

文章编号 1674-2915(2013)02-0231-06

## 内掩式透射地基日冕仪中杂光鬼像的消除

卜和阳<sup>1,2</sup>, 卢振武<sup>1\*</sup>, 张红鑫<sup>1</sup>, 孙明哲<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 光电技术研发中心, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 为了消除杂散光对日冕仪成像质量的影响, 分析了工作波段为 530 ~ 555 nm 的内掩式透射地基日冕仪(其视场为  $\pm 1.1 \sim 3R_{\odot}$ , 分辨率为 13.5  $\mu\text{m}$ , 口径为 120 mm, 系统  $F$  数为 8.2) 物镜的多次反射形成的鬼像。基于鬼像形成原理, 完成建模模拟, 提出了结构性遮拦措施, 并通过实验论证了遮拦结构对鬼像有良好的遮拦效果, 同时验证了鬼像的光强和物镜边缘衍射光基本一致。实验还显示: 鬼像的尺寸和模拟基本一致, 直径均约为 0.9 mm。消除鬼像后, 内掩式透射日冕仪消杂光能力和成像质量进一步提高, 实现了对日冕的有效观测。

**关键词:** 内掩式透射地基日冕仪; 鬼像; 杂散光; 结构遮拦

中图分类号: TH754; TH751 文献标识码: A doi:10.3788/CO.20130602.0231

## Suppression of stray light ghost image in internally occulting refractive ground-based coronagraph

BU He-yang<sup>1,2</sup>, LU Zhen-wu<sup>1\*</sup>, ZHANG Hong-xin<sup>1</sup>, SUN Ming-zhe<sup>1,2</sup>

(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)*

*\* Corresponding author, E-mail: luzu@ciomp.ac.cn*

**Abstract:** In order to improve the imaging quality of coronagraphs, the ghost image caused by multi-reflection light from an objective lens for the internally occulting refractive ground-based coronagraph is analyzed at a band from 530 nm to 555 nm. The coronagraph with an aperture of 120 nm shows its main specifications in a field of view of 1.1 to  $3R_{\odot}$ , a resolution of 13.5  $\mu\text{m}$ , and  $F$  number of 8.2. The paper analyzes its imaging theory and establishes a model for the ghost image. Then, it presents the structure masking measures and performs an experimental demonstration. The experiment result shows that the masking structure is effective on the elimination of ghost image. In addition, the intensity of ghost image and the intensity of diffracted light of objective lens edge are basically the same. The experiment also illuminates that the size of ghost image is the same as the simulation result of 0.9 mm. The ghost image suppressing further improves the capability of elimination of stray light and the image quality of the coronagraph achieves the effective observation of the solar co-

收稿日期: 2012-12-15; 修订日期: 2013-02-16

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2011AA7033035B); 空间科学预先研究资助项目 (No. XDA04071800)

rona.

**Key words:** internally occulting refractive ground-based coronagraph; ghost image; stray light; structure masking

## 1 引言

日冕是太阳的外层大气,不仅有高速外流的太阳风,还有强烈的日冕物质抛射(CME),会发射出很强的紫外和X射线辐射。日冕的活动与日地空间环境及空间通讯有着密切的关系,而且影响太空环境及地球磁场等,所以对日冕的观测,尤其是CME现象的观测,可以对影响地球及日地空间的灾害性天气进行预警。根据对日冕的监测资料可以深入研究和理解CME的成因以及CME与周围日冕结构、日冕活动(例如耀斑,日珥的爆发以及日冕震荡等)的相互作用。对人类全面理解太阳活动等有着重要的科学价值。

日冕的亮度相对来自太阳光球层的可见光极其微弱,几乎是太阳中心亮度的 $10^{-6}$ 量级,外冕的亮度则更加微弱<sup>[1-4]</sup>,人眼观测不到,只有在日全食时才能看到日冕,但此时对日冕的监测时间有限,获得的科学数据也极其有限。

日冕仪则是人为通过仪器的结构遮拦造成类似日全食影像的成像仪器,是日地空间环境的监测仪器。因为日冕观测是在极强背景下观测暗目标,所以日冕仪不仅需要建立在高海拔地区来减弱地球大气的影响,且光学系统设计的关键就是消除外界及自身杂散光的影响。

从最早的Lyot日冕仪至今,国外已发射多颗空间探测卫星,如欧洲航天局与美国合作的太阳与日光层观测台(SOHO),美国的日地关系观测台(SREREO),日本阳光卫星(Yohkoh)等,日冕仪都是其中重要的载荷。一些国家制定了相应的对日观测计划<sup>[5-6]</sup>,利用自行研制的地基日冕仪在不同时刻不同角度对日冕进行观测,我国地基日冕仪建立后,将成为这一观测网络的重要组成部分。

透射式日冕仪的主要杂光光源除了太阳直射光,入射孔径的边缘衍射光,还有物镜表面二次反射形成的鬼像,而鬼像作为透射式日冕仪不可避

免的一类杂光,必须进行有效消除。本文对一台已有的内掩式地基日冕仪开展了消除杂散光的研究。该日冕仪的视场为 $\pm 1.1 \sim 3R_{\odot}$ ,工作波段为530~555 nm,分辨率为13.5  $\mu\text{m}$ ,口径为120 mm,系统F数为8.2。另外,系统总长为1800 mm,其中光学系统长1700 mm,焦距为987 mm。通过分析透射式日冕仪的基本原理和鬼像的形成机制,完成了软件模拟,并提出了结构性遮拦方法。实验显示,提出的方法有效遮拦了鬼像,提高了透射式日冕仪的杂散光抑制能力。

## 2 透射式日冕仪工作原理

图1所示的为内掩式透射日冕仪的工作原理图。内掩式经物镜对太阳成像,在第一像面处放置内遮掩体,将太阳光球的光遮蔽掉。如图1所示,日冕仪由入射口径,日冕仪物镜,场镜,中继镜组,内掩体,鬼像吸收膜,Lyot光阑构成。太阳光直接照射在物镜组上,被物镜组成像在其后焦面处,设置在焦面处的掩体遮蔽了太阳光球层的阳光,使其不能进入后继系统<sup>[7-10]</sup>。未被遮挡的阳光通过由场镜和中继镜组组成的日冕仪二次成像系统成像于像面CCD,形成类似日全食的影像。

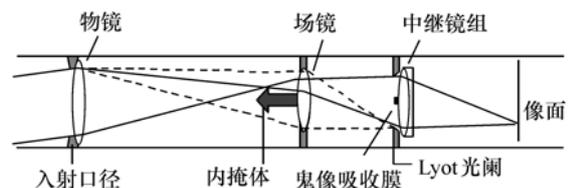


图1 透射式日冕仪成像原理

Fig. 1 Imaging principle of refractive coronagraph

## 3 鬼像形成机制及软件模拟

由图1原理图可知,物镜组会直接暴露在太阳光的强烈直射之下。虽然物镜表面经过了超光滑抛光,但是无法避免透镜内表面的多次反射,这

样在透镜内部被表面多次反射的太阳光会进入后继镜组形成鬼像<sup>[11]</sup>。如不鬼像遮拦,则相当于一个面光源,一定程度上照明像面,就会降低像面的对比度。太阳光在物镜内部的反射如图 2 所示。

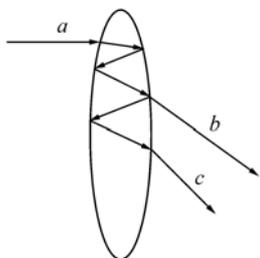


图 2 光在物镜内的多次反射示意图

Fig.2 Multi-reflection light in the objective lens

设物镜表面透射系数  $T$  达到 0.99,反射系数  $R$  为 0.01,且透射及反射无能量吸收,设入射光线  $a$  的光强度为 1,按照物镜两面性质相同计算可得:

$$I_b = T \times R \times R \times T = 9.8 \times 10^{-5}$$

$$I_c = T \times R \times R \times R \times R \times T = 9.8 \times 10^{-9}$$

其中  $I_b$  和  $I_c$  分别是光线  $b$  和  $c$  的光强,可见  $I_b$  比  $I_c$  的强度大  $10^4$  倍,故  $c$  光相比  $b$  光的影响几乎可以忽略,故着重考虑的是二次反射成像。

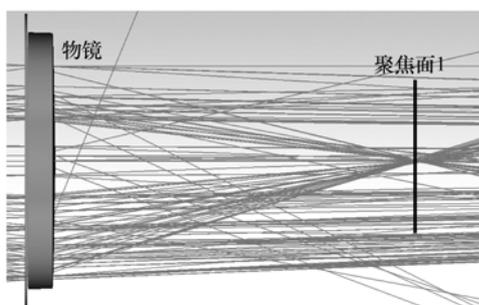


图 3 物镜表面二次反射光的第一像面(零度平行光入射光)

Fig.3 The first image plane of secondary reflected light in the objective lens(0°parallel light)

用 Tracepro 软件进行光线追迹,零度角水平入射的平行光经物镜后如图 3,可见物镜内表面二次反射光会先在物镜后一定位置聚焦面 1 处聚焦;再如图 4,经场镜被聚焦在中继镜组前,这个

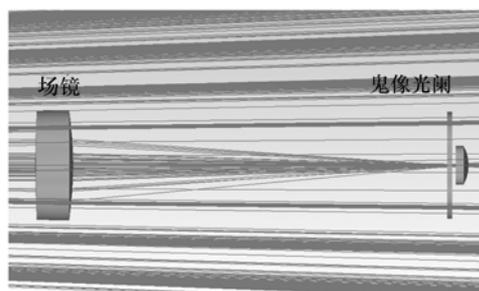


图 4 鬼像位置示意图(零度平行光入射光)

Fig.4 Ghost image position(0°parallel light)

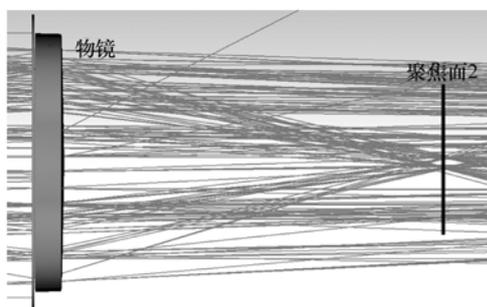


图 5 物镜表面二次反射光第一像面(±0.7°平行光入射光)

Fig.5 The first image plane of secondary reflected light in the objective lens(±0.7°parallel light)

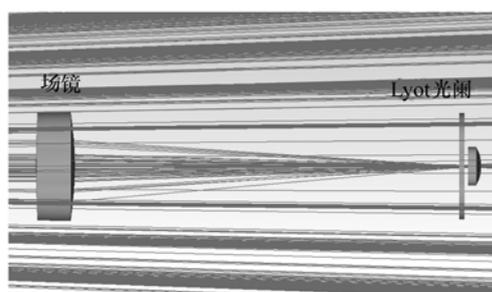


图 6 鬼像位置示意图(±0.7°平行光入射光)

Fig.6 Ghost image position(±0.7°parallel light)

聚焦点就是鬼像。模拟分别以 ±0.7°入射的平行光,如图 5 和图 6 所示,可见同角度入射的平行光先聚焦在聚焦面 2,再经过场镜同样被聚焦在中继镜组前。可见鬼像并不是一个理想的点,而是有一定尺寸的弥散斑,且并不是物镜内的全部二次反射都聚焦为鬼像,只是物镜中心小范围内的

二次反射才对鬼像有贡献。根据它的位置考虑有两种途径可对其进行遮挡:(1)在 Lyot 光阑中心添加一个挡片进行遮拦;(2)在后面的透镜表面中心的一个小区域内镀吸收膜进行遮拦。但考虑 Lyot 光阑中心的挡片需要支撑结构,从而会引入杂光,故实际应用中采用后一种方法,即在后面透镜表面中心镀制吸收膜。由模拟结果直接取值,这一小圆区域的直径约为 0.9 mm。为确保遮拦效果,实际吸收膜区域应采用 4% 的过遮拦。

另一方面,采用 MATLAB 进行光线追迹,计算获得物镜对鬼像有贡献的区域最大半径仅有 3.790 1 mm,且是物镜中心区域。

## 4 实验分析

### 4.1 实验原理图

图 7 所示为物镜二次反射光成像示意图。

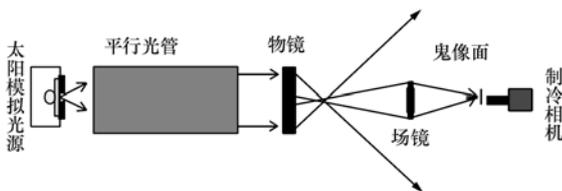


图 7 物镜二次反射光成像示意图

Fig. 7 Imaging principle of secondary reflected light in the objective lens

太阳模拟光源发出的光经平行光管转化为平行光入射日冕仪物镜,物镜内表面多次反射引起的杂光先聚焦于物镜后一定位置,而后入射日冕仪后继系统,经场镜后成像,成像面就是图中所示的鬼像面。制冷相机对鬼像面成像并通过计算机进行观察,场镜限制了日冕仪的视场角度,也限制了对鬼像有贡献的成像光束数量。

### 4.2 实验条件

实验在千级超净间完成,采用 1:1 日冕仪实验系统氙灯作为太阳模拟光源,日冕系统置于封闭黑箱内,同时配置制冷相机一台。氙灯通过毛玻璃光强被均匀化,匀化的光通过开口直径为  $D$  的染黑铝板,铝板置于平行光管焦面处,由平行光管焦距  $f=1\ 600\ \text{mm}$ ,太阳光球层视场角约为  $\omega = \pm 16'$ ,得铝板开口直径<sup>[12]</sup>:

$$D = f \times \tan(\omega) \times 2 = 14.89\ \text{mm}$$

氙灯要对准铝板开口的中心,由此铝板的开口被氙灯均匀照明,可模拟太阳。平行光管出射的光可视为来自太阳的平行光束,光被日冕仪接收到,最后通过制冷相机成像。因为太阳内冕的辐射亮度几乎是太阳中心亮度的  $10^{-6}$  量级,为了让模拟的太阳实验装置也达到这一量级比,在铝板开口处放置  $10^6$  倍的衰减片,再用制冷相机观察平行光管焦面处的铝板,当开口孔径中心亮度和孔径外的灰度值一致时,说明满足  $10^{-6}$  量级比例关系。之后去掉衰减片,此时被照亮的铝板开口可以比较理想地模拟太阳,为之后的实验奠定了基础。

### 4.3 鬼像遮拦实验

从鬼像的成像原理已知,鬼像的成像光直接来自物镜的表面,鬼像面同场镜对物镜的成像面非常接近,故可用相机对物镜的像面成像,稍加前后调整,便可以找到鬼像的像面。

图 8 所示用制冷相机拍摄的鬼像像面,像面的中心处有一个明显的亮斑。通过微小转动物镜,这个亮斑会发生较大的水平偏移,在未到达视

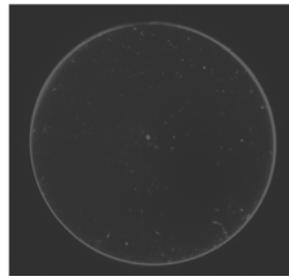


图 8 鬼像像面成像图

Fig. 8 Image plane before elimination of ghost image

场边缘时便消失。物镜调整回原位后,亮斑又重新出现,而其他杂光点并未有明显变化,这个中心亮斑就是鬼像点。测量显示鬼像点的直径和模拟的值基本吻合,均约为 0.9 mm。采用一片光洁度极好的薄玻璃片,在其上点一黑点,将玻璃片置于鬼像像面,黑点遮住鬼像点,再通过制冷相机对该面成像,鬼像被遮蔽。鬼像消除后的影像如图 9 所示。

图 8 中出现的明亮环为物镜边缘的衍射光成像,通过 MATLAB 读取图片灰度值,发现鬼像及

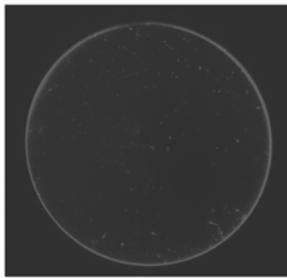


图9 鬼像消除后成像图

Fig.9 Image plane after elimination of ghost image

衍射光亮环灰度值都达到了 16 383 的 CCD 饱和值,如图 10 和图 11,由此更加确定鬼像如不进行

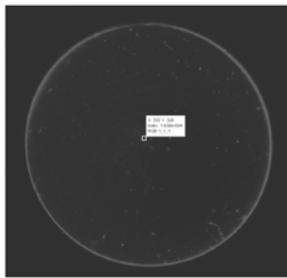


图10 鬼像点灰度值

Fig.10 Gray value of ghost image

遮拦,一定程度上照明 CCD 像面使得日冕像的背景色变亮,日冕成像的对比度就会变差,从而影响观测。

综上,理论和实验证实了地基日冕仪中主要的杂散光鬼像得到了抑制,实验同时提示只有物镜中心一定区域的二次反射光才会形成鬼像,而对鬼像无贡献的物镜二次反射光会有不规则的

#### 参考文献:

- [1] 胡中为,赵海斌,姚进生. 日全食时的日冕光学观测[J]. 科学通报,2009,54(13):1841-1849.  
HU ZH W,ZHAO H B,YAO J S. Optical observation of the solar corona at total solar eclipse[J]. *Chinese Sci Bull*,2009,54(13):1841-1849. (in Chinese)
- [2] 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.  
WANG S. Coronal mass ejections and space weather[J]. *China Basic Science*,2000,4:12-15. (in Chinese)
- [3] 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.  
SONG L M,ZHANG J,YANG ZH L, et al.. Earth-directed coronal mass ejection[J]. *Progress in Astronomy*,2002,20(1):33-43. (in Chinese)
- [4] 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.  
ZHAO H B,LIN Q SH,CHEN Y P, et al.. Coronal structure and brightness profile of the total solar eclipse on August 1,

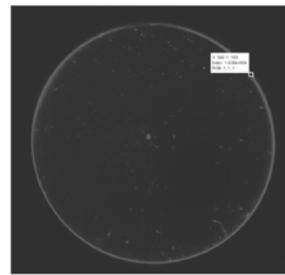


图11 物镜边缘衍射光灰度

Fig.11 Gray value of diffracted light of objective lens edge

分布,所以镜筒内壁应进行消杂光螺纹设计,所有光阑边缘应进行刀口设计以减小杂散光。另外,图 8 和图 9 中的不规则亮点是由物镜上的灰尘散射光成像形成的,故提高成像系统的洁净度也是消除杂光必不可少的手段。

## 5 结 论

日冕仪的工作特点决定了其对杂散光抑制要求极其严格,在仪器完善及镜片制造工艺极其成熟的前提下,也有很多杂散光是无法避免的,从而要求日冕仪系统在保证成像质量的前提下提高杂散光的抑制水平。本文着重讲述了内掩式透射日冕仪鬼像的形成原理,进行了软件模拟,并在超净间进行了 1:1 日冕仪实验系统的演示,验证了提出的鬼像消除方法的可行性,也通过实验验证了鬼像的尺寸和 Tracepro 模拟的尺寸基本一致,直径约为 0.9 mm。

- 2008[J]. *Chinese Sci Bull*, 2009,54(12):1790-1792. (in Chinese)
- [5] 尤建圻. 空间日冕观测进展[J]. *天文学进展*, 1999,17(4):299-308.  
YOU J Q. Progress in space observations of the corona[J]. *Progress in Astronomy*, 1999,17(4):299-308. (in Chinese)
- [6] 张奇岩. “太阳与日光层观测台”揭示太阳的秘密[J]. *中国科教创新导刊*, 2006(7):7-10.  
ZHANG Q Y. “Solar and Heliospheric Observatory” reveal the secrets of the sun[J]. *China Education Innovation Herald*, 2006(7):7-10. (in Chinese)
- [7] BRUECKNER G E, HOWARD R A, KOOMEN M J, *et al.*. The large angle spectroscopic coronagraph(LASCO)[J]. *Solar Physics*, 1995,162:357-402.
- [8] THOMPSON W, DAVILA J, MENTZELL E. Calibration results for the COR-1 coronagraph on STEREO/SECCHI, SH21B-0408[R]. Washington: American Geophysical Union, Fall Meeting 2004.
- [9] 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[J]. *SPIE*, 2003, 4853:1-11.
- [10] HOWARD R A, MOSES J D, VOURLIDAS A, *et al.*. Sun earth connection coronal and heliospheric investigation(SECCHI)[J]. *Space Sci Rev*, 2008,136:67-115.
- [11] 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 D L, *et al.*. Stray light suppressing of optical system in white light coronagraph[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(10):2371-2376. (in Chinese)
- [12] 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.  
LI P, LU ZH W, XIA D L, *et al.*. Stray light analysis of internally occulted mirror coronagraph[J]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.*, 2009,2(5):408-413. (in Chinese)

#### 作者简介:



卜和阳(1984—),男,吉林长春人,硕士研究生,2008年于华中科技大学获得学士学位,2008年至2009年工作于海信宽带多媒体技术公司,主要从事杂散光分析等方面的研究。E-mail:bhy0125@126.com



张红鑫(1978—),男,河北邯郸人,博士,副研究员,硕士生导师,2001年、2004年于长春理工大学获得学士、硕士学位,2007年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事二元光学、光学设计、光学系统杂散光分析与抑制等方面的研究。E-mail:fristhongxin@163.com



卢振武(1955—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1982年于东北师范大学获得学士学位,1985年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位。主要从事光学的应用基础研究、光学设计、衍射光学等方面的工作。E-mail:luzw@ciomp.ac.cn



孙明哲(1984—),男,吉林磐石人,博士研究生,2007年于吉林大学获得学士学位,2011年于华南师范大学获得硕士学位。主要从事杂散光分析等方面的研究。E-mail:sunmingzhe2003@126.com