

## 面阵探测器连续扫描成像光学系统

于洋<sup>1</sup>, 王世勇<sup>1</sup>, 蹇毅<sup>1</sup>, 陈珺<sup>2</sup>, 代具亭<sup>1</sup>

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083; 2. 中国地质大学 自动化学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 研制了一套用于面阵探测器 360°连续扫描成像的红外光学系统。该光学系统包含了一个无光焦度的望远镜、一个方位补偿摆镜及一个二次成像物镜, 采用了制冷型面阵红外探测器。引入了方位补偿摆镜, 按二倍角关系朝相反方向摆动, 解决了面阵探测器连续扫描中的成像拖尾与模糊问题。采用了像方扫描方式, 使得摆镜透光尺寸由物方扫描的大约 40 mm×220 mm 缩减至目前 14 mm×22 mm, 摆镜质量减轻了 95%以上, 摆动频率可达 100 Hz, 使系统可在 1 s 内完成对 360°方位的扫描成像。系统结构简洁紧凑, 共由八片透镜以及一片反射镜组成, 像质接近衍射限。实验室测试结果表明: 方位补偿摆镜固定时, 对小圆靶成像有明显拖尾成长条状; 而开启摆镜摆扫之后, 小圆靶成像清晰无变形, 成像效果接近凝视型。

**关键词:** 像方扫描; 面阵探测器; 360°连续扫描; 方位补偿; 消模糊

**中图分类号:** TN21 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0118002

## Realization of an optical system based on continuous-scan focal plane array

Yu Yang<sup>1</sup>, Wang Shiyong<sup>1</sup>, Jian Yi<sup>1</sup>, Chen Jun<sup>2</sup>, Dai Juting<sup>1</sup>

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. School of Automation, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** One set of infrared optical system which was based on a 360° continuous-scan focal plane array was realized. This optical system contained one afocal telescope, one compensation scan-mirror, and one re-imaging object lens. A cooled focal plane array sensor was utilized. The scan-mirror was used for azimuth compensation. It scanned at a special angular velocity according to the double angle relationship in the opposite direction, thus the system could solve the problem of image smear. Image space scanning was adopted by the system, thus the size of the scan-mirror can be reduced from about 40 mm×210 mm under object space scanning to 14 mm×22 mm now, and the weight of the scan-mirror could be reduced by more than 95%. Now the swing frequency could reach 100 Hz, which enabled the system to finish 360° azimuth-scan in one second. This system was succinct and compact. It contained eight pieces of lens and one piece of reflective mirror. The image quality was close to the diffractive limit. The laboratory test result shows that, when the scan-mirror is fixed, the image of the small circle hole is blurred, and has smear ghost

收稿日期: 2015-05-10; 修订日期: 2015-06-18

基金项目: 国家十二五国防预研项目(41101050501); 上海市现场物证重点实验室基金(2011xcwzk04);

中科院上海技术物理所三期创新项目(Q-ZY-108)

作者简介: 于洋(1984-), 女, 副研究员, 博士, 主要从事红外光电成像技术与红外光学系统设计方面的研究。

Email: fishinwater99@hotmail.com

phenomenon. After the scan-mirror compensation, the image of the circle hole is clear and without smear or distortion, and the image quality is similar to that of the starring system.

**Key words:** image space scan; focal plane array; 360° continuous-scan; azimuth compensation; removing image smear

## 0 引言

红外搜索跟踪(IRST)系统是一种采用被动方式工作的成像探测设备,可完成对目标的搜索、跟踪和定位,具有隐蔽性好、探测范围广、定位精度高、识别伪装能力强以及抗电磁干扰等多种优点,被认为是雷达理想的辅助和替代设备之一,已得到了广泛关注和大力发展<sup>[1]</sup>。

第二代 IRST 系统采用扫描型线列探测器<sup>[2]</sup>,可实现全方位扫描成像,但其积分时间受扫描速率所限,通常花在每个像素的时间都在数十微秒量级,因此,输出的信号强度较低,信噪比受限。第三代 IRST 系统采用凝视型面阵焦平面探测器<sup>[3]</sup>,其积分时间要长得多,普遍在毫秒量级,因此探测能力大为提高<sup>[4-5]</sup>。

通常情况下,凝视型面阵探测器视场受限,特别是为了提高作用距离,一般的凝视型红外成像系统的焦距尽量拉长,以获取更小的瞬时视场。这就导致其视场不能覆盖所需的空域。如果采用多个面阵探测器分视场凝视的方式,将大大增加系统的体积、质量,且成本昂贵。因此,连续扫描型面阵探测器成像系统就有了应用价值。

但是,连续扫描型面阵成像系统在积分时间内的扫描,会导致焦平面和景物之间产生相对运动,造成拖尾,使图像变得模糊。这是面阵探测器应用于扫描型系统的最大障碍。

国外已有少量国家针对扫描型面阵探测器开展了相关应用研究,以法国的 VAMPIR 系统<sup>[6]</sup>和以色列的 ELTA 系统<sup>[7]</sup>为代表。国内相关研究开展较少,仅有南京理工大学某课题组<sup>[8-10]</sup>从电子学角度,在信号处理算法上研究了这种系统的应用,光学系统的报道尚属空白。

为此,文中从光学稳像角度出发,研制了一套能够应用于面阵探测器 360°连续扫描成像的红外光学系统。该光学系统由一个望远镜、一个方位补偿摆镜、一个二次成像物镜组成。在面阵探测器扫描的积

分时间内,由方位补偿摆镜以特定速率朝相反方向摆动,对方位视场的变化进行补偿。

实验室测试结果表明:该光学系统可以有效地保证积分时间内成像清晰,将拖尾与扫描模糊现象降至最低。

## 1 系统原理

### 1.1 系统组成

面阵扫描连续成像系统由无光焦度的望远镜、方位补偿摆镜、二次成像物镜、红外面阵探测器以及方位扫描转台共同组成。

其中望远镜的放大倍率  $M > 1$ , 即其出射平行光高度仅为入射平行光高度的  $1/M$ , 从而实现了光束的压缩。采用像方扫描<sup>[11]</sup>的方式,在望远镜的出瞳处放置方位补偿摆镜。将摆镜放在被望远镜压缩过的光束内,可以有效缩小摆镜尺寸,减轻摆镜及机械结构的质量,从而提高摆镜的摆动频率,实现更高的扫描速率。

### 1.2 工作原理

系统在工作状态时,方位扫描转台以稳定的角速度连续转动,位于转台上的面阵探测器在转动过程中完成积分读出。面阵探测器每次积分形成一帧图像,经过转台一圈 360°扫描后,完成多次积分,形成多帧图像。每帧图像的视场有少许重叠,以保证探测 360°方位空域无死角。在后期图像处理时,将由信号处理系统除去重叠区域,从而拼接成 360°全景图像。该重叠拼接方法的另一优势在于,信号处理软件将根据帧与帧之间的重叠图像完成图像的像素级配准,剔除冗余部分,形成 360°全景图像。方位转台每圈起点 0°与终点 360°位置不需要精确重合。

### 1.3 望远镜+像方扫描

常用的扫描方式有两种,物方扫描与像方扫描。物方扫描指在小视场物镜前的光路中加入扫描部件,以获得较大的空间覆盖。物方扫描的原理比较简单,但缺点是物镜口径较大,要实现大范围扫描,特别是二维扫描,机械装置比较复杂笨重。

而像方扫描则指在大视场物镜后的会聚光路中加入扫描部件。像方扫描的优点是结构紧凑,扫描部件小巧,但不足之处则在于在会聚光路中扫描会引起像点散焦;而且要得到高像质,对设计要求较高。

而该光学系统通过望远镜压缩光束加上摆镜像方扫描的方式,既能获得小巧的摆镜尺寸,又由于摆镜的摆动不是在汇聚光束中完成,而是在望远镜的平行光束中摆动,因此摆动对像质基本不产生影响,综合了物方扫描与像方扫描二者的优势,具体见下文稳像原理叙述。

#### 1.4 稳像原理

该光学系统稳像消模糊的原理如下。主要目标是保证面阵探测器在一个积分时间内,进入探测器的光线视场保持稳定,否则会产生模糊拖影问题。具体实现方式则是令摆镜与转台绕同一轴作反向摆动,根据平面反射镜出射角是入射角二倍的原用来精确控制摆镜的摆动角速度,以便在面阵探测器扫描的每帧积分时间内实现视场角的冻结,从而实现稳像的设计目标。

摆镜角速度  $\omega$  与转台角速度  $\Omega$ 、探测器积分时间  $t$ 、望远镜放大倍率  $M$ 、摆镜放置位置等因素有关。

随着方位扫描转台的转动,面阵探测器每帧空域转动角度为  $\Omega t$ 。根据平面反射镜出射角是入射角二倍的原理,若摆镜采用物方扫描方式,则摆镜只需在每帧时间内向回摆动( $\Omega t/2$ )角度,即摆镜角速度为  $\omega=\Omega/2$ ,即可实现视场角的冻结。但物方扫描的摆镜必须位于整个光学系统最前端,其尺寸会相当庞大,相应地摆动频率很难提高。

该系统为减小摆镜体积,采用的是像方扫描方式。由于望远镜光束出射角度是入射角度的  $M$  倍,则位于像方的摆镜只需在每帧时间内向回摆动( $M\Omega t/2$ )角度,即其摆动角速度  $\omega=M\Omega/2$  即可实现对方位角的补偿。

上述方法使得望远镜加像方扫描摆镜在每帧积分时间内的摆动,有效抵消了方位转台的转动,从而保证在每帧积分时间内,通过二次成像物镜到达面阵探测器的光线的视场保持冻结状态,达到类似于凝视型面阵探测器成像的设计效果。

## 2 光学系统设计

### 2.1 光瞳衔接匹配

具体说来,该光学系统由一个无光焦度的望远

镜、一个位于望远镜出瞳位置的摆镜、以及一个二次成像物镜组成。

按光瞳衔接原则,这里物镜的入瞳要与望远镜的出瞳匹配,物镜的出瞳要与制冷型红外面阵探测器的冷光阑匹配,因此物镜必须采用二次成像的结构形式。否则如果不采用二次成像的结构形式,则物镜的出瞳与探测器冷光阑匹配之后,其入瞳必定位于探测器的焦平面之后,则无法与望远镜的出瞳匹配了。

文中在设计出望远镜及二次成像物镜初步可用的初始结构之后,将其合并并在 ZEMAX 中进行统一优化,通过添加约束条件,控制望远镜的出瞳与二次成像物镜的入瞳匹配,获得理想的成像质量。

### 2.2 摆镜像方扫描对像质的影响分析

前文已经提到,摆镜位于望远镜的出瞳位置。由望远镜无光焦度这一光学特性,不同角度入射的平行光会出射为不同角度的平行光。出射角为入射角的  $M$  倍,但出射光束仍然是平行光束。因此,方位补偿摆镜在平行光路中摆动,不会影响成像质量。

### 2.3 摆镜像方扫描对视场的影响分析

摆镜像方扫描会对系统视场造成影响,即摆镜扫描将引入扫描视场。并且在光学系统计算过程中,应同时设置多个关键点,采用多重结构,控制摆镜不同角度的像质水平均达到理想状态。

由于摆镜摆动过程包含了非线性加速启动区和线性摆动区,因此,系统将通过同步信号控制探测器的积分时间位于摆镜的线性摆动区内。因此,摆镜的摆动是线性的。该系统在设计过程中,只需要设计 3 个关键点,分别是摆镜摆动角度的最大值、最小值与零位,即可使不同角度的像质水平均达到理想状态。

### 2.4 摆镜尺寸控制

如果不考虑摆镜的尺寸大小的问题,摆镜位置实际上只要放在望远镜出射的平行光束中的任意位置即可。但这种情况下,由于来回扫描,扫描视场会使得摆镜的尺寸比较大。为了严格控制摆镜尺寸最小化,需要令望远镜出瞳与二次成像物镜的入瞳位置严格匹配,并将摆镜放在望远镜出瞳位置处,这样无论扫描视场多大,摆镜的尺寸都只由望远镜出瞳的大小决定,不会变大。

### 2.5 光学系统设计结果

按照上述原理设计的光学系统的具体参数如表 1 与表 2 所示。该系统共由 8 片透镜和 1 片摆镜组成,

主要采用常见的硅和锗材料,仅包含 1 个圆锥曲面,以便于备料和加工。

表1 探测器参数

Tab.1 Focal plane array parameter

Item	Value
Pixel number	320×256
Pixel size/ $\mu\text{m}$	30×30
Spectral range/ $\mu\text{m}$	3.7-4.8
$F$ number	2
Type	Cooled FPA

表 2 光学系统参数

Tab.2 Optical system parameter

Item	Value
Focal length/mm	73
Field of view (FOV)	$7.5^\circ \times 6^\circ$
Entrance pupil diameter/mm	36.5
$F$ number	2
Note	100% cold-shield match

前组望远镜为 3 片式结构,后组二次成像物镜由 5 片镜片组成。为了更好地消色差,后组系统引入了 1 片蓝宝石镜片,尺寸较小,成本可控。

光学系统光路图、立体图、各种像差曲线图如图 1~图 5 所示。光学系统的最大镜片口径为 162 mm,体积仅为 303 mm×184 mm×162 mm。

由光学系统光路图可见,经过望远镜的光束压缩,摆镜尺寸得到了有效地控制。实际设计结果中,摆镜通光尺寸仅为 14 mm×22 mm,便于实现高频摆动。

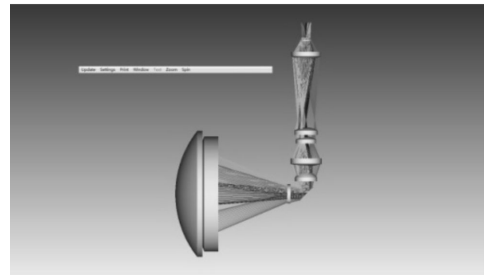


图 2 光学系统立体图

Fig.2 3D Diagram of optical system

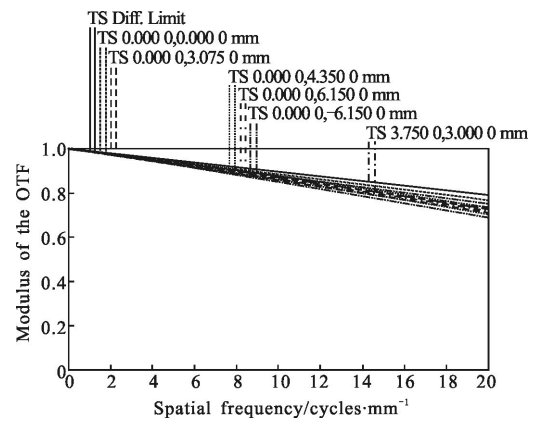


图 3 光学系统 MTF 曲线图

Fig.3 MTF of optical system

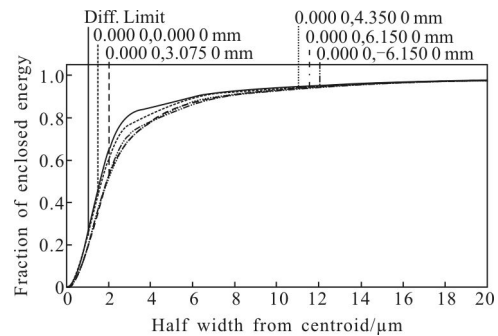


图 4 光学系统能量集中度曲线图

Fig.4 Encircled energy curves diagram of optical system

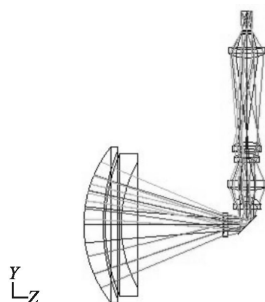


图 1 光学系统光路图

Fig.1 Light path diagram of optical system

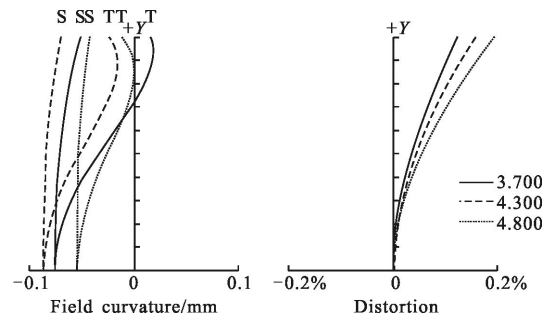


图 5 光学系统场曲畸变曲线图

Fig.5 Field curvature and distortion of optical system

调制传递函数 MTF 是评价光学系统像质的最主要标准之一<sup>[12]</sup>。由图 3 可见,在空间频率 20 lp/mm 处,各视场的传函值都接近衍射极限。从图 4 可见,在探测器一个像元内的能量分布,轴上点的能量集中度超过了 89%,轴外点的能量集中度超过了 86%,与能量集中度的衍射极限 89.73% 非常接近。由图 5 可见,本光学系统成像的畸变很小。综合上述,该光学系统的像质接近衍射极限,成像效果理想。

### 3 实验结果

为了对摆镜像方扫描的稳像效果进行验证,对采用圆靶小黑体的平行光管进行了成像对比实验。先令摆镜静止,只让转台转动,测试未进行方位补偿时的成像效果,如图 6 所示。结果显示:圆靶小黑体的圆形像点拖尾成了长条形。然后开启摆镜,同时让转台转动,测试了方位补偿之后的成像效果,如图 7 所示。结果表明:圆靶小黑体成像时不再有拖尾,形成了清晰的圆形像点。

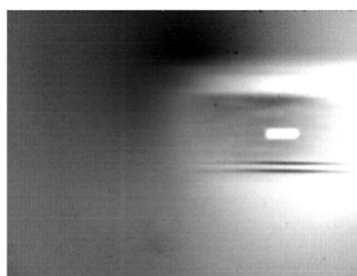


图 6 摆镜静止成像效果图

Fig.6 Imaging effect when the scan-mirror was fixed



图 7 摆镜开启成像效果图

Fig.7 Imaging effect when the scan-mirror was scanning

### 4 结束语

研制了一套基于面阵探测器 360°扫描成像的红外光学系统。该系统采用望远镜压缩光束配合像方扫描的方式来代替物方扫描方式,极大地减小了摆镜体积,减轻了摆镜质量,换取了更高的扫描速率。

采用单个面阵探测器,配合 360°连续扫描方式,

既有效控制了系统成本,又综合了扫描型与凝视型红外成像系统的优势,获得了更高的空间分辨率、更长的积分时间、更高的响应灵敏度,以及更大的监测视场。

实验结果表明:文中所研制的采用摆镜像方扫描进行方位补偿的光学系统,能有效对方位转台转动带来的方位视场角的变化进行补偿,消除面阵探测器扫描的积分时间内的拖影与模糊,获得接近凝视型成像的清晰稳定的成像效果。

### 参考文献:

- [1] Zhou Shichun. Introduce to Senior Infrared Electro-optical Engineering [M]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2009. (in Chinese)
- [2] Wang Chunyong. The scanning and starring FPA in infrared systems[J]. *Infrared Technology*, 2003, 25(1): 1-5. (in Chinese)
- [3] Fu Yanpeng, Jin Ning, Li Xunniu, et al. Airborne novel design for MWIR continuous zoom optical system [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2013, 32(4): 309-312. (in Chinese)
- [4] Han Genjia. Present status and development trend of shipborne IRSTs[J]. *Modern Defence Technology*, 2007, 35(3): 109-113. (in Chinese)
- [5] Wang Bingxue, Zhang Qiheng, Chen Changbin, et al. A mathematical model for operating range of a staring IR search and track system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(7): 8-11. (in Chinese)
- [6] Pierre-Olivier Nougues, Paul Baize, Flavien Roland, et al. Third-generation naval IRST using the step-and-stare architecture[C]//SPIE, 2008, 6940:69401B.
- [7] Zvi Schneider, Moshe Meidan, Asher Lotan. ELTA's IRST defense and self-protection system[C]//SPIE, 2007, 6542: 654232.
- [8] Hu Yongsheng, Chen Qian, Gu Guohua, et al. IRST system based on scanning area FPA and its target detectability analysis[J]. *Infrared Technology*, 2008, 30(2): 71-74. (in Chinese)
- [9] Qian Weixian, Guan Zhiqiang, Chen Qian, et al. Target detection method of focal plane array search system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(11): 3066-3071.
- [10] Guan Zhiqiang, Chen Qian, Gu Guohua, et al. A new method used area infrared focal plane array detector for omnidirectional searching and tracking [J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(2): 150-155. (in Chinese)
- [11] Li Gang, Fan Xuewu, Zou Gangyi, et al. Design of space optical system with double infrared waveband based on image space scanning [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 861-866. (in Chinese)
- [12] Zhang Liang, Mao Xin, Wang Helong. The design of MWIR/LWIR multiple FOV optical system [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2013, 32(3): 254-258. (in Chinese)