

长焦距同离轴混合式三反光学系统

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 130039

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 将一个同轴三反系统和两个离轴三反系统相结合, 设计了同离轴混合式三反光学系统。同轴系统视场角为 $1^\circ \times 0.1^\circ$, F 数为7.3, 工作波段为 $0.38 \sim 0.78 \mu\text{m}$ 和 $1.2 \sim 1.7 \mu\text{m}$; 离轴系统视场角为 $2^\circ \times 0.1^\circ$, F 数为18.9, 工作波段为 $0.38 \sim 0.78 \mu\text{m}$ 。两系统焦距同为14 m, 可同时推扫成像, 均具有中间像面和实际出瞳, 便于抑制杂散光。优化后, 像质均接近衍射极限, 各视场、各波段奈奎斯特频率处调制传递函数均大于0.41, 满足静态传递函数优于0.2的系统设计要求。全系统结构紧凑, 易于加工和装调。

关键词 光学设计; 同离轴混合; 三反光学系统; 像质评价; 调制传递函数

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0416002

Coaxial and Off-Axial Hybrid Three-Mirror Optical System with Long Focal Length

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

¹Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130039, China

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

Abstract One coaxial and off-axial hybrid three-mirror optical system is designed, by combining a coaxial three-mirror system and an off-axial three-mirror system. A $10^\circ \times 0.1^\circ$ field of view (FOV) is achieved by the $F/7.3$ coaxial system with spectral coverages of $0.38 \sim 0.78 \mu\text{m}$ and $1.2 \sim 1.7 \mu\text{m}$. A $2^\circ \times 0.1^\circ$ FOV is achieved by the $F/18.9$ off-axial system with spectral coverage of $0.38 \sim 0.78 \mu\text{m}$. The above two systems have the same focal length of 14 m, and the simultaneously performing push-broom imaging ability. They both have a middle image plane and a real exit pupil which can suppress stray light easily. After an optimization, near diffraction-limited performance can be obtained over all the FOVs and the spectral ranges. A minimum modulation transfer function (MTF), higher than 0.41 at Nyquist frequency, is acquired, which satisfies the design requirement to achieve a static MTF higher than 0.2. Moreover, the whole system structure is compact and its elements are easy to manufacture and align.

Key words optical design; coaxial and off-axial hybrid; three-mirror optical system; image quality evaluation; modulation transfer function

OCIS codes 220.4830; 110.2970; 110.4100; 110.3000

1 引言

空间光学对光学系统的分辨率(须具有大孔径和长焦距)和覆盖宽度(须具有大视场)的要求不断提高。此外,宽谱段成像是遥感技术发展的一大趋势。由于反射系统相较于透射系统,无色差、便于轻量化设计^[1]、对温度变化不敏感且结构紧凑,遥感成像光学系统中多采用反射式结构。

收稿日期: 2015-08-24; 收到修改稿日期: 2015-12-07

基金项目: 吉林省科技发展计划(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: chenzhheyizhiqu@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

反射系统主要包括两反和三反系统,其中三反光学系统优化自由度高,成像质量好,形式灵活,已成为空间光学系统的主要形式。在实际应用中,二次成像的三反光学系统,中间像面位于次、三镜之间,具有实出瞳且便于杂散光抑制,系统设计和结构布局更加方便。其中,二次成像的离轴三反光学系统较同轴三反系统而言,无中心遮拦、像质好、视场大,但是由于其主次镜间间隔较大以及孔径的离轴导致筒长较长和体积较大^[2],而且离轴三反系统中离轴镜面的非球面度是同轴系统中镜面的两倍以上,离轴系统的加工、检测与装调的经济和时间成本依然成倍于同轴系统。

本文在二次成像三反光学系统的基础上设计了长焦距同离轴混合式三反光学系统。同轴系统 F 数小于离轴系统的二分之一,可实现高分辨率、宽谱段成像,离轴系统全视场二倍于同轴系统,可实现宽覆盖成像。同、离轴系统同时成像,可同时实现空间光学普查和详查,像质优良、结构紧凑,具有良好的应用前景。

2 光学系统参数的确定

空间遥感光学系统参数关系可表示为^[3]

$$f = Hald, \quad (1)$$

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

$$\theta_c = alf, \quad (3)$$

$$\theta_o = 1.22\lambda/D, \quad (4)$$

式中 f 为焦距,轨道高度 H 为 500 km。可见光谱段的同轴系统高分辨率成像,要求地面像元分辨率(GSD) d 为 0.25 m,拟选择探测器像元尺寸 a 为 7 μm ,由(1)式, f 取 14 m;离轴系统宽覆盖成像,焦距与同轴系统相同,但主、次镜使用同轴系统的部分口径, a 取 13 μm ,则由(1)式, d 为 0.464 m。针对近红外谱段,拟采用的探测器 a 为 13 μm ,相应的 d 为 0.464 m。空间相机采用推扫成像方式,光学系统的视场角为 2ω ,要求同轴系统高分辨率成像地面覆盖宽度 L 大于 8 km,离轴系统宽覆盖成像 L 大于 17 km。由(2)式,同轴系统视场应大于 0.92° ,离轴系统全视场应大于 1.95° 。(3)式和(4)式中, λ 为工作波长, D 为入射光瞳口径, θ_c 为光学系统的角分辨率, θ_o 为像元角分辨率。相机在奈奎斯特频率 $\rho_N[\rho_N=1/(2a)]$ 处的静态传递函数 F_{static} ^[3] 为

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

式中 $F_{\text{design}}(\rho_N)$ 为光学系统的设计传递函数,加工装调传递函数 $F_{\text{alignment}}$ 取 0.85,电子学传递函数 F_c 为 0.9,采样过程传递函数 $F_{\text{sample}}(\rho_N)$ 为 0.637,通常要求 $F_{\text{static}}(\rho_N) \geq 0.2$ 。由(3)~(5)式,同轴光学系统 F 数取 7.3,离轴光学系统 F 数取 18.9。综上,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	Value		
F -number	7.3	7.3	18.9
Spectral bands / μm	0.38~0.78	1.2~1.7	0.38~0.78
Focal length /m	14	14	14
Aperture /m	1.92	1.92	0.74
GSD /m	0.25	0.464	0.464
Field of view /($^\circ$)	≥ 0.92	≥ 0.92	≥ 1.95
F_{design}	≥ 0.41	≥ 0.41	≥ 0.41

同离轴混合式三反光学系统是以同轴和离轴三反光学系统为基础进行综合分析和优化设计的,针对这两类系统的初始结构参数的求解,已有诸多文献介绍^[4],在此不再赘述。

3 光学系统优化设计

在初始结构和设计参数的基础上,针对同轴三反光学系统,通过视场偏置消除二次遮拦;针对离轴三反光学系统,通过减少入瞳直径和孔径离轴消除遮拦。保证主、次镜的通光孔径位于同轴系统主、次镜之内,两个系统的主、次镜的结构参数相同,焦距相同。对离轴系统加入与同轴系统方向相反的少量视场偏置,避

免次镜后光路的遮挡。同轴系统的孔径光阑位于主镜上,离轴系统的孔径光阑位于出瞳处。确保两个系统均有完整可用的实出瞳。在优化过程中,保持两系统主、次镜的结构参数相同,两个三镜的结构参数可同时作为优化变量,通过增加三镜的六次非球面系数来增加变量减小系统像差。优化的过程也是调整结构布局的过程,应注意控制主、次间隔和次镜的遮拦尺寸,协调光路的折叠方式和出瞳的位置,确保两个系统的成像互不影响,兼顾体积压缩和结构紧凑。此外,还应考虑光阑、遮光罩、挡光板等机械结构的位置和尺寸。

优化得到光学系统结构参数如表2所示,两系统焦距同为14 m,同轴系统入瞳直径为1.92 m,全视场为 $1^\circ \times 0.1^\circ$;离轴系统入瞳直径为0.74 m,全视场为 $2^\circ \times 0.1^\circ$,适合推扫成像方式工作。

表2 光学系统结构参数

Table 2 Structural parameters of optical system

	Radius/mm	Thickness /mm	Conic	6th order coefficient
Primary mirror	-5242.4309	-2096.4541	-0.9529	0
Secondary mirror	-1390.3217	3797.4247	-2.2377	0
Tertiary mirror (coaxial)	-1878.4342	-2168.8852	-0.4618	-1.7358×10^{-20}
Tertiary mirror (off-axial)	-1880.2963	-2171.0612	-0.4600	-9.4142×10^{-20}

同轴和离轴三反光学系统分别如图1(a)、(b)所示,光路依图所示镜面编号顺序折转。同轴系统主、次、三镜编号分别为a1、a2、a4,a3为平面折叠镜,a5为实出瞳,a6为焦平面。离轴系统主、次、三镜编号分别为b1、b2、b4,b3为平面折叠镜,b5为实出瞳,同时也是孔径光阑,b6为焦平面。两个系统相结合得到的同离轴混合式三反光学系统如图1(c)和(d)所示,a1和b1为同一块反射镜,a2和b2为同一块反射镜。两系统均有一次像面和可用的实出瞳。在实出瞳附近设置分光镜,并设计多谱段子成像系统与之承接,以提高系统的对地观测能力。系统总长为 $f'/5.0 \sim f'/4.9$,高为 $f'/6.1 \sim f'/5.8$,结构紧凑。

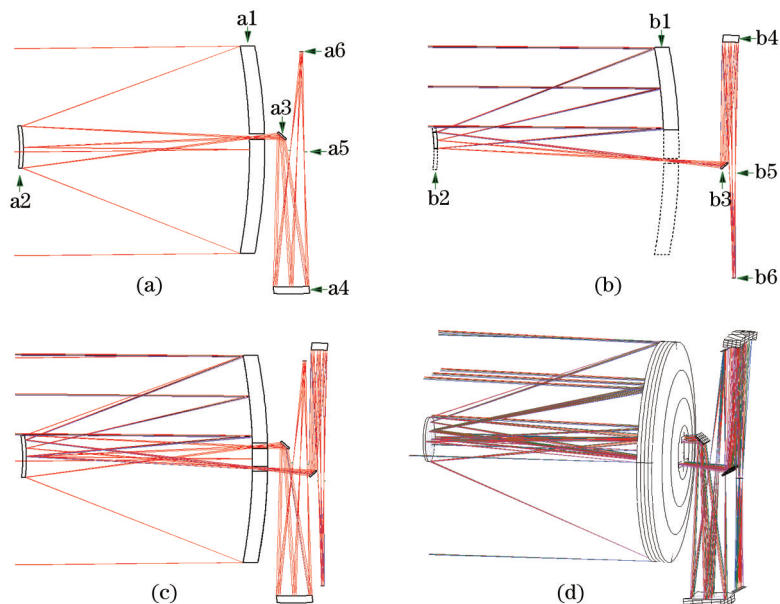


图1 光学系统结构。(a) 同轴系统;(b) 离轴系统;(c) 同离轴混合系统;(d) 三维图

Fig.1 Optical system configuration. (a) Coaxial system; (b) off-axial system; (c) coaxial and off-axis hybrid system; (d) three-dimensional diagram

为有效抑制杂散光,需针对同轴光学系统设计外遮光罩^[5]、挡光环和次镜遮光罩^[6],即分别针对同轴和离轴系统设计主镜中心孔遮光罩、在一次像面处设置视场光阑,并在实出瞳处设置Lyot光阑^[7]。其中,视场光阑的角度和通光形状根据各自系统的一次像面进行专门的设计,以此有效减少视场外杂光进入后系统;由于离轴系统使用部分口径,且主镜后方光路折叠复杂,需要在出瞳附近和后光路设计安装挡光板、环等消光结构。此外,系统中应采用低反射高吸收的黑色涂层,并加入蜂窝微结构等杂光陷阱进行杂光抑制。进行消杂光设计时应注意结构间的位置,避免对有效光路的遮挡。消杂光设计不是本文重点、不再赘述。

通过共用主、次镜,该系统相较于两套独立的同轴和离轴三反光学系统,节省了两套主、次镜的加工、制造和检测的成本,只需要增加一块三镜便可实现高分辨率和大视场成像。主、次镜同轴的设计也大大简化了加工和装调过程,采用计算机辅助装调技术,首先调整主、次镜的位置关系,再完成折叠镜和两个三镜的安装,最后对系统进行精调。

4 光学性能分析

由(2)式,同轴三反光学系统全视场为 $1^\circ \times 0.1^\circ$,地面覆盖宽度达 8.7 km,离轴三反光学系统全视场 $2^\circ \times 0.1^\circ$,地面覆盖宽度达 17.5 km,满足表 1 要求。由于视场的对称性,对同轴和离轴系统分别选择 5 个视场角进行像质评价,如表 3 所示。

表 3 视场角
Table 3 Field of view

		1	2	3	4	5
Coaxial system /($^\circ$)	x	0	0.35	0.50	0.35	0.50
	y	0.61	0.56	0.56	0.66	0.66
Off-axial system /($^\circ$)	x	0	0.70	1.0	0.70	1.0
	y	-0.45	-0.40	-0.40	-0.50	-0.50

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^[8],同时导致调制传递函数(MTF)曲线的下降和变形。事实上,本文所述的系统中同轴三反系统的遮拦由次镜及其支撑杆产生,并非圆对称,PSF 的形状和不同方向上的 MTF 都会相应变化。因此,在对同轴系统进行像质评价时将考虑如图 2(单位:mm)中阴影所示遮拦产生的影响。离轴系统不存在遮拦。

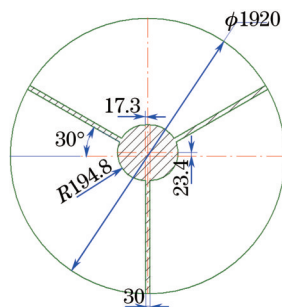


图 2 同轴三反系统遮拦面积

Fig.2 Area of obscuration of coaxial three-mirror optical system

同轴和离轴三反光学系统的点列图分别如图 3(a)和图 3(b)所示。图 3(a)中里外两个圆圈分别表示同轴系统可见光谱段和近红外谱段的艾里斑大小。各视场点列图直径均方根值(D_{RMS})均小于艾里斑直径(同轴系统可见光谱段 $10.3 \mu\text{m}$,近红外谱段 $25.8 \mu\text{m}$;离轴系统 $26.8 \mu\text{m}$),且在像元尺寸以内。同轴系统可见光谱段和近红外谱段的 MTF 曲线分别如图 4(a)和(b)所示,可见光谱段奈奎斯特频率(71.4 lp/mm)处全视场 MTF 均优于 0.477,平均 MTF 值为 0.501,由于遮拦不对称,子午和弧矢方向的 MTF 曲线存在差别;近红外谱段奈奎斯特频率(38.5 lp/mm)处 MTF 优于 0.411,平均值为 0.414。离轴系统可见光谱段 MTF 曲线如图 4(c)所示。全视场奈奎斯特频率(38.5 lp/mm)处 MTF 优于 0.411,平均值为 0.452。两系统各谱段 MTF 均接近衍射极限,全视场 MTF 满足大于 0.410(如表 1 所示)的设计要求,可保证光学系统的静态传递函数优于 0.2。

该系统结合了同轴三反光学系统和离轴三反光学系统,二者焦距相同。其中同轴系统 F 数为 7.3,可用于高分辨率和近红外详查观测;离轴系统 F 数为 18.9,分辨率低于同轴系统,但视场二倍于同轴系统,可用于光学普查成像。

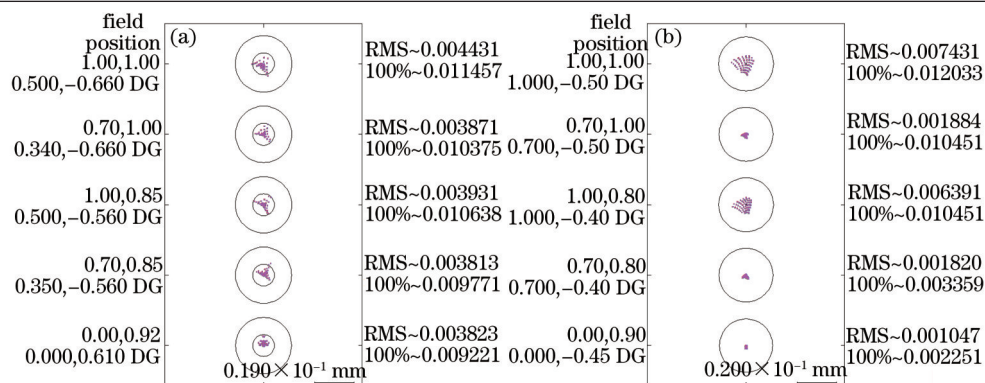


图3 (a) 同轴系统和(b)离轴系统点列图

Fig.3 Spot diagram of (a) coaxial system and (b) off-axis system

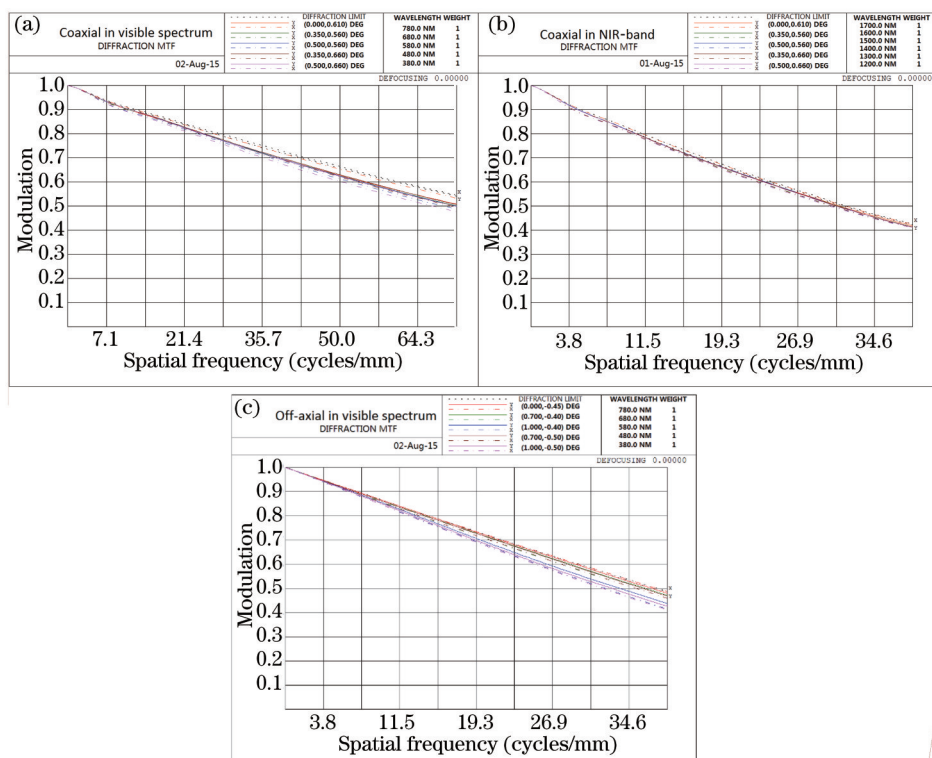


图4 MTF曲线。(a) 同轴系统可见光谱段；(b) 同轴系统近红外谱段；(c) 离轴系统可见光谱段

Fig.4 Curves of MTF. (a) Coaxial system in visible spectrum range; (b) coaxial system in near-infrared-band; (c) off-axis system in visible spectrum range

5 结 论

设计的长焦同轴混合式三反光学系统,将同轴三反和离轴三反光学系统相结合,同时具备详查和普查能力。该系统所集成的两个光学系统均具有一次像面和实际出瞳,方便杂散光的抑制。在500 km轨道,同轴系统可实现地面覆盖宽度为8.7 km,可见光谱段(0.38~0.78 μm)分辨率为0.25 m,近红外谱段(1.2~1.7 μm)分辨率0.464 m的对地成像,离轴系统可完成地面覆盖宽度为17.5 km,可见光谱段(0.38~0.78 μm)分辨率为0.464 m的对地观测。两个系统像质均接近衍射极限。全系统结构紧凑,易于加工和装调,可同时实现高分辨率、大视场和多谱段对地推扫成像,在航天遥感领域具有良好的应用前景。

参 考 文 献

1 Xu Hong, GuanYingjun. Structural design of 1m diameter space mirror component of space camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(6): 1488-1495.

- 徐 宏, 关英俊. 空间相机 1 m 口径反射镜组件结构设计[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(6): 1488-1495.
- 2 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.
- 3 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.
- 4 Cheng Hongtao. Design and research of the large astronomical coaxial three-mirror telescope system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 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(5): 0522002.
- 5 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.
- 6 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, 孙丽崑, 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.
- 7 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.
- 8 Wilson R N. Reflecting telescope optics [M]. Heidelberg: Springer, 2004: 302-304.

栏目编辑: 韩 峰