

PEV 摄象机非对称斩波模式研究

黄 铁 侠

(华中工学院电子与信息工程系)

摘要——本文提出热释电摄象管非对称斩波模式,与通常的斩波模式相比较,具有电流响应率高,动态范围大及负向残象小等优点。文中讨论了信号传递函数的分析方法,并对信号处理电路作了扼要的说明。

一、引 言

通常热释电摄象管(PEV)摄象机的斩波模式都是对称型的。即在一个斩波周期中,信号亮场(调制盘打开)和暗场(调制盘关闭)的场数相等。这种斩波模式的主要缺点是电流响应率较低;此外,由于信号电流不能超过本底电流数值,故动态范围和信噪比都受到限制。

本文提出的非对称斩波模式的特点是:在一个斩波周期中,只有一个亮场,而包含多个暗场;其优点是:亮场输出信号幅度接近平移模式,电流响应率高;高空间频率时的信号传递函数比平移模式高;信号电流可以大大超过本底电流,动态范围大及观察运动目标时负向残象小。采用非对称斩波模式时,信号处理电路中必须使用场存贮器。

这种模式的主要缺点是由于亮场帧频较低(5~10 Hz),当观察运动速度较快的目标时,图象会呈现不连续的感觉。

二、工 作 原 理

下面讨论非对称斩波的工作状态。为了进行比较,我们先扼要说明对称斩波的情况。

1. 对称斩波模式的信号传递函数

图1为对称斩波模式的装置和靶面辐照度波形图。物镜和摄象管靶面之间装有一个渐开线型的调制盘。由于调制盘不可能贴近象平面,当斩波频率取为1/2场频时,靶面辐照度的变化实际上接近升余弦规律。

设 f_c 为斩波频率, $T_c=1/f_c$ 为斩波周期, T_v 为场周期。目标辐射在靶面上的图形,其照度在 y 轴方向按正弦规律分布,则靶面辐照度 H 为

本文1987年8月10日收到。

$$H = H_0 + H_m \sin 2\pi n y \cdot \exp \left[j \left(\omega_c t + \frac{\pi}{2} \right) \right];$$

式中, n 为空间频率; $\omega_c = 2\pi f_c$ 为斩波角频率; H_0 为辐照度的恒定分量, 它对信号电流没有贡献, 可不予考虑。

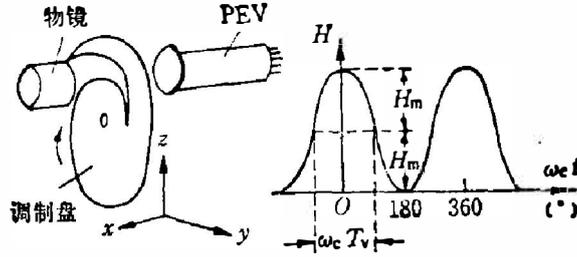


图1 PEV 对称斩波模式装置及辐照度波形图

Fig.1 Schematic of symmetrically chopped mode operation of a PEV and the irradiance waveform.

可以证明 信号电流 I_s 是一个复数

$$I_s = I_{s0} \sin 2\pi n y (1 + \beta^2)^{-1/2} S_s \left(\frac{\omega_c T_V}{2} \right) \cdot (1 - L) (1 + L^2 - 2L \cos \omega_c T_V)^{-1/2} \cdot \exp \left[j \left(\omega_c t - \phi - \theta - \frac{\omega_c T_V}{2} + \pi \right) \right]; \quad (1)$$

式中, $I_{s0} = \frac{P A \alpha H_m}{\eta \rho c b}$ 是理论上信号电流能达到的最大值; P 为热释电系数; A 为扫描面积; α 为吸收率; η 为扫描效率; ρ 为靶材料密度; c 为靶材料的比热; b 为靶厚; $\beta = \frac{k(2\pi n)^2}{\omega_c}$; k 为热扩散系数; $S_s = \left(\frac{\sin \frac{\omega_c T_V}{2}}{\frac{\omega_c T_V}{2}} \right)$ 为抽样函数; L 为放电滞后系数; $\phi = \arctg \frac{1}{\beta}$ 称为热扩散相移; $\theta = \arcsin [L \sin(\omega_c T_V)] / (1 + L^2 - 2L \cos \omega_c T_V)^{1/2}$ 为放电滞后相移。

关于 PEV 的调制传递函数 MTF, 至今没有统一的定义。文献[2、3]把 $(1 + \beta^2)^{-1/2}$ 定义为 MTF。文献[1、4]把 I_s/I_{s0} 的复模定义为 MTF; 文献[5]则把该量定义为信号传递函数 STF。这些定义对指导靶材料和电子枪参数的选择是有用的^[5], 但对于斩波模式, 由于热释电摄像管只能在一个选定的读出相角下工作, 故 I_s/I_{s0} 的复模不能完全代表实际信号电流。

本文对信号传递函数 STF 作如下定义: 复数 I_s/I_{s0} 的实部 $\text{Re}(I_s/I_{s0})$ 称为信号传递函数。这样 STF 不仅与空间频率有关, 而且还决定于读出相角。

式(1)中, 设 $k = 0.3 \text{ mm}^2/\text{s}$, $L = 0.5$, $f_c = 25 \text{ Hz}$ 。由于我们只对垂直条形图象信号电流的幅值感兴趣, 故命 $\sin 2\pi n y = 1$ 。根据上述 STF 的定义, 可算得不同空间频率时, STF 与读出相角的一族关系曲线, 如图 2 所示。STF 的负值与正值是对称的, 故图中未画出曲线的负值部分。

从图 2 可以看出, 热滞后相移 ϕ 与空间频率有关, 因此 STF 与 n 的关系(见图 3)决定于读出相角的选定。把读出相角选为 65° , 这时低空间频率的信号电流虽略有下降, 但却能显著提高高空间频率时的调制度。

按文献[1、4、5]所导出的公式作出的 MTF 或 STF 曲线(如图 3 中虚线所示), 实际上就是按图 2 中各曲线的最大值而作出的。由于读出相角只能是一定值, 各曲线的最大值无法同时读出, 因此图 3 中虚线所示的 STF 曲线是不可能实现的, 它不能用来描述 PEV 摄

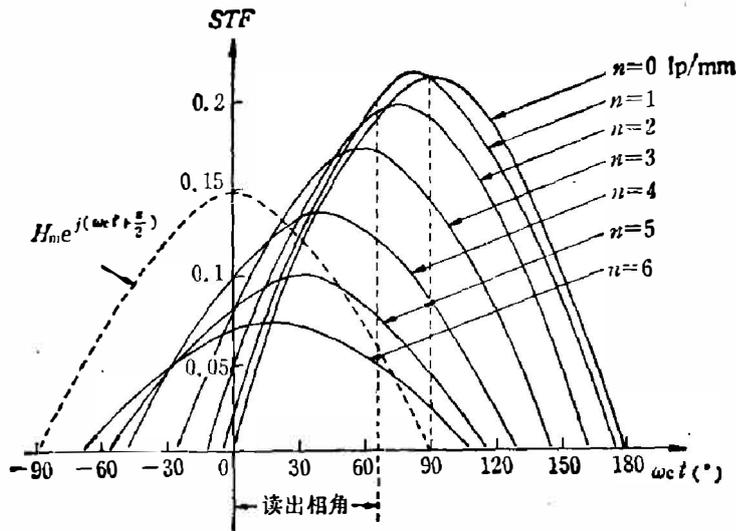


图2 对称斩波模式信号传递函数与读出相角的关系

Fig. 2 Signal transfer function in the symmetrically chopped mode vs reading phase angle.

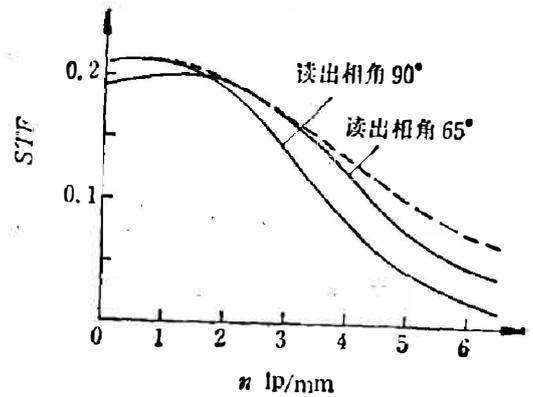


图3 对称斩波模式信号传递函数与空间频率的关系

Fig. 3 Signal transfer function in the symmetrically chopped mode vs spatial frequency.

象机的运行特性。

从图3还可看出,当 $n=0$ 时,STF的数值只有0.2左右,说明对称斩波模式的电流响应率较低。在式(1)中命 $n=0$, $f_0=25\text{ Hz}$,可得 $(I_s/I_{s0})=0.64(1-L)/(1+L)$,可见滞后系数 L 对信号电流影响很大。采用薄靶结构可以显著提高热释电摄像管工作于平移模式的电流响应率^[6]。但由于靶减薄后会使得靶电容增加从而使 L 增大,故薄靶管用于对称斩波模式不能充分体现其优越性。这个矛盾只有采用非对称斩波模式才能较好地解决。

2. 非对称斩波模式的信号传递函数及特性

图4为非对称斩波模式的装置、辐照度波形及信号处理电路方框图。调制器采用圆盘窗口形式。窗口的宽度等于靶直径。斩波频率可取为5 Hz(一个亮场,九个暗场)或10 Hz(一个亮场,四个暗场),前者可获得较大的信号电流。

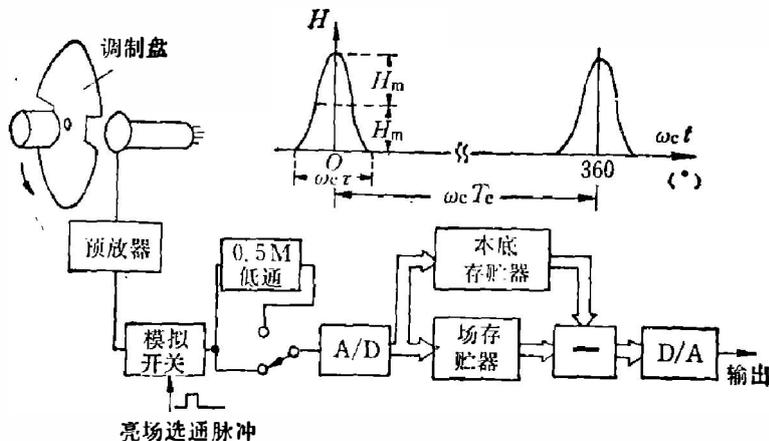


图4 PEV非对称斩波模式装置、辐照度波形及信号处理电路

Fig. 4 Schematic of unsymmetrically chopped mode operation of a PEV, the irradiance waveform and the block diagram of signal processor.

由于热释电摄像管的光电变换特性是线性的,因此分析信号电流时可以使用叠加原理。对于图4的升余弦辐照度,其中第 N 次谐波的振幅可用傅里叶级数求出,表达式如下

$$H_N = \frac{H_m \cdot 2 \sin N\pi \frac{\tau}{T_c}}{N\pi \left[1 - \left(\frac{\tau}{T_c} \right)^2 N^2 \right]}, \quad (2)$$

式中, N 为谐波次数; τ 为余弦脉冲宽度。

可以证明,在 $N \leq \frac{T_c}{\tau}$ 的范围内,各次谐波的初相位均为 $\frac{\pi}{2}$ 。以后的计算中, N 最大只取到 $N = \frac{T_c}{\tau}$,结果已足够准确,故辐照度可用以下近似式表示

$$H \doteq H_0 + \sum_{N=1}^{\frac{T_c}{\tau}} H_N \cos N\omega_c t; \quad (3)$$

式中, H_0 为辐照度的恒定分量,它不产生信号电流。

如果取 $\tau = 2T_v$ (即窗口宽度与靶直径相等),结合式(1)、式(2)及式(3),可得出与辐照度各次谐波对应的信号电流的表达式为

$$\begin{aligned} I_{sN} = I_{s0} & \frac{2 \sin N\pi \frac{2T_v}{T_c}}{N\pi \left[1 - \left(\frac{2T_v}{T_c} \right)^2 N^2 \right]} \left[1 + \left(\frac{k \cdot 2\pi n^2}{N \frac{1}{T_c}} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \\ & \cdot \frac{\sin \pi N \frac{T_v}{T_c}}{\pi N \frac{T_v}{T_c}} (1-L) \left(1 + L^2 - 2L \cos 2\pi N \frac{T_v}{T_c} \right)^{-\frac{1}{2}} \\ & \cdot \exp \left\{ jN \frac{2\pi}{T_c} t - \arctg \frac{N \frac{1}{T_c}}{k \cdot 2\pi n^2} \right. \\ & \quad \left. - \arcsin \left[L \sin \left(2\pi N \frac{T_v}{T_c} \right) \left(1 + L^2 - 2L \cos 2\pi N \frac{T_v}{T_c} \right)^{-\frac{1}{2}} \right] \right. \\ & \quad \left. - \frac{\pi N T_v}{T_c} + \pi \right\}. \quad (4) \end{aligned}$$

式(4)形式虽然复杂,但当选定 $\frac{T_v}{T_c}$,并已知 L 及 k 时,则各次谐波信号电流仅是空间频率 n 的函数,即 $I_{sN}(n)$ 。

对应于任一空间频率 n 的信号电流 $I_s(n)$ 是各次谐波电流的总和,即

$$I_s(n) \doteq \sum_{N=1}^{\frac{T_c}{2T_v}} I_{sN}(n). \quad (5)$$

设 $\frac{T_v}{T_c} = \frac{1}{10}$, $L=0.5$, $k=0.3 \text{ mm}^2/\text{s}$,结合式(4)及式(5),用计算机算出信号传递函数的一组曲线如图5所示。图中10条垂直虚线的位置分别示出第1场至第10场的读出相角,各虚线的长度则表示 $n=0$ 时STF的数值,其中第一场(即亮场)的信号是我们所需要的。图6中用实线画出了第1场、第6场和第9场STF与 n 的关系。

下面对非对称斩波模式的特性进行分析和讨论。

(1) 与对称斩波模式比较,当亮场读出相角选定为 10° 时,信号电流大3倍,空间分辨

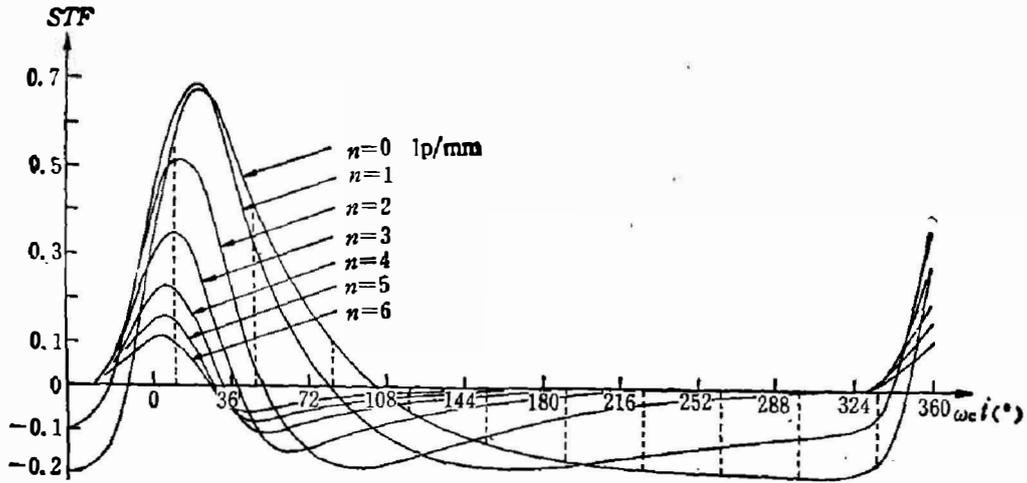


图5 不同空间频率时,非对称斩波模式信号传递函数与读出相角的关系
 Fig. 5 Signal transfer function in the unsymmetrically chopped mode vs reading phase angle for various spatial frequency.

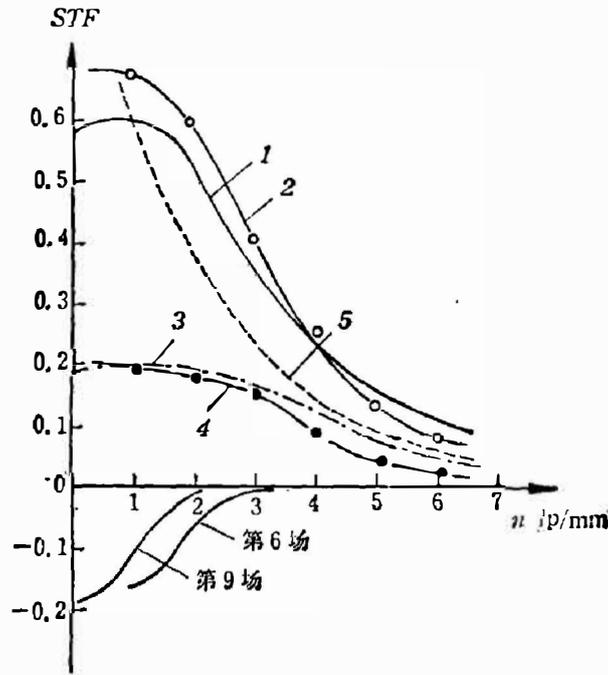


图6 非对称斩波模式信号传递函数与空间频率的关系
 Fig. 6 Signal transfer function in the unsymmetrically chopped mode vs spatial frequency.

1—非对称斩波 $\omega_c t = 10^\circ$; 2—非对称斩波测试值; 3—对称斩波 $\omega_c t = 65^\circ$;
 4—对称斩波测试值; 5—平移

力不降低。与平移模式比较,当 $n=1$ 时,两者 STF 接近相等。当 $n=5 \text{ lp/mm}$ 时,非对称斩波的 STF 比平移模式要大一倍,故空间分辨力较高。

(2) 从图6中画出的第6和第9场的 STF 可以看出,暗场信号电流比亮场小得多,且随空间频率的增加,幅度迅速衰减,因此暗场信号是不能利用的。暗场 STF 低劣是热扩散作用的结果。

(3) 辐照度的恒定分量对产生信号电流不起作用,但它却会使运动目标产生负向残象。

众所周知,热释电摄像机在拍摄固定目标时,如果将目标突然移出视场,这时监视器屏幕上将看到随时间慢慢消失的负象,即负向残象,这是辐照度恒定分量使靶产生温升,而在目标移去后温度下降所产生负极性信号的结果。残象的滞留时间决定于靶的热时间常数。这种现象降低了成象系统的时间分辨力。非对称斩波辐照度的恒定分量比对称斩波小许多倍,因此其负向残象实际上已小到可以忽略不计。

(4) 对称斩波信号电流最大不能超过本底电流。设本底电流为 100 nA , 电流响应率为 $1\text{ nA}/^\circ\text{C}$, 摄像管和预放器噪声电流有效值共约 1.5 nA , 则信噪比最大不能超过 $20\log\frac{100}{1.5} = 36\text{ dB}$ 。实验得知,非对称斩波的亮场信号电流可比本底电流大 4 倍,故信噪比可达 48 dB , 这对具有温度标定的成象系统减小测温误差是很有意义的。

(5) 非对称斩波模式还有一个优点,即改变调制盘窗口的宽度可以改变 STF 曲线的形状。例如,当把窗口宽度取为靶直径的一半时,由于亮场中各象元的积分时间缩短一倍,低空间频率的电流响应率将减小一倍,但这时热扩散的影响减小,故高空间频率的响应率几乎不变。这种工作状态可获得轮廓比较清楚的热图象。如果需要提高热灵敏度,则可把窗口宽度取为靶直径的 2 倍,这样便产生了 2 个亮场信号。在第 1 个亮场期间,摄像管栅极上加上消隐信号,使电荷不被读出,则第 2 个亮场的信号电流将会增大 1 倍。实验表明,这个办法只适用于软管。

三、信号处理电路

近几年来,热释电摄像机已普遍采用数字信号处理技术,以提高性能和扩展功能。例如对称斩波模式摄像机采用数字式象差处理器,可消除本底的不均匀性引起的闪烁,并使信噪比提高 $\sqrt{2}$ 倍。非对称斩波模式因暗场信号不能利用,所以不能使用象差处理器;但可采用如图 4 所示的具有信号存贮和本底补偿功能的信号处理电路。图中,摄像机预放器输出的信号经过亮场选通后送到高速 A/D 变换器, A/D 变换器输出亮场数字信号除送到 D/A 变换器之外,同时还写入场存贮器。暗场期间从场存贮器读出数据,使 D/A 变换器输出为连续视频信号。

场存贮器的容量为 128×128 或 256×256 , 根据对分辨力的要求而定。当成象系统只用于对热象作定性观察时, A/D 变换器、场存贮器可采用 6 bit 的器件。如果要对仪器进行温度标定,则至少要用 7 bit 。

热释电摄像管本底电流的不均匀性可达 25% , 故必须进行本底补偿。办法是把数字化的本底信号先写入本底存贮器,摄像时此存贮器置于读出状态,然后利用减法器减去输出信号中的本底部分。

由于本底信号变化缓慢,故在写入本底信号数据时接入 0.5 MHz 的低通滤波器以限制带宽,并且本底存贮器容量可减小为 $128\times 64\times 6\text{ bit}$, 实际上用一片 $8\text{ K}\times 8\text{ bit}$ 的静态 RAM 就可以了。

四、实验结果

我们非对称斩波、对称斩波及平移模式的性能进行了对比测试。实验时使用国产 SF

2103 型热释电摄像管;物镜光圈数 $F=1$; 预放大器带宽 5 MHz, 等效输入噪声电流有效值为 1.3 nA。

实验结果如下:

1. 以平移模式(热象在靶面平移速度为 3 mm/s)的信号电流为基准, 黑体目标的空间频率 $n=0.5$ lp/mm 时, 三种工作模式信号电流的相对值和噪声等效温差 NETD 如表 1 所示。

表 1 三种工作模式的信号电流及 NETD
Table 1 The Signal Current and NETD of three operating modes

测试项目 \ 工作模式	平 移	对 称 斩 波 $f_c=25(\text{Hz})$	非 对 称 斩 波	
			$f_c=5(\text{Hz})$	$f_c=10(\text{Hz})$
信号电流相对值	1	0.21	0.86	0.75
NETD($^{\circ}\text{C}$)	0.3	1.5	0.35	0.4

2. 非对称斩波和对称斩波 STF 的实测曲线见图 6。它们与理论计算值相比较, 高空间频率时数值偏小。产生误差的因素很多, 其中物镜调制传递函数的影响是不可忽视的。

3. 使用与环境温差为 40°C 的黑体目标, 从图象监视器和波形监视器观察负向残象。结果是: 5 Hz 非对称斩波的残象不易察觉, 而平移和对称斩波(未使用象差处理器)的残象十分明显, 滞留时间约为 8s。

4. 当热象在靶面以 5 mm/s 的速度移动时, 5 Hz 非对称斩波的图象有明显的不连续感。当移动速度小于 3 mm/s 时, 图象基本上是连续的。

综上所述, 可以得出结论: 非对称斩波摄像机的热灵敏度与对称斩波比较提高近 4 倍, 且动态范围大。此外由于负向残象小, 避免了活动图象的沾污现象。因此, 对于运动速度不高或静止目标(这是大多数工业应用的情况), PEV 摄像机采用非对称斩波模式是合适的。

参 考 文 献

- [1] Garn L. E. and Petito F. C., *IEEE Trans. Electron Devices*, **ED-24**(1977), 1221.
- [2] Garn L. E. and Sharp E. J., *IEEE Trans. Parts, Hybrids, Packag.* **PHP-10**(1974), 708.
- [3] Putley E. H., et al., *Ferroelectrics*, **3**(1972), 263.
- [4] Logan R. M. and Mclean T. P., *Infrared Phys.*, **13**(1973), 15.
- [5] 罗正发、朱春才、李家璘, *红外研究*, **2**(1983), 3: 195~203.
- [6] 何叔帽, *红外研究*, **4**(1985), 1: 1~8.

STUDY OF UNSYMMETRICALLY CHOPPED MODE OF A PEV IMAGING SYSTEM

HUANG TIEIXIA

(Department of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology)

ABSTRACT

This paper proposes an unsymmetrically chopped mode operation of a PEV imaging system. In comparison with the standard chopped mode, the advantages of the mode include high current responsivity, large dynamic range and small negative residual image.

The analytic method of signal transfer function is discussed and the circuit of signal processor is briefly explained.