF/20</sup> = 1.22。

$$V_{s, \min} = 12.8 \text{ nV} \cdot \Delta f^{1/2} \times 10^{NF/20} = 15.6 \text{ nV} \cdot \Delta f^{1/2}$$

在输出低通滤波器的时常数为5sec情况下，等效噪声带宽为0.05Hz，由此可得

$$V_{s, \min} = 15.6 \text{ nV} \times \sqrt{0.05} = 3.5 \text{ nV}$$

此即理论上可检出的最小电压。

## 四、FS-1型锁相放大器

这是由中国科学院物理研究所和江西庐山电子仪器厂共同研制的一台锁相放大器。全部采用国产电子元器件。它已达到的主要技术指标为

信号通道：

灵敏度 最大 100nV 满刻度(每10db步进)

输入阻抗 100MΩ//20pF

带通滤波(可分档组合选通范围) 可接入50Hz陷波。

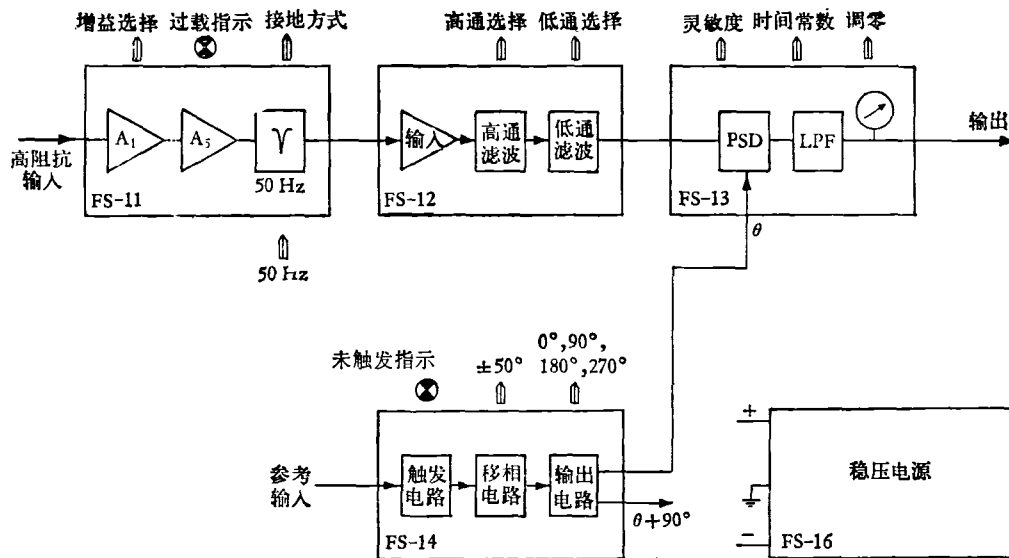


图7 FS-1 锁相放大器原理方框图

参考通道:

输入电压范围 30mV—110V

输入阻抗  $1M\Omega//40pf$

波形与平均电平每周期相交两次的任意周期性  
波形

相位  $0-370^\circ$  可调

频率范围 20—100kHz

等效噪声带宽最小  $0.0083Hz(T_0 = 30sec)$

噪声抑制  $>40db$

时常数 1ms—30sec

FS-1 型锁相放大器的原理如图 7 所示, 包括四个部份, 即信号通道、PSD 及 LFP、参考通道、电源。整个仪器由 5 个插件组成, 每一插件皆可单独使用。

信号通道由高增益低噪声放大器 FS-11 与有源滤波器 FS-12 组成。放大器由 5 节同样结构的放大级与 50Hz 陷波器构成。为消除地电流的影响, 备有讯号地与底板“浮空”结构。每节增益 20db 的放大级和陷波器可开关。有源滤波器由输入电路、高通滤波器和低通滤波器构成。其高低通的截止频率可以 1.585 的倍数步进调节。

FS-13 由以差分放大器为基础的复合式开关门电路构成的 PSD 电路与用运算放大器 8FC2 作成的低通滤波器组成。

参考通道是一个由触发电路、四级移相电路和输

出电路构成的相移与频率无关的非周期移相器 FS-14。

电源 FS-16 供给图 7 每一方框单元直流稳压正负电压。为消除通过电源外干扰的引入, 每一单元内部再设有一稳压电源。

## 五、结束语

锁相放大器已在许多领域得到广泛的应用。诸如电子学、电信、磁学、光学、力学、电机、低温物理、电化学、生物学等领域。在这些领域中都需要检测埋在噪声中的微弱信号或这些信号的幅值和相位的慢变化过程。

已知的应用达百余种。典型的应用如微波频谱、俄歇谱仪、MOS 电路的电容和电导的测量、接触电位差测量、磁共振测量、磁强计、霍耳效应测量、光度计、可见光真空紫外及红外光的光谱测量、光子计数、激光测量、位移测量、极谱仪、超导器件测量、重力场测量等等。

应该指出, 对微弱信号的测量有必要事先妥善地处理好噪声问题(例如良好的屏蔽措施, 以及对测量中可能引入噪声的估计)。同时也必需对所测量对象、传感器、特别是锁相放大器有较好的了解。这样才能获得实验成功, 并且能使锁相放大器获得更多的应用。