锁相放大器教学实验讲义（补充）

引言

锁相放大器是测量微弱信号的一个非常好的手段，在科研活中扮演着十分

重要的角色。随着电子技术的发展利用数字乘法器制成的相敏检波器（PSD），

组成数字锁相放大器有其优越性。

参考资料

1.微弱信号检测技术实验讲义 唐鸿宾 编1997。

2.近代物理实验 北京大学物理学院 吴思诚 王祖铨 主编 高等教育出版社 2005

3. 微弱信号检测教学实验讲义 SYSU SCIENTIFIC INSTRUMENTS 2016

4. MODEL OE1022 DSP Lock-In Amplifier SYSU SCIENTIFIC INSTRUMENTS 2013

实验目的

1.了解锁相放大器的原理及典型框图

2.熟悉数字锁相放大器的使用方法

3.了解锁相放大器的应用。

4. 测量变容二极管内PN结电容与反偏电压的关系并了解获得半导体杂质分布的方法。

实验原理

信息时代需要获取信息，许多科学研究和工程技术的信息需要用检测的方法来获取。当被检测的信号非常微弱时，容易被噪声淹没，此时对他们的检测往往变得十分困难。微弱信号检测就是利用现代电子学和信号处理方法从噪声中提取有用信号的一门新兴技术学科。

微弱信号检测技术在许多领域具有广泛的应用，例如物理学、化学、电化学、生物医学、天文学、地学、磁学、超声等。微弱信号检测所针对的检测是用万用表、示波器等常规和传统方法不能检测到的微弱量，例如弱光、弱磁、弱声、小位移、微流量、微振动、微温差、微压差、微电导以及微电流等。随着科学技术的发展，对微弱信号进行检测的需要日益迫切，可以说，微弱信号检测是发展高新技术，探索及发现新的自然规律的重要手段，对推动相关领域的发展具有重要意义。

现代测量中，所有的物理最终都转换为电压或光强进行记录和处理，我们称之为电或光信号。而所有的测量，即使完全由机器自动进行，结果都不可避免地显示不规则，所测量的信号中叠加了噪声，测量结果可以视作被测量量信号与噪声的叠加。

锁相放大器(lock-in amplifier，LIA)自问世以来，在微弱信号检测方面显示出优秀的性能，在科学研究的各个领域得到了广泛的应用，推动了物理、化学、生物医学、地震、海洋等行业的发展。

对于幅度较小的直流信号或慢变信号，为了防止1/*f*噪声和直流放大的直流漂移(例如运算放大器输入失调电压的温度漂移)的不利影响，一般都使用调制器或斩波器将其变换成交流信号后，再进行放大和处理，用带通滤波器抑制宽带噪声，提高信噪比，之后再进行解调和低通滤波，得到放大了的被测信号。

设混有噪声的正弦调制信号为

式中，是正弦调制信号，是被测信号，是污染噪声。对于微弱的直流或慢变信号，调制后的正弦信号也必然微弱。要达到足够的信噪比，用于提高信噪比的带通滤波器BPF（band pass filter)的带宽必须非常窄，Q值(，为中心频率与带宽的比值)必须非常高，这在实际中很难实现。而且Q值太高的带通滤波器不稳定，温度、电源电压的波动均会使滤波器的中心频率发生变化，从而导致其通频带不能覆盖信号颏率，使得测量系统无法稳定可靠地进行测量。在这种情况下，利用锁相放大器可以很好地解决上述问题。

1. 锁相放大器中的频谱迁移

锁相放大器抑制噪声有3个基本出发点:

1. 用调制器将直流或慢变信号的颏谱迁移到调制频率处，再进行放大，以避开1/*f*噪声的不利影响。
2. 利用相敏检测器实现调制信号的解调过程，可以同时利用频率和相角进行检测，噪声与信号同頻又同相的概率很低。
3. 用低通滤波器而不是用带通滤波器来抑制宽带噪声。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，稳定性也远远优于带通滤波器。

锁相放大器对信号频谱进行迁移的过程示于

图 1‑1。调制过程将低频信号V乘以频率为的正弦载波，从而将其频谱迁移到调制频率两边，之后进行选频放大，这样就不会把1/*f*噪声和低频漂移也放大了，如

图 1‑1 (a)所示。图中的虚线表示1/*f*噪声和白噪声的功率谱密度。经交流放大后，再用相敏检测器PSD（phase sensitive detection）将其频谱迁移到直流()的两边，用窄带低通滤波器LPF(low pass filter)滤除噪声，就得到高信噪比的放大信号，如

图 1‑1(b)所示，图中用虚线表示LPF的频率响应曲线。只要LPF的带宽足够窄，就能有效地改善信噪比。

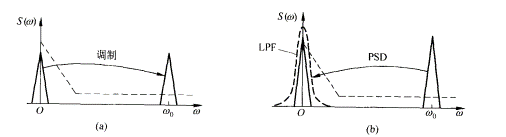


图 1‑1 锁定放大器对信号频谱进行迁移的过程

可见，锁相放大器继承了调制放大器使用交流放大，而不使用直流放大的原理，从而避开了幅度较大的1/*f*噪声;同时又用相敏检测器实现解调，用稳定性更高的低通滤波器取代带通滤波器实现窄带化过程，从而使检测系统的性能大为改善。锁相放大器的等效噪声带宽可以达到0.0001Hz，整体增益可以高达1011以上，所以0.InV的微弱信号可以放大到10V以上。此外，锁相放大器可以实现正交的矢量测量，这有助于对被测信号进行矢量分析，以确定被测系统的动态特性。

## 锁相放大器的工作原理

1. 锁相放大器的原理说明

锁相放大器的基本结构示于图 1‑2，包括信号通道、参考通道、相敏检测器PSD和低通滤波器LPF等。各个模块的基本功能描述如下：

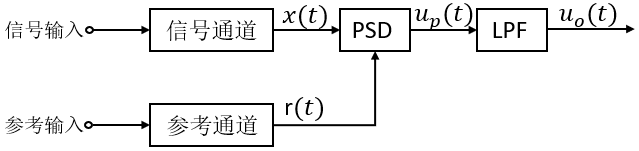


图 1‑2 锁相放大器工作原理[4]

1. 信号通道：对信号输入进行放大及滤波，将微弱信号放大到足以推动相敏检测器工作的电平，并且要滤除部分干扰和噪声。
2. 参考输入：一般是等幅正弦或者方波信号，它可以是从外部输入的某种周期信号，也可以是系统内原先用于调制的载波信号或用于斩波的信号。
3. 参考通道：对参考输入进行放大或衰减，以适应相敏检测器对幅度的要求。参考通道的另一个重要功能是对参考输入进行相位锁定及移相等处理，从而产生同频正弦波与余弦波，以提供给相敏检波器进行乘法运算。

相敏检波器（PSD）：以参考通道提供的基准正弦与余弦分量作为输入，对经过信号通道放大滤波的进行相敏检波（乘法运算），从而实现检波。

1. 图 1‑13所示频谱迁移过程。将的频谱由处迁移到处，再经LPF滤除噪声，其输出对的幅度和相位都敏感，这样就达到了既鉴幅又鉴相（相位及幅度的测量）的目的。
2. 低通滤波器（LPF）：频带可以做得很窄，所以可使锁相放大器达到较大的SNIR。

锁相放大器OE1022D为双相型锁相放大器，即共有两个运算通道。

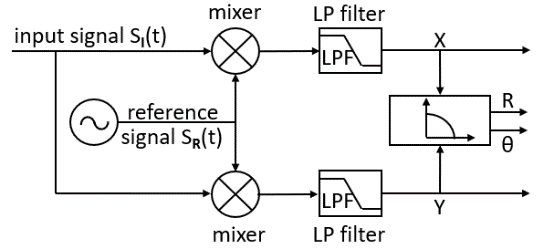


图 1‑3 双相锁相放大器结构框图[5]

以下对双相锁相放大器结构进行运算原理剖析：

输入信号可定义为：

上式中是待测交流信号，幅值为、角频率为ω、相位为，是总噪声。待测信号幅值与噪声相比非常微弱，因此输入信号是一个信噪比很低的信号。

两路参考信号是由锁相放大器通过锁相环锁定跟踪外部的参考信号输入，

从而获得外部参考信号的频率与相位，再通过锁相放大器内部的数字信号处理模块生成同频的高精度正弦波及余弦波（由于同时生成正弦与余弦两路参考信号，因此叫做双相），可定义为：





待测信号与参考信号SR0同时进入PSD模块进行乘法运算，在进行积化和差，得到如下表达式:





式中包含PSD运算后得到的三个结果：

为直流成分，这一部分包含了待测信号幅值、参考信号幅值以及待测信号与参考信号的相位差的余弦值，在待测信号与参考信号稳定的情况下，本部分为定值。

为参考信号二倍频交流成分。

为噪声与参考信号相乘成分。

以上第二部分与第三部分均可认为是PSD运算得到的交流成分。

由于正弦信号具有完备性，且随机信号与正弦信号不具备相关性，对第二部分及第三部分进行积分运算，结果为0，相当于通过后级低通滤波器滤除交流成分，故经PSD运算后所得信号经过LPF模块后，得到直流分量如下：



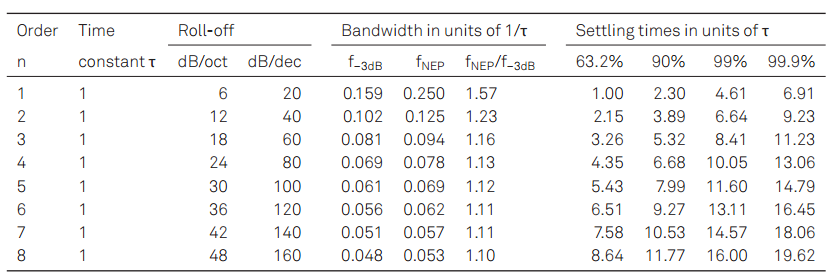


根据直流分量，可通过下列计算式得到待测信号幅值与相位，分别以R和表示：



通过锁相放大的过程，相当于通过一个Q值极高的窄带滤波器，不受待测频率以外的噪声信号影响，因而可以测量极其微小的信号。

不同低通滤波器阶数对应的系统带宽和稳定时间[5]



在数字锁相放大器中，低通滤波器是用数字滤波器实现的；同时OE1022锁相放大器中可选择1至4阶低通滤波器级联的结构；不同的阶数对应的滤波器的陡降不同，1至4阶滤波器分别对应6dB、12dB、18dB、24dB四种陡降。

可以简单地认为，时间常数越大，阶数越高，输出的带宽就越低，显示的测量幅度、相位等值就越稳定。然而，过大的时间常数会抹平输入信号（随时间）的变化，从而失去有用的信息。因此，在实际应用中，需要根据输入信号随时间变化的情况，协调时间常数与信噪比之间的平衡。

实验内容

## 强噪声背景下检测微弱信号

### 【实验原理】

在许多物理实验测试中，测量环境有很大的噪声，待测信号被淹没在强噪声中，给测量工作带来困难。本实验使用μV级别的正弦波信号，淹没在幅值可调的白噪声中，模拟客观测量环境，噪声幅值可达到目标信号的一千倍甚至一万倍。

本实验原理图如图 3‑1所示：



图 3‑1 强噪声背景检测弱信号实验原理图

### 【实验装置】

本实验测量装置由OE1022D型锁相放大器和配套的教学实验仪组成.

实验箱自带100mVrms的白噪声发生器，实验箱内部电路利用双极性晶体管散粒噪声的功率特性来产生白噪声[10]。使用通过拨码器选择可以得到**100mVrms**、**10mVrms**、**1mVrms**的

白噪声信号，分别对应**0dB（1倍）**、**20dB（10倍）**、**40dB（100倍）**的衰减。由锁相放大器OE1022D的SINE OUT以及外部的80dB(10000倍)信号衰减器，可以得到100nVrms到5Vrms的正弦信号。通过运放把两路信号相加得到不同信噪比的信号，然后由锁相放大器对此信号进行提取测量。

## 变容二极管结电容测量实验

### 【实验原理】

本实验的原理框图如图 3‑10所示。其中变压器的作用是将交流信号加载到变容二极管的两端，同时起到了隔离的作用。但是本实验系统中可以不是用变压器而直接将SINE OUT输出的交流信号加载到变容二极管上，因为锁相放大器的SINE OUT接口和SIGNAL IN接口是共地的。但是在很多情况下，采用隔离变压器的方法可以避免不共地问题带来的测量误差。



图 3‑10 变容二极管结电容测量实验原理图

半导体PN结交界处存在势垒区，因此结两端的电压变化会引起积累在此区域的电荷数量的改变，从而表现出电容效应。PN结电容根据产生的原因不同可分为势垒电容和扩散电

容。

当PN结外加电压变化时，空间电荷区的宽度将随之变化，即耗尽层的电荷量随着外加电压的变化而增多或减少。耗尽层宽度变化所等效的电容就叫做势垒电容，它具有非线性，与结面积、耗尽层宽度、半导体的介电常数及外加电压有关。变容二极管就是根据普通二极管内部的PN结电容随着外加电压的变化而变化的原理而设计出来的一种特殊二极管。

除了上面所说的势垒电容，还有一个就是扩散电容。扩散电容是在正向偏置电压下所表现出来的一种微分电容效应。在反向偏置的时候，可以忽略扩散电容的作用，因为它是少数载流子引起的，在正向偏置的时候会起很大的作用。但是，势垒电容就不同了，它在正向偏置与反向偏置下都起作用，因为它是多数载流子引起的。

二极管PN结分析的简化模型有两种，分别是突变结和线性缓变结模型，实验箱中所用的是变容二极管等效分析模型是突变结模型。

二极管PN结电容Cx 计算公式为[11]：

其中，上式中e、ε和是常数，为PN结轻掺杂一边的杂质浓度，为接触电势差，与PN结两边的掺杂浓度以及材料性质有关，A为PN结势垒电容等效为平行板电容器后的正对面积。在PN结确定的情况下，以上参数均不会发生变化。所以从式中可以得出和成反比关系。

在变容二极管两端加入反偏直流电压DC-Vt，变容二极管电容值随电压DC-Vt 变化而变化，变化关系如下图 3‑11所示：

图 3‑11 变容二极管Cx与DC-Vt的曲线关系图

实验电路图由于锁相放大器输入阻抗远大于待测阻抗，测量端可以视为断路状态。另外的阻抗为2MΩ,可视为断路状态。根据交流电路结构可以简化为如下交流等效结构：



图 3‑12 变容二极管结电容测量实验原理图简图

根据实验原理简图可推出待测电容Cx表达式：

其中是SINE OUT设置的值，Vout是OE1022D测得值幅值R，C0是标准电容，此处采用6.8nF。

### 【实验装置】

本实验测量装置由OE1022D型锁相放大器和配套的教学实验仪组成。实验采用信号源是OE1022D的SINE OUT信号发生器，输出10.000kHz的交流信号用于激发变容二极管的电容效应，同时用OE1022D作为测量仪器。

### 常见问题

问题1：被测信号携带了哪些信息？锁相放大器能够测量信号的什么信息？

问题2：既然锁相放大器只能测量交流信号的幅度及相位，而被测信号却往往是微弱的直流信号，怎么办？

问题3: 锁相放大器在什么情况下采用内部参考模式，什么情况下采用外部参考模式？

问题4：有没有什么测量情况不采用参考信号？

问题5：锁相放大器能不能测量非正弦的周期信号？

问题6：被测信号的幅度如果变化很快，锁相放大器测量参数怎么设置？

### 【思考题】

1. 参考本方法，思考三极管、场效应管的寄生电容或者电感如何测量。

2. 某些传感器的阻抗在外界环境情况下会随环境快速响应，例如测量发动机气缸的温度的变化。这种情况可以考虑用一个热敏电阻（电阻值随着温度变化而变化）作为传感器，由于发动机气缸的温度变化很快，因此传统的方法测量信噪比低；思考及设计采用锁相放大技术进行测量的方案。