



光电子技术(20)

应用：高速图象摄取，如电视图象摄取。

第五章、微弱光电信号检测

指弱光信号，转换为电流后，比背景噪声电流还小。即信噪比小于1的信号检测，称为相对微弱信号。反之，信号虽弱，但仍强于噪声，称为绝对微弱信号

§ 5.1、噪声及其特性

噪声包括内部和外部噪声。

外部噪声：指来自测量系统以外的噪声，如市电干扰、脉冲放电等。外部噪声通过采取适当的措施可以消除。

内部噪声：由测量系统自身产生的各种噪声。如热噪声。内部噪声通常难于完全消除。只能采取措施减弱。



光电子技术(20)

一、热噪声

由电子无规热运动引起的电压起伏称为热噪声。注意与光电转换中的热发射噪声的区别。它实质上起源电子运动速度的热涨落。

特点：(1) 平均值为零。可用均方根描述。

(2)、与频率无关，即平均分布在所有频率上。称为“白”噪声。

(3)、平方均值正比于测试系统的带宽 Δf_N 、温度 T 和负载电阻 R ：

$$\overline{V_n^2} = 4KTR\Delta f_N$$

二、散粒噪声

有源器件内由于增益起伏引起电子数量的涨落，对应这种涨落的噪声称为散粒噪声。散粒噪声的方均值：

$$\overline{i_{ns}^2} = 2eI_a\Delta f_N$$



光电子技术(20)

Δf_N 为等效噪声带宽， I_a 为平均电流。散粒噪声与频率无关，所以，为“白”噪声。

三、闪烁噪声

由器件结构上的局部起伏引起的发射电子的缓慢随机起伏，称为闪烁噪声。如光阴极的不均匀引起发射电子的不均匀。闪烁噪声为低频噪声，出现在500赫兹以下。通过提高工作频率可以避免闪烁噪声。

四、等效噪声带宽

定义为与噪声功率增益谱的总功率相等的具有最大增益高度的矩形功率谱的带宽。即：

$$\Delta f_N = \frac{1}{G_m} \int_0^{\infty} G(f) df$$



光电子技术(20)

§ 5.2 有源滤波

通过对光信号进行调制，可以将光信号转换为在某一频率范围内的电信号，然后使用有源滤波技术选取信号频谱放大、而排除噪声。

一、有源低通滤波

低通滤波指通频带在 $0 \sim f_c$ 范围的滤波放大。 f_c 定义为幅频特性（电压增益）衰减到最大值的70%时的频率。

典型的有源低通滤波电路如图107所示。它的幅频特性为：

$$|H(\omega)| = \left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{R_f}{R_i} \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega R_f C_f)^2}} = \frac{R_f}{R_i} \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega / \omega_c)^2}}$$

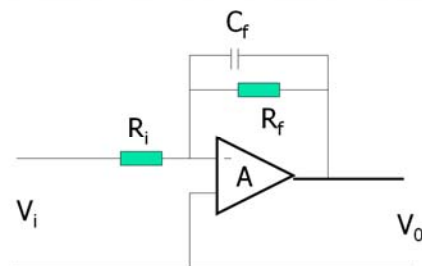


Fig.107 有源低通滤波器典型线路

光电子技术(20)

上截止频率为:
$$f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{1}{2\pi R_f C_f}$$

二、有源高通滤波

有源高通滤波用于滤去低频噪声。有源高通滤波的典型电路如108图所示，频率范围 $f_c \sim \infty$ 。其幅频特性为：

$$|H(\omega)| = \left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{R_f}{R_i} \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega_c / \omega)^2}}$$

下截止频率为:
$$f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{1}{2\pi R_i C_i}$$

三、有源带通滤波

有源带通滤波的通带在 $f_{c1} \sim f_{c2}$ 间，通常用于选取一个窄的通带。它由一个低通和高通滤波器件串连而成，只要低通的截止频率 f_L 大于高

光电子技术(14)

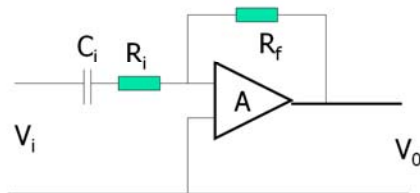


Fig. 108 有源高通滤波器典型线路

光电子技术(20)

通滤波器件的截止频率 f_H ，即 $f_L > f_H$ 。

带通滤波器的幅频特性为：

$$|H(\omega)| = \frac{R_{fL} R_{fH}}{R_{iL} R_{iH}} \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega / \omega_{cL})^2} \sqrt{1 + (\omega_{cH} / \omega)^2}}$$

式中 $\omega_{cL} > \omega_{cH}$ 。

当 $\omega = \omega_{\max} = \sqrt{\omega_{cL} \omega_{cH}}$

幅频特性最大值为： $|H(\omega_{\max})| = \frac{R_{fL} R_{fH}}{R_{iL} R_{iH}} \frac{1}{1 + \omega_{cH} / \omega_{cL}}$

所以， $|H(\omega)| = |H(\omega_{\max})| \frac{1 + \omega_{cH} / \omega_{cL}}{\sqrt{1 + (\omega / \omega_{cL})^2} \sqrt{1 + (\omega_{cH} / \omega)^2}}$



光电电子技术(20)

带通滤波器的上、下截止频率为:

$$f_{c1} = \frac{\sqrt{(\omega_{cl} + \omega_{ch})^2 + 4\omega_{cl}\omega_{ch}} - (\omega_{cl} + \omega_{ch})}{4\pi}$$

$$f_{c2} = \frac{\sqrt{(\omega_{cl} + \omega_{ch})^2 + 4\omega_{cl}\omega_{ch}} + (\omega_{cl} + \omega_{ch})}{4\pi}$$

§ 5.3 相关检测原理

有源滤波提供了在频率域中提取微弱信号的方法。而相关法提供在时间域中提取微弱信号的方法。两者是等价的,通过付里叶变换联系起来。



光电电子技术(20)

这种时域-频域处理的等价性由相关定理保证,相关定理表述为:

设 $f(t), g(t)$ 为两个可积函数,它们的互相关为:

$$R_{fg}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f^*(t)g(t+\tau)dt$$

则,它的付里叶变换为:

$$R(\omega) = \mathfrak{F}\{R(\tau)\} = F^*(\omega)G(\omega)$$

式中 $F(\omega) = \mathfrak{F}\{f(t)\} \quad G(\omega) = \mathfrak{F}\{g(t)\}$

所以,时域的相关运算等价于频域的滤波。



光电电子技术(20)

一、自相关函数与自相关检测

任一时间函数 $f_1(t)$ 的自相关函数定义为:

$$R_{11}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T f_1(t) f_1(t - \tau) dt$$

假设被检测时间序列 $f_1(t)$ 由信号 $s(t)$ 和噪声 $N(t)$ 相加组成, 即

$$f_1(t) = s(t) + N(t)$$

则自相关函数为:

$$R_{11}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T [s(t) + N(t)][s(t - \tau) + N(t - \tau)] dt$$



光电电子技术(20)

$$\begin{aligned} &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T [s(t)s(t - \tau) + s(t)N(t - \tau) + N(t)s(t - \tau) + N(t)N(t - \tau)] dt \\ &= R_{ss}(\tau) + R_{sN}(\tau) + R_{Ns}(\tau) + R_{NN}(\tau) \end{aligned}$$

假设噪声 $N(t)$ 是随机的, 并且具有零均值, 则

$$R_{sN}(\tau) = 0, \quad R_{Ns}(\tau) = 0, \quad R_{NN}(\tau) = \overline{N^2} \delta(\tau)$$

所以,

$$R_{11}(\tau) = R_{ss}(\tau) + \overline{N^2} \delta(\tau)$$

上式表明自相关检测能够排除噪声影响, 仅有延迟零点受噪声影响。

例: $f(t) = V_0 \cos(\omega t + \varphi) + N(t)$



光电子技术(20)

其自相关为: $R_{11}(\tau) = \frac{V_0^2}{2} \cos \omega \tau + \overline{N^2} \delta(\tau)$

自相关器的结构框图如图109所示

二、互相关函数与互相关测量

自相关检测中还存在噪声对延迟零点处的自相关函数的影响, 这是由于参考信号中含有噪声。如果参考信号中不含噪声, 则噪声对相关函数的影响就可以消除, 这就是发展互相关检测的思想。

互相关函数定义为:
$$R_{12}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T f_1(t) f_2(t - \tau) dt$$



光电子技术(20)

式中 $f_1(t)$ 为被检测信号, 包含噪声, 而 $f_2(t)$ 为参考信号, 不含噪声。

设: $f_1(t) = s_1(t) + N(t)$

$f_2(t) = s_2(t)$

则:
$$R_{12}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T [s_1(t) + N(t)] s_2(t - \tau) dt$$

$= R_{s_1 s_2}(\tau) + R_{N s_2}(\tau)$

假设噪声 $N(t)$ 为零均值随机噪声, 则: $R_{N s_2}(\tau) = 0$

互相关函数简化为: $R_{12}(\tau) = R_{s_1 s_2}(\tau)$

上式表明零均值随机噪声对互相关检测没影响。



光电子技术(20)

互相关检测器结构框图如图110所示。

§ 5.4 锁相放大器 (Lock-in)

锁相放大器是基于互相关检测原理发展起来的一种微弱周期信号检测仪器，它不仅锁定周期信号的频率，而且锁定其初始相位，并对检测出的信号放大。它等效于频域检测中的有源带通滤波。

一、锁相放大的原理

设被检测微弱周期信号为： $S_1(t) = V_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1)$

参考信号为： $S_2(t) = V_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2)$

互相关函数为：

$$R_{12}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T V_1 V_2 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) \sin[\omega_2(t - \tau) + \varphi_2] dt$$



光电子技术(20)

$$= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{V_1 V_2}{4T} \int_{-T}^T \{ \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2 + \omega_2 \tau)] - \cos[(\omega_1 + \omega_2)t + (\varphi_1 + \varphi_2 - \omega_2 \tau)] \} dt$$

使用低通滤波，滤除和频项，则上式简化为：

$$\begin{aligned} R_{12}(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{V_1 V_2}{4T} \int_{-T}^T \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2 + \omega_2 \tau)] dt \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{V_1 V_2}{2T(\omega_1 - \omega_2)} \cos(\varphi_1 - \varphi_2 + \omega_2 \tau) \sin(\omega_1 - \omega_2)T \\ &= \begin{cases} 0 & \omega_1 \neq \omega_2 \\ \frac{V_1 V_2}{2} \cos(\varphi_1 - \varphi_2 + \omega_2 \tau) & \omega_1 = \omega_2 \end{cases} \end{aligned}$$



光电子技术(20)

上式表明锁相放大器不仅对频率灵敏，而且对信号与参考之间的位相差也灵敏。通过调节信号与参考之间的延迟时间 τ ，可以实现相敏检测。即

$$R_{12}(\tau) = \begin{cases} 0 & \omega_1 \neq \omega_2 \\ \frac{V_1 V_2}{2} \cos(\varphi_1 - \varphi_2 + \omega_2 \tau) & \omega_1 = \omega_2 \end{cases}$$
$$= \begin{cases} \frac{V_1 V_2}{2} & \varphi_1 - \varphi_2 + \omega_2 \tau = 2n\pi, \quad \text{同相} \\ 0 & \varphi_1 - \varphi_2 + \omega_2 \tau = n\pi + \frac{\pi}{2}, \quad \text{正交} \\ -\frac{V_1 V_2}{2} & \varphi_1 - \varphi_2 + \omega_2 \tau = (2n+1)\pi, \quad \text{反相} \end{cases}$$



复习要点

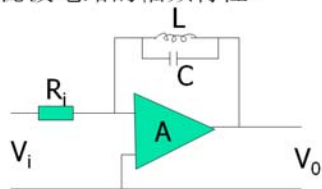
- 1、噪声的种类和频谱特性？
- 2、有源低通、高通和带通滤波器的结构和幅频特性、截止频率？
- 3、自相关检测、互相关检测的原理和各自特点？
- 4、锁相放大器的原理？频率和相位灵敏性？





练习二十

1、分析下图所示滤波电路的幅频特性？



2、分析锁相放大器的信号和参考信号均为方波时的输出结果？