

高分辨率共孔径同轴三反光学系统

陈 哲^{1,2} 张星祥¹ 陈长征¹ 任建岳¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为实现高分辨率全天候对地观测,充分利用了长焦距、大孔径空间光学系统的特点,设计了可见、红外共孔径光学系统。系统由可见光光学系统和红外子系统组成,视场角 $1.3^{\circ}\times 0.1^{\circ}$,便于共光路同时推扫成像。可见光光学系统采用同轴三反结构,谱段 $0.38\sim 0.78\ \mu\text{m}$,焦距25 m, F 数10,具有中间像面和实际出瞳,便于抑制杂散光。在可见光光学系统出瞳附近分光并以红外子系统与之承接,形成共孔径红外光学系统,谱段 $8\sim 10.5\ \mu\text{m}$,焦距4 m, F 数1.6。优化后,双波段像质均接近衍射极限,满足设计指标且全系统结构紧凑。进行了公差分析,并通过蒙特卡罗方法验证了公差分配的结果满足静态传递函数优于0.2的设计要求。

关键词 光学设计; 共孔径同轴三反光学系统; 像质评价; 公差分析

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1116002

A Common Aperture Coaxial Three-Mirror Optical System with High Resolution

Chen Zhe^{1,2} Zhang Xingxiang¹ Chen Changzheng¹ Ren Jianyue¹

¹*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China*

²*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract In order to realize the round-the-clock space-to-earth observation with high resolution, a visible and infrared bands common aperture optical system is designed, taking full advantage of the high resolution of the space optical system with long focal length and large aperture. The system consists of a visible spectrum optical system and an infrared (IR) subsystem. The fields of view for the two spectral ranges are both $1.3^{\circ}\times 0.1^{\circ}$ which is convenient for push-broom imaging simultaneously. A coaxial three-mirror structure with a middle image plane and a real exit pupil to facilitate suppressing the stray light is utilized by the visible spectrum optical system whose working wavelength band is $0.38\sim 0.78\ \mu\text{m}$, focal length is 25 m, and F -number is 10. The beam is split near the exit pupil of the visible spectrum optical system, to which an IR subsystem is designed and connected. Then the coaxial three-mirror optical system and the IR subsystem are integrated into a common aperture IR optical system, whose working wavelength band is $8\sim 10.5\ \mu\text{m}$, focal length is 4 m and F -number is 1.6. After optimization, the structure of the whole system is compact, and the image quality in the two bands approaches the diffraction limit satisfying the design requirement. The tolerance analysis of the two systems is accomplished, and the result of Monte-Carlo analysis indicates that a static modulation transfer function(MTF) better than 0.2 is achievable.

Key words optical design; common aperture coaxial three-mirror optical system; image quality evaluation; tolerance analysis

OCIS codes 220.4830; 110.4850; 110.3000; 110.6770

收稿日期: 2015-06-17; 收到修改稿日期: 2015-08-25

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20126016)

作者简介: 陈哲(1987—),男,博士研究生,主要从事空间光学系统设计及检测技术方面的研究。

E-mail: chenzyeyezhiqiu@126.com

导师简介: 任建岳(1952—),男,研究员,博士生导师,主要从事光学遥感器的研制和性能评价方面的研究。

E-mail: reny@sohu.com

1 引 言

高分辨率、大视场和多谱段成像光学系统是空间光学领域的重要研究内容。20世纪90年代以来,美国、俄罗斯、法国、以色列和我国先后研制了米级分辨率的光学遥感器,但对米级以下高分辨率光学遥感器的研制,我国与世界先进水平仍存在差距^[1]。多谱段成像空间相机,可实现全天候观测,提高目标探测和识别能力。因此对高分辨率、多谱段空间相机光学系统的研究具有重要意义。

卫星的轨道高度一定时,相机的地面分辨率和覆盖范围由光学系统的角分辨率和视场角决定。光学系统的入瞳直径越大其角分辨率越高。对于可见光波段,大口径折射系统需采用特殊光学材料且结构复杂,对材料的光学均匀性、加工与装调的要求极高,对环境的变化又极其敏感;折反射系统同样结构复杂,存在视场小和消二级光谱的问题;反射系统不存在色差,有利于实现大孔径宽谱段成像,可利用非球面校正像差,形式灵活,结构紧凑,便于轻量化设计。两反系统变量较少,视场较小,而三反系统具有3个半径、3个圆锥系数、2个间隔共8个参数,除满足焦距、球差、彗差、像散、场曲的条件外还有3个变量进行结构优化和系统布局。两次成像的同轴三反光学系统相较于离轴三反而言,具有加工和装调相对容易、筒长短、体积小特点,由于发射运载能力有限,许多大口径空间遥感光学系统仍采用同轴三反结构^[2]。此类系统存在中间像面和实出瞳,理论上能够实现100%的冷光阑效率并能有效抑制杂散光,且有利于不同谱段共光路设计。本文在同轴三反系统的基础上,通过可见、红外(IR)谱段共孔径光路设计,在出瞳前端分光,可见光部分经反射成像,红外部分经过后端的红外子系统成像,提高了对地观测能力。

2 光学系统结构参数的确定

光学系统结构参数关系可表示为^[3]:

$$f = Ha/G, \quad (1)$$

$$\theta_c = af, \quad (2)$$

$$\theta_o = 1.22\lambda/D, \quad (3)$$

$$L = 2H \tan \omega, \quad (4)$$

式中 f 为焦距,轨道高度 H 为500 km。可见光和红外谱段,探测器像元尺寸 a 分别为8 μm 和25 μm ,地面像元分辨率 G 分别为0.16 m和3.125 m。 λ 为工作波长, D 为入射光瞳口径, θ_o 为光学系统的角分辨率, θ_c 为像元角分辨率。空间相机采用推扫成像方式,光学系统的视场角为 2ω ,要求地面覆盖宽度 L 大于8 km。相机在奈奎斯特频率 $\rho_N[\rho_N = 1/(2a)]$ 处的静态传递函数 $F_{\text{static}}(\rho_N)$ ^[3]:

$$F_{\text{static}}(\rho_N) = F_{\text{design}}(\rho_N) \cdot F_{\text{alignment}} \cdot F_e \cdot F_{\text{sample}}(\rho_N), \quad (5)$$

式中 $F_{\text{design}}(\rho_N)$ 为光学系统的平均设计传递函数,加工装调传递函数 $F_{\text{alignment}}$ 取0.85,电子线路传递函数 F_e 取0.9,采样过程传递函数 $F_{\text{sample}}(\rho_N)$ 为0.64,通常要求 $F_{\text{static}}(\rho_N) \geq 0.2$ 。由(1)~(5)式,综合考虑各项指标要求,光学系统的主要设计参数如表1所示。

表1 光学系统设计参数

Table 1 Design parameters of optical systems

Parameters	Visible	IR
Spectral bands / μm	0.38~0.78	8~10.5
Focal length /m	25	4
Aperture /m	2.5	2.5
G /m	0.16	3.125
Field of view /($^\circ$)	≥ 0.92	≥ 0.92
$F_{\text{alignment}} \cdot F_{\text{design}}(\rho_N)$	≥ 0.347	≥ 0.347
F_{design}	≥ 0.408	≥ 0.408

可见光谱段成像系统(同时也是红外谱段的共孔径光路)采用同轴三反光学系统,此类系统初始结构参数的计算诸多文献已有介绍^[4],不再赘述。

3 光学系统优化设计

在初始结构的基础上,通过视场偏置消除二次遮拦。在优化过程中,通过增加三镜六次非球面系数来增加变量以减小系统像差。优化的过程也是调整结构布局的过程,应注意协调光路的折叠方式与出瞳的位置,以便在压缩尺寸的同时实现红外子系统与同轴三反光学系统出瞳的承接。

当系统存在遮拦,其衍射置限点扩展函数(PSF)的形状和大小会随遮拦比的变化而变化。当中心遮拦为圆对称时,遮拦比的增加将导致 PSF 亮度的下降和次级大的增强^[5],同时将导致调制传递函数(MTF)曲线的下降和变形。事实上,同轴偏视场光学系统的遮拦并非圆对称,PSF 的形状和不同方向上的 MTF 都会相应变化。所以在对此类系统进行像质评价时,应将所有遮拦计算在内。

对于同轴系统,遮拦不只来自次镜,次镜支撑杆和遮光罩同样会产生遮拦,且更加不对称。对于三反系统,用于控制杂散光的遮光罩和光阑主要包括^[6-7]:外遮光罩、次镜遮光罩、主镜中心孔遮光罩、视场光阑和里奥光阑。其中次镜遮光罩主要遮挡未被外遮光罩遮挡且不经主次镜反射而经主镜中心孔直接进入后系统的小角度入射的光线,其会对视场内成像光束产生遮拦,引起像质下降。在优化设计时,针对遮光罩应注意以下三点:1) 反复估算遮光罩尺寸和遮拦面积并分析像质,通过控制次镜大小、镜间距离和特殊光线角度来减小遮拦尺寸,使最终像质达到最优;2) 次镜遮光罩的遮拦面积尤其是横向尺寸会随设计视场的增加而增大,应适当协调视场和遮拦的关系,防止中心遮拦过大引起传递函数的明显下降;3) 虽然增加外遮光罩的长度可使次镜遮光罩得到一定程度的压缩,但巨大的外遮光罩的设计与实现存在困难^[8-9]。

对于红外子系统,在出瞳前端分光。如果需要,可将整个红外子系统放在冷箱中,将分光镜作为杜瓦瓶的入射窗口,并设置冷光阑。设计时,应注意减小出瞳尺寸,控制光阑像差,以降低背景杂光的强度,提高冷光阑效率,若光阑像差为零,则可实现 100% 的冷光阑效率。红外子系统采用折射系统,在校正单色像差的同时应注意材料的选择以校正色差^[10]。

4 设计实例

在初始结构的基础上经过优化设计得到同轴偏视场三反光学系统,即可见光谱段光学系统,结构参数见表 2,焦距 25 m,孔径光阑位于主镜上,口径 2.5 m,全视场 $1.3^\circ \times 0.1^\circ$,适合推扫成像方式工作。

表 2 同轴三反光学系统结构参数

Table 2 Structural parameters of coaxial three-mirror optical system

	Radius /mm	Thickness /mm	Conic	6 th order coefficients
Primary mirror	-9722.7271	-3909.8804	-0.9506	0
Secondary mirror	-2564.8363	6725.3626	-2.3365	0
Tertiary mirror	-3465.2646	-4032.0815	-0.4485	-5.0992×10^{-21}

可见光谱段光学系统、红外谱段光学系统以及双谱段整体结构分别如图 1(a)~(c)所示。光路依图所示镜面编号顺序折转,主、次、三镜编号分别为 1、2、5,编号 9 为可见谱段焦面,编号 3、4、6、7、8 的反射镜为平面镜,其中 4、6、8 镜是同一块反射镜。为减少镜面缺陷对像质的影响,折叠镜 3 远离中间像面。分光镜 7 位于光学系统的实际出瞳前端,可见谱段光线经反射汇聚至可见焦面,红外谱段经透射进入红外子系统再会聚至红外焦面。分光镜经镀膜处理后,红外谱段透射率高于 95%,可见光的反射率高于 90%。系统总长 $f'/4.8 \sim f'/4.7$,高 $f'/10$,结构紧凑。光学系统具有两次像面和实出瞳,可在一次像面处设置视场光阑,在出瞳设置里奥光阑以有效控制杂散光。

图 1(b)中的共孔径红外光学系统包括三反光学系统和红外子系统,整体焦距 4 m,视场 $1.3^\circ \times 0.1^\circ$ 。红外子系统如图 1(d)所示,结构参数见表 3。图 1(d)中左起第 1 片平行平板为分光镜 7,材料为 Ge。所有镜面均为球面。在视场范围内有少量光阑像差残留,经计算,各视场冷光阑效率均高于 96%。可知,实出瞳分光和共孔径成像在充分利用三反系统大孔径优势的同时能够有效控制背景杂光对像质的影响。

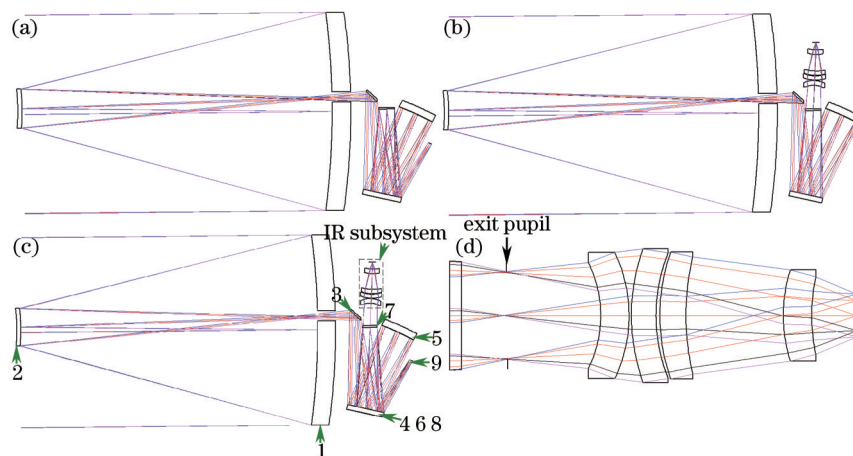


图1 光学系统结构。(a)可见光谱段光学系统;(b)红外谱段光学系统;(c)整体光学系统;(d)红外子系统

Fig.1 Optical system configuration. (a) Visible spectrum optical system; (b) IR-band optical system; (c) whole optical system; (d) IR subsystem

表3 红外子系统结构参数

Table 3 Structural parameters of IR subsystem

Surface	Radius /mm	Thickness /mm	Material	Aperture /mm
1	-249.0725	60.0000	Ge	221.7641
2	-302.1192	5.0000		265.3145
3	417.3421	52.3391	ZnSe	280.9466
4	351.1098	7.9178		264.2672
5	398.7362	55.0654	Ge	266.3323
6	523.2788	206.3427		246.2663
7	322.8316	60.0000	Ge	192.0976
8	387.9416	95.1378		163.3899
Image	Infinity	0		

5 光学性能分析

光学系统视场角 $1.3^\circ \times 0.1^\circ$, 由(4)式得地面覆盖宽度达 11.35 km。由于视场的对称性, 选择 5 个视场角进行像质评价, 如表 4 所示。

表4 视场角

Table 4 Field of view

	1	2	3	4	5
$x / (^\circ)$	0	0.455	0.65	0.455	0.65
$y / (^\circ)$	0.51	0.46	0.46	0.56	0.56

针对上述光学系统设计了遮光罩。在此给出对像质产生影响的次镜及其遮光罩和支撑杆所产生的遮拦, 如图 2 所示, 图 2(a)为支撑杆和次镜产生的遮拦, 下文称遮拦 1; 图 2(b)为支撑杆、次镜及其遮光罩产生的遮拦, 下文称遮拦 2。图中阴影部分代表遮拦。

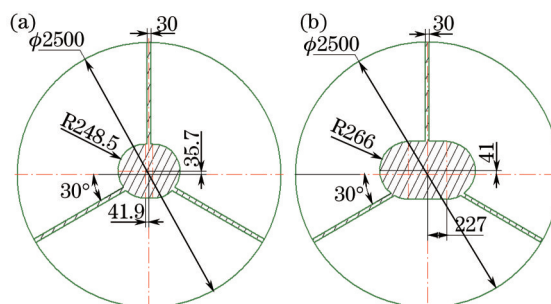


图2 同轴三反系统遮拦面积。(a)遮拦1;(b)遮拦2

Fig.2 Area of obscuration of coaxial three-mirror optical system. (a) Obscuration 1; (b) obscuration 2

光学系统点列图如图3所示。各视场点列图直径均方根值均小于艾里斑直径(可见谱段 $14.6 \mu\text{m}$; 红外谱段 $36.4 \mu\text{m}$), 在像元尺寸以内。MTF曲线如图4所示, 图中曲线束1代表不计算遮拦时各视场的MTF曲线; 曲线束2代表带有遮拦1时各视场的MTF曲线; 曲线束3代表带有遮拦2时各视场的MTF曲线。三种情况下可见光谱段奈奎斯特频率(62.5 lp/mm)处全视场平均MTF值分别为0.537、0.464、0.415; 红外谱段奈奎斯特频率(20 lp/mm)处全视场平均MTF值分别为0.608、0.528、0.468。由图可见, 三种情况下MTF均接近衍射极限, 但由于遮拦不对称, 子午和弧矢方向的MTF曲线存在差别。尽管遮拦使MTF曲线有所下降, 但最终全视场平均MTF依然满足大于0.408的设计要求, 可保证光学系统的静态传递函数优于0.2。

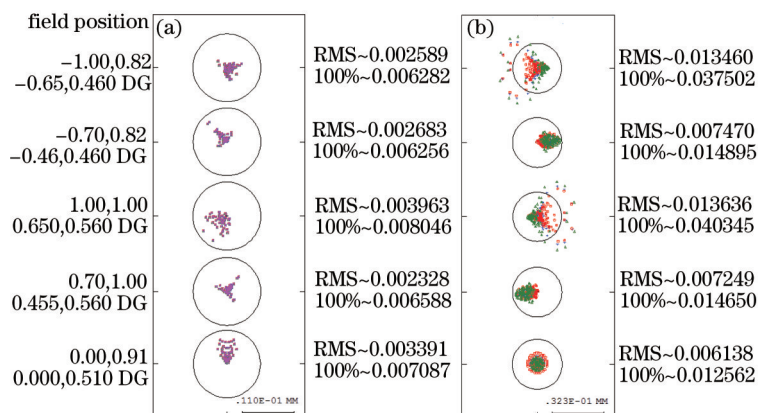


图3 点列图。(a) 可见光谱段; (b) 红外谱段

Fig.3 Spot diagram. (a) Visible spectrum range; (b) IR-band

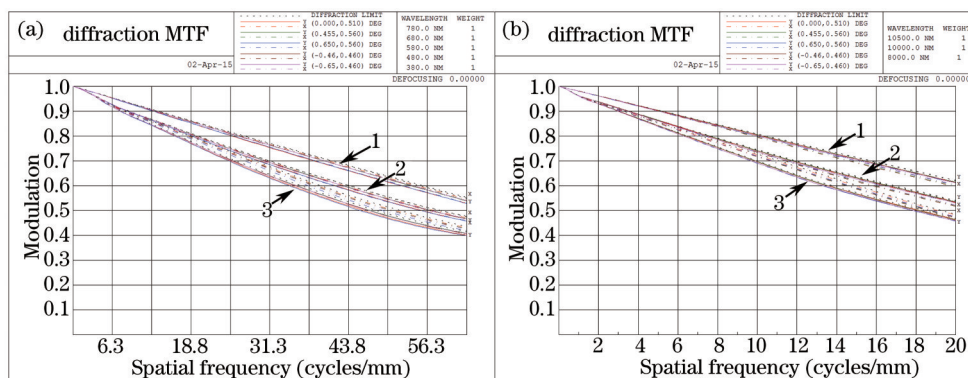


图4 MTF曲线。(a) 可见光谱段; (b) 红外谱段

Fig.4 Curves of the MTF. (a) Visible spectrum range; (b) IR-band

6 公差分析

同轴三反光学系统的每个反射镜均有6个自由度: 相对于镜面中心的局部坐标系在 x 方向、 y 方向和 z 方向的平移自由度, 以及绕 x 轴、 y 轴和 z 轴的旋转自由度。红外子系统旋转对称, 则每片透镜有5个自由度。因此每个反射镜面有6个位置公差, 每片透镜有5个位置公差。加工公差包括曲率半径公差、二次曲面系数公差、面型公差(RMS)以及六次非球面系数公差^[11]。为保证光学系统全视场的像质, 以表4所示的5个视场奈奎斯特频率处的MTF作为性能指标, 以像面的位置作为补偿调整参数进行公差分析。

详细的公差分配过程包括灵敏度、反转灵敏度分析和蒙特卡罗分析, 在此不再赘述。通过灵敏度分析可知, 主镜公差最为严格, 所以装调时可将主镜固定, 作为基准, 对次、三镜进行装调, 再装调红外子系统。表5、表6分别给出了同轴三反光学系统和红外子系统的公差分配结果。表6中透镜依图1(d)自左至右编号。光学系统中的平面反射镜和分光镜的装调公差较宽松, 面形公差与其他反射镜相同。

全部公差确定后, 通过蒙特卡罗分析来验证公差分配结果, 即令所有参数在正负公差范围内以正态概率分布取值并对光学系统进行性能分析。分析时, 同轴三反光学系统和红外子系统公差分别依表5、表6取

值。对带有遮拦2的同轴三反光学系统和共孔径红外光学系统各分析了500个蒙特卡罗样本,即模拟了500个加工和装调后的光学系统。计算两个光学系统奈奎斯特频率处各自的平均MTF,得到统计结果如表7所示。二者累积概率随MTF变化的曲线如图5所示。

表5 同轴三反光学系统公差

Table 5 Tolerance of coaxial three-mirror optical system

Item	Primary mirror	Secondary mirror	Tertiary mirror
Displacement x /mm	-	0.02	0.2
Displacement y /mm	-	0.03	0.2
Displacement z /mm	-	0.13	1
Tilt α /(")	-	3	6
Tilt β /(")	-	3	6
Tilt γ /(")	-	60	60
ΔR /mm	0.3	0.5	2
ΔK	0.0005	0.001	0.0003
ΔB	-	-	5×10^{-22}
Surface error RMS ($\lambda=632.8$ nm)	$\lambda/50$	$\lambda/50$	$\lambda/50$

表6 红外子系统公差

Table 6 Tolerance of IR subsystem

Item	Lens 1	Lens 2	Lens 3	Lens 4
Displacement x /mm	0.2	0.15	0.15	0.15
Displacement y /mm	0.2	0.15	0.15	0.15
Displacement z /mm	0.3	0.3	0.2	0.2
Tilt α /(")	15	15	12	15
Tilt β /(")	15	15	12	15
ΔR /mm	0.15	0.15	0.15	0.2
Surface error RMS ($\lambda=9$ μm)	$\lambda/50$	$\lambda/50$	$\lambda/50$	$\lambda/50$

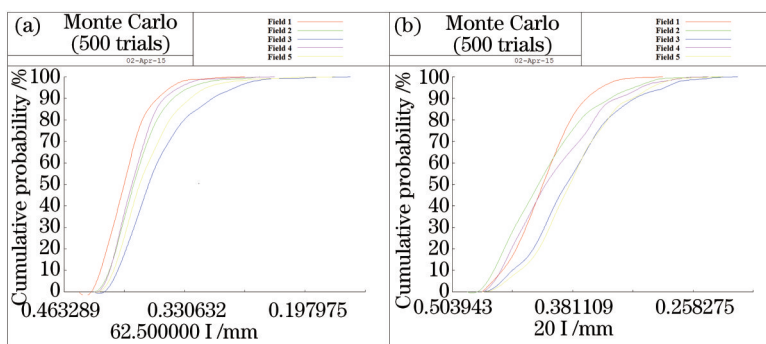


图5 累积概率曲线图。(a) 可见光谱段;(b) 红外谱段

Fig.5 Curves of the cumulative probability. (a) Visible spectrum range; (b) IR-band

表7 蒙特卡罗分析结果

Table 7 Monte Carlo analysis results

Cumulative probability	MTF	
	Visible spectrum range (62.5 lp/mm)	IR-band (20 lp/mm)
50%	0.384	0.401
84.1%	0.348	0.353
97.7%	0.298	0.298
99.9%	0.218	0.247

由表7和图6可见,依公差分配结果进行加工装调后,大于84%的可见光谱段光学系统的MTF优于

0.348,大于84%的红外谱段光学系统的MTF优于0.353,对比表1可知84%以上的光学系统满足静态MTF优于0.2的设计要求。

对于如此巨大的三反光学系统,公差是难以避免的。在轨运行时,需采用主动光学手段对系统由温度、震动等引起的失调进行补偿。如在主镜后安装促动器以控制面形和波前,在次镜后安装精调位置和方向的促动器以补偿元件的失调。失调量和主动调整方案与镜体的支撑、轻量化和系统的桁架等结构关系密切,不是重点,限于篇幅,不再赘述。

7 结 论

所设计的双谱段共孔径同轴三反光学系统在500 km轨道,地面覆盖宽度达11.35 km,0.38~0.78 μm 可见光谱段分辨率0.16 m,8~10.5 μm 红外谱段分辨率3.125 m,其中红外子系统与同轴三反系统出瞳承接,冷光阑效率高于96%,两个谱段光学系统像质均接近衍射极限。对全系统进行了公差分析,对公差分配结果进行的蒙特卡罗分析表明84%以上的光学系统满足静态MTF优于0.2的要求。该系统杂光易于控制,结构紧凑,适用于高分辨率、大视场、多谱段、全天候对地推扫成像,在航天遥感领域具有良好的应用前景。

参 考 文 献

- Hu Jun, Wang Dong, Sun Tianyu. Application and development of recent space optical imaging remote sensors[J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2010, 3(6): 519-533.
胡 君,王 栋,孙天宇.现代航天光学成像遥感器的应用与发展[J].中国光学,2010,3(6):519-533.
- Gong Dun, Wang Hong. Optical design of large field and low distortion coaxial three mirror system with free-form surface[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0722001.
巩 盾,王 红.含有自由曲面的大视场低畸变同轴三反射光学系统设计[J].光学学报,2014,34(7):0722001.
- Zhang Xiaofei, Chen Lizi, Du Shaojun. Optical system design of off-axis three-mirror camera with resolution of 1 m[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(6): 062204.
张晓飞,陈力子,杜少军.1 m分辨率离轴三反相机光学系统设计[J].激光与光电子学进展,2013,50(6):062204.
- Cheng Hongtao. Design and research of the large astronomical coaxial three-mirror telescope system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(05): 0522002.
程洪涛.共轴大型天文三反望远物镜的设计研究[J].光学学报,2013,33(05):0522002.
- Wilson R N. Reflecting Telescope Optics I[M]. Berlin: Springer, 2004: 302-304.
- Zhu Yang, Zhang Xin, Wu Yanxiong, *et al.*. Research on the optical design and stray light suppression for off-axis reflective space astronomical telescope[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0822002.
朱 杨,张 新,伍雁雄,等.离轴反射式空间天文望远系统设计及其杂散光抑制研究[J].光学学报,2014,34(8):0822002.
- Lin Jianchun, Sun Liwei, Chen Boyang, *et al.*. Stray light analysis of a coaxial two reflect mirror system and optimized design of inner photomask[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0116001.
林剑春,孙丽威,陈博洋,等.同轴两反光学系统杂散光分析及内遮光罩优化设计[J].中国激光,2013,40(1):0116001.
- Wang Wei, Chen Fansheng. Design of baffle of imaging system for earth observation on geostationary earth orbit[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0916001.
王 威,陈凡胜.静止轨道对地观测成像系统外遮光罩设计[J].中国激光,2014,41(9):0916001.
- Wang Wei, Chen Fansheng, Cui Kun, *et al.*. Opt-mechanical system design and simulation of SBIRS GEO-1 a geostationary camera[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(s1): s116005.
王 威,陈凡胜,崔 坤,等.地球静止轨道相机SBIRS GEO-1光机结构的设计与仿真[J].中国激光,2014,41(s1):s116005.
- Xu Xinhang, Chen Ning, Wang Bing, *et al.*. Design of compact middle-wave infrared camera used onairborne platform[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0816002.
徐新行,陈 宁,王 兵,等.机载紧凑型中波红外相机的设计[J].中国激光,2014,41(8):0816002.
- Wang Hong, Tian Tiejun. Design of three line array mapping camera and its tolerance analysis[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(7): 1444-1450.
王 红,田铁印.三线阵测绘相机光学系统的设计和公差分析[J].光学精密工程,2011,19(7):1444-1450.

栏目编辑:韩 峰