

引用格式: HUANG Yupeng, ZHANG Hongxin, DING Yue, et al. Determination and Experimental Study of Three Kinds of Stray Light in the Coronagraph System[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(11):1122003
黄玉鹏,张红鑫,丁悦,等. 日冕仪系统中三种杂散光的判定与实验研究[J].光子学报,2023,52(11):1122003

日冕仪系统中三种杂散光的判定与实验研究

黄玉鹏^{1,2},张红鑫¹,丁悦^{1,2},王泰升¹

(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)

摘要:针对日冕仪中对杂散光的抑制要求,分析了日冕仪系统中的三种杂散光,包括日冕仪物镜二次反射产生的鬼像点、日冕仪物镜散射点、以及日冕仪孔径光阑衍射光。利用光学建模软件对日冕仪系统进行仿真和分析,发现这三种杂散光的成像位置十分接近且不易区分,并会对系统的检测过程和检测结果产生干扰。根据仿真结果,给出了这三种杂散光的判定与抑制方法,并利用一台视场为 $\pm 1.08 R_{\odot} \sim \pm 2.5 R_{\odot}$ (R_{\odot} 表示太阳半径),工作波段为 530.3~637.4 nm,通光口径为 220 mm,系统总长为 4 321 mm 的内掩式日冕仪进行了理论验证和实验对比,验证了判定方法的可行性。同时设计了掩体和鬼像遮拦结构对杂散光进行抑制,增加了日冕仪系统杂散光抑制的选择方案,提升了日冕仪杂散光检测的准确率。

关键词:内掩式日冕仪;杂散光检测;光线追迹;鬼像;散射光;杂散光判定

中图分类号:O439

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20235211.1122003

0 引言

日冕仪的观测目标为日冕,在可见光波段,日冕的亮度相对于太阳光球层亮度而言极其微弱,内冕的亮度约为 $10^{-6} B_{\odot}$ (B_{\odot} 表示日面中心亮度),距离日面 $2 R_{\odot}$ (R_{\odot} 表示太阳半径)的外冕亮度则降到 $10^{-9} B_{\odot}$ 。考虑到地球大气的散射作用,在海平面处的日间天空背景亮度约为 $10^{-2} B_{\odot} \sim 10^{-3} B_{\odot}$ [1-5],所以在地面上观察的日冕光将被太阳光球层的光及地球大气的散射光所淹没,只有在日全食期间才能观测到几个太阳半径甚至更远处的日冕。日冕仪是通过仪器的遮拦结构人为造成类似日全食影像的成像仪器,其需要在干扰光线极强的状态下观察暗目标,所以对杂散光的抑制有极高的要求 [6-8]。国内日冕仪的研究起步较晚,技术条件也有限,目前的研制工作主要还是在国内的技术条件基础上遵循国外成功的研制案例进行。国外对日冕仪杂光抑制的主要方法是对杂光光源进行二次成像甚至二次以上的成像后,在二次及高次像面进行单级或多级共轭遮拦。

为了测试日冕仪系统的杂散光抑制水平和成像质量,需要在实际应用前期对日冕仪系统进行实验室检测。在日冕仪系统检测和应用过程中存在着多种由于光学系统原因所产生的并且不可避免的杂散光来源,主要包括:1)由于物镜孔径光阑产生的衍射光;2)日冕仪物镜二次反射产生的鬼像点;3)日冕仪物镜表面脏点或瑕疵引入的散射光线等。本文针对以上几种日冕仪系统检测和应用过程中存在的杂散光,通过软件对其进行建模,分析了这几种杂散光的特点,分别给出判定与抑制方法,并通过实验进行可行性验证,从而提高日冕仪杂散光抑制水平和系统检测效率。

1 日冕仪检测实验装置

日冕仪检测实验原理如图 1 所示,日冕仪与平行光管共轴放置,左侧虚线框内的装置用来模拟来自极远

基金项目:国家自然科学基金(No. 41627806)

第一作者:黄玉鹏,ucas_hyp@163.com

通讯作者:张红鑫,firsthongxin@163.com

收稿日期:2023-03-13;录用日期:2023-04-18

<http://www.photon.ac.cn>

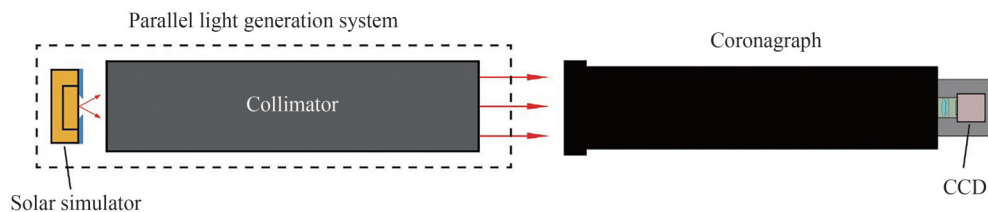


图1 日冕仪成像检测实验原理
Fig. 1 Experimental principle of coronagraph imaging detection

位置的太阳平行光,太阳模拟光源置于平行光管的焦面中心,其发出的光经过平行光管后转换为平行光射出,日冕仪系统接收这部分光,并最终通过CCD相机对模拟太阳目标及日冕目标成像。

太阳光球直射光是进入日冕仪系统中的最强杂光光源,也是日冕仪系统杂光抑制的首要问题。根据对太阳直射光的抑制方法不同,通常将日冕仪分为内掩式和外掩式。将太阳光视为从无穷远处发射的平行光束,其经过物镜后在物镜焦面处会聚,并在焦面位置处使用掩体进行遮拦,此为内掩式日冕仪。其系统基本结构及工作原理如图2所示, A_0 为日冕仪前端消杂光光阑部分, A_1 为物镜入口孔径光阑, A_2 为视场光阑, A_3 为中继镜组入射口径光阑; O_1 为系统物镜, O_2 为场镜组, O_3 为中继镜组, O_2 和 O_3 组成了日冕仪的二次成像系统; D_1 为内掩体,是为了将太阳直射光导出光路^[9-12], D_2 为Lyot斑,作用是吸收来自物镜的鬼像点; P 为CCD像面。来自太阳的光线首先经过前端消杂光光阑部分,主要作用为拦截视场外的杂散光源,如地球大气的部分散射光线等,随后由物镜 O_1 在内掩体 D_1 位置处成像,内掩体的尺寸根据物镜焦距及内视场遮拦的情况等确定,用来将太阳直射光反射出光路,随后经过由 O_2 和 O_3 组成的系统成像在最终像面位置处。实际应用时,常常设置多次成像,用来满足不同的要求。

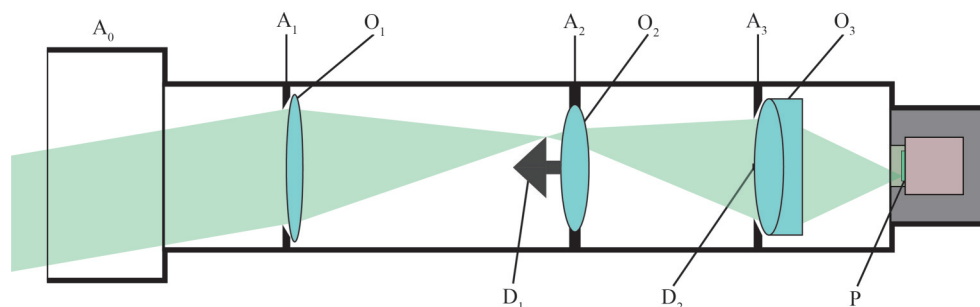


图2 内掩式日冕仪工作原理(绿色部分表示太阳边缘日冕光线路径)
Fig. 2 Working principle of inner-occulted coronagraph (the green part shows the sun's corona light path)

2 日冕仪杂散光模拟分析

为了分析日冕仪各类杂散光的产生机理和自身特点,使用光线追迹软件对日冕仪系统进行了模拟仿真,所构建的模型结构如图3所示, L_1 为日冕仪物镜; D_1 为内掩体; L_2 为场镜; L_3 为准直镜组,用于产生平行光

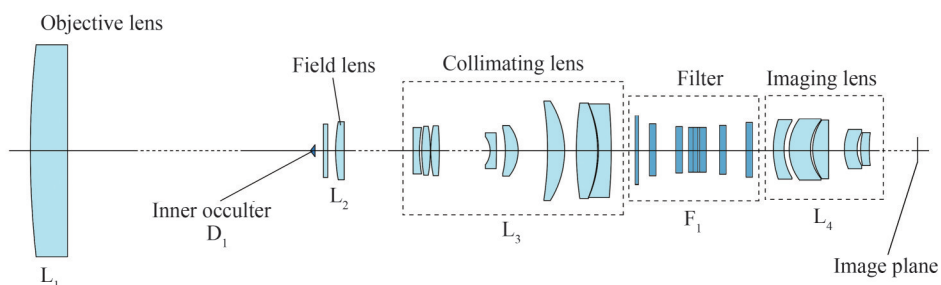


图3 日冕仪系统仿真结构(非等比例尺度)
Fig.3 Simulation architecture of coronagraph system (non-equal ratio scale)

供滤光器使用;滤光器 F_1 对成像波段进行窄带滤光; L_4 为成像镜组,用于最终像面的成像和调焦。针对日冕仪物镜孔径光阑衍射光、物镜二次反射产生的鬼像点,以及物镜散射光这三种杂散光进行建模分析。

2.1 物镜孔径光阑衍射光分析

日冕仪物镜受到太阳直射光照射时,物镜孔径光阑边缘被照亮,根据惠根斯原理,可将孔径光阑产生的衍射光看作孔径光阑边缘无数点光源的集合,对光阑衍射光常用的拦截方式为设置 Lyot 光阑,如图 4 中黑色虚线所示,孔径光阑产生的衍射光经过场镜组 O_2 后到达 Lyot 光阑 A_3 处并被其拦截,从而阻止衍射光到达像面,影响成像质量。

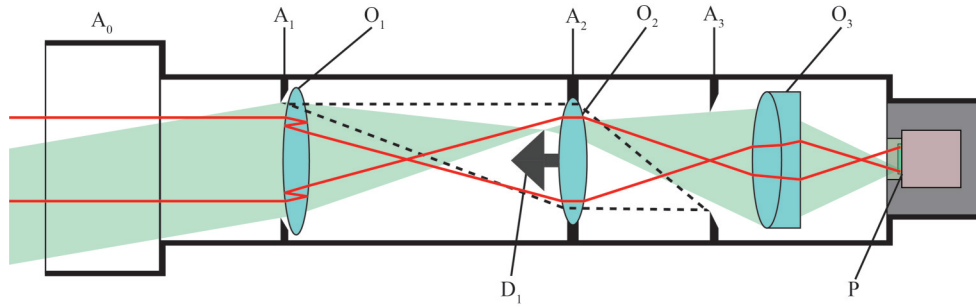


图4 物镜孔径光阑衍射光和二次反射鬼像点抑制原理

Fig.4 Suppression principle of the diffraction from the objective and the secondary reflection ghost point

利用几何光线追迹软件对衍射光进行分析,寻找 Lyot 光阑放置位置,如图 5 所示,在孔径光阑边缘位置处,放置一点光源,模拟被照亮后的光阑边缘。如图 6 所示,点光源发出的光线经过场镜后,首先会聚在 S_1 位置处,再经过准直镜组后在 S_2 位置处重新会聚。当光线满口径入射时,会在两个会聚位置处形成亮圆环,如不拦截此衍射亮环,衍射光线将会最终到达像面,并影响成像对比度。根据模拟结果,可在 S_1 或 S_2 位置处设置 Lyot 光阑进行拦截,考虑 S_2 位置为滤光器工作位置,故可选择在 S_1 位置处设置 Lyot 光阑。

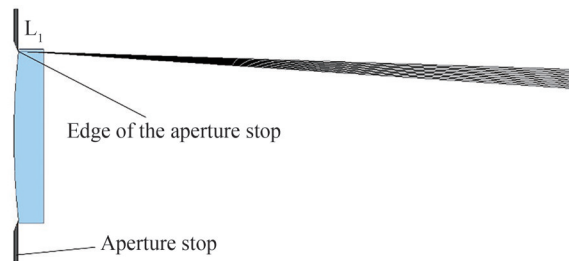


图5 孔径光阑衍射光模拟点光源放置位置

Fig.5 The position of the point source for simulating the aperture diffraction

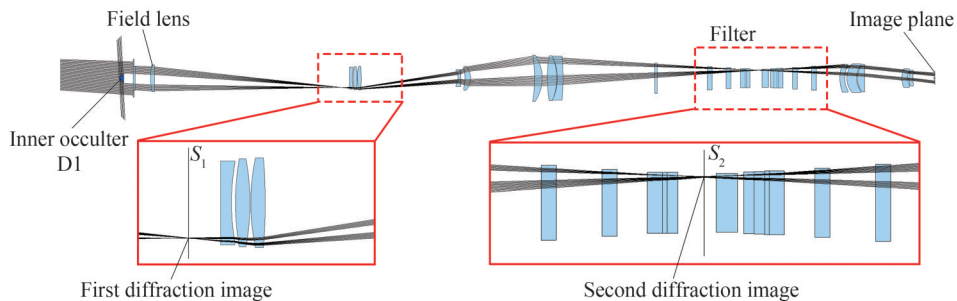


图6 模拟孔径光阑衍射光在光学系统内的传播路径

Fig.6 The propagation path of the simulated diffracted light in the optical system

2.2 二次反射鬼像点分析

2.2.1 鬼像形成机制

物镜 O_1 在太阳的直射光之下, 无法避免物镜自身表面的多次反射, 如图 7 所示, 这种在透镜内表面多次反射的太阳光会通过后继镜组形成鬼像^[13-15], 并在一定程度上照明像面。日冕仪物镜为了减小太阳直射光的散射, 通常会选择使用超光滑表面而无法进行增透处理, 此时如不对二次反射鬼像进行遮挡, 会显著降低像面上日冕像的对比度, 甚至湮没日冕图像。

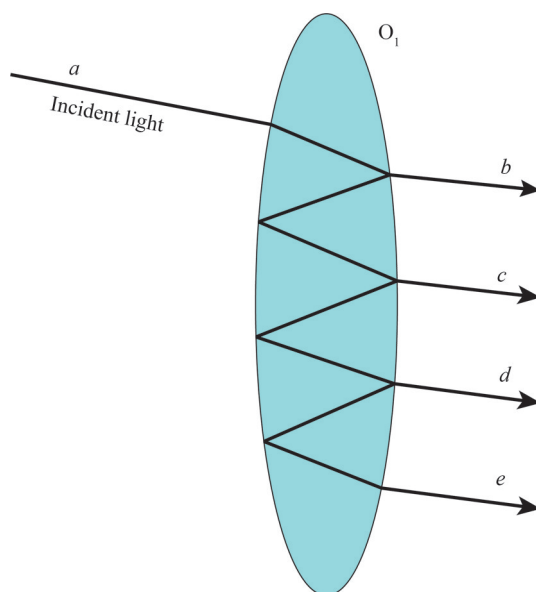


图 7 太阳光在物镜 O_1 内的多次反射示意图
Fig.7 Diagram of multiple reflection of sunlight in objective O_1

根据菲涅耳反射定律, 将物镜 O_1 两个表面的反射率 R 均设为 0.04, 透射率 T 设为 0.96。设入射光线 a 的光强度 I_a 为 1, 按照 O_1 两表面一致特性计算可得出射光线 c 、 d 、 e 的光强分别为

$$\begin{cases} I_c = T \times R^2 \times T \times I_a = 1.47 \times 10^{-3} \\ I_d = T \times R^4 \times T \times I_a = 2.40 \times 10^{-6} \\ I_e = T \times R^6 \times T \times I_a = 3.77 \times 10^{-9} \end{cases} \quad (1)$$

式中, I_c 、 I_d 和 I_e 分别为光线 c 、 d 和 e 的光强。由式(1)可见 I_c 的强度约为 I_d 的 10^3 倍, 约为 I_e 的 10^6 倍。 I_d 在物镜表面内反射的光强与日冕目标量级相当, 经过后端光学系统到达像面后, 强度将远远低于日冕目标, 所以 d 光和 e 光相对于 c 光对日冕探测的影响几乎可以忽略, 因此这里只考虑二次反射成像。

对二次反射光的抑制原理如图 4 中所示, 图中红色线为二次反射光的一条路径, 由物镜 O_1 产生的二次反射光线通过后续镜组重新会聚形成鬼像, 并最终照亮像面。常用的抑制方法为在鬼像点处使用 Lyot 斑进行遮挡, 若鬼像点位置恰好位于透镜表面, 也可直接在透镜表面镀 Lyot 斑吸收, 从而阻止其传播到像面上造成杂光干扰。此方法既有效降低了鬼像传播光强的量级也没有引入其他杂散光, 是日冕中杂散光抑制技术的核心之一。

2.2.2 鬼像模拟

利用几何光线追迹软件对鬼像位置进行模拟, 日冕仪物镜两个表面均设成反射率为 0.04, 透射率为 0.96 的物理参数指标。

首先分析零角度入射的平行光, 经过物镜后的光路如图 8 所示, 物镜 L_1 左侧光线为入射光和来自物镜表面的反射光, 透射光在物镜内表面发生二次反射后, 会先在物镜后一定距离的 S_1 位置处聚焦。再如图 9 所示, 二次反射光线经过场镜 L_2 后, 在准直镜组前端 S_2 位置以及滤光器镜组 S_3 位置处重新聚焦, 并最终在像面形成明亮照明面, 降低像面对比度。

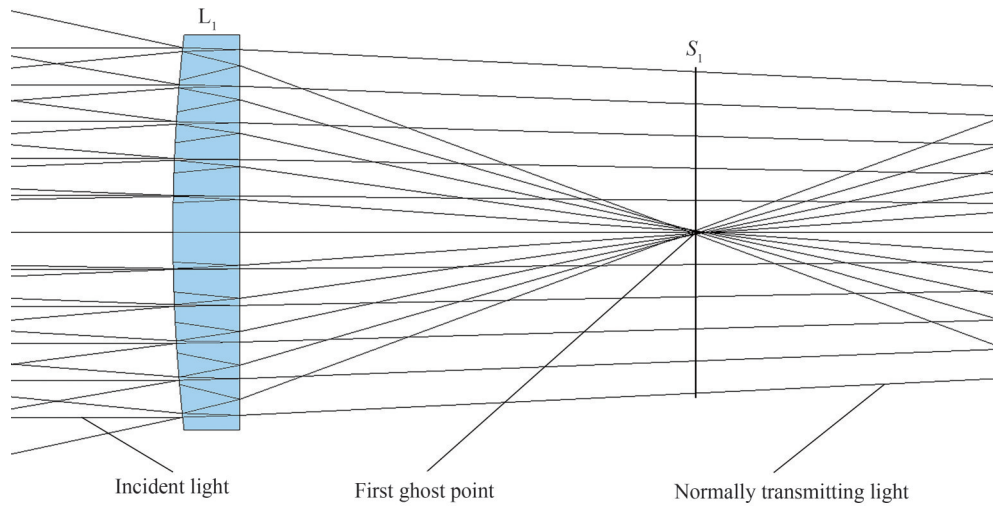


图8 物镜内表面二次反射光的第一像面与鬼像点

Fig.8 The first image plane and ghost point of the second reflection on the inner surface of the objective

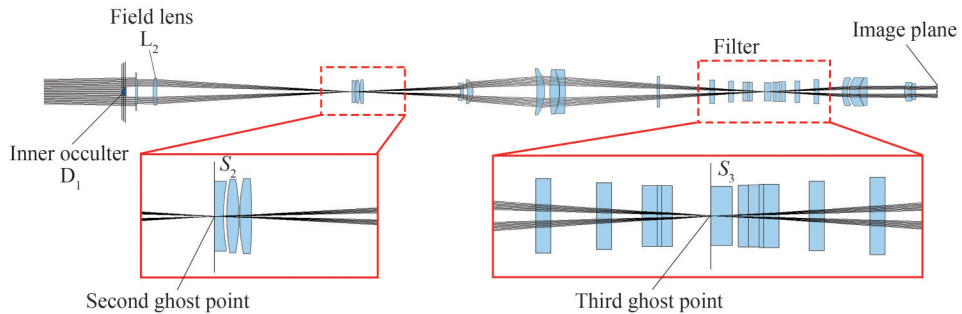


图9 鬼像位置及其对像面的影响示意图

Fig.9 Diagram of ghost location and its effect on the image plane

当入射光线非零角度入射时,鬼像点的位置与零角度入射时一致,但鬼像并不是一个理想的点,而是具有一定尺寸的弥散斑。根据鬼像的位置考虑有以下两种途径对其进行遮拦:1) S_2 位置与Lyot光阑位置接近,可在此位置处添加挡片进行拦截;2)在滤光器内 S_3 位置滤光片表面中心的一个小区域内镀吸收膜进行遮拦。但是第一种途径需要在Lyot光阑上添加挡片的支撑结构,这样又会引入支撑结构的衍射光,故实际应用中采用后一种方法较多,通常将用于遮挡此类鬼像的装置称作Lyot斑。

2.3 日冕仪物镜散射点

日冕仪物镜产生散射光的主要原因是日冕仪物镜表面缺陷及灰尘污染物,这类杂散光无法通过系统结构完全消除,通常的抑制方法为使用超光滑表面抛光技术并保持透镜表面清洁^[13]。散射光线虽无法完全消除,但是可以在检测过程中将这些散射光像点找到并判定归类,从而排除这些因素的干扰。

物镜表面的散射点在受到光源照射时会改变光线的路径,从而产生杂散光,如图10所示,通过在日冕仪物镜表面设置点光源来模拟物镜表面散射点。如图11所示,散射点光线通过场镜后首先成像在准直镜组前端 S_1 位置处,后经准直镜组后成像在 S_2 位置处。经过光线追迹,散射点成像位置与鬼像点十分接近,对像面也同样产生影响,如不进行遮拦,同样会在像面形成明亮照明面,降低像面的对比度。也正因为二者的成像性质相似,因此在检测过程中极易混淆,这就需要在实验中准确区分,从而采用不同的遮拦方式进行消除。

为了判定日冕仪物镜散射点形成的杂散光,可以旋转物镜,散射点会跟随物镜旋转到对应位置,符合几何光学原理,可以准确快速地将物镜表面散射点形成的杂散光判断出来。

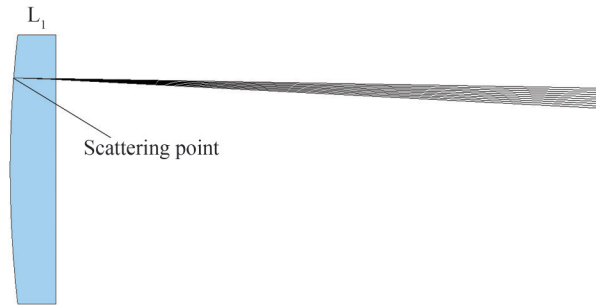


图10 日冕仪物镜散射点模拟示意图

Fig.10 Scattering point simulation diagram of coronagraph objective

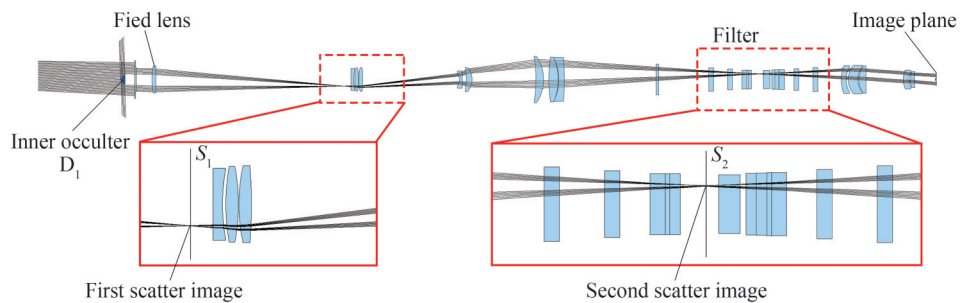


图11 日冕仪物镜散射点成像位置及其对像面影响示意图

Fig.11 Diagram of imaging position of scattering points in coronagraph objective and its effect on image plane

3 日冕仪检测实验

在千级超净环境下搭建了日冕仪检测平台,实验所用日冕仪实物如图12所示,该日冕仪的视场为 $\pm 1.08 R_{\odot} \sim \pm 2.5 R_{\odot}$,工作波段为530.3~637.4 nm,焦距为955 mm,系统总长为4 321 mm。所用相机的型号为Dhyana95 V2背照式sCMOS相机,其有效像素数为 $2\,048 \times 2\,048$,有效面积为 $22.5\text{ mm} \times 22.5\text{ mm}$,像元尺寸为 $11\ \mu\text{m} \times 11\ \mu\text{m}$ 。

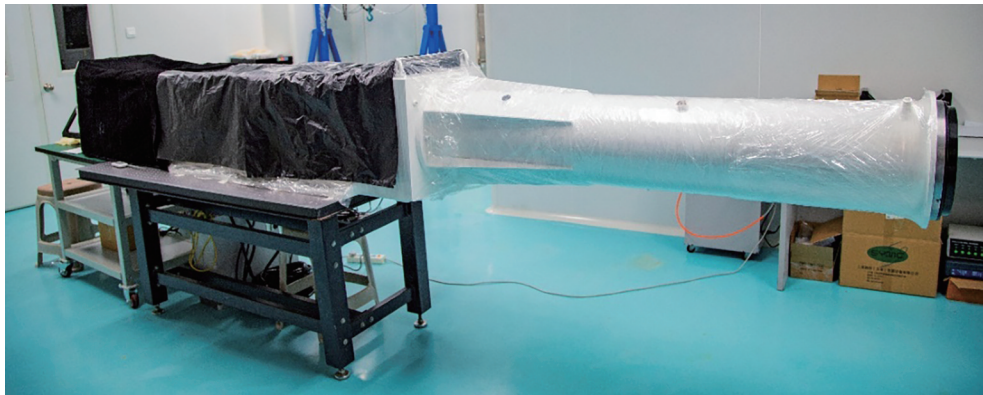


图12 日冕仪检测实验装置

Fig.12 Experimental apparatus for coronagraph detection

在日冕仪杂散光的检测过程中,由平行光管产生的散射光将会进入日冕仪的光学系统,从而影响杂散光强度检测结果,因此,平行光管的物镜采用与日冕仪物镜相同的超光滑抛光工艺,来减少此散射光线对检测结果带来的影响。太阳模拟器为实验过程中的光源,其通过扩散板产生均匀分布的照亮面,并将此照亮

面放置在超光滑物镜的焦面位置处,通过光阑调整照亮面的孔径,使其经过物镜后的张角恰好等于太阳的发散角,从而模拟太阳光球层光线到达地球时的情况。由模拟分析可知,几种杂散光的成像位置都在滤光器区域内,滤光器在此处的设计作用为观测特定的日冕谱线,因此在实验时将滤光器拆下,直接使用相机的CMOS接收前述杂散光在此位置的图像。

杂散光强度使用杂散光光强(I_s)与直射光光强(I_i)的比值表示,记为 $\delta = I_s/I_i$,在实验室检测时,使用线性程度较好的科学相机对光强进行测量,相应光线的光强值可用科学相机读取出的灰度值表示。杂散光检测流程为:首先将内掩体拆下,此时模拟太阳的直射光线直接进入日冕仪系统,并被探测器捕获,读取探测器捕获到太阳部分的灰度数值,记为 D_1 ,此数值即为太阳直射光的亮度;然后安装内掩体,遮挡太阳直射光,此时探测器所捕获到的光线均为系统内的杂散光线,读取视野中各点的灰度值,记为 D_2 。由于直射光与杂散光通常相差 10^5 量级以上,所以测量直射光光强时应在光路中加入线性衰减片,衰减指数记为 σ 。同时考虑到平行光管物镜与日冕仪物镜采用相同的抛光工艺,其散射特性基本相同,所以杂散光强度可表示为

$$\delta = \frac{I_s}{I_i} = \frac{\sigma D_1}{2D_2} \quad (2)$$

3.1 鬼像的检测与判定

由鬼像形成原理可知,鬼像的成像光直接来自物镜L1的表面,并且位于滤光器区域内,因此在滤光器位置处稍加前后调整,便可以找到鬼像面,其像面的特点为在像面中心位置处有一个明亮的光斑,视野内不均匀分布若干离焦像斑。

为了更加清晰地看到各种杂散光的像点,对拍摄到的图像进行了对比度增强和反色处理,使得杂散光像点看起来比实际效果更明显。图13中白色为拍摄背景,黑色为光斑,图像的中心处有一个光斑,即为鬼像点,鬼像点是一个弥散斑,这与2.2节中模拟分析结果一致。外圈的光环为日冕仪入射口径边缘衍射光的像,其成像位置同鬼像面十分接近,可以通过Lyot光阑进行遮拦^[7]。衍射光环内的其他光斑为平行光管物镜和日冕仪物镜的散射点,边缘的云雾状光斑是平行光管表面因多次擦拭留下的划痕所产生的杂散光像斑。

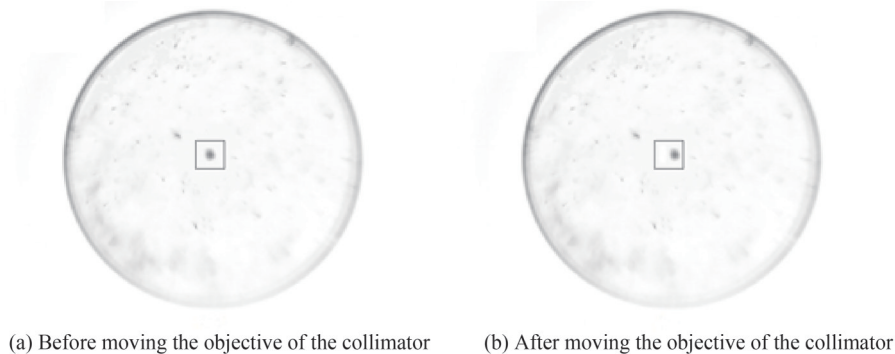


图13 拍摄到的鬼像面
Fig.13 Picture of a ghost image plane

在水平方向微小移动平行光管物镜,发现鬼像点也会在水平方向发生偏移,如图13(b)所示,这是由于当平行光管物镜发生微小移动,从平行光管出射的平行光由水平入射变为微小角度的斜入射,从而导致鬼像点位置发生移动,可以作为鬼像点的判定依据。

为了消除鬼像点,使用镀有Lyot斑的平板玻璃在滤光器位置处对鬼像点进行遮挡,并对像面杂散光强度进行测量,如图14所示,从图中可见,对物镜自身二次反射产生的鬼像进行遮挡前,像面杂散光强度为 10^{-5} 量级,这将会湮没日冕图像,影响观测,遮挡鬼像后,杂散光强度下降到 10^{-6} 量级,符合观测要求。

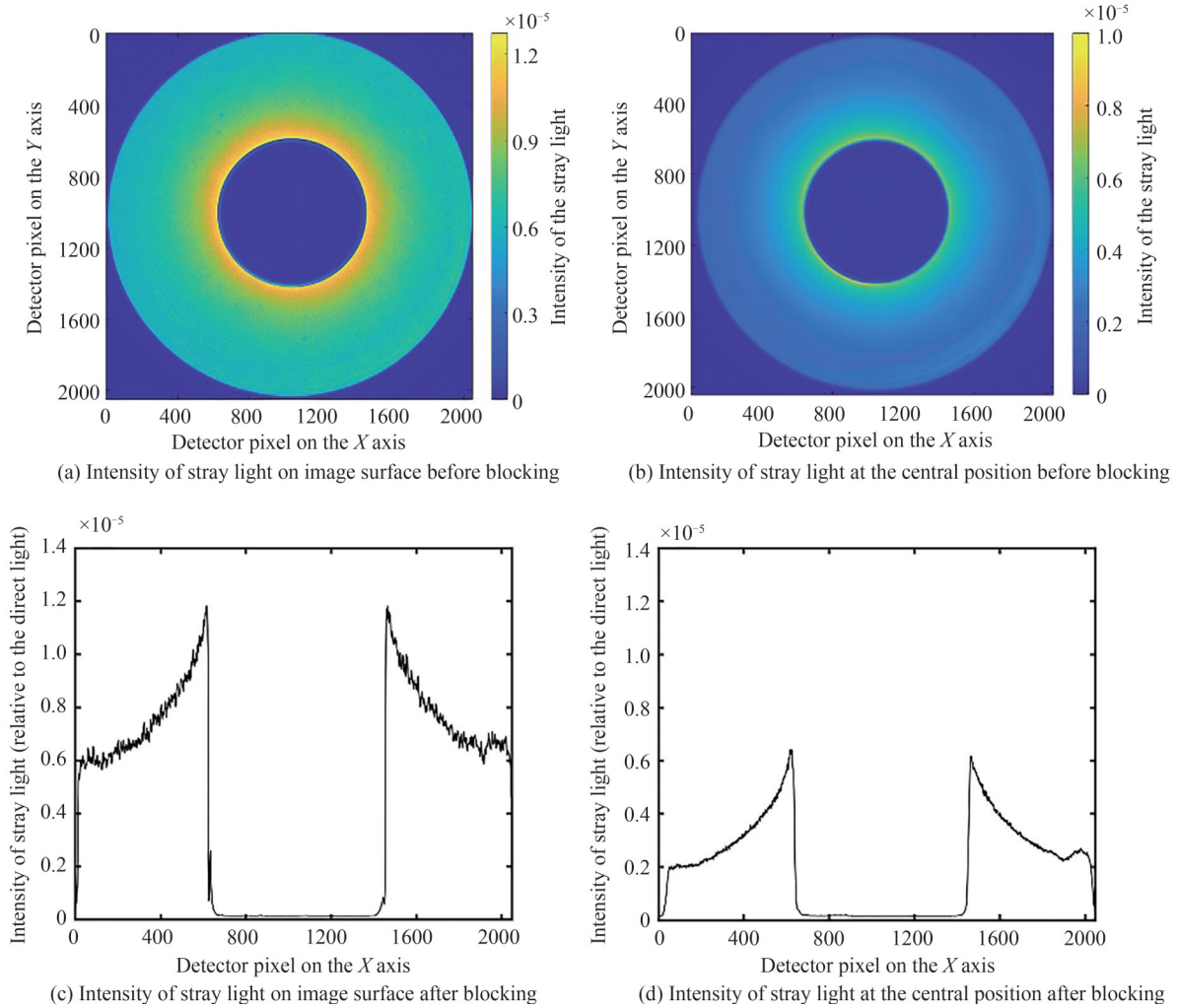


图 14 鬼像遮拦前后的像面杂散光强度对比

Fig.14 Comparison of stray light before and after blocking the ghost image

3.2 日冕仪物镜散射点的检测与判定

从仿真结果可以看到,物镜孔径光阑衍射、二次反射鬼像以及日冕仪物镜散射点,三者的成像位置都十分接近。因此在鬼像面位置处向前寻找,即可找到物镜散射点的像面,其像面特点为视野范围内不均匀无规律分布若干光点,并且像面中间有鬼像点的离焦像。

由于产生物镜散射点的原因物镜本身疵病或表面污垢,所以其像面上的分布比较杂乱,没有规律可循,如图 15 所示。但是可以通过旋转日冕仪物镜来区分和判定此杂散光,图 15(a)和(b)分别为将日冕仪物

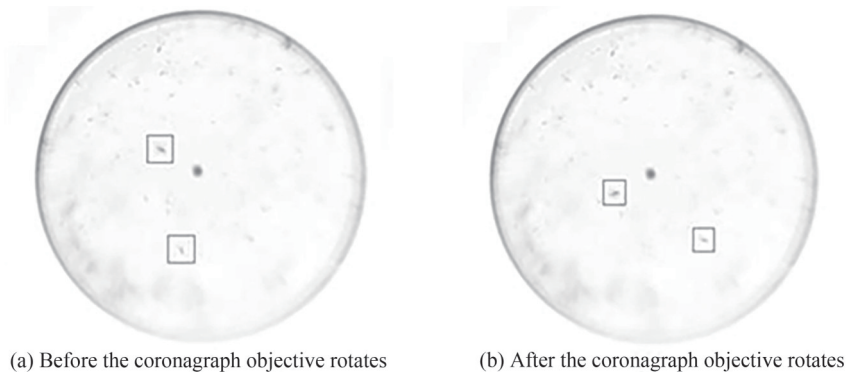


图 15 日冕仪物镜散射点成像
Fig.15 Scattering point imaging with the coronagraph objective

镜旋转一定角度前后的像点分布。可以看到,图中两个方框内的亮斑跟随日冕仪物镜的转动发生了位置变化,说明这两个点是日冕仪物镜散射点形成的像点。在实际应用中,通常使用超光滑抛光工艺,并保持透镜表面清洁,以减小由于物镜散射带来的杂散光。

3.3 三种杂散光的等效系统位置关系

根据日冕仪光路分析,将场镜 L_2 和准直镜组 L_3 等效为一个光学系统,则孔径光阑边缘、二次反射鬼像点及物镜散射点相对于此光学系统而言,均位于该等效光学系统的二倍焦距之外,所以它们的像面基本一致,并按照顺序排列,如图16所示。

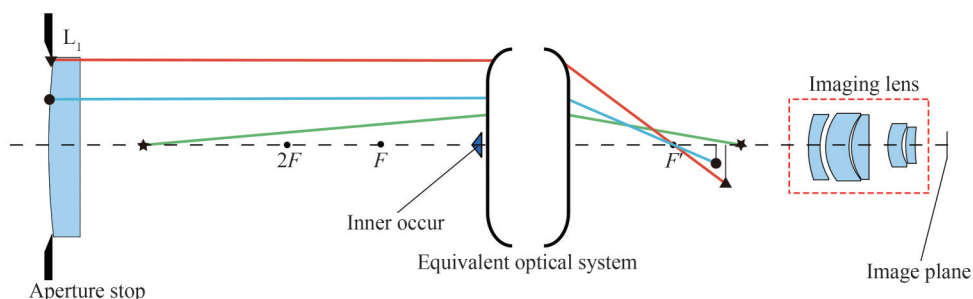


图16 日冕仪三种杂散光的等效系统位置关系示意图

Fig.16 Schematic diagram for the equivalent system position relationship for the three stray light types of the coronagraph

通过实验及仿真结果的比对,总结了日冕仪孔径光阑衍射光、物镜二次反射形成的鬼像点以及物镜散射点三种杂散光的特点、判定和区分方法,如表1所示。需要说明的是,这里只定性地给出了这三种杂散光特性,以及在实验中如何判别并抑制它们的手段,至于对这些杂散光进行定量的分析工作可以在其他的研究中找到^[6-9]。

表1 三种杂散光的判定与比较

Table 1 Determination and comparison of three kinds of stray light

Types of stray light	Analysis of causes	Characteristics of stray light	The method to distinguish
Aperture diffracted light	The aperture is exposed directly to sunlight	Imagining in front of the collimator group and in the filter area; bright spots at the edge of the field of view; reduce imagining contrast	A bright, sharp aperture around the field of view
Ghost point	Secondary reflection of the objective	Imagining in front of the collimator group and in the filter area; spot in the center of the ghost plane; reduce imagining contrast	The ghost point moves in the opposite direction of the coronagraph objective
Objective scattering point	Surface defects and contaminants of the objective	Imagining in front of the collimator group and in the filter area; the position of the image point on the ghost plane is center symmetric with the position of the scattering point on the objective; reduce imagining contrast	The image point rotates in the same direction as the objective

4 结论

影响日冕仪杂散光程度的因素很多,其中日冕仪孔径光阑衍射光、物镜二次反射形成的鬼像点以及物镜散射点由于其成像位置接近,并且后两种杂散光像点相似,导致容易混淆,难以区分。通过软件分别对这三种杂散光进行模拟仿真,分析了它们各自的特点,并给出了判定与抑制方法。孔径光阑衍射光由于受到太阳光的直接照射而产生,其成像在光路中,可通过寻找视场周围一圈明亮锐利的光圈判定此类杂散光;鬼像点是由于日冕仪物镜的两个表面发生二次反射导致的,可通过微小移动物镜并观察像面内与物镜移动方向相反的光斑来判定;物镜散射点是由于物镜表面瑕疵及污染物的散射产生的,可通过寻找随物镜旋转而随动的光斑判定。实验结果与仿真结果具有很高的一致性。这些判定方法与实验手段不仅适用于日冕仪

系统的检测,对于其他光学系统也具有参考价值。

参考文献

- [1] WANG Shui. Coronal mass ejections and space weather [J]. *China Basic Science*, 2000, 4: 12-15.
王水. 日冕物质抛射与空间天气学[J]. *中国基础科学*, 2000, 4: 12-15.
- [2] SONG Limin, ZHANG Jun, YANG Zhiliang, et al. Earth-directed coronal mass ejection [J]. *Progress in Astronomy*, 2002, 20(1): 33-43.
宋丽敏, 张军, 杨志良, 等. 对地日冕物质抛射研究[J]. *天文学进展*, 2002, 20(1): 33-43.
- [3] ZHAO Haibin, LIN Qisheng, CHEN Yiping, et al. Coronal structure and brightness profile of the total solar eclipse on August 1, 2008 [J]. *Science Bulletin*, 2009, 54(12): 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[J]. *科学通报*, 2009, 54(12): 1790-1792.
- [4] YOU Jianqi. Progress in space observations of the corona [J]. *Progress in Astronomy*, 1999, 17(4): 299-308.
尤建圻. 空间日冕观测进展[J]. *天文学进展*, 1999, 17(4): 299-308.
- [5] CHEN C H K, CHANDRAN B D G, WOODHAM L D, et al. The near-Sun streamer belt solar wind: turbulence and solar wind acceleration [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2021, 650: L3.
- [6] BU Heyang, LU Zhenwu, ZHANG Hongxin, et al. Suppression of stray light ghost image in internally occulting refractive ground-based coronagraph [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(2): 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[J]. *中国光学*, 2013, 6(2): 231-236.
- [7] BU Heyang, ZHANG Hongxin, LU Zhenwu, et al. Analysis on the parameter of Lyot stop in internally occulting refractive coronagraph [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1212006.
卜和阳, 张红鑫, 卢振武, 等. 内掩式透射日冕仪中 Lyot 光阑参数分析[J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1212006.
- [8] FAINSHTEIN V G, EGOROV Y I. Onset of a CME-related shock within the Large-Angle Spectrometric Coronagraph (LASCO) field of view [J]. *Solar Physics*, 2019, 294: 1-14.
- [9] WANG Jincheng, WANG Taisheng, SHI Chengyong, et al. Influence of the thermodynamic properties of the internal occulter inside the coronagraph on coronal observations [J]. *Optics Express*, 2022, 30(12): 21028-21043.
- [10] LANDINI F, ROMOLI M, FINESCHI S, et al. Stray light calibration for the solar orbiter/metis solar coronagraph [C]. *SPIE*, 2019, 11180: 961-976.
- [11] THOMPSON W T, DAVILA J M, FISHER R R, et al. COR1 inner coronagraph for STEREO-SECCHI, in innovative telescopes and instrumentation for solar astrophysics [C]. *SPIE*, 2003, 4853: 1-11.
- [12] HOWARD R A, MOSES J D, VOURLIDAS A, et al. Sun Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation (SECCHI) [J]. *Space Science Reviews*, 2008, 136: 67-115.
- [13] SONG Yansong, YANG Jianfeng, LI Fu, et al. Method of controlling optical surface roughness based on stray light requirements [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(19): 84-92.
宋延松, 杨建峰, 李福, 等. 基于杂散光抑制要求的光学表面粗糙度控制方法研究[J]. *物理学报*, 2017, 66(19): 84-92.
- [14] ZHANG Hongxin, LU Zhenwu, XIA Lidong, et al. Stray light suppressing of optical system in white light coronagraph [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(10): 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[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(10): 2371-2376.
- [15] LI Ping, LU Zhenwu, XIA Lidong, et al. Stray light analysis of internally occulted mirror coronagraph [J]. *Chinese Journal of Optics Applied and Optics*, 2009, 2(5): 408-413.
李萍, 卢振武, 夏利东, 等. 反射式内掩日冕仪的光学设计与杂散光分析[J]. *中国光学与应用光学*, 2009, 2(5): 408-413.

Determination and Experimental Study of Three Kinds of Stray Light in the Coronagraph System

HUANG Yupeng^{1,2}, ZHANG Hongxin¹, DING Yue^{1,2}, WANG Taisheng¹
(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*)

Abstract: The coronagraph is a scientific instrument developed to observe extremely faint coronal emission in the strong background of the solar disk. During the coronagraph observation and laboratory detection procedures, numerous non-imaging beams are present. The entrance of non-imaging beams into the detector has an adverse impact on the imaging contrast and these beams reaching the image plane are

usually called stray light. In order to discern the subtle coronal signal, it is imperative for the coronagraph to effectively mitigate most forms of stray light present within the system. Due to the stark contrast in brightness between the corona and the solar photosphere, very strict requirements must be met in terms of the suppression of stray light to obtain reliable measurements. This paper primarily examines three forms of stray light within inner mask coronagraph systems as per the stipulations set forth by the requirements of the coronagraph, including the ghost images produced by the reflections from two surfaces of the objective, the scattering points from the objective, and the diffracted light from the aperture stop. The origins of the aforementioned three types of stray light can be attributed to the inherent characteristics of the solar corona system, and they can not be completely eliminated from the coronagraph itself. Therefore, alternative procedures must be implemented to effectively nullify the stray light prior to reaching the image plane. We simulate the coronagraph system using optical modeling software and plot the stray light propagation path within the optical system. Our analysis reveals that the propagation of the aforementioned three types of stray light in the optical system converges at multiple locations. Further, based on the corresponding propagation paths, we have established the respective intensity distribution patterns of the three types of stray light at their imaging location and the characteristics of these kinds of stray light are also analyzed. Upon conducting an in-depth analysis, it is discovered that the imaging locations of the three stray light types are in close proximity to each other, and exhibit similar imaging characteristics, resulting in significant interference to the detection process and the detection result of the system. Based on the simulation results, we summed up the causes of these stray lights and give the methods for detecting and mitigating these stray lights. At the same time, the corresponding experimental verification method is designed and a coronagraph with a field-of-view of $\pm 1.08 R_{\odot} \sim \pm 2.5 R_{\odot}$ (R_{\odot} represents the radius of the sun), a working wavelength range of 530.3~637.4 nm, and a total length of 3 713.28 mm was used for experimental comparison, and feasibility of the methods is verified. The camera used for the final image plane in this study was the Dhyana 95 V2 back-illuminated sCMOS camera. It boasted an effective pixel count of $2\ 048 \times 2\ 048$, an effective imaging area of $22.5\text{ mm} \times 22.5\text{ mm}$, and a pixel size of $11\ \mu\text{m} \times 11\ \mu\text{m}$. The experimental results provide confirmation of the viability and efficacy of the aforementioned determination method. Moreover, the shelter and ghost image shielding structure is designed to mitigate the effects of stray light. The level of stray light was measured following the suppression, and it was found to meet the observation criteria. The stray light analysis and suppression implemented in this study broaden the array of available methods for mitigating stray light in coronal instrument systems, enhancing the efficiency and precision of laboratory-based detection of the coronagraph systems.

Key words: Inner-occulted coronagraph; Stray light detection; Ray tracing; Ghost image; Scatter light; Stray light determination

OCIS Codes: 290.2648; 220.4830