

远紫外电离层高光谱成像仪杂散光抑制研究

巨燕方^{1,2}, 顾国超¹, 李博^{1*}, 林冠宇^{1,4}, 马征征³, 徐彬³¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;²中国科学院大学, 北京 100049;³中国电子科技集团有限公司第二十二研究所, 山东 青岛 266107;⁴许健民气象卫星创新中心, 北京 100081

摘要 电离层空间环境复杂, 紫外波段辐射能量微弱, 如何抑制远紫外高光谱成像仪杂散光是研究远紫外电离层高光谱载荷的重要环节。依据系统技术要求, 给出单超环面光栅型高光谱成像仪杂散光抑制方法, 首先分析杂散光的主要来源和传播路径, 利用 UG 软件设计消杂光结构, 使用 LightTools 软件仿真不同视场和不同光栅衍射级次下接收面的能量响应, 评估杂散光抑制效果。结果表明: 视场外杂散光能量和视场内光线能量量级相差 $10^{-5} \sim 10^{-7}$, 光栅非工作衍射级次光线能量和工作级次能量量级相差 $10^{-6} \sim 10^{-8}$, 中心波长处光谱杂光系数为 0.9975%, 所提方法满足空间远紫外高光谱遥感指标要求。

关键词 杂散光; 远紫外; 电离层; 超环面光栅; 高光谱成像仪

中图分类号 O433.4; O432.1; O434.2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222759

Stray-Light Suppression of Far Ultraviolet Ionization Layer Hyperspectral Imager

Ju Yanfang^{1,2}, Gu Guochao¹, Li Bo^{1*}, Lin Guanyu^{1,4}, Ma Zhengzheng³, Xu Bin³¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China;²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;³The 22nd Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Qingdao 266107, Shandong, China;⁴Innovation Center for FengYun Meteorological Satellite, Beijing 100081, China

Abstract The ionospheric space environment is complicated, and the ultraviolet-band light energy is feeble. Therefore, an important part of the study of the far ultraviolet ionization layer hyperspectral load is understanding how to suppress the stray light of a far ultraviolet hyperspectral imager. As per the system technical requirements, this paper presents a stray-light suppression method for a single toroidal grating hyperspectral imager. To evaluate the stray-light suppression effect, we first examined the main sources and propagation paths of stray light, then designed a structure for stray-light elimination using the UG software, and finally used the LightTools software to simulate the energy response of the receiving surface under various fields of view and grating diffraction levels. The results demonstrate that the difference between the stray light energy out of the field of view and the light energy in the field of view is $10^{-5} \sim 10^{-7}$, and the difference between the non-working diffraction level light energy of the grating and the working level light energy is $10^{-6} \sim 10^{-8}$, and the spectral stray-light coefficient at the central wavelength is 0.9975%, indicating that the proposed method meets the requirements of far ultraviolet hyperspectral remote sensing in space.

Key words stray light; far ultraviolet; ionosphere; toroidal grating; hyperspectral imager

1 引言

电离层分布在距离地面约 48~965 km^[1]。由于

电离层空间环境复杂, 探测波段光谱辐射弱, 系统成像质量很容易受到杂散光的影响。因此有效抑制杂散光对提高系统成像质量、改善系统观测能力尤为

收稿日期: 2022-10-12; 修回日期: 2022-11-03; 录用日期: 2022-11-24; 网络首发日期: 2023-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(62005268)、国家重点研发计划(2018YFB0504600, 2018YFB0504603)、中国电波传播研究所稳定支持科研经费资助项目(A132001W03)、黑土地保护与利用科技创新工程专项资助(XDA28050102)

通信作者: *libo0008429@163.com

重要。

举例了目前国内外对光栅型光谱成像系统杂散光抑制的研究。美国国家标准与技术研究院对多通道光纤成像光谱仪在空间方向上的杂散光水平进行了分析,利用 14 根光纤模拟不同视场的光源信号,并获得相应的点扩散函数^[2]。美国国家标准与技术研究院对 InGaAs 变形高光谱成像仪的杂散光进行了分析,利用积分球进行辐照度定标,并测得成像光谱仪杂散光水平^[3]。韩国公州国立大学利用 LightTools 软件对紧凑型成像光谱仪进行杂散光分析,计算得到像面处的杂散光的相对强度为 10^{-5} ,且这部分杂散光均来源于系统视场外^[4]。罗切斯特理工学院对 Landsat8 卫星上的 TIRS 载荷进行了杂散光分析与校正,提出一个通用方程,并对其与已知大气辐射进行比较,确定绝对辐射误差平均减小到 0.5%,远低于 2% 的要求^[5]。周海金等^[6]通过增加遮光罩,有效降低了星载大气痕量气体差分系数光谱仪杂散光辐射比。张军强等^[7]通过测得星载成像光谱仪杂散光修正矩阵,修正了中心波长杂散光信号。杨晋等^[8]通过设计消杂光光阑,有效降低了便携式中阶梯光栅光谱仪杂散光水平。骆超^[9]通过设计遮光罩,并利用 LightTools 软件对某 Offner 成像光谱仪进行光线追迹,采用陷波法进行仿真获得系统光谱维杂光系数,得到的陷波波长 633 nm 处的杂光系数为 0.34%,满足杂光系数 $\leq 1\%$ 的指标要求。张天一等^[10]通过构建 Harvey-Shack 散射模型,对高分辨率光谱仪进行了杂散光分析,得到系统杂散辐射率为 2.55%,信噪比为 16.01 dB,达到设计指标要求。

上述成像光谱仪工作波段为可见波段或红外波段,光栅多为平面或凸面,国内暂时没有关于远紫外光谱成像系统杂散光的研究。对远紫外电离层高光谱成像仪杂散光的有效研究,将使我国具备发展远紫外高光谱遥感技术的基础,为未来空间天气科学研究奠定技术基础与理论基础。对此,本文对远紫外单超环面光栅型高光谱成像仪杂散光进行抑制研究,使用 UG 软件设计 0 级光陷阱及消杂光光阑等装置,对杂散光进行抑制,使用 LightTools 软件进行追迹仿真,得到各视场各衍射级次杂散光的辐射能量,并对中心波长处的光谱谱线重叠进行计算。

2 成像光谱仪光机系统

成像光谱仪可以获得观测目标的连续单色图像,并将光谱维数据和空间维数据共同组成三维观测数据立方体,兼具高光谱分辨率和高分辨成像能力,可提供目标的空间与光谱特征细节。

根据全球紫外成像仪(GUVI)的仪器需求流程^[11],确定本系统的中心波长处杂光系数优于 1%。根据国外高层大气探测载荷所用轨道^[12-14],本文按照 840 km 极轨气象卫星运行轨道设计,采用侧向临边与天底相结合的观测模式实现对电离层的全球覆盖成像光谱观测,如图 1 所示。因远紫外波段信号微弱,且满足该波段透射率要求的光学透射材料有限,为保证信噪比与传输效率,系统采用离轴抛物望远镜+超环面光栅的结构,光学系统结构如图 2 所示,指标参数如表 1 所示。

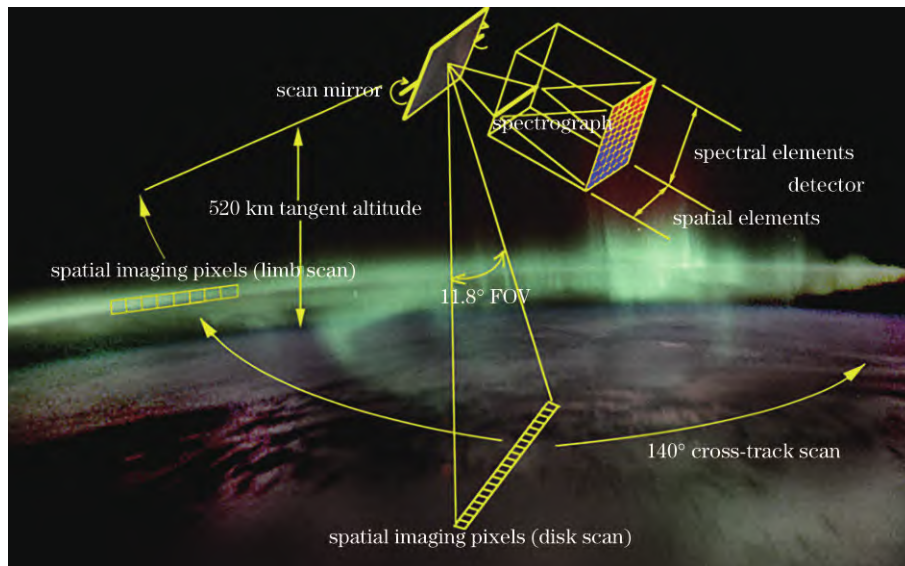


图 1 观测示意图

Fig. 1 Observation diagram

消杂光光阑和 0 级光陷阱等防杂光结构设计原理如图 3 所示,机械三维模型如图 4 所示(为便于观察,将部分结构件隐藏)。光学系统包括光阑、离轴抛物望远镜、狭缝、超环面光栅、像面,镜片基底选用微晶玻璃,

机械结构采用钢材料,对机械结构表面涂覆消光漆并进行氧化发黑处理,进一步提高系统对杂散光的抑制效果。

其中,光学系统及机械结构参数如表 2 所示,其中

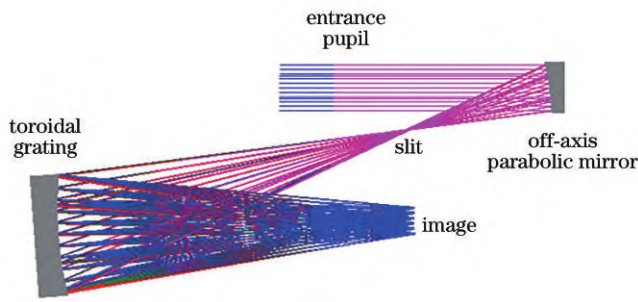


图 2 光学系统结构图

Fig. 2 Optical system structure diagram

表 1 技术指标

Table 1 Technical indicators

Technical indicator	Value
Field of view / [(°) × (°)]	11.8 × 0.176
Wavelength / nm	115–180
F [#]	3
Entrance pupil aperture / mm	25
Spectral resolution / nm	2
Spatial resolution / km	10
Device dimension / (mm × mm)	16 × 16
Stray light level	10 ⁻²

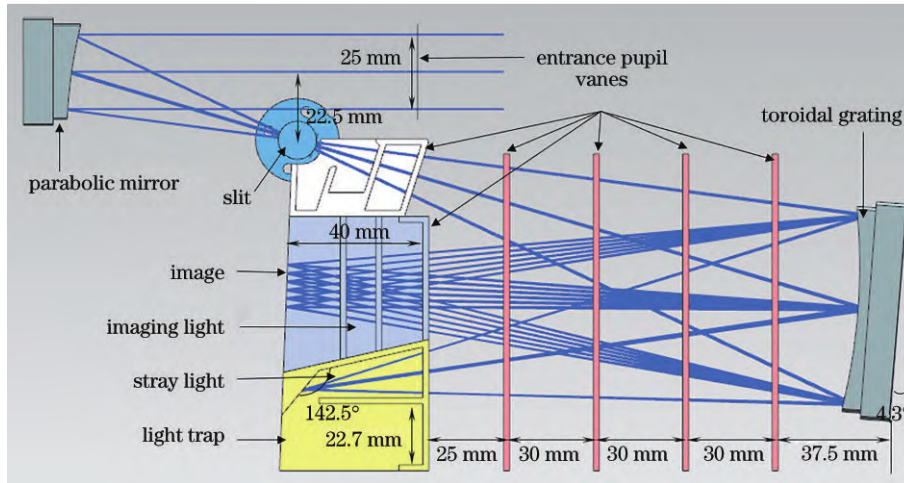


图 3 机械结构示意图

Fig. 3 Schematic of mechanical structure

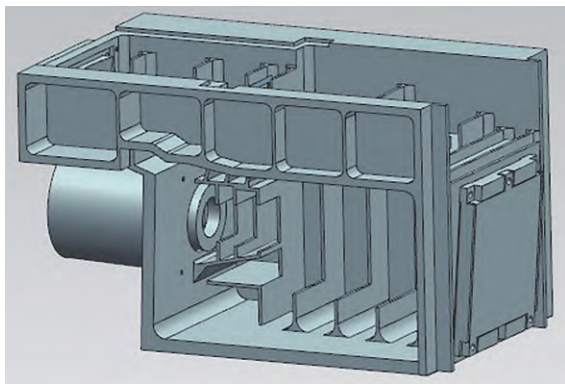


图 4 系统三维模型

Fig. 4 Three-dimensional model of the system

L_{E-T} 是入瞳到离轴抛物镜的距离, L_{T-S} 是抛物镜到狭缝的距离, L_{S-G} 是狭缝到超环面光栅的距离, L_{G-I} 是光栅到像面的距离。

3 杂散光分析与计算

杂散光是光学系统中非正常传输光线的总称, 即在光学系统中按照非正常光路传播到探测器上的目标光线信号和到达探测器表面的非目标光线信号^[15]。轨道高度、空间环境、工作波段、观测目标及系统结构等

表 2 结构参数

Table 2 Structural parameters

Device	Parameter	Value
Entrance pupil	Size / (mm × mm)	25 × 25
	L_{E-T} / mm	120
Telescope mirror	Type	Off-axis parabolic mirror
	Radius / mm	-150
	L_{T-S} / mm	-75
slit	Width / mm	0.23
	L_{S-G} / mm	-196
Diffraction grating	Type	Toroidal grating
	Radius / mm	200/195.86
	Reticle density / (lp · mm ⁻¹)	1200
	Diffraction order	+1
	Incidence angle / (°)	12.25
Diffraction grating	Diffraction angle / (°)	0.22
	L_{G-I} / mm	193.97

诸多因素共同影响系统的杂散光的来源和分布。对于本文远紫外电离层高光谱成像仪, 其杂散光的来源主要有视场外杂散光和超环面光栅非工作衍射级次杂散光。

3.1 杂散辐射理论

由于实际加工水平的限制,经元件表面反射的光线并不完全遵循反射定律,而是会以弥散的方式进行传播,如图 5 所示,其中 θ_i 为入射角, θ_r 为反射角, ϕ_i 为入射光方位角, ϕ_r 为反射光方位角。

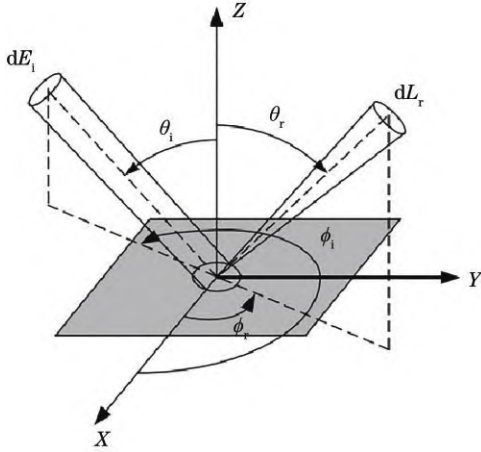


图 5 双向散射分布函数几何示意图

Fig. 5 Geometric diagram of bidirectional scattering distribution function

弥散程度用双向散射分布函数(BSDF)表示,表征该表面的散射特征,只与入射光的波长、入射角度及观测角度有关,定义为光沿表面某一方向散射后的辐亮度 $L_s(\theta_r, \phi_r, \lambda)$ 与入射到该表面的辐照度 $E_s(\theta_i, \phi_i, \lambda)$ 之比,表达式为

$$F_{\text{BSDF}} = \frac{L_s(\theta_r, \phi_r, \lambda)}{E_s(\theta_i, \phi_i, \lambda)} \quad (1)$$

BSDF 包括双向反射分布函数(BRDF)、透射分布函数(BTDF)、衍射分布函数(BDDF),对于该成像光谱仪杂散辐射分析,主要考虑 BRDF,其表示表面的漫反射状态。光机系统杂散光的传播十分复杂,但其仍遵循能量传导理论。将杂散光源看作微面元,把整个传播过程分为若干部分,每一部分的接收面作为下一部分的发射面,对各微面元进行积分,得到总的杂散辐射^[16]。微面元之间的能量传输示意图如图 6 所示。

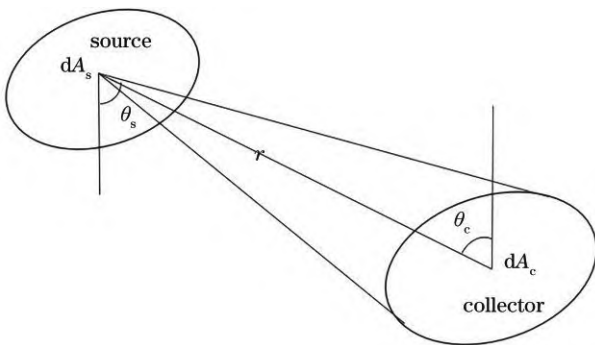


图 6 微面元间能量传输示意图

Fig. 6 Schematic of energy transmission between micro panels

图 6 中, r 为面元中心距离, θ_s 和 θ_c 为面元连线与法线夹角, L_s 为光源面辐亮度。由立体角定义可知, $d\Omega_s$ 为

$$d\Omega_s = \frac{\cos \theta_c \cdot dA_c}{r^2} \quad (2)$$

几何构成因子(GCF)是光源面元 dA_s 对接收面元 dA_c 投影的立体角,表达式为

$$F_{\text{GC}} = \frac{\cos \theta_s \cdot \cos \theta_c \cdot dA_c}{r^2} \quad (3)$$

联合式(1)~(3),得接收面接收的辐射通量 $d\phi_c$ 为

$$d\phi_c = d\phi_s \cdot F_{\text{BSDF}} \cdot d\Omega_{s \rightarrow c} \quad (4)$$

最后光学系统杂散光辐射的传输方程可简化为

$$\phi_c = \phi_s \cdot F_{\text{BSDF}} \cdot F_{\text{GC}} \quad (5)$$

由式(5)知,可通过降低杂散光源强度 ϕ_s ,降低表面的散射特性 F_{BSDF} ,合理设计机械结构降低 F_{GC} ,从而抑制系统杂散光。

3.2 杂散光仿真抑制

利用 LightTools 软件进行杂散光分析,在软件中建立成像光谱仪模型,光机模型参数如表 3 所示。

表 3 光机模型参数

Table 3 Optical mechanical model parameters

Model	Content
Light source	500 mm away from the pupil
Radiant power / W	1
Off-axis parabolic mirror	Reflectivity 95%; absorption 5%
Toroidal grating	Work level +1; 1200 line/mm
Mechanical surface	Lambert reflectance 2.5%; absorption 97.5%
Number of scattered rays	10
Receiving surface	Mechanical absorber
Number of trace rays	2500000

因为 O^+ 、 O_2 、 N_2 等是地球电离层大气中的主要成分,其特征谱线含有远紫外光谱,根据地球紫外光谱分布结果^[17],利用 Origin 软件对 115~180 nm 日气辉光谱分布进行归一化处理,得到本系统光源光谱权重,如图 7 所示。

高光谱成像仪中超环面光栅工作级次为 +1 级,在软件中对光栅 -2~+3 共 6 个级次进行模拟。使用可覆盖 $\pm 20^\circ$ 视场的弧形光源,对设置挡光装置前后的接收面能量分布进行分析,光线追迹结果如图 8~11 所示,有挡光装置的光功率为 2.554×10^{-2} W,无挡光装置的光功率为 3.547×10^{-2} W,挡光装置可抑制占总能量 28% 的杂光。

使用平面光源以不同视场角度照射系统入瞳,各视场权重均设置为 1,对接收面能量分布进行分析,结果如图 12 所示。结果表明:无挡光装置时, 15.5° 视场时,杂散光能量衰减为 0;有挡光装置时, 6.8° 视场时,杂散光能量衰减为 0,挡光装置对视场外杂散光的抑

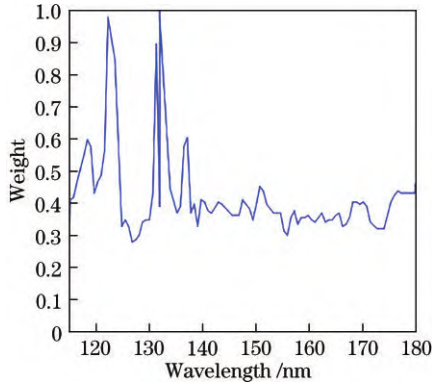


图 7 光源光谱权重

Fig. 7 Light source spectral weight

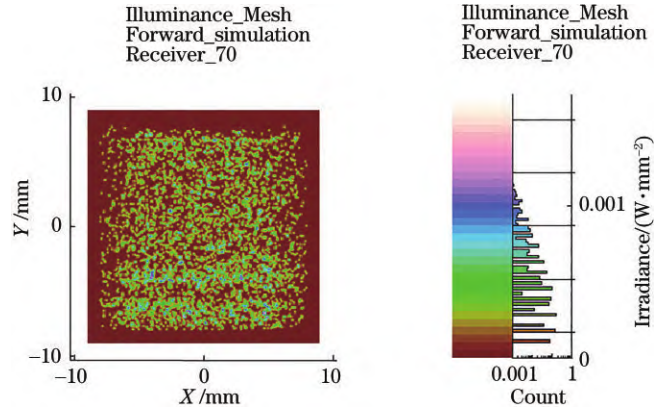


图 11 能量分布图(抑制后)

Fig. 11 Energy distribution diagram (after inhibition)

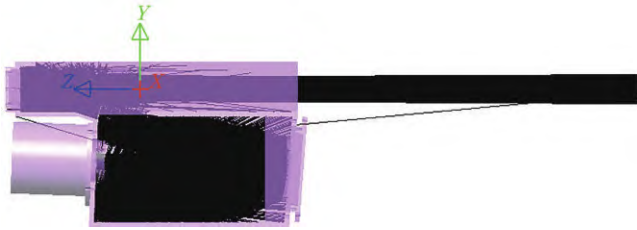


图 8 光线追迹图(抑制前)

Fig. 8 Ray tracing diagram (before inhibition)

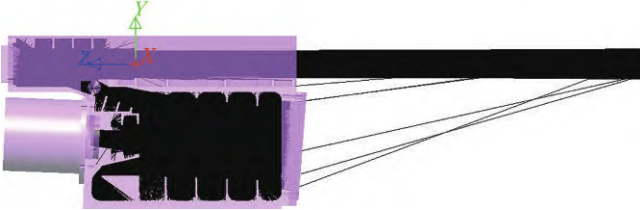


图 9 光线追迹图(抑制后)

Fig. 9 Ray tracing diagram (after inhibition)

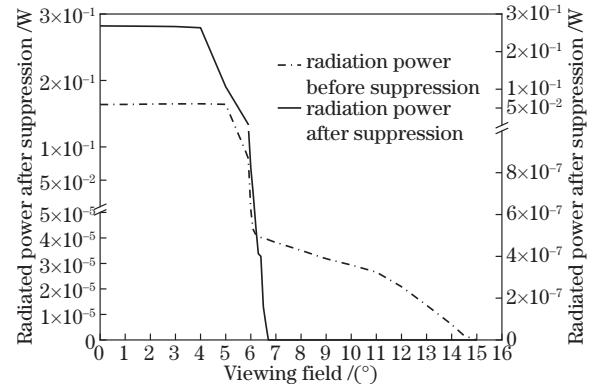


图 12 各视场像面能量

Fig. 12 Image plane energy of each field of view

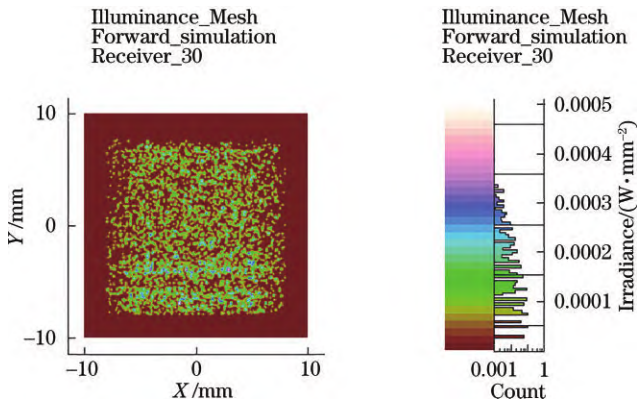


图 10 能量分布图(抑制前)

Fig. 10 Energy distribution diagram (before inhibition)

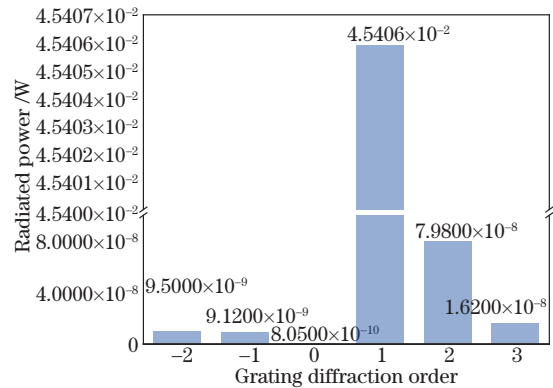


图 13 光栅各衍射级次能量

Fig. 13 Diffraction order energy of the grating

制效果明显;同时,到达像面的杂散光能量与信号光能量量级相差较大,约为 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ 。

使用弧形光源对光栅各衍射级次进行追迹,不同衍射级次光线到达接收面的能量结果如图 13 所示,结果表明,光栅非工作级次光线的能量与正常光线的能量量级相差约 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ 。

由视场外杂散光和超环面光栅杂散光的仿真结果可知,0 级光陷阱与各消杂光光阑的配合可有效地抑制系统杂散光。

对于高光谱成像仪,在无任何杂光抑制措施的情况下,像面谱线重叠现象严重,对成像影响很大。对中心波长 147.5 nm 进行单波长分析,中心波长响应区域位于像面中央,以此响应区域为新建像面,分析其他波长光在该区域落点能量,并与全波段光在该区域的能量进行对比,计算出中心波长杂光系数,计算公式为

$$V = \frac{E_s}{E_T} \times 100\%, \quad (6)$$

式中: V 为杂光系数; E_s 为接收面除中心波长外的辐射能量总和; E_T 为全波段总辐射能量。新建像面下非中心波长的光功率分布如图 14 所示, 全波段光功率分布如图 15 所示, 结果如表 4 所示。

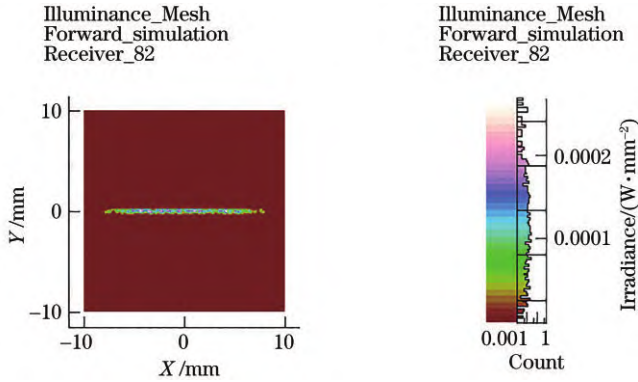


图 14 非中心波长能量分布

Fig. 14 Noncentral wavelength energy distribution

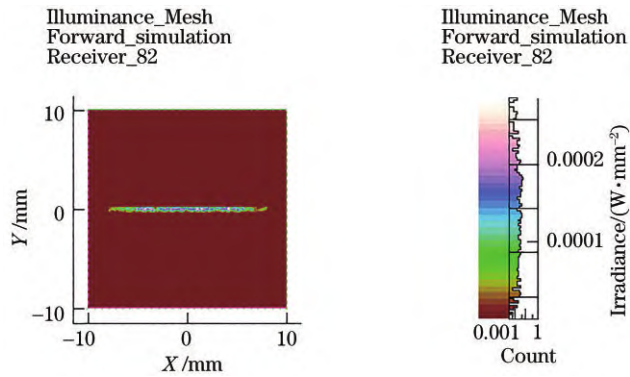


图 15 全波段能量分布

Fig. 15 Full band energy distribution

表 4 中心波长杂散光水平

Table 4 Central wavelength stray light level

Wavelength /nm	Power /W
115-180	9.15597×10^{-4}
Stray light	9.13×10^{-6}
Stray light coefficient	0.9975%

由系统中心波长杂光系数分析结果可知, 接收面中心波长响应区域里非中心波长光功率和全波段光功率分别约为 9.13×10^{-6} W 和 9.2×10^{-4} W, 由式(6)计算可知中心波长处杂光系数为 0.9975%。

4 结 论

根据远紫外电离层成像探测技术研究的实际需求, 设计了远紫外电离层高光谱成像仪光学系统。由于电离层空间环境复杂且变化敏感, 远紫外波段特殊、能量衰减快, 通过设计挡光环、0 级光陷阱及消杂光光阑等机械防杂光结构, 对系统视场外杂散光和超环面

光栅非工作衍射级次引起的杂散光进行了抑制且抑制效果良好; 视场外杂散光能量与视场内光线能量量级相差 $10^{-5} \sim 10^{-7}$, 非工作级次杂散光与 +1 级衍射光线能量量级相差 $10^{-6} \sim 10^{-8}$; 对成像光谱仪像面处的光谱谱线重叠进行了仿真分析, 得到中心波长处杂光系数为 0.9975%, 满足系统中心波长处杂光系数优于 1% 的空间远紫外高光谱遥感探测指标要求。

参 考 文 献

- [1] 谭广远. 风云三号电离层掩星产品评估及气候学特征研究[D]. 北京:中国科学院国家空间科学中心, 2021.
Tan G Y. Accuracy evaluation and climatological characteristics of Fengyun-3 series ionospheric radio occultation products[D]. Beijing: National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [2] Brown S W, Johnson BC, Feinholz M E, et al. Stray-light correction algorithm for spectrographs[J]. Metrologia, 2003, 40(1): S81-S84.
- [3] Lin M K, Swanson R, Moon T, et al. Stray light characterization of an InGaAs anamorphic hyperspectral imager[J]. Optics Express, 2010, 18(16): 17510-17520.
- [4] Lee J, Lee J. Stray light analysis of a compact imaging spectrometer for a microsatellite STSAT-3[J]. Hankook Kwanghak Hoeji, 2012, 23(4): 167-171.
- [5] Gerace A, Montanaro M. Derivation and validation of the stray light correction algorithm for the thermal infrared sensor onboard Landsat 8[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 191: 246-257.
- [6] 周海金, 刘文清, 司福祺, 等. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪杂散光抑制[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2331-2337.
Zhou H J, Liu W Q, Si F Q, et al. Stray light suppression of space-borne differential optical absorption spectrometer for monitoring atmospheric trace gas[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(11): 2331-2337.
- [7] 张军强, 吴清文, 颜昌翔. 星载成像光谱仪杂散光测量与修正[J]. 光学精密工程, 2011, 19(3): 552-560.
Zhang J Q, Wu Q W, Yan C X. Measurement and correction of stray light of space-borne high-resolution imaging spectrometer[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(3): 552-560.
- [8] 杨晋, 尹禄, 姚雪峰, 等. 新型便携式中阶梯光栅光谱仪光学设计与消杂散光研究[J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0812001.
Yang J, Yin L, Yao X F, et al. Optical design and stray light suppression of a new portable echelle spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0812001.
- [9] 骆超. 成像光谱仪杂散光的分析、测量与校正[D]. 苏州: 苏州大学, 2018.
Luo C. Analysis, measurement and correction of stray light in imaging spectrometer[D]. Suzhou: Soochow University, 2018.
- [10] 张天一, 侯永辉, 徐腾, 等. LAMOST 高分辨率光谱仪杂散光分析[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(1): 278-285.
Zhang T Y, Hou Y H, Xu T, et al. Stray light analysis

- on LAMOST high-resolution spectrograph[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(1): 278-285.
- [11] GUVI. Algorithms[EB/OL]. [2022-10-01]. http://guvitimed.jhuapl.edu/science_algorithms.
- [12] Christensen A B. Initial observations with the Global Ultraviolet Imager (GUVI) in the NASA TIMED satellite mission[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(A12): 1451.
- [13] Paxton L J, Meng C I, Fountain G H, et al. SSUSI: horizon-to-horizon and limb-viewing spectrographic imager for remote sensing of environmental parameters [J]. *Proceedings of SPIE*, 1993, 1764: 161-176.
- [14] Thonnard S E, Osterman S N, McCoy R P, et al. Optical calibration of the special sensor ultraviolet limb imager (SSULI)[J]. *Proceedings of SPIE*, 1994, 2282: 98-106.
- [15] 陈靖, 田爱玲. 光学合成孔径成像系统的杂散光分析与抑制[J]. *西安工业大学学报*, 2021, 41(4): 432-437.
- Chen J, Tian A L. Analysis and suppression of stray light in an optical synthetic aperture imaging system[J]. *Journal of Xi'an Technological University*, 2021, 41(4): 432-437.
- [16] 陆强. 地球同步轨道空间相机的可见光通道地球反照杂散光研究[J]. *红外*, 2019, 40(11): 1-6, 48.
- Lu Q. Study on earth-reflected stray light in the visible channel of space camera in geosynchronous orbit[J]. *Infrared*, 2019, 40(11): 1-6, 48.
- [17] 王大鑫. 真空紫外电离层光学遥感辐射特性和反演算法研究[D]. 北京: 中国科学院国家空间科学中心, 2020.
- Wang D X. Research on radiation characteristics and inversion algorithm of vacuum ultraviolet ionospheric optical remote sensing[D]. Beijing: National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, 2020.