

天基光纤激光雷达光谱仪光学系统设计

刘晓林, 刘勋*, 李维, 张庭成, 孙德伟, 张丽, 蔺宇辉

中国空间技术研究院, 北京空间机电研究所, 北京 100094

摘要 为了实现光纤激光雷达系统的天基应用,开展了天基光纤激光雷达光谱仪光学系统设计,根据应用需求确定光谱仪光学系统构型主要由望远系统、狭缝、准直系统、平面光栅、成像系统构成;为了解决谱段宽可能引入的色差问题,光谱仪系统采用全反射结构设计;完成了光学系统与各项指标分析,通过设计可达到以下指标:光谱仪谱段范围为 320~950 nm,光谱分辨率为 2 nm,光谱仪最大色畸变为 1.1 μm (即 0.07 pixel),3 个像元内的能量集中度大于 96%,光学传递函数 MTF 在 3.7 lp/mm 下可达到 0.99。所设计的光谱仪系统可用于星载大气成分高分辨率光谱探测。

关键词 光学设计; 光纤激光; 光谱仪; 光学系统设计; 光谱分辨率

中图分类号 V445

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221529

1 引言

人们发现超短超强激光脉冲作用于透明介质时会产生非常细的丝状物,即“光纤”。飞秒激光成丝是由非线性光学效应造成的奇特光学现象,其本质为自聚焦效应与等离子体散焦效应之间的一种动态平衡,能够在介质中形成稳定的等离子体通道。近几十年来,随着人们对飞秒激光成丝现象研究的不断深入,成丝的原理、机制、物理模型以及各种非线性效应已经逐步明了。成丝所具有的特殊属性使得它在现实生活中有着广泛应用^[1-2],例如:可将产生的等离子体用于激光引雷,利用成丝的特性形成虚拟天线;可用于人工控制降雨或者降雪;探测大气污染物的成分;等等。南开大学刘伟伟教授带领团队承担国家重点研发计划项目,瞄准未来光纤激光在天基遥感探测领域的应用,开展天基光纤激光雷达技术研究,在关键技术攻关的同时进行天基系统的初步论证。

传统的星载大气污染监测装置依赖光谱成像和激光雷达技术,无法实现对大气多组分污染物的实时监测,无法识别不明污染物和检测各种具有复杂形态的污染物的化学成分。光纤激光大气探测的机理是:光纤激光雷达系统中的飞秒激光器向大气层发射激光的强度足够电离或解离大气环境中的分子,并使其处于激发态,形成光纤激光,光纤激光与大气物质相互作用后激发出携带物质成分信息的荧光谱线^[3],通过分析荧光光谱便可以判定光纤作用区域内多种物质的组分、种类及含量等信息。为了支撑天基光纤激光雷达

技术的研究,实现雷达系统的天基应用,笔者开展了面向遥感应用的天基光纤激光雷达光谱仪的光学系统设计,完成了光学系统构型设计与各项指标分析,光谱仪的谱段范围为 320~950 nm,光谱分辨率为 2 nm,设计结果可以用于星载大气成分达到痕量状态时的高分辨率光谱探测。

2 应用要求与主要技术指标

天基光纤激光雷达是一种主动式大气污染物质探测系统,雷达系统发射的飞秒激光脉冲经过超长距离传输后,与大气污染物质发生相互作用,产生与污染物质对应的荧光光谱^[4]。光谱仪系统属于非成像类光谱仪,通过接收光子信号并累积强度实现探测。

所设计的天基光纤激光雷达系统瞄准突发污染事件的应急探测,探测对象是 20 种污染物,主要包括镉、钴、铬、铅、氯化铜、硫酸铜、氯化钾、硝酸钾、硝酸镁、硫酸钠、氯化铵等。根据污染物特性以及物质元素所对应的光谱,光谱仪的工作谱段为 320~950 nm,光谱分辨率为 2 nm,可探测痕量污染物的成分。

所设计的仪器预计工作在轨道高度为 400 km 的卫星平台上。使用光纤激光传输演化仿真软件^[5-6],分析不同飞秒激光脉冲能量与激光脉宽下,传输 400 km 后(近地位置)所产生的光纤激光的直径。当飞秒激光脉冲能量取值 30、40、50 mJ,激光脉宽取值 50 fs 和 100 fs,激光发射光斑直径为 300 mm 时,激光传输 400 km 后产生的光纤激光的直径如图 1 所示。从仿真结果中看到光纤激光传输 400 km 后的直径约为 6 mm,这是由光纤激光传输演化过程中产生的非线性效应决定

收稿日期: 2022-12-15; 修回日期: 2023-02-22; 录用日期: 2023-03-13; 网络首发日期: 2023-03-23

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504400)

通信作者: *liuxun_laby@163.com

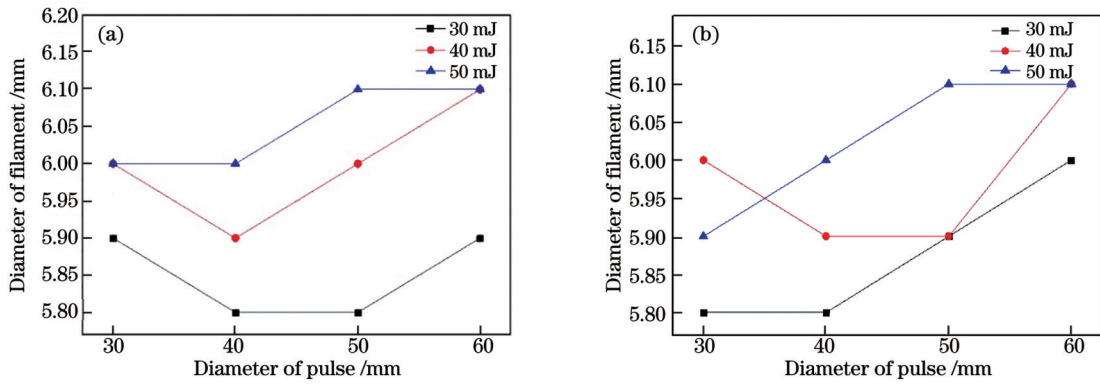


图1 光纤激光传输400 km后的直径。(a)激光脉宽为50 fs;(b)激光脉宽为100 fs

Fig. 1 Diameter of filament laser after 400 km propagation. (a) Laser pulse width of 50 fs; (b) laser pulse width of 100 fs

的,即:光纤激光在轨超长距离传输后,其直径可以约束在一个较小的空间尺度内^[7]。

计算一个飞秒激光脉冲所激发的光子数量,结果如表1所示。经过多次400 km传输仿真后,取光纤激光长度为0.5 km。

表1 光纤激光激发光子数产额

Table 1 The number of photons stimulated by filament laser

Parameter	Value (orbital altitude 400 km)	Note
Atmospheric density / m^{-3}	2.5×10^{25}	Detection zone background
Filament active area / m^2	$\pi(3 \times 10^{-3})^2$	Simulation result calculation
Filament length / km	0.5	Simulation result calculation
Ionization rate	0.1%	
Monopulse excited photon yield	1.7×10^{16}	

根据表1中的光子数量,得到了光学收发系统中的光学接收镜在不同口径下所能接收到的光子数量,如表2所示。

根据光谱范围和光谱分辨率需求,探测器最终选用面阵CCD探测器,像元尺寸为 $13 \mu m \times 13 \mu m$,像元

表2 系统可接收的光子数量(在轨400 km)

Table 2 The number of photons received by the system (orbital altitude 400 km)

Diameter / m	Angle / ($^\circ$)	Solid angle / ($^\circ$)	Photon number
0.2	5×10^{-7}	2×10^{-13}	2.7×10^2
0.5	1.25×10^{-6}	1.2×10^{-12}	1.6×10^3
1	2.5×10^{-6}	4.9×10^{-12}	6.6×10^3
1.5	3.75×10^{-6}	1.1×10^{-11}	1.5×10^4
2	5×10^{-6}	2.0×10^{-11}	1.9×10^4

规模为 1024×1024 ,采用 3×3 合并像元方式,最小光谱采样间隔设计为 0.67 nm/pixel ,探测器光谱维有效像元数为941元。本项目采用的器件可满足该要求。根据研究团队的工程研制经验,同时参考国内星载光学遥感载荷的光学系统口径,确定光谱仪系统的口径为0.5 m。这样设计,一方面可以降低大口径光学元件研制的难度,降低系统的装调难度;另一方面可以降低载荷重量,为其他组件提供更大的设计空间。

综合考虑光谱仪的信噪比要求后,最终确定光谱仪光学系统的相对孔径 $D/f' = 1/3.5$ 。天基光纤激光雷达光谱仪的光学系统技术指标汇总见表3,该系统具有宽谱段、高光谱分辨率的特点。

表3 光谱仪系统的主要指标

Table 3 Main indexes of the spectrometer system

Main index	Content (20–950 nm)
Spectral resolution / nm	2
Linear dispersion / ($\text{nm} \cdot \text{pixel}^{-1}$)	0.67
Sampling rate / pixel	~ 3
Focal length / mm	1750
Diameter / mm	500
$F\#$	3.5
Angle of field 2ω / mrad	0.3
Pixel size / μm	13

3 光谱仪光学系统设计

光谱仪的光学系统由前置望远系统和光谱探测系统两部分组成,望远系统的作用是将地物目标成像到狭缝处,光谱探测系统的作用是将狭缝像色散分光后再次成像到探测器上。

3.1 前置望远系统设计

前置望远系统在设计时需要重点考虑狭缝处的像质,像质通常采用点列图来评价,成像质量的好坏直接影响光谱仪的光谱分辨率。选择合适的初始结构是保

证光学系统实现指标要求和成像要求的重要环节,常用的光学系统结构形式主要有透射式、反射式和折反式三种。与透射式、折反式系统相比,反射式系统具有诸多优点:1)无色差,适用于宽波段成像;2)光学元件数量少,有利于实现轻小型设计;3)对材料要求较低,环境适应性强。光纤激光雷达光谱仪要求波段很宽,而且含有紫外波段,透射材料很少,难以校正色差,因此采用全反射卡塞格林结构作为初始结构。设计结果如图 2 所示,次镜后引入了一个折转镜,以实现紧凑结构设计。结构参数如表 4 所示。

望远光学系统各视场成像点弥散斑半径的均方根值(RMS)均在 14 μm 以内;各视场成像点弥散斑的最大几何半径(GEO)均在 31 μm 以内,小于狭缝在光谱

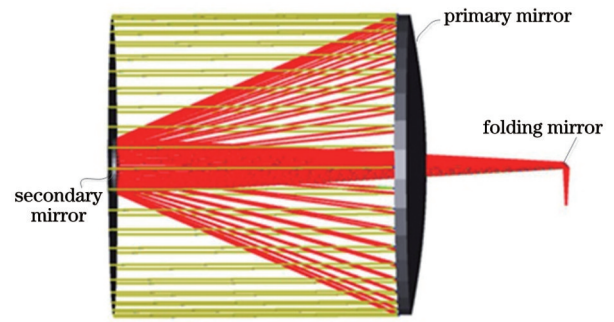


图 2 望远系统光路图

Fig. 2 Optical path diagram of telescopic system

方向的尺寸(64 μm),具有良好的成像效果,如表 5 所示。

表 4 望远光学系统的主要参数

Table 4 Main parameters of telescopic optical system

Mirror	Radius /mm	Conic coefficient	Distance /mm	Aperture /mm
Primary mirror	-1192	-1.002	488.9	500 (hole 60 mm)
Secondary mirror	-247	-1.726	-738.9	73
Folding mirror			70	71×38

表 5 望远光学系统的成像弥散情况

Table 5 Spots diagram of telescopic optical system

Field of view	Spot diagram	RMS radius / μm	GEO radius / μm
(0°, 0°)		14.15	31.3
(0.0050°, 0°)		14.14	31.2
(0.0010°, 0°)		14.15	31.3

3.2 光谱探测系统设计

光谱仪分辨率主要由狭缝大小和光栅刻线密度的设计来保证。光学系统拟采用反射式平面光栅,光栅由于周期性刻线的影响,在反射光方向发生衍射,不同

波长下的光衍射角不同,从而实现分光。根据光栅方程,确定平面光栅线对数约为 263 lp/mm,光栅口径为 22 mm,采用 1 级衍射光,可实现系统光谱分辨率 2 nm 的要求。光谱探测光路如图 3 所示,狭缝出射光经准

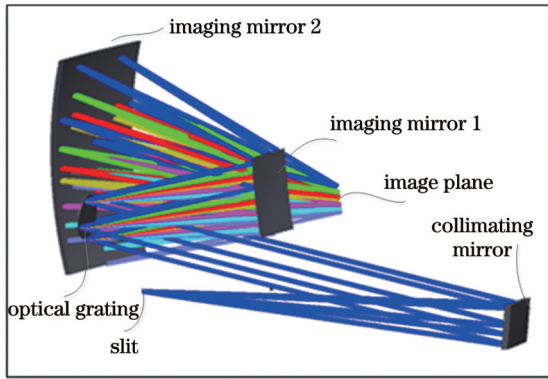


图 3 光谱探测光学系统示意图

Fig. 3 Diagram of spectral detection optical system

直镜准直后进入平面反射光栅,经光栅衍射后再经成像镜成像于探测器上。光谱仪系统的结构参数如表 6 所示。

3.3 全光路设计结果

将前置望远系统和光谱探测系统通过狭缝连接在一起,整个光谱仪光学系统主要由望远系统、狭缝、准直系统、平面光栅、成像系统构成,其中准直系统、色散元件和成像系统组成了光谱仪^[7]。具体的设计构型如图 4 所示。

光谱仪系统对狭缝成像,像面点列图如图 5 所示,点列图基本接近衍射艾里斑,最大 RMS 直径小于 $17\ \mu\text{m}$ (950 nm 波段处),远小于光谱方向的实际像元尺寸,即三个像元大小 $39\ \mu\text{m}$ 。

表 6 光谱仪系统的结构参数

Table 6 Structural parameters of the spectrometer system

Item	Radius /mm	Thickness /mm	Aperture /mm	Decentration /mm	Tilt /($^{\circ}$)
Collimating mirror	378.81	226.1	22.6×20.72	72.4	6.61
Optical grating		100	22		5
Imaging mirror 1	258.81	130.56	38×23	10.92	18.9
Imaging mirror 2	187.63	133.7	101×50	54.81	18.7

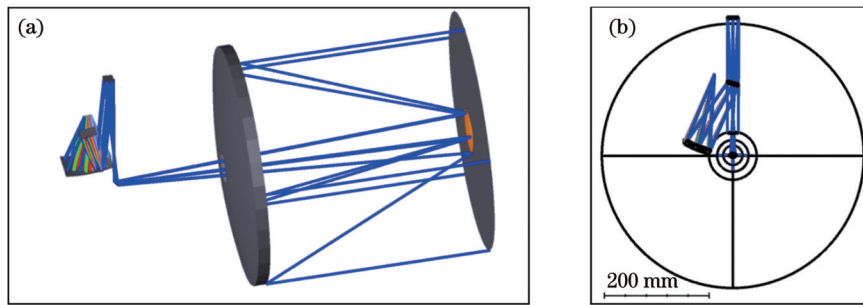


图 4 光谱仪全光路系统构型。(a)整体构型的 X-Z 视图;(b)整体构型的 X-Y 视图

Fig. 4 Optical system configuration of spectrometer. (a) X-Z view of integral configuration; (b) X-Y view of integral configuration

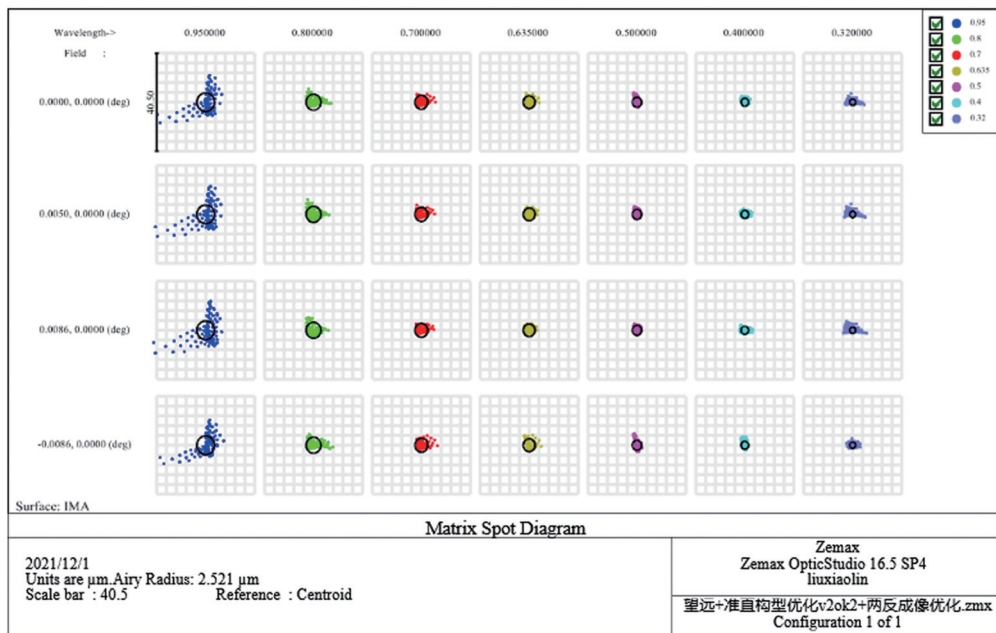


图 5 光谱仪系统对狭缝成像的点列图

Fig. 5 Spot diagram of slit image of spectrometer

光谱仪光学系统在不同波长下的调制传递函数曲线如图 6 所示,不同波长下的调制传递函数均大于 0.99@3.7 lp/mm,满足高性能光谱成像要求。不同谱段下的能量集中度情况如图 7 所示,所有谱段在三个

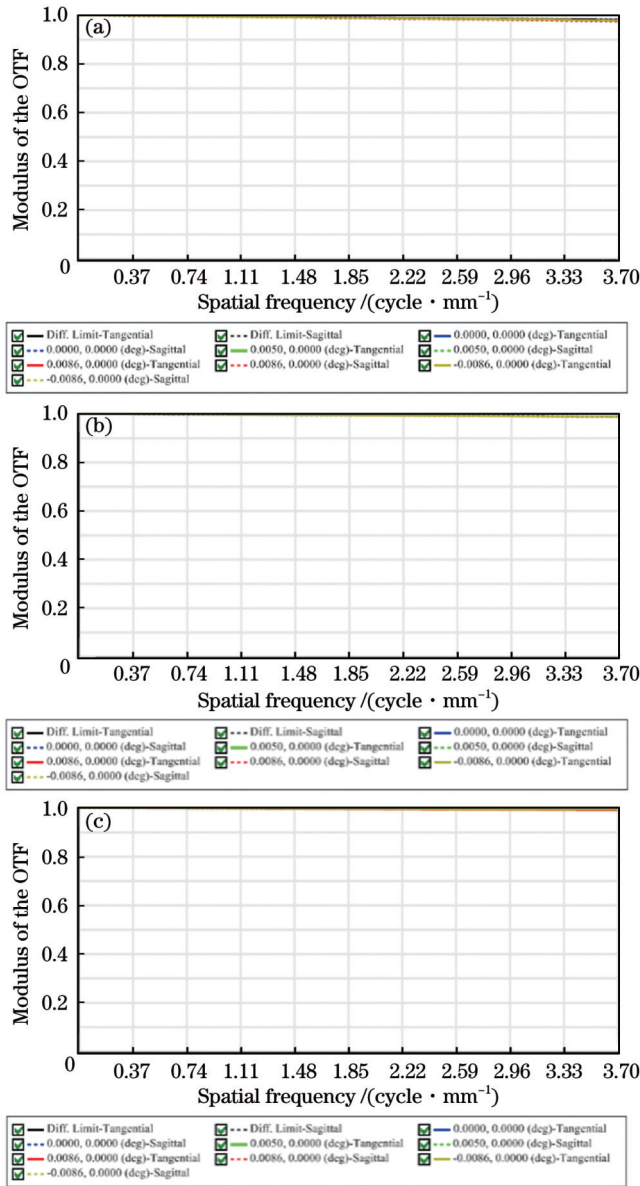


图 6 不同谱段下光谱仪光学系统的调制传递函数曲线。
(a) 950 nm; (b) 635 nm; (c) 320 nm

Fig. 6 MTF of the spectrometer optical system under different wavelengths. (a) 950 nm; (b) 635 nm; (c) 320 nm

像元内的能量集中度均达到了 96% 以上,符合设计要求。

色畸变是评价光谱成像系统的重要指标之一。色畸变是指直狭缝经由光谱仪光学系统成像以后,不同波长对应的狭缝像的放大率不一样,即不同波长下狭缝光谱像的长度不同。表 7 分别给出了不同波长下的色畸变值。由表 7 所示数据可以看出,不同波长下最大的色畸变量为 1.1 μm ,相当于 0.07 个探测器单个像元大小。分析结果表明,高分辨率光谱仪系统具有良

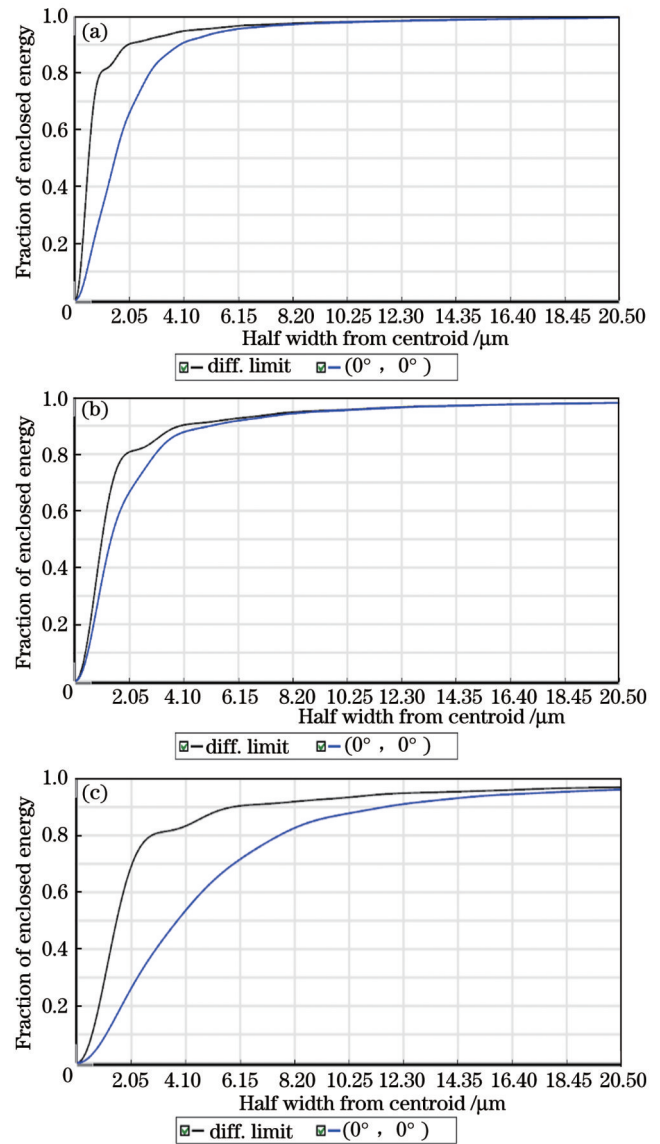


图 7 不同谱段下光谱仪光学系统的能量集中度。(a) 320 nm;
(b) 630 nm; (c) 950 nm

Fig. 7 Energy concentration of the spectrometer optical system under different wavelengths. (a) 320 nm; (b) 630 nm; (c) 950 nm

表 7 光谱仪的色畸变值

Table 7 Color distortion value of the spectrometer

Wavelength /nm	Color distortion / μm
320	0.9 (≈ 0.06 pixel)
477.5	0.8 (≈ 0.05 pixel)
635	0.9 (≈ 0.06 pixel)
792.5	1.0 (≈ 0.06 pixel)
950	1.1 (≈ 0.07 pixel)

好的保真光谱探测能力。

在狭缝宽度为 64 μm 的情况下,光谱分辨率可以通过光谱响应函数峰值半峰全宽和线色散率计算得到。经计算可知光谱分辨率均小于 1.5 nm。

4 光机及杂光抑制设计

针对光学系统的设计特点,系统由前端望远系统和后端光谱仪系统两部分组成,望远系统采用同轴结构,主镜和次镜均采用二次非球面。若主次镜间的位置发生变化,相机的成像质量就会下降,从而影响地面图像处理的精度。因此,需要选择比刚度高、膨胀系数小、真空稳定性和热稳定性好的材料作为主次镜之间的支撑结构(即前镜筒)。整体结构的重心集中于前端望远镜头,采用立式安装能减轻整机重量,有利于力学稳定性。相机采用阻尼桁架解锁机构进行三点支撑,安装于卫星载荷舱底板上。光机构型如图 8 所示。前镜筒选用碳纤维复合材料,以确保主次镜的热稳定性;主承力框及连接板采用钛合金;次镜支撑结构选用宝钢;主镜支撑结构选用钛合金;光机主体的主要支撑结构阻尼桁架采用钛合金;各部件与主承力板间的连接支架选用钛合金;辅助的非承力结构采用轻质铝合金。

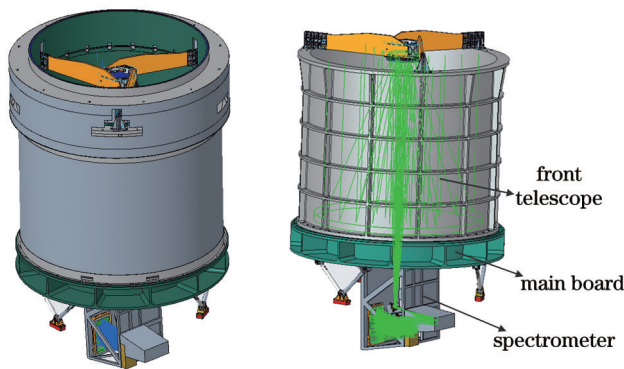


图 8 光谱仪的整体构型

Fig. 8 Integral configuration of the spectrometer

杂散光抑制是高性能光谱仪的重要指标之一。外遮光罩可以避免视场外大角度入射的光线直接照射主镜,并使之发生多次散射而衰减,而蜂窝结构或者挡光环能够进一步保证衰减的效果。同时,综合工程可实现性、包络尺寸限制以及抑制效果等因素,最终外遮光罩的设计结果如图 9(a)所示。由于外遮光罩的长度

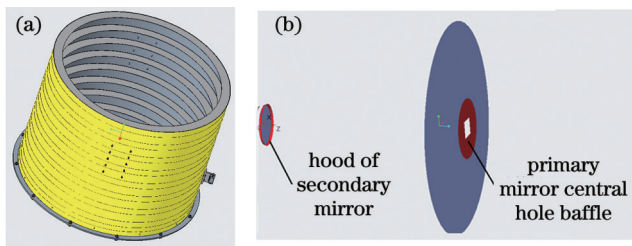


图 9 杂散光抑制结构。(a)外遮光罩;(b)内部杂散光抑制结构
Fig. 9 Stray light suppression structures. (a) Outer stray light shield; (b) inner stray light suppression structures

受到限制,其能够完全遮挡的杂散光入射角度为 40° ,而小于该角度入射的杂散光的抑制必须通过引入新的抑制结构来实现,这里采用了结构形式最为简单的“次镜遮光罩+主镜中心孔挡板”的组合形式,如图 9(b)所示。

经过计算,光谱仪采用外遮光罩、次镜遮光罩、主镜中心孔挡板组合能够保障相机的杂散光系数小于 0.5%。此外,对各种能够到达像面的光线路径进行统计后未发现异常杂散光路径。相机的主要杂散光是由机械表面的散射引起的。

5 结 论

面向光纤激光雷达系统的天基应用,笔者开展了天基光纤激光雷达光谱仪光学系统设计研究,根据应用需求确定了光学系统的选型与主要技术指标,所设计的光谱仪系统可以在 320~950 nm 谱段范围内实现 2 nm 的光谱分辨率;对光谱仪光学设计结果的多视场点阵图、MTF 曲线、能量集中度等进行分析,分析结果显示设计结果满足预期设计要求,可为新型光纤激光雷达系统中光谱仪的设计与研制提供参考。

参 考 文 献

- [1] 王铁军, 陈娜, 郭豪, 等. 飞秒强激光大气遥感新技术的原理和研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(7): 0700001.
Wang T J, Chen N, Guo H, et al. Principle and research progress of atmospheric remote sensing by intense femtosecond lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(7): 0700001.
- [2] 刘伟伟, 薛嘉云, 苏强, 等. 超快激光成丝现象研究综述[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500003.
Liu W W, Xue J Y, Su Q, et al. Research progress on ultrafast laser filamentation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500003.
- [3] Liu X, Tao Y L, Liu W W, et al. Multi-component atmosphere detection technology based on space-based filament laser[M]// Urbach H P, Yu Q F. The fourth international symposium of space optical instrument and application. Springer proceedings in physics. Cham: Springer, 2018, 209: 18-25.
- [4] 刘勋, 李维, 冯志芳, 等. 面向遥感应用的飞秒激光在轨传输规律仿真研究[J]. 航天返回与遥感, 2022, 43(4): 78-88.
Liu X, Li W, Feng Z F, et al. Simulation of femtosecond laser propagation in orbit for remote sensing applications[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2022, 43(4): 78-88.
- [5] 刘勋, 冯志芳, 李维, 等. 一种用于光纤激光长距离传输仿真的方法、介质及设备: CN112084621A[P]. 2020-12-15.
Liu X, Feng Z F, Li W, et al. Method, medium and equipment for simulating filament laser long-distance transmission: CN112084621A[P]. 2020-12-15.
- [6] Feng Z F, Li R, Li W, et al. The propagation of femtosecond laser filaments in air with continuously varying pressures[J]. Optics Communications, 2022, 502: 127404.
- [7] 王保华, 李可, 唐绍凡, 等. 高分辨率超大幅宽星载成像光谱仪光学系统设计[J]. 航天返回与遥感, 2021, 42(1): 92-99.
Wang B H, Li K, Tang S F, et al. Optical system design of a spaceborne imaging spectrometer with high resolution and super swath[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2021, 42(1): 92-99.

Optical System Design of Space-Based Filament LiDAR Spectrometer

Liu Xiaolin, Liu Xun*, Li Wei, Zhang Tingcheng, Sun Dewei, Zhang Li, Lin Yuhui
Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Chinese Academy of Space Technology, Beijing 100094, China

Abstract

Objective With the development of ultrashort and ultra-intense laser, it has been revealed that when a femtosecond laser pulse propagates in air, filaments, referred to as “filament laser”, would occur owing to nonlinear effects. Traditional spaceborne air-pollution monitoring devices rely on spectral imaging and LiDAR technology, which cannot realize real-time monitoring of atmospheric multi-component pollutants, identify unknown pollutants, and detect the chemical composition of various pollutants. The filament laser system in orbit emits a femtosecond laser pulse into the atmosphere, and the intensity of the femtosecond laser pulse is sufficient to ionize molecules in the atmospheric environment. Ionization excites the fluorescence spectrum carrying the information of the material composition, which can determine the various material components, species, and content in the area of the filament laser. To aid the research on space-based filament lidar technology, this study explored the optical system design of a space-based filament lidar spectrometer for remote sensing applications and realized the optical system configuration design. The spectral range and resolution of the spectrometer are 320–950 nm and 2 nm, respectively, and it has applicability in high resolution spectral detection of atmospheric pollutant composition.

Methods First, the application requirements of space-based filament lidar spectrometer were analyzed. On the basis of the characteristics of pollutants and the corresponding spectra of the substance elements, the working spectrum of the spectrometer and the spectral resolution were designed to be 320–950 nm and 2 nm, respectively. Using filament laser propagation simulation software, the filament laser diameter was found to be approximately 6 mm after 400 km orbital propagation. The filament laser diameter can be constrained to a small spatial scale after ultralong-distance propagation. To conform to the spectral range and resolution requirements, the size of CCD detector is 1024×1024 , with $13 \mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$ pixel size. The minimum spectral sampling interval was designed to be 0.67 nm/pixel. Considering the signal-to-noise ratio requirements of the spectrometer, the relative aperture of the optical system was determined as $D/f' = 1/3.5$, and the aperture of the spectrometer system was set as 0.5 m. Then, considering the requirements of engineering and the space environment, the optical design and optical-mechanical design of the spectrometer were performed so as to provide an effective load scheme for space-based filament laser atmospheric detection.

Results and Discussions The optical system of the spectrometer mainly comprises a telescopic system, slit, collimating system, plane grating, and imaging system; the collimating system, dispersion element, and imaging system constitute the spectrometer. The front telescopic system adopts a total reflection Cassegrain structure without chromatic aberration correction, and the root mean square (RMS) value of the diffuse spot radius of its imaging point is within $14 \mu\text{m}$. The spectrometer uses a reflective plane grating; the number of plane grating lines was determined to be approximately 263 lp/mm, and the grating aperture was 22 mm. A spectral resolution of 2 nm was achieved using first-order diffraction light. The maximum RMS diameter of the spectrometer system imaging slit is less than $17 \mu\text{m}$. The modulation transfer function (MTF) is greater than $0.99@3.7 \text{ lp/mm}$, and the maximum color distortion is $1.1 \mu\text{m}$. The energy concentration in three pixels is over 96%, which can be used for spaceborne high-resolution spectral detection of atmospheric components. The spectrometer system adopts a damping truss-unlocking mechanism for three-point support and is installed on the bottom plate of the satellite load compartment. The front lens tube is made of a carbon fiber composite material to ensure the thermal stability of the primary and secondary lens spacing. The main bearing frame and connecting plate are made of a titanium alloy. The design of stray light adopts the combination of “secondary mirror mask and primary mirror central hole baffle” with the simplest structure, which can ensure that the stray light coefficient of the camera is less than 0.5%. The statistics of various light paths that could reach the image surface were also obtained, and no abnormal stray light paths were found.

Conclusions For space-based applications of the filament LiDAR spectrometer system, the optical system was designed and examined, and the main technical indicators of the optical system were determined. The designed spectrometer system can achieve a spectral resolution of 2 nm in the spectral range of 320–950 nm and thus provide a reference for the design and development of spectrometers used in filament LiDAR systems.

Key words optical design; filament laser; spectrometer; optical system design; spectral resolution