

大相对孔径、大视场、紧凑型空间光学系统设计

任志广^{1,2**}, 李旭阳^{1*}, 倪栋伟¹

¹中国科学院西安光学精密机械研究所空间光学应用研究室, 陕西 西安 710119;

²陕西师范大学物理学与信息技术学院, 陕西 西安 710119

摘要 设计了一种基于改良曼金反射镜的大相对孔径、大视场的光学成像系统, 分析了改良曼金反射镜的像差, 提出了改良曼金反射镜的设计方法。系统采用改良曼金反射镜和折反式光学系统结合的形式, 相对孔径为 1/1.8, 视场角为 $4^\circ \times 4^\circ$, 工作波段为 450~850 nm, 焦距为 380 mm, 成像探测器像元为 $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ 的互补金属氧化物半导体(CMOS)探测器, 在 250 lp/mm Nyquist 频率处的调制传递函数值接近衍射极限且大于 0.5。系统次镜采用曼金反射镜和消色差透镜结合的形式, 基于系统初始结构初步优化分析所得的球差、正弦差, 采用 PW 法求解出消色差曼金反射镜的光焦度; 基于消色差条件和系统剩余色差, 求解出消色差曼金反射镜 3 个表面的光焦度, 计算得到了表面的曲率半径。系统的单色像差及色差均较小, 成像质量好。

关键词 光学设计; 大相对孔径; 曼金反射镜; 大视场; 折反式光学系统

中图分类号 V476.9

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0922001

Compact Space Optical System Design with Large Relative Aperture and Field of View

Ren Zhiguang^{1,2**}, Li Xuyang^{1*}, Ni Dongwei¹

¹Space Optics Lab, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China;

²School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710119, China

Abstract An imaging optical system with large relative aperture and field of view was designed based on a modified Mangin mirror. The aberrations of the modified Mangin mirror are analyzed and a design method is proposed for it. The optical system adopts a combination of an improved Mangin mirror and a catadioptric optical system. The relative aperture is 1/1.8, field of view is $4^\circ \times 4^\circ$, working band is 450-850 nm, and focal length is 380 mm. The imaging detector is a CMOS detector with pixel of $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$. The modulation transfer function value is close to the diffraction limit and greater than 0.5 at a Nyquist frequency of 250 lp/mm. The secondary mirror of the system is designed based on a Mangin mirror and an achromatic lens. Based on the spherical aberration and sine aberration obtained from the preliminary optimization analysis of the initial system structure, the focal power of the achromatic Mangin mirror is solved by the PW method. Based on achromatic conditions and residual chromatic aberration of the system, the focal powers of three surfaces of the achromatic Mangin mirror are solved and the radii of the surfaces can be calculated. The system has small monochromatic and chromatic aberrations and good imaging quality.

Key words optical design; large relative aperture; Mangin mirror; large field of view; catadioptric optical system

OCIS codes 220.3620; 080.4035; 120.0280; 350.1260

1 引 言

空间遥感光学系统在对地观测、气象监控等领域发挥着重要作用^[1-2]。当焦距一定时,增大入瞳直径可显著提高系统的空间分辨率。对于光学成像系统而言,增大相对孔径可以提升系统的分辨率和灵

敏度。相对孔径越大,系统的分辨率越高,像面照度也越高,因此曝光时间越短,灵敏度随之提升,信息实时性增强。因此,研制大相对孔径、大视场、高灵敏度的空间遥感器成为重要的发展方向^[3-5]。

大相对孔径的光学成像系统中采用小像元尺寸探测器接收图像时,存在截止频率处的调制传递函

收稿日期: 2018-12-21; 修回日期: 2018-12-21; 录用日期: 2019-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(61427811)

* E-mail: lixuyang2004@126.com; ** E-mail: rzg121@126.com

数(MTF)难以接近衍射极限的困难,从而导致了高空间频率与高 MTF 值较难共存等难题^[6]。国内外现阶段多采用离轴三反或四反来实现大相对孔径光学系统的设计^[7-9],但常伴随着装调难度大、空间结构复杂导致的发射难度增加及加工成本高等问题。因此,设计一款在高空间频率处仍能保证高 MTF 的紧凑型光学遥感系统迫在眉睫。

本文针对高灵敏度、大视场的应用特性,设计了一种大相对孔径的空间光学成像系统,解决了大相对孔径在高空间频率 250 lp/mm 处难以接近衍射极限进而获得高 MTF 值的问题。基于技术指标,分析并计算出系统的初始结构;初步优化得到系统的剩余像差;对曼金反射镜进行改良,提出了一种消色差曼金反射镜,以校正系统的剩余像差;基于 PW 法计算出消色差曼金反射镜的初始结构,并将其代入初步优化后的系统中。设计了一种 F 数为 1.8、视场角为 $4^\circ \times 4^\circ$ 、工作波段为 450~850 nm、有效焦距为 380 mm、后工作距不小于 15 mm 的光学成像系统。

2 光学系统的结构选择及原理

2.1 初始结构选型

根据光学系统的有效焦距 f 、 F 数得到光学系统的通光口径 D 。考虑到透镜的加工难度及系统的空间结构,选取合适的主镜相对口径。根据系统功能确定系统的总体长度,并选取后工作距 Δ 。基于三级像差理论,从系统焦距与主镜焦距出发确定放大率和面型的曲率半径;根据消球差、彗差条件,最终确定主、次镜的面型系数,并根据遮拦比选择适当的结构,并优化参数^[10]。得到的折反式光学系统的初始结构如图 1 所示。

次镜的物距 l_2 和系统遮拦比 α 满足

$$l_2 = \frac{-f'_1 + \Delta}{\beta - 1}, \quad (1)$$

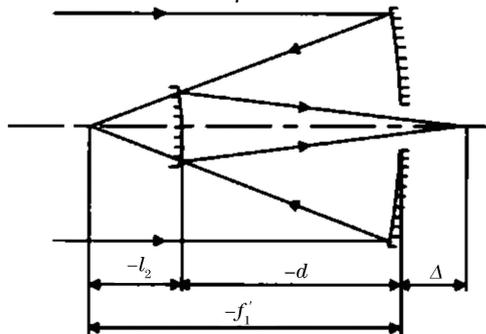


图 1 折反式光学系统的初始结构

Fig. 1 Initial configuration of catadioptric optical system

$$\alpha = \frac{l_2}{f'_1}, \quad (2)$$

式中: f'_1 为有效焦距; β 为垂轴的放大倍率。

主、次镜顶点的曲率半径 R_1 和 R_2 及两镜间隔 d 满足

$$R_1 = 2 \times \frac{D}{D/f'_1}, \quad (3)$$

$$R_2 = \frac{\alpha\beta}{\beta+1} R_1, \quad (4)$$

$$d = f'_1(1 - \alpha). \quad (5)$$

根据消球差、彗差条件得到主、次镜的面型参数 e_1^2 和 e_2^2 分别为

$$e_1^2 = 1 + \frac{2\alpha}{(1-\alpha)\beta^2}, \quad (6)$$

$$e_2^2 = \frac{2\beta/(1-\alpha) + (1+\beta)(1-\beta)^2}{(1+\beta)^3}. \quad (7)$$

2.2 曼金反射镜的原理

传统折反式光学系统的视场角(FOV)一般小于 $20'$,其对应的畸变和倍率色差一般也较小,因此可以忽略。当视场角为 $4^\circ \times 4^\circ$ 、 F 数为 1.8 时,光学系统大孔径对应大的孔径像差,即球差和色差;畸变和倍率色差分别与视场的三次方和一次方成正比,引入大视场必将增大畸变和倍率色差;彗差既与孔径相关,又与视场相关,所以大相对孔径、大视场也必将引入大的彗差。大像差必将导致系统的 MTF 远低于衍射极限,因此必须对色差、畸变等像差进行校正。这里可以引入曼金反射镜对系统像差进行校正。

传统的曼金反射镜是一种消球差反射镜,共有 3 个表面,其原理结构如图 2(a)所示,对应的薄曼金反射镜的总光焦度为

$$\Phi = 2\Phi_1 + \Phi_2, \quad (8)$$

式中: Φ_1 为第一面的光焦度; Φ_2 为第二面的光焦度。

当光阑与曼金反射镜重合时,反射镜对应的主要像差——球差极值 e_{LA} 及正弦差 e_{OSC} 满足^[11]

$$e_{LA} = \frac{1}{8} \frac{(8n^2 - 13n - 11)}{4n^2(n+3)} h^2 \Phi, \quad (9)$$

$$e_{OSC} = \frac{1}{8} \frac{(-n^3 + 3n^2 - 3n - 3)}{2n^2} h^2 \Phi, \quad (10)$$

式中: n 为透镜的折射率; h 为透镜的半通光口径。

从(9)式可以看出,球差极限的正负只与曼金反射镜的光焦度、 $(8n^2 - 13n - 11)$ 有关。当相对孔径为一定值时,可以通过改变折射率来改变球差的符号,进一步校正折反系统的球差,同时也可对彗差进

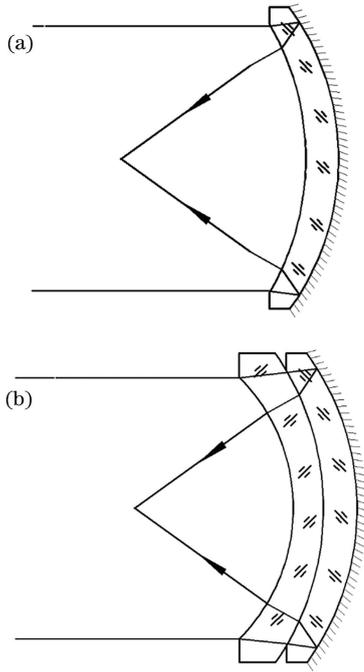


图 2 传统曼金反射镜和消色差曼金反射镜的原理结构图。(a)传统曼金反射镜;(b)消色差曼金反射镜

Fig. 2 Schematics of traditional Mangin mirror and achromatic Mangin mirror. (a) Traditional Mangin mirror; (b) achromatic Mangin mirror

行一定的校正。因为光阑与反射镜重合时不引入畸变和倍率色差,故可在曼金反射镜后加校正镜,用以校正系统的剩余像差。

2.3 曼金反射镜的优化

为压缩光学系统的轴向空间,常在次镜前加透镜。但透镜在校正系统球差及畸变的同时,也引入了色差。根据曼金反射镜的像差分析,传统曼金反射镜不具备色差校正能力。根据文献[12],可采用消色差双胶合透镜取代负镜的办法实现消色差的功能。消色差曼金反射镜的结构如图 2(b)所示。

新曼金反射镜可提供像差校正功能的面共有 5 个,对应的薄消色差双胶合曼金反射镜的光焦度 Φ' 为

$$\Phi' = 2\Phi'_1 + 2\Phi'_2 + \Phi'_3, \quad (11)$$

式中: Φ'_1 为左侧透射表面的光焦度; Φ'_2 为中间胶合表面的光焦度; Φ'_3 为右侧反射表面的光焦度。

对于双胶合薄曼金反射镜,有

$$2h^2 \left(\frac{\Phi'_1 + \Phi'_2}{\nu_1} + \frac{\Phi'_2 + \Phi'_3}{\nu_2} \right) + C = 0, \quad (12)$$

式中: ν_1, ν_2 为从左至右两透镜玻璃的阿贝数; C 为系统初始结构优化后的剩余色差。

设透镜从左至右,介质的折射率依次为 n_0, n_1, n_2 , 表面曲率半径依次为 r_1, r_2, r_3 , 则

$$\Phi'_1 = \frac{n_1 - n_0}{r_1}, \quad (13)$$

$$\Phi'_2 = \frac{n_2 - n_1}{r_2}, \quad (14)$$

$$\Phi'_3 = -2 \frac{n_2}{r_3}. \quad (15)$$

随着光焦距的变化范围增加,大相对孔径、大视场光学系统的像差校正范围也增大。消色差曼金反射镜不仅具有传统曼金反射镜的球差、正弦差校正能力,还具有色差校正能力,而且对系统球差、正弦差的校正能力大于传统曼金反射镜。

3 含消色差曼金反射镜的光学系统设计

3.1 光学成像系统初始结构设计

光学成像系统的主要技术指标如表 1 所示。

表 1 光学成像系统的主要技术指标

Table 1 Main specifications of optical imaging system

System parameter	Value
Focal length /mm	380
Field of view /[(°)×(°)]	4×4
F number	1.8
Working distance /mm	>15
Spectral bands /nm	450-850
Pixel size /($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	2×2

根据有效焦距 f_{EFL} 为 380 mm 和 F 数为 1.8 得到光学系统的通光口径为 210 mm。在选取合适的透镜加工难度的前提下,为压缩光学系统的整体长度,实现超紧凑的光学结构形式,选取主镜的相对口径为 1:1,后工作距 $\Delta = 50$ mm。在实现合适遮拦比的前提下,由(1)~(9)式计算出系统的初始结构参数如表 2 所示。

表 2 光学系统的初始结构参数

Table 2 Initial structural parameters of optical system

Surface	Radius / mm	Quadratic coefficient	Thickness / mm
Primary mirror	-420.00	1.4893	-117.14
Secondary mirror	-417.86	24.8548	167.14

3.2 消色差曼金反射镜结构设计

在光学设计软件 CODE V 中选取 10 个视场对全视场 $\pm 3^\circ$ 进行追迹,视场依次为 $(0^\circ, 0^\circ), (1^\circ, 1^\circ), (1.4^\circ, 1.4^\circ), (0^\circ, 2^\circ), (\pm 2^\circ, 0^\circ), (2^\circ, 2^\circ), (2^\circ, -2^\circ),$

$(-2^\circ, 2^\circ)$ 、 $(-2^\circ, -2^\circ)$, 其中, 第一位数字为横向视场, 第二位为纵向视场。经过初步优化发现系统存在较大的球差、彗差和畸变, 添加少量校正镜对其进行校正后发现仍存在较大像差; 除畸变为正值外, 球差、彗差均为负值, 分别为 -0.0317 mm 和 -0.0613 mm , 且正弦差为 $-0.033110 \text{ mm} - (-0.018203 \text{ mm}) = -0.014907 \text{ mm}$, 远大于单个像元尺寸 ($2 \mu\text{m}$), 因此必须对系统像差进行校正。

根据(9)~(11)式可知, 取曼金反射镜的折射率为 $1.4 \sim 2$ 时, 因子 $8n^2 - 13n - 11$ 和 $-n^3 + 3n^2 - 3n - 3$ 恒为正值, 因此当曼金反射镜取负光焦度时, 可引入正值的球差和正弦差, 选取合适的光焦度时便可以校正原本的球差及正弦差。

根据初始结构计算所得球差及正弦差可知, 在选取合适冕牌玻璃和火石玻璃的前提下, 可由(9)~(10)式计算得到消色差曼金反射镜的光焦度; 通过PW法, 结合(11)~(12)式可以计算得到消色差曼金反射镜3个表面的光焦度, 由(13)~(15)式可以计算得到3个表面的曲率半径; 将计算得到的曼金反射镜放置在图1中次镜的位置, 为降低计算难度, 经程序优化得到反射面的偏心率的平方 e^2 , 从而得到含有消色差曼金反射镜的折反式大相对孔径、大视场的光学成像系统。

计算后发现, 采用折射率为 1.747905 (对应波长为 650 nm) 的 HZF6 玻璃在前、折射率为 1.514517 (对应波长为 650 nm) 的 DK9L 在后的消色差曼金反射镜可较好地校正像差。根据光线经过的顺序对表面进行编号, 优化后得到消色差曼金反射镜的表面参数, 如表3所示。

表3 消色差曼金反射镜的表面参数

Table 3 Surface parameters of achromatic Mangin mirror

Surface	Radius / mm	Quadratic coefficient	Distance / mm	Material
1	-1989.88	0	-8	HZF6
2	-49828.54	0	-8	DK9L
3	-876.5298	-9.058	-	-

3.3 光学成像系统的优化

本研究选取互补金属氧化物半导体 (CMOS) 的像元大小为 $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$, 在实际应用中, 光学系统截止频率 f_c 的大小取决于探测器的分辨率^[13], 即

$$f_c = \frac{1}{2 \text{ pixel}} = 250 \text{ lp/mm}, \quad (16)$$

因此, 在优化系统时截止频率设置为 250 lp/mm 。

因为光学系统像差的最大值处在视场的 0.707 处^[14], 因此研究中选取 0 视场、 0.5 视场、 0.7 视场及对角线视场进行光线追迹。鉴于反射镜为二次曲面, 会导致像质不对称等现象, 对该系统的 6° 视场共追迹 10 个视场。

通过采用PW法推导出的曼金反射镜的球差、正弦差以及色差公式, 并结合光焦度公式, 计算得到了消色差曼金反射镜的初始结构, 将其代入折反式光学系统初步优化后的结构, 并进行优化, 得到含有消色差曼金反射镜的大相对孔径、大视场的光学成像系统。该系统的最大孔径为前置校正镜的直径 220 mm , 系统总长为 193.5 mm , 实现了大相对孔径、大视场超紧凑光学结构形式的光学成像系统设计。系统结构如图3所示。

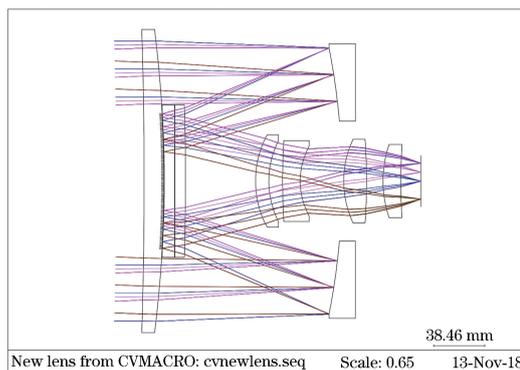


图3 光学系统结构

Fig. 3 Layout of optical system

含有消色差曼金反射镜光学成像系统的结构参数如表4所示, SPECIAL为特质玻璃, SCHOTT为肖特玻璃, CDGM为成都光明玻璃。

4 成像质量分析

对光学系统追迹 10 个视场的点列图 (SPT)、MTF、场区和畸变, 并进行分析, 结果如图4~6所示。图4为光学成像系统 10 个视场的 MTF 曲线, 在 CMOS 探测器的 Nyquist 空间频率 250 lp/mm 处进行分析。结果显示: 追迹的 10 个视场的 MTF 均在 0.3 左右, 接近衍射极限, 满足光学成像系统的要求。

系统的点列图分布如图5所示, 弥散斑整体接近圆形, 表明彗差及畸变得到了很好的校正; 引入消色差曼金反射镜后, 系统色差也得到显著改善; 对角线边缘视场处弥散斑直径的均方根 (RMS) 值最大, 约为 $2 \mu\text{m}$, 总体小于单个像元的尺寸 $2 \mu\text{m}$ 。

表 4 含有消色差曼金反射镜光学成像系统的初始结构参数

Table 4 Initial structural parameters of optical system with achromatic Mangin mirror

Surface	Radius /mm	Quadratic coefficient	Thickness /mm	Materials
1	-3500		15.0	SILICA_SPECIAL
2	-882.55	-9.3316	138.5	
STOP	-520.328	-0.3451	-122.5	
4	-2100.97		-8.0	SF4_SCHOTT
5	83472.675		-8.0	NFK5_SCHOTT
6	-882.55	-9.3316	8.0	NFK5_SCHOTT
7	83472.675		8.0	SF4_SCHOTT
8	-2100.97		50.8	
9	74.1	0.5664	10.0	NSK16_SCHOTT
10	67.12		10.5	
11	459.756	-8.0859	10.0	DLAF79_CDGM
12	53.512		33.8	
13	73.722		17.2	HZK50_CDGM
14	-464.806		12.6	
15	84.72		13.3	HZK9A_CDGM
16	361.916		15.0	

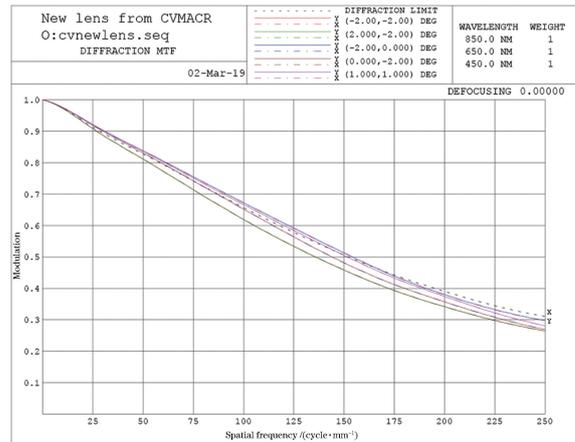
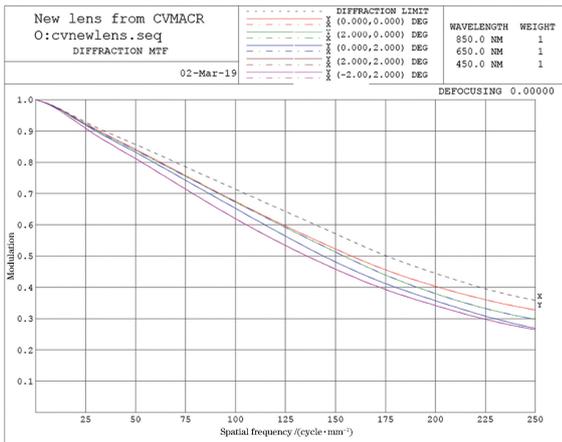


图 4 系统曲线。(a) 1~5 视场的 MTF 曲线；(b) 6~10 视场的 MTF 曲线

Fig. 4 MTF curves of system. (a) MTF curves of field 1-5; (b) MTF curves of field 6-10

图 6 为像散、场曲和畸变曲线图。图 6(a)显示子午场曲小于 0.4%，弧矢场曲小于 0.2%，像散小于 0.3%；图 6(b)显示系统的畸变小于 0.48%。可见，在大视场光学成像系统中，像散、场曲和畸变均得到很好的校正。

5 消色差曼金反射镜二次曲面检测补偿器设计

二次曲面光学元件可以很好地校正系统的像

差,改善系统的成像质量。干涉法作为一种非接触式的检测方法,具有精度高、操作简单等优点。对于二次凹曲面,可采用干涉法进行检测。

在本研究中,消色差曼金反射镜共有 3 个表面,表面 6 为二次曲面,曲率半径 R 为 -882.196 mm,二次曲面系数 K 为 -9.3306 ,口径为 99.4 mm,其余 2 个均为球面。由表面 6 的数据分析可知,该二次曲面属于相对较易检测的曲面。检测补偿器的检测光路如图 7 所示。

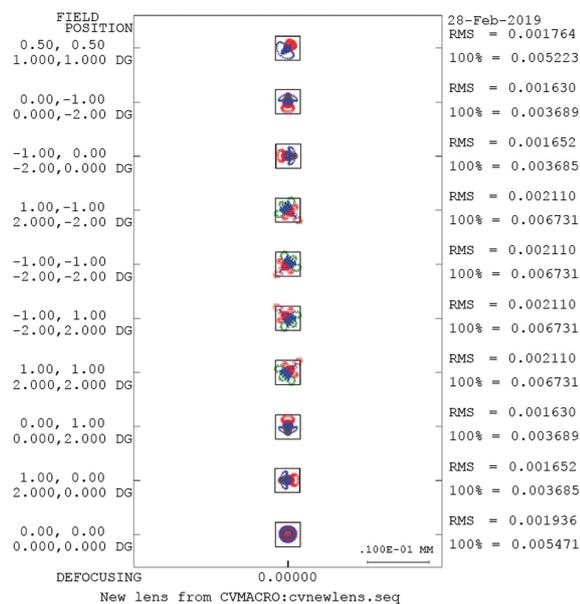


图 5 系统点列图

Fig. 5 Spot diagram of system

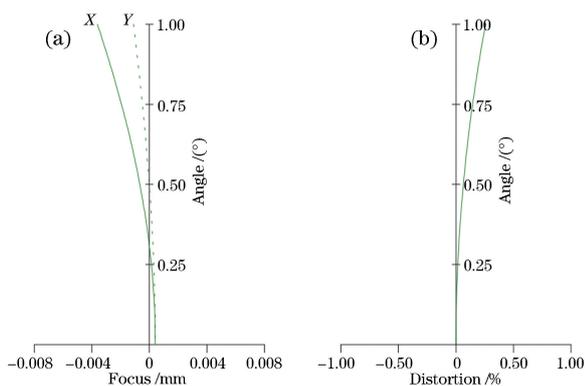


图 6 系统畸变、像散和场曲。(a) 像散和场曲；(b) 畸变
Fig. 6 Astigmatic, curvature of field, and distortion.
(a) Astigmatic and curvature of field; (b) distortion

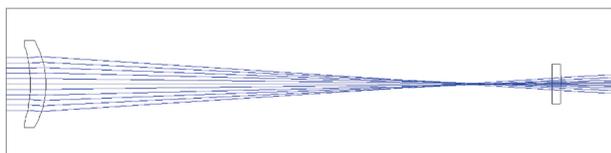


图 7 检测补偿器的检测光路

Fig. 7 Optical path of detection compensator

检测系统的残余波像差如图 8 所示：表面面型最大峰谷值 (PV) 为 0.0004λ ，表面面型 RMS 为 0.000λ ，检测波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 。结果表明，该检测补偿器可以很好地实现补偿检测，可以满足补偿检测的要求。

6 结 论

本研究实现了一种新型结构形式的大相对孔

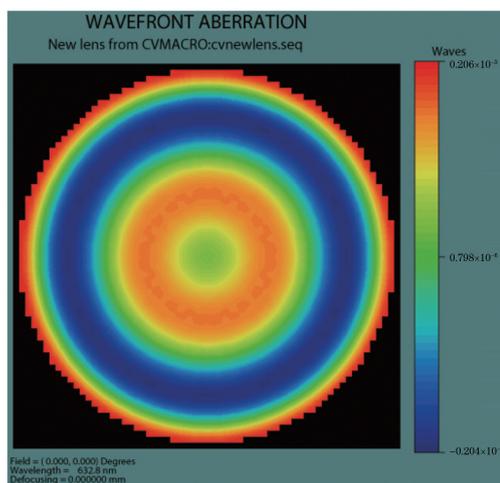


图 8 检测系统的残余波像差

Fig. 8 Residual wave aberration of testing system

径、大视场、接近衍射极限的折反式光学成像系统。在 CMOS 探测器 Nyquist 频率 250 lp/mm 处，系统主要视场的 MTF 值均约为 0.3；系统弥散斑半径的最大 RMS 值约为 $2 \mu\text{m}$ ，整体上小于探测器的单个像元尺寸；系统畸变小于 0.48%，能够满足光学成像系统的使用要求。该光学成像系统除具有大相对孔径、大视场、宽光谱等特点外，还具有能满足高 Nyquist 频率处接近衍射极限的特点。本研究设计的含有消色差曼金反射镜的折反式光学系统不仅克服了传统折反式光学系统难以实现大视场的难题，还避免了大相对孔径、大视场、接近衍射极限光学系统采用离轴三反射光学结构引入的装调难题，同时也实现了离轴光学系统难以实现的超紧凑结构，具有小球差、小正弦差、低色差及小畸变等优点。该光学结构形式可以广泛应用于军事及气候检测等方面。

参 考 文 献

- [1] Meng Q Y, Dong J H, Qu H F, *et al.* Light optical system design with wide spectral band, large field of view for deep space exploration[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(1): 0122001.
孟庆宇, 董吉洪, 曲洪丰, 等. 用于深空探测的宽谱段大视场小型光学系统设计[J]. 光子学报, 2015, 44(1): 0122001.
- [2] Dun X, Jin W Q, Wang X. 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.
- [3] Bai H B, Miao L. Design of large aperture and long focal length zoom optical system [J]. Journal of

- Applied Optics, 2018, 39(5): 644-649.
白虎冰, 缪礼. 大口径长焦距变焦光学系统设计[J]. 应用光学, 2018, 39(5): 644-649.
- [4] Chen W, Zheng Y Q, Xue Q S. Airborne imaging spectrometer with wide field of view and large relative-aperture [J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(1): 15-21.
陈伟, 郑玉权, 薛庆生. 机载宽视场大相对孔径成像光谱仪[J]. 光学精密工程, 2015, 23(1): 15-21.
- [5] Zhu L R. Optical design of four-mirror systems with ultra-large aperture [D]. Suzhou: Soochow University, 2007: 7-48.
朱立荣. 超大口径四反射镜光学系统设计[D]. 苏州: 苏州大学, 2007: 7-48.
- [6] Hu M Y, Li M J, Zhao Q, *et al.* Design and imaging distortion correction of pin-hole objective lens with large field [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(5): 0522002.
胡明勇, 李明杰, 赵奇, 等. 大视场针孔物镜设计及成像畸变校正 [J]. 光学学报, 2017, 37(5): 0522002.
- [7] Liu J, Liu W Q, Kang Y S, *et al.* Optical design of off-axis four-mirror optical system with wide field of view [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1022002.
刘军, 刘伟奇, 康玉思, 等. 大视场离轴四反射镜光学系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1022002.
- [8] Goldstein N, Dressler R A, Shroll R, *et al.* Ground testing of prototype hardware and processing algorithms for a Wide Area Space Surveillance System (WASSS): ADA591374 [R]. New Mexico: Air Force Research Lab Kirtland AFB NM Space Vehicles Directorate, 2013.
- [9] Lü Y, Zeng X F, Zhang F. Effect of surface scattering on imaging performance for off-axis three mirror optical system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(9): 092901.
吕洋, 曾雪峰, 张峰. 镜面散射对离轴三反系统成像质量的影响 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(9): 092901.
- [10] Pan J H. The design, manufacture and test of the aspherical optical surfaces [M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004: 31-36.
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验 [M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004: 31-36.
- [11] Lin Y S. The primary aberration characteristics analysis of Mangin mirror [J]. Optical Instruments, 1981(2): 53-61.
林银森. 曼金反射镜初级象差特性分析 [J]. 光学仪器, 1981(2): 53-61.
- [12] Warren J S. Modern optical engineering: the design of optical systems [M]. 4th ed. New York: McGraw Hill Companies, 2011: 205-234.
- [13] Wang W S. Applied optics [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2010: 293-298.
王文生. 应用光学 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2010: 293-298.
- [14] Yu D Y, Tan H Y. Engineering optics [M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
郁道银, 谈恒英. 工程光学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.