

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

紧凑式离轴三反光学系统设计

蒋成斌, 陈智利, 王肖同, 张媛, 成姗姗

引用本文:

蒋成斌, 陈智利, 王肖同, 等. 紧凑式离轴三反光学系统设计[J]. 光电工程, 2023, 50(12): 230231.

Jiang C B, Chen Z L, Wang X T, et al. Design of compact off-axis triple mirror optical system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(12): 230231.

<https://doi.org/10.12086/oe.2023.230231>

收稿日期: 2023-09-14; 修改日期: 2023-11-22; 录用日期: 2023-11-23

相关论文

光楔分光中波红外Fizeau型干涉仪光学系统设计

杨帅, 李杨, 张文喜, 伍洲, 覃日康, 樊耀轩

光电工程 2023, 50(5): 230014 doi: 10.12086/oe.2023.230014

基于离轴四反的空间引力波探测激光发射望远镜设计

范子超, 谈昊, 莫言, 王海博, 赵璐佳, 冀慧茹, 姜治渝, 彭如意, 付利平, 马冬林

光电工程 2023, 50(11): 230194 doi: 10.12086/oe.2023.230194

SAR实时成像光学处理器光机系统设计

赵洪强, 张星祥, 王夺, 毕国玲, 付天骄

光电工程 2022, 49(9): 210421 doi: 10.12086/oe.2022.210421

High-resolution visible imaging with piezoelectric deformable secondary mirror: experimental results at the 1.8-m adaptive telescope

Youming Guo, Kele Chen, Jiahui Zhou, Zhengdai Li, Wenyu Han, Xuejun Rao, Hua Bao, Jinsheng Yang, Xinlong Fan, Changhui Rao

Opto-Electronic Advances 2023, 6(12): 230039 doi: 10.29026/oea.2023.230039

更多相关论文见光电期刊集群网站 

 | 光电工程
Opto-Electronic Engineering

<http://cn.ojournal.org/oe>



OE_Journal



Website

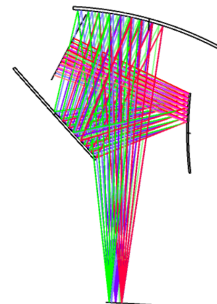


DOI: 10.12086/oe.2023.230231

紧凑型离轴三反光学系统设计

蒋成斌, 陈智利*, 王肖同, 张媛, 成姗姗

西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710021



摘要: 为解决地球遥感观测和星载激光雷达探测等领域对空间光学系统尺寸小型化、结构紧凑和高分辨率的要求, 本文设计了一种基于 Zernike 自由曲面的紧凑型离轴三反系统, 同时满足了长焦距、小畸变和宽工作波段的要求。该系统采用非对称、近圆形布局的离轴三反光学系统, 并在第三反射镜采用了自由曲面的设计, 通过在 Zemax 软件中设置适当的优化目标和方法, 对光学系统进行设计优化。最终该系统有效焦距为 800 mm, F 数为 4, 视场角为 $12^\circ \times 6^\circ$, 畸变小于 1%, 工作波段覆盖可见光及近/中红外波段, 在 400 km 轨道高度实现了 1.5 m 的地元分辨率(可见光)和 2.5 m 的地元分辨率(近红外), 地面幅宽为 80 km \times 40 km。并进行了系统像差、点列图、MTF 等性能指标评估的分析与验证, 结果表明该设计方案带来了高分辨率并提升了信息获取能力。

关键词: 离轴三反光学系统; 空间光学; 光学系统设计; 紧凑型结构

中图分类号: TH74

文献标志码: A

蒋成斌, 陈智利, 王肖同, 等. 紧凑型离轴三反光学系统设计 [J]. 光电工程, 2023, 50(12): 230231

Jiang C B, Chen Z L, Wang X T, et al. Design of compact off-axis triple mirror optical system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(12): 230231

Design of compact off-axis triple mirror optical system

Jiang Chengbin, Chen Zhili*, Wang Xiaotong, Zhang Yuan, Cheng Shanshan

School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China

Abstract: In order to meet the requirements of miniaturization, compact structure and high resolution of the space optical systems in the fields of Earth remote sensing observation and spaceborne Lidar detection, this paper designs a compact off-axis triple inverse system based on Zernike free-form surface, which simultaneously meets the requirements of long focal length, small distortion and wide working band. The system adopts an off-axis triple inverse optical system with the asymmetric and nearly circular layout, and the third mirror of the system adopts the free-form surface design. By setting appropriate optimization objectives and methods in Zemax software, the design of the optical system is optimized. Finally, the effective focal length of the system is 800 mm, the F-number is 4, the field of view is $12^\circ \times 6^\circ$, and the distortion is less than 1%. The working band covers the visible and near/middle infrared bands, and the ground element resolutions of 1.5 m (visible light) and 2.5 m (near infrared) can be achieved at the orbit height of 400 km, and the ground width is 80 km \times 40 km. The analysis and verification of

收稿日期: 2023-09-14; 修回日期: 2023-11-22; 录用日期: 2023-11-23

*通信作者: 陈智利, medichen@163.com。

版权所有©2023 中国科学院光电技术研究所

system aberration, dot plot, MTF and other performance indexes are carried out. The results show that the design scheme brings the high resolution and improves the information acquisition ability.

Keywords: off-axis triple inverse optical system; space optics; optical system design; compact structure

1 引言

离轴反射系统因其无色差、无中心遮挡和紧凑结构等特点, 在现代空间光学遥感领域广泛应用于对地遥感观测^[1-2]和星载激光雷达探测^[3-4]等场景。特别是离轴三反光学系统在满足高像质和轻量化设计需求方面具有明显优势, 相较于离轴两反和离轴四反系统更具潜力^[5]。随着空间遥感技术的不断发展, 关于离轴三反光学系统的分辨率、工作波段和紧凑性的要求也随之不断提高, 以便满足高分辨、宽光谱和轻小型的设计目标。

随着技术的发展, 离轴三反光学系统在空间光学领域得到广泛应用和认可。参考文献 [6] 设计了一款多谱段推扫式的离轴三反光学系统, 工作波段为 0.47 μm 至 0.87 μm , 有效口径为 20 mm, 视场达到 $36^\circ \times 6^\circ$, 在轨道高度为 600 km, 地面像元分辨率 GSD 为 50 m。整体结构为主镜、三镜使用高次非球面, 次镜使用二次曲面, 在奈奎斯特频率 71 lp/mm 处 MTF 值大于 0.6, 成像质量良好。参考文献 [7] 设计的大视场推扫式光学系统在非球面三反系统的基础上, 对主镜和三镜采用了 Zernike 自由曲面, 分析了不同项对像差的影响, 最终设计的离轴三反系统焦距为 1300 mm, 视场为 $35^\circ \times 2^\circ$, 在轨道高度为 650 km, 地面像元分辨率为 4.4 m, 系统在 50 lp/mm 处 MTF 大于 0.5, 最大畸变为 2.9%。参考文献 [8] 设计的星载高分辨率红外双谱段遥感器光学系统, 在轨道高度为 500 km, 地面像元分辨率达到了 5 m, 相对孔径 1/4, 视场角 2.3° , 在空间频率 25 lp/mm 处 MTF 大于 0.32, 其视场角较小, 成像范围有限。参考文献 [9] 设计了一款大视场离轴三反光学系统, 其视场角为 10° , 相对孔径 1/4.5, 系统在轨道高度为 400 km, 地面像元分辨率为 4 m, 在 71.4 lp/mm 处各视场 MTF 均大于 0.28, 畸变小于 0.1%。虽然离轴三反光学系统已得到普遍应用, 但在现代空间光学领域的快速发展下, 其系统结构、分辨率和工作波段的要求也在不断提升, 而紧凑式离轴三反系统能够有效地压缩系统体积, 从而节省材料和降低成本, 并实现系统性能的提升。参考文献 [6-9] 所设计的系统成像质量

都基本满足需求, 但其结构仍不够紧凑, 不能满足空间光学系统的尺寸小型化要求, 且分辨率普遍不高, 因此需要对紧凑式系统结构进行深入研究。

本研究旨在实现离轴三反光学系统结构的紧凑化并提高系统的分辨率, 以满足空间光学轻小型的要求并获取细节更为丰富的图像数据, 为各种遥感应用提供更精确的信息服务。通过对系统进行优化, 实现可见光及近/中红外波段的高性能光学成像, 有助于提高遥感图像的信息量, 为地球观测和资源调查等领域提供更全面的数据支持^[10]。可见光波段可用于地形检测、泥沙检测、植被检测、海洋监测等领域, 近红外波段可应用于大气校正等领域^[11]。针对空间遥感领域的特殊需求, 本研究将致力于实现轻量化和紧凑性的优化设计, 实现一种近圆形布局的离轴三反结构, 以降低系统的质量和体积, 为星载激光雷达探测等应用提供更为实用的解决方案。

2 指标需求分析

2.1 指标确定

本文设计的紧凑式离轴系统的指整体指标要求分别为: 系统有效焦距 800 mm, F 数为 4, 在 400 km 轨道高度上, 可见光、近红外和中红外的地元分辨率分别为 1.5 m、2.5 m、8.5 m。离轴三反系统的设计指标, 包括入瞳直径、工作视场大小、探测器像元尺寸和奈奎斯特频率可由下列公式给出:

$$D = \frac{f'}{F}, \quad (1)$$

$$TFOV = 2 \arctan\left(\frac{W}{2H}\right), \quad (2)$$

$$s = \frac{d \times f}{H}, \quad (3)$$

$$N_n = \frac{1}{2\varphi}, \quad (4)$$

其中: D 为光学系统入瞳直径, f 为光学系统有效焦距, $TFOV$ 为光学系统的视场角, W 为横向/纵向幅宽, H 为卫星在轨高度, s 表示像元大小, d 为地元分辨率, φ 表示像素的尺寸。

根据式 (1)~(3) 计算可得到本文设计的紧凑式离轴三反系统的具体设计指标如表 1 所示。

表 1 光学系统设计参数表

Table 1 Table of the optical system design parameters

指标项	参数值
焦距	800 mm
入瞳直径	200 mm
F数	4
光谱范围	0.486~0.656 μm , 0.78~2.5 μm , 3~5 μm
视场	12°×6°
像元尺寸	可见光通道为3 μm , 近红外通道为5 μm , 中红外通道为17 μm
成像要求	可见光MTF(@160 lp/mm>0.2) 近红外MTF(@100 lp/mm>0.2) 中红外MTF(@30 lp/mm>0.2)

2.2 系统方案选择

常见的光学系统有折射式、折反射式和全反射式系统三类^[12]。全反射系统利用多个镜面来纠正光线的折射和散射,从而有效减少球差、彗差和像散等像差问题。这种设计方案可以提供更清晰、更准确的图像,同时提高望远镜的观测能力和性能。采用全反射系统还可以灵活地调整和优化光学参数,以满足特定的技术要求^[13]。通过选择合适的镜面形状、曲率半径和镜面材料,可以实现更高的光学效率和更广泛的波段覆盖。

本设计采用全反射式非共轴结构(如非共轴孔径、非共轴视场等),实现避免主镜与次镜之间的相互遮挡,以及三镜与次镜之间的相互遮挡。相对于共轴系统,非共轴系统不仅可以提供较大的视野,而且可以消除中间的遮挡。常见的离轴三反式光学系统设计有Cook型三反系统,如图1所示。它具有平坦的视场,其中二级和三级镜面呈球形,简化了制造^[14]。这种布置的视野为7°×12°。由于该系统是共轴结构,三镜和主镜之间只存在口径上的偏心,而无倾斜,因此便于后期的装调工作。

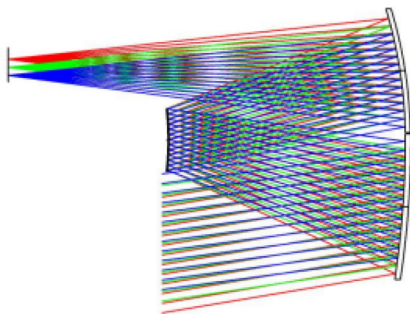


图 1 Cook 型三反系统

Fig. 1 Cook type three reverse system

而本文设计的紧凑型三反系统,其特点是三面反射镜的位置近似围成一个圆,像面位置位于第一面镜子和第二面镜子之间。直观的结构如图2所示。此系统结合了孔径离轴和视场离轴的优点,既避免了中心遮挡,又实现了较大视场。在这种系统中,光线通过非中心孔径进入,并在非中心区域形成视场。这样的设计可以进一步优化系统性能,适用于对成像质量和视场要求较高的应用场景^[15]。

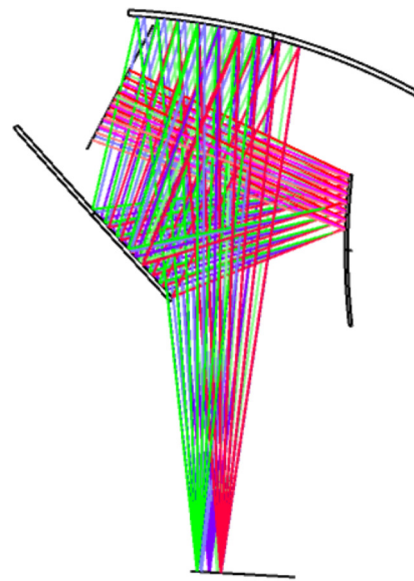


图 2 紧凑型结构示意图

Fig. 2 Compact structure diagram

3 紧凑型三反系统初始结构计算

在实际应用中,一般采用求解基础像差方程的方法来确定系统的初始构型。在此基础上,提出了一种利用视场角度离轴和XY坐标离轴的三反系统。随后,

通过逐步增加视场优化来得到最终的结构。因此，一个良好的初始结构对于后续的优化过程起到至关重要的作用。

同轴三反系统的初始结构如图 3 所示。

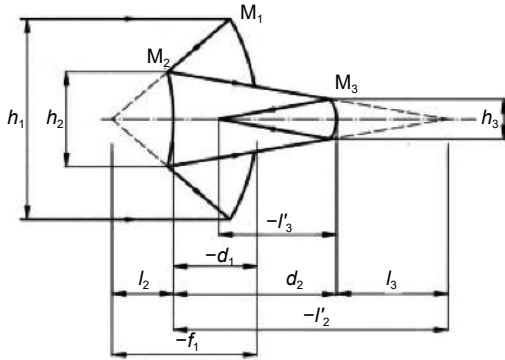


图 3 同轴三反结构图^[16]
Fig. 3 Triaxial structure diagram

根据图 3，同轴三反光学系统的起始结构参数可以被确定，包括：一镜、二镜和三镜尺寸的半径 R_1 、 R_2 和 R_3 ； d_1 、 d_2 作为所述主反射镜与所述辅助反射镜、所述辅助反射镜与所述第三反射镜的间距。得到了 $k_1 = -e_1^2$ 、 $k_2 = -e_2^2$ 、 $k_3 = -e_3^2$ ，这 3 个二次曲线的系数，其中 e 表示偏心率。此外，还有 α_1 、 α_2 、 β_1 、 β_2 4 个相关参数。将这 4 个相关参数引入到塞德尔像差公式中，可以得到一阶像差 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 的计算公式。取 $S_1 = S_2 = S_3 = 0$ ，可得三个非球面的非球面系数 $-e_1^2$ 、 $-e_2^2$ 、 $-e_3^2$ 在消除了球差、像散、彗差的值，令 $S_4 = 0$ 可以消除场曲，最终得到四个轮廓参数的关系，通过高斯光学理论得 R_1 、 R_2 、 R_3 、 d_1 、 d_2 。

为简化计算，取一二面厚度互为相反数，通过 $f' = -800$ mm， $\alpha_1 = 0.2$ ， $\alpha_2 = 1.8$ ，可得到一组初始结构参数，如表 2 所示。

理想结构的初始离轴倾角计算公式为^[17]

$$d_2 = 2R \sin(\theta_2 - \theta_3), \quad (5)$$

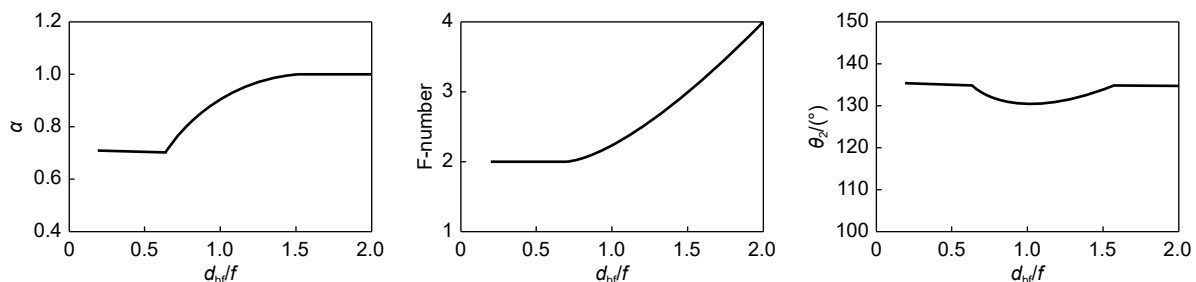


图 5 d_{bf}/f 与部分参数的关系^[17]
Fig. 5 Relationship between d_{bf}/f and some parameters

$$d_3 = d_{bf} - d_2 [\cos \theta_3 - \sin \theta_3 / \tan(\theta_2 + \theta_3)], \quad (6)$$

$$\cos \theta_1 = - \frac{d_1 + (d_2/2) \cos \theta_2}{[d_1^2 + (d_2/2)^2 + d_1 d_2 \cos \theta_2]^{1/2}}, \quad (7)$$

$$\tan \theta_3 = - \frac{(d_1/2) \sin \theta_2}{d_2 + (d_1/2) \cos \theta_2}, \quad (8)$$

其中： θ_3' 是反射镜 3 处光线三角形的角度，即 $\theta_3' = d_1/2R$ 。式 (5)~(8) 可以从图 4 中的几何关系得到。

表 2 初始结构参数
Table 2 Initial structure parameter

	曲率半径/mm	厚度	圆锥系数
主镜	-1641.935	-330	-4.118
次镜	-550.510	330	-0.919
三镜	-828.318	-730.4	0

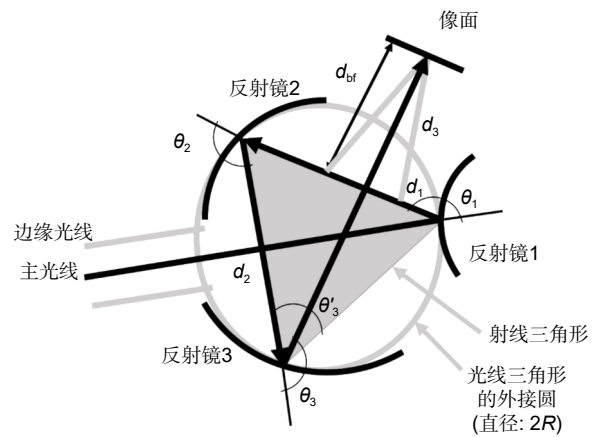


图 4 理想结构示意图
Fig. 4 Ideal structure diagram

第一步根据系统参数 f 、 R 和 d_{bf} 确定路径配置。结构可由上述 6 个构造参数 d_i 和 θ_i 描述。焦距 f 和系统大小设置为 800，即 $f = 2R = 800$ ，需要的 F 数为 4，由图 5 可得 $d_{bf}/f = 2$ ， d_{bf} 可设置为 1600，同时可知 θ_2 的大小为 135° 。根据定义， $d_1 = 2\alpha R = 800$ 。其他的构造参数 d_2 、 d_3 、 θ_1 和 θ_3 即可通过式 (5)~(8) 计算得到，最终得到的初始参数如表 3 所示。

表 3 初始结构的倾斜和偏心
Table 3 Tilt and eccentricity of the initial structure

项目	倾斜X/倾斜Y	偏心X/偏心Y
主镜	±18.4°	±800
次镜	±45°	±565
三镜	±45°	±1600

4 系统优化与分析评价

首先是最基础的系统参数控制, 如 EFFL、WFNO 等操作数, 按照设计所要求直接设置。通过 COVA、ABLT 操作数来限制圆锥系数。并运用 FCGT、FCGS、TRAY、SPHA 及相关数学操作数来控制像差。基于上述求出的同轴三反光学系统对其优化并进行离轴操作, 利用点到直线的距离公式来调控三面反射镜之间的距离, 使三面镜子近似抵在一个圆上, 来确保光学系统总体结构符合提出紧凑型结构。具体过程为: 首先通过读取物面(面 1)上边缘点以及主镜(面 3)上边缘点的 yz 坐标信息, 来确定一条直线, 利用直线的斜截式 $y = kx + b$ 来计算斜率 k 和截距 b , 然后获取次镜(面 5)下边缘点的 yz 坐标信息, 将这些坐标视为点, 最后根据式 (9) 来求出点到直线的距离。图 6 为对该方法的直观解释, 图中红线为控制的距离。

$$d = \frac{|kx_0 - y_0 + b|}{\sqrt{k^2 + 1}} \quad (9)$$

利用此方法对次镜到像面和三镜连线的距离进行约束以控制光学结构和遮拦, 并对三镜到主镜和次镜连线的距离进行控制, 避免三镜过度靠近主镜, 从而导致两镜体互相嵌入无法正常生产安装。并通过 PMVA、ABGT、ABLT 操作数将离轴量控制在预想范围内。

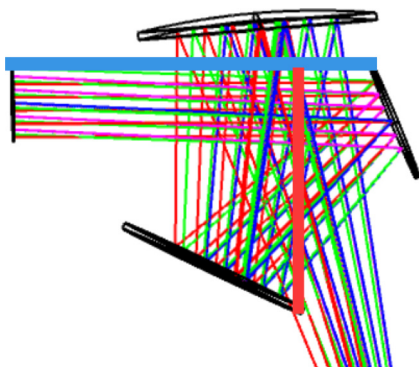


图 6 距离控制示意图
Fig. 6 Range control diagram

在初期三反射镜的面型选择为偶次非球面, 并设置了 4、6 阶系数为变量进行优化, 获得了焦距为 800 mm、视场为 $10^\circ \times 6^\circ$ 、入瞳直径为 150 mm 的非球面光学系统, 发现成像质量并不符合要求, 在 -5 度到 0 度的视场范围内, MTF 值较低, 无法满足成像要求。此外, 系统存在一定程度的遮拦, 需要进一步进行优化。通过像质评价可以得知, 系统的 MTF 均匀一致性较差, MTF 频率为 100 lp/mm 时的最大值为 0.527, 最小值为 0.07, 平均值为 0.364。系统的 RMS 半径为 $6.213 \mu\text{m}$, 畸变在边缘视场最大, 达到 1.4%。整个 $10^\circ \times 6^\circ$ 的视场范围内, 系统未能满足成像要求。

考虑到如果只采用偶次非球面或二次型反射镜, 则由于其可优化的自由度太少, 很难满足高阶像差的校正要求和设计结构的要求以及系统分辨率的要求。因此为消除离轴反射系统中的离轴像差、倾斜角度、不对称高阶像差等问题, 本设计采用了自由曲面的 Zernike 多项式表征的非球面, 应用于三反结构中。该方法是在原有结构的基础上, 通过向抛物面、双曲面等曲面中加入高阶项, 使其具有柔性可调性。从而实现结构的灵活调整。通过采用这种表征方式, 设计能够满足结构紧凑和高分辨率要求, 同时有效地校正高阶像差。这样系统能够优化设计自由度, 满足高分辨率要求, 并有效校正离轴反射系统产生的高阶像差^[18]。

Zernike 多项式^[19] 是一种在光学和图像处理中常用的函数, 它在自由曲面设计中也有重要的应用。具体来说, Zernike 多项式的形式为

$$Z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_i^N A_i Z(\rho, \varphi), \quad (10)$$

式中: N 为 Zernike 多项式的项数, A_i 为第 i 项的系数, c 为顶点的曲率, r 为径向口径, ρ 为极坐标半径, φ 为极坐标角。

本文将一个 Zernike 自由曲面引入到偶次非球面体系中。在此基础上, 我们对 Zernike 多项式的 Z1-Z5 项目首先进行了优化, 后续在系统无法达到理想成像效果的基础上每次增加 5 项, 然后逐步将 X-轴向的视野扩展每一次 0.1 度。同时, 通过每次采取微小变化, 避免因 Zernike 系数变化而引起的评价函数和系统失效, 从而避免引起系统的崩坏。在优化过程中, 对反射镜的倾斜度、偏心度、视场的离轴角、

RMS 半径进行了人工同步监测, 从而保证了设计的准确性和合理性。经过反复优化最终得到自由曲面推扫光学系统焦距为 800 mm、视场为 12°×6°、入瞳直径为 200 mm 和畸变小于 1% 的紧凑式离轴三反光学系统。结构示意图如图 7 所示。

其中 Zernike standard 自由曲面系数由表 4 给出, 可见光、近红外和中红外波段的 MTF 图如图 8、图 9 和图 10 所示。可见光、近红外和中红外波段的 RMS 点列图如图 11、图 12 和图 13 所示。通过像质评价可以得知, 在可见光、近红外、中红外波段, 系统的 MTF 均匀一致性较好, 可见光波段、近红外和中红外波段衍射 MTF 值分别在截止频率为 160 lp/mm、100 lp/mm 和 30 lp/mm 时均大于 0.2。系统的点列图

的 RMS 半径平均为 2 μm。畸变在边缘视场最大, 达到 0.996%, 如图 14 所示, 不超过指标要求的 1%。整个 12°×6° 的视场范围内, 该系统的成像质量良好, 所设计的系统满足设计要求。

5 公差分析

曲面的形状误差主要包括光阑的直径容差、曲面的特定尺寸和参数容差、曲面的不平整容差。对于 Zernike 自由曲面, 需要单独考虑使用 Zernike 的标准面不规则度, 因此对于偶次非球面和自由曲面分析主要是利用 PV 分析, 使用 TEXI 公差操作数独立地在非球面和自由曲面表面上随机产生矢高偏差峰值-谷值 (PV) 波动, 为加工表面形状引入一种随机误差。

表 4 Zernike standard 自由曲面系数表

Table 4 Zernike standard free-form surface coefficient table

项目	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7
	-74.798	-1.701×10 ⁻⁵	10.674	0.164	-4.348×10 ⁻⁷	0.017	2.38×10 ⁻³
	Z8	Z9	Z10	Z11	Z12	Z13	Z14
三镜	-2.385×10 ⁻⁸	-1.049×10 ⁻⁴	-5.268×10 ⁻⁸	-2.277×10 ⁻⁵	-1.079×10 ⁻⁵	7.318×10 ⁻⁹	3.574×10 ⁻⁷
	Z15	Z16	Z17	Z18	Z19	Z20	
	3.034×10 ⁻⁹	5.154×10 ⁻¹¹	7.969×10 ⁻⁷	7.156×10 ⁻¹⁰	8.6×10 ⁻⁹	8.421×10 ⁻¹⁰	

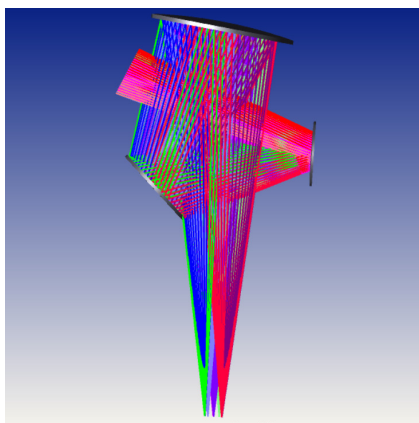


图 7 最终设计系统结构图

Fig. 7 Final design system structure diagram

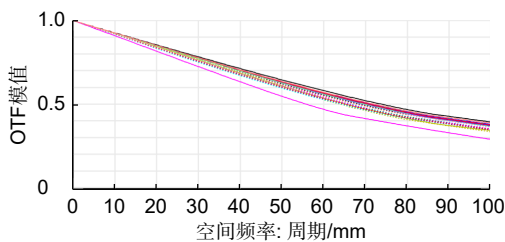


图 9 系统近红外波段 MTF 图

Fig. 9 MTF diagram of near infrared band of the system

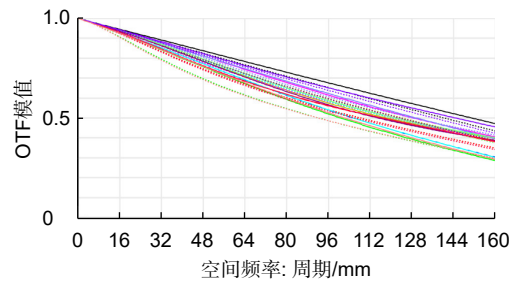


图 8 系统可见光波段 MTF 图

Fig. 8 MTF diagram of the system in visible band

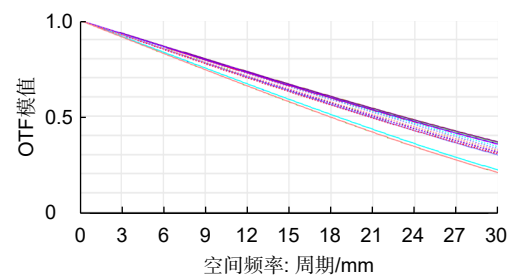


图 10 系统中红外波段 MTF 图

Fig. 10 MTF diagram of mid-infrared band of the system

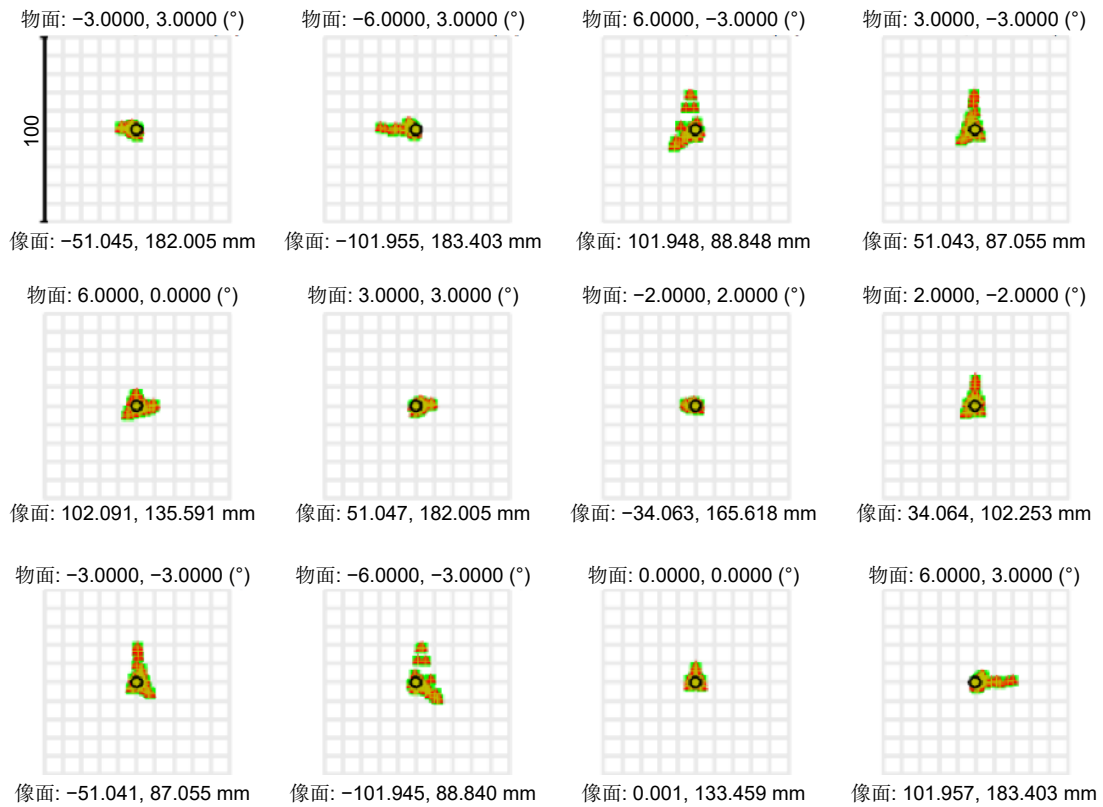


图 11 系统可见光波段点列图

Fig. 11 System visible light band point diagram

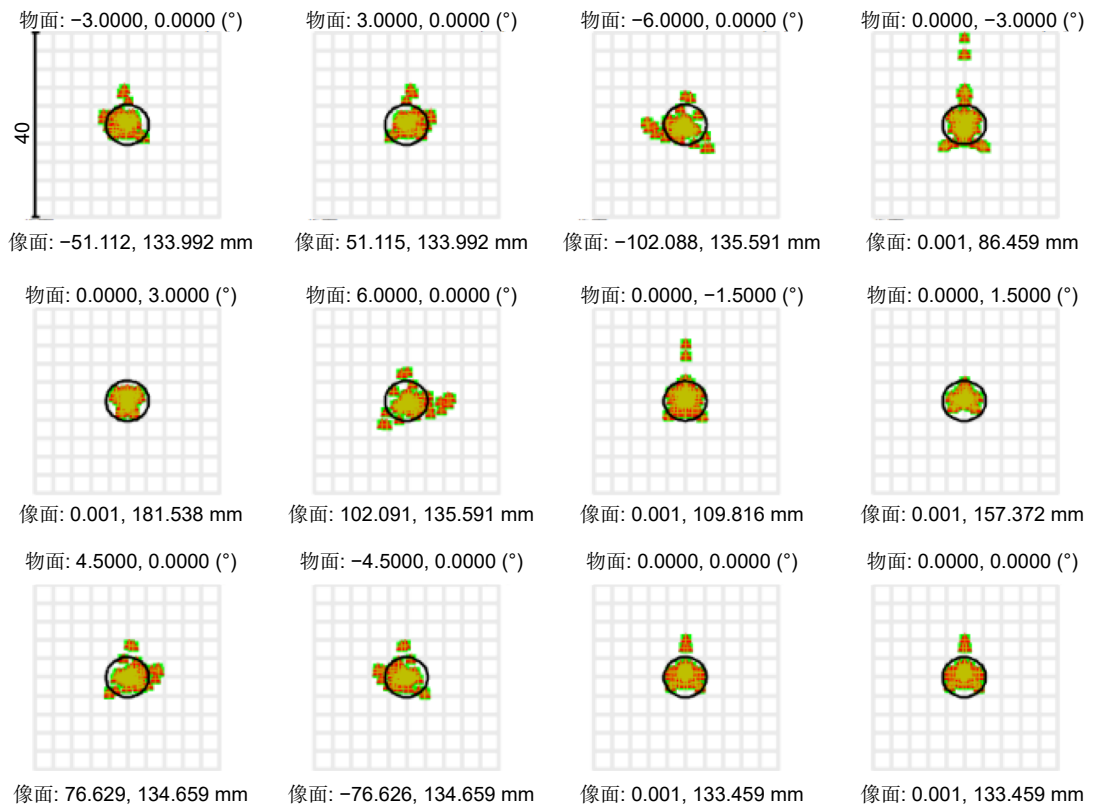


图 12 系统近红外波段点列图

Fig. 12 System near infrared band point diagram

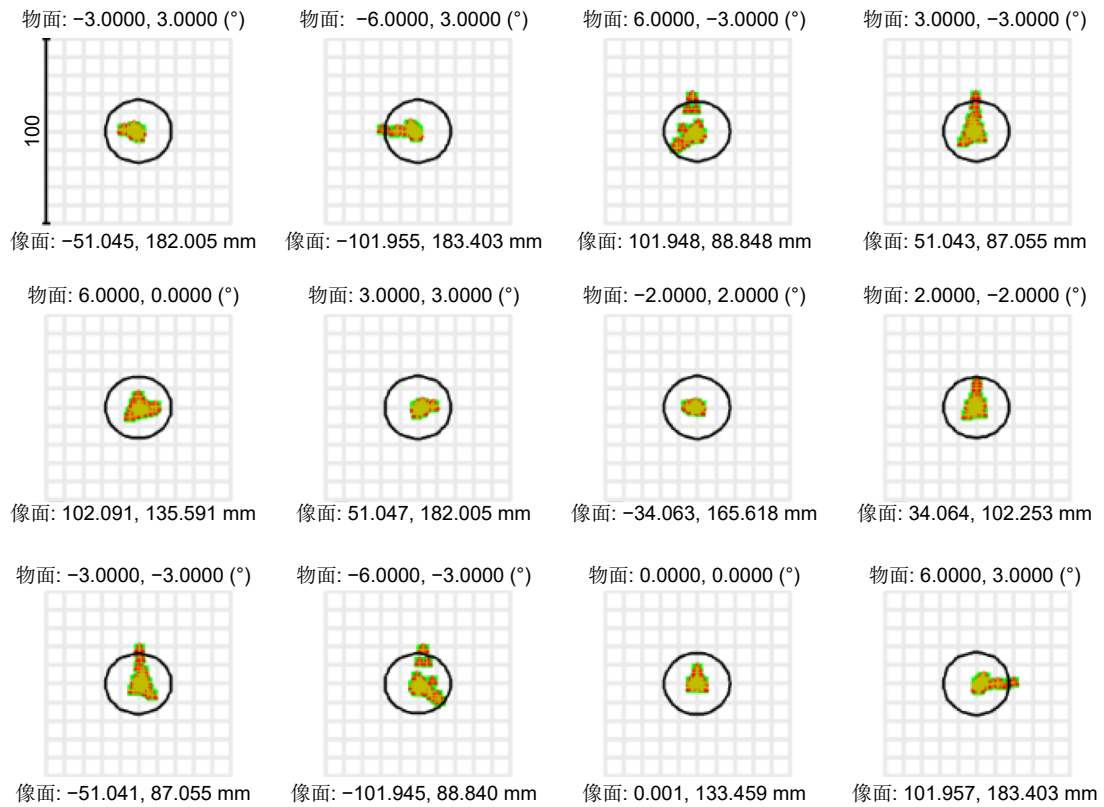


图 13 系统中红外波段点列图
Fig. 13 System middle infrared band point diagram

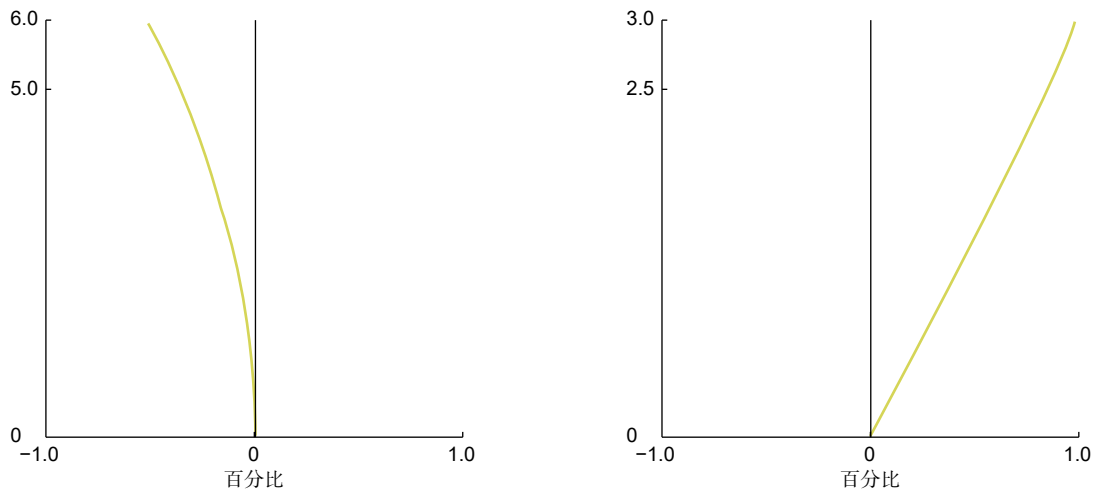


图 14 系统畸变图
Fig. 14 System distortion diagram

利用 ZEMAX 内置容限评定工具, 并选择敏感性分析。以 RMS 数值和 MTF 数值作为判断准则, 设定最大取样点数目 20 个。在一定的上下容许范围内, 采用蒙特卡罗算法, 以正态分布为随机样本。在调试过程中, 先把第三反射镜固定好, 因为在离轴测试中第三反射镜的移动和倾斜是导致系统性能下降的主要原因, 所

以把它当作安装基准。表 5 为公差分配表。

依据目前装配公差的实际情况, 通常 MTF 的降低一般是 0.1 或者更少。基于 RMS 半径的平均值和 MTF 的平均值, 进行容限分析。选取对系统有较大影响的 10 个公差项目, 对其进行模拟调试的困难程度及关键因素进行了分析。利用蒙特卡罗方法, 通过

表 5 误差分配表
Table 5 Error distribution table

公差类别	公差项目	主镜	次镜	三镜
装调误差	X方向偏轴/mm	0.05	0.2	0
	Y方向偏轴/mm	0.05	0.2	0
	X方向倾斜/(°)	0.005	0.001	0
	Y方向倾斜/(°)	0.005	0.001	0
面型误差	曲率半径/mm	0.2	0.2	0.2
	波峰到波谷(PV值)/ μm	0.5	0.5	0.2

累计叠加计算, 获得了 RMS 和 MTF 累计统计概率。

其中, 装调过程中倾斜度误差造成整个系统的性能降低最为明显, 是导致整个系统性能降低的主要原因, 所以必须对其进行严格的公差控制。为了获得预定的性能, 在安装调试时需要严格把控移动和倾斜, 对安装调试提出了挑战。此处给出了此设置下 RMS 半径和 MTF 在 150 lp/mm 的蒙特卡罗累计概率如表 6 所示。

表 6 蒙特卡罗累计概率统计表
Table 6 Monte Carlo cumulative probability statistic

累积概率/%	弥散斑RMS/mm	MTF
90	0.00476342	0.11910409
80	0.00455730	0.15766662
50	0.00396765	0.18865949
20	0.00323214	0.23130557
10	0.00308628	0.24853763

6 结论

空间光学是基础科学的应用前沿。在现代遥感技术中, 空间光学系统的分辨率与视场对于获取高质量的图像至关重要。本文利用近圆形的三反结构的构造, 对视场进行了偏心 and 倾斜, 提出了一种基于偶次非球面反射镜的设计方案。在此基础上, 为增加成像质量, 提出了一种基于 Zernike 自由曲面的紧凑式离轴三反光学系统, 并满足了长焦距、大视场和宽光谱的要求。最终所设计的系统为 $12^\circ \times 6^\circ$, 焦距为 800 mm, 像方 F 数为 4, 视场角为 $12^\circ \times 6^\circ$, 畸变为 0.996%, 工作波段为 0.486~0.656 μm 和 0.78~2.5 μm 和 3~5 μm , 该系统点列图最小为 1.6 μm , MTF 达到成像要求, 能够在较大视场范围内, 得到较佳的像质。

参考文献

- [1] Marlow W A, Carlton A K, Yoon H, et al. Laser-guide-star satellite for ground-based adaptive optics imaging of geosynchronous satellites[J]. *J Spacecraft Rockets*, 2017, **54**(3): 621-639.
- [2] Groff T D, Zimmerman N T, Subedi H B, et al. Roman Space Telescope CGI: prism and polarizer characterization modes[J]. *Proc SPIE*, 2021, **11443**: 114433D.
- [3] Lu C L, Bai Z G, Li Y C, et al. Technical characteristic and new mode applications of GF-6 satellite[J]. *Spacecr Eng*, 2021, **30**(1): 7-14.
陆春玲, 白照广, 李永昌, 等. 高分六号卫星技术特点与新模式应用[J]. *航天器工程*, 2021, **30**(1): 7-14.
- [4] Zhan H. An update on the Chinese space station telescope project[EB/OL]. (2019-11-05)[2021-09-22]. <https://www.issibern.ch/teams/weakgravlense/wp-content/uploads/sites/150/2019/11/H.-Zhan.pdf>.
- [5] Han X L, Nie L, Ren M R. Optimal design of visible/infrared dual-band off-axis three-reflection optical system[J]. *Infrared*, 2021, **42**(8): 1-6.
韩修来, 聂亮, 任梦茹. 可见光/红外双波段离轴三反光学系统优化设计[J]. *红外*, 2021, **42**(8): 1-6.
- [6] Liu Y X, Zhang D D, Niu X H. Design of multi-spectrum push-broom optical system[J]. *Opt Tech*, 2022, **48**(2): 139-143.
刘宇轩, 张冬冬, 钮新华. 多谱段推扫式离轴三反光学系统设计[J]. *光学技术*, 2022, **48**(2): 139-143.
- [7] Wei Y. Design of large field of view pushover optical system based on free-form surface[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2020.
魏雨. 基于自由曲面的大视场推扫式光学系统设计[D]. 西安: 西安工业大学, 2020.
- [8] Wang B H, Liu Z M, Tang S F, et al. Optical system design of high resolution dual-band IR remote sensor[J]. *Laser Infrared*, 2022, **52**(1): 102-109.
王保华, 刘志敏, 唐绍凡, 等. 星载高分辨率红外双波段遥感器光学系统设计[J]. *激光与红外*, 2022, **52**(1): 102-109.
- [9] Shen Z J. Design of large field of view off-axis three-mirror reflective optical system[J]. *Electro-Opt Technol Appl*, 2020, **35**(2): 24-27,64.
沈志娟. 大视场离轴三反光学系统设计[J]. *光电技术应用*, 2020, **35**(2): 24-27,64.
- [10] Yang X, Li Y H, Zhang Y J, et al. Optimal design of dual-band off-axis three-reflection optical system based on free-form surface[J]. *Infrared Technol*, 2022, **44**(11): 1195-1202.
杨旭, 李艳红, 张远健, 等. 基于自由曲面双波段离轴三反光学系统的优化设计[J]. *红外技术*, 2022, **44**(11): 1195-1202.

- [11] Luo Q. Research on wide field and broad spectrum push-broom optical system[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics, University of Chinese Academy of Sciences), 2017.
罗秦. 大视场宽光谱推扫式光学系统研究[D]. 上海: 中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所), 2017.
- [12] Yang C, Chen Y, Yu K X, et al. Design of receiving optical system for multi-channel beam-split spaceborne Lidar[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 44(2): 7-12.
杨超, 陈宇, 于可心, 等. 多路分光星载激光雷达接收光学系统设计[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 44(2): 7-12.
- [13] He C W, Wang L H, Huang P, et al. Design of diffractive imaging optical system based on off-axis four-mirror[J]. *Opto-Electron Eng*, 2019, 46(11): 190099.
何传王, 汪利华, 黄鹏, 等. 离轴四反射镜衍射成像光学系统设计[J]. *光电工程*, 2019, 46(11): 190099.
- [14] Wu L Q. Research on optical design with large field of view based on free-form surface and stray light suppression[D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optical Precision Machinery, Chinese Academy of Sciences), 2020.
吴俐权. 大视场自由曲面光学系统设计及杂散光抑制技术研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2020.
- [15] Li Y Q, Cao C. Design of the freeform imaging optical system with large field of view and high resolution[J]. *Opt Optoelectron Technol*, 2021, 19(6): 57-63.
李越强, 操超. 大视场高分辨率自由曲面成像光学系统设计[J]. *光学与光电技术*, 2021, 19(6): 57-63.
- [16] Zhang Y, Chen Z L, Hu T, et al. Design of telephoto off-axis three-mirror optical system[J]. *Opt Optoelectron Technol*, 2023, 21(1): 72-80.
张媛, 陈智利, 胡涛, 等. 宽光谱高分辨率离轴三反光学系统设计[J]. *光学与光电技术*, 2023, 21(1): 72-80.
- [17] Nakano T, Tamagawa Y. Configuration of an off-axis three-mirror system focused on compactness and brightness[J]. *Appl Opt*, 2005, 44(5): 776-783.
- [18] Shan B Z, Wang S Y, Niu H B, et al. Zernike polynomial fitting method and its application[J]. *Opt Precision Eng*, 2002, 10(3): 318-323.
单宝忠, 王淑岩, 牛慧笨, 等. Zernike多项式拟合方法及应用[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(3): 318-323.
- [19] Sun Y H, Sun Y Q, Chen X Y, et al. Design of a free-form off-axis three-mirror optical system with a low f -number based on the same substrate[J]. *Appl Opt*, 2022, 61(24): 7033-7040.

作者简介



蒋成斌(1999-), 男, 硕士研究生, 主要从事光学设计方面的研究工作。

E-mail: 853778481@qq.com



【通信作者】陈智利(1973-), 男, 教授, 主要研究方向为光学设计、现代光学加工技术。

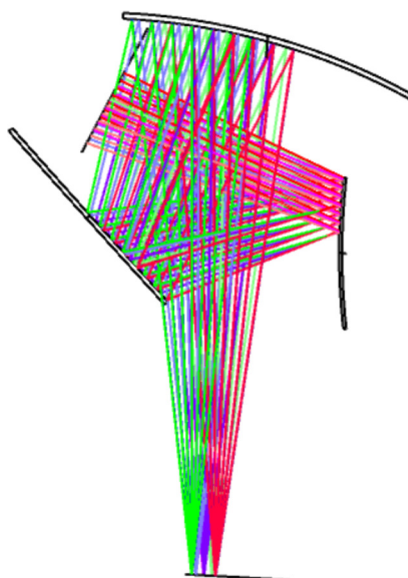
E-mail: medichen@163.com



扫描二维码, 获取PDF全文

Design of compact off-axis triple mirror optical system

Jiang Chengbin, Chen Zhili*, Wang Xiaotong, Zhang Yuan, Cheng Shanshan



Compact structure diagram

Overview: With the continuous development of the space remote sensing technology, the resolution, operating band and compactness of the off-axis triplex optical systems have also generated the need for improvement to meet the design objectives of high resolution, broad spectrum and lightweight and compactness. Spatial optics, as the application frontier of basic science, the resolution and field of view of spatial optical systems are crucial for obtaining high-quality images in modern remote sensing technology. To address the special needs of the space remote sensing field, this research will be devoted to achieving an optimized design for lightweight and compactness, and realizing an off-axis triple-reversal structure with a near-circular layout, in order to reduce the mass and volume of the system and provide a more practical solution for applications such as satellite-mounted LIDAR detection. In order to further enhance the resolving power and information acquisition capability of the space optical system, a design scheme is proposed in this paper, which adopts a compact off-axis triple-reflector optical system with a long focal length, small aberration and a wide operating band, and the system structure adopts an asymmetric, near-circular layout of the off-axis triple-reflector optical system, which utilizes a special triple-reflector structure construction, which has been eccentrically tilted in the field of view, and designs an optical system based on even-ordered aspheric surface. On this basis, in order to improve the imaging quality and meet the design requirements, the design method of Zernike's free surface is studied, the third reflector is optimized, and finally the system is effective for a focal length of 800 mm, an F-number of 4, a field of view of $12^\circ \times 6^\circ$, an aberration less than 1%, and an operating band covering the visible and the near/mid-infrared, and a geodetic resolution of 1.5 m has been achieved at the orbit altitude of 400 km. With 1.5 m ground element resolution (visible) and 2.5 m ground element resolution (near-infrared) at an orbital altitude of 400 km, and a ground width of 80 km \times 40 km, the system has been analyzed and verified in terms of aberration, dot-plot, MTF, and other performance indexes. And the results show that the design scheme brings high resolution capability and information acquisition capability. The analysis results show that the design scheme successfully realizes the design objectives of high resolution, wide spectrum and lightweight and small size, and meets the design requirements with the excellent resolution capability and the information acquisition capability.

Jiang C B, Chen Z L, Wang X T, et al. Design of compact off-axis triple mirror optical system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(12): 230231; DOI: 10.12086/oe.2023.230231

School of Optoelectronic Engineering, Xi 'an Technological University, Xi 'an, Shaanxi 710021, China

* E-mail: medichen@163.com