



内掩式日冕仪衍射杂散光抑制方法

袁鸿昌^{1,2}, 张红鑫^{1*}, 孙明哲³

1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 山东大学(威海)空间科学研究院, 威海 264209

* E-mail: firsthongxin@163.com

收稿日期: 2018-11-10; 接受日期: 2019-03-14; 网络版发表日期: 2019-11-08

国家自然科学基金(批准号: 41627806)和山东省光学天文与日地空间环境重点实验室开放课题(编号: KLWH201811)资助项目

摘要 日冕仪是一种对太阳大气层进行观测的望远镜系统, 衍射杂光是系统中除太阳辐射之外最强的杂散光源, 必须对其进行有效抑制。本文针对一台内掩式日冕仪, 结合光线追迹和Gabor变换两种方式模拟衍射杂光在系统内的传输特性, 得到衍射杂光的聚焦平面及其光强分布, 并由此确定Lyot光阑的过遮拦比例为6%。在千级洁净暗室内, 利用模拟太阳光源对Lyot光阑安装前后系统的杂散光水平进行检测。实验结果表明, 该Lyot光阑安装后像面上的杂光强度下降约2个数量级, 衍射杂光得到有效抑制。衍射杂光消除之后, 日冕仪的观测能力将得到显著提高。

关键词 内掩式日冕仪, 衍射杂光, Lyot光阑, Gabor变换

1 引言

日冕是环绕太阳周围的高温等离子体, 属于太阳的外层大气。日冕在可见光波段内的辐射不足太阳光球层的 $1/10^6$ ^[1], 但日冕观测对于全面理解太阳活动至关重要, 如太阳爆发的机制、早期太阳风的演化等^[2,3]。同时, 对日冕的监测还可以应用于空间灾害天气的预警预报^[4], 避免太阳活动对飞行器运行、卫星导航、电力传输等产生有害影响。

日冕仪通过在光学系统中添加诸多遮光结构, 消除太阳直射光和其他各级杂散光^[5,6], 从而可在强背景下探测到来自日冕的微弱信号。自1930年第一台地基日冕仪发明以来, 其观测波段、视场范围、空间/时间

分辨率等参数不断提高; 此外, 一些太阳观测卫星如STEREO^[7,8]和SOHO^[9]上也均搭载有日冕仪, 可在太空中对日冕成像。目前, 一些科研机构仍有新的地基和空间日冕仪研制计划, 如美国高山天文台Large Coronagraph^[10]、欧洲航空局ASPIICS^[11]等。我国“子午工程”二期目前也计划加入一台“光谱成像日冕仪”, 对日冕低温谱线进行观测, 来完善空间环境地基综合监测子午链。

日冕仪物镜光阑受太阳光直接照射, 其有限孔径引起的衍射杂光较强, 足以淹没日冕信号。通常可在物镜光阑的一次像面处添加Lyot光阑对其进行遮挡, 国际上同类型仪器的相关文献[12]中阐述过一些Lyot光阑的设计经验, 但并未就其过程和依据做出详细说

引用格式: 袁鸿昌, 张红鑫, 孙明哲. 内掩式日冕仪衍射杂散光抑制方法. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 1343–1349

Yuan H C, Zhang H X, Sun M Z. Suppression of diffraction stray light in the inner-occulted coronagraph (in Chinese). Sci Sin Tech, 2019, 49: 1343–1349, doi: 10.1360/N092018-00376

明。本文针对一台地基内掩式日冕仪进行了衍射杂光抑制方法的研究, 结合几何光线追迹和Gabor变换两种方法, 模拟得到衍射杂光的聚焦位置及其光强分布, 并据此进行Lyot光阑的参数设计; 随后在千级超净间内, 利用模拟太阳光源对日冕仪系统衍射杂光进行检测, 实验结果证明该Lyot光阑可对衍射杂光进行有效抑制。所用日冕仪的物镜口径为70 mm, F 数为17, 视场为 $(1.05\sim 1.5)R_{\odot}$ (R_{\odot} 表示太阳半径), 角分辨率为 $3.75''$, 对日冕中Fe XIV离子发射线(530.3 nm)进行谱线成像。

2 内掩式日冕仪工作原理

图1为内掩式日冕仪的工作原理图^[13]。其中, 内掩体 D_1 为表面抛光的金属圆锥, 太阳直射光经过物镜 O_1 后会聚在 D_1 上并被反射出成像光路; O_1 前后表面二次反射引起鬼像杂光, 经场镜 O_2 聚焦后被Lyot光阑 D_2 所吸收; 物镜光阑 A_1 的边缘会引起强烈的一次衍射杂光, 经 O_1 和 O_2 聚焦后, 被Lyot光阑 A_3 所遮挡; 同时 D_1 受一次衍射杂光的照射, 其边缘会引起二次衍射现象, 并在像面处形成一亮环, 可在该处利用挡板对其进行遮挡。而日冕被 O_1 成像在 D_1 和视场光阑 A_2 之间, 随后通过准直镜组 O_3 和可调谐滤光器 F , 最终被成像镜组 O_4 成像在CCD上。此外, A_1 衍射杂光也会照亮 A_2 边缘, 产生二次衍射过程(同理, A_3 会产生三次衍射); 但这部分杂散光在像面处的强度较低, 可忽略不计。

3 衍射杂光的形成机制与抑制方法

3.1 衍射杂光形成机制

由于日冕仪物镜存在倍率色差, 内掩体的尺寸需比工作波长(530.3 nm)处的太阳像稍大, 即形成“过遮拦”; 本日冕仪指标要求的内视场为 $1.05R_{\odot}$, 故内掩体最大过遮拦比例为5%。同时由于衍射效应, 有限口径物镜所成的太阳像实际上由无数艾里斑叠加而成, 其

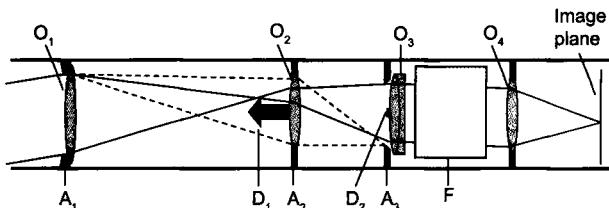


图 1 内掩式日冕仪工作原理

Figure 1 Working principle of inner-occulted coronagraph.

强度分布存在一定弥散; 即便采用了过遮拦设计, 仍有部分太阳光能量可超出内掩体遮拦范围, 形成所谓“衍射杂光”。艾里斑的强度随着到中心距离的增加而急剧下降, 因此衍射杂光的主要贡献来自边缘视场的太阳像, 其对应入射角为 $\pm 16'$ 。

在ASAP软件中建立物镜及其光阑模型, 模拟得到以 $\pm 16'$ 入射的平行光经物镜所成的艾里斑, 其强度分布如图2所示。日冕观测所用双折射滤光器的带宽只有 $0.12 \text{ nm}^{[14]}$, 故此处仅模拟了530.3 nm的入射光。

图2中横坐标为物镜焦平面上距光轴的距离, 纵坐标为对数归一化光强。由图2可知, 该艾里斑的中心位于 $y=4.55 \text{ mm}$ 处, 此即物镜所成的太阳像的半径; 根据5%的过遮拦比例, 可确定内掩体的半径为 $r=4.78 \text{ mm}$, 如图中竖线所示。可以看出, 该艾里斑在内掩体遮拦范围之外的光强为其中心光强的 10^{-6} 量级, 与该区域内日冕信号的强度相当。为了提高探测信噪比, 必须对这部分衍射杂光进行抑制。

3.2 衍射杂光抑制方法

根据边界波理论^[15], 此衍射杂光可认为是物镜光阑边缘产生的子波光束, 其经过物镜和场镜后重新会聚, 并在物镜光阑的一次像面处形成一亮环。利用Lyot光阑对该亮环进行遮挡即可有效抑制衍射杂光。

首先在物镜光阑边缘一侧设置点光源模拟该衍射光束, 通过光线追迹得到衍射杂光在日冕仪系统内的传播路径, 并由此确定其聚焦平面, 即Lyot光阑的设计位置。过程如图3所示。

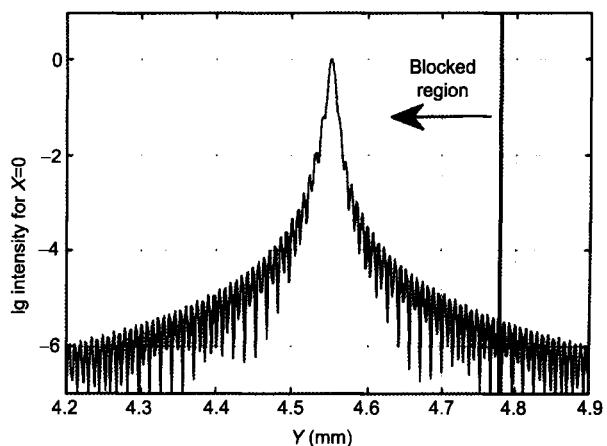


图 2 (网络版彩图)艾里斑归一化强度沿径向的分布

Figure 2 (Color online) Normalized intensity distribution of the Airy disk along radius.

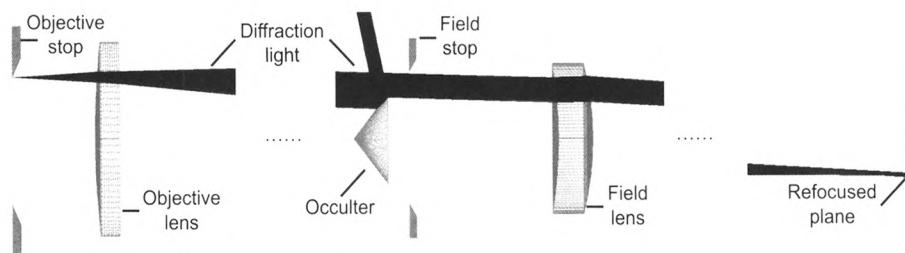


图 3 (网络版彩图)光线追迹法确定 Lyot 光阑位置

Figure 3 (Color online) Location of the Lyot stop determined by ray tracing.

该方法计算出衍射杂光的聚焦平面位于场镜后 89.9 mm。但同时由图3可知,此光束的传播路径被内掩体和视场光阑所限制,会再次受到衍射效应的影响,其聚焦后的强度在空间上存在一定起伏,仅由光线追迹无法得到其精确分布;为了确定Lyot光阑的合理通光口径,需对该处衍射光强的精确分布有所了解。为此,可在ASAP软件中模拟上述二次衍射过程,方法如下:

(1) 利用物镜光阑对入射平行光进行截取,并通过 Gabor 变换将截取后的光场分解为高斯光束阵列^[16];

(2) 将各高斯光束在系统中传播,并在物镜的后焦面处进行相干叠加,形成一艾里斑;

(3) 利用内掩体和视场光阑对此艾里斑的光场进行截取,并重新分解为新的高斯光束阵列;

(4) 继续将各光束向前传播至 Lyot 光阑所在平面,进行相干叠加并计算出该处的光强分布。

其中,步骤(1)和(3)对光场进行截取的过程引入了相应衍射效应。将步骤(4)所得结果进行归一化并取对数,得到如图4所示光强分布。图4中强度分布的图案为一段圆弧,这是由于此时仅模拟了以+16'入射的平行光;当考虑所有可能方向的入射光时,该图案将扩展为一个完整的环。图5进一步给出了此段圆弧沿Y轴的强度分布。

由图5可知,衍射杂光的强度在 $y_1 = -6.33 \text{ mm}$ 处达到最大,此即该圆弧的半径;在 $y_2 = -5.95 \text{ mm}$ 处强度下降到最大值的1%,以此为标准,可将Lyot光阑的通光口径设置为

$$D = 2 \times |y_2| = 11.9 \text{ mm.} \quad (1)$$

可以预期,此时绝大部分衍射杂光的能量都将被 Lyot 光阑所遮挡。同时 Lyot 光阑也成为日冕仪系统的孔径光阑;与内掩体类似,可定义其过遮拦比例为

$$\alpha = \frac{y_1 - y_2}{y_1} = 6.0\%. \quad (2)$$

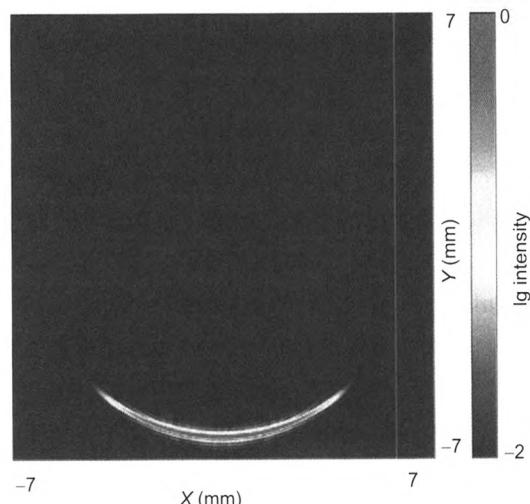


图 4 (网络版彩图)Lyot 光阑处衍射光强的模拟结果

Figure 4 (Color online) Simulated intensity of the diffraction light on the Lyot stop.

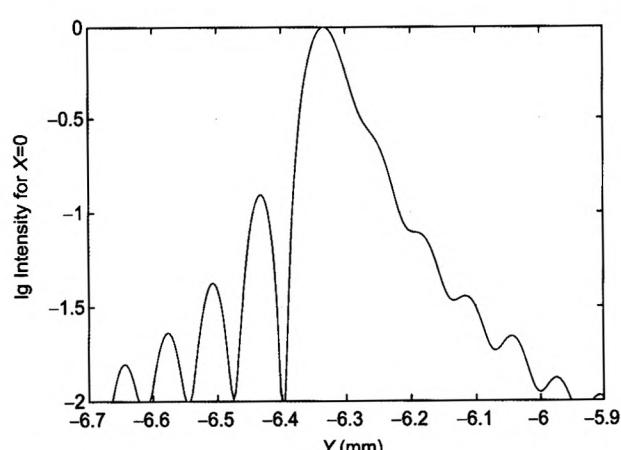


图 5 (网络版彩图)衍射光强沿 Y 轴的分布

Figure 5 (Color online) Intensity of the diffraction light along the Y axis.

4 实验检测

4.1 实验装置

日冕观测通常在高海拔地区、晴朗无云的天气条

件下进行。对低海拔地区, 若直接在室外以太阳为光源进行实验, 测得仪器杂散光强度会被大气背景噪声淹没^[17], 无法反映出日冕仪真实的杂散光抑制水平。因此, 我们选择在室内利用模拟太阳光源进行实验检测, 实验环境为千级洁净暗室以减少环境杂光影响。

图6为实验装置示意图。氙灯辐射的光谱分布与实际太阳光接近, 作为实验光源。其发出的光经聚光镜会聚, 透过位于准直镜前焦面处的焦面光阑, 随后被准直成不同角度的平行光出射; 出射光张角 ω 与该焦面光阑的直径 L 之间的关系为

$$\omega = 2\arctan\left(\frac{L}{2f_c}\right), \quad (3)$$

其中, f_c 为准直镜焦距, 此处为1600 mm。根据式(3), 为使 ω 恰好等于太阳光实际张角($32'$), L 的大小为14.89 mm。此外, 为获得均匀的强度分布, 在氙灯和铝板之间放置乳白玻璃作为匀光器^[18]。模拟太阳光从准直镜出射后, 进入日冕仪系统并产生衍射杂光, 从而可对其进行实验检测。

4.2 衍射杂光聚焦位置及其光强分布

根据3.2节的分析, 衍射杂光将在场镜后会聚。在该处使用CMOS探测器对其进行接收, 并前后移动寻找其最佳聚焦位置, 其位于场镜后89.6 mm处, 与光线追迹法所得结果(场镜后89.9 mm)相符。图7为此位置处的光强分布。

从图7可以看出, 聚焦后的衍射杂光形成一亮环; 但由于所用探测器的有效感光面积较小($8.50 \text{ mm} \times 7.09 \text{ mm}$), 单次曝光仅能得到其部分图像。在亮环上3个不同区域内取其强度极大值点, 坐标分别为(434, 145), (1746, 683), (2277, 2015), 由此可计算出亮环半径对应的像元个数为1826; 同时像元的边长为 $3.45 \mu\text{m}$, 故亮环实际半径为6.30 mm, 与Gabor变换法所得结果(6.33 mm)相符。经分析, 二者之间的误差主

要因实验所用滤光片中心波长(532 nm)与模拟波长(530 nm)不一致引起; 在ASAP软件中保持其他条件不变, 仅将波长更改为532 nm后, 所得模拟结果与实验结果更加接近。

该实验结果证明: 日冕仪系统中衍射杂光的聚焦平面可由光线追迹法给出, 进一步结合Gabor变换可得到该平面处的衍射光强分布, 从而最终确定Lyot光阑的合理设计参数。

4.3 Lyot光阑衍射衰减系数

通常使用衍射衰减系数 R 来评判Lyot光阑对衍射杂光的抑制效果^[19], 其定义为Lyot光阑安装后与安装前日冕仪最终像面上的杂光强度之比。

首先按图1所示搭建日冕仪光路, 记录像面处的杂光强度; 其中, Lyot光阑的实际通光口径经过测量为11.94 mm, 比3.2节中的设计口径(11.9 mm)稍大, 其对应实际过遮拦比例为5.69%。然后将Lyot光阑移除, 并再次记录像面处的杂光强度; 此时为避免衍射杂光能量太高造成过度曝光, 需在中继镜组O₄前安装中性密度滤光片(ND), 其透过率为10%。两次测量在相同的曝光设置及光照条件下进行。图8为两次测量直接所得结果(未考虑ND的衰减效果)。以图8(a)为例, 中心暗圆为内掩体遮拦所形成的阴影区域, 周围明亮的环带则对应日冕仪有效视场。可以看出, Lyot光阑安装前, 衍射杂光充满了大部分视场, 且其强度由内向外逐渐降低; 而Lyot光阑安装后, 衍射杂光的强度明显降低, 仅在内掩体边缘存在由其二次衍射所形成的亮环。

将图8(a)和(b)中对应位置处的光强相除, 并乘以ND的透过率, 便得到Lyot光阑的衍射光衰减系数 R 。图9给出了 R 值随视场的变化曲线。

图9横坐标为视场, 单位为太阳半径(R_\odot)。日冕仪内视场处($1.05R_\odot$)的 R 值较高, 为8.13%, 这是由于图8(b)中内掩体边缘存在二次衍射亮环; 在

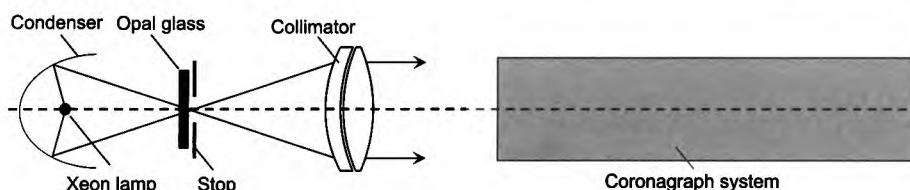


图 6 实验装置示意图

Figure 6 Schematic diagram of experimental set-up.

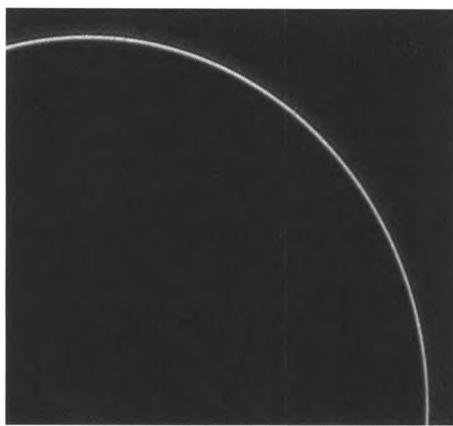


图 7 Lyot光阑处衍射光强的实验结果

Figure 7 Experimental result of the intensity of diffraction light on the Lyot stop.

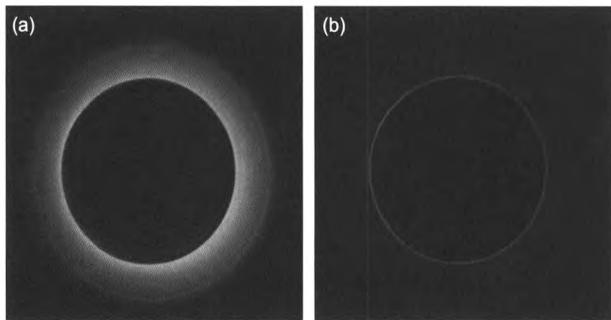


图 8 (网络版彩图)日冕仪像面处的杂光强度. (a) 无Lyot光阑, 有衰减片; (b) 有Lyot光阑

Figure 8 (Color online) Intensity of the stray light on the image plane of the coronagraph. (a) Before the installation of the Lyot stop; (b) after the installation of the Lyot stop.

(1.1~1.4) R_{\odot} 视场内, R 值稳定在1%左右; 在1.4 R_{\odot} 到日冕仪外视场之间, 图8(a)中衍射杂光的强度开始下降, 故 R 值又逐渐上升至3.46%。

该实验结果表明, Lyot光阑过遮拦比例为5.69%时, 能对该日冕仪系统中的衍射杂光进行有效抑制, 使像面处的杂光强度整体下降约2个数量级; 若过遮拦比例按3.2节中设计为6%, 其对衍射杂光的抑制效果将进一步提高。此时, 内掩体引起的二次衍射亮环强度较高, 可达直射光的 10^{-5} 量级, 但由于该亮环仅分

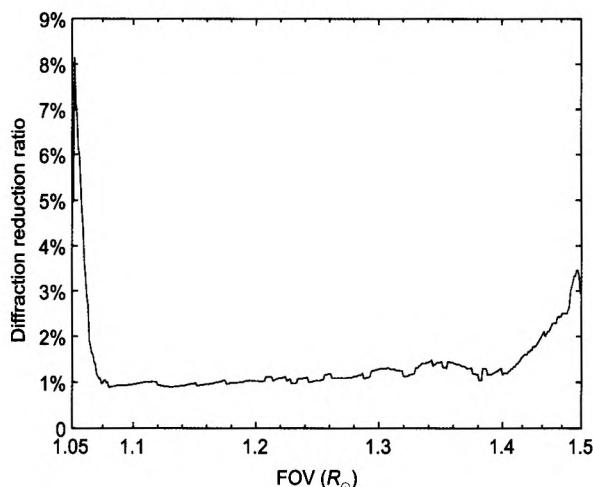


图 9 (网络版彩图)不同视场处的衍射衰减系数

Figure 9 (Color online) Diffraction reduction ratio at different field-of-view.

布在内掩体边缘, 不会扩散到其他视场内, 故可以忽略其影响。其他视场内的剩余杂光主要由物镜表面散射引起, 可通过磁流变精密抛光^[20]、仔细清洁等方式降低其影响, 进一步提高日冕观测的信噪比。

5 结论

日冕仪物镜光阑受太阳直接照射, 其边缘会产生强烈的衍射杂光, 必须对其进行抑制。本文结合几何光线追迹与Gabor变换两种方法, 模拟了日冕仪系统中衍射杂光的传播过程, 得到了其聚焦位置处衍射光强的精确分布, 并由此确定了Lyot光阑的设计参数, 其位于场镜后89.9 mm处, 通光口径为11.9 mm, 对应过遮拦比例为6%。随后在千级洁净暗室内, 利用模拟太阳光源对仪器实际杂散光进行了检测。实验结果证明: 上述模拟方法能够正确给出该日冕仪系统中衍射杂光的分布, 且Lyot光阑的设计参数合理, 像面处大部分视场内的衍射衰减系数可达1%左右。此时, 该日冕仪在实现对衍射杂光有效抑制的同时, 又能保证足够的通光口径。

参考文献

- Zhao H B, Lin Q S, Chen Y P, et al. Coronal structure and brightness profile of the total solar eclipse on August 1, 2008 (in Chinese). Chin Sci Bull, 2009, 54: 1790–1792 [赵海斌, 林启生, 陈一平, 等. 2008年8月1日日全食的日冕结构和亮度分布. 科学通报, 2009, 54: 1790–1792]
- Chen Y. A review of recent studies on coronal dynamics: Streamers, coronal mass ejections, and their interactions (in Chinese). Chin Sci Bull,

- 2013, 58: 1620–1650 [陈耀. 日冕动力学研究进展: 冕流、日冕物质抛射及其相互作用. 科学通报, 2013, 58: 1620–1650]
- 3 Habbal S R, Woo R, Fineschi S, et al. Origins of the slow and the ubiquitous fast solar wind. *Astrophys J*, 1997, 489: L103–L106
- 4 Wang S. Coronal mass ejections and space weather (in Chinese). *China Basic Sci*, 2000, 4: 14–17 [王水. 日冕物质抛射与空间天气学. 中国基础科学, 2000, 4: 14–17]
- 5 Sun M Z, Zhang H X, Lu Z W, et al. Stray light suppression of the large field of view coronagraph optical system (in Chinese). *Laser Optoelectr Prog*, 2014, 51: 052203 [孙明哲, 张红鑫, 卢振武, 等. 大视场日冕仪光学系统杂散光抑制. 激光与光电子学进展, 2014, 51: 052203]
- 6 Zhang H X, Lu Z W, Xia L D, et al. Stray light suppressing of optical system in white light coronagraph (in Chinese). *Opt Precis Eng*, 2009, 17: 2371–2376 [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. 光学精密工程, 2009, 17: 2371–2376]
- 7 Howard R A, Moses J D, Vourlidas A, et al. Sun Earth connection coronal and heliospheric investigation (SECCHI). *Space Sci Rev*, 2008, 136: 67–115
- 8 Zhang X F, Liu Y, Shen Y D, et al. Progress in the observation of coronal mass ejections by STEREO (in Chinese). *Prog Astron*, 2012, 30: 159–171 [张雪飞, 刘煜, 申远灯, 等. STEREO卫星的CME观测研究进展. 天文学进展, 2012, 30: 159–171]
- 9 Brueckner G E, Howard R A, Koomen M J, et al. The large angle spectroscopic coronagraph (LASCO). *Sol Phys*, 1995, 162: 357–402
- 10 Gallagher D, Tomczyk S, Zhang H, et al. Optical design of the COSMO large coronagraph. In: *Ground-based and Airborne Telescopes IV*. International Society for Optics and Photonics. Amsterdam, 2012. 173–181
- 11 Damé L, Vivès S. ASPIICS: A giant coronagraph for the ESA/PROBA-3 Formation Flying Mission. In: *Proceedings Volume 7731, Space Telescopes and Instrumentation 2010: Optical, Infrared, and Millimeter Wave*. San Diego, 2010. 52–56
- 12 Tomczyk S, Nelson P G, Gallagher D. Stray light and polarimetry considerations for the COSMO K-Coronagraph. In: *Proceedings Volume 8444, Ground-based and Airborne Telescopes IV*. Amsterdam, 2012. 173–181
- 13 Bu H Y, Lu Z W, Zhang H X, et al. Suppresion of stray light ghost image in internally occulting refractive ground-based coronagraph (in Chinese). *Chin Opt*, 2013, 6: 231–236 [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. 中国光学, 2013, 6: 231–236]
- 14 Ichimoto K, Noguchi M, Tanaka N, et al. A new imaging system of the corona at Norikura. *Publ Astron Soc Jpn*, 1999, 51: 383–391
- 15 Rubinowicz A. The Miyamoto-Wolf diffraction wave. *Frog Opt*, 1965, 4: 199–240
- 16 Einziger P D, Raz S, Shapira M. Gabor representation and aperture theory. *J Opt Soc Am A*, 1986, 3: 508–522
- 17 Liu N P, Liu Y, Shen Y D, et al. Measurement of sky brightness and suppression of scattering in sky brightness monitor (in Chinese). *Acta Astronom Sin*, 2011, 52: 160–170 [刘念平, 刘煜, 申远灯, 等. 日晕测量与日晕光度计外缘杂散光抑制试验. 天文学报, 2011, 52: 160–170]
- 18 Bai X Y, Wang Y R, Zhang Z Y, et al. Flat-field measurement method of coronagraph with opal glass (in Chinese). *Acta Opt Sin*, 2017, 37: 523002 [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. 光学学报, 2017, 37: 523002]
- 19 Noll R J. Reduction of diffraction of use of a Lyot stop. *J Opt Soc Am*, 1973, 63: 1399–1402
- 20 Shi F, Dai Y F, Peng X Q, et al. Removal of subsurface damage in grinding by magnetorheological finishing (in Chinese). *Opt Precis Eng*, 2010, 18: 162–168 [石峰, 戴一帆, 彭小强, 等. 磁流变抛光消除磨削亚表面损伤层新工艺. 光学精密工程, 2010, 18: 162–168]

Suppression of diffraction stray light in the inner-occulted coronagraph

YUAN HongChang^{1,2}, ZHANG HongXin¹ & SUN MingZhe³

¹*Opto-Electronics Technology Center, 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;*

³*Institute of Space Sciences, Shandong University, Weihai 264209, China*

The coronagraph is a telescope system for the purpose of observing the solar atmosphere. Diffraction light is the strongest source of stray light apart from the solar radiation in this system and need to be suppressed effectively. The propagation of the diffraction light in an inner-occulted coronagraph is simulated by the methods of ray tracing and Gabor transformation. The focus position and the intensity distribution of the diffraction light are obtained. The over-occulting ratio of the Lyot stop is then decided to be 6% based on the simulation results. The level of stray light in the system is measured with a sun simulator in a class 1000 cleanroom before and after the installation of the Lyot stop. Experimental result shows that the diffraction light can be suppressed effectively after the Lyot stop is applied, and the total intensity of the stray light in the final image plane is reduced by about 2 orders of magnitude. The observation capability of the coronagraph will be significantly improved after the diffraction light is eliminated.

inner-occulted coronagraph, diffraction stray light, Lyot stop, Gabor transformation

doi: 10.1360/N092018-00376