

文章编号 1004-924X(2015)01-0070-08

## 锯齿型外掩体设计和衍射光强检测

孙明哲<sup>1,2</sup>, 张红鑫<sup>1\*</sup>, 卢振武<sup>1</sup>, 卜和阳<sup>1</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:**针对太阳极轨望远镜计划对大视场日冕仪杂散光抑制的要求,设计了一个衍射抑制程度更高的锯齿型外掩体用于该日冕仪。应用半无限矩形法模拟了锯齿型外掩体衍射光强分布,得到了最低衍射强度的锯齿形状。通过实验检测了此最优锯齿形状外掩体的衍射光抑制水平,并与圆形外掩体衍射光强进行了对比,证实了锯齿型外掩体相对于圆形外掩体在抑制衍射光上的优势。实验观测结果显示,优化设计后的锯齿型外掩体的衍射光强抑制水平可以达到 $10^{-7}$ 量级,高于目前国际上实验观测到的外掩体衍射光强抑制水平 $10^{-6}$ 量级,可以满足大视场日冕仪的对杂散光抑制的要求。

**关键词:**日冕仪;杂散光;衍射光强;锯齿型外掩体

**中图分类号:**P111.41 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152301.0070

## Design and diffraction intensity test of toothed occulter

SUN Ming-zhe<sup>1,2</sup>, ZHANG Hong-xin<sup>1\*</sup>, LU Zhen-wu<sup>1</sup>, BU He-yang<sup>1</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: firsthongxin@163.com*

**Abstract:** According to the requirements of a coronagraph for suppressing the stray light in Solar Polar Orbit Radio Telescope Mission, a toothed occulter for the coronagraph was designed to suppress the diffracted light in a higher level. The diffracted light distribution from the toothed occulter was calculated by using the semi-infinite rectangle method, and an optimized shape with the lowest diffracted light was obtained. Meanwhile, the stray light level of the optimized toothed occulter was measured experimentally, and the obtained result was compared with the diffraction intensity of a round disk occulter. It verifies that the toothed occulter has an advantage over the round disk in diffracted light reduction. The measured data show that the suppression of diffracted light of the proposed toothed occulter has been up to  $10^{-7}$  level after optimization, higher than internationally  $10^{-6}$  level in the lab. The suppression level has been met the demands of large view coronagraphs.

**Key words:** coronagraph; stray light; diffraction intensity; toothed occulter

收稿日期:2013-12-03;修订日期:2014-01-20.

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项资助项目(No. XDA04071800, No. XDA04060804-03)

## 1 引言

日冕仪是对日冕和日冕物质抛射现象进行观测的装置,太阳极轨射电成像望远镜(Solar Polar Orbit Radio Telescope, SPORT)<sup>[1]</sup>计划中计划配置的大视场日冕仪,是国际上首个中心遮拦的大视场成像日冕仪。大视场日冕仪在近日点和远日点的视场分别为  $8 \sim 72R_{\odot}$  ( $R_{\odot}$  为太阳半径)和  $24 \sim 215R_{\odot}$ ,而国际上中心遮拦的日冕仪最大的视场仅达到  $30R_{\odot}$ <sup>[2]</sup>,远远低于大视场日冕仪的视场。由于日冕和日冕物质抛射的亮度很低,在  $1.1 \sim 215R_{\odot}$  对应的亮度为  $10^{-5} \sim 10^{-13} B_{\odot}$  量级<sup>[3]</sup> ( $B_{\odot}$  为太阳光盘的平均亮度),因此大视场日冕仪对杂散光抑制的要求很高,其外视场杂散光的抑制水平甚至要求高达  $10^{-14} B_{\odot}$  量级。杂散光分为散射光和衍射光。散射光主要借鉴其他天文望远镜采用的方法<sup>[4-10]</sup>来抑制;衍射杂散光则主要通过共轭遮拦或衍射源的结构设计来抑制。

大视场日冕仪的外掩体和外窗口由于直接受到太阳光的照射而成为衍射杂散光的主要来源。尽管这部分衍射光分别受到内掩体和视场光阑的遮拦,但是仍有一部分衍射光会照射到物镜表面,而由此产生的多种杂散光到达像面会淹没日冕信号光。因此这部分衍射光的抑制是日冕仪制造的一个关键问题。自 J. Evans<sup>[11]</sup>发明外掩式日冕仪以来,外掩体先后经历了双圆盘<sup>[12-13]</sup>,三圆盘<sup>[12-14]</sup>,多圆盘<sup>[12]</sup>,多线圈形<sup>[14]</sup>,圆锥形<sup>[14]</sup>,锯齿形<sup>[14-15]</sup>,蛛网形<sup>[16]</sup>及花瓣形<sup>[17-20]</sup>等结构,其中三圆盘型和多线圈型已将外掩体的衍射光降低到相当低的水平,但也仅仅达到  $10^{-5} \sim 10^{-6} B_{\odot}$  量级<sup>[12,14]</sup>。蛛网型和花瓣型计划应用于 40 m 半径的外掩体中,主要为观测太阳系外恒星的近轨行星的日冕仪而设计<sup>[17-19]</sup>。但对于半径在几十厘米大小的对日观测日冕仪外掩体而言,以上结构均不能达到日冕仪要求的精度(外掩体要求边缘和尖角等非常锋利,如此才能达到结构消衍射光的效果)。而锯齿型外掩体容易加工,能有效地降低衍射光。另外锯齿型可以作为日冕仪外窗口来降低外窗口的衍射光。目前锯齿型外掩体的衍射光强理论上可以达到  $10^{-8} B_{\odot}$  量级<sup>[21-23]</sup>,但国际

上所有类型的外掩体所能实验达到的衍射光强抑制水平最高仅为  $6.4 \times 10^{-6} B_{\odot}$ <sup>[12,14]</sup>。为了满足大视场日冕仪的杂散光抑制要求,本文设计了一个锯齿型外掩体。首先对日冕仪的锯齿型外掩体衍射光强进行了设计并检测,然后在理论上应用半无限矩形法<sup>[23]</sup>对锯齿型外掩体衍射光强进行了模拟分析,从而得出理论上的最佳形状。最后通过实验说明其衍射光抑制水平能够满足大视场日冕仪的要求。

## 2 外掩式日冕仪结构介绍

SPORT 大视场日冕仪为外掩式日冕仪,如图 1 所示<sup>[2,24]</sup>。太阳直射光被外掩体  $D_1$  和外窗口  $A_0$  遮拦,其它进入日冕仪腔体的太阳直射光被拒热镜  $M_1$  聚焦反射出腔体外。日冕光进入物镜组  $O_1$ ,经场镜组  $O_2$ ,中继镜组  $O_3$  在像面处形成一个圆环形的日冕像。物镜组  $O_1$  将外掩体  $D_1$  成像在  $D_2$  处,使  $D_1$  边缘的衍射光被  $D_2$  遮拦。视场光阑  $A_2$  除决定日冕仪的外视场,还用于遮拦外窗口  $A_0$  边缘的衍射光。Lyot 光阑  $A_3$  为日冕仪的孔径光阑,同时遮拦  $A_1$  边缘的衍射光。Lyot 斑位于中继镜组  $O_3$  前表面处,作用是遮拦物镜  $O_1$  表面多次反射造成的鬼像<sup>[25-26]</sup>。

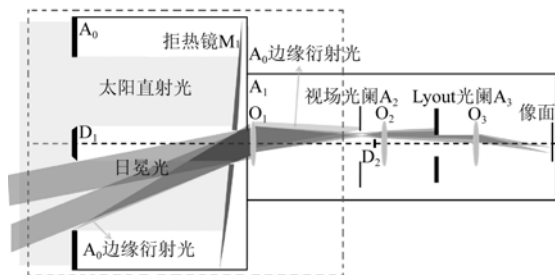


图 1 外掩式日冕仪装置示意图

Fig. 1 Diagram of external-occulted coronagraph

## 3 锯齿型外掩体杂散光的抑制原理及理论计算

由衍射理论可知,垂直于衍射边的方向上行射光最强。如图 2 所示<sup>[14]</sup>,锯齿形外掩体可以让衍射最强方向的光偏离中心部分,从而降低中心区域的衍射光强。物镜置于这部分区域内将大大

降低进入物镜内的衍射杂散光。外掩体和物镜口径的距离  $z$  为 550 mm, 外掩体的大小为 50 mm。在此条件下, 本文对锯齿型外掩体的衍射光进行数值模拟来得到其理论上的最佳值。锯齿型外掩体衍射光强的装置如图 3 所示。这里应用半无限矩形法<sup>[23]</sup>进行衍射计算, 模拟时主要应用菲涅耳公式<sup>[27]</sup>。首先计算锯齿每一边在物镜表面造成的衍射光场复振幅分布, 得到:

$$\bar{U}(r_0, \theta_0) = \frac{U_0 e^{ikz}}{2j} \{ [C(\alpha_2) - C(\alpha_1)] + j[S(\alpha_2) - S(\alpha_1)] \} \times \{ [C(\beta_2) - C(\beta_1)] + j[S(\beta_2) - S(\beta_1)] \}, \quad (1)$$

其中:  $U_0$  为入射光场复振幅,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为波长,  $\alpha_1 = (2/(\lambda z))^{1/2} (T - r_0 \cos \theta_0 \cos \delta - r_0 \sin \theta_0 \sin \delta)$ ,  $\alpha_2 = (2/(\lambda z))^{1/2} (T + L - r_0 \cos \theta_0 \cos \delta - r_0 \sin \theta_0 \sin \delta)$ ,  $\beta_1 = -\infty$ ,  $\beta_2 = (2/(\lambda z))^{1/2} (-R + r_0 \cos \theta_0 \sin \delta - r_0 \sin \theta_0 \cos \delta)$ ,  $r_0, \theta_0$  为物镜口径处的极坐标。T, L,  $\delta$ , R 见图 2,  $z$  见图 3,  $C(x)$ ,  $S(x)$  为菲涅耳积分公式<sup>[27]</sup>, 如下所示:

$$C(x) = \int_0^x \cos \left[ \frac{\pi \xi^2}{2} \right] d\xi, \quad (2)$$

$$S(x) = \int_0^x \sin \left[ \frac{\pi \xi^2}{2} \right] d\xi.$$

再经对称叠加运算就得到整个锯齿型外掩体在物镜表面的光场复振幅分布。

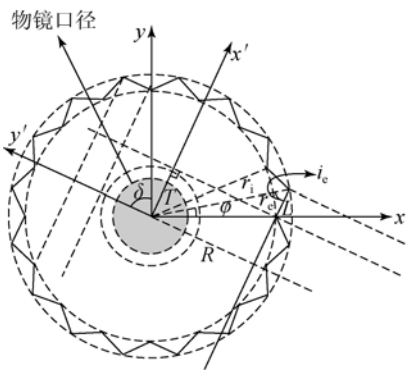


图 2 锯齿边型外掩体<sup>[14]</sup> (锯齿边缘的垂直方向均避开了中心处的物镜口径)

Fig. 2 Toothed occulter (any line perpendicular to any side of toothed occulter avoids the central objective)

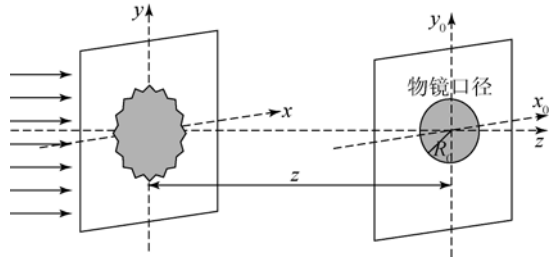


图 3 锯齿边型衍射装置示意图

Fig. 3 Diagram of diffraction setup with toothed occulter

由上述方法首先在锯齿边数一定的情况下计算锯齿高度变化对衍射光强的影响。如图 4 所示, 锯齿型衍射光强随高度的增大先减小, 高度为 3 mm 时趋于平稳, 略有升高; 因此最佳高度应选为 3 mm, 但考虑到不同边数和不同波长情况趋于平稳的点可能有差异 (但基本趋势均为随高度减小), 将高度选为 5 mm。在选定高度的情况下计算锯齿数变化时衍射光强的变化。如图 5 所示, 锯齿型衍射光强随锯齿数的增大先减小后增大, 在 20 齿附近达到最低。但受金刚石车床加工角度的限制, 20 齿时的加工精度不是最佳, 经与技术人员讨论将锯齿数定为 45。如图 5 所示, 20 齿时衍射光强为  $3 \times 10^{-9} I_0$ , 45 齿时衍射光强在  $8 \times 10^{-9} I_0$ , 差别基本在曲线上下浮动的误差范围。由此得到大视场日冕仪的锯齿型外窗口尺寸: 外径  $r_0$  为 50 mm, 内径  $r_1$  为 45 mm, 锯齿数  $N$  为 45。

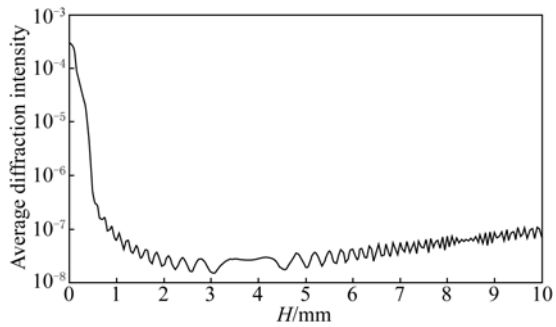


图 4 锯齿型外掩体的衍射光强随锯齿高度的变化曲线 (衍射强度是在物镜平面内半径为 4.6 mm 的圆内取平均值)

Fig. 4 Diffraction intensity of toothed occulter as a function of tooth height (The line is averaged over circular region of radius  $r = 4.6$  mm in central part of objective screen)

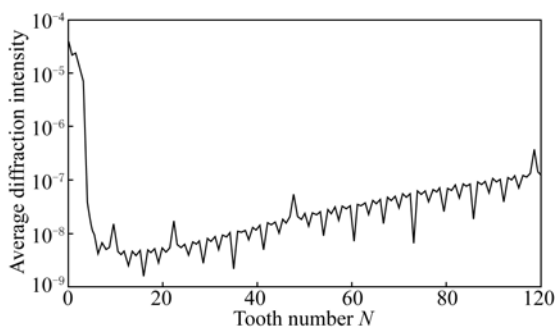


图 5 锯齿型外掩体衍射光强随锯齿数的变化曲线(衍射强度是在物镜平面内半径为 4.6 mm 的圆内取平均值)

Fig. 5 Diffraction intensity of toothed occulter as a function of teeth number (The line is averaged over circular region of radius  $r=4.6$  mm in central part of objective screen)

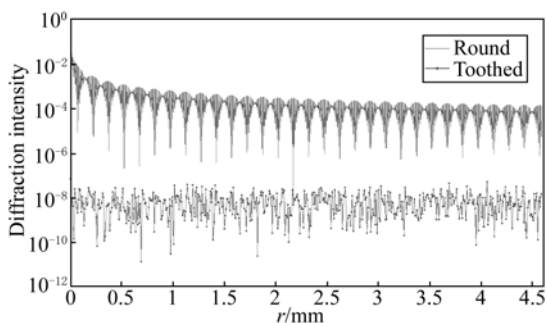


图 6 圆形外掩体与 45 齿锯齿形外掩体的衍射光强径向分布对比

Fig. 6 Comparison of diffraction intensities between toothed occulter and circular disk

计算此时锯齿型外掩体的衍射光强并与圆形外掩体进行比较,结果如图 6 所示。由图可知,锯齿边型外掩体的衍射光强要比圆形外掩体小得多,对物镜口径范围内取平均得到圆形外掩体的衍射光强大约是锯齿型外掩体的  $10^4$  倍,锯齿型外掩体的衍射光强约为入射光强的  $10^{-8}$  量级。这个计算结果与文献[22]中 Verroi 的计算结果在量级上是相符的<sup>[22]</sup>。

#### 4 外掩体衍射光强的实验测量

锯齿型外窗口要求边缘、尖角及凹角处均极

其尖锐,因此其加工难度非常大,这也是蛛网型和花瓣型在小口径加工时不能达到日冕仪要求的原因。实验所用的外掩体由五维精密金刚石车床加工而成,由于锯齿型外掩体在物镜表面处的衍射光强太低,不易观察,故在其衍射光强聚焦的位置,即内掩体的位置观测衍射光。实验装置如图 7 所示,外掩体的衍射光经大视场日冕仪的物镜组成像在内掩体位置,并被制冷相机拍摄。拒热镜是为了消除平行光被墙壁(在日冕仪中为镜筒内表面)散射后照明外掩体后表面,再进入物镜口径的杂散光。

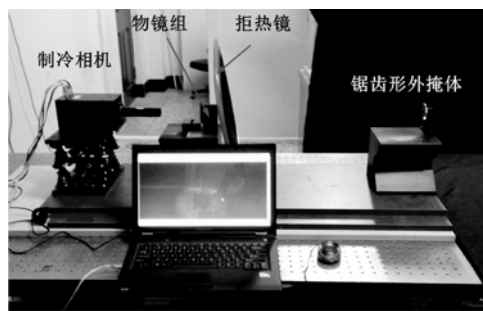


图 7 外掩体实验装置图

Fig. 7 Setup of occulter experiment

#### 4.1 锯齿形与圆形衍射光强定性分析

首先分别定性分析锯齿型与圆形掩体的衍射光强。如图 7 所示,先对锯齿型外掩体衍射光进行成像,并在相同条件下将锯齿型外掩体换成圆形外掩体再进行成像。如图 8 所示,两幅图均在 200 ms 曝光情况下拍摄,左边的圆形衍射图样已经过度饱和,而右边的锯齿型衍射图样才勉强能看清。

由于圆形外掩体的衍射光强过度饱和而锯齿型外掩体的衍射光曝光不足,本文不能对他们的衍射强度有量级上的认识。因此应用积分模式将曝光时间提高 20 s 再分别拍摄锯齿型和圆形衍射光强,并在测量圆形衍射光时分别加  $10^{-2}$  和  $10^{-3}$  的衰减片,得到的图像如图 9 所示。锯齿型外掩体的衍射光强为圆形衍射光强的  $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 。

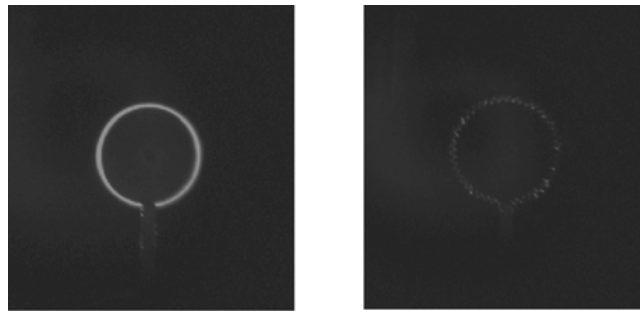
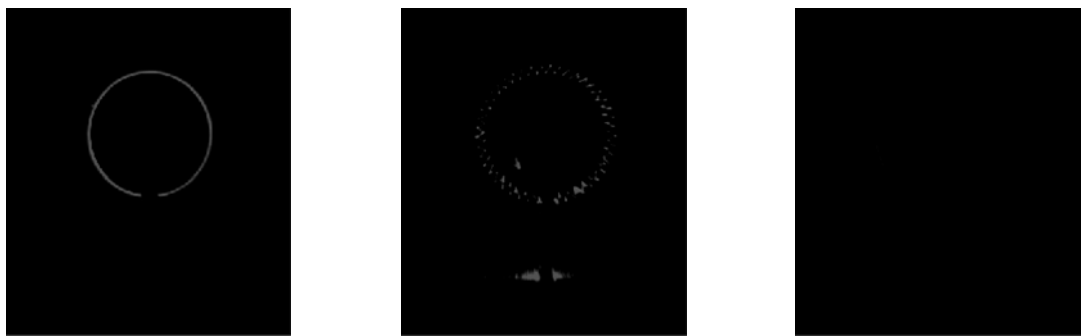


图 8 圆形(左)与锯齿边型外掩体(右)衍射光强的比较(曝光时间均为 200 ms)

Fig. 8 Comparison of diffraction intensities between circular disk (left) and toothed occulter (right)  
(with exposure time of 200 ms.)



(a) 加入  $10^{-2}$  衰减片情况下的圆形衍射图  
(a) Image taken under  $10^{-2}$   
neutral density filter

(b) 锯齿型衍射光强图  
(b) Image taken without filter

(c) 加入  $10^{-3}$  衰减片情况下的圆形衍射图  
(c) Image taken under  $10^{-3}$   
neutral density filter

图 9 锯齿边型与圆形外掩体衍射光强对比(积分时间均为 20 s)

Fig. 9 Comparison of diffraction intensities between circular disk (left and right) and toothed occulter (center)  
(with exposure time of 20 s)

#### 4.2 锯齿形外掩体衍射光强的定量分析

为了定量分析锯齿型衍射光强的抑制水平,需要测量模拟太阳的光强;再将它与之前测得的锯齿型衍射光强进行对比分析来得到锯齿型外掩体的衍射光强量级。同样应用图 7 所示装置,将外掩体移除,并在内掩体的位置测量。由于模拟太阳光强太强,在制冷相机前加入  $10^{-7}$  的衰减片,积分时间仍选用 20 s,得到的模拟太阳像如图 10 所示。图中鬼像是由平行光管、日冕低度物镜等多次反射造成的。处理此太阳像,去除相机本身的噪声,再对太阳像部分进行平均得到平均的太阳光强度。

同样去除锯齿型衍射光强像的相机噪声,再除以太阳光源强度就得到衍射光强的量级,如图

11 所示。由图 11 中可以看出在锯齿边缘处衍射光强为  $10^{-7}$  量级。

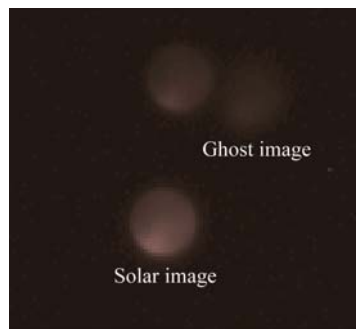


图 10 加入  $10^{-7}$  衰减片情况下的太阳像

Fig. 10 Solar images taken under  $10^{-7}$  neutral density filter

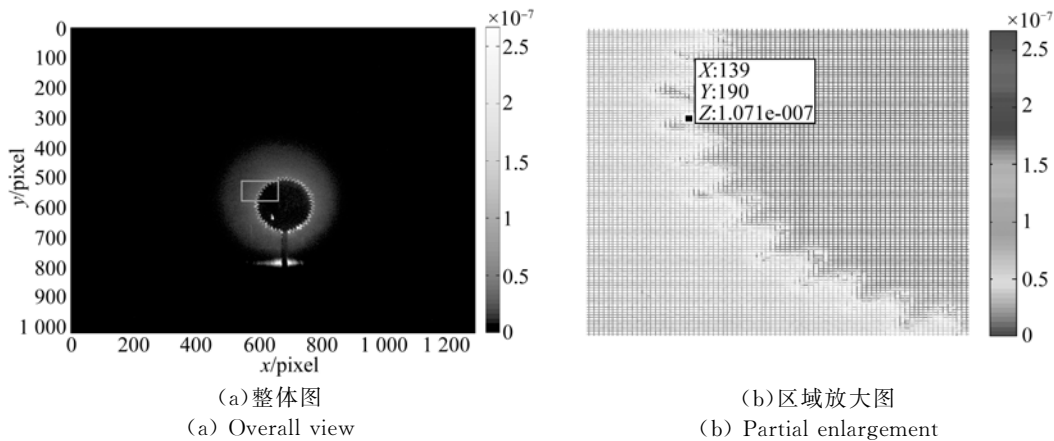


图 11 锯齿型外掩体衍射光强分布图

Fig. 11 Diffraction field of toothed occulter

## 5 讨 论

日冕的强度随太阳半径的增大而减小,大约由  $1.1R_{\odot}$  时的  $2 \times 10^{-5} B_{\odot}$  减小到  $330R_{\odot}$  时的  $10^{-13} B_{\odot}$  量级<sup>[28]</sup>。SPORT 计划的大视场日冕仪在近日点和远日点的视场分别为  $8 \sim 72R_{\odot}$  和  $24 \sim 215R_{\odot}$ ,  $8R_{\odot}$  时日冕亮度大约为  $10^{-10} B_{\odot}$  量级<sup>[2-3]</sup>, 而  $215R_{\odot}$  时日冕亮度大约为  $10^{-13} B_{\odot}$  量级<sup>[28]</sup>。通常外掩式日冕仪的外掩体与外窗口衍射造成的杂散光主要包括两方面:

(1) 外掩体本身的衍射光到达像面的强度,此次设计的大视场日冕仪的外掩体在日冕仪物镜处造成的衍射光在  $10^{-7} B_{\odot}$  量级。在内掩体对外掩体共轭成像的遮拦作用下衍射光强会大幅度降低。通常遮拦的比例为  $1.1 \sim 1.3$  倍,对应大约降低  $2 \sim 3$  个量级,若选用  $1.3$  倍遮拦可以达到  $10^{-10} B_{\odot}$ 。这部分衍射光通常集中在内视场边缘,故应当使它低于内视场边缘附近的日冕亮度。SPORT 日冕仪在近地点时内视场的亮度为  $10^{-10} B_{\odot}$  量级<sup>[2-3]</sup>,与衍射光处于同一量级,仍需进一步抑制衍射杂散光。而由于这部分衍射光基本集中在内视场边缘,如果外掩体和内掩体的实际遮挡能将内视场减小到  $7R_{\odot}$ ,这样衍射光实际集中在内视场  $7R_{\odot}$  附近,避开了日冕仪的目标视场,则在  $8R_{\odot}$  处的衍射光强会得到进一步降低从而达到  $10^{-11} B_{\odot}$  级的杂散光抑制水平。此时需要考虑减小内视场带来的影响。当内掩体遮拦为  $7R_{\odot}$  时,在  $1.3$  倍遮拦情况下外掩体的实际遮拦

为  $5.4R_{\odot}$ ,  $5.4R_{\odot}$  处日冕亮度约为  $10^{-9} B_{\odot}$ <sup>[2]</sup>,远低于外掩体边缘的衍射光,故可以忽略其照射物镜表面等的散射光。而  $7R_{\odot}$  处的日冕光经大视场日冕仪成像后基本处于圆环形目标像的内部,不影响大视场日冕仪目标视场的成像。降低大视场日冕仪的实际内视场并未影响目标视场的成像质量,由此锯齿型外掩体的衍射光本身到达像面的强度满足大视场日冕仪杂散光抑制的要求。

(2) 外掩体的衍射光照射到物镜表面时其表面粗糙度和杂质造成的杂散光。日冕仪物镜为超光滑加工,总的表面粗糙度值低于  $0.2 \text{ nm}$ ,此时散射光强至少达到  $10^{-7}$  倍的入射光强<sup>[29]</sup>,故衍射光造成的散射光强度可以达到  $10^{-14} B_{\odot}$ ,这部分光弥散在像面上,应低于外视场的日冕亮度。在远地点处日冕仪的外视场为  $215R_{\odot}$ ,日冕亮度为  $10^{-13} B_{\odot}$ <sup>[28]</sup>。故由衍射光照射物镜表面造成的散射光水平满足大视场日冕仪外视场处杂散光抑制的要求。

## 6 结 论

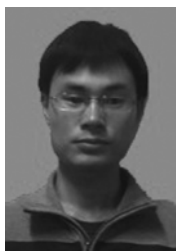
本文为大视场日冕仪设计了一种锯齿型外掩体。应用半无限矩形法模拟得到了最优化的锯齿型外掩体形状,并从理论上证明了最优化形状的锯齿型外掩体的衍射光强可以达到  $10^{-8} B_{\odot}$  量级。通过实验观测了此外掩体的衍射光强,得到衍射光强可以达到  $10^{-7} B_{\odot}$  量级,比目前外掩体最低的衍射光强抑制水平提高了一个量级。此锯齿型外掩体衍射光强可以达到大视场日冕仪的杂散光抑制的要求。

## 参考文献:

- [1] WU J, SUN W, ZHENG J, *et al.*. Imaging interplanetary CMEs at radio frequency from solar polar orbit [J]. *Advances in Space Research*, 2011, 48(5):943-954.
- [2] BRUECKNER G E, HOWARD R A, KOOMEN M J, *et al.*. The large angle spectroscopic coronagraph (LASCO) [J]. *Sol. Phys.*, 1995, 162: 357-402.
- [3] HOWARD R A, MOSES J D, SOCKER D G. Sun earth connection coronal and heliospheric investigation (SECCHI) [J]. *SPIE*, 2000, 4139: 259-283.
- [4] 杨林,李达,崔天刚,等. 空间太阳望远镜在紫外波段成像检测中的杂散光测量和消除 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(7): 1456-1463.
- YANG L, LI D, CUI T G, *et al.*. Measurement and elimination of stray light from space solar telescopes for imaging test at UV band [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7):1456-1463. (in Chinese)
- [5] 孙可,江厚满,程湘爱. 强光辐照下主镜表面散射引起的视场内杂光分布 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(2): 493-499.
- SUN K, JIANG H M, CHENG X A. Distribution of in-field stray light due to surface scattering from primary mirror illuminated by intense light [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 493-499. (in Chinese)
- [6] 王一凡,李零印. 白天观测空间目标的恒星光电探测系统的杂散光抑制 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(12): 2854-2861.
- WANG Y F, LI L Y. Stray light suppression of star photoelectric detection system for space target in daytime [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 2854-2861. (in Chinese)
- [7] 李晓平,沙晟春,胡亭亮. 长焦距离轴三反光学系统杂散光的抑制 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(11): 2603-2608.
- LI X P, SHA SH CH, HU T L. Suppression of stray light for long focal length off-axis three-mirror optical system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11): 2603-2608. (in Chinese)
- [8] 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]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11): 2331-2337. (in Chinese)
- [9] 赵飞,王森,邓超,等. 兴隆 1 m 光学望远镜消杂散光系统 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(3): 513-520.
- ZHAO F, WANG S, DENG CH, *et al.*. Stray light control lens for Xing Long 1-meter optical telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3): 513-520. (in Chinese)
- [10] 赵飞,王森. 兴隆 1 m 光学望远镜杂散光效应研究 [J]. *天文研究与技术: 国家天文台台刊*, 2010, 7(2): 158-167.
- ZHAO F, WANG S. Study of stray light for the Xinglong 1-meter optical telescope [J]. *Astronomical Research & Technology*, 2010, 7(2): 158-167. (in Chinese)
- [11] EVANS J W. A photometer for the measurement of sky brightness near the sun [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1948, 38: 1083-1085.
- [12] KOUTCHMY S, BELMAHDI M. Improved measurements of scattered light level behind occulting systems [J]. *J. Optics*, 1987, 18: 265-269.
- [13] LENSKY A V. Theoretical assessment of efficiency of coronagraph external occulting systems [J]. *Sov. Astron.*, 1981, 25(3): 366-372. (in Russian)
- [14] BOUT M, LAMY P, MAUCHERAT A, *et al.*. Experimental study of external occulters for the large angle and spectrometric coronagraph 2: LASCO-C2 [J]. *Appl. Opt.*, 2000, 39: 3955-3962.
- [15] FORT B, MOREL C, SPAAK G. The reduction of scattered light in an external occulting disk coronagraph [J]. *Astron. Astrophys.*, 1978, 63: 243-246.
- [16] VANDERBEI R J, SPERGEL D N, KASDIN N J. Spiderweb masks for high-contrast imaging [J]. *Astrophys. J.*, 2003, 590: 593-603.
- [17] VANDERBEI R J, CADY E J, KASDIN N J. Optimal occulter design for finding extrasolar planets [J]. *Astrophys. J.*, 2007, 665: 794-798.
- [18] CASH W. Detection of earth-like planets around nearby stars using a petal-shaped occulter [J]. *Nature*, 2006, 422: 51-53.
- [19] CADY E, KASDIN N J, SHAKLAN S. Designing asymmetric and branched petals for planet-finding occulters [J]. *Opt. Express*, 2010, 18(2): 523-543.
- [20] CADY E. Boundary diffraction wave integrals for diffraction modeling of external occulters [J]. *Opt. Express*, 2012, 20: 15196-15208.

- [21] VERROI E, FRASSETTO F, NALETTO G. Diffraction effects in a giant saw-toothed edge externally occulted solar coronagraph [J]. *SPIE*, 2008, 7010: 70103Q.
- [22] VERROI E, FRASSETTO F, NALETTO G. Analysis of diffraction from the occulter edges of a giant externally occulted solar coronagraph [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2008, 25: 182-189.
- [23] SUN M Z, ZHANG H X, BU H Y, *et al.*. Computation of the diffracted field of a toothed occulter by the semi-infinite rectangle method [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2013, 30 (10): 2140-2149.
- [24] 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 coronagraph [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17 (10): 2371-2376. (in Chinese)
- [25] WILSON D W, MAKER P D, TRAUGER J T, *et al.*. Eclipse apodization; realization of occulting spots and Lyot masks [J]. *SPIE*, 2003, 4860: 0277-786X.
- [26] 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)
- [27] HECHT E. *Optics* [M]. 4th ed. New York: International Ed. Adelphi University, 2002: 498.
- [28] 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.
- [29] NELSON P G. *An Analysis of Scattered Light in Reflecting and Refracting Primary Objectives for Coronagraphs* [R]. COSMO Tech Note 4. Boulder, CO, High Altitude Observatory, 2007.

## 作者简介:



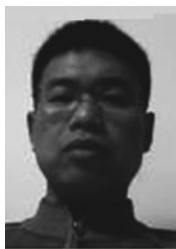
孙明哲(1984—),男,吉林磐石人,博士研究生,2007年于吉林大学获得本科学位,2011年于华南师范大学获得硕士学位,主要从事杂散光分析与抑制方面的研究。E-mail: sunmingzhe2003@126.com

## 导师简介:



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年于长春光机所获得硕士学位,主要从事光学中应用基础的研究工作。E-mail: luzw@ciomp.ac.cn

## 通讯作者:



张红鑫(1978—),男,河北邯郸人,博士,副研究员,2001年,2004年于长春理工大学分别获得学士、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: firsthongxin@163.com