

文章编号:1001-9014(2007)01-0010-005

## 红外凝视成像系统中的光学微扫描技术

吴新社, 蔡毅

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

**摘要:** 简要介绍了国内外微扫描技术研究情况, 讨论了用于凝视焦平面探测器的微扫描技术原理和分类, 按伺服电机驱动和压电陶瓷驱动两种形式, 分析了微扫描技术的原理、结构和信号读出方式, 最后总结了微扫描技术的优点。

**关键词:** 光学微扫描; 红外成像; 凝视; 红外焦平面探测器

**中图分类号:** TN     **文献标识码:** A

## TECHNIQUES OF OPTICAL MICROSCAN IN STARING INFRARED IMAGING SYSTEM

WU Xin-She, CAI Yi

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

**Abstract:** The microscan techniques studies both domestic and overseas were introduced briefly and the principles and categories of microscan techniques used for IR staring imaging were discussed. According to different actuating elements, such as servo motors and ferroelectric ceramics, the principles, structures and signal read-out of microscan were described in detail. Finally, the merits of microscan were summarized.

**Key words:** optical microscan; infrared imaging; staring; IRFPA

### 引言

随着凝视型红外焦平面探测器的发展, 微扫描技术的重要性逐渐显现. 通过微扫描技术, 可以在不降低探测器热灵敏度的前提下提高成像系统的空间分辨率. 微扫描技术是一种微位移技术, 原理是在规定的方向上使景物图像相对于探测器表面移动规定距离, 为探测器采样提供位置微小变化的图像. 在红外成像系统设计中, 空间分辨率不足限制了整机的探测距离进而成为制约红外成像系统发展的技术瓶颈. 分辨率高低主要受探测器制造成本和光学衍射极限的限制, 还与红外焦平面探测器的器件结构有关. 首先, 目前虽然可以做出大规模的红外焦平面探测器, 但是成本很高, 性价比低, 原因是制备大尺寸均匀性好的红外晶体材料很困难, 难以满足使用要求, 探测器制作工艺水平还不完美, 与之相连的采用平面工艺制造的读出电路的性能也受制于平面尺

寸, 这些因素共同作用使得探测器的制造成本居高不下. 其次, 红外成像系统工作在波长较长的红外波段( $1 \sim 12 \mu\text{m}$ ), 在光学系统的  $f/\#$  数确定的情况下, 波长越长衍射光斑越大, 从这一点来看, 即使探测器制造水平很高也不可能做出分辨率很高的探测器, 因为探测器设计的首要要保证热灵敏度(探测距离), 然后才考虑分辨率. 第 3, 探测器结构决定了它的填充因子小于 100%, 有的甚至低于 50%, 也就是说探测器光敏面上存在盲区, 不能探测到视场内的所有信息, 人为抖动或随机振动也不能可靠地消除这一缺陷. 第 4, 微扫描器件的开发成本远低于高分辨力探测器的制造成本, 也就说后者的性能与价格比不高. 第 5, 工作过程中凝视型红外焦平面探测器尤其是光伏型器件多数时间处于等待状态, 只有少数时间处于积分状态, 器件潜能没有充分发挥出来. 通过微扫描技术可以在不增加红外焦平面探测器探测元总数的情况下提高红外成像系统的分辨率, 扩

收稿日期: 2006-03-30, 修回日期: 2006-11-30

基金项目: 国家 973 课题(5131305)

作者简介: 吴新社(1966-), 男, 湖南邵阳人, 高级工程师, 主要从事红外光电器件研发.

Received date: 2006-03-30, revised date: 2006-11-30

大热成像系统的作用距离,消除探测器因填充因子小带来的探测盲区,同时还具有一定的稳像功能,这就是为什么国际上一些著名红外技术公司争相开发微扫描技术的原因。

## 1 光学微扫描技术原理

Nyquist 定律表明,探测器的采样频率只有大于场景最高空间频率的一倍时,所生成的图像才能完全反映场景信息.微扫描就是使场景相对于探测器做微小或规定运动,为探测器采样提供微小变化的辐射信号.微扫描在不影响探测器热灵敏度、探测元总数、光学系统结构和过多增加制造成本的前提下提高采样频率或扩大视场,并最终扩大瞬时视场(IFOV).微扫描技术具体应用有两种,一种是视场不变提高空间分辨力,另一种是空间分辨力不变扩大视场.由于篇幅有限,文章主要讨论提高空间分辨力的微扫描技术。

提高空间分辨力的微扫描原理如图 1 所示,图中以  $2 \times 2$  微扫描为例,微扫描得到 4 幅子图像,通过信号处理电路,将 4 幅子图像合成在一起,这样空间分辨力就提高到原来图像的 4 倍,视场保持不变.需要特别说明的是,微扫描模式(子图像数)要根据探测器的最高工作频率而定,两者的参数需要匹配.一般情况下,光子探测器尤其是光伏型的探测器的工作频率较高,热探测器的工作频率要低一些.频率越低,微扫描时能够得到的子图像数就越少。

### 1.1 微扫描形式分类

同普通扫描成像技术类似,微扫描形式多种多样.按扩大瞬时视场(IFOV)的方式不同,可分为提高空间分辨力的微扫描和扩大视场的微扫描.按所用驱动元件的不同,可分为电机驱动的微扫描、压电陶瓷驱动的微扫描、电场或超声波驱动的微扫描.按微扫描的模式不同可分为  $1 \times 2$ ,  $2 \times 2$ ,  $3 \times 3$ ,  $4 \times 4$ ,  $2 \times 3$ ,  $3 \times 4$  等等.按微扫描过程的不同可分为连续微

扫描和不连续微扫描两种.按光学元件与光的作用方式不同可分为反射式微扫描和折射式微扫描两种。

### 1.2 国内外研究情况

微扫描的理论研究始于上世纪 70 年代,器件开发始于 90 年代.西方国家在非制冷探测器开发过程中,为了将探测元间距大空间分辨力低的焦平面探测器用于空间分辨力较好的整机产品上而研发微扫描技术.经过长期研究,目前已经形成了以压电陶瓷驱动和电机驱动的两产品系列(含英国、日本、加拿大、美国和韩国研制出的实验室产品),部分已经成功用于在空中或地面武器平台上,生产单位有美国的 FLIR Systems、Raytheon、TI,英国的 BAE Systems 和法国的 Thales. FLIR Systems 公司的所有 COTS AN/AAQ-22 系列吊舱系统都采用了微扫描技术;Thales 公司推出的 VIPIR 近程武器热瞄准具(2005 年 4 月 1 日),以及改进型 MT-DNGS 昼夜射击和观察瞄准具(2005 年 8 月 1 日)采用了这种技术,并计划为荷兰皇家陆军的 184 辆 CV9035 Mk III 步兵战车提供 UTAAS 火控系统,首批交货定于 2006 年 5 月 1 日. BAE Systems 公司以 Merlin 系列非制冷红外焦平面探测器为核心的部分热像仪也采用微扫描技术.2006 年上半年,加拿大的 INO 报道了  $8 \sim 12\mu\text{m}$  和  $300 \sim 900\text{nm}$  双波段直径  $100\text{mm}$  的圆柱形枪瞄产品,该产品用  $160 \times 120$  的非制冷探测器,通过  $2 \times 2$  微扫描模式得到  $320 \times 240$  像素的图像.韩国 SAMSUNG-THALES 公司生产的一款中波热像仪采用两个压电陶瓷元件分别驱动用于折转光路的两块平面镜摆动实现微扫描成像,微扫描模式为  $2 \times 2$ ,图像分辨力由原来的  $320 \times 240$  提高到  $640 \times 480$ 。

国内目前还没有开发出实用的微扫描器件,从报道的情况来看,理论研究、实验模拟方面的文章比较多,实用产品处于空白状态。

## 2 提高空间分辨力的微扫描技术

提高空间分辨力的微扫描主要针对填充因子小于 100% 的凝视型红外焦平面探测器,微扫描时子图像的最大位移小于探测元间距.将空间位置微小变化的子图像合成,就得到分辨力提高的完整图像,相当于用探测元间距缩小的探测器生成的图像.实现微扫描的形式多种多样,按驱动方式的不同,大致可以分成以电机驱动和压电陶瓷驱动两类。

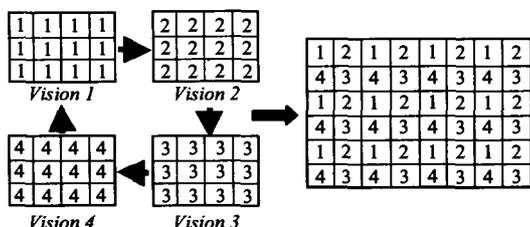


图 1 提高空间分辨率的微扫描技术原理

Fig. 1 Principle of microscanning technique to improve resolution

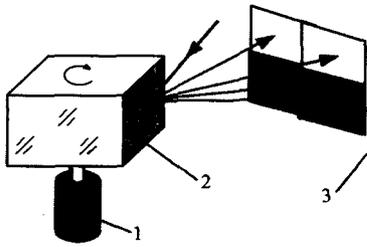


图2 旋转多面体微扫描示意图

Fig. 2 Principle of microscanning technique by rotating multi-facets drum

## 2.1 电机驱动方式

在压电陶瓷技术不成熟的情况下,电机驱动方式是最容易实现的一种方式.这种微扫描的原理是利用电机带动光学元件旋转、改变其光学面的法向矢量从而使反射或透射图像产生微小移动,达到微扫描目的.按使用光学元件的不同,电机驱动又可分为镜面反射和平板或透镜光学元件透射两种.

### 2.1.1 镜面反射

镜面反射最常用的情况是电机驱动多面体旋转,如图2所示,每个面上每点的法向矢量(自由曲面)与光轴的夹角不一样,每个反射面形成的微扫描图像(子图像)也不一样,通过控制这个法向矢量来确定子图像位移大小和方向.在微扫描精度要求很高的情况下,这种微扫描方式的设计和制作难度很大,因而它的应用受到限制.

### 2.1.2 平板透射

平板透射微扫描原理如图3所示,大圆为旋转圆盘,四个小圆为平板透射元件,平板光学元件入射面的法向矢量与光轴有一定夹角,光线穿过平板时由于折射作用,出射光线会在入射面内沿平板倾斜的方向移动距离 $\Delta d$ , $\Delta d$ 的大小由探测元间距和微扫描模式决定.如果将几个这样的光学元件放在同一个圆盘上,每个元件的与光轴的夹角大小相等方向不同,通过旋转就可以得到空间位置略微不同的子图像.

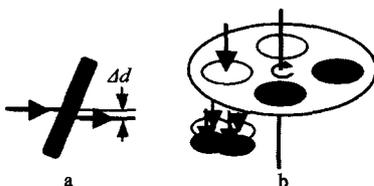


图3 平板透射微扫描结构简图

Fig. 3 Principle of microscanning technique by refractive plate

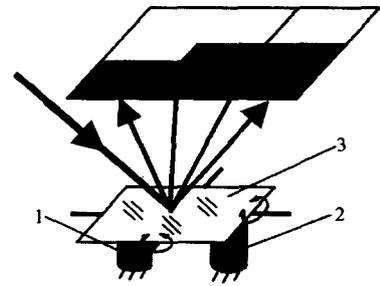


图4 陶瓷驱动平面镜微扫描原理示意图

Fig. 4 Principle of microscanning technique with mirror actuated by PZT

这种微扫描方式可以将斩波与微扫描有机结合为一体,结构紧凑,特别适合于非制冷热释电凝视焦平面探测器.探测器的几何尺寸较大时改为阿基米德螺旋线,信号读出采用逐行读出方式.其突出特点是可以解决因高性能压电陶瓷技术不足而带来的技术难题,微扫描过程连续,工作效率高,不足之处是微扫描精度有限,设计复杂,工艺难度较大.

## 2.2 陶瓷驱动方式

陶瓷驱动方式是指利用压电陶瓷的电致伸缩特性驱动光学元件运动,通过改变光学元件的空间位置改变由它们所生成的图像的空间位置,从而得到微扫描图像.

### 2.2.1 平面反射镜

如图4所示,两个驱动元件分别安装在可以使平面镜绕两个正交轴旋转的驱动位置,控制压电陶瓷的伸缩就可以改变平面反射镜的反射角度,从而改变反射光束的位置,得到不同位置的子图像.为说明问题,图中所示有点夸张,实际上每一幅相邻子图像的位移距离为 $1/2$ 个探测间距.这种微扫描过程为平面镜先运动到某幅子图像位置,然后保持在这个位置,等到信号读出时再转向下一个子图像位置,循环往复直到程序停止.从上面的描述来看,这种微扫描过程是不连续的,微扫描时不运动,运动时不微扫描.它的优点是微扫描位置精度比较高,凝视成像,可以生成多种模式的微扫描,不足之处是存在“像旋”.

### 2.2.2 平板透射元件

平板透射元件微扫描方式的结构与上面介绍的平面反射镜微扫描方式类似,也是通过压电陶瓷驱动平板透射元件运动改变元件的法向矢量得到微扫描图像的.如图5所示,平板透射光学元件由两个压电陶瓷驱动分别绕两个正交轴旋转,透射元件的偏转角度由陶瓷的驱动行程决定,即两个驱动元件共

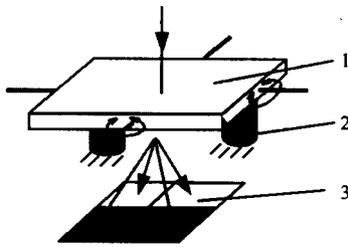


图5 陶瓷驱动平板透射元件微扫描原理示意图  
Fig.5 Principle of microscanning technique with refractive plate element actuated by PZT

同决定了元件的法向矢量,不同的法向矢量得到不同的子图像.特点与上面基本一样.

### 2.2.3 成像透镜

成像透镜微扫描是指利用压电陶瓷作为驱动元件,驱动成像透镜在垂直于光轴的平面内运动得到微扫描图像.如图6所示,成像系统的单个透镜元件置于支承架内,在两个正交方向上分别设置压电陶瓷元件,用来驱动和支承透镜,两个元件共同运动使成像透镜按预定模式运动,从一个位置沿直线运动到另一个位置,一个元件伸长另一个元件相应地也要伸长.它可以做常用的 $2 \times 2$ , $3 \times 3$ , $4 \times 4$ 微扫描,也可做 $2 \times 3$ , $3 \times 4$ 微扫描.图6a是硬件结构示意图,图6b是 $2 \times 2$ 微扫描模式示意图.这种微扫描方式的特点是选择模式多,可控性能好,微扫描精度高.不足之处对压电陶瓷的驱动能力,响应速度和定位精度要求较高.

### 2.3 电机驱动与压电陶瓷驱动的微扫描器件性能比较(如表1所示)

表1 电机驱动与压电陶瓷驱动的微扫描器性能比较表  
Table 1 Comparable sheet of microscanning performance between microscanners motivated by motors and piezoelectric ceramics

驱动方式	扫描精度	扫描过程	成像形式	体积	功耗
电机驱动	低	连续	扫描	大	低
陶瓷驱动	高	不连续	凝视	小	高

## 3 微扫描过程中的同步信号

微扫描生成的子图像要通过后面的信号处理电路才能成为分辨率提高的图像,因此需要同步信号来统一“动作”.同步信号是指控制微扫描状态和红外焦平面探测器信号读出时序的控制信号.凝视型探测器通常选用逐行读出方式和整帧读出(Snap-

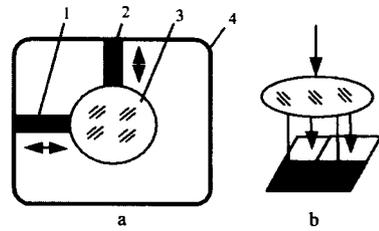


图6 成像透镜微扫描原理  
Fig.6 Principle of microscanning technique by lens element

shot)方式,在微扫描状态下,对于扫描成像的微扫描,探测器的信号读出应选择逐行读出方式,而对于凝视成像的微扫描则应选择整帧读出方式.在上面介绍的几种微扫描形式中,只有电机驱动平板透射元件的微扫描方式是扫描成像,其余都是凝视成像.

### 3.1 扫描成像时微扫描的同步设计

从上面的分析可知,这种情况下探测器只能选择边积分边读出的方式.微扫描圆盘做匀速圆周运动,如果将窗口形状设计成阿基米德螺旋线,可使微扫描器近似均匀地逐行扫过,也就是说探测器是被逐行曝光的.又由于微扫描窗口大小一致,可以认为每一行的曝光时间是相等的.因此探测器的同步信号起始点应当在第一行曝光结束点位置,在这个位置设置一个信号发生点就可以了,具体做法如图7所示,仍以 $2 \times 2$ 微扫描为例,在圆盘上边缘距每个微扫描窗口结束边相应位置打上一个通孔,在这个孔的正下方安装一对光耦合器(不动),当圆盘旋转时其上的通孔也一起旋转,通孔与光耦合器正对时光耦合器上发光二极管发出的光不能反射回去,光敏元件输出一个信号,这个信号启动探测器进行信号读出.圆盘转过这个位置后又有光信号反射回去,光耦合器复位.探测器在完成整个一帧图像的读出后复位,等待下一个读出信号的到来,如此反复进行.这种同步方式结构简单,容易实现,相位与微扫描窗口的空间位置一一对应.

### 3.2 凝视成像时微扫描的同步设计

旋转自由曲面多面体的同步信号设计与上面介

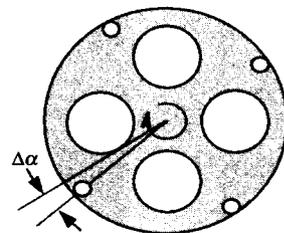


图7 扫描成像时的同步信号  
Fig.7 Synchronous signal in scanning image

绍的扫描成像时微扫描同步设计类似,在此不再赘述. 压电陶瓷驱动下的微扫描同步信号设计比较简单,方法是由同一个信号源去同时控制压电陶瓷运动和探测器信号读出. 以  $2 \times 2$  微扫描为例,共分 4 个步骤,其控制过程为(积分 1)→(微扫描元件运动 1 的同时探测器信号读出 1)→(积分 2)→(微扫描元件运动 2 的同时探测器信号读出 2)→(积分 3)→(微扫描元件运动 3 的同时探测器信号读出 3)→(积分 4)→(微扫描元件运动 4 的同时探测器信号读出 4),然后重复上述过程. 由于微扫描元件的运动只有“动”和“不动”两种状态,因此可以将“运动”状态表示为 1,“不动”状态表示为 0,两个方向的压电陶瓷的表示方法都一样,那么我们可以将整个微扫描控制过程用一个类似于数字电子技术中的真值表来表示,如表 2 所示. 需要说明的是,虽然微扫描器和探测器同时收到信号源发出的控制信号,但动作并不是同时发生,微扫描动作是立即执行,但探测器的信号读出要经过延时电路的延时处理,过早读出是错误的. 延时长度由探测器积分时间决定.

表 2 凝视成像时微扫描的状态控制表

Table 2 State control sheet of microscan with staring imaging

微扫描步骤	水平方向	垂直方向	信号读出状态
①	0	0	1
②	0	1	1
③	1	0	1
④	1	1	1

## 4 结论

随着红外焦平面探测器技术的发展,微扫描技术越来越受到人们的重视. 微扫描技术建立在普通

的扫描成像技术和凝视型红外焦平面探测器技术之上,扫描原理和结构没有多大改变,但扫描幅度更小,扫描精度更高,扫描形式更多. 微扫描技术可以弥补红外焦平面探测器填充因子小于 100% 的固有缺陷,充分利用它的等待时间进行微扫描成像,长远来看,微扫描技术是红外技术领域竞争的又一项重要技术.

## REFERENCES

- [1] Joseph C Gillette, Thomas M Stadtmiller. Aliasing reduction in staring infrared imagers utilizing subpixel techniques[J], *Opt. Eng.* 1995, **34**:3130—3137.
- [2] Cabanski W, Breiter R, Mauk K-H, et al. Miniaturized high performance staring thermal imaging system [J], *Proc. SPIE*, 2000, **4028**:208—219.
- [3] Jean Fortin, Paul Chevrette. Realization of a fast microscanning device for infrared focal plane arrays[J], *Proc. SPIE*, 1996, **2743**:185—196.
- [4] Edward A Watson, Robert A Muse, Fred P Blommel. Aliasing and blurring in microscanned imagery[J], *Proc. SPIE*, 1992, **1689**:242—250.
- [5] John Lester Miller, John Wilste. Benefits of microscan for staring infrared imagers [J]. *Proc. SPIE*, 2004, **5407**:127—138.
- [6] Bergeron A, Jerominek H. Dual-band dual field-of-view TVWS prototype[J]. *Proc. SPIE*, 2006, **6206**:620610\1—620610\9.
- [7] WAN You-Bao, YANG Pei-Zhi, WU Yu-Rong, et al. Effects of composition ionic concentration on the Raman spectra of ferroelectric potassium lithium niobate crystals [J]. *J. Infrared Millim. Waves*(万尤宝,杨培志,吴玉蓉,等,组分离子浓度对铁电铌酸钾晶体光谱的影响. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(5):331—334.
- [8] CHEN Yuan-Yuan, YU Jin-Zhong, CHEN Shao-WU, et al. Research on improved methods of reduction of bend loss of silicon-on-insulator waveguides [J]. *J. Infrared Millim. Waves*(陈媛媛,余金中,陈少武,等,SOI 波导弯曲损耗改善方法的研究. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(1):53—55.