【光学工程与电子技术】　　doi：10.11809/bqzbgcxb2020.11.043

一种深空探测多功能光学系统设计

白　瑜，张　辉，刘恩海

（中国科学院光电技术研究所，成都　610209）

摘要：提出了一种用于深空探测的小载荷多功能光学系统，该系统在深空探测中具备自主姿态和位置测量功能，同时能完成交会对接测量任务并能实现对目标红外波段的探测。采用 CODE V 设计了一款多功能光学系统，该系统由可见光导航光学系统、中波红外探测光学系统、激光雷达发射光学系统和激光雷达接收光学系统组成。前 3 个光学系统共孔径，用一个分光镜反射可见光、透过激光和中波红外光线，反射的可见光后接可见光导航光学系统的透镜校正镜组，其工作波段为 500 ~ 750 nm；第二个分光镜反射激光、透过中波红外光，光线反射后接激光雷达接收光学系统的透镜校正镜组，其工作波段为 1 064 nm；光线透射后接中波红外探测光学系统的透镜校正镜组，其工作波段为 3 700 ~ 4 800 nm；激光雷达发射光学系统口径较小，为单独的光学系统，其工作波段为 1 064 nm。设计结果表明：各项指标都能满足要求，设计的光学系统能够实现自主导航、交会对接和红外波段探测等多种功能。

关键词：深空探测；自主导航；光学系统；多功能

本文引用格式：白瑜，张辉，刘恩海. 一种深空探测多功能光学系统设计[J]. 兵器装备工程学报，2020，41(11)：237 - 241，247.

Citation format：BAI Yu, ZHANG Hui, LIU Enhai. Design of a Multi-Functional Optical System for Deep Space Rxploration [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering，2020，41(11)：237 - 241，247.

中图分类号：V474　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**2096 - 2304(2020)11 - 0237 - 05

Design of a Multi-Functional Optical System for Deep Space Rxploration

BAI Yu, ZHANG Hui, LIU Enhai

(Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

Abstract: The paper proposed a multi-functional optical system for deep space exploration, which consists of visible navigation optical system, MWIR detection optical system, laser radar emitting optical system and laser radar receiving optical system. Visible navigation optical system, MWIR detection optical system, laser radar receiving optical system are common aperture type. The first beam splitter reflect visible, refract laser and MWIR, correction lenses of visible navigation optical system are used after the light reflection, the working band of visible navigation optical system is 450 ~ 750 nm. The second beam splitter reflect laser, refract MWIR, correction lenses of laser radar receiving optical system were used after the light reflection, the working band of laser radar receiving optical system is 1 064 nm; correction lenses of MWIR optical system were used after the light refraction, the working band of MWIR optical system is 3 700 ~ 4 800 nm. The laser radar emitting optical system is a separate optical system, and its working band is 1 064 nm. The multi-functional optical system not only performs laser radar ranging in deep space exploration, but also performs visible navigation and infrared spectrum detection.

Key words: deep space exploration; autonomous navigation; optical system; multi-functional

收稿日期：2020 - 02 - 20；**修回日期：**2020 - 03 - 20

基金项目：中国科学院青年创新项目(20150313)；国家 973 重点研发计划(2016YFB0501105，2019YFB0706000)

作者简介：白瑜(1982—)，男，博士，副研究员，硕士生导师，主要从事精密光学仪器设计、空间光学遥感探测等方面的研究。

随着深空探测任务的逐步实施,深空探测器的自主运行技术逐渐成为深空探测领域未来发展的一项重要研究内容,而深空自主导航是深空探测器自主运行的核心问题之一[1-6]。国外多个深空探测任务都采用了多功能光学系统并实现了包含自主导航能力在内的多种功能。

典型代表有1998年美国发射的深空一号(deep space 1, DS1)探测器,DS1采用MICAS(miniature integrated camera spectrometer)微型综合相机光谱仪,通过共孔径方式实现对紫外、红外和可见光波段的同时探测,其中2个可见光相机视场分别为0.69°×0.78°(VISCCD Imager)和0.26°×0.26°(APS Imager),口径100 mm,F数为6.8;2个可见光相机成功地实现了在巡航段和接近段及绕飞段的自主导航[7]。2016年欧空局发射的奥西里斯(OSIRIS-Rex)小行星探测器[8],采用了激光测高仪(osiris-rex laser altimeter, OLA),利用小行星反射回来的光脉冲与发射激光脉冲之间的时间差计算得到距离信息,并据此创建了Bennu表面的3-D模型;同时OLA还能够进行辅助导航。其他的深空探测任务,如日本隼鸟一号(MUSES-C)探测器、美国NASA的深度撞击(Deep Impact)探测器等也都采用了光学导航敏感器、激光测距仪等实现了交会、附着段或者撞击段的自主导航能力。

本文提出了一种用于深空探测的多功能光学系统载荷方案,该系统能够在实现深空探测器自主导航的同时,还能实现激光测距功能,同时还能兼顾对红外波段目标的探测。

1 多功能光学系统设计

1.1 多功能光学系统的构成

用于深空探测的多功能光学系统由可见光导航光学系统、中波红外探测光学系统、激光雷达接收光学系统和激光雷达发射光学系统组成。其中可见光导航光学系统、中波红外探测光学系统、激光雷达接收光学系统等三个系统采用共孔径结构形式,减小了系统尺寸,减轻了系统重量,确保实现光电设备的轻小型化,原理图如图1所示。激光雷达发射光学系统原理图如图2所示。

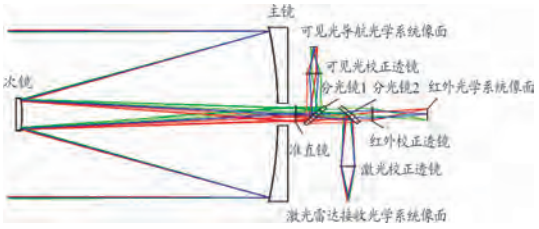


图1 共孔径光学系统原理图

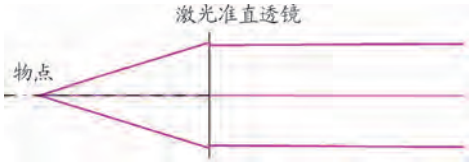


图2 激光雷达发射光学系统原理图

共孔径光学系统由主镜、次镜、准直镜、分光镜1、分光镜2、可见光校正透镜、激光校正透镜和红外校正透镜组成。目标经过主镜、次镜后成一次像,一次像经过准直镜对光线进行准直,分光镜1反射可见光波段、透射激光和中波红外波段,分光镜2反射激光波段、透射中波红外波段,通过2个分光镜的两次分光,实现了共孔径下可以同时在可见光、激光、红外3个波段下对目标进行探测。

激光雷达发射光学系统口径较小,无法和上述三个光学系统实现共孔径,设计为单独的光学系统。光纤出射端放置在物点处,通过激光准直透镜对光束准直后发射出去。

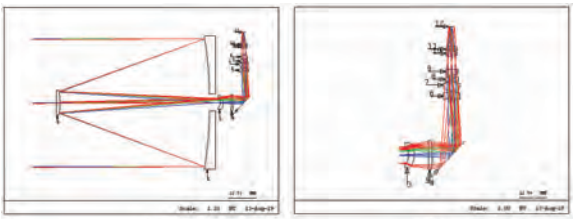
1.2 可见光导航光学系统

可见光导航光学系统的设计参数如表1。

表1 可见光导航光学系统设计参数

指标	数值	指标	数值
入瞳直径	100 mm	工作波段	450~750 nm
视场	0.5°	焦距	300 mm
F数	3.0		

可见光导航光学系统的光路图如图3。



(a) (b)

图3 可见光导航光学系统光路图

可见光导航光学系统由主镜(1),次镜(2),准直镜组(3~4),分光镜(5),校正透镜组(6~11),可见光导航光学系统的像面(12)组成,光学系统的孔径光阑置于主镜上,准直镜组(3~4)采用ZNSE光学玻璃材料,采用了SF57和NSK16两种光学玻璃材料,可见光探测器的像元数1 024×1 024,像元大小6.5 μm×6.5 μm,实际使用时只使用了探测器的可见光的一部分像元,主镜的通光口径为100 mm,遮拦比为0.18,次镜到分光镜的距离为154.84 mm,分光镜到像面的距离为55.23 mm,校正透镜组的最大通光直径为6.88 mm。

能量集中度是光学系统重要的性能评价指标,图4为可见光导航光学系统不同视场的像点径向能量集中度分布曲线,其中横坐标是弥散圆直径,纵坐标表示该弥散圆直径内所包含的能量百分比,表2为可见光导航光学系统的各个视场的能量集中度数据,可知80%能量集中处,所有视场的弥散圆直径都在6.5 μm以内。

畸变是一种轴外像差,是指轴外点主光线在像面上交点的高度和理想像高的差值,畸变不会影响图像的清晰度,也

不会降低系统的分辨率,它只是使图像的大小和图像发生某些变化。图 5 右侧为可见光导航光学系统的畸变曲线,可知全视场内的最大畸变为 0.38%。

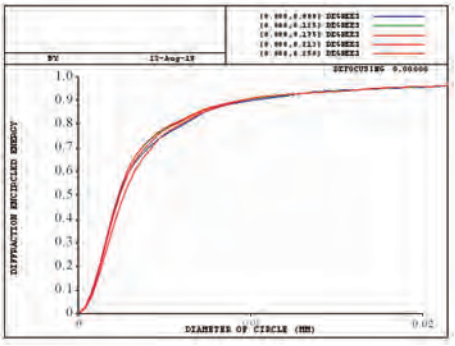


图 4　可见光光学系统能量集中度曲线

表 2　可见光导航光学系统各视场能量集中度数值

归一化视场	能量集中度/μm					
	40%	50%	60%	70%	80%	90%
0	2.04	2.39	3.06	4.11	6.16	10.14
0.3	1.95	2.30	2.85	3.77	5.65	9.59
0.5	2.00	2.35	2.88	3.74	5.51	9.45
0.7	2.06	2.42	3.03	3.92	5.64	9.48
1	2.19	2.67	3.37	4.28	5.94	9.60

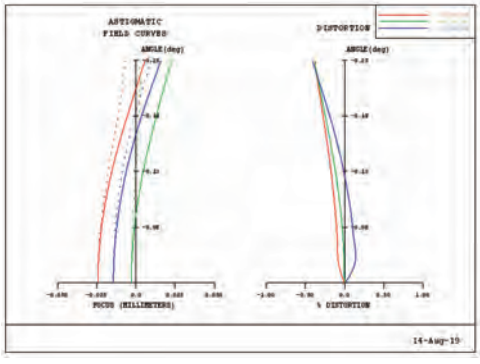


图 5　可见光导航光学系统的场曲和畸变曲线

1.3　激光雷达接收光学系统设计及结果

激光雷达接收光学系统的设计参数如表 3 所示。

表 3　激光雷达接收光学系统设计参数

参数	数值	参数	数值
入瞳直径	100 mm	工作波段	1 064 nm
接收视场	500 μrad	焦距	280 mm
F 数	2.8		

设计的激光雷达接收光学系统的光路图如图 6 所示。激光雷达接收光学系统由主镜(1),次镜(2),准直镜组(3~4),分光镜(5),分光镜(6),激光校正透镜组(7~8),激光雷达接收光学系统的像面(9)组成,光学系统的孔径光阑置于主镜上,采用了 SF57 和 NSK16 两种光学玻璃材料,主镜的通光直径为 100 mm,次镜到分光镜(6)距离 171.85 mm,分光镜 6 到像面的距离为 36.09 mm,激光雷达接收校正透镜组的最大通光直径为 3.83 mm。

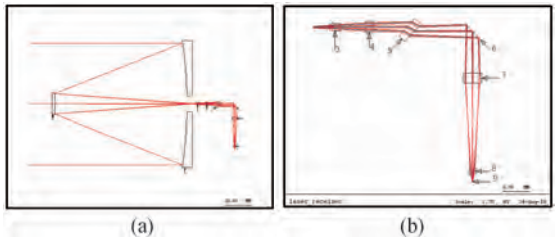


图 6　激光雷达接收光学系统光路图

图 7 为激光雷达接收光学系统各视场的 MTF 曲线,由图 7 可知,激光雷达接收光学系统各视场的 MTF 均接近衍射极限,性能良好。

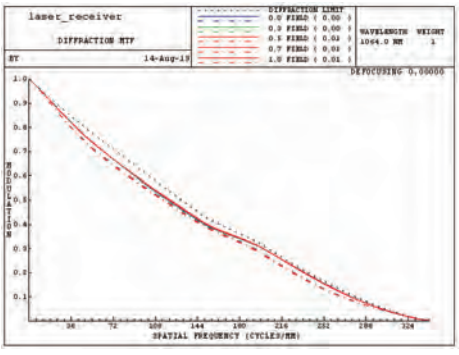


图 7　激光雷达接收光学系统的 MTF 曲线

图 8 为激光雷达接收光学系统点列图,表 4 给出了激光雷达接收光学系统各视场弥散斑 RMS 直径大小。由此可知激光雷达接收光学系统各视场弥散斑均方根直径大小均在 6 μm 以内。

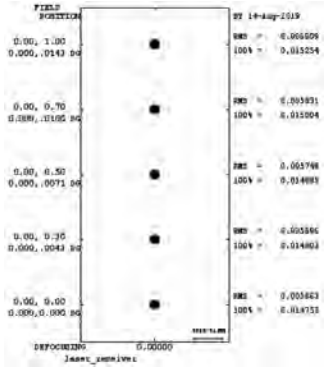


图 8　激光雷达接收光学系统点列图

表 4 激光雷达接收光学系统各视场弥散斑 RMS 直径

归一化视场	激光雷达接收光学系统 RMS 弥散斑直径/μm
0	5.66
0.3	5.69
0.5	5.75
0.7	5.83
1.0	6.00

1.4 中波红外探测光学系统设计结果

中波红外探测光学系统的设计参数如表 5 所示。中波红外探测光学系统的光路图如图 9 所示。中波红外探测光学系统由主镜(1)、次镜(2)、准直镜组(3~4)、分光镜(5)、分光镜(6)、中波红外校正透镜组(7~10)、中波红外探测器窗口(11)、中波红外探测器滤光片(12)、中波红外探测光学系统像面(13)组成,红外探测器的像元数 320×256,像元大小 30 μm×30 μm,实际使用时只使用了红外探测器的一部分像元,光学系统的孔径光阑置于红外探测器的冷光阑处,采用了锗、硅和硒化锌 3 种红外光学玻璃材料,主镜的通光直径为 100 mm,分光镜(5)和分光镜(6)的材料都为硒化锌,次镜到像面的距离为 237.28 mm,中波红外校正透镜组的最大通光直径为 7.79 mm,中波红外探测光学系统满足 100% 冷光阑效率,冷光阑到像面的距离为 20 mm。

表 5 中波红外探测光学系统设计参数

参数	数值	参数	数值
入瞳直径	100 mm	工作波段	3 700~4 800 nm
接收视场	0.58°	焦距	400 mm
F 数	4.0		

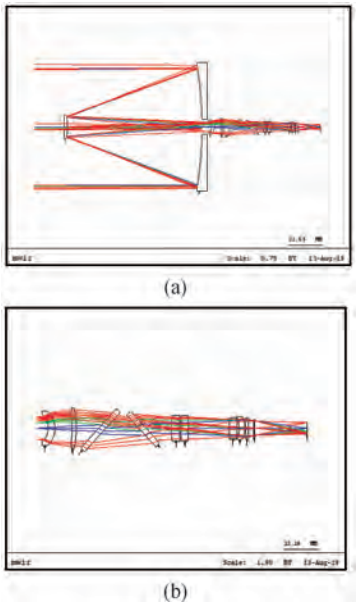


图 9 中波红外探测光学系统光路图

图 10 为中波红外探测光学系统不同视场的像点径向能量集中度分布曲线,表 6 为中波红外探测光学系统的各个视场的能量集中度数据。由此可知 60% 能量集中处,所有视场的弥散圆直径都在 30 μm 以内。

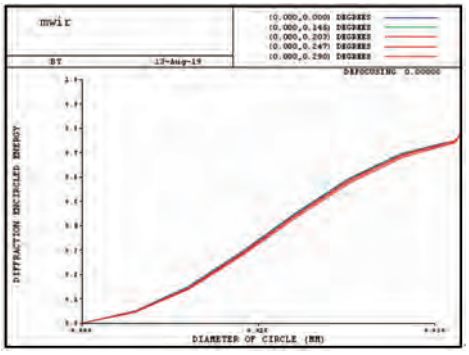


图 10 中波红外探测光学系统能量集中度曲线

表 6 中波红外探测光学系统各视场能量集中度数值

归一化视场	能量集中度/μm					
	40%	50%	60%	70%	80%	90%
0	18.94	21.13	23.77	27.96	43.70	77.76
0.3	18.86	21.04	23.67	27.74	43.56	77.57
0.5	18.94	21.15	23.82	28.17	43.39	77.64
0.7	19.15	21.39	24.11	28.70	43.70	78.15
1	19.29	21.58	24.35	29.26	44.26	79.22

图 11 右侧为中波红外探测光学系统的畸变曲线,由图 11 可知,全视场内的最大畸变为 2.41%。

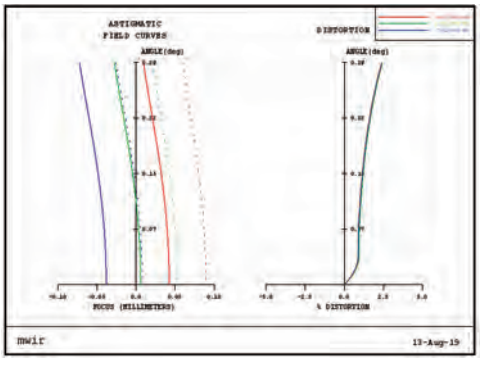


图 11 中波红外探测光学系统的场曲和畸变曲线

1.5 共孔径光学系统合成光路图

将可见光导航光学系统、激光雷达接收光学系统和中波红外探测光学系统 3 个光学系统合成在一起的共孔径光路图如图 12 所示,由图 12 可知,系统在兼顾 3 个光学系统的同时,用一套光学系统可以同时实现以往 3 个光路单独实现的光学系统,可以满足深空探测光学有效载荷的小型化、轻量化要求。

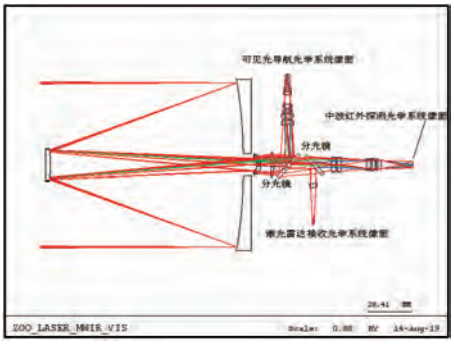


图 12　共孔径光学系统合成光路图

1.6　激光雷达发射光学系统

激光雷达发射光学系统的设计参数如表 7 所示。

表 7　激光雷达发射光学系统设计参数

指标	数值	指标	数值
入瞳直径	17 mm	工作波段	1 064 nm
视场	300 μrad	物方数值孔径	0.22
物高	0.05 mm		

设计的激光雷达发射光学系统的光路图如图 13 所示。激光雷达发射光学系统由 3 片透镜组成,采用 ZF6 光学玻璃,光纤出射端作为物点,激光雷达发射光学系统实际工作时只使用了光纤芯径的一部分,激光雷达发射光学系统总长为 30.79 mm,物点到透镜 1 的距离为 13.41 mm。

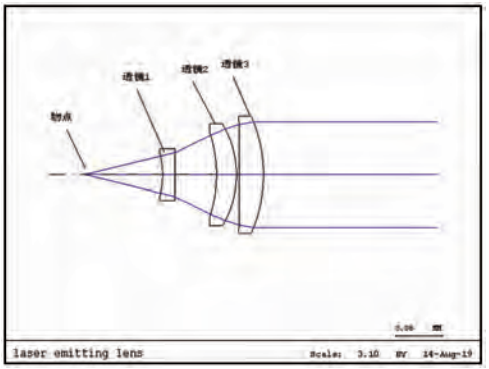


图 13　激光雷达发射光学系统结构光路图

因为激光雷达发射光学系统的物方在有限远处,像方在无穷远处,因此,评价激光雷达发射光学系统的成像质量时,需要将激光雷达发射光学系统物方和像方倒置后进行评价。图 14 为激光雷达发射光学系统各视场的 MTF 曲线,其中横坐标和纵坐标分别为像面上的空间频率和光学系统的调制传递函数值。由图 14 中可知,激光雷达发射光学系统各视场的 MTF 均接近衍射极限,性能良好。

图 15 为激光雷达发射光学系统的点列图,表 8 给出了激光雷达发射光学系统各视场 RMS 弥散斑直径。由此可知激光雷达发射光学系统各视场弥散斑均方根直径均在 0.2 μm 以内。

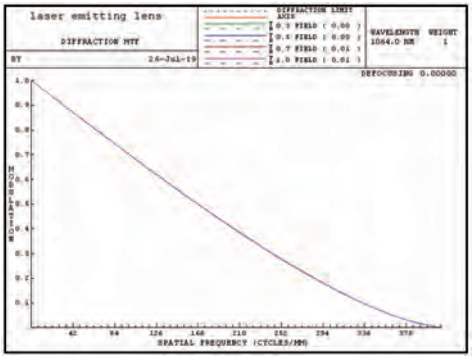


图 14　激光雷达发射光学系统各视场的 MTF 曲线

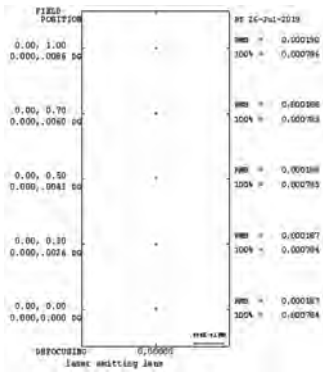


图 15　激光雷达接收光学系统的点列图

表 8　激光雷达发射光学系统各视场 RMS 弥散斑直径

归一化视场	激光雷达发射光学系统 RMS 弥散斑直径/μm
0	0.190
0.3	0.188
0.5	0.188
0.7	0.187
1.0	0.187

2　结论

本文针对深空探测载荷小型化的需求,提出了一种具备自主光学导航、激光测距以及红外目标探测等功能的多功能光学系统方案,并给出了一个设计实例,首先介绍了多功能光学系统的构成。然后分别介绍了入瞳直径为 100 mm 的共孔径结构的可见光导航系统、激光雷达接收系统和红外波段探测系统等 3 个光学系统的设计光路图、设计参数以及结果。最后,对给出了激光雷达发射光学系统的设计仿真结果,设计结果表明,该多功能光学系统可满足深空探测任务需求。

(下转第 247 页)