

用多场累积技术改进热释电摄像管 成象系统的性能

黄 铁 侠

(华中工学院无线电系)

摘要——用热释电摄像管构成的热象仪,按斩波调制方式工作时,利用信号的帧间相关性实行多场累积,能显著提高信噪比,从而提高温度分辨率和空间分辨率;降低最小可分辨温度。

本文对多场累积的基本原理进行了讨论,导出了设计公式,提出了一种实施方案,并给出某些实验结果。

一、概 述

现阶段热释电摄像管的灵敏度还不够高,不能满足高质量的夜视和医用等方面的要求。为了提高摄像机的灵敏度,除改进热释电摄像管本身的性能和采用高质量的预放器(前放)之外,可利用各场图象之间的相关性,通过适当的信号处理方法,来提高信噪比。在这方面斩波调制方式较为有利,因为它在摄取固定或移动缓慢的目标时,信号具有很强的帧间相关性,只要把多场信号累积起来,便可显著地改善系统的性能。

实现多场累积有几种可行的方案,最好的办法是用数字处理技术。然而,由于要处理的象元数量大,工作速度高,因此在目前条件下,成本太高,难于推广使用。

利用微处理机也可以实现多场累积,但是由于处理速度低,不能实时显示,在许多情况下不符合使用要求。

目前使用硅靶贮存管实现多场累积是比较合适的。优点是电路结构比较简单,成本只占整机造价的三分之一左右,效果良好。但由于贮存管是电子束器件,本身存在黑斑效应、非线性失真等缺陷,并且累积场数受一定限制,故也有不足之处。

本文讨论采用硅靶贮存管的方案,方框图如图1所示。下面说明各部分的作用。

摄像机的镜头和热释电摄像管之间装有一个由同步电动机驱动的调制盘,用来对入射辐射进行斩波。调制盘近旁装有光电式的相位脉冲发生器,光电管发出的脉冲信号(称为P脉冲)使信号处理部分的各个电子开关和逻辑控制电路受调制盘的相位控制。

预放器输出的信号送到象差处理器^[1,2],用以消除摄像管的黑斑、本底不均匀性和其他

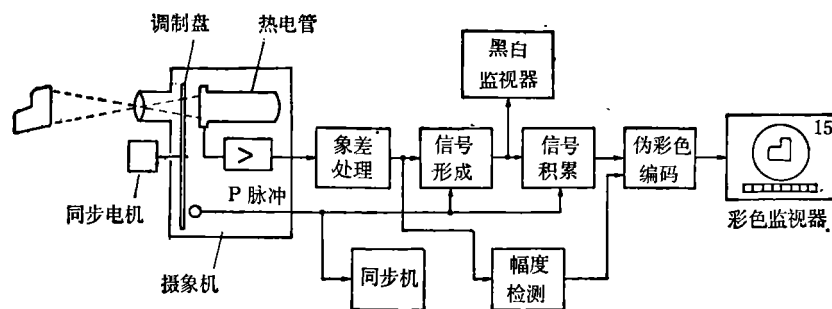


图1 系统方框图

固定噪声的影响。

信号形成器的作用是象差处理器输出的信号进行加工处理，使其波形符合信号累积器的要求。

累积器把输入信号进行多场相加，因而信噪比大为提高，并且彻底消除了闪烁。此外累积器还具有第二次象差处理的作用。

伪彩色编码器把信号按幅度分层量化编码^[3]。输出信号用彩色监视器显示。

视场中任一点的热释电信号幅度由幅度检测电路测出，其结果在监视器屏幕的右上方以数字形式显示。经过黑体校正后，此数字能代表目标的亮度温度^[4]。

二、热释电摄像管运用特性的讨论

为了对斩波方式的信噪比进行计算，必须对热释电摄像管的某些特性作简要的说明和分析。

1. 信号电流和调制传递函数

热释电摄像管输出的信号电流(热释电信号)由下式表示：

$$i_s = i_{sm} \cdot MTF = \Delta T R_{TP} \cdot MTF, \quad (1)$$

式中 MTF 为摄像管的调制传递函数； i_{sm} 为 $MTF=1$ 时的信号电流，这实际上是摄像管工作于平移方式，摄取大目标时的输出电流； R_{TP} 为管子的温度响应率，即灵敏度。若采用电视扫描制式，使用 $F=1$ 的镜头， R_{TP} 的典型数值为 $4 \text{ nA}/^\circ\text{C}$ 。

根据参考文献[5]所导出的公式，可算出当场频为 50 Hz 时平移方式的 MTF_P 及斩波方式的 MTF_C 与空间频率 f 的关系，如图2所示。

从图2可知，在低空间频率时，平移方式的 MTF_P 较大；斩波方式的 MTF_C 随斩波频率 f_c 升高而降低。为了清楚起见，把 $f=0$ 时的 MTF_C 和 f_c 的关系画在图3中。其中小圈表示用国产TGS层流枪管实验的结果。

高空间频率时，由于靶的横向热扩散作用，调制传递函数衰减很快。当斩波频率较低时，情况更为严重。 f_c 高于 12.5 Hz 后，高空间频率的 MTF_C 与平移方式接近。因此最合适的斩波频率应是 12.5 Hz 。 f_c 等于 25 Hz 时，灵敏度下降到平移方式的 $1/4$ 左右，但调制传递函数曲线却比较均匀。此外，提高斩波频率对于不用信号累积器的机器消除闪烁是有利的。

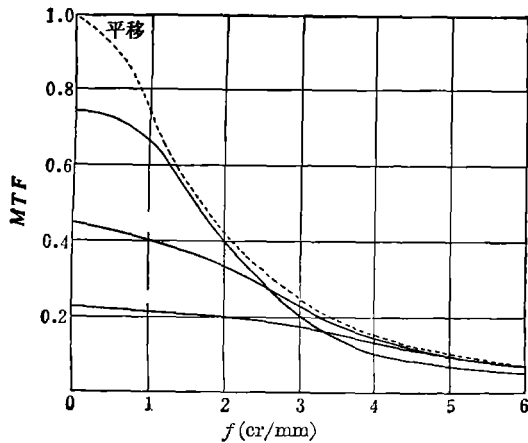


图2 调制传递函数与空间频率的关系

上黑曲线—5Hz; 中黑曲线—12.5Hz; 下黑曲线— $f_c=25\text{Hz}$

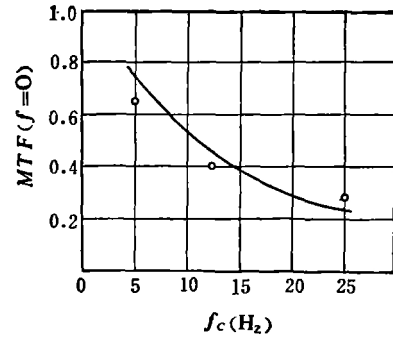


图3 $MTF(f=0)$ 与 f_c 的关系

高空间频率时, MTF 下降影响了摄像机的空间分辨率。为了解决这个问题, 从系统设计方面来说有两个办法: 其一, 采用数字技术对横向热扩散进行二维校正。此法效果最好, 但使用硬件太多, 比较复杂, 在目前条件下不易实现。其二, 采用高频提升方法对图象进行一维轮廓校正。此法比较简单, 但当提升量较大时, 会显著降低信噪比, 这对信噪比本来就不高的热释电摄像机是很不利的。提升量与信噪比之间的矛盾只有采用多场累积技术才能较好地解决。

2. 信号波形和噪声

热释电摄像管的输出信号包括以下各项:

1) 本底电流 i_p 。

2) 热释电信号电流 i_s 。由于 i_s 与靶的温度变化率成正比, 故当调制盘叶片打开时, 靶温升高, i_s 为正值, 称为斩波亮场信号; 叶片遮断时, 靶温降低, i_s 为负值, 称为斩波暗场信号。图4表示当目标为一根垂直热条时, 斩波亮场和斩波暗场中一行信号的波形。

3) 固定噪声电流 i_{FN} 。它包括: 本底电流中的黑斑信号、由于靶材料的缺陷和制造工艺不善产生的疵点。这些噪声不能被人眼积分, 故看起来十分显眼, 严重影响图象质量, 并且给热释电信号的幅度检测带来困难。

4) 随机噪声电流 i_N 。当采用互阻抗放大器, 且带宽为 2MHz 时, 折算到预放大器输入端总噪声电流的有效值约为 0.6 nA ^[6]。由此结合式(1)可算出平移和斩波两种情况下的信噪比, 列于表1。

表1 信噪比的计算值($\Delta T=1^\circ\text{C}$, $R_{FP}=4\text{ nA}/^\circ\text{C}$, $F=1$)

工作方式	平 移	$f_c=5\text{ Hz}$	$f_c=12.5\text{ Hz}$	$f_c=25\text{ Hz}$
信 噪 比				
$\frac{S}{N}=20 \lg \frac{i_{sm}}{i_N}$	16.5 dB	13.6 dB	9 dB	3.7 dB

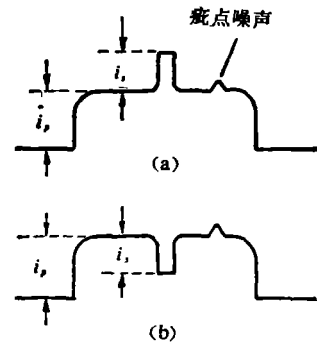


图4 行信号的波形

(a) 斩波亮场 (b) 斩波暗场

图象质量与信噪比的大致关系见表2。结合表1和表2可以看出, 平移工作时质量较好的图象, 在改用斩波调制后, 信噪比就降低到不能容忍的了。

表2 信噪比与图象质量的关系

信 噪 比 (dB)	图 象 质 量
0—6	辨 认 阈 值
12	差
16	较 好
20	良 好
30 以上	优

三、用多场累积法提高信噪比和降低最小可分辨温度

对于图象信号, 按电压计算, 信噪比的定义是

$$\frac{S}{N} = 20 \lg \frac{e_s}{e_N}, \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

式中 e_s 是热释电信号电压的峰-峰值。 e_N 是随机噪声电压的有效值。

由于经过信号形成电路之后, 亮场和暗场热释电信号的极性相同(见后文), 对于静止目标, 各场信号之间的相关系数为1, 因此把 n 场信号相加, 结果是

$$\sum_{i=1}^n e_{st} = n e_s。$$

随机噪声电压应按功率关系相加。 n 个电压按功率关系相加的一般表达式为

$$e^2 = \sum_{i=1}^n e_i^2 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n c_{ij} e_i e_j,$$

式中 c_{ij} 为相关系数, 其值在 ± 1 之间。考虑到各场的随机噪声实际上是不相关的, 其相关系数为零, 故 n 场噪声电压相加后结果为

$$\left[\sum_{i=1}^n e_{Nt} \right]^2 = \sum_{i=1}^n e_N^2 = n e_N^2。$$

于是经过 n 场累积之后, 输出电压的信噪比为

$$\frac{S}{N} = 20 \lg \frac{\left[\sum_{i=1}^n e_{st} \right]}{\left[\sum_{i=1}^n e_{Nt} \right]} = 20 \lg \sqrt{n} \frac{e_s}{e_N} = 20 \lg \sqrt{n} + 20 \lg \frac{e_s}{e_N} \quad (\text{dB}), \quad (3)$$

式中右边的第二项是输入信号原有的信噪比, 故第一项就是信噪比的增量。表3列出了信噪比增量与累积场数的关系。

表3 信噪比增量与累积场数的关系

累积场数 n	2	10	50	100	200	300	1000
信噪比增量 (dB)	3	10	17	20	23	25	30

从表3可知, 用多场累积法提高信噪比效果显著。即使原来图象的信噪比很低, 只要累积一百场以上, 就能获得质量较高的图象。

从理论上说, 如果不计较累积时间的话, 信噪比的提高似无限制。实际上, 当使用贮存

管作累积器时, n 一般不超过二、三百场。

图 5 为一组实验结果照片。实验时, 目标为加有 10 V 左右电压的严重氧化的电烙铁, 其表面与背景的温差约 2°C 。

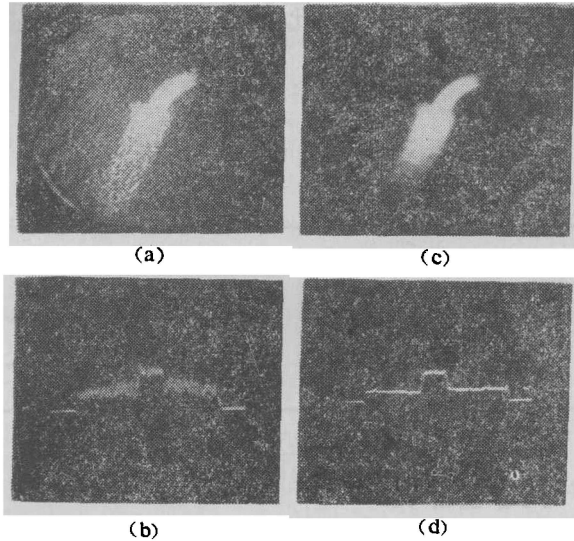


图 5 用多场累积法获得的照片

(a) 累积两场的热象 (b) 从选行示波器拍摄的此热象一行视频信号的波形 (c)、(d) 累积 100 场时的情况

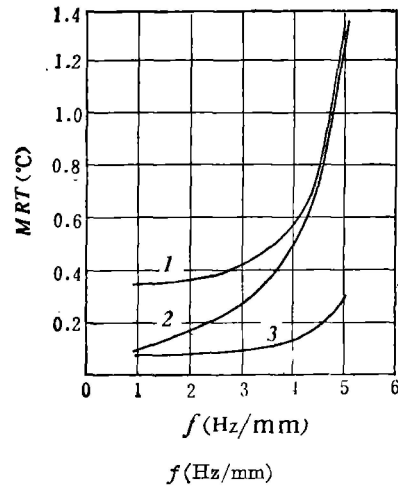


图 6 MRT 曲线

1— MRT_p ; 2— MRT_o , $f_o=25\text{ Hz}$;
3— MRT_n , $f_o=25\text{ Hz}$, $n=200$ 场

现在讨论多场累积法对降低最小可分辨温度 (MRT) 的作用。图 6 中曲线 1 表示某种热释电摄像管在平移方式工作时 MRT_p 与空间频率 f 的关系。 f 增加时 MRT_p 迅速增大是热释电摄像管的一个严重缺点。

斩波调制时的 MRT_o 可根据图 6 的曲线 1 及图 2 的 MTF 曲线, 按下面的关系式换算得出:

$$MRT_o = MRT_p \cdot \frac{MTF_p}{MTF_o} \quad (4)$$

图 6 中, 曲线 2 是 $f_o=25\text{ Hz}$ 时换算得出的 MRT_o 。与平移方式比较, 在低空间频率时最小可分辨温度显著增大了。

为了便于导出多场累积时 MRT_n 的计算公式, 我们认为累积器对 MTF 无影响。这是符合实际的, 因为贮存管的分辨率比目前热释电摄像管的空间分辨率要高得多, 在 6 Hz/mm 的范围内, 前者的 MTF 可认为不变。

由于随机噪声经过贮存后转变为固定噪声, 不能为人眼所积分, 但 MRT 是一个考虑人眼积分作用在内的主观评价参量, 因此在计算累积后的 MRT_n 时, 应该扣除相当于人眼积分所获得的信噪比增量。

设人眼的积分时间是 0.2 s , 即相当于累积 10 场, 对应的信噪比增量是 10 dB , 因此多场累积净得的信噪比增量为 $20\lg\sqrt{n} - 10$ 。

由于 MRT 是在信噪比为一定的条件下得出的, 故信噪比提高了多少倍, MRT 就会相应地降低多少倍, 于是 MRT_n 与 MRT_o 的关系为

$$20 \lg \frac{MRT_c}{MRT_n} = 20 \lg \sqrt{n} - 10,$$

故有

$$MRT_n = MRT_c \times 10^{-(\lg \sqrt{n} - 0.5)}. \quad (5)$$

图 6 中, 曲线 3 表示 $f_c = 25 \text{ Hz}$, $n = 200$ 场时的 MRT_n 。由此可见, 多场累积能够显著地降低最小可分辨温度。

从式(5)可知, 当 $n \leq 10$ 时, 采用累积法就无实际意义。

表 4 为用层流枪管所测得的一组实验数据。

表 4 三种工作方式下 MRT 的实测值

f (Hz/mm)	MRT ($^{\circ}\text{C}$)		
	平 移	$f_c = 25 \text{ Hz}$	$f_c = 25 \text{ Hz}, n = 100$ 场
1	0.1	0.4	0.2
3	0.5	1.3	0.4

四、信号处理部分

图 7 为信号处理部分的方框图, 其中包括象差处理器、信号形成电路和累积器。图 8 是电路中有关各点的信号波形图。

1. 象差处理器^[1,2]

可使用的象差处理器有多种形式, 其作用是一样的, 即把斩波亮场信号和暗场信号作减

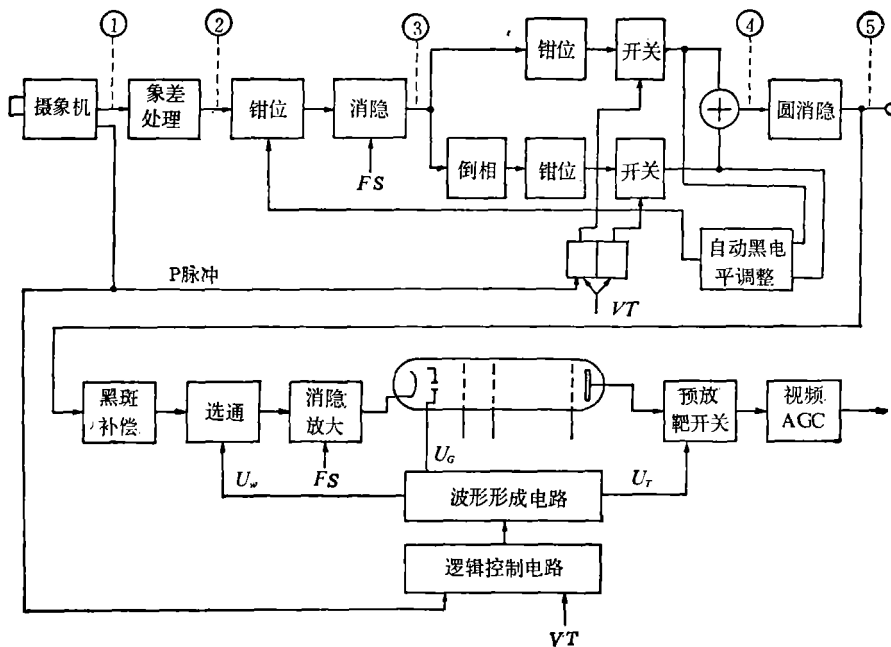


图 7 信号处理部分的电路方框图

VT —场同步 F_S —复合消隐

法运算。从象差处理器输出的信号,要重新加入黑电平,以便形成单极性的视频信号。

2. 信号形成电路

预放器和象差处理器输出的信号波形分别如图 8 ①及 ②所示。由于斩波器叶片和背景的热辐射不同,故实际上斩波亮场和暗场的本底电平是不相同的,从而经象差处理后黑电平将出现差值 ΔS 。为了使暗场信号倒相后黑电平能和亮场一致,信号经钳位后要加入复合消隐脉冲,其幅度应调到比图中亮场黑电平高 $\frac{1}{2} \Delta S$ 。这一过程是由自动黑电平调整电路输出的直流电压控制钳位电平来实现的。

利用倒相器和电子开关把暗场信号倒相,然后和亮场信号重新相加,合成后的波形如图 8 ④所示。

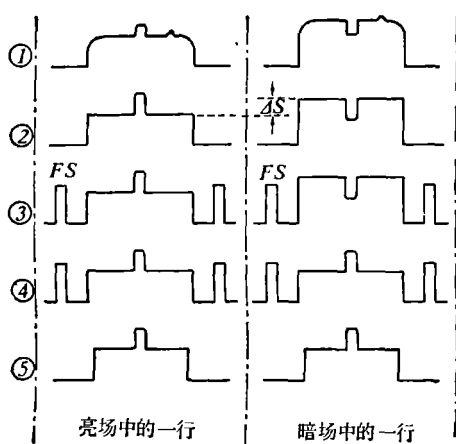


图 8 电路各点的信号波形

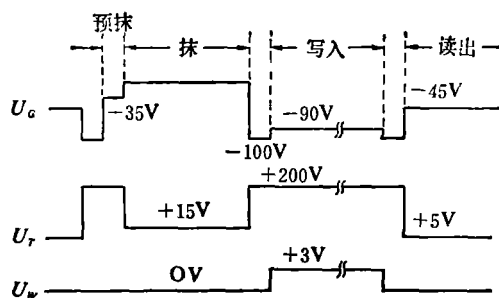


图 9 贮存管电路的电压波形

电子开关的动作由频率与斩波频率相同的方波电压来控制,这电压由触发器产生。摄像机输出的 P 脉冲控制着触发器的起始状态。

考虑到热释电摄像管靶面外圆结构不规则,故采用圆消隐电路消去靶面有效面积以外的各种寄生信号。

信号经过上述处理后,亮场和暗场波形基本一致,可送至黑白监视器进行显示。但是由于模拟式的象差处理器往往不能彻底消除热释电摄像管固定噪声的影响,故图象还会有轻度的闪烁。

3. 信号累积器

信号累积器采用硅靶贮存管,工作时具有预抹、抹、写入、读出四种状态^[2]。这四种状态是用改变栅压 U_G 、靶压 U_T 及送到阴极的信号电压来实现的。

图 9 为 U_G 、 U_T 和选通电压 U_W 的波形。图中预抹时间为 2 场,抹时间为 12 场,写入时间为 100 场或 200 场,读出时间一般为数分钟。这三种电压是由逻辑电路产生的控制脉冲,经过波形形成电路产生的。逻辑电路还能使上述四个过程自动循环。

为了要写入 100 场以上的信号,必须减小贮存管在写入时的束流,为此要加大写入时栅极负电压的数值。

图 8 中如果不使用象差处理器,则信号形成电路和累积器本身也具有一定的象差处理

作用,因为在这种情况下,暗场信号倒相之后,其固定噪声与亮场的极性相反,故在累积器中相加时,它们就互相抵消了。然而,由于贮存管的非线性特性,这种抵消作用是不够充分的。试验表明,它只能把热释电摄像管的固定噪声的影响减小到20%左右,而不能根除。

五、结 语

本文所论述的多场累积信号处理技术,可以显著提高在斩波方式工作时热释电摄像管成象系统的温度分辨率和空间分辨率。但是由于采用模拟贮存器件,系统的性能受到一定的影响。

致谢——实验过程中,曾得到卢益民、谈新权等同志的协助,特此致谢。

参 考 文 献

- [1] Helmick C. and Woodworth W., *Ferroelectrics*, **10**(1976), 390~393.
- [2] 黄铁侠、谈新权,华中工学院学报, (1980), **3**.
- [3] 蔡丹宇、顾德伟,华中工学院学报(CGD及PEV专辑), (1980).
- [4] 卢益民、吴康寅,华中工学院学报, (1981), **1**.
- [5] Garn L. E. and Petito F. C., *IEEE Trans. Electron Devices*, **ED-24** (1977), 1221~1227.
- [6] Singer B., *Advances in Image Pick-up and Display* (Ed.: B. Kazan) Vol. 3, New York: Academic Press, 1977, 1~82.

IMPROVING PERFORMANCE OF THE PYROELECTRIC VIDICON IMAGING SYSTEM BY MULTIPLE-FIELD CUMULATION PROCESSING

HUANG TIEXIA

(Department of Radio, Huazhong Institute of Technology)

ABSTRACT

On the basis of the interframe correlativity in a thermal imaging system, the signal-to-noise ratio is raised greatly by multiple-field cumulation processing, using a pyroelectric vidicon in chopping mode. Both temperature and space resolution are improved and minimum resolvable temperature is lowered in the system.

The principle of multiple-field cumulation is described and a chosen project is presented in the paper. Some test results are also given.