

空间高分辨率宽视场红外光学系统设计

梅 贵 翟 岩 苗健宇 李广泽 浦前帅

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要 针对高分辨率、宽覆盖面积、全天时海洋目标的红外侦察与搜索需求,设计了一种大口径、长焦距的同轴折反射式中波红外光学系统。其工作轨道高度为 1200 km,波段为 3.7~4.8 μm ,星下点地面像元分辨率优于 10 m。通过分析计算确定系统焦距为 3000 mm,相对孔径为 1:4。采用镜头前组摆扫方式实现了视场角 14.203°,地面覆盖宽度为 300 km。利用调焦机构在 10 $^{\circ}\text{C}$ ~30 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围内主动消热差,在奈奎斯特频率 21 lp/mm 处全视场调制传递函数(MTF)大于 0.39,接近衍射极限。实现了 100%冷光阑匹配以抑制系统自身的杂散辐射。设计结果表明,该系统各项性能指标和结构的可实现性均满足要求。

关键词 光学设计;中波红外;同轴折反射式系统;调制传递函数

中图分类号 TN216 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1222004

Design of a High Resolution and Wide Field Space Infrared Optical System

Mei Gui Zhai Yan Miao Jianyu Li Guangze Pu Qianshuai

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract According to the requirements on high-resolution, wide-field-of-view, all-time reconnaissance and search for maritime targets, a coaxial catadioptric optical system with medium wave infrared (MWIR) is designed. It operates at the orbit altitude of 1200 km with the wavelength spanning from 3.7 μm to 4.8 μm , and it presents the ground resolution of 10 m at nadir. After detailed analysis and calculation, the focal length of this system is 3000 mm, and the relative aperture is 1:4. The angle of field reaches 14.203°, and the earth area coverage can reach 300 km with scanning former lens group. A focusing mechanism is developed to correct thermal aberrations of the system from 10 $^{\circ}\text{C}$ to 30 $^{\circ}\text{C}$. The modulation transfer function (MTF) corresponding to the whole field of view (FOV) is larger than 0.39, which can approach diffraction limit at Nyquist frequency of 21 lp/mm. In order to suppress stray radiations, the optical system is optimized to realize 100% cold-shield-match efficiency. The above results show that the properties and structure feasibility of this optical system closely meet the requirements.

Key words optical design; medium wave infrared; coaxial catadioptric system; modulation transfer function

OCIS codes 220.4830; 040.3060; 110.3080

1 引 言

航天对地侦察是利用空间光学遥感器获取地球表面目标的属性信息,进行分析后从中获取情报的手段。海洋覆盖了地球表面 71% 的面积,在军事和民生等方面有着重大的意义。海洋目标主要包括水面舰船、潜艇、航母(编队)以及某些大型人造散落物、标志物、受污染海区等,20 世纪 60 年代末,人们

就开始考虑使用空间遥感器搜索、跟踪和监视海洋目标。近年来,天基海洋目标的侦察在海洋目标预警、监视、态势评估等军事应用和海洋营救搜索、环境监测、海关缉私等民事需求中的优势日益凸显^[1-2]。可见光侦查是目前应用最为广泛和成熟的空间遥感技术,可见光光学系统接收的能量来自于目标物体对可见光的反射或者物体自身发出的可见

收稿日期: 2014-06-23; **收到修改稿日期**: 2014-07-26

基金项目: 国家自然科学基金(61108066)

作者简介: 梅 贵(1984—),男,硕士,助理研究员,主要从事空间光学遥感器光机系统设计等方面的研究。

E-mail: meigui840428@163.com

光,这使得可见光侦查只能在目标处于昼间时进行,受目标地区的气象条件影响极大。红外光学系统接收来自于目标物体自身的红外辐射能量,克服了可见光系统对时间的依赖,可以全天候工作,同时由于长波优良的穿透能力,红外系统可以在云雾等不良天气状况下进行观测^[3]。

海湾战争以来,红外成像技术取得了长足的进步,现在已经发展到第三代——凝视成像技术^[4-6],其在诸多方面尤其是军事领域展现了优异的性能,重要性日益突出,被多数发达国家应用于军事侦察、监视、跟踪和预警等方面。如美国的中段空间实验卫星(MSX)、天基空间监视系统(SBSS)、天基红外系统(SBIRS)、KH-11和KH-12型锁眼系列卫星,俄罗斯的眼睛卫星和预报卫星,法国的螺旋预警卫星(SPIRAIE)和太阳神2A卫星,日本的EOS卫星等,均搭载了不同性能指标的红外相机^[7-11]。

受限于当前的技术和工艺水平,红外 CCD 器件的像元尺寸很难像可见光 CCD 一样做到很小。为了降低噪声、提高探测器灵敏度,红外 CCD 一般需要制冷,这使整个器件体积增加,无法像可见光 CCD 一样简单地在焦平面处进行机械拼接以扩大视场角。高密度的红外焦平面器件多用于军事领域,受到西方国家的武器禁运条款限制而无法购得。国产红外焦平面器件的研制起步较晚,目前性能上还难以满足多方面的需求^[12],因此国内高分辨率、宽视场空间红外相机的研制面临着很大的挑战。基于以上各种因素,本文针对高分辨率、宽覆盖面积、全天时海洋目标的侦察与搜索需求,设计了一个大口径、长焦距的同轴折反式中波红外光学系统,设计结果表明其各项性能指标和结构的可实现性均满足要求。

2 系统参数分析

2.1 焦距

相机工作在 1200 km 轨道高度,地面像元分辨率 10 m。通过对探测目标的红外特性分析,选取波长为 3.7~4.8 μm 的中波红外谱段作为影像摄取谱段。考虑到红外系统的灵敏度[以噪声等效温差(NETD)衡量]、分辨率和信噪比等因素,选取的制冷型红外 CCD 像元尺寸为 24 μm ×24 μm ,像元数为 640 pixel×512 pixel。系统的焦距 f' 可表达为

$$f' = \frac{aH}{R}, \quad (1)$$

式中 a 为像元尺寸, H 为轨道高度, R 为地面像元分辨率,代入数据可得系统焦距为 2880 mm,规划为 3000 mm。

2.2 视场角

单片面阵 CCD 对应的卫星飞行方向和垂直飞行方向的视场角分别为

$$\omega_s = 2\arctan \frac{n_1 a}{2f'}, \quad (2)$$

$$\gamma_s = 2\arctan \frac{n_2 a}{2f'}, \quad (3)$$

式中 n_1 、 n_2 分别为面阵 CCD 的列像元数和行像元数,由(2)、(3)式可以得到单片 CCD 对应的视场角为 $0.293^\circ \times 0.235^\circ$ 。相机地面覆盖宽度为 300 km,全视场角为

$$\gamma_w = 2\arctan \frac{W}{2H}, \quad (4)$$

式中 W 为地面覆盖宽度。计算得到相机垂直飞行方向全视场角为 14.203° ,而单幅视场角仅为 0.235° ,无法通过多 CCD 视场拼接实现宽覆盖,只能通过摆扫来解决。摆扫周期为飞行方向上相邻两次拍摄的时间间隔,即

$$T = \frac{n_1 a(1-\rho)H}{Vf'}, \quad (5)$$

式中 V 为卫星飞行速度,约为 7.2 km/s, ρ 为相邻两幅图片拍摄的重叠率,这里取 10%,计算可得相机摆扫周期为 0.768 s,这对于相机在周期内实现摆扫、拍照并返回而言是完全不够的,因此需要增大飞行方向的视场。采用 4 片 CCD 视场拼接使得列像元等效数量达到 2500,由(2)式得到相应的视场角为 1.145° ,摆扫周期由(5)式计算得到,为 3.000 s。

2.3 相对孔径

为了同时满足系统的调制传递函数(MTF)和信噪比(SNR)的要求,光学系统的相对孔径(F 数的倒数)需要合理选取。对于制冷型红外 CCD 作为探测器的系统而言,最大限度抑制杂散辐射需要光学系统与探测器实现完全的冷光阑匹配,系统的 F 数应与探测器 F 数一致,这里为 4,因此光学系统的相对孔径为 1:4。理想圆开口光学系统的 MTF(记为 F_{MTF})表达为^[13]

$$F_{\text{MTF}}(\nu) = \frac{2(A+B+C)}{\pi(1-\epsilon^2)}, \quad (6)$$

式中 A 表达为

$$A = \arccos \nu - \nu \sqrt{1-\nu^2}, \quad (7)$$

B 表达为

$$B = \begin{cases} \epsilon^2 \left[\arccos\left(\frac{\nu}{\epsilon}\right) - \left(\frac{\nu}{\epsilon}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{\nu}{\epsilon}\right)^2} \right], & 0 \leq \nu \leq \epsilon, \\ 0, & \nu > \epsilon \end{cases}, \quad (8)$$

C 表达为

$$C = \begin{cases} -\pi\epsilon^2 & 0 \leq \nu < \frac{1-\epsilon}{2} \\ -\pi\epsilon^2 + \left[\epsilon \sin \phi + \frac{\phi}{2} (1 + \epsilon^2) - (1 - \epsilon^2) \arctan\left(\frac{1 + \epsilon \tan \frac{\phi}{2}}{1 - \epsilon}\right) \right], & \frac{1-\epsilon}{2} \leq \nu \leq \frac{1+\epsilon}{2}, \\ 0, & \nu > \frac{1+\epsilon}{2} \end{cases}, \quad (9)$$

且

$$\phi = \arccos\left(\frac{1 + \epsilon^2 - 4\nu^2}{2\epsilon}\right), \quad (10)$$

式中 ν 为归一化空间频率, $\nu = f/f_c$, f 为系统空间频率, $f_c = 1/(\lambda F)$ 为系统截止频率, λ 为工作波长, 取平均值 $4.25 \mu\text{m}$ 。当系统空间频率 f 等于 CCD 的奈奎斯特频率 f_N 时, 即 $f = f_N = 1/(2a)$ 时, $\nu = 0.354$; ϵ 为光学系统遮拦比, 这里取 0.25 , 由 (6) 式可以得到光学系统的 $F_{\text{MTF}} = 0.463$, 满足成像质量要求。经过计算, 系统在给定条件下对预定探测目标的信噪比也满足设计要求。至此可以得到该空间红外系统的主要设计参数, 如表 1 所示。

表 1 空间红外系统主要设计参数

Table 1 Parameters of space infrared system

Parameter	Value
Orbit altitude /km	1200
Optical bandpass / μm	3.7~4.8
Earth area coverage /km	300
Nadir resolution /m	≤ 10
NETD /mK	≤ 100
Effective focal length /mm	3000
F-number	4
Field of view /($^\circ$)	14.203
Detector array /pixel	640×512
Pixel pitch / μm	24×24

3 光学系统设计

3.1 光学系统设计构想

通过对比透射式、同轴折反射式、离轴反射式系统, 发现同轴折反射式系统在满足总体要求的同时系统体积最小。经过论证, 这里采用同轴折反射式三次成像光学系统方案。相机的光学系统采用前置无焦系统形成中间平行光路加成像光学系统的结构形式。这种光学系统使相机的摆扫部分仅为前置无焦系统部分, 避免了整机摆扫的问题。其利用形成

的平行光路增加前向像移补偿(IMC)反射镜和摆扫像移补偿反射镜, 分别对卫星速度产生的像移和相机摆扫产生的像移进行补偿。红外光学系统结构如图 1 所示, 根据光经过的先后顺序将系统依次分为反射镜组、准直镜组、随动反射镜、像移补偿反射镜、二次成像镜组和中继镜组。反射镜组与准直镜组形成无焦光路并具有实出瞳; 随动反射镜随主系统摆扫, 两块像移补偿反射镜置于实出瞳附近, 通过转动实现前向和摆扫像移补偿; 二次成像镜组用于二次成像并作为调焦组件; 中继镜组实现光阑匹配、焦距的缩放和视场的拼接。为了达到结构紧凑的目的, 将像移补偿反射镜、二次成像镜组和中继镜组安装于主镜背板上, 通过光路折叠保证系统较为紧凑。

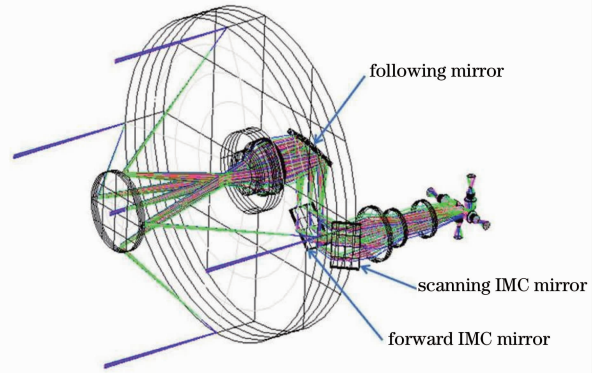


图 1 光学系统结构示意图

Fig. 1 Configuration of optical system

光学系统分视场如图 2 所示, 二次像面位于视场分割镜附近, 视场分割镜将二次像面的视场分割至不同的中继镜组, 从而实现视场拼接, 采用三次成像实现冷光阑匹配。

3.2 光学设计结果

红外光学系统以视场分割镜为界可分为望远光路和中继光路两部分。每个光路具有不同的指标要求。

3.2.1 望远光路设计

要求望远光路在全视场范围内具有良好的成像

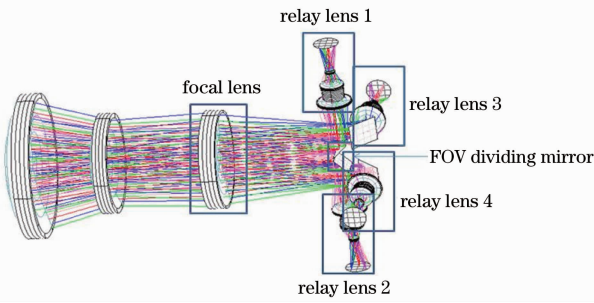


图 2 光学系统分视场结构示意图

Fig. 2 Sketch map for dividing FOV of optical system

质量和较低的畸变,如图 3 所示。其实现的技术指标为:焦距 2751 mm,入瞳直径 $\Phi 750$ mm,物方全视场角 1.547° ,中心遮拦比 0.22,畸变小于 0.055%。

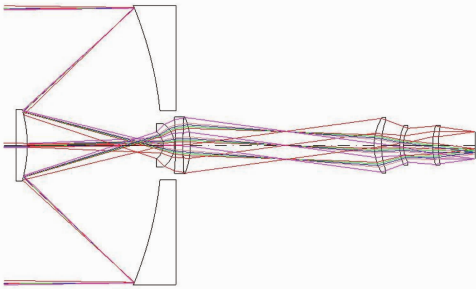


图 3 红外系统的望远光路布局图

Fig. 3 Telescopic optical layout of infrared system

红外系统望远光路的光学传递函数曲线如图 4 所示(考虑中心遮拦),在像方对应奈奎斯特频率为 21 lp/mm 时成像质量接近衍射极限。

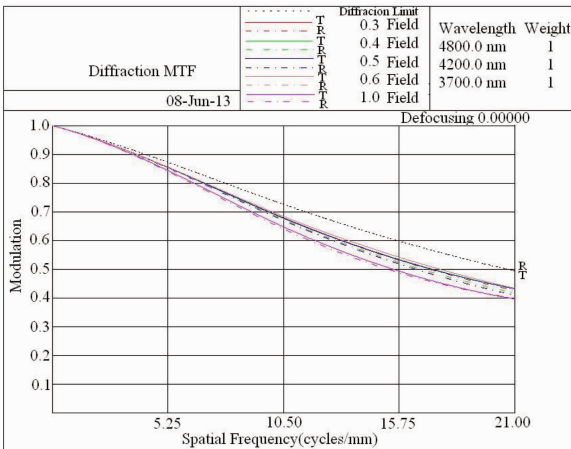


图 4 望远光路的调制传递函数曲线

Fig. 4 MTF curves of telescopic optical system

3.3.2 中继光路设计

视场分割镜之后的光路为中继光路,其功能是将分割后的实像成像到探测器上。中继光路有四路,两路具有完全相同的结构。中继光路应具有良好的成像质量,有实出瞳并与探测器冷阑完全匹配,

如图 5 所示。其技术指标为:垂轴放大率 1.091,瞬时视场角 $0.286^\circ \times 0.235^\circ$,畸变小于 2.25%。中继光路的调制传递函数曲线如图 6 所示,在像方对应奈奎斯特频率 21 lp/mm 处接近衍射极限。

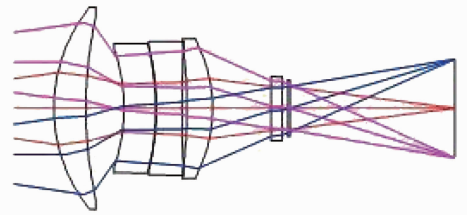


图 5 红外系统的中继光路

Fig. 5 Relay optical layout of infrared system

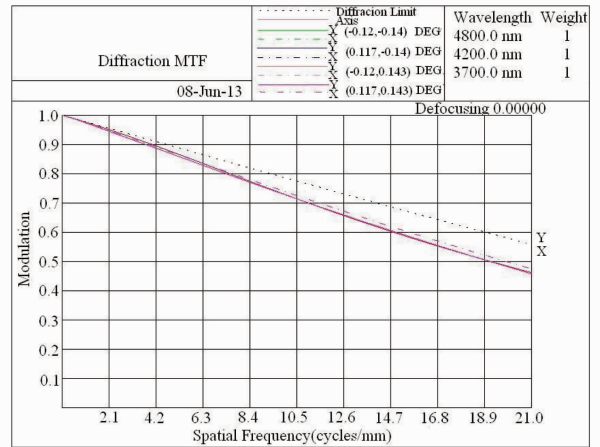


图 6 中继光路的调制传递函数曲线

Fig. 6 MTF curves of relay optical system

3.3.3 红外系统达到的指标及成像质量

红外系统的望远光路以及中继光路均为近衍射极限的成像质量。两个光路之间视场应严格匹配,光瞳能够相互衔接,为系统最终性能提供保证。红外系统达到的技术指标为:焦距 $f' = 3000$ mm,相对孔径 $D/f' = 1:4$,物方全视场角 1.547° ,畸变小

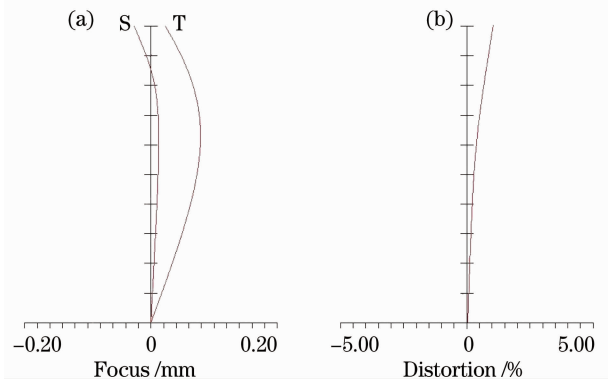


图 7 红外光学系统(a)场曲和(b)畸变分析图

Fig. 7 (a) Field curvature and (b) distortion of infrared system

于 2.5%。红外系统的场曲和畸变如图 7 所示,各视场的调制传递函数曲线如图 8 所示,可以看出红外系统对接后,在奈奎斯特频率 21 lp/mm 处成像质量仍然接近衍射极限,全视场的调制传递函数均大于 0.39,满足成像质量要求。

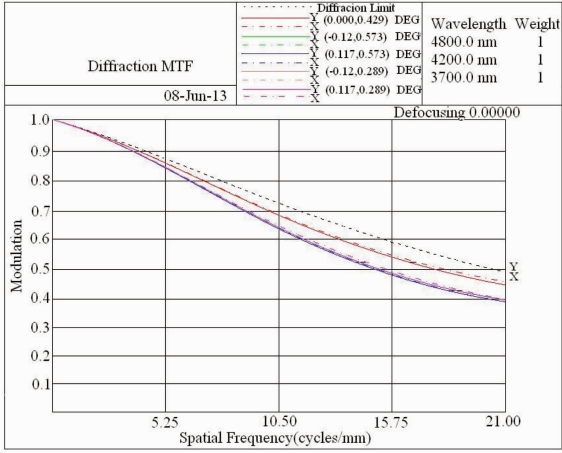


图 8 红外系统调制传递函数曲线

Fig. 8 MTF curves of infrared system

4 冷反射分析

冷反射是制冷型探测器红外成像系统的特有现象,由于制冷型探测器光敏面工作时的温度(90 K~120 K)相比系统温度明显偏低,是非常强的冷辐射源,在探测器处会接收到自身折射元件表面反射的冷像,对扫描制冷型红外成像系统尤为明显,使系统的成像质量严重下降。对于凝视型面阵探测而言,虽然冷反射可以通过非均匀校正来进行一定的补偿,但在光学设计时仍应该考虑并优化^[14-16]。

利用 Code V 软件对该系统的冷反射进行分析,结果如表 2 所示。其中 f_{YNI} 表示近轴边缘光线在该面的入射高度 Y 、折射率 N 和入射角 I 之积, I_{BAR} 表示主光线的入射角。当 f_{YNI} 很小且 I/I_{BAR} 绝对值小于 1 时,产生冷反射的可能性较大。由表 2 可以看出第 15、19 面可能会产生冷反射,经过反向追迹光线,发现经 15、19 面反射的光线均距离焦平面较远,不会带来严重的冷反射效应。

5 温度补偿分析

光学系统的温度补偿是通过合理的光机设计来消除温度变化带来的离焦、色差等现象以达到“无热化”的目的,主要分为主动式和被动式两种。光学系统的被动无热化技术具有结构结单、无额外功耗、可靠性较高等优点,是光学系统无热化研究的热

点^[17-20]。但是其缺陷也很明显,它依赖光学和机械材料热特性参数之间的匹配程度,对于复杂的折反光学系统,很难做到合理的匹配设计。因此所提方案中采用机械主动补偿式来消除温差对系统的影响,选取望远光路最后一块透镜作为调焦镜,设计调焦机构。

表 2 冷反射分析

Table 2 Narcissus analysis

Surface	Clipping aperture	f_{YNI}	I/I_{BAR}
5	17(R)	-3.0738	-0.902
6	17(R)	-4.5567	-1.135
7	17(R)	7.9284	-4.492
8	17(R)	17.9134	-2.881
9	17(R)	18.0941	-2.873
10	17(R)	-6.4469	-1.357
11	17(R)	9.3552	2.246
12	17(R)	-2.0328	-1.475
13	17(R)	-1.0101	-0.668
14	17(R)	3.1503	1.015
15	29(R)	0.1131	0.057
16	17(R)	-1.1035	-1.260
18	29(R)	1.9513	-0.598
19	29(R)	-0.6840	-0.189
20	29(R)	-1.2306	-0.292
21	29(R)	-0.8425	-0.252
22	29(R)	-0.8330	-0.252
23	29(F)	0.9614	2.587
24	29(F)	0.6901	1.020
25	29(R)	-1.4725	-0.377

为了实现摆动组件高轻量化的同时考虑到材料线膨胀系数的匹配性,保证反射镜(尤其是大口径的主镜)、次镜、像移补偿镜及其相应的支撑连接材料均选用铍铝合金材料(Al Be Met),透镜与其安装结构材料分别为硅、锗和钛合金(TC4)。相面离焦分析计算时的材料热属性如表 3 所示。可以得到系统在 10 °C ~ 30 °C 工作范围内的离焦量为 -1.557 ~ 1.436 mm,设计调焦范围为 ±2.5 mm。图 9(a)、(b)分别为 10 °C 和 30 °C 调焦后的调制传递函数曲线,可以看出均接近衍射极限。

表 3 光机材料热属性

Table 3 Thermal properties of opto-mechanical materials

Material	$dn/dt / (10^{-6} / ^\circ\text{C})$	CTE $/(10^{-6} / ^\circ\text{C})$
AlBeMet	—	13.9
Si	162	2.62
Ge	400	5.7
TC4	—	8.9

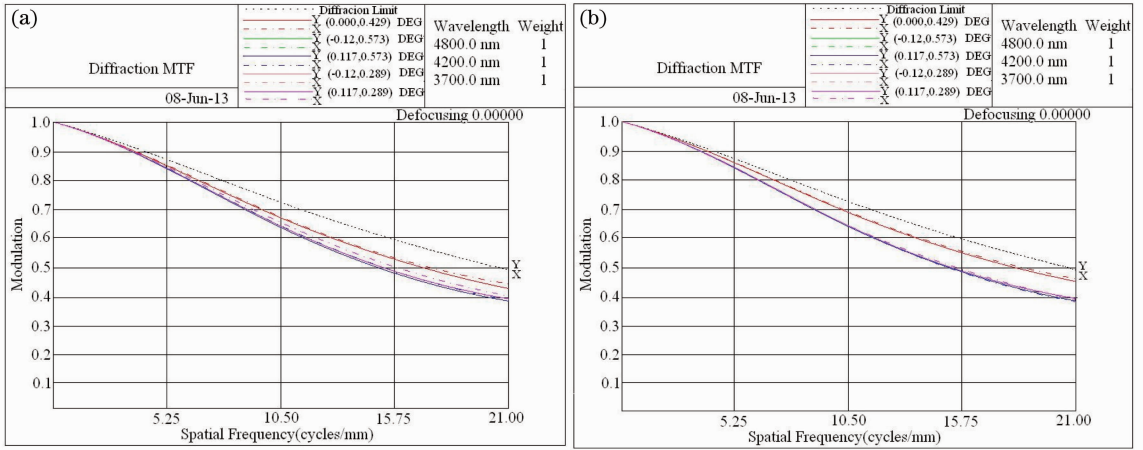


图 9 调焦后调制传递函数曲线。(a) 10 °C；(b) 30 °C

Fig. 9 MTF curves after focusing. (a) 10 °C；(b) 30 °C

6 杂散光抑制

杂散光抑制是成像光学系统设计的重要组成部分。通常为了抑制视场外杂散光对系统的影响,可采用在系统内外添加遮光筒、遮光板、在中间像面放置视场光阑等措施来遮挡外部杂散光。采用消杂散光光阑、红外消杂散光涂料等措施可以有效抑制红外光路的杂散辐射特性。

这里设计的红外系统采用三次成像方式,可在系统中间像面放置视场光阑来有效抑制杂散光,同时采用外遮光筒获得良好的消杂散光能力,如图 10 所示。

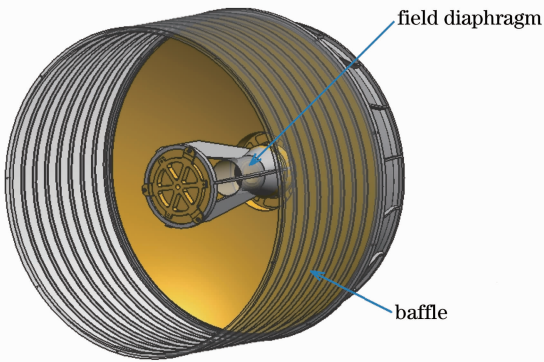


图 10 红外系统杂散辐射抑制结构示意图

Fig. 10 Stray radiation suppression for infrared system

为了提高红外系统的成像质量,消除系统自身的辐射及杂散辐射的影响,红外系统严格按照冷光阑匹配设计,最大限度抑制镜筒结构的自发辐射。探测器本身是热辐射源,所以在结构设计时,需要考虑控制其热辐射,将探测器安装在独立的箱体里面,与光路相对隔离,并设计相应的散热机构,将探测器散发的热向系统外部传播,保证探测器的热辐射不

会影响光学系统的性能。

7 光学设计难点与可行性分析

高性能的宇航用中波红外 CCD 器件可选择余地并不多,选定像元尺寸为 $24\ \mu\text{m} \times 24\ \mu\text{m}$ 时,根据总体指标要求系统焦距达到 3000 mm,而为了满足冷光阑匹配,1:4 的相对孔径使得主镜通光口径达到 $\Phi 750\ \text{mm}$,如此长焦距、大口径的光学系统受到卫星平台的限制,需要在很小的空间和质量范围内实现。同时为了满足 300 km 地面覆盖宽度,光学系统前组(反射镜组和准直镜组)需要进行摆扫,要求镜头前组轴向尺寸尽可能短并实现超轻质与高刚度化。另外,系统设计时还要为框架、反射镜支撑结构、像移补偿机构、调焦机构、星上定标机构、分光与视场拼接结构等预留出合理的空间,这对光学系统的集成化、小型化设计提出了极高的要求。

针对上述难点,光学系统类型选定为同轴折反射式,设计时考虑压缩主镜和次镜的间距,减小摆动前组的长度;后续光路通过合理的折叠,减小整个系统的占用空间。然而主、次镜间距不能无限度地压缩,为了避免中心遮拦过大,在主、次镜间距减小的同时必须降低主镜的焦比(主镜焦距与口径之比)。低焦比的主镜虽然可以有效改善中心遮拦,但是一方面其加工、检测难度较大,另一方面使次镜的位置公差要求更为严格,给系统装调和结构支撑设计带来了较大的挑战。考虑到当前国内在非球面加工、检测与装调方面的能力,将主次镜间距控制在 365 mm 左右,主镜焦比在 0.62 左右,系统的制造将易于实现。为了在减小系统体积的同时给各组件留

出合理的空间,采用了光机电系统联合设计的思路,各系统协同优化,避免因光学系统固化导致的机电系统设计、布局、装调的空间不足或浪费。

该光学系统结构实现的难点主要为超高比刚度大口径镜头前组、像移补偿反射镜等的研制。根据光学设计结果,主镜实际口径将达到 $\Phi 770$ mm 左右,为了在满足空间相机热力学条件的前提下实现极高的轻量化,高比刚度和导热性能的材料成为必须的选择。经过建模、仿真分析和论证,常用红外(反射)光学材料铝和碳化硅无法完全满足要求,铍和铍铝合金均可以胜任。作为光学镜坯材料,铍铝合金的应用起始于 21 世纪初,Heber 等^[21-24]的研制和测试结果表明,铍铝合金作为(红外系统)镜坯的综合性能优于铝、碳化硅、铍等。目前国内已经可以完成此口径规模的铍铝合金镜坯的制造、加工和抛光,因此这里铍铝合金为最终选择。由于国内尚无此材料的反射镜在轨实例,作为设计方案的工艺探索和可行性验证,本课题组已经设计、加工并装调了一个小口径铍铝合金主镜卡塞格林式红外样机,检测合格。

相机在工作过程中需要对镜头摆扫和飞行速度产生的像移进行补偿,经过分析,像移补偿反射镜的工作频率为 26 Hz,快速控制反射镜(FSM)可以满足这一要求。FSM 被广泛应用于激光通讯、精确跟踪瞄准、航空相机像移补偿等领域^[25-27],在可靠性和热力学环境适应性要求更高的航天领域内应用不多,主要集中在欧美航天发达国家,国内还未见在轨的实例报道。本单位设计了音圈电机(VCA)驱动的 FSM 鉴定组件,如图 11 所示,热、力、电性实验结果表明其可以满足使用要求。

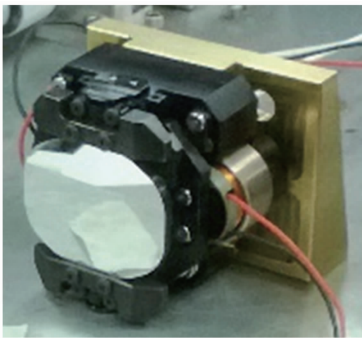


图 11 FSM 组件照片

Fig. 11 Photograph of FSM

8 结 论

根据对海面目标高分辨率、宽覆盖面积、全天时

侦查与搜索的需求,设计了一个大口径、长焦距同轴折反式中波红外光学系统,工作波段为 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ 。设计结果表明,系统在 1200 km 轨道高度下,地面像元分辨率(星下点)优于 10 m,通过镜头前组摆扫实现覆盖宽度 300 km 的要求。采用调焦机构在 $10^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ 温度范围内主动消热差,在奈奎斯特频率 21 lp/mm 处全视场调制传递函数大于 0.39,且接近衍射极限。实现了 100% 冷光阑匹配,最大程度抑制了系统自身的杂散辐射。目前,针对整机实体模型的热力学仿真分析已经给出了较好的结果,证明了光机结构设计的可行性及合理性,进一步的工作是解决摆动的轻质大口径镜头前组的实际工程化问题,完成工程样机的研制。该系统的设计和研制对海面大型舰船的侦察和灾难的搜救援助等工作具有重大的意义。

参 考 文 献

- Xu Yifan, Tan Yuejin, He Renjie, *et al.*. System analysis and research overview of space-based maritime surveillance [J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(3): 628-640.
徐一帆, 谭跃进, 贺仁杰, 等. 天基海洋目标监视的系统分析及相关研究综述[J]. *宇航学报*, 2010, 31(3): 628-640.
- Huang Hanwen. Marine target space-based comprehensive awareness technology [J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2011, 27(6): 11-13.
黄汉文. 海洋目标天基综合感知技术[J]. *航天电子对抗*, 2011, 27(6): 11-13.
- Wang Yanbin. Research on Mid-Wave Infrared Zoom System [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. 1-6.
王艳彬. 中波红外变焦光学系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010. 1-6.
- Liu Wu, Ye Zhenhua. Status and trends of foreign infrared photodetectors [J]. *Laser and Infrared*, 2011, 41(4): 365-370.
刘武, 叶振华. 国外红外光电探测器发展动态[J]. *激光与红外*, 2011, 41(4): 365-370.
- Fan Jinxiang, Yang Jianyu. Development trends of infrared imaging detecting technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3145-3153.
范晋祥, 杨建宇. 红外成像探测器技术发展趋势分析[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(12): 3145-3153.
- Fan Jinxiang, Yue Yanjun. Development in new concepts and new schemes for military infrared imaging systems [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 1-6.
范晋祥, 岳艳军. 军用红外成像系统新概念新体制的发展[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(1): 1-6.
- Wang Chao. Research on Space-Based Surveillance Imaging System of Infrared Space Targets [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. 1-5.
王超. 空间红外目标天基监视成像系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013. 1-5.
- Nancy S Andreas. Space-based infrared system (SRIRS) system of system [C]. *Proceedings of the IEEE Aerospace Conference*, 1997, 4: 429-438.
- Shen Zhiqiang, Hou Yukui, Liu Pinxiang, *et al.*. Analysis of functions and developing status of space system in high seas counterwork [J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2012, 28(6): 21-23.

- 申志强, 侯宇葵, 刘品雄, 等. 远海对抗中天基系统作用及发展状态分析[J]. 航天电子对抗, 2012, 28(6): 21-23.
- 10 Xie Jinsong. Development analysis of the America space-based infrared [J]. Ship Electronic Engineering, 2012, 32(6): 8-10. 谢晋松. 美国天基红外技术的发展分析[J]. 舰船电子工程, 2012, 32(6): 8-10.
- 11 Liu Tao, Chen Haowen, Li Xiang. Study on midcourse target discrimination based on space-based IR sensor [J]. Electronics Optics and Control, 2009, 16(3): 6-8. 刘涛, 陈浩文, 黎湘. 天基红外传感器弹道导弹中段目标识别技术分析[J]. 电光与控制, 2009, 16(3): 6-8.
- 12 Lai Rui. Investigation of Key Techniques for Improving the Spatial Resolution of Space-Borne Infrared Imaging System [D]. Xi'an: Xidian University, 2007. 2-3. 赖睿. 提高星载红外成像系统空间分辨率的关键技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007. 2-3.
- 13 Stephen A Cota, Jabin T Bell, Richard H Boucher, *et al.*. PICASSO: an end-to-end image simulation tool for space and airborne imaging systems [J]. J Appl Remote Sens, 2010, 4(1): 043535.
- 14 Liu Yang, An Xiaoqiang. Analysis and control of narcissus effect of cooling IR focal plane system [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0222007. 刘洋, 安晓强. 制冷型红外焦平面系统冷反射效应的分析与控制[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0222007.
- 15 Liu Yang, An Xiaoqiang, Wang Qian, *et al.*. Analysis and control of narcissus effect of long-wavelength cooling infrared imaging system based on optical defocusing [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0422003. 刘洋, 安晓强, 王茜, 等. 基于光学离焦量的致冷型长波变焦红外成像系统冷反射效应的分析与控制[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0422003.
- 16 Yang Shengjie. Optical design for high resolution cooled mid-wavelength infrared wide-angle imaging system [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0822003. 杨胜杰. 高分辨率制冷型中波广角红外成像系统的光学设计[J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0822003.
- 17 Qu Hemeng, Zhang Xin, Wang Lingjie, *et al.*. Design of a low F-number compact athermalizing infrared optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0322003. 曲贺盟, 张新, 王灵杰, 等. 大相对孔径紧凑型无热化红外光学系统设计[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0322003.
- 18 Yu Linyao, Wei Qun, Zhang Xin, *et al.*. Design of compact integral structure of two-mirror system [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(3): 561-566. 虞林瑶, 魏群, 张鑫, 等. 一体式紧凑型折反光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2013, 21(3): 561-566.
- 19 Dun Xiong, Jin Weiqi, Wang Xia. Design of large relative aperture compact infrared optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0622002. 顿雄, 金伟其, 王霞. 大相对孔径超紧凑型红外光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0622002.
- 20 Liu Lin, Shen Weimin, Zhou Jiankang. Design on athermalised middle wavelength infrared optical system with large relative aperture [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(3): 675-679. 刘琳, 沈为民, 周健康. 中波红外大相对孔径消热差光学系统的设计[J]. 中国激光, 2010, 37(3): 675-679.
- 21 J E Heber, T B Parsonage. Characterization of AlBeMet 162 as an optical substrate material [C]. SPIE, 2003, 5179: 56-62.
- 22 T Parsonage. New technologies for optical systems utilizing aluminum beryllium [C]. SPIE, 2008, 7018: 70180M.
- 23 Michael J Russo. An all-beryllium-aluminum optical system for reconnaissance applications [C]. SPIE, 2009, 7425: 74250H.
- 24 Carissa Say, Jack Duich, Chris Huskamp, *et al.*. Cost effective aluminum beryllium mirrors for critical optics applications [C]. SPIE, 2013, 8837: 883706.
- 25 Zhou Ziyun, Gao Yunguo, Shao Shuai, *et al.*. Design of fast steering mirror using flexible hinge [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(6): 1547-1554. 周子云, 高云国, 邵帅, 等. 采用柔性铰链的快速反射镜设计[J]. 光学精密工程, 2014, 22(6): 1547-1554.
- 26 Wang Hengkun, Zhang Guoyu, Guo Lihong, *et al.*. High performance fast steering mirror for beam control of vehicular high energy laser system [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(12): 336-341. 王恒坤, 张国玉, 郭立红, 等. 高精度车载激光发射系统光束控制反射镜[J]. 光学精密工程, 2012, 20(12): 336-341.
- 27 Hei Mo, Lu Yafei, Zhang Zhiyong, *et al.*. Design of fast steering mirror based on dynamic model [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(1): 53-61. 黑沫, 鲁亚飞, 张智勇, 等. 基于动力学模型的快速反射镜设计[J]. 光学精密工程, 2013, 21(1): 53-61.

栏目编辑: 韩峰