

文章编号 1004-924X(2022)17-2050-08

Lyot星冕仪光学系统及杂散光抑制

迟金鹏^{1,2}, 张红鑫^{1*}, 王晓东¹, 孟庆宇¹, 秦子长^{1,2}, 李云辉¹, 王泰升¹, 李凤有¹

(1. 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)

摘要:木卫一等离子体环是木星磁层中密度最大、研究最广泛的区域。为满足木卫一等离子体环的观测需求,设计了一种用于行星大气光谱望远镜(Planetary Atmospheric Spectral telescope, PAST)的Lyot星冕仪。根据木星的辐射特性与PAST参数确定仪器参数,给出Lyot星冕仪的初始结构并进行优化;分析了Lyot星冕仪的成像性能,系统在37 lp/mm的MTF>0.6,满足成像质量要求;确定系统杂散光成因,利用物像共轭关系设计相应的杂散光抑制结构,在千级超净间对Lyot星冕仪进行杂散光抑制水平检测。实验结果表明:系统主要杂散光得到了有效抑制,系统的杂散光抑制水平在 $2.5R_J$ 处为 10^{-5} 量级,满足地基观测木卫一等离子体环要求。

关键词:光学设计;光学遥感;天文仪器;星冕仪;杂散光

中图分类号:TH753.12 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20223017.2050

Optical system and stray light suppression of Lyot coronagraph

CHI Jinpeng^{1,2}, ZHANG Hongxin^{1*}, WANG Xiaodong¹, MENG Qingyu¹, QIN Zichang^{1,2},

LI Yunhui¹, WANG Taisheng¹, Li Fengyou¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: firsthongxin@163.com

Abstract: The Io plasma torus is the most densest and most widely studied region of Jupiter's magnetosphere. To meet observe the Io plasma torus observation, a Lyot Coronagraph was installed in the planet's atmosphere spectrum telescope to meet the needs of imaging observation of Io plasma torus capture the emissive spectrum. The parameters of the instrument were determined according to the radiation characteristics of the Jupiter and the parameters of PAST. Then, the initial structure was optimized. The imaging performance of the system was analyzed, and the MTF value at 37 lp/mm is above 0.6 that meet the design specification. Considering the character of stray light in system, a structure system for suppressing stray light was built considering the characteristics of stray light. The level of stray light in the system was measured in a class 1 000 cleanroom. The experimental results show that the main sources of stray light can be suppressed entirely, and the stray light suppression level of the system is equal to 10^{-5} at $2.5R_J$, which satisfies the system re-

收稿日期:2022-01-26;修订日期:2022-02-25.

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(A类)资助(No. XDA17010205)

quirements for observing Io plasma torus.

Key words: optical design; optical remote sensing; astronomical instrument; stray light; coronagraph

1 引言

木卫一火山活动释放的粒子被木星磁场所捕获,在木星磁层空间约 5.9 个木星半径处演化形成等离子体环,影响着木星磁层的动力学过程^[1]。1979 年,旅行者 1 号探测器首次对这种复杂的环行星等离子体环进行近距离探测。在随后的 30 年里,旅行者 1 号、旅行者 2 号、伽利略号、朱诺号等探测器多次对木卫一等离子体环进行近距离探测,对木卫一等离子体环的近距离探测,使人们对木卫一等离子体环的粒子成分、温度和径向分布有了一定的认识^[2]。探测器的近距离探测虽能提供木卫一等离子体环的粒子成分、温度和径向分布详细的空间信息,但难以观测粒子物质与能量传输的全貌,限制了人们对木卫一等离子体环全局特性的研究。木卫一等离子体环在木星自身(磁场、引力)与外部(太阳风、星际磁场等)活动的影响下,始终是动态变化的,若想研究木卫一等离子体环的全局特性,需要将木卫一等离子体环动态变化的空间信息和时间信息进行分离。光学遥感观测通过对木卫一等离子体环的地基观测,将观测的光谱信息与量子辐射理论结合,反演辐射体相关信息,追踪其时空变化,获取一定时间尺度内大范围空间物质的分布状态,对木卫一等离子体环的全局特性进行研究^[3]。

1995 年,科研人员在卡塔琳娜天文台对木卫一等离子体环 673.1 nm 发射谱线进行光学遥感观测,首次获得木卫一等离子体环的全局结构图像^[4]。但公共望远镜的使用存在时长限制,难以观测木卫一等离子体环全局特性的长期演化。本文设计的 Lyot 星冕仪搭载世界上首台专用于行星科学研究的望远镜——行星大气光谱望远镜 (Planetary Atmospheric Spectral Telescope, PAST)^[5],实现对木卫一等离子体环 589, 630 和 673.1 nm 发射谱线的长期光学遥感观测,对木卫一等离子体环全局特性的长期演化进行研究。

2 Lyot 星冕仪工作原理

法国天文学家 Lyot 在 1930 年发明了日冕仪,消除太阳直射光对日冕成像的影响,实现对日冕的观测^[6]。地基观测木卫一等离子体环,通常采用衰减片降低木星直射光对木卫一等离子体环成像的影响。本文依照 Lyot 日冕仪的工作原理设计 Lyot 星冕仪,消除木星直射光对木卫一等离子体环成像的影响,图 1 为 Lyot 星冕仪的工作原理。其中, D_1 为内掩体,是表面抛光的金属圆锥,圆锥底面与 PAST 焦面 P_1 重合,木星直射光会聚在 D_1 的表面被反射出成像光路。PAST 入射孔径、次镜挡光板及 Spider 支撑件共同组成孔径光阑 A_1 ,木星直射光照射孔径光阑 A_1 会产生强烈的衍射光,衍射光经 Lyot 星冕仪 O_2 镜组成像在共轭像面 P_2 处,在此处放置 Lyot 光阑 A_2 对衍射光进行遮拦。内掩体 D_1 及 Lyot 光阑 A_2 用于抑制杂散光,实现对木卫一等离子体环的成像观测。

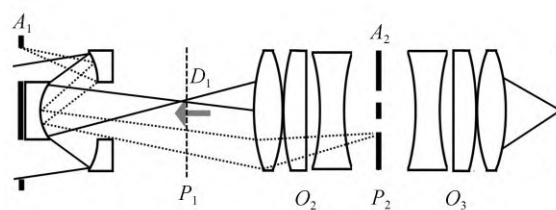


图 1 Lyot 星冕仪工作原理

Fig. 1 Working principle of Lyot coronagraph

3 系统设计

3.1 系统参数

PAST 口径为 800 mm,焦距为 5 600 mm,工作波段为 280~680 nm,视场角 2ω 为 $15'$,角分辨率为 $0.5''$ 。Lyot 星冕仪共轭距为 300 mm, Lyot 星冕仪要求在 589, 630 和 673.1 nm 3 个波段成像,选择具有良好光谱透过率的窄带滤光片控制光谱波段。

Lyot 星冕仪需要对 PAST 望远镜的成像图进行二次成像。考虑系统杂散光的情况,为实现地基观测等离子体环目标,确定 Lyot 星冕仪杂散光抑制水平为 10^{-5} 量级^[4]。根据理论计算与设计分析, Lyot 星冕仪的具体光学设计参数如表 1 所示。

表 1 Lyot 星冕仪指标要求

Tab. 1 Requirements of Lyot coronagraph

光学参数	值
放大率	-1×
工作波长	589, 630, 673.1 nm 带宽均为 2 nm
探测器	像元尺寸 13.5 μm
杂散光抑制指标	10^{-5} 量级
平均传递函数	不低于 0.6@37 lp/mm

3.2 优化及性能分析

初始结构选择结构对称的双高斯系统,该系统的物像倍率为 -1 $\times$,对称式结构能够自动消除彗差、畸变和倍率色差这 3 种垂轴像差,设计时只需要考虑球差、像散、场曲和位置色差的影响,设计简单。此外,孔径光阑衍射光经 PAST 平行出射,由对称式双高斯系统成像于镜头对称中心,有利于杂散光抑制结构的设计。在光学设计软件中建立评价函数进一步优化系统,最终 Lyot 星冕仪的光学结构如图 2 所示。

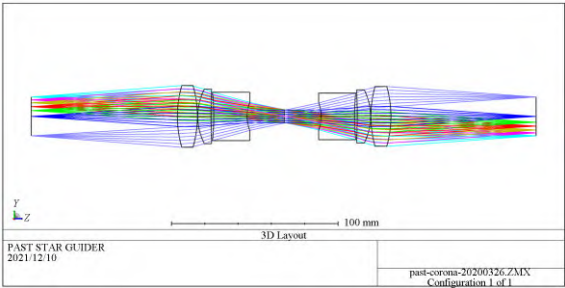


图 2 Lyot 星冕仪的光学结构

Fig. 2 Optical structure of Lyot coronagraph

PAST 系统整体如图 3 所示。系统不同波长有效视场最大弥散斑的 RMS 直径分别为 13.212, 11.380 和 11.492 μm ,均小于所选用探测器的像元尺寸(13.5 μm),如图 4 所示。探测器的特征频率为 37 lp/mm,所有视场处的 MTF 值均大于 0.6,如图 5 所示。以上结果表明, Lyot 星冕仪具有良好的成像质量。

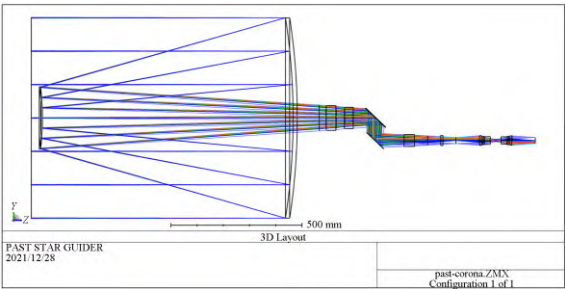


图 3 PAST 系统光学结构

Fig. 3 Optical structure of PAST system

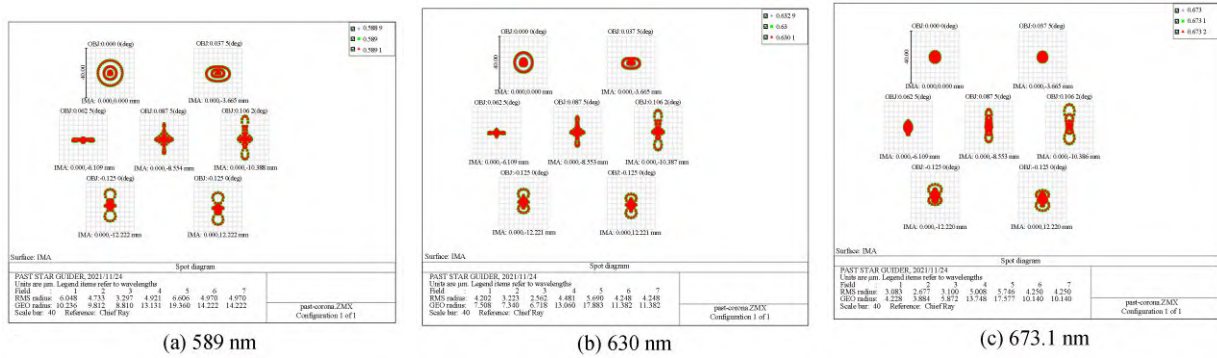


图 4 PAST 系统弥散斑点列图
Fig. 4 Spot diagrams of PAST system

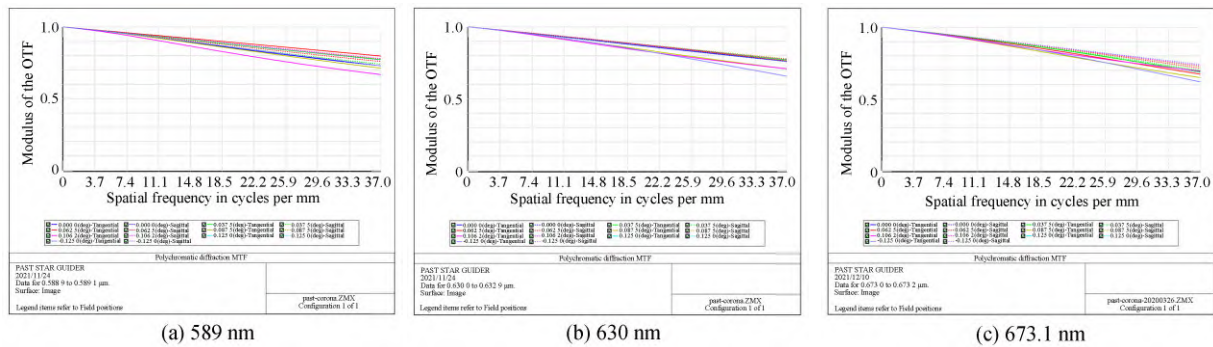


图 5 PAST 系统的传递函数曲线
Fig. 5 MTF curves of PAST system

3.3 机械结构设计

受 PAST 结构布局限制, Lyot 星冕仪需要一次光路折转, 因此设计了用于折转光路的反射结构。 Lyot 星冕仪的机械结构可以分为两部分: 反射镜座部分与主镜筒部分, 如图 6 所示。

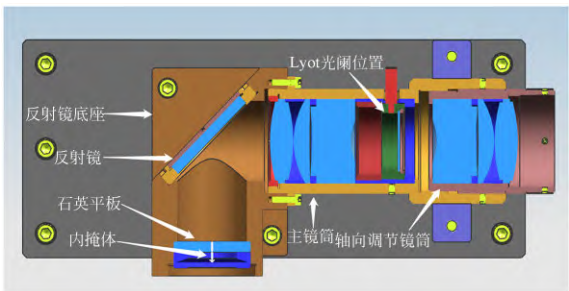


图 6 Lyot 星冕仪的机械结构
Fig. 6 Mechanical structure of Lyot coronagraph

反射镜座部分是一个三通结构, 三个通面分别与 PAST 像面、反射镜与主镜筒部分相接。与 PAST 像面相接的通面处需要安装内掩体, 此处需要预留超光滑石英平板位置; 反射镜以 45° 固定在反射镜座中, 使光线发生折转, 实现光路的一次折转; 主镜筒部分通过法兰与反射镜座连接保证系统的同轴度。

主镜筒部分为与反射镜座部分相接的主镜筒和轴向调节镜筒。主镜筒内包括 3 片透镜和 Lyot 光阑, 采用隔圈与压圈组合将镜片固定在主镜筒中。 Lyot 光阑通过拨杆旋转调节角度, 确保能够完全遮挡衍射杂散光。轴向调节镜筒包括 3 片透镜, 同样采用隔圈与压圈组合的方式将镜片固定在轴向调节镜筒中。轴向调节镜筒采用套

筒的方式与主镜筒相接保证透镜同轴, 轴向调节镜筒在主镜筒中可以沿中轴线移动, 并通过径向的顶紧螺钉锁紧在合适的位置。移动轴向调节镜筒调整像面位置, 使像面与 CCD 平面重合, 从而接收到清晰的图像。

4 杂散光分析与抑制

4.1 杂散光分析

影响目标成像的光线被称为杂散光, 影响木卫一等离子体环成像的杂散光主要来源于木星直射光。依据杂散光在系统中传播路径的不同, 将影响木卫一等离子体环成像的杂散光分为: (1) 直接进入 Lyot 系统的木星直射光, 在系统内发生散射, 导致在像面无法观测到木卫一等离子体环图像; (2) 木星直射光照射 PAST 孔径光阑引起的衍射杂散光^[7]; (3) 木星直射光照射到 PAST 主镜, 由主镜表面粗糙度或缺陷产生的散射杂散光。

4.2 杂散光抑制结构设计

为消除进入系统的木星直射光, 在 PAST 像面处放置圆锥型内掩体, 内掩体底面与 PAST 焦平面重合, 木星的像落在内掩体侧面上被反射出光路。木星的理想像高为:

$$y=f\cdot\tan\omega=y\cdot\omega,$$
(2)

其中: f 为 PAST 的焦距, 已知 $f=5\,600\,\text{mm}$; ω 为木星角半径, 由木星半径 $R_j=71\,400\,\text{km}$ 和木地距离 h 得到:

$$\omega=R_j/h.$$
(3)

在近地点和远地点木星距离分别为 6.3×10^8 km(角半径为 $23''$)和 9.3×10^8 km(角半径为 $15''$),取二者的平均值 $19''$,计算得到木星的理想像高 y 。为确保充分遮拦木星直射光,内掩体的底面半径为木星像高的2.5倍,即:

$$r = 2.5 \cdot y = 1.29 \text{ mm}. \quad (4)$$

采用超光滑石英平板作为安装内掩体的基座,在平板中心打孔,通过支杆将内掩体直接固定在平板上,避免内掩体支撑产生额外的杂散光。使用吸光槽吸收内掩体反射的木星直射光,对木星直射光进行有效的抑制,如图7所示。

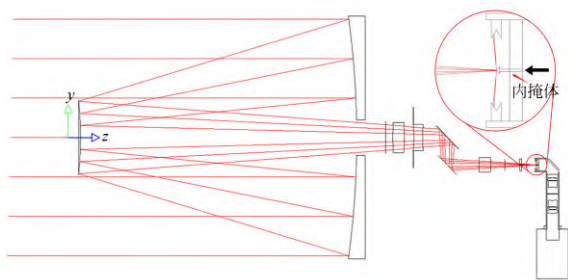


图7 木星直射光的抑制

Fig. 7 Suppression of direct Jupiter light

根据边界波理论^[8],在孔径光阑处产生的衍射光可等效为孔径光阑边缘产生的子波光束,它们会聚在特定的光学系统中,并通过在共轭像面添加 Lyot 光阑来抑制。木星直射光照 PAST 孔径光阑(入射孔径、次镜挡光板及 Spider 支撑件),孔径光阑产生衍射光经 Lyot 星冕仪准直镜组成像在 Lyot 星冕仪内部,在孔径光阑的共轭像面放置 Lyot 光阑抑制衍射杂散光。

模拟 PAST 孔径光阑产生的衍射子波,在不同位置设置点光源,通过光线追迹得到对应的点像,图8为 PAST 孔径光阑衍射光的抑制过程,根据点像确定 Lyot 光阑的位置及尺寸^[9]。

经过上述抑制设计,PAST 系统的主要杂散光已经得到了抑制。为进一步消除系统 PAST 主镜表面产生的散射杂散光及镜片本身物理缺陷的影响,还需要采取系统内壁涂黑吸

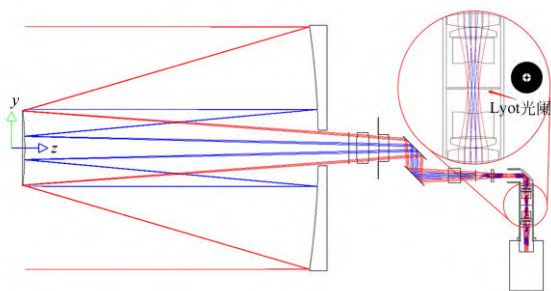


图8 衍射光杂散光的抑制

Fig. 8 Suppression of diffractive light

收散射光,使用工艺成熟的玻璃减少镜片气泡及杂质等措施。

5 实验

5.1 实验装置

在千级超净间暗室中搭建模拟木星光源与模拟 PAST 进行 Lyot 星冕仪杂散光抑制水平的检测,图9为实验装置。光纤光源发出的光由物镜会聚到准直镜组前焦面小孔处,小孔前放置乳白玻璃匀光,小孔直径为 d ,经准直镜组形成不同角度的平行光。小孔出射光孔径角 ω 与小孔直径存在以下关系:

$$\omega = 2 \arctan \left(\frac{d}{2f} \right). \quad (5)$$

已知木星直射光角半径为 $19''$,准直镜组焦距 f 为 550 mm,计算得到小孔直径 d 为 0.1 mm。此时,准直镜组出射光为模拟木星直射光,经模拟望远镜系统产生杂散光,利用 Lyot 星冕仪抑制,对杂散光抑制水平进行检测^[10]。

实验中,使用 LED 白光光纤光源和平行光管模拟木星光源^[11],在平行光管焦点处放置合适圆孔,此时平行光管出射光可视为木星直射光;

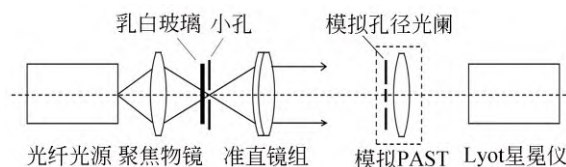


图9 Lyot星冕仪杂散光抑制实验装置示意图

Fig. 9 Schematic diagram of experimental set-up for stray light suppression of Lyot coronagraph

使用透镜系统模拟 PAST,在透镜系统前固定位置放置 Spider 结构模拟 PAST 孔径光阑(入射孔径、次镜挡光板及 Spider 支撑件),此时的透镜系

统等效于 PAST;最后,由 CCD 接收经 Lyot 星冕仪抑制后的杂散光图像,实验装置如图 10 所示。

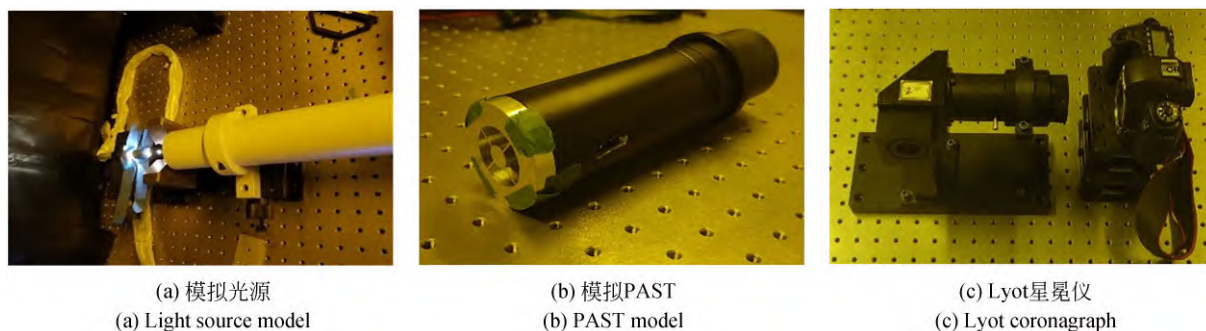


图 10 实验装置

Fig. 10 Photos of experimental set-up

5.2 实验方案与结果

根据第 4 节分析,系统中所有杂散光的根本来源为木星直射光,定义杂散光抑制能力的评价指标 $A = E(\theta)/E_j$, $E(\theta)$ 代表采取所有抑制手段后最终像面上不同视场处杂散光的照度, E_j 代表不采取任何抑制手段时木星直射光在最终像面上形成的平均照度, A 就代表系统杂散光的抑制水平^[12]。

根据 4.2 节分析,孔径光阑衍射光经 Lyot 星冕仪前镜组成像在其共轭像面(Lyot 光阑)处成像,如图 11 所示。在 Lyot 星冕仪后添加成像镜组,使 CCD 能够接收到衍射光在 Lyot 光阑处所成的图像。图 12(a)中的亮条纹为模拟 Spider 结构衍射光所成像,该像可以被 Lyot 光阑的十字遮拦结构遮拦,不会在系统中继续传播;由图 12(b)可以看出, Lyot 光阑能够完全遮挡模拟 Spider 结构衍射光产生的衍射光。

在暗室中使用光源照射模拟 PAST,在光源前放置 6×10^{-5} 衰减片,摘除 Lyot 星冕仪内掩体,直接对模拟光源成像,拍摄模拟光源图像^[13],

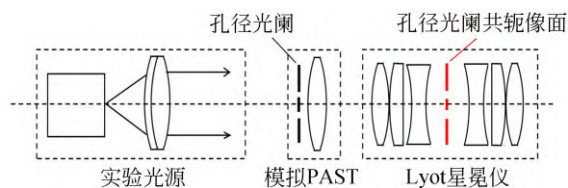


图 11 孔径光阑成像位置

Fig. 11 Aperture stop imaging position

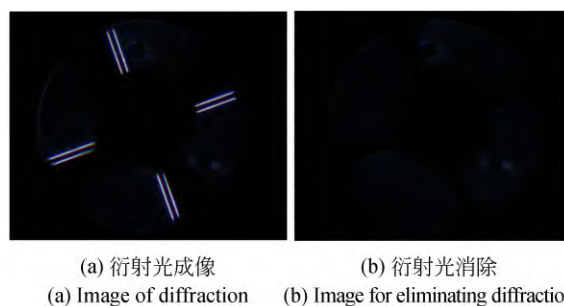


图 12 Lyot 光阑处 Spider 衍射光结果

Fig. 12 Experimental result of Spider diffraction on Lyot stop

如图 13(a)所示。安装 Lyot 星冕仪内掩体,模拟光源直射光被内掩体反射出主光路不再继续向前传播,模拟 PAST 孔径光阑所产生的衍射光被 Lyot 光阑抑制,此时到达 CCD 的光为剩余系统杂散光,采用同样的曝光时间拍摄此时的杂散光图像,如图 13(b)所示;通过程序读取模拟光源图

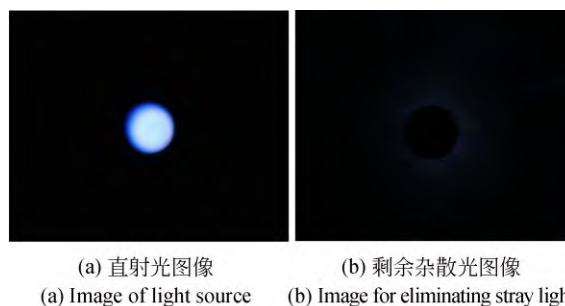


图 13 Lyot 星冕仪像面处杂散光

Fig. 13 Stray light on image plane of Lyot coronagraph

像灰度值和剩余杂散光图像灰度值,计算系统杂散光的抑制水平。

使用程序读取衰减后光源图像,计算灰度平均值,此平均值与杂散光图像灰度值相比,若灰度值量级相同,则系统杂散光抑制水平与衰减片衰减量级相同。图 14 为系统杂散光抑制水平散点图,整体抑制水平在 10^{-5} 量级,最大值为 4.72×10^{-5} ,平均值约为 1.94×10^{-5} ,满足系统要求。

6 结 论

本文设计了一种 Lyot 星冕仪,该 Lyot 星冕仪需要与 PAST 配合观测木卫一等离子环。Lyot 星冕仪的全视场多波段弥散斑尺寸均小于 $13.5 \mu\text{m}$ (探测器像元尺寸),全视场多波段 MTF 均大于 0.6,成像良好。使用不同窄带滤光片控

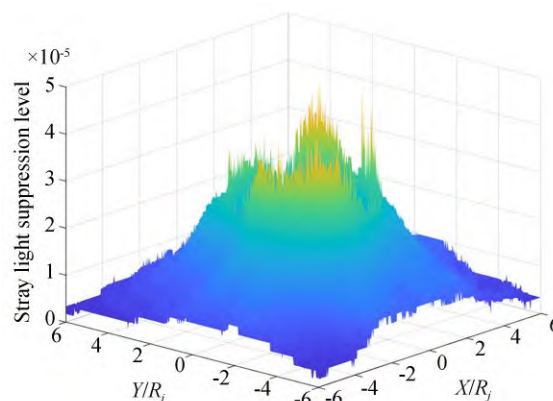


图 14 PAST 系统杂散光抑制水平

Fig. 14 Stray light suppression level of PAST system

制光谱波段,实现多波段(589,630,673.1 nm)成像。通过设计合适的杂散光抑制结构,使 Lyot 星冕仪杂散光抑制水平在 $2.5R_j$ 处为 10^{-5} 量级,满足地基观测要求。

参考文献:

- [1] 何飞. 行星空间环境光学遥感[J]. 科学通报, 2020, 65(14): 1305-1319.
HE F. Remote sensing of planetary space environment[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(14): 1305-1319. (in Chinese)
- [2] PHIPPS P H, WITHERS P, BUCCINO D R, *et al.* Two years of observations of the io plasma torus by Juno radio occultations: results from perijoves 1 to 15[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, 126(3): 2020JA028710.
- [3] 何飞, 尧中华, 魏勇. 冷湖行星光学遥感发展与展望[J]. 地球与行星物理论评, 2021, 52(4): 361-372.
HE F, YAO ZH H, WEI Y. Development and prospect of planetary optical remote sensing at Lenghu[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2021, 52(4): 361-372. (in Chinese)
- [4] SCHNEIDER N M, TRAUGER J T. The structure of the io torus[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 1995, 450: 450.
- [5] MENG Q, HE F, ZHAO W, *et al.* The overview of the planetary atmospheric spectral telescope (past) in the scientific experimental system in near-space (sense)[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2019, XLII-2/W13: 1419-1423.
- [6] 卜和阳, 卢振武, 张红鑫, 等. 内掩式透射地基日冕仪中杂光鬼像的消除[J]. 中国光学, 2013, 6(2): 231-236.
BU H Y, LU ZH W, ZHANG H X, *et al.* Suppression of stray light ghost image in internally occulting refractive ground-based coronagraph [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(2): 231-236. (in Chinese)
- [7] 王蕴琦, 张广, 何玲平, 等. Lyman α 与可见光双波段内掩式日冕仪[J]. 光学精密工程, 2020, 28(2): 303-314.
WANG Y Q, ZHANG G, HE L P, *et al.* Solar coronagraph imager based on internal occulting in Lyman-alpha and visible bands[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(2): 303-314. (in Chinese)
- [8] HAWKES P W. *Advances in Imaging and Electron Physics*[M]. Amsterdam: Elsevier, 2011.
- [9] 张红鑫, 卢振武, 夏利东, 等. 白光日冕仪光学系统的杂散光抑制[J]. 光学精密工程, 2009, 17(10): 2371-2376.
ZHANG H X, LU ZH W, XIA L D, *et al.* Stray light suppressing of optical system in white light co-

- ronagraph [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17 (10): 2371-2376. (in Chinese)
- [10] 袁鸿昌, 张红鑫, 孙明哲. 内掩式日冕仪衍射杂散光抑制方法[J]. 中国科学(技术科学), 2019, 49(11): 1343-1349.
- YUAN H CH, ZHANG H X, SUN M ZH. Suppression of diffraction stray light in the inner-occulted coronagraph [J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2019, 49(11): 1343-1349. (in Chinese)
- [11] 白先勇, 王怡然, 张志勇, 等. 利用乳白玻璃测量日冕仪平场的方法[J]. 光学学报, 2017, 37(5): 303-309.
- BAI X Y, WANG Y R, ZHANG ZH Y, *et al.* Flat-field measurement method of coronagraph with opal glass[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37 (5): 303-309. (in Chinese)
- [12] FEST E C. *Stray Light Analysis and Control*[M] SPIE Digital Library, 2013.
- [13] 袁鸿昌. 内掩式日冕仪杂散光分析与抑制[D]. 北京: 中国科学院物理研究所, 2019.
- YUAN H CH. *Analysis and Suppression of the Stray Light in the Inner-occulted Coronagraph* [D]. Beijing: Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)

作者简介:



迟金鹏(1996—),男,山东青岛人,硕士研究生,2018年于鲁东大学获得学士学位,主要从事杂散光分析等方面的研究。E-mail: 15563827187@163.com

通讯作者:



张红鑫(1978—),男,河北邯郸人,研究员,博士生导师,主要从事光学设计、光学系统杂散光分析与抑制、日冕仪等方面的研究。E-mail: firsthongxin@163.com