

红外系统微扫描技术研究

张良¹ 仇振安² 杨小儒¹ 刘玉¹

(¹ 中国航空工业集团公司洛阳光电设备研究所, 河南 洛阳 471009)

² 陆航驻北京地区军事代表室, 河南 洛阳 471009

摘要 介绍了微扫描技术及其给红外焦平面阵列(FPA)成像带来的好处,分析了微扫描红外焦平面阵列成像方案的特点,比较了各种微扫描成像方案的优势及不足,指出了红外焦平面阵列微扫描成像工程化的可行方案和研究方向。设计了一种采用非制冷氧化钒 384 pixel×288 pixel 焦平面探测器的长波红外微扫描光学系统。其工作波长范围为 8~14 μm, F 数为 1, 焦距为 150 mm。利用光学设计软件 Code V 进行了仿真计算,对其像质进行了评价,并给出了微扫描系统的配置方案。

关键词 光学器件;微扫描技术;红外焦平面;微扫描模式;光学仿真

中图分类号 TN215 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.042302

Research of Infrared Micro-Scanning Technology

Zhang Liang¹ Qiu Zhen'an² Yang Xiaoru¹ Liu Yu¹

¹ The Electro-Optical Equipment Institute of Aviation Industry Corporation of China,
Luoyang, Henan 471009, China

² Military Deputy Office of the People's Liberation Army in Beijing District, Luoyang, Henan 471009, China

Abstract Micro-scanning technique and its benefits in infrared focal plane array (FPA) imaging are discussed. Different micro-scanning schemes and their property are described in detail. The advantages and drawbacks of each scheme are compared. The possible schemes for engineering application are presented. The research direction in micro-scanning infrared focal plane array imaging is pointed out. As an example, we design a micro-scanning optical system suitable for long wave infrared optical system whose operating wavelength range is 8~14 μm, F number is 1, and focal length is 150 mm. It was an uncooled 384 pixel×288 pixel VO_x focal plane array detector. Moreover, its image quality is evaluated with the Code V optical design software. And the infrared micro-scanning system configuration is also introduced.

Key words optical devices; micro-scanning technology; infrared focal plane; micro-scanning mode; optical simulation

OCIS codes 230.4685; 040.6808; 230.3990; 040.3060

1 引言

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。分辨率的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。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。因此,国际上一些著名红外技术公司争相开发微扫描技术。本文给出了一种基于非制冷氧化钒 384 pixel×288 pixel 焦平面探测器,采用 2×2 微扫描方式的长波红外微扫描光学系统的设计方案,并进行了仿真和评价。

收稿日期: 2011-11-18; 收到修改稿日期: 2011-12-19; 网络出版日期: 2012-02-24

作者简介: 张良(1973—),男,硕士,高级工程师,主要从事红外系统总体和光学系统等方面的研究。

E-mail: zhangliang.ly@163.com

2 微扫描技术成像原理

假设物体 $o(x, y)$ 经光学系统后产生模糊像 $i(x, y)$, 假设光学系统是线性系统, 点扩展函数为 $h(x, y)$, 那么 $i(x, y) = o(x, y) * h(x, y)$ 。 $i(x, y)$ 经过探测器阵列抽样后产生抽样图像 $i_s(x, y)$, 那么

$$i_s(x, y) = \left[\frac{1}{w_x w_y} a\left(\frac{x}{w_x}, \frac{y}{w_y}\right) * o(x, y) * h(x, y) \right] \frac{1}{d_x d_y} \text{comb}\left(\frac{x}{d_x}, \frac{y}{d_y}\right), \quad (1)$$

式中 $*$ 为卷积, $a(x, y)$ 为探测器形状的函数, w_x 和 w_y 分别为探测器在 x 和 y 方向的有效尺寸, d_x 和 d_y 分别为 x 和 y 方向探测器之间的间距。 $\text{comb}(x, y)$ 为梳状函数, 定义为

$$\text{comb}(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(x - n, y - m). \quad (2)$$

对(1)式进行傅里叶变换, 获得图像的空间频率谱 $I_s(\xi, \eta)$ 为

$$I_s(\xi, \eta) = [A(w_x \xi, w_y \eta) O(\xi, \eta) H(\xi, \eta)] * \text{comb}(d_x \xi, d_y \eta). \quad (3)$$

从(3)式可以看出, 像素孔径和光学系统会对物的空间频率内容进行滤波(导致模糊), 并且由于梳状函数卷积的原因, 模糊的物光谱在抽样点处被复制, 产生频谱混叠。

考虑 2×2 微扫描的情况, 即连续图像被微扫描装置在 x 和 y 方向分别移动了像素间距的一半, 微扫描过程产生的抽样图像为

$$i_{ms}(x, y) = \frac{1}{4d_x d_y} \left[\frac{1}{w_x w_y} a\left(\frac{x}{w_x}, \frac{y}{w_y}\right) * o(x, y) * h(x, y) \right] \left[\text{comb}\left(\frac{x}{d_x}, \frac{y}{d_y}\right) + \text{comb}\left(\frac{x}{d_x} - \frac{1}{2}, \frac{y}{d_y}\right) + \text{comb}\left(\frac{x}{d_x}, \frac{y}{d_y} - \frac{1}{2}\right) + \text{comb}\left(\frac{x}{d_x} - \frac{1}{2}, \frac{y}{d_y} - \frac{1}{2}\right) \right]. \quad (4)$$

对(4)式进行傅里叶变换, 得到微扫描图像的空间频率光谱为

$$I_{ms}(\xi, \eta) = \frac{1}{4} [A(w_x \xi, w_y \eta) O(\xi, \eta) H(\xi, \eta)] * \{ \text{comb}(d_x \xi, d_y \eta) \times \{ 1 + \exp(-i\pi d_x \xi) + \exp(-i\pi d_y \eta) + \exp[-i\pi(d_x \xi + d_y \eta)] \} \}. \quad (5)$$

运用(3)式可将(5)式写为

$$I_{ms}(\xi, \eta) = \frac{1}{4} [A(w_x \xi, w_y \eta) O(\xi, \eta) H(\xi, \eta)] * \left\{ \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(d_x \xi - n, d_y \eta - m) \{ 1 + \exp(-i\pi n) + \exp(-i\pi m) + \exp[-i\pi(m + n)] \} \right\}. \quad (6)$$

注意(6)式中的大括号内, 当 m, n 为偶数时, 其值为 4, 当 m, n 为其他组合时则为 0, 也就是说只有偶级谱引入混淆, 由此可知 2×2 微扫描可以减小基带内的频谱混淆, 非零级谐波与基带图像频谱有了较大的分离, 等效于 Nyquist 频率提高了 1 倍。这种影响如图 1 所示, 为了简便用一维表示。

图 1 中带有竖线的部分表示基带, ξ_0 表示不采用微扫描时的频域的抽样间距。由抽样定理可知, 在图像重建的过程中只取基带部分, 从图 1(a)可以看出基带内含有其他谐波的成分, 也就是说在重建图像中会有混淆。采取 2×2 微扫描后抽样间距减小到原来的 $1/2$, 则频域的抽样频谱间距增大到原来的 2 倍, 即 $2\xi_0$ 。

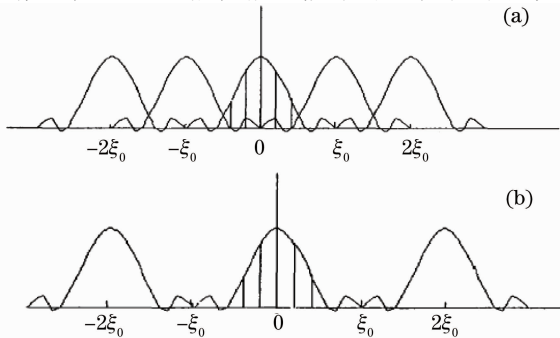


图 1 (a)抽样图像和(b)微扫描图像的频谱

Fig. 1 Frequency diagrams of (a) sample image and (b) micro-scanning image

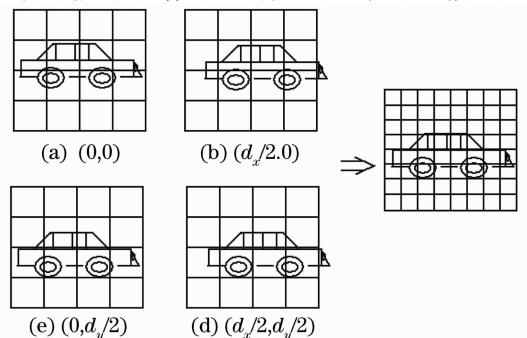


图 2 微扫描成像过程

Fig. 2 Micro-scanning imaging process

图 2 给出了采用 2×2 方式的微扫描成像过程。

将微扫描技术引入到红外凝视成像系统中等效于减小了抽样间距,增加了空间抽样率。这能减小图像中的频谱混淆,提高分辨率。

3 微扫描方式

从国内外的研发情况看,发展成熟的主要是旋转透射平面镜微扫描、微转动反射平面镜微扫描以及微动透镜微扫描技术^[1,2],如图 3 所示。

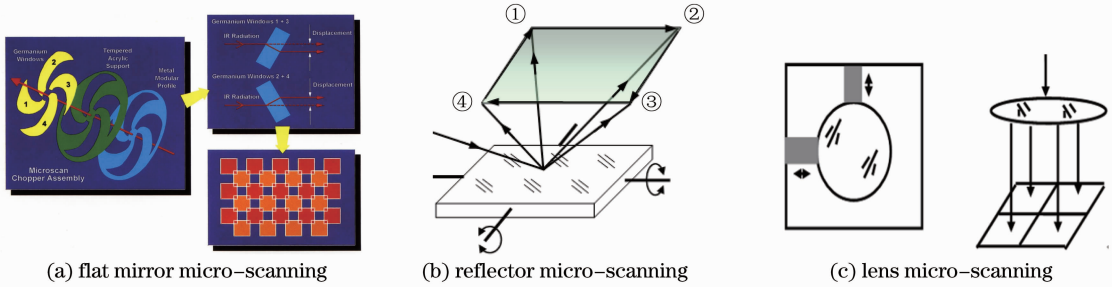


图 3 几种微扫描方式示意图

Fig. 3 Different micro-scanning methods

4 微扫描热成像系统仿真

4.1 技术要求

微扫描热成像系统的设计指标如表 1 所示。

表 1 设计指标

Table 1 Design requirements

Parameter	Value
Wavelength range / μm	8~14
Focal length / mm	150
Detector	384 pixel \times 288 pixel VO_x microbolometer
F-number	1
Modulation transfer function	>0.6 (12 lp/mm)
Micro-scanning model	2×2
Micro-scanning method	lens
Drive method	Piezoelectric transducer

4.2 系统组成

微扫描热成像系统由红外焦平面阵列探测器、微扫描光学系统和微扫描成像与信号处理电路等三部分构成。探测器采用法国 ULIS 公司 384 pixel \times 288 pixel、25 μm 微测辐射热计红外焦平面阵列。微扫描光学系统采用压电陶瓷 (PZT) 驱动微扫描成像透镜,使其在垂直于光轴的平面内做周期性的微位移运动,获得

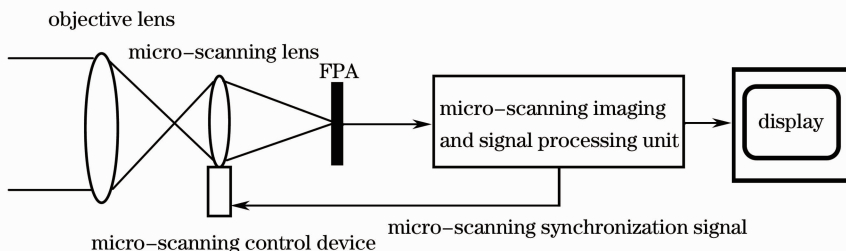


图 4 微扫描红外成像系统

Fig. 4 Schematic drawing of infrared micro-scanning system

微扫描图像。微扫描成像与信号处理电路为微扫描成像透镜提供周期微位移同步驱动信号,并对红外焦平面阵列输出的原始图像信号进行非均匀校正、盲元替代、自动增益控制和超分辨率图像增强。图 4 给出了微扫描热成像系统的组成。

4.3 光学系统仿真

为了满足系统的技术参数要求,在保证全视场成像质量的同时还需要考虑微扫描透镜在 4 个不同扫描位置对系统像质的影响。采用 Petzval 型红外光学系统作为初始结构,利用 Code V 软件进行优化设计。

由于选用的探测器的像元尺寸为 $25\ \mu\text{m}$,系统采用 2×2 微扫描,因此,微位移的步长(0.5 pixel)为 $12.5\ \mu\text{m}$,将光学系统对应地设为四重结构进行优化设计,设计结果如图 5 和图 6 所示,结果表明成像质量满足了小 F 数和微扫描的要求。

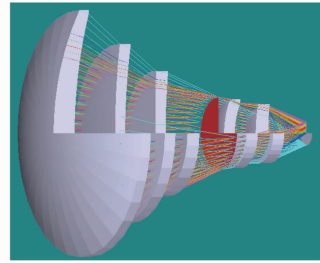


图 5 光路三维布局(最后一块为微扫描透镜)
Fig. 5 Three-dimensional layout of the optical system
(The last lens is a micro-scanning lens)

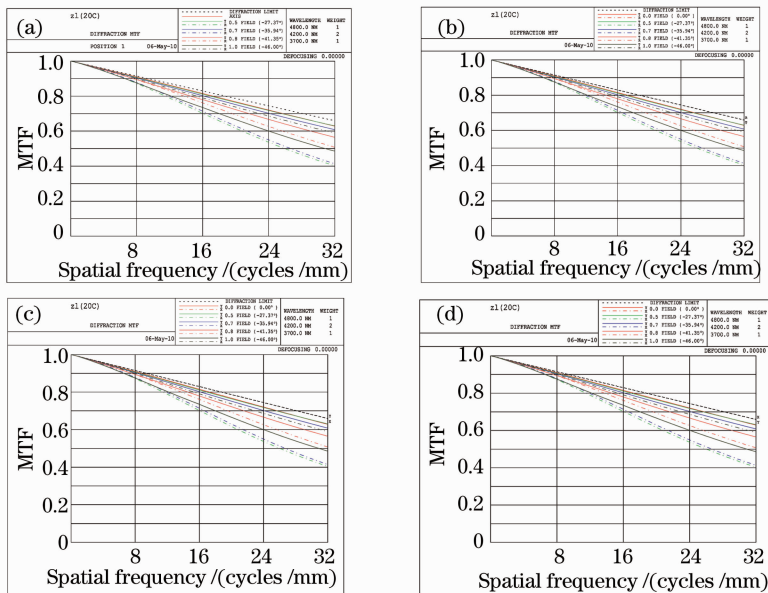


图 6 不同扫描位置调制传递函数(MTF)评价。(a) $(0,0)$; (b) $d_x/2,0$; (c) $(0,d_y/2)$; (d) $(d_x/2,d_y/2)$
Fig. 6 MTFs of different micro-scanning positions. (a) $(0,0)$; (b) $d_x/2,0$; (c) $(0,d_y/2)$; (d) $(d_x/2,d_y/2)$

4.4 微扫描机构设计

微扫描机构是保证微扫描光学系统成像质量的关键因素。微扫描属于精密位移系统,机构比较复杂,在机构设计上不但要保证光学系统的精度,还要实现光学元件在水平和垂直两个方向的直线位移,主要通过机械方法使光学系统与探测器之间形成可控的位移,实现微扫描。图 7 是利用压电陶瓷微位移装置实现透镜微扫描的原理图,压电陶瓷微位移装置具有很高的到位精度和重复精度,可以实现纳米级的精度控制^[3]。

由于光学系统由固定组和微动组两部分组成,机构也相应地分为固定镜筒部分和微动镜筒部分。微动镜筒由镜筒、压电微位移驱动器、支架组成,其中压电微位移驱动器选用法国 CEDRAT 公司产品,实现横向和纵向微位移的控制。固定组镜筒及微动部分结构示意图如图 8 所示。

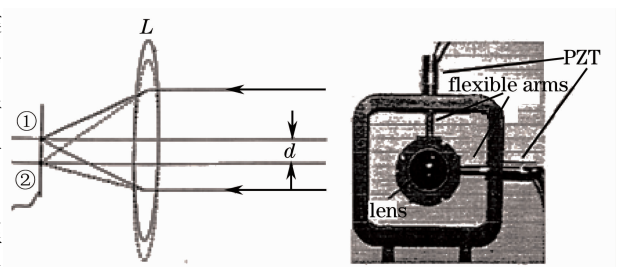


图 7 透镜微扫描原理及压电驱动示意图
Fig. 7 Principle of lens micro-scanning and schematic of PZT driving

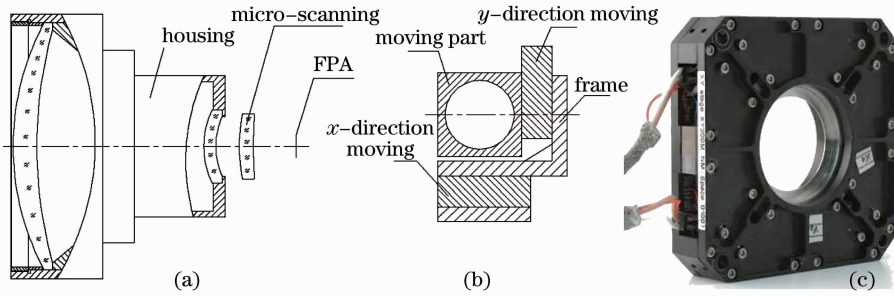


图8 微扫描机构设计示意图。(a)固定组;(b)微动组;(c)微位移器件

Fig.8 Micro-scanning structure design. (a) Fixed part; (b) moving part; (c) micro displacement device

4.5 微扫描图像重构

微扫描图像重构是通过对多幅具有互补信息的低分辨率图像的处理来重构一幅高分辨率图像,如图9所示。利用微扫描图像重构技术,可以在不改变成像系统的前提下,达到提高图像空间分辨率的目的^[4,5]。

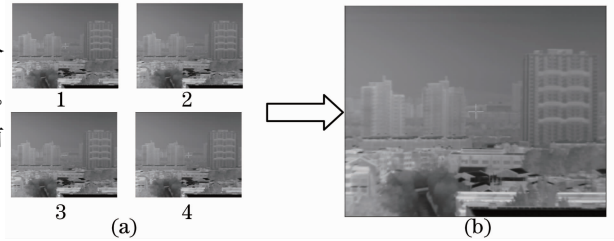


图9 微扫描图像重构。(a)多幅低分辨率图像;
(b)高分辨率图像

Fig.9 Reconstruction of micro-scanning images. (a) Low-resolution images; (b) reconstructed high-resolution image

5 微扫描技术在机载光电探测领域中的应用

从国外机载微扫描红外产品的研制情况分析,微扫描技术的应用方向主要有两个:

1) 机载侦察成像系统。微扫描技术在该类系统中的应用,可以在保持原系统空间尺寸不变的条件下有效地提高系统的空间分辨率,或者在保持空间分辨率不变的情况下有效地缩减系统的空间尺寸。

2) 大视场红外告警系统。微扫描技术在该类系统中的应用,可以提高大视场光学系统的空间分辨率。在兼顾大视场的同时获得高的空间分辨率,适用于导弹威胁逼近告警、态势感知、辅助导航等大视场系统的需求。

6 结束语

微扫描技术是随着红外焦平面阵列器件的出现而引入的新技术,是一种提高现有器件分辨率、使焦平面阵列上的每个像元发挥最佳性能的有效途径。其主要优点有:与未采用微扫描技术的红外成像系统相比,分辨率得到提高;消除了凝视阵列探测器采样的不足和混淆;减少操作人员的疲劳,提高了人机功效。

在现代军事应用方面,微扫描技术在夜视夜战产品中占有极其重要的地位。微扫描技术可以在保持原系统空间尺寸不变的条件下有效地提高系统的空间分辨率,或者在保持空间分辨率不变的情况下有效地缩减系统的空间尺寸。利用微扫描技术可以大幅提高得到的目标图像的分辨率,便于目标的探测与识别。因此,微扫描技术在红外成像系统中起着越来越重要的作用,有着广阔的市场应用前景和可以预期的巨大经济效益。

参 考 文 献

- Xu Chao, Jin Weiqi, Li Yaqiong. Optical microscanner technique and realization[J]. *Infrared Technology*, 2006, **28**(6): 338~342
徐超, 金伟其, 李雅琼. 光学微扫描器技术及其实现方式[J]. *红外技术*, 2006, **28**(6): 338~342
- Wu Xinshe, Cai Yi. Techniques of optical microscan in staring infrared imaging system[J]. *Infrared and Millimeter Waves*, 2007, **26**(1): 10~14
吴新社, 蔡毅. 红外凝视成像系统中的光学微扫描技术[J]. *红外与毫米波学报*, 2007, **26**(1): 10~14
- Sun Baoyu, Yue Xiaofeng, Wang Dengyue. Research of a micro-displacement compensation mechanism based on piezoelectric actuator[J]. *J. Changchun University of Technology*, 2004, **25**(1): 38~40
孙宝玉, 岳晓峰, 王登月. 压电式微位移补偿机构[J]. *长春工业大学学报*, 2004, **25**(1): 38~40

- 4 Zhang Nan, Jin Weiqi, Su Pinghua *et al.*. Research and recent advance of high resolution infrared image reconstruction technology[J]. *Acta Armamentarii*, 2005, **26**(2): 173~176
张楠, 金伟其, 苏秉华等. 高分辨率红外热图像重建算法的进展及研究[J]. 兵工学报, 2005, **26**(2): 173~176
- 5 Bai Junqi, Chen Qian, Wang Xianya. An improved high-resolution reconstruction algorithm for staring infrared image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 86~90
白俊奇, 陈钱, 王娴雅. 一种改进的凝视红外图像高分辨率重建算法[J]. 光学学报, 2010, **30**(1): 86~90