

新型的红外成象系统

杨 应 槐

一、引 言

红外技术发展史表明,一种高性能的新探测器的诞生,必将导致新型系统的出现。1981年6月,英国Mullard公司D. Charton等人在西德慕尼黑第五届国际激光光电学学术会上,宣读了题为:“在元件内处理信号(Signal Processing in the Element)——高性能热成象系统用红外探测器技术的一个突破”的论文之后^[1],这种简称为SPRITE的红外探测器就载入红外探测器史册。于是,用SPRITE探测器制作的红外成象系统的进展,成为人们极为关注的一种新的技术动向。恰巧,最早使用SPRITE探测器的红外成象系统也是由英国Barr & Strond和Maconi Arionics等公司首先研制成功的,这大概是历史发展的必然吧。

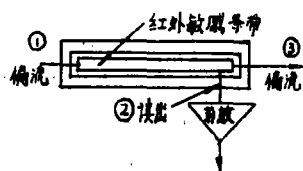
本文就笔者曾看到过的用SPRITE探测器制作的两种类型的红外成象系统:IR 18和英国二类通用组件的系统,简称为UKTICM—II(United Kingdom Thermal Imaging System—II)。凭借本人看过这种成象系统之后的一点印象,结合极为有限的资料对系统的原理、特点作一简单的介绍,依据使用普通分立面阵探测器的设计概念,对系统的设计方法进行一些推导和验算。最后,就SPRITE探测器制作的系统应用和发展前景谈谈个人的一些肤浅的看法。

二、问题的提出

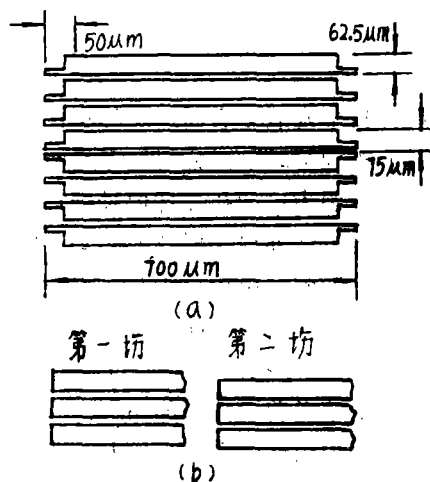
一个红外成象系统,在一定的技术发展阶段当系统其他各部分组件所涉及的加工工艺或各使用元件取值都接近于极限值运用的情况下,要进一步提高系统的性能,唯一可采取的措施就是在工艺条件许可的前提下适当地增加使用的探测器数目。然而,这是受限制的,因为使用的探测器数目增加时,除了本身制作难度加大,暂且不提之外,从使用角度考虑,必然地增加了系统的复杂程度。这样,往往可能因某种工艺没有解决或其他原因,即使增加了使用探测器的数目,而实际上达不到所预期的效果。其原因是多方面的,直观看来,可能有这几方面的原因。系统使用的探测器数目增加,探测器向外引线数目就相应地增多,势必就增加了热耗损,为了保证探测器维持在最佳工作状态系统的制冷设备就相应地增大。由于探测器数目增加,必须有与探测器数目相同的前置放大器配用,这样,除加大所占用空间之外,仅就这一点在某些场合下也是不允许的。更为重要的是,大量的引出线就可能因布线不合理而引起附加干扰;而且各前置放大器与探测器之间的噪声匹配欠佳使系统性能受到的影响程度也是随着探测器数目增加而增大的。另外,探测器数目增多使系统所需的信息处理电路亦

趋复杂。以上列举的种种都会成为利用增加使用探测器数目来进一步改善系统性能的不利因素。能否有一种探测器可以克服上述所提到的各不足之处,同时又具有相当数量多元线列或阵列探测器性能的新型探测器呢?刚问世不久的SPRITE探测器则是属于这类新型探测器的一种。SPRITE探测器是一种由若干条状碲镉汞(MCT)n型光电导体组成的探测器,目前提供使用的8条的SPRITE探测器较为普遍,这种探测器利用了象扫描速度等于非平衡载流子双极漂移速度这一物理概念,使得它不仅能完成常规的多元阵列探测器的功能,而且还能在其内部完成对已探测的信号延时积分和采样。实际上,它已具有一简单的单片红外CCD的功能。它的对外引线如同大家所熟悉的电子放大器一样,只有三根引线——偏压,地线和信号输出。

SPRITE探测器示意图如图一所示。在图二表明了SPRITE探测器阵列结构。从图中我们清楚地看到与普通分立的探测器阵列不同,它是由条状灵敏面构成的,每条的长度可相当于若干分立的探测器数目,而并行的条数就相当并接的探测器数目,如图二(a)所示,每一 条敏



图一 SPRITE探测器



图二 (a)SPRITE探测器结构 (b)场过扫描示意

感面扣除两端读出区各 $50\mu\text{m}$,有效敏感面的长度是 $600\mu\text{m}$,少数载流子(简称少子)的扩散长度 Q_h ,扩散限制的分辨尺寸约为 $2Q_h$,对于MCT材料的探测器, $Q_h=25\mu\text{m}$,那么,每条相当于串接探测器数目为:

$$N_s = \frac{L}{2Q_h} = \frac{600}{50} = 12$$

8条相当于并接的探测器数目, $N_p=8$ 。这样图二所示的SPRITE探测器就是相当于工作在 $(8-14)\mu\text{m}$ 范围的分立的光导型探测器阵列数目为:

$$N_s \cdot N_p = 12 \times 8 = 96$$

不只是数量上相当,而且相同数量而言,如果同是背景限的条件,并且扫描速度很高时,SPRITE探测器具有高于分立阵列探测器的性能,在这样情况下,SPRITE探测器的探测度表达式可写为^[2]:

$$D_s^* = (2\eta)^{\frac{1}{2}} D_{\text{Blip}}^* (s\tau)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

这里: η ——量子效率

D_{Blip}^* ——某种材料探测器背景限的极限值

s ——取象速率

τ ——少子的寿命

在(1)式中,只要 $(s\tau)$ 之乘积大于1,SPRITE探测器就得到高于相同数量分立探测器阵列的性能。正因为这种原因,通常称图二所示的SPRITE探测器相当于100元分立探测器阵列的性能。

综上所述,SPRITE探测器无论是外形结构,还是从可获得的性能来说,用它来制作红外成像系统是比较理想的器件。因此,这样的探测器业经问世,很快地就在各种系统上得到成功的应用。而英国的IR18和UKTICM—Ⅰ是这类系统的典型代表。下面我们将有选择地介绍这两种系统有关参数、性能指标和设计方法。

三、新型的红外成像系统

用SPRITE探测器制作的系统不同于现有的各种类型的红外成像系统,故我们把它称为一种新型的红外成像系统。迄今为止,这种系统为数不多,就世界范围来说也是屈指可数的。就我们了解,作为成熟技术可向外转让的有英国Barr & Strond公司的IR18,也是这个国家的Rank和Marconi Avionics两公司生产的英国二类通用组件的红外成像系统,据有关方面透露在1983年1月正式提供三军使用。这两种系统性能比较接近,但各有特点,详见表1所列。

表 1

参 数 \ 系 统	IR18	UKTICM-Ⅰ
视 场	$38^{\circ} \times 25.5^{\circ}$	$60^{\circ} \times 40^{\circ}$
分 辨 率	1.73mrad	2.73mrad
MRTD	$0.1 \sim 0.35^{\circ}\text{C}$ (在0.289周/mrad)	0.1°C (在0.2周/mrad)
探 测 器	8条SPIRTE (使用4条)	8条SPRITE
波 段	$(8-13)\mu\text{m}$	$(8-13)\mu\text{m}$
视频输出	CCIR兼容	CCIR兼容
显 示	625/525 线/帧	625/525 线/帧
场 频	50/60 周	50/60 周
帧 频	25/30 周	25/30 周
功 耗	32 瓦	49 瓦
重 量	7.4 公斤	8 公斤

一、特点

1. 系统的取象速率必须等于少子的迁移速率

SPRITE探测器是用高纯度的n型MCT材料制成的光导型探测器。当红外辐射投入到它上面时,由于受到光子的激发使其导电率发生变化,为了在沿扫描方向上及时地取出相应于每个象元所产生的视频信号,就必须使外部的取象速率和少子在给定电场下的迁移率相等。因而,这种系统的行扫描电机的每分钟转速高达万转以上。这里从UKTICM—Ⅰ系统提供的

数据, 对系统的行扫描电机转速作一推算。

该系统使用Mullard公司生产的8条SPIRTE探测器, 从探测器使用说明书可知^[3], 在 $f2.5$, 电场强度 30Vcm^{-1} 和取象速率为 1.8×10^6 象元/秒的条件下, 该探测器可获得最佳性能。以上各参数之间的关系于图三表明。

已知每秒扫描的象元数, 我们便可求出在每个象元上的驻留时间:

$$\tau_d = \frac{1}{1.8 \times 10^6} = 0.6\mu\text{s}$$

系统驻留时间 τ_d 与各参数之间的关系是:

$$\tau_d = \frac{\omega \eta_p \eta_{sc}}{\Omega F_R \eta_{ovsc}} \quad (2)$$

式中: Ω ——总的视场角度

ω ——在 x 和 y 方向上两瞬时视场角度之乘积

F_R ——帧频

n_p ——并接探测器数目

η_{sc} ——总的扫描效率 $\eta_{sc} = \eta_v \cdot \eta_h$

η_v, η_h ——分别为垂直和水平方向上的扫描效率

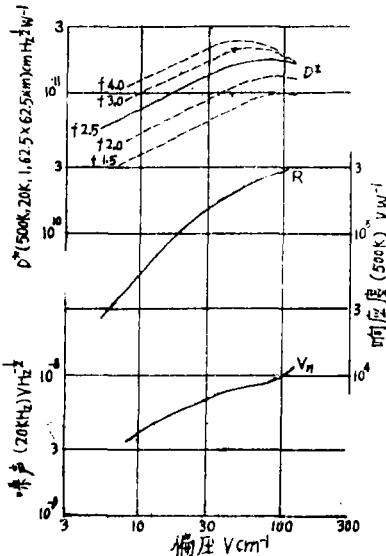
η_{ovsc} ——过扫描比

有关 η_{sc} 和 η_{ovsc} 量的取法下面还有说明, 这里分别取二值为0.41和0.66, 结合表1给出的数据, 代入式(2)中, 经计算得:

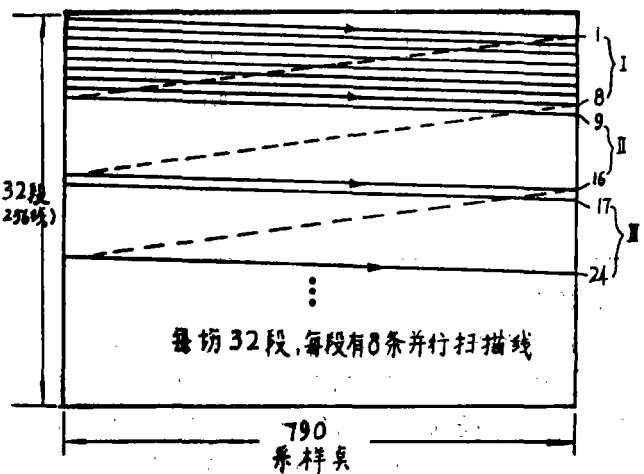
$$\tau_d = 0.8\mu\text{s}$$

从计算的结果看, UKTICM—II系统中各参数的选择符合该探测器最佳性能所需满足的条件。因为系统是与电视兼容的, 我们便可按下式求出行扫描电机的转速 n 。

$$\frac{n_p k n}{F_R} = N_l \quad (3)$$



图三 SPIRTE探测器性能与偏压、视场角度的关系



图四 扫描图案

式中, k ——反射扫描镜的面数 $k = 6$

N_t ——每帧的扫描线数 $N_t = 625$ 线/帧

$n_p = 8$ 则求出:

$$n = \frac{N_t F_R}{n_p k} = \frac{625 \times 25}{8 \times 6} = 325.52 (\text{转/秒})$$

即电机的转速为19,531转/分。(Marconi Avionics公司给出UKTICM—Ⅱ系统的行扫描电机速度是19,500转/分)^[4]说明我们推算的结果与系统实际使用的值是吻合的。

由此可见,高速是这样系统使用的必要前提,欲使行扫描电机的转速降低,可能采取的措施就是适当地增加并接的条数。从目前情况推测,将来SPRITE探测器的进一步发展,并行的条数将进一步地增多,以达到更多数目探测器的水平。因为每条长度的增加是受信号叠加效果的限制,超过某个极限值是会造成弊多于利的,一般的分立探测器串接数不能大于18个探测器,由此类推,每条长度的增加是非常有限的。

2. 这两种系统都是组件化的

以UKTICM—Ⅱ系统为例,整个系统分为:扫描器组件,它包括探测器,行和帧驱动马达电路,前置放大器,缓冲器,电荷耦合带储存器,增益控制和箝位电路,行电机稳速电路,红外波形发生器和电视波形发生器等组件构成。另外系统配用微型焦耳汤姆逊效应制冷器,气源是由小型高压气瓶供气。

3. 扫描图案

图四表明UKTICM—Ⅱ系统的扫描图案。

因系统用8条SPRITE探测器,所以每扫描一次有8条并行扫描线,从图二(b)和表1可知,系统为2:1隔行扫描,每场扫描线数是 $625/2 = 312$ 线,每场分 $312/8 = 39$ 段扫完。电视图案的纵横比一般的为4:3,当在俯仰方向上扫描625线时,在水平方向上应该有833个采样点,考虑回扫的损失,故在这个方向上有790个采样点。水平方向的扫描效率,在视场为 60° 时,

$$\eta_h = \frac{60}{2 \times 60} = 0.5 = 50\%$$

从图四中可求出在俯仰方向上的扫描效率为:

$$\eta_v = \frac{32}{39} = 0.82 = 82\%$$

系统总的扫描效率:

$$\eta_{SC} = \eta_h \cdot \eta_v = 0.5 \times 0.82 = 0.41$$

场与场之间的过扫比(overscan ratio),以符号 η_{ovsc} 表示,其定义是探测器高度与两相邻扫描线之间距离之比^[6]。它的数学表达式为:

$$\eta_{ovsc} = \frac{\Delta Y}{Y_t} \quad (4)$$

式中, ΔY ——探测器高度

Y_t ——两相邻扫描线之间的间隔

从图二(b)可知,两场重叠之后交错部分为 $37.5\mu\text{m}$,故探测器高度 $\Delta Y = (62.5 - 37.5)\mu\text{m}$,

$$Y_i = 37.5 \mu m,$$

所以,

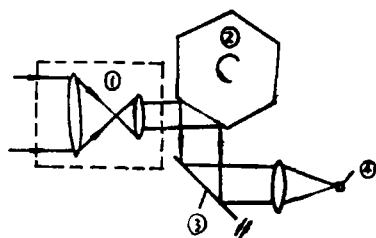
$$\eta_{osc} = \frac{Y}{Y_i} = \frac{62.5 - 37.5}{37.5} = 0.66$$

系统空间分辨率为:

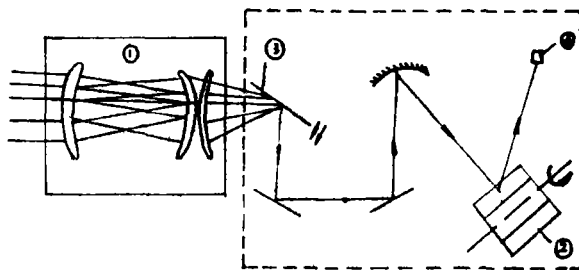
$$\alpha = \frac{62.5 \mu m}{27.5 mm} = 2.72 (mrad) (60^\circ \times 40^\circ \text{视场})$$

4. 使用SPRITE探测器的红外成像系统既可用平行光束, 也可用会聚光束扫描

通常, 一个分立阵列探测器的红外成像系统几乎都是采用图五所示的平行光束扫描。这是因为在阵列中含有串接探测器, 串接探测器需要将各探测器不同时刻, 扫描同一象元所得到的信号, 通过一定的延时后相加。采用平行光束扫描可减小不同扫描角而引起的延时误差, 进而就能实现经历串接行列中各探测器的扫描率相同, 从而可达到准确的延时值, 以便获得最佳信号相加的效果。如果用会聚光束扫描使行列中各探测器经历的扫描速率有着很大差异, 就不能得到所希望的信号相加的效果。所以, 根据这一理由, 凡是用阵列探测器的红外成像系统其光学部分大多是采用平行光束扫描。SPRITE探测器用于红外成像系统, 由于其特殊的结构形式和功能, 从实际系统来看, 不仅可用平行光束扫描, 也可用会聚光束进行扫描。目前仅有的两个系统, UKTICM-Ⅱ是采用图五所示的扫描方式, IR18是采用图六所示的会聚光束扫描。两图中相同的功能的部件, 我们用同样的数字表明, 如②都表示行扫描镜鼓, 其他数字类同。这里还需要说明的是, 在图六中, 虚线部分的光路是根据我有关人员多次同Barr & Strond公司人员接触中了解的情况绘制而成的, 不是该公司书面提供的, 主要方面是对的, 细节可能会有些出入。但是该系统是采用会聚光束扫描这点是无疑的。现在我们探讨使用这样的探测器为什么可以采用会聚光束扫描呢, 我们的推测可能是这样:



图五 平行光束扫描



图六 IR18扫描系统

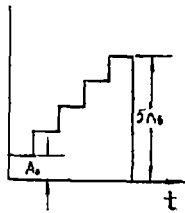
SPRITE探测器从它具有的性能来说相当于一个多元阵列探测器, 而使用方法和结构形式普通分立阵列探测器有着很大的差别, 每一条形灵敏面可视为一个探测器, 那么, n 条就等于 n 个并接探测器, 在每一扫描时间等于光子寿命时的扫描瞬间相当于 n 个并扫探测器的情况, 并扫通常可以用会聚光束扫描的。所以, n 条并行的SPRITE探测器用于系统可用会聚光束进行扫描。至于这样的扫描方式是否好, 我们下面还要在有关部分作进一步评述。除此之外, 对这样的扫描系统还有几处须加说明的。图五和图六中之①都称为望远系统, 其实图六中的①不是望远镜系统, 而是一个会聚物镜, 这里强调指出, 在产品说明书中也明明白白地

标有望远镜字样。据我们的分析,所以用“望远镜”这个术语,也许是指这部分光学系统就其作用而言,相当于一般红外成象系统中称之为望远镜的那部分的作用。再一个就是,这两个图中,帧、行扫描器的位置是不同的,图六中先帧扫后行扫,这可以说是会聚光束扫描的一个特点,如大家所熟悉的AGA热成象系统就是如此。因为这样使整个系统结构紧凑,先帧扫,可以将帧扫描器置于会聚光束之中,不一定在中间像面上,扫描器尺寸大一点也无关紧要,因为帧速是很低的。

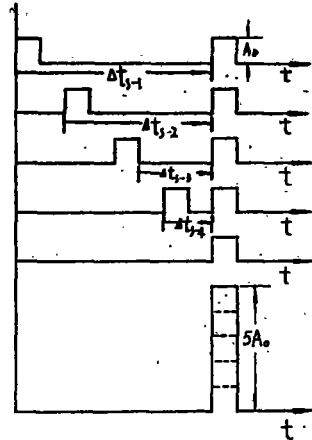
二、性能高和结构紧凑

1. 性能高

从式(1)中可直接看出SPRITE探测器这种应用机理就有可能获得高于分立阵列探测器的性能。现在要说明的是,在SPRITE探测器的每个条形敏感面,虽然以少子极限长度来分可相当于若干个分立线列探测器的串接,可是就其性能而言高于相同数量分立探测器的串接。这里有两个方面的原因,其一,SPRITE探测器获得串扫信号相加是通过其内部电荷累积来实现的,没有外接延迟元件对信号的影响。而普通分立线列探测器串扫获得的信号相加是由外部延迟元件来完成的,延迟元件信号成份总是有损失的,这两者信号相加过程分别由图七和图八表明。在图八中,第*i*个探测器信号的延时值为:



图七 SPRITE探测器的信号累积



图八 分立线列探测器串扫的信号相加

$$\Delta t_{s-i} = (n-i) \left(1 + \frac{\Delta \alpha}{\alpha}\right) \tau_d \quad (5)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, (n-1)$$

式中, $\Delta \alpha$ ——两相邻探测器之间隔所对应的空间张角

α ——水平方向上的瞬时视场

从(5)式可看出,SPRITE探测器每条敏感面,实际上是间隔等于零的若干个探测器串接,这就消除因延时误差而造成信号相加的损失。其二,SPRITE探测器只用一个前置放大器,由于信号是先累积后读出,所以,加入前置放大器的信号比单个探测器输出信号高*N*倍,*N*为每条形敏感面相当于串接的探测器数,从而可以忽略前置放大器噪声对探测器性能的影响。普通分立探测器线列,每个探测器都必须配接一个前置放大器。这样,就必然存在前置放大器噪声对探测器性能影响的问题。噪声系数就是表征一个前置放大器噪声对探测器性能影响程度。(6)式就是说明这种关系^[6]:

$$N_F = 10 \lg \left(1 + \frac{V_{NA}}{V_{Nd}} \right) \quad (6)$$

式中, V_{NA} ——前置放大器等效输入噪声

V_{Nd} ——探测器输出噪声

从(6)式可知, 只有当 $V_{NA} = 0$ 或 $V_{Nd} = \infty$ 时, $N_F = 1$ 也就是唯有在上述两种情况中的一种, 探测器性能就没有损失, 实际上, 这两种情况都是不可能的。

2. 结构紧凑

目前提供使用的, 响应于 $(8-14)\mu\text{m}$, 大约相等于100元背景限性能的SPRITE探测器, 但其体积远小于100元分立探测器阵列, 这样, 用这种探测器制作的系统结构非常紧凑, 又由于电子线路得到了简化, 从而使系统性能稳定可靠, 并且降低成本, 这些都是使用SPRITE探测器的红外成像系统所特有的长处。

三、IR18和UKTICM-Ⅱ的比较

SPRITE 探测器是一种新型的红外探测器, 对于它的使用我们还是陌生的, 为了更好地掌握这样探测器用于系统的设计方法, 我们将目前已公布的两种系统——IR18和UKTICM-Ⅱ进行比较。

1. UKTICM-Ⅱ系统的空间分辨率高于IR18

从表1提供的两系统的参数可知, IR18在 $38^\circ \times 25.5^\circ$ 视场角可具有的空间分辨率为 1.73mrad , UKTICM-Ⅱ系统在 $60^\circ \times 40^\circ$ 视场角的情况下, 空间分辨率是 2.73mrad , 为了便于比较, 应求出在相同视场角的两个系统的空间分辨率。因为在一个系统中, 总的视场角与总的瞬时视场角之比值是一个常数, 即:

$$\frac{\Omega}{\omega} = C \quad (7)$$

设UKTICM-Ⅱ在视场 $38^\circ \times 25.5^\circ$ 时空间分辨率为 ω' , 由(7)式则有:

$$\omega' = \frac{38 \times 25.5}{60 \times 40} \times 2.73 = 1.102 \text{ (mrad)}$$

$1.102\text{mrad} < 1.73\text{mrad}$, 所以, UKTICM-Ⅱ系统的空间分辨率高于IR18。

2. UKTICM-Ⅱ系统的热灵敏度也高于IR18

(1) 我们都观看过这两种系统所显示的热图, 给我们留下的印象是UKTICM-Ⅱ的热图比IR18清晰。

(2) IR18是将8条SPRITE探测器当4条使用, 而两系统取象速率又相同, 从理论上分析, IR18系统的热灵敏度劣于UKTICM-Ⅱ是必然的。

(3) 前面已经指出, IR18是用会聚光束扫描的, 不同扫描角变化引起散焦现象而使系统象质恶化较为严重。

综上所述, UKTICM-Ⅱ系统性能优于IR18。

3. UKTICM-Ⅱ的体积略大于IR18

在表1中列出的两系统的重量表明, UKTICM-Ⅱ比IR18稍重一点。这与我们参观这两系统之后的印象是一致的。我们分析了UKTICM-Ⅱ体积之所以要大一点, 是因为这两个系统都是采用同一规格的探测器, 那么, UKTICM-Ⅱ系统提高空间分辨率唯一采取的办法就是增加光学系统的有效焦距, UKTICM-Ⅱ系统的空间分辨率高于IR18, 所以, UKTICM-Ⅱ的体积就略大于IR18。

4. UKTICM-Ⅱ系统电机噪声大于IR18

IR18系统的探测器并接的条形敏感面只有4条,它与UKTICM-Ⅱ的取象速率相同,因而,IR18系统行扫描电机的转速就比较高,经了解是选用空气轴承电机。UKTICM-Ⅱ是使用球形轴承电机。因此,UKTICM-Ⅱ系统电机运转引起的噪声较大。但是,从系统降低成本和使用方便考虑,力戒选用空气轴承电机。实际上,在我们参观了UKTICM-Ⅱ样机之后,又看了改进后的第二代产品,两者比较之后,觉得系统的电机噪声有了明显的改善。特别指出的是,在扫描电机使用上值得我们注意,合金铝制成的反射扫描镜鼓就是电机转子,这种外转子结构的电机,据说是非常适合用于高速扫描系统。

四、系统的评价和应用前景

一、SPRITE探测器制作的红外成像系统水平

从目前所得到的SPRITE探测器制作的红外成像系统性能来看,其水平相当于美国的第一代红外前视系统的性能。美国在七十年代初就宣称红外前视系统可与普通电视相兼容,而其象质能与可见光图象相媲美。十年之后,我们见到的8条SPRITE探测器制作的红外成像系统的性能基本上和上述情况相仿。这里不妨就这两者几个主要参数列于表2。

表 2

参 数 \ 系 统	UKTICM-Ⅱ	第一代红外前视	第二代红外前视
空间分辨率	1 mrad	(0.1~0.5) mrad	(0.05~0.1) mrad
探测器数	8条SPRITE	180元(线列)	10 ⁴ 元(红外焦平面)
帧频	30	30	30

二、系统可获得的极限性能

这类系统可获得的极限性能受以下两方面限制。其一,由于SPRITE探测器应用机理决定了它本身存在着表征热耗损的电阻成份,这样它将来发展的极限值,有资料表明约为2000元左右的普通分立探测器性能,由此而推断,系统的热灵敏度再高于这个水平是困难的。其二,这类系统的空间分辨率在(8~13) μm 范围可获得与一般分立探测器相同的水平,而在(3~5) μm 范围内达不到现在使用的分立探测器所具有的最小可制作的尺寸。

由于这两方面的原因,这类系统作为体现最先进水平的红外成像系统,它的前景不是十分乐观的。与此相反,目前使用的普通分立型探测器阵列大有作为。

三、应用前景

这种系统的新颖的信息获取方式,简化系统电路的复杂程度,减少了元件引线 and 热负载,并且降低了成本,这一点正是人们对分立探测器的红外成像系统所期望能具有的特性。因此,这类系统一旦崭露头角,就引起设计师高度重视和用户们极大的兴趣,从发展趋势,很快就可能风行欧洲,成为热门货。尤其是在各种军用设备上应用更为适宜。所以,这类系

统具有广泛的应用前景。

五、结 束 语

纵观世界各技术先进的国家,不难看出,他们都在不惜工本地研制新型的高性能的红外探测器,新的系统层出不穷地推陈出新,发展速度是惊人的。这是引起我们足够重视的发展动向。这里介绍的用SPRITE探测器制作的系统就是一例。本文介绍此系统,目的在于,熟悉和探求这类新型系统的设计方法,以便最大限度发挥这种探测器的性能;同时也试图通过介绍,希望我国有关部门对这类系统的出现引起必要的重视,尤其是期望加速SPRITE探测器的研制工作,以便在不太长的时间内,改变我们在这方面技术的落后状态,加快红外成像技术向先进水平发展的速度。

致谢,本文承蒙何启予主任审核并提出有益的建议,值此表示谢意。

参 考 资 料

1. Infrared physics Vol.22, pp31~42, 1982年
2. Laser81 Opto-Electronic, 5th International Congress and International Trade Fair, abstracts, p222, 1981年
3. Mullard SPRITE Detector 说明书
4. Marconi Avionics Co, "Conventional Detector Concept"
5. AD/A073763
6. 用于高阻抗的InSb探测器的前置放大器”(内部)杨应槐