

用于光学像移补偿的红外望远光学系统

焦明印, 张 勇, 王一力
(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要:为提高搜索效率和目标探测概率,红外搜索警戒系统越来越多地采用了焦平面成像器件.工作时必须保证成像器件具有一定的积分时间,才能达到要求的信噪比,为此必须采取像移补偿措施.常用的光学式像移补偿利用位于望远光学系统后面反射镜的反向摆动,使场景的光学图像在积分时间内与焦平面成像器件相对静止,以消除平台在连续转动过程中产生的像移或拖尾.本文给出了一种像方视场角与物方视场角具有线性关系的红外望远光学系统,系统工作波段为 $7.7 \sim 10.3 \mu\text{m}$,放大率为 $10\times$.该系统可用于采用焦平面探测器的搜索警戒装置,通过像移补偿反射镜或透射平板的摆动补偿平台转动时产生的像移,计算表明全视场范围内的残留像移不大于 $1 \mu\text{m}$.

关键词:像移补偿;红外光学设计;搜索警戒系统

中图分类号:TH751 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2020.10.012

An optical system of infrared telescope used for optically compensation of image motion

JIAO Ming-yin, ZHANG Yong, WANG Yi-li
(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to increase the searching efficiency and detection probability, more and more Focal Plane Detectors are used in infrared searing or surveillance systems. The optical image must be static to detector for a period of time to reach the demand ratio of signal to noise, therefore a compensation for image motion must be applied. The optical compensation which is commonly used exploit a wiggling mirror or transparent plane after a telescope to compensate the imaging motion generated by platform rotation. An optical system of infrared telescope that the image field of view correlated linearly with the objective field of view is described in this paper, and the wave band of the optical system is $7.7 \sim 10.3 \mu\text{m}$ with magnification of $10\times$. The telescope can be used in infrared searching system, where a wiggling mirror or transparent plane is used for compensating the imaging motion generated by platform rotation. The calculating results show that the residual image motion is less than $1 \mu\text{m}$ in the whole field of view.

Keywords: image motion compensation; infrared optical design; searching and surveillance system

1 引 言

周视光电侦察或搜索警戒系统工作时,须使成像器件相对于所关注的物方空间作相对运动,以完成对大空间范围的侦察、搜索或警戒,一般采

用搭载光电系统的平台做步进或连续的转动来实现,其中步进转动因控制难度大、搜索效率低而较少使用。目前大部分周视光电侦察或搜索警戒系统采用了焦平面成像器件,因其属于凝视器件,工

作时必须停留一定的积分时间,才能达到要求的信噪比。采用焦平面成像器件的光电侦察、搜索或警戒设备必须采取像移补偿措施,以消除平台在连续转动过程中产生的像移或拖尾。像移补偿的手段有光学式、集成式、电子式及图像式等^[1-6],其中光学式像移补偿是利用光路中的物方或像方扫描反射镜或透射平板,在平台运动时使反射镜同步反向摆动,进而使外界景物的光学图像在积分时间内与焦平面成像器件相对静止^[7]。为了减小补偿反射镜及伺服单元的尺寸重量,可将其放置于望远镜像方的平行光路中,以补偿平台转动引起的像移。理想的像移补偿应该能够消除整个光学视场内的图像拖尾,但由于望远光学系统的像方视场角与物方视场角的非线性关系,计算表明普通红外望远系统在边缘视场存在显著的残留像移,本文设计了一种像方视场角与物方视场角具有线性关系的红外望远光学系统,系统工作波段为 $7.7 \sim 10.3 \mu\text{m}$,放大率为 $10\times$,系统使用单元尺寸为 $15 \mu\text{m}$ 的 640×512 元焦平面探测器,可有效减小残留像移。

2 残留像移的产生

如图1所示,物镜1至物镜4构成望远光学系统,当光电系统进行周视搜索时通过反向摆动像移补偿反射镜实现“凝视”,即光学像面相对于探测器靶面不动,但由于视场角度的不同,在反射镜摆动时像面上不同点在探测器靶面上的位置变化是有微量差别的。实际产品的分辨力和最小可分辨温差的测试表明,轴外视场相对于静止状态有较大降低。对于普通望远光学系统,其像方视场角的正切与对应的物方视场角的正切有以下关系:

$$\tan(\text{FOV}_I/2) = \Gamma \times \tan(\text{FOV}_O/2) \quad (1)$$

其中, $\text{FOV}_I/2$ 为出射光线与光轴的夹角即像方半视场角; $\text{FOV}_O/2$ 为与其对应的入射光线与光轴的夹角即物方半视场角; Γ 为望远光学系统的放大率。假设补偿反射镜后光学系统的焦距为 f'_T , 则光敏面上像高为:

$$y'_T = f'_T \tan(\text{FOV}_I/2) \quad (2)$$

反射镜做补偿摆动时,相当于 $\text{FOV}_I/2$ 发生了微小变化,对式(2)求微分可得:

$$\Delta y'_T = [f'_T / \cos^2(\text{FOV}_I/2)] \cdot \Delta(\text{FOV}_I/2) \quad (3)$$

式(3)中像高变化量与视场 $\text{FOV}_I/2$ (单位为弧度)有关,即不同视场像点的变化量不同,反射镜的补偿摆动只能补偿一个视场的像移,其他视场则残留一定量的像移。表1为某放大率为 $10\times$ 的红外望远光学系统在转动 0.2° 、并对 0° 视场的像移进行补偿后,其他视场的残留像移量(即补偿后像高度与补偿前像高度之差,计算时望远系统后接焦距为 20 mm 的理想透镜),这里将周视及补偿过程分解为首先整体转动 0.2° , 然后补偿反射镜反向摆动 1° (即 $10 \times 0.2^\circ/2$) 使 0° 视场像高为0,即对 0° 视场完全实现像移补偿。

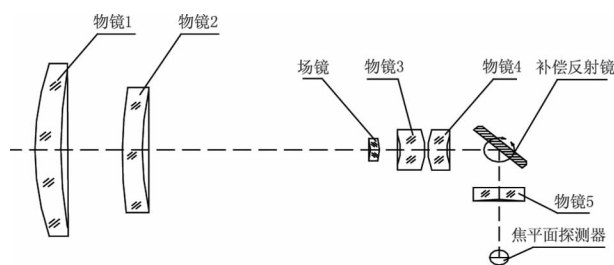


图1 光学系统构成示意图

Fig. 1 Structure representation of the optical system

表1 某10倍红外望远光学系统残留像移

Tab. 1 The residual image motion for a $10\times$ infrared optical telescope

物方 视场角/ ($^\circ$)	像方 视场角/ ($^\circ$)	补偿前 像高度 /mm	补偿后 像高度 /mm	残留 像移量 /m
0	0	0	0	0
0.20	2.00	-0.698	-0.697	0.001
0.41	4.107	-1.436	-1.432	0.004
0.50	5.013	-1.754	-1.749	0.005
0.69	6.935	-2.432	-2.421	0.011
0.85	8.566	-3.012	-3.001	0.011
0.97	9.799	-3.453	-3.436	0.017
1.25	12.716	-4.512	-4.470	0.042
1.375	14.041	-5.00	-4.941	0.059

由表1可见, 1.375° 视场残留像移量达到了 $59 \mu\text{m}$, 对于单元尺寸为 $15 \mu\text{m}$ 的焦平面探测器

件,约为4个像素,0.85°视场的残留像移量约为1个像素,表现为系统作周视转动时整个视场内只有中心局部视场图像清晰,其余视场则图像模糊或拖尾,严重影响光电侦察或搜索预警系统的性能。本文设计的红外望远光学系统按视场角度的不同,人为引入负畸变,使望远系统的像方视场角 $FOV_I/2$ 按线性关系正比于物方视场角 $FOV_O/2$,可使全视场范围内的像移都得到有效补偿,即:

$$FOV_I/2 = \Gamma \times FOV_O/2 \quad (4)$$

3 设计要求及系统构成

设计要求为透射式红外望远光学系统,工作波段 $W = (7.7 - 10.3) \mu\text{m}$,入瞳直径 $D = \phi 100 \text{ mm}$,出瞳直径 $d = 10 \text{ mm}$,放大率 $\Gamma = 10$ 倍,瞬时视场: H (水平) $\times V$ (垂直) $= \pm 1.375^\circ \times \pm 1.1^\circ$,周视视场 $n \times 360^\circ$,使用单元尺寸为 $15 \mu\text{m}$ 的 640×512 元焦平面探测器,工作方式见图1。由红外望远光学系统与像移补偿反射镜、探测器前置透镜5、焦平面探测器共同构成 $n \times 360^\circ$ 周视搜索/跟踪光电装置。红外望远光学系统由透镜1至透镜4组成,透镜1和透镜2组成望远光学系统的物镜,透镜3至透镜4构成望远光学系统的目镜,透镜3前设置有场镜。透镜2材料为化学汽相沉积硒化锌,以消除物镜的色差,其余材料均为单晶锗。加入场镜的目的是在保证100%冷屏蔽效率的情况下更好地控制望远系统的畸变,使像方视场角与物方视场角满足式(4),设计中控制相对畸变Dist满足下式:

$$\text{Dist} = [FOV_I/2 - \tan(FOV_I/2)] / \tan(FOV_I/2) \quad (5)$$

式中, $FOV_O/2$ 为以弧度为单位物方半视场角,本文中对最大水平视场的相对畸变为-1.9%,不会影响使用。

4 设计结果

表2为详细设计结果,图2至图4分别给出了所设计望远镜的像差曲线、几何光学传递函数及点列斑图形,系统成像质量满足使用要求。表3为补偿后系统的残留像移,望远镜物方视场角与像方视场角线性度曲线见图5。

表2 光学系统详细参数

Tab. 2 Detailed parameters of the optical system

名称	曲率半径 /mm	有效口径 /mm	面型 特性	厚度(间隔) /mm	材料
透镜1	176.6	$\phi 132$	高次非球面	16.5	单晶锗
	244.3	$\phi 125$	球面	35	空气
透镜2	657.7	$\phi 104$	球面	13.5	硒化锌
	455.0	$\phi 99$	球面	141.46	空气
场镜	-27.16	$\phi 13.5$	球面	5	单晶锗
	-29.31	$\phi 16$	球面	12.44	空气
透镜3	-40.55	$\phi 19.5$	球面	15.5	单晶锗
	-46.03	$\phi 26$	球面	0.5	空气
透镜4	45.5	$\phi 26$	球面	10	单晶锗
	60.81	$\phi 22$	球面	18	空气
备注	透镜1前表面采用高次非球面,当坐标原点位于其顶点时,面型方程为 $Z(h) = \frac{ch^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2h^2 + Ah^4 + Bh^6}}$ 其中 $h^2 = x^2 + y^2$, $c = 1/176.6$ 为顶点曲率, $k = -0.08001$ 为二次曲面系数, $A = 0.758460 \times 10^{-9}$ 、 $B = 0.487482 \times 10^{-13}$ 为高次非球面系数, Z 为光轴方向上曲面上的点离顶点的距离。				

表3 光学系统残留像移

Tab. 3 the residual image motion of the optical system

物方 视场角/ (°)	像方 视场角/ (°)	补偿前 像高度 /mm	补偿后 像高度 /mm	残留 像移量 /m
0	0	0	0	0
0.20	2.001	-0.699	-0.698	0.001
0.41	4.102	-1.434	-1.434	0
0.50	5.003	-1.750	-1.750	0
0.69	6.904	-2.421	-2.421	0
0.85	8.506	2.990	-2.990	0
0.97	9.707	-3.420	-3.420	0
1.25	12.51	-4.435	-4.436	0.001
1.375	13.761	-4.896	-4.897	0.001

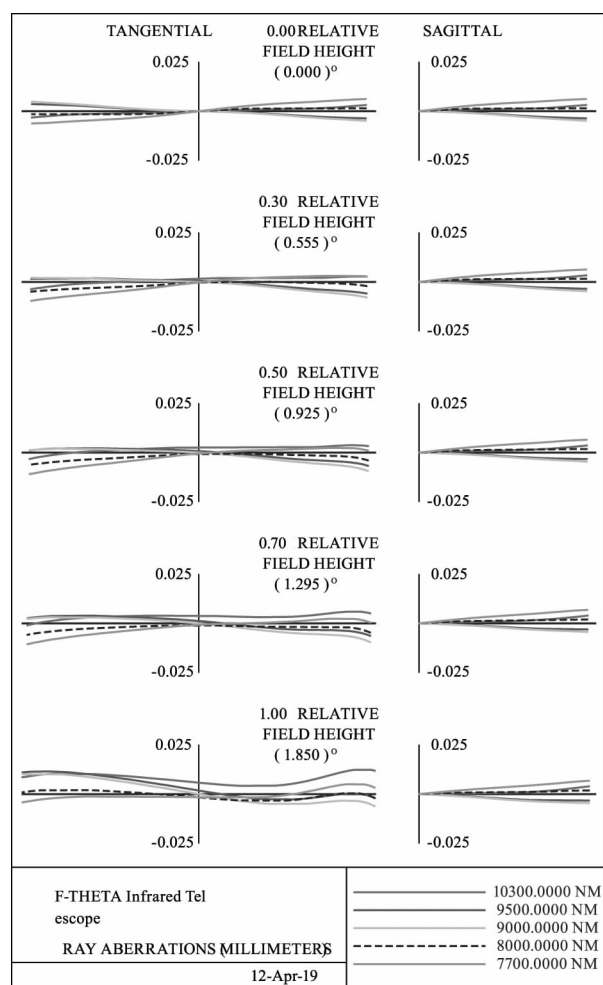


图 2 垂轴像差曲线(加焦距 20 mm 的理想透镜)

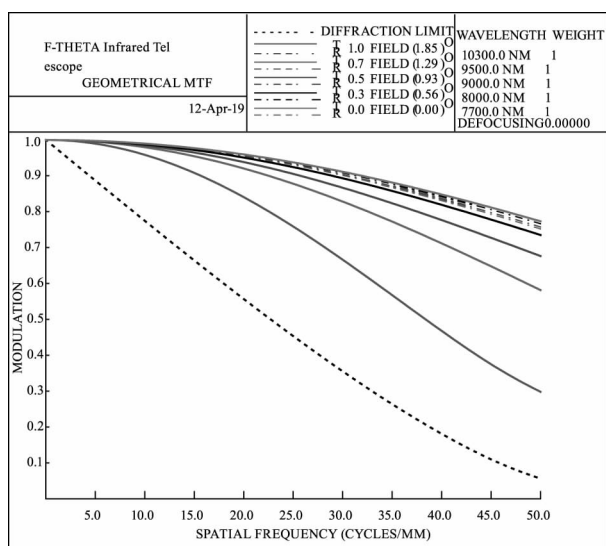
Fig. 2 Rim ray aberration
(with ideal lens of 20 mm EFL)

图 3 几何光学 MTF 曲线(加焦距 20 mm 的理想透镜)

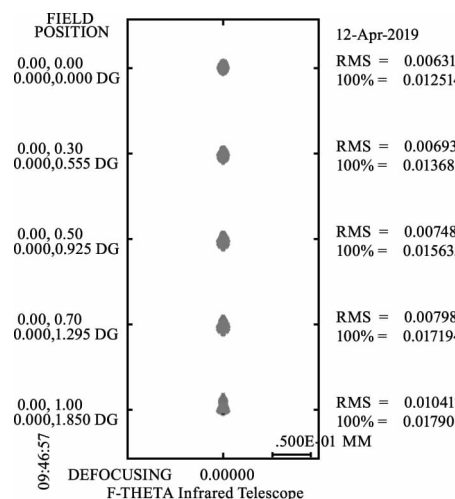
Fig. 3 The curves of Geometrical MTF
(with ideal lens of 20 mm EFL)

图 4 点列斑图形(加焦距 20 mm 的理想透镜)

Fig. 4 Spot diagrams (with ideal lens of 20 mm EFL)

4 结 论

如图 5,在物方视场角与像方视场角线性度曲线(的情况下,由表 3 可见,本设计的残留像移在 $1 \mu\text{m}$ 左右,小于探测器单元尺寸的 $1/10$ 。对于像方补偿的红外搜索/跟踪装置,像移补偿元件前的望远光学系统的像方视场角按线性关系正比于其物方视场角进行设计,可以显著减少残留像移。

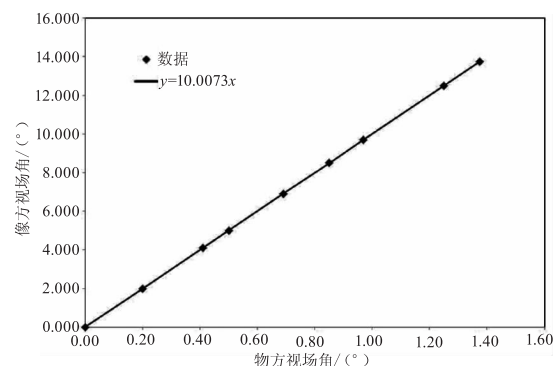


图 5 物方视场角与像方视场角线性度曲线

Fig. 5 Linearity curve of the objective FOV with imaginary FOV

参考文献:

- [1] Tan Chan. Research on two-dimensional image motion compensation of space-borne staring imager based on scanning control [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
谭婵. 基于扫描控制的空间凝视成像二维像移补偿技术研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2014.
- [2] Kuang Haipeng, Wang Dejiang, Sun Chongshang. On-chip compensation technology for scanning image motion of integrated reconnaissance and attack aerial camera [J]. La-

- ser & Infrared, 2015, 45(4): 415 – 421. (in Chinese)
- 匡海鹏, 王德江, 孙崇尚. 航空相机扫描像移片上补偿技术[J]. 激光与红外, 2015, 45(4): 415 – 421.
- [3] Zhang Yuxin, Liu Yu, Ge Wenqi. Development and prospect of image motion compensation technology[J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2010, 3(2): 112 – 118. (in Chinese)
- 张玉欣, 刘宇, 葛文奇. 像移补偿技术的发展与展望[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(2): 112 – 118.
- [4] Zhao Junli, Wu Yiming, Gao Limin, et al. Technology research on image motion compensation of the rotating double optical wedge[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(5): 1506 – 1511. (in Chinese)
- 赵军丽, 吴易明, 高立民, 等. 旋转双光楔系统用于像移补偿的技术研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1506 – 1511.
- [5] Chen Chaoshuai, Wang Shiyong, Li Fanming, et al. A kind of image motion compensation control technology using Real-Time LOS tracking forIRST system[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2018, 39(1): 95 – 99. (in Chinese)
- 陈超帅, 王世勇, 李范鸣, 等. 红外搜索跟踪系统的像移补偿设计分析[J]. 半导体光电, 2018, 39(1): 95 – 99.
- [6] Wang YiKun, Han GuiCheng, Qi HongXing, et al. Investigation of image motion compensation technique based on real-time LOS tracking[J]. J. Infrared Millim. Waves, 2015, 34(6): 757 – 762. (in Chinese)
- 王义坤, 韩贵丞, 齐洪兴, 等. 基于实时视轴跟踪的像移补偿技术研究[J]. 红外与毫米波学报, 2015, 34(6): 757 – 762.
- [7] Jiao Mingyin, Kang Wenli, Zhou Xiaobin. Optical Descanning technique in search and track systems using focal plane array detectors[J]. Journal of Applied Optics, 2017, 2017, 38(4): 521 – 525. (in Chinese)
- 焦明印, 康文莉, 周晓斌. 采用凝视器件的搜索跟踪系统中的扫描补偿光学技术[J]. 应用光学, 2017, 38(4): 521 – 525.