

文章编号:1001-9014(2011)03-0263-05

## 旋转式红外微扫描器研制

吴新社<sup>1</sup>, 邓芳轶<sup>2</sup>, 陈敏<sup>1</sup>, 蔡毅<sup>3</sup>

(1. 解放军昆明总医院, 云南 昆明 650032; 2. 云南民族大学, 云南 昆明 650031;  
3. 兵器科学研究院, 北京 100089)

**摘要:**针对红外成像系统因衍射光斑大导致图像分辨率低、焦平面探测器填充因子小导致图像传函值小等两大主要缺陷,提出了通过微扫描成像技术提高图像分辨率和传函值的技术方案.简要介绍了微扫描成像的工作原理,重点论述了旋转式红外微扫描器设计方法,并推导了有关设计公式.在微扫描器及其成像演示装置研制基础上,开展了微扫描成像实验,成功得到分辨率和传函值明显提高的红外图像.

**关键词:**旋转式微扫描器;红外成像

**中图分类号:**TN911.73 **文献标识码:**A

## Development of rotary infrared micro-scanner

WU Xin-She<sup>1</sup>, DENG Fang-Yi<sup>2</sup>, CHEN Min<sup>1</sup>, CAI Yi<sup>3</sup>

(1. Kunming General Hospital of PLA, Kunming 650032, China;  
2. Yunnan Nationalities University, Kunming 650031, China;  
3. R. & D. Academy of Machinery Equipment, Beijing 100089, China)

**Abstract:** Poor resolution and lower modulation transfer function (MTF) value in infrared imaging system have been remaining for many years because of its large Airy disc of optical lens and the small fill-factor of focal plane array (FPA), respectively. This paper reported a popular way to improve the resolution and MTF of infrared images using micro-scanning technique. The principles were briefly described. The designing rotary IR micro-scanner was discussed. The rotary micro-scanner imaging system using a 240 × 320 pixels  $\alpha$ -Siuncooled FPA, and got higher resolution and MTF value of IR videos obviously.

**Key words:** rotary micro-scanner; infrared imaging

**PACS:** 95.55.Rg

### 引言

受光学衍射限的限制,表征红外图像分辨率的探测元间距不可能也没必要无限缩小,因此图像分辨率不能单纯通过增加探测器的探测元密度而得到提高;此外,窄禁带红外半导体材料及其复杂的制作工艺使得焦平面探测器填充因子小于100%,从而影响传函(MTF)指标<sup>[1]</sup>.这两大因素严重制约了红外图像质量,而光学微扫描技术正好可以弥补这些缺陷,有效提高图像品质.

光学微扫描技术是一种使光学图像沿预定轨迹周期运动的光学技术.对于提高分辨率的微扫描,其微扫描幅度小于对应探测器的探测元间距;对于扩大视场的微扫描,其微扫描幅度接近对应探测器光

敏区的长度和宽度.光学微扫描器是完成微扫描任务的光学组件,通过光学微扫描器和相应信号处理电路得到的视频称为光学微扫描成像.

光学微扫描器驱动形式多种多样,大致可以分为“旋转式”和“摆动式”两类.旋转式微扫描器以伺服电机为驱动元件,通过伺服电机驱动光学元件旋转使图像产生微小位移而完成微扫描任务;摆动式微扫描器以压电陶瓷为驱动元件,通过压电陶瓷驱动光学元件摆动使图像位置发生微小变化而完成微扫描任务.旋转式微扫描器具有连续微扫、强度调制、光学滤波、容易制造等多种优点,深受用户喜爱;摆动式微扫描器体积较小、模式较多,但元件要求较高、器件功能较少<sup>[2]</sup>.

收稿日期:2010-09-25,修回日期:2011-04-02

基金项目:国家973课题(5131305)

作者简介:吴新社(1965-),男,湖南邵阳人,博士,主要从事光学工程与医学工程技术应用研究,E-mail:wuxinshe11@163.com。

Received date: 2010-09-25, revised date: 2011-04-02

## 1 旋转式微扫描器工作原理

通过驱动带有若干法向矢量不同的平板或平面光学元件的圆盘旋转,生成一系列平面位置微小变化的光学图像完成微扫描任务.如图1所示,圆盘上窗口个数与一个周期内微扫描所需要的子图像数相等,每个窗口的光学元件法向矢量各不相同.微扫描过程中,这些法向矢量不同的光学元件(窗口)依次扫过探测器前面的成像光束,使光束发生位移,得到平面位置微小变化的子图像,被凝视型红外焦平面探测器转换成电子图像后,通过信号处理,再将电子图像按其实际空间位置进行“组合”,最后得到分辨率提高的或视场扩大的图像<sup>[2,3]</sup>.

按光学原理不同又可分为反射式微扫描和透射式微扫描两种,前者旋转圆盘上的光学元件为平面镜,后者则为平板.反射式微扫描利用平面镜的镜面反射原理实现微扫描,适用于扩大视场的微扫描成像;透射式微扫描则利用平板光学元件对光线的折射作用进行微扫描,适用于提高分辨率的微扫描成像;二者不能互换.

使用平板光学元件提高分辨率的微扫描成像原理如图2所示,一束与平板光学元件法向矢量不平行的光入射到平板光学元件上,在材料折射作用下,出射光束会相对于过入射点光轴侧移一段微小距离 $\Delta d$ ,侧移方向在入射光线与过入射点的法向矢量构成的平面内.经过推导,可以得到如下微位移(微扫描步长)计算公式:

$$\Delta d = h \left( 1 - \frac{\cos \alpha}{\sqrt{n_p^2 - \sin^2 \alpha}} \right) \sin \alpha, \quad (1)$$

在入射角小于 $3^\circ$ 情况下,  $\cos \alpha \approx 1$ ,  $\sin \alpha \approx 0$ ,式(1)可简化为

$$\Delta d = h \left( 1 - \frac{1}{n_p} \right) \sin \alpha, \quad (2)$$

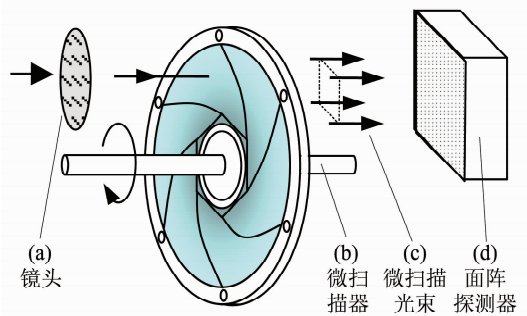


图1 旋转式红外微扫描器原理示意图  
Fig. 1 Principle of rotary IR micro-scanner

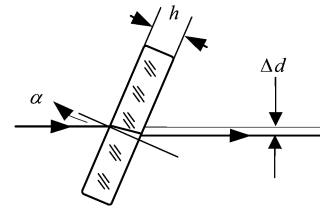


图2 平板透射元件微扫描原理  
Fig. 2 Micro-scanning principle of planar transmission element

式(1)和式(2)中 $\Delta d$ 为微扫描步长; $h$ 为平板厚度; $n_p$ 为平板元件材料折射率; $\alpha$ 为入射光线与平板法向矢量的夹角.

总之,旋转式微扫描器的物理基础源于平板光学元件对非垂直入射光线的折射作用,通过多个法向矢量不同的平板元件组合旋转,即可实现微扫描.

## 2 旋转式微扫描器结构设计

### 2.1 探测器位置

从垂直于光轴方向看,旋转式红外微扫描器位于红外镜头与探测器之间,如图1所示;从光轴方向看,红外焦平面探测器位于以调制器转轴为坐标原点、零度极径为水平轴的直角坐标系二象限<sup>[3]</sup>,如图3所示.

通过数值分析可知,微扫描窗口中的阿基米德螺旋线外端曲率和微扫描器旋转半径较小,这样有利于得到“推扫”效果,有利于缩小微扫描器体积,而其余三个象限要么螺旋线曲率大,要么微扫描器尺寸大,不予选择.

### 2.2 微扫描模式选择与步长计算

微扫描模式是描述微扫描器微扫描过程中生成的子图像数目及其相对位置关系的一个重要概念.作者认为微扫描模式以“ $a \times b$ ”的形式表示较为贴切,其中 $a$ 表示行探测元方向生成的子图像数, $b$ 表示列探测元方向生成的子图像数,二者之积则为一

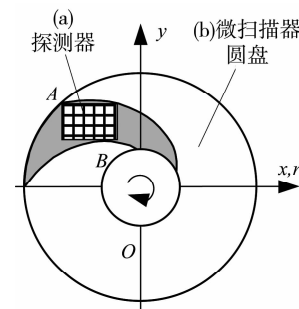


图3 探测器的位置关系  
Fig. 3 Position between FPA and the micro-scanner

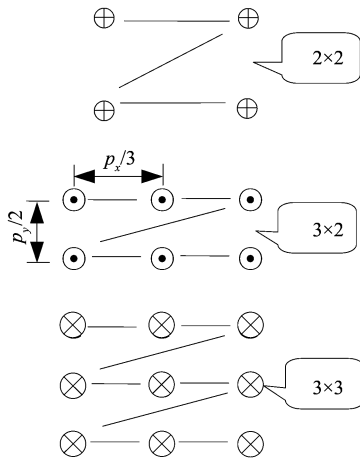


图4 常用微扫描模式

Fig. 4 Common micro-scan patterns

个周期内生成的子图像总数.

微扫描步长即相邻两幅子图像最近边缘之间的间距<sup>[4]</sup>.如图4所示,微扫描步长等于相应方向探测元间距除以该方向微扫描子图像数.

$$\Delta d_x = \frac{p_x}{a}, \quad (3)$$

$$\Delta d_y = \frac{p_y}{b}. \quad (4)$$

式(3)、式(4)中  $\Delta d_x$ 、 $\Delta d_y$  分别为探测元行、列方向微扫描步长,  $p_x$ 、 $p_y$  分别为探测元列和行间距.例如对  $3 \times 2$  微扫描模式,横向生成3幅子图像,那么微扫描步长为  $1/3$  倍探测元行间距;纵向生成2幅子图像,微扫描步长则为  $1/2$  倍探测元列间距.

微扫描模式选择非常重要,过于复杂会增加微扫描器的制造难度与制造成本,过于简单又会影响微扫描的成像效果,因此需要统筹考虑.用数值分析方法分析微扫描模式与调制传递函数(MTF)之间的关系可知: $3 \times 3$  以上的微扫描模式对 MTF 的贡献不十分明显,实用价值有待考量<sup>[1~5]</sup>.此外探测器的探测元间距和填充因子也是微扫描模式选择的重要依据,探测元间距越大、填充因子越小,微扫描模式就越复杂;反之亦然.

### 2.3 微扫描窗口形状与个数

微扫描成像条件下面阵探测器信号读出方式为逐行读出,即边扫描边读出连续工作.逐行读出方式要求同一行内探测元尽可能同步曝光,否则将会引入信号非均匀性问题.对于旋转式微扫描器,将微扫描窗口边缘做成阿基米德螺旋线形状,可以得到近似同步曝光(推扫)效果.根据阿基米德螺旋线定义和推扫要求,可以推出表征螺旋线形状的比例系数

$\chi$  与面阵探测器光敏面几何尺寸之间的关系为

$$\chi = \frac{z \sqrt{(p_x m)^2 + (p_y n)^2}}{2000 \pi}. \quad (5)$$

式(5)中  $\chi$  为阿基米德螺旋线比例系数,  $z$  为微扫描窗口总数,  $m$  为探测器列数,  $n$  为探测器行数.

按照上面计算的比例系数  $\chi$ ,用阿基米德螺旋线定义描出曲线即可,其极坐标式为

$$r = \chi \theta. \quad (6)$$

式(6)中  $r$  为极径,  $\theta$  为极角.当然也可转化为直角坐标.

窗口个数即旋转圆盘上用于安装平板光学元件的专用孔数量,它等于微扫描模式确定的不重复子图像数之和.根据式(6)算出的阿基米德螺旋线与微扫描模式确定的窗口个数等分圆盘后,再确定内圆和外圆大小,即可得到微扫描窗口形状,基本样式如图3中过点A与B的两条螺旋线及内外圆围成的区域所示<sup>[6,7]</sup>.

### 2.4 平板光学元件及其倾斜角度

微扫描窗口中的平板光学元件形状与窗口形状一致,透射光谱同红外成像系统的工作波段相近,平板厚度根据所选材料的强度确定,在满足强度情况下越薄越好,外形加工完成后镀增透膜.平板元件厚度和微扫描步长确定后,倾斜角度按式(1)或式(2)计算得到.

### 2.5 微扫描器圆盘最小半径及最大厚度

在完全覆盖探测器光敏面情况下,微扫描器圆盘最小半径是指微扫描窗口最大外圆到旋转中心的距离,即图3中A点到O点的距离.微扫描器圆盘最大厚度须小于红外镜头的后截距,否则无法完成安装任务.

### 2.6 驱动元件与转速要求

驱动元件选择低速直流伺服电机.选择要点有:转速与转轴稳定性要好,否则会影响子图像位置精度;扭矩余量适中,以免增加功耗;双向旋转,以适应逐行读出探测器不同读出顺序要求;转速可调,便于适应不同帧频探测器的转速要求.为保证积分时间,电机转速与探测器最高帧频存在如下关系

$$n_{\text{rotate}} \leq \frac{60 f_{\text{max}}}{a \times b}, \quad (7)$$

式(7)中  $n_{\text{rotate}}$  为电机转速,  $f_{\text{max}}$  为探测器最高帧频.其使用条件为圆盘旋转一周产生的子图像数正好组成一幅完整的微扫描图像<sup>[8]</sup>.

### 2.7 同步信号

同步信号是协调微扫描与信号处理电路同步动

作的“指令”,每一个窗口设置一个触发信号.基本做法是:在旋转圆盘边缘接近图像曝光结束位置设置一个小孔,再在小孔旋转轨迹正下方安装一个光电耦合器,圆盘旋转时小孔一起旋转,当小孔经过光电耦合器时发出脉冲信号,同步信号由此产生.

按照以上设计方法,得到如图 5 所示的实物.

### 3 实验结果

#### 3.1 图像分辨率明显提高

采用法国 ULIS 公司  $240 \times 320$  非晶硅红外焦平面探测器和南京理工大学自主开发的信号处理电路,选择  $2 \times 2$  微扫描模式,微扫描器每转一圈生成 4 幅  $240 \times 320$  分辨率的子图像,经过信号处理拼成 1 幅  $480 \times 640$  分辨率热图像,分辨率提高了 4 倍,成功实现了微扫描成像,得到了分辨率明显提高的红外视频图像.图 6 所示为实验时从视频中抓取“无微扫描”红外图像和“有微扫描”红外图像,可以看出微扫描成像得到的图像分辨率明显提高.

#### 3.2 图像传函值明显增大

调制传递函数是反应成像系统性能的最佳技术指标.实验使用从以色列进口的传函测量设备,在同一成像演示装置上分别对无微扫和有微扫描的传函值进行测量,结果如图 7 中的曲线①和②所示,图 7 横轴为空间频率  $f$ ,纵轴为传函值 MTF.可以看出,有微扫描时的传函值明显大于无微扫描时的传函值<sup>[9]</sup>.

### 4 结论

该微扫描成像不仅可以提高红外图像的空间分辨率、改善系统的传函值,而且还可用于多波段成

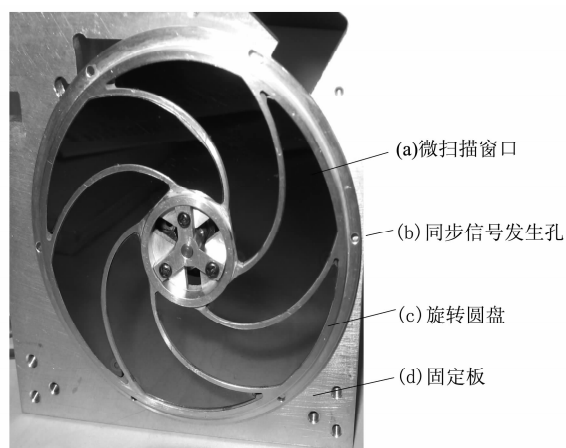


图 5 旋转式微扫描器实物照片  
Fig. 5 Photograph of the rotary micro-scanner

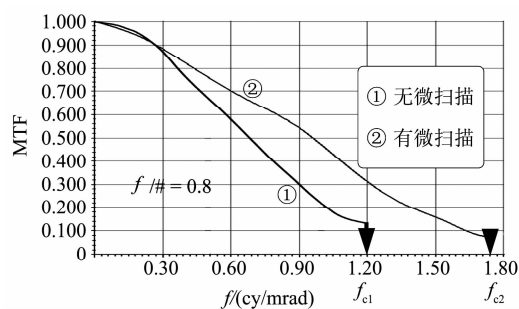


图 6 微扫描成像效果对比 (a) 无微扫描红外图像 (b) 有微扫描红外图像

Fig. 6 The effects comparison between (a) the common image and (b) micro-scanning image

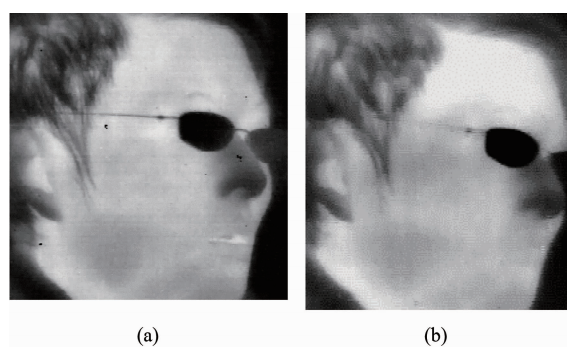


图 7 无微扫描与有微扫描传函值比较

Fig. 7 The MTF values comparison of micro-scanning imaging and common imagings

像、光学滤波以及具有调制要求的铁电型红外焦平面探测器支持下的红外成像,应用范围较宽。

### REFERENCES

- [1] WU Xin-She. Development of chopper/micro-scanner for uncooled focal plane assemblies [D]. *China Research and Development Academy of Machinery Equipment* (吴新社. 非制冷红外焦平面探测器的调制型微扫描器设计与实现. 兵器科学研究院), 2008; 29—33.
- [2] WU Xin-She, CA I Yi. Techniques of optical microscan in staring infrared imaging system [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (吴新社, 蔡毅. 红外凝视成像系统中的光学微扫描技术. *红外与毫米波学报*), 2007, 26(1): 10—14.
- [3] WU Xin-She, FAN Nai-Hua, LI Long, et al. Chopper design for ferroelectric un-cooled FPA [J]. *Infrared Technology* (吴新社, 范乃华, 李龙, 等. 铁电型非制冷红外焦平面探测器的调制器设计. *红外技术*), 2007, 29(6): 333—336.
- [4] SUI Xiu-Bao, CHEN Qian, LU Hong-Hong. Research on improving spatial resolution of infrared image [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (隋修宝, 陈钱, 陆红红. 红外图像空间分辨率提高方法研究. *红外与毫米波学报*), 2007, 26(5): 377—385.
- [5] Miller J L, Wiltse J. Benefits of microscan for staring infrared imagers [J]. *Proc. SPIE*. 2004, 5407: 127—138.
- [6] Bergeron A, Jerominek H, Doucet M, et al. Dual-band dual field-of-view TVWS prototype [J]. *Proc. SPIE*. 2006,

6206:620610-1—620610-10.

- [7] Bergeron A, Jerominek H, Doucet M, *et al.* Lightweight uncooled TWS equipped with catadioptric optics and microscan mechanism [J]. *Proc. SPIE.* 2006, **6206**: 620662061N-1—62061N-14.
- [8] Cabanski W, Breiter R, Mauk K-H, *et al.* Miniaturized high performance staring thermal imaging system [J].

*Proc. SPIE.* 2000, **4028**:208—219.

- [9] JIN Wei-Qi, WANG Chun-Yong, ZHANG Nan, *et al.* Study on sub-pixel processing algorithm for scanning FPA thermal imaging system[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (金伟其,王春勇,张楠. 等. 扫描型焦平面热成像系统的亚像元处理算法研究. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(4): 261—264.

(上接 262 页)

氢、金属化和钢柱列阵的制备等工艺,得到了钝化界面植氢的 HgCdTe 中波红外探测芯片. 实验发现钝化界面植氢优化的 HgCdTe 红外中波探测芯片的光电二极管开启电压比未经过植氢处理的增加了 50mV 左右,零偏及反偏动态阻抗提高了 10 倍,且正向串连电阻也明显减小. 这表明钝化界面等离子体植氢处理可以抑制 HgCdTe 中波光电二极管的暗电流和优化探测芯片的欧姆接触,从而能提高中波红外焦平面探测器的探测性能.

**致谢** 本工作得到了于梅芳、马伟平、朱建妹、陈兴国、祝海彬、刘丹、吴云、曹菊英、王建新、陈昱、邢雯、陈洪雷和曹妩媚等的支持,作者在此一并表示衷心的感谢.

## REFERENCES

- [1] Rogalski A, Antoszewski J, Faraone L. Third-generation in-

frared photodetector arrays [J]. *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, 2009, **105**(09):091101 - 1.

- [2] Rogalski A. New material systems for third generation infrared detectors[J]. *SPIE*, 2009, **7388**:73880J - 1.
- [3] YE Zhen-Hua, YIN Wen-Ting, HUANG Jian, *et al.* 128 × 128 SW/MW TWO-COLOR HgCdTe IRFPAs [J]. *J. Infrared and Millim. Waves* (叶振华,尹文婷,黄建,等. 128 × 128 短波/中波双色红外焦平面探测器. *红外与毫米波学报*), 2010, **29**(6):415—418.
- [4] Dewames R E, Williams G M, Pasko J G, *et al.* Current Generation Mechanisms In Small Band Gap HgCdTe p-n Junctions Fabricated by Ion Implantation [J]. *Journal of Crystal Growth*, 1988, **86**:849 - 858.
- [5] YE Zhen-Hua, HU Xiao-Ning, ZHANG Hai-Yan, *et al.* Study of dark current for Mercury Cadmium Telluride long-wavelength photodiode detector with the different structures [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (叶振华,胡晓宁,张海燕,等. 不同结构的碲镉汞中波光伏探测器的暗电流研究. *红外与毫米波*), 2004, **23**(2):86 - 90.
- [6] Gopal V, Westerhout R J, Faraone L. Surface leakage current contribution to the dynamic resistance and 1/f noise in mid-wave mercury cadmium telluride infrared photodiodes [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2008, **51**:532 - 536.