



## 光电子技术(21)

实际应用中，参考信号为正弦波，而待测信号被调制成周期信号，通常为周期方波。根据付里叶级数理论，任何周期波包含周期频率的各次谐波。

$$S_1(t) = \sum_{n=0}^{n=\infty} a_n \sin(n\omega_1 t + \theta_n)$$

它与参考信号互相关结果为：

$$R_{12}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{V_2 a_n}{4T} \sum_{n=0}^{n=\infty} \int_{-T}^T \{ \cos[(n\omega_1 - \omega_2)t + (\theta_n - \varphi_2 + \omega_2\tau)] - \cos[(n\omega_1 + \omega_2)t + (\varphi_2 + \theta_n - \omega_2\tau)] \} dt$$

通过低通滤波，只保留频率不高于 $\omega_1 - \omega_2$ 项，则



## 光电子技术(21)

$$R_{12}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{V_2 a_1 R_f}{4TR_i} \int_{-T}^T \frac{\cos[(\omega_1 - \omega_2)t + (\theta_1 - \varphi_2 + \omega_2\tau) + \phi]}{\sqrt{1 + ((\omega_1 - \omega_2)R_f C_f)^2}} dt$$

$$= \begin{cases} 0 & \omega_1 \neq \omega_2 \\ \frac{V_2 a_1}{2} \cos(\theta_1 - \varphi_2 + \omega_2\tau) & \omega_1 = \omega_2 \end{cases}$$

结果仍然是频率和相位敏感的。

锁相放大器的增益谱由低通滤波器确定：

$$G(\omega) = |H(\omega)| = G(0) / \sqrt{1 + (\omega C_f R_f)^2}$$

白噪声的增益谱与信号增益谱相同，所以噪声等效带宽为：



## 光电子技术(21)

$$\Delta f_N = \frac{1}{G(0)} \int_0^{\infty} G(\omega) d\omega = \frac{1}{2\pi R_f C_f} \arctg(\omega C_f R_f) \Big|_0^{\infty} = \frac{1}{4R_f C_f}$$

设  $R_f C_f = 250\text{s}$ , 则  $\Delta f_N = 1\text{mHz}$

如此窄的等效噪声带宽, 所以能有效滤出噪声, 提高信噪比。

在实际的锁相放大器中, 有一个设置“时间常数”按钮, 它用于设置采样信号的时间长度, 实质上就是设置噪声等效带宽。

锁相放大器的实质:

锁相放大器把原来要在频域中做的有源窄带通滤波转换为时域的相关运算, 通过控制被测信号的时间长度, 控制噪声等效带宽。信号时间序列越长, 噪声等效带宽越窄, 去噪声效果越好。用时间相关代替带宽和中心频率可调的带通滤波器。能实现高增益窄带宽



## 光电子技术(21)

### 二、常用锁相放大器

先前国产锁相放大器主要由南京大学生产, 现在中山大学生产

国外锁相放大器主要由美国的EG&G和stanford Research公司生产。

### 三、锁相放大器应用

锁相放大器用于微弱光信号检测的典型测量光路如图111所示。

### § 5.5 取样积分器 (Boxcar)

取样积分是另一种微弱信号检测方法, 它直接利用信号和零均值随机噪声具有不同的二级统计特性, 通过多次累加, 提高信噪比, 实现微弱周期信号的检测。

#### 一、取样积分原理

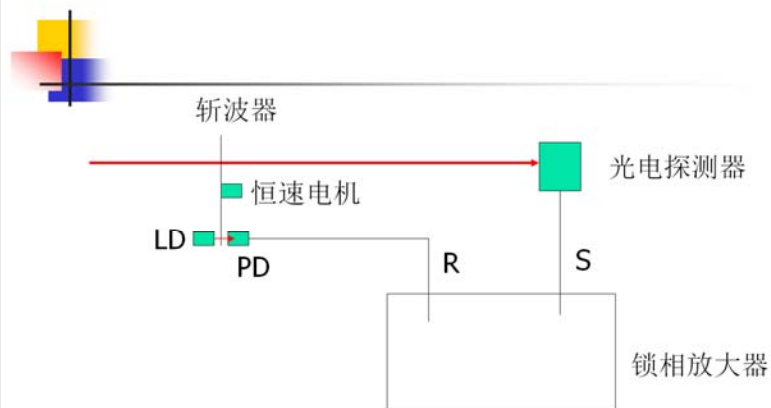


Fig.111 微弱光信号的锁相放大器检测

## 光电子技术(21)

设待测量信号 $f(t)$ 为:

$$f(t) = S(t) + N(t)$$

$$S(t) = S(t + nT), \quad n = 1, 2, \dots$$

$$N(t) = \sqrt{N^2(t)}$$

当对信号的 $m$ 个周期重复采样, 并累加采样值得:

$$f_0 = \sum_{n=1}^m f(t_i + nT) = \sum_{n=1}^m [S(t_i + nT) + N(t_i + nT)] = \sum_{n=1}^m S(t_i + nT) + \sum_{n=1}^m N(t_i + nT)$$

$$= mS(t_i + nT) + \sqrt{\left\langle \sum_{n=1}^m N^2(t_i + nT) \right\rangle - \left\langle \sum_{n=1}^m N(t_i + nT) \right\rangle^2}$$

$$= mS(t_i + nT) + \sigma_b \sqrt{m + 2 \sum_{i=1}^{m-1} (m-i)r_{1i}}$$

式中 $\sigma_b$ 为噪声的方均根值,  $r_{1i}$ 为噪声的归一化相关系数。



## 光电子技术(21)

累加器输出的信噪比为:

$$SNR_{out} = \frac{mS_i(t_i + nT)}{\sigma_b \sqrt{m + 2 \sum_{i=1}^{m-1} (m-i)r_{ii}}} = \frac{m}{\sqrt{m + 2 \sum_{i=1}^{m-1} (m-i)r_{ii}}} \frac{S_i(t_i + nT)}{\sigma_b} = \frac{m}{\sqrt{m + 2 \sum_{i=1}^{m-1} (m-i)r_{ii}}} SNR_{in}$$

信噪比增益倍数为:

$$M = \frac{(SNR)_{out}}{(SNR)_{in}} = \frac{m}{\sqrt{m + 2 \sum_{i=1}^{m-1} (m-i)r_{ii}}}$$

当噪声为随机白噪声时,  $r_{ii}=0$

⇐ / ⇨



## 光电子技术(21)

所以, 信号比 (SNR) 改善倍数为:

$$M = \frac{m}{\sqrt{m + 2 \sum_{i=1}^{m-1} (m-i)r_{ii}}} = \sqrt{m}$$

上式表明通过增加累加次数, 能提高信噪比。但测量时间长, 所以, 提高信噪比是以牺牲时间为代价的。

### 二、单点及扫描式取样积分

单点取样积分只能检测周期信号中的某一点, 测量框图如图112所示。扫描式取样积分能给出一个完整的周期波形, 测量框图如图112a所示。

### 三、取样积分器主要参数



## 光电电子技术(21)

### 1、采样周期 $T_g$ 与取样门宽度 $\delta$

根据采样定理，采样频率不低于信号带宽的两倍，所以，

$$\frac{1}{T_g} > 2f_s \quad \text{或} \quad T_g < 0.5 / f_s$$

取样门宽度 $\delta$ 应该小于采样周期 $T_g$ ， $\delta$ 越窄，信号恢复越精细。因为门宽内的信号被积分、不可分辨。

### 2、积分常数 $T_c$

积分常数决定了积分时间，对确定的信号频率，积分常数的大小决定了累加的次数。积分常数大，累加次数多，信噪比改善大，反之，累加次数小，信噪比改善小。然而，积分常数太大，高频窄脉冲就不灵敏，所以，高频成分被滤去，积分常数应折衷。

### 3、噪声等效带宽



## 光电电子技术(21)

$$\Delta f = \delta / (2RC)$$

### 4、时基 $T_b$

指延迟器的最大延迟时间，最大值为信号周期。

### 5、扫描时间 $T_t$

指信号的总的被采样时间长度。设累加的点数为 $N_t$ ，则扫描时间为：

$$T_t = N_t T_s = N_t / f_s$$

在总的扫描时间 $T_t$ 内，延迟时间刚好扫描一个时基，所以，被恢复信号点之间的时间间隔为：

$$\Delta t = \frac{T_b}{N_t} = \frac{T_b}{T_t f_s}$$

### 四、多通道取样积分器

前面讲的单通道取样积分器，每次扫描只对一个点积分测量，测量

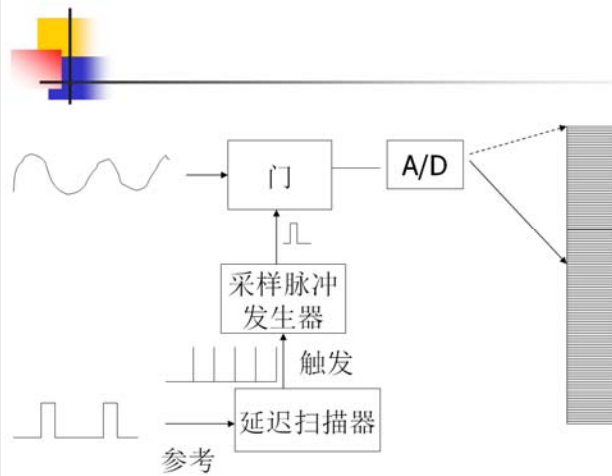


Fig.112a 扫描取样积分器框图

## 光电电子技术(21)

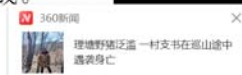
效率低，时间长。而多通道积分器有多个积分通道，每个通道对应不同的延迟时间，所以，可以对一个信号周期内的不同延迟时间点串行采样积分。这种多通道取样积分器实际上是结合高速A/D和微计算机。利用高速A/D转换器，顺序采样一个周期信号内的多点，例如1024点，并存入计算机内存中。下一个周期中再重复上一个周期采样点，并将结果累加进入存放上一周期采样序列的内存中，重复这一过程 $m$ 次，则每个存储器中的信号的信噪比均提高 $m^{1/2}$ 倍。

### 五、常见取样积分器

取样积分器主要由美国的EG&G公司生产，由多个模块组成。

### § 5.6 光子计数器

光子计数是一种绝对微弱但高信噪比信号的灵敏检测技术，而实现



## 光子电子技术(21)

放大和积分累加是低信噪比的相对微弱信号的灵敏检测技术。

### 一、光子计数原理

当信号功率绝对微弱时，探测器的输出不再是连续的，而是一些脉冲序列。如果噪声背景脉冲幅度低于信号脉冲幅度，通过设置门限电平（甄别电平），忽略背景噪声脉冲，而只计数电平高于门限的信号脉冲的数目。这就是光子计数的原理。

光子计数的条件：（1）光电倍增管的渡越时间偏差足够小，它决定系统的分辨时间和最大探测功率。

（2）信号脉冲相对于背景噪声脉冲有足够的信噪比。

光子计数测量的动态范围：

（1）测量上限由探测器的渡越时间偏差确定，数学表示为：



## 光子电子技术(21)

$$P_{\max} = \frac{h\nu}{\tau\eta}(W)$$

例： $\eta=0.5$ ， $\tau=10\text{ns}$ ， $h\nu=2\text{eV}=3.2\times 10^{-19}\text{J}$ ， $P_{\max}=6.4\times 10^{-11}\text{(W)}$

（2）测量下限由背景噪声脉冲数决定。数学表示为：

$$P_{\min} = \frac{n_b h\nu}{\eta}(W)$$

例： $\eta=0.5$ ， $n_b=100$ ， $h\nu=2\text{eV}=3.2\times 10^{-19}\text{J}$ ， $P_{\min}=6.4\times 10^{-17}\text{(W)}$

背景电子数的降低可以采用低温制冷探测器。

甄别电平设置：（1）下甄别电平设置。探测器无光照时，逐渐增加下甄别电平，直至几乎无计数出现。此时电平即为下甄别电平。



## 光子电子技术(21)

(2) 上甄别电平设置。为了排除高能射线粒子的影响，可以设置上甄别电平。通常上甄别电平设置在无穷大，逐渐降低上甄别电平直至光子计数不受影响的最低电平。

### 二、光子计数器结构与工作过程

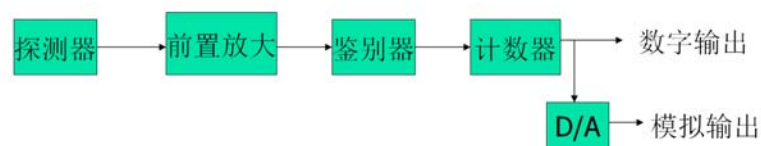
光子计数器由探测器、前置放大器、甄别器和计数器四部分组成。

探测器：通常用低温制冷的光电倍增管或雪崩二极管。要求渡越时间偏差小。

前置放大器：放大探测器输出的信号。要求放大器噪声小。

甄别器（鉴别器，**discriminator**）：将脉冲幅度在上下甄别电平范围内的脉冲转换为标准幅度的计数脉冲，脉冲宽度应小于探测器渡越时间偏差。

## 光子电子技术(15)



光子计数器结构框图





## 光子电子技术(21)

脉冲计数器：计数单位时间内的脉冲数，反映了输入光功率。

### 三、常见光子计数器

美国EG&G公司生产SPCM-AQ系列单光子计数器。

Stanford Research Systems生产的SR400系列双通道单光子计数器

德国的FastComTeck公司生产的Model 7882双通道光子计数器。

### 四、时间分辨光子计数器

应用时间分辨光子计数器可以测量周期性时间变化的信号，如发光衰减过程。只需要将计数器换为高速A/D转换器和存储器序列，不同时刻的A/D转换信号存在不同的存储单元中。对多个周期重复累加，最后获得随时间变化的信号光强。目前可以做到几十皮秒的时间分辨率（当前0.2ps，条纹相机）。广泛用于发光动力学研究。



## 复习要点

- 1、取样积分器改善信噪比的原理？单点和扫描式取样积分器的工作原理？
- 2、光子计数器的工作原理？
- 3、取样积分器与光子计数器所检测的微弱信号有何异同？



## 作业二十一

---

- 1、取样积分器提高信噪比的原理？
- 2、取样积分器与光子计数器所检测的微弱信号有何异同？