

激光与光电子学进展

折叠式离轴三反光学系统设计与装调

陈太喜¹, 伍雁雄^{1,2*}, 宋绍漫¹, 李淑贤¹

¹季华实验室, 广东 佛山 528200;

²佛山科学技术学院物理与光电工程学院, 广东 佛山 528200

摘要 在同轴三反光学系统成像理论的基础上,通过孔径光阑离轴及平面反射镜折叠光路,设计一个折叠式离轴三反光学系统。全视场范围内,光学系统在奈奎斯特特征频率为 62.5 lp/mm 处,调制传递函数的设计值优于 0.58,成像质量接近衍射极限。基于光学干涉检测技术和计算机辅助装调理论,建立初级像差与光学元件失调量的灵敏度矩阵并分析失调光学系统的像差特性,在此基础上提出具体有效的光学精密装调方案。整机装调后光学系统全视场波像差的均方根值优于 $1/14\lambda$ (λ 为波长)。使用相机对准模拟无穷远处的目标,在探测器极限分辨率为 62.5 lp/mm 处可以成像清晰,性能优异。

关键词 光学设计; 三反系统; 计算机辅助装调; 灵敏度矩阵

中图分类号 TH745

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1722001

Design and Alignment of Folded Off-Axis Three-Mirror Optical System

Chen Taixi¹, Wu Yanxiong^{1,2*}, Song Shaoman¹, Li Shuxian¹

¹Ji Hua Laboratory, Foshan, Guangdong 528200, China;

²School of Physics and Optoelectronic Engineering, Foshan University,
Foshan, Guangdong 528200, China

Abstract Based on the imaging theory of the coaxial three-mirror optical system, a folded off-axis three-mirror optical system is designed through the aperture diaphragm off-axis and the flat mirror to fold the optical path. In the full field of view, the design value of the modulation transfer function of the optical system at the Nyquist characteristic frequency of 62.5 lp/mm is better than 0.58, and the imaging quality is close to the diffraction limit. Based on optical interference detection technology and computer-aided assembly and adjustment theory, the sensitivity matrix of primary aberration and optical component misalignment are established, and the aberration characteristics of the misaligned optical system are analyzed, and on this basis, a specific and effective optical precision assembly adjustment scheme is proposed. After the whole machine is installed and adjusted, the root mean square value of the wave aberration of the optical system in the whole field of view is better than $1/14\lambda$ (λ is wavelength). Using the camera to simulate the target at infinity, the image can be clearly imaged at the 62.5 lp/mm limit resolution of the detector, and the performance is excellent.

Key words optical design; three-mirror optical system; computer-aided alignment; sensitivity matrix

OCIS codes 220.4830; 220.1140; 220.4840

收稿日期: 2020-11-25; 修回日期: 2020-12-11; 录用日期: 2020-12-17

基金项目: 国家自然科学基金面上基金(61771139)

通信作者: *364477424@qq.com

1 引言

近年来,随着遥感测量技术的飞速发展,该技术对成像系统的成像质量和整体结构尺寸的要求越来越高,因此长焦距、大口径和结构紧凑的光学系统已是遥感技术领域研究的热点之一^[1-2]。目前,常见的光学系统有折射式、折反式和全反射式,若要实现长焦距和大口径的光学系统,折射式和折反式光学系统需要特殊的光学材料和复杂的结构来消除二级光谱的影响,全反射式光学系统则不存在二级光谱的问题^[3-4],光路可折叠,结构紧凑,且易于轻量化,焦距和口径都可以放大。为了解决中心遮拦的问题以及适应大视场的需要,采用离轴三反射光学系统有利于实现无遮拦设计并可以增大成像视场,但离轴三反射光学系统的装调是一个比较难解决的问题^[5-6]。

为了获得结构空间紧凑、实现扁平化与轻量化的长焦距空间相机光学系统,本文通过孔径离轴以及光路折叠来实现折叠式离轴三反光学系统的光学设计。由于折叠式离轴三反光学系统不具备轴对称性,且折叠后的三镜与主镜不共系统光轴,从而增加了系统的装调难度。基于光学干涉检测技术和计算机辅助装调的理论,建立光学系统的灵敏度像差分析矩阵,分析光学系统的失调像差特性,确定光学系统的装调方案,并对光学系统进行装调,最终获得接近衍射极限的成像质量。

2 离轴三反光学系统的设计

根据应用要求,光学系统的设计指标参数如表 1 所示,其中 FOV 为视场角,MTF 为调制传递函数。

表 1 光学系统的设计指标
Table 1 Design index of optical system

Parameter	Value
Focal length /mm	1500±5
FOV / (°)	≥2
Entrance pupil diameter /mm	≥200
Waveband/nm	400-700
MTF at frequency of 62.5 lp/mm	>0.4

离轴三反光学系统是在同轴三反光学系统初始结构的基础上,对初始结构进行孔径光阑离轴或视场偏置后优化得到的^[7]。因此,设计过程中需要先得到同轴三反光学系统的初始结构,同轴三反光学系统的初始结构如图 1 所示。

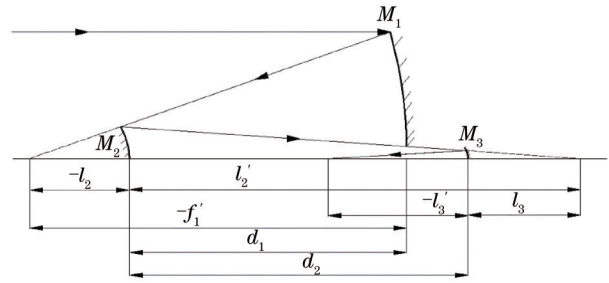


图 1 同轴三反光学系统的初始结构

Fig. 1 Initial structure of coaxial three-mirror optical system

系统有 8 个变量,分别为三块反射镜的半径 r_1 、 r_2 和 r_3 ,两个镜间距离 d_1 和 d_2 ,以及三个镜面的二次非球面系数 k_1 、 k_2 和 k_3 。利用高斯光学理论可以得到系统的结构参数^[8],表达式为

$$r_1 = \frac{2}{\beta_1 \cdot \beta_2} f', \quad (1)$$

$$r_2 = \frac{2 \cdot \alpha_1}{\beta_2 \cdot (\beta_1 + 1)} f', \quad (2)$$

$$r_3 = \frac{2 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2}{1 + \beta_2} f', \quad (3)$$

$$d_1 = \frac{1 - \alpha_1}{\beta_1 \cdot \beta_2} f', \quad (4)$$

$$d_2 = \frac{\alpha_1 \cdot (1 - \alpha_2)}{\beta_2} f', \quad (5)$$

$$l'_3 = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot f', \quad (6)$$

式中: f' 为光学系统的总焦距; $\alpha_1 = l_2/f'$ 为次镜对主镜的遮拦比, l_2 为次镜的物距; $\alpha_2 = l_3/l'_2$ 为三镜对次镜的遮拦比, l_3 为三镜的物距, l'_2 为次镜的像距; $\beta_1 = l'_2/l_2$ 为次镜的放大倍率; $\beta_2 = l'_3/l_3$ 为三镜的放大倍率, l'_3 为三镜的像距。

系统要求像面平场,即令场曲 $S_4 = 0$,再根据消球差 S_1 、彗差 S_2 和像散 S_3 的要求,令 $S_1 = S_2 = S_3 = 0$,可以求取三个镜面的二次非球面系数 k_1 、 k_2 和 k_3 ,具体推导过程在诸多文献有详细介绍^[9-11],本文不再赘述。将求取的初始结构参数输入到光学设计软件中,经过逐步优化,最终获得光学系统的结构参数如表 2 所示,其中 OBJ 为物面,STO 为光阑面。使用平面反射镜将光路进行压缩和折叠,光学系统如图 2 所示。MTF 曲线如图 3 所示。从图 3 可以看到,当光学系统处于可见光波段时,各个视场在奈奎斯特特征频率为 62.5 lp/mm 处,MTF 值大于 0.58,成像质量接近衍射极限,设计结果如表 3 所示。

表 2 光学系统的结构参数

Table 2 Structure parameters of optical system

No.	Radius /mm	Thickness /mm	Glass	Conic coefficient	Tilt /($^{\circ}$)	Y-axis eccentricity /mm
OBJ	∞	∞			0	0
STO	∞	300.000			0	177
3	-728.242	-290.662	Mirror	-0.9171	0	40
4	-237.563	186.478	Mirror	-3.6909	0	19
5	∞	-305.760	Mirror		45	-28
6	366.365	471.105	Mirror	-0.3212	0	-20

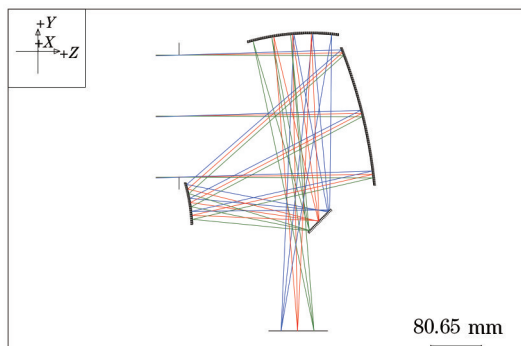


图 2 折叠光学系统

Fig. 2 Folded optical system

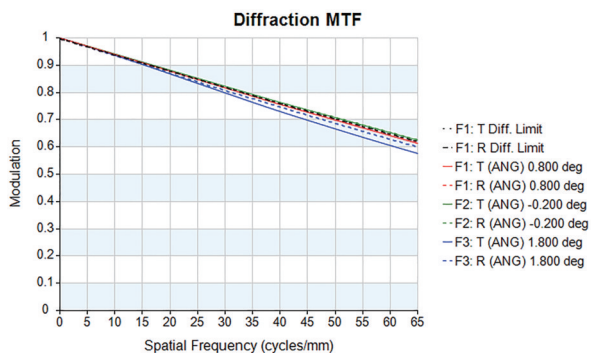


图 3 光学系统的 MTF 曲线

Fig. 3 MTF curves of optical system

表 3 光学系统的设计结果

Table 3 Design results of optical system

Parameter	Value
Focal length /mm	1500.003
FOV /($^{\circ}$)	2
Entrance pupil diameter /mm	200
Waveband /nm	400-700
MTF at frequency of 62.5 lp/mm	>0.58

3 光学系统装调分析

3.1 装调自由度分析

根据光学系统的像差理论得知,对于初装的光学系统,高级像差与初级像差相差较小,且全反射系统不需要考虑色差,畸变在干涉图中也反映不出来^[12]。

因此,系统装调过程中考虑校正初级像散、彗差和球差即可,对应干涉检测结果中 Zernike 多项式系数 $Z_5 \sim Z_9$,其中 Z_5 为 0° 方向像散, Z_6 为 45° 方向像散; Z_7 为 X 方向彗差, Z_8 为 Y 方向彗差, Z_9 为球差。

系统装调过程中,通常固定主镜不动,即认为主镜曲率的中心和顶点的连线与系统光轴重合。折叠镜的位置姿态与三镜相互关联,从而影响视场的视轴指向及视场位置,需要通过高精度的光电经纬仪按名义设计值来标定装调。综上,失调光学系统需要装调的自由度共有 10 个:次镜与主镜的间隔 T_{31} , 次镜的偏心量 D_{x2} 和 D_{y2} , 倾斜量 R_{x2} 和 R_{y2} ; 三镜与次镜的间隔 T_{32} , 三镜的偏心量 D_{x3} 和 D_{y3} , 倾斜量 R_{x3} 和 R_{y3} 。由于装调的自由度过多,所以装调难度很大。

3.2 失调系统的像差特性分析

根据光学设计结果,入射角为 $(0, 0.935^{\circ})$ 的主光线垂直像面。装调过程中,将该入射角定义为光学系统的中心视场,则线阵方向两个边缘视场分别为 ± 1 视场。为光学系统的次镜和三镜施加微小失调量 $[T_{31}, T_{32}, D_x, D_y, R_x, R_y] = [0.1 \text{ mm}, 0.1 \text{ mm}, 0.1 \text{ mm}, 0.1 \text{ mm}, 0.01^{\circ}, 0.01^{\circ}]$,可以在原始的设计数据上分析产生虚拟的干涉图和 Zernike 多项式,建立反射镜失调量与光学系统初级像差的灵敏度矩阵 A ,系数如表 4 所示。

对灵敏度矩阵进行分析,可以得到折叠式离轴三反光学系统的失调像差特性,分析过程如下。

1) 相同失调量会对系统球差、像散和彗差产生影响,次镜的灵敏度较三镜敏感得多,而三镜的位置姿态对系统的视轴指向及视场位置的影响较大。因此,系统经过粗定位后,当像差较大时,可通过调整次镜的位置姿态来快速收敛像差。

2) 镜间隔的失调量 T 对系统初级像差产生的影响在系统全视场范围内数值大致相同,方向一致,且各个自由度的失调量对系统波像差的主要影响是像散。

3) 三镜的各个自由度失调量在一定范围内对系统球差的影响基本可以忽略不计,偏心失调量在一

表 4 灵敏度矩阵
Table 4 Sensitivity matrix

Aberration	Adjustment item									
	T_{31} /mm	T_{32} /mm	D_{x2} /mm	D_{y2} /mm	R_{x2} /mm	R_{y2} /mm	D_{x3} /mm	D_{y3} /mm	R_{x3} /($^{\circ}$)	R_{y3} /($^{\circ}$)
(0,0) Z5	0.544	0.011	0	1.068	-0.146	0	0	0.097	0.044	0
(0,0) Z6	0	0	-1.199	0	0	-0.164	-0.098	0	0	0.044
(0,0) Z7	0	0	-0.207	0	0	-0.032	-0.016	0	0	0.004
(0,0) Z8	-0.182	-0.007	0	-0.140	0.023	0	0	-0.015	-0.004	0
(0,0) Z9	-0.010	-0.001	0	0.008	-0.001	0	0	0	0	0
(0,-1) Z5	0.575	0.029	0	1.073	0.178	0	0	0.085	0.015	0
(0,-1) Z6	0	0	-1.218	0	0	-0.199	-0.089	0	0	0.175
(0,-1) Z7	0	0	-0.208	0	0	-0.033	-0.016	0	0	0.004
(0,-1) Z8	-0.192	-0.009	0	-0.139	0.023	0	0	-0.014	-0.003	0
(0,-1) Z9	-0.010	-0.001	0	0.008	-0.001	0	0	0	0	0
(0,+1) Z5	0.557	-0.003	0	1.037	-0.109	0	0	0.109	0.072	0
(0,+1) Z6	0	0	-1.181	0	0	-0.130	-0.109	0	0	0.072
(0,+1) Z7	0	0	-0.206	0	0	-0.032	-0.016	0	0	0.004
(0,+1) Z8	-0.170	-0.003	0	-0.140	0.023	0	0	-0.017	-0.004	0
(0,+1) Z9	-0.010	-0.001	0	0.008	-0.001	0	0	0	0	0

定范围内不会影响整个系统的成像质量,倾斜失调量在一定范围内只对像散产生影响,不影响彗差。

4)在对称的视场上,次镜与三镜的偏心失调量所引起的像差数值相同,方向相同,而倾斜失调量所引起的像散数值不同。因此,在精调过程中应该先调节倾斜自由度,使失调系统像差倾斜特性与光学设计参数一致,在调整偏心自由度的同时收敛各视场像差。

5)各个自由度失调所产生的像差是可以相互补偿,如偏心失调量 D_{x2} 可以通过调整倾斜失调量 R_{y2} 和 R_{y3} 来补偿,系统精调过程中需要检测各个边缘视场数据并对其进行整体分析,逐步迭代优化。

4 光学系统的装调

根据折叠式离轴三反光学系统的失调像差特性,确定该光学系统的装调步骤。

4.1 系统光轴的引入

折叠式离轴三反光学系统的装调以主镜为基准,即固定主镜不动,调整次镜和三镜的位置姿态。在光学加工过程中,定义主镜的曲率中心和顶点的连线为主镜光轴,主镜光轴以主镜检测所用的补偿器光轴为基准,即补偿器光轴和主镜光轴重合。由于系统以主镜为基准进行装调,系统光轴实际上是主镜光轴,因此系统光轴必须由补偿器引入。

检测主镜面形的精度,当 Zygo 干涉仪检测的主镜面形精度达到设计值时,则残余的彗差小于 0.01λ (λ 为波长),干涉条纹为 0 条纹,这时认为主镜光轴和主镜补偿器的光轴重合,检测光路如图 4(a) 所示。主镜补偿器前端面的平板玻璃代表补偿器光轴,撤开 Zygo 干涉仪,在合适的位置上放置系统装调所用的平面反射镜,利用 TM6100A 经纬仪(测量精度为

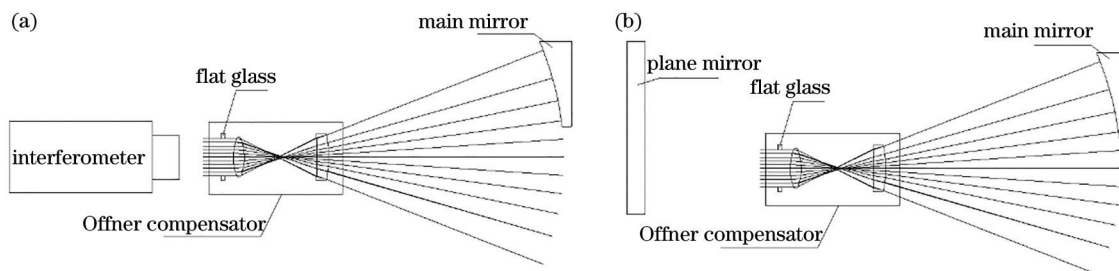


图 4 引入系统光轴的检测光路。(a)补偿器和主镜同轴;(b)引入准直平面反射镜

Fig. 4 Detection optical path after introducing optical axis of system. (a) Compensator and primary mirror are coaxial; (b) introduction of collimating planar mirror

0.5")来标定补偿器的平板玻璃与平面反射镜相互平行,平面反射镜的位置如图 4(b)所示。令主镜和平面反射镜的位置不动,将此平面反射镜作为折叠式离轴三反系统装调过程中的准直平面镜,这样检测的光线即为系统的轴上光线,同时也以此平面反射镜为基准来标定各个视场的位置。

4.2 折叠反射镜的装调

光学系统在次镜和三镜之间插入一块 45°平面反射镜作为折叠反射镜以折转光路,使光学系统结构更加紧凑。考虑对成像质量的影响,当折叠反射镜镜面的面形误差符合要求时,其位置姿态对像差没有贡献,但失调量直接影响三镜的位置而引起视轴偏差,并导致后端光路的像差增大。为了保证视轴偏差在公差范围内,需要考虑折叠反射镜的倾斜失调量。传统的装调方法是以机械定位面为基准直接装调折叠反射镜,但难以满足成像系统的视轴偏差要求。综上所述,确定折叠反射镜的装调位置是以系统光轴为基准,即以准直平面反射镜为基准,利用 TM6100A 经纬仪来标定并调整折转反射镜的角度。光路搭建好之后,使用经纬仪测量基准平面反射镜的法线方向,记录经纬仪的读数为 (H_0, V_0) ,其中 H_0 为基准平面反射镜的方位角度, V_0 为基准平面反射镜的俯仰角度。使用经纬仪测量折叠镜的法线方向,记录读数为 (H_1, V_1) ,其中 H_1 为折叠镜的方位角度, V_1 为折叠镜的俯仰角度。将读数转换到测量坐标系下(图 2 的坐标系)^[13]的法线向量 $M(x_0, y_0, z_0)$ 和 $N(x_1, y_1, z_1)$,表达式为

$$\begin{cases} x = \sin V \cos H \\ y = \cos V \\ z = -\sin V \sin H \end{cases} \quad (7)$$

空间两向量夹角的表达式为

$$\cos \theta = \frac{\mathbf{M} \cdot \mathbf{N}}{|\mathbf{M}| \cdot |\mathbf{N}|} = \frac{x_0 x_1 + y_0 y_1 + z_0 z_1}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2} \cdot \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2}}, \quad (8)$$

式中: θ 为两向量的空间夹角。使用折叠镜来调整垫片的二面角,使得 θ 满足设计要求。

4.3 失调量调整

在完成 4.1~4.2 节的工作后,以机械结构进行定位,按设计值初装次镜和三镜,检测中心视场数据,检测光路如图 5 所示。

根据灵敏度矩阵来分析检测数据。首先通过调整主次镜间隔 T_{31} 来收敛系统球差,使得轴上视场的 Zernike 多项式 Z_9 项小于 0.01λ ,调整次镜的偏

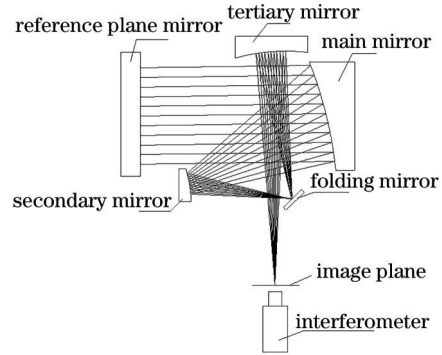


图 5 光学系统装调的检测光路
Fig. 5 Detection path of optical system

量 D_{x2} 和 D_{y2} 来消除轴上视场像散和彗差,使得轴上视场波像差达到较好的状态;其次检测光学系统各个视场波像差数据并根据像差特性调整次镜的倾斜量 R_{x2} 和 R_{y2} ,使边缘视场的像差倾斜特性与设计相同;再次精调次镜的偏心量,使全视场像差接近设计值;最后精调三镜的位置姿态,进一步补偿系统残差及确定系统视场入射角和出射角的位置关系。失调量调整辅助分析装调过程如图 6 所示,其中 F 为检测结果矩阵, A 为灵敏度矩阵。

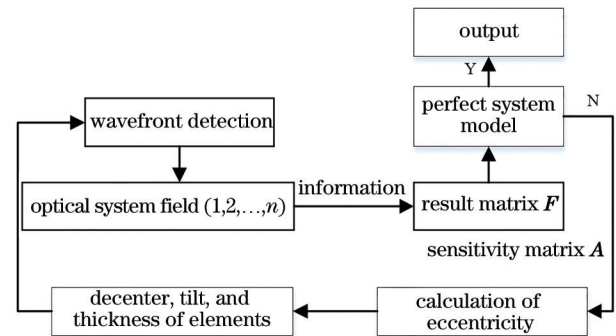


图 6 辅助装调流程
Fig. 6 Flowchart of auxiliary installation

4.4 整机装调测试及成像实验

根据 4.3 节的装调步骤,经过几轮逐步迭代优化可以得到整个光学系统各个视场的系统波像差,如图 7 所示。其中中心视场的波像差均方根 (RMS) 值为 0.0498λ , -1 视场波像差的 RMS 值为 0.0701λ , +1 视场的波像差 RMS 值为 0.0738λ ,系统各视场成像质量均满足设计要求。

整机装调完成后,在实验室中利用平行光管与分辨率靶标来模拟无穷远处的目标并进行成像。光学系统焦距的实测值为 1496 mm,检测所用平行光管的焦距为 6018 mm,使用平行光管来分辨标准分辨率板,能分辨的空间频率 N_0 为

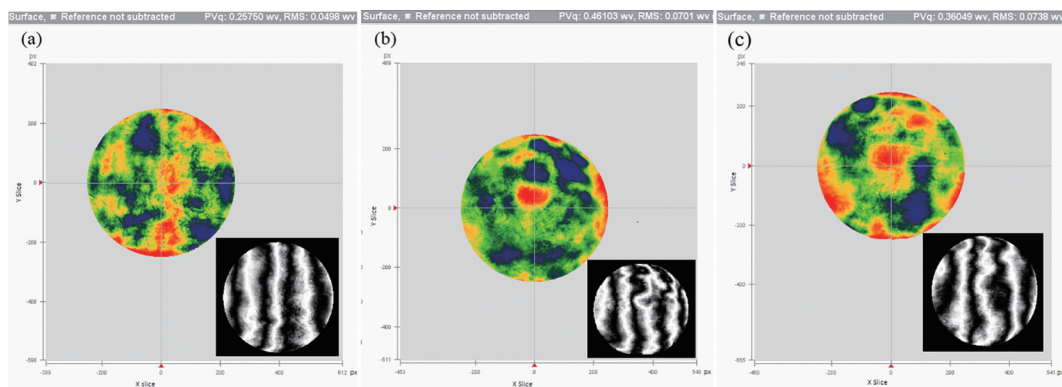


图7 全视场最终的装调结果。(a)中心视场;(b) -1视场;(c) +1视场

Fig. 7 Final results of full field of view. (a) Central field of view; (b) -1 field of view; (c) +1 field of view

$$N_0 = \frac{f'_0}{f'_c} N = \frac{1496}{6018} \times 62.5 = 15.5, \quad (9)$$

式中: N 为系统的奈奎斯特特征频率; f'_0 为系统的实测焦距; f'_c 为平行光管的焦距。根据计算结果可知,对应4号分辨率板有16组线组。图8为相机获取的4号分辨率靶板图像。从图8可以看到,整机在探测器奈奎斯特频率为62.5 lp/mm处可以实现清晰成像,验证光学系统的装调性能。

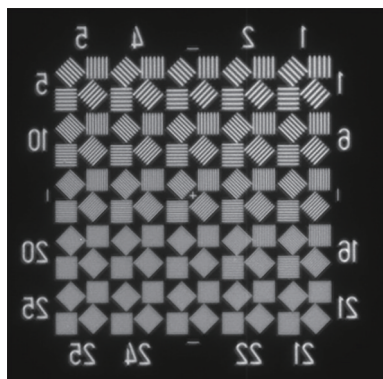


图8 相机对分辨率板的成像

Fig. 8 Image of resolution plate by camera

5 结 论

为了满足空间遥感对高性能和轻小型光学成像系统的需求,基于孔径离轴以及引入平面反射镜折叠光路的方式,设计一种光路高度折叠紧凑的离轴三反光学系统,光学系统焦距达到1500 mm,实现放置在直径不大于500 mm的球壳空间内,成像质量接近衍射极限。与同轴折叠光学系统^[14](焦距为1450 mm,视场为 $1.4^\circ \times 0.6^\circ$,系统总长为237 mm)、离轴折叠空间光学系统^[15](焦距为900 mm,视场为 $0.8^\circ \times 0.8^\circ$,系统总长为330 mm)和离轴扩束光学系统^[16](焦距为2800 mm,视场为

$2^\circ \times 2^\circ$,系统总长为6 m)等反射式光学系统相比,在保证系统MTF的前提下,该系统同时具有较大视场、长焦距和较小体积的特点。针对光学系统孔径离轴量大且光路折叠的特点,分析光学系统的装调自由度以及装调的复杂性。基于光学干涉检测技术以及计算机辅助装调方法,建立光学系统初级像差与失调量的灵敏度矩阵,研究各自由度对光学像差的影响机理与干扰程度,在此基础上提出具体有效的光学精密装调方案。通过整机装调、测试及成像实验,实现光学系统成像视场内波像差RMS值优于 $1/14\lambda$,满足成像质量的要求。所得的研究成果为空间遥感光学相机技术的发展提供有益的参考与借鉴。

参 考 文 献

- [1] Lu Q, Wei C Y, Hu C. Design of compact space optical system with large field of view based on free-form surface[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(3): 032203.
路晴, 魏朝阳, 胡晨. 基于自由曲面的大视场紧凑型空间光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(3): 032203.
- [2] Pan S H, Pan Z F, Chen J F. Design of a compact off-axis three-mirror optical system with secondary imaging[J]. Electronics Optics & Control, 2020, 27(1): 90-93.
潘思豪, 潘枝峰, 陈建发. 具有二次成像的紧凑型离轴三反光学系统设计[J]. 电光与控制, 2020, 27(1): 90-93.
- [3] Kong D C. Design and analysis of light-small off-axis TMA space camera main structure[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018: 1-8.
孔德成. 轻小型离轴三反空间相机主体结构设计及

- 分析[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018: 1-8.
- [4] Cheng H T. 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] Guo J K, Wang Z L, Lu M. Off-axis three-mirror anastigmatic system alignment and application based on principal component analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 0322002.
郭继锴, 王治乐, 陆敏. 基于主成分分析法的离轴三反系统装调及其应用[J]. *光学学报*, 2019, 39(3): 0322002.
- [6] Shi G W, Zhang X, Zhang J P, et al. Wavefront aberration characteristics of several misaligned reflective optical systems [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 160-166.
史广维, 张新, 张建萍, 等. 几种失调反射光学系统的波像差特性[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(1): 160-166.
- [7] Chang J, Zhang X F, Zhang K. Modern reflective zoom optical system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017: 3-13.
常军, 张晓芳, 张柯. 现代反射变焦光学系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017: 3-13.
- [8] Gao D R, Hu H, Wang W, et al. Optical design for a kind of simply processed and installed off-axis three-reflection [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(6): 0616001.
高铎瑞, 胡辉, 汪伟, 等. 一种改进的易于加工、装调的离轴三反光学系统设计[J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 0616001.
- [9] Pan J H. Design, fabrication and testing of aspherical optical surface[M]. Beijing: Science Press, 1994: 157-160.
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检测[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 157-160.
- [10] Li J Y, Li W Q, Long Y, et al. Design of off-axis three-mirror optical system based on free-form surface[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(9): 092202.
李俊阳, 李文强, 龙尤, 等. 基于自由曲面的离轴三反光学系统设计方法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(9): 092202.
- [11] Tian Q J, Zhang J H, Zhang H H, et al. Design of off-axis four-mirror optical antenna with long exit pupil distance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(18): 1822001.
田棋杰, 张建华, 张缓缓, 等. 长出瞳距离轴四反光学天线的设计研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(18): 1822001.
- [12] Gong D, Tian T Y, Wang H. Computer-aided alignment of off-axis three-mirror system by using Zernike coefficients[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(8): 1754-1759.
巩盾, 田铁印, 王红. 利用Zernike系数对离轴三反射系统进行计算机辅助装调[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(8): 1754-1759.
- [13] Xing H, Jiao W C, Wang Y. Method to elicit the boresight of infrared cryogenic camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0112008.
邢辉, 焦文春, 王响. 红外低温相机视轴引出方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0112008.
- [14] Du K. Optical system compact design and stray light analysis of micro/nano satellite remote sensing camera[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020: 42-50.
杜康. 微纳卫星遥感相机光学系统紧凑化设计与杂散光分析[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020: 42-50.
- [15] Guo Y X, Li Y C, Lü B B, et al. Design of new-style unobscured three-mirror optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(4): 1144-1147.
郭永祥, 李英才, 吕保斌, 等. 一种新型无遮拦三反射光学系统研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(4): 1144-1147.
- [16] Wang Z Q, Wang C Y, Sun H, et al. Design of off-axis three-mirror optical system for dynamic target simulation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(1): 012203.
王志强, 王春艳, 孙昊, 等. 动态目标模拟离轴三反光学系统的设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(1): 012203.