

利用乳白玻璃测量日冕仪平场的方法

白先勇^{1,2}, 王怡然³, 张志勇^{1,2}, 冯志伟^{1,2}, 邓元勇^{1,2}, 刘四清³, 季凯帆⁴,
郭晶晶^{1,2}, 张 洋^{1,2}

¹中国科学院太阳活动重点实验室, 北京 100012;

²中国科学院国家天文台, 北京 100012;

³中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190;

⁴中国科学院云南天文台, 云南 昆明 650500

摘要 平场改正可以扣除日冕仪成像过程中的不均匀性,是其数据定标的必要步骤。提出一套基于乳白玻璃测量日冕仪平场的装置和方法,并开展了相关模拟和实地测量以验证该方法的可行性。首先,模拟了太阳经乳白玻璃后在日冕仪观测视场内扩散光源的均匀性,模拟结果表明其均匀度为 99.98%,十分接近理想的均匀面光源。其次,测量了 12 cm 地基日冕仪的平场,测量结果显示该方法可以测量出日冕仪成像的不均匀性,如探测器的条纹。平场改正后的结果符合日冕和天空背景亮度的径向分布。最后,为评价利用乳白玻璃测量平场的有效性,将其和天空平场进行了对比,二者相关系数为 99.94%,线性拟合斜率为 1,具有极强的相关性。

关键词 光学器件; 扩散片; 日冕仪; 图像分析; 平场; 光度测量

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0523002

Flat-Field Measurement Method of Coronagraph with Opal Glass

Bai Xianyong^{1,2}, Wang Yiran³, Zhang Zhiyong^{1,2}, Feng Zhiwei^{1,2},
Deng Yuanyong^{1,2}, Liu Siqing³, Ji Kaifan⁴, Guo Jingjing^{1,2}, Zhang Yang^{1,2}

¹Key Laboratory of Solar Activity, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;

²National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;

³National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

⁴Yunnan Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming, Yunnan 650500, China

Abstract Flat-field correction can remove the non-uniformity in the coronagraph imaging process, which is a necessary step in its data calibration. The device and method for measuring flat-field of coronagraph based on an opal glass are proposed in this paper. Some simulations and site measurements are carried out to verify the feasibility of this method. First of all, the uniformity of the diffused sunlight passing through the opal glass in the field of view of the coronagraph is simulated. The simulation result shows that its uniformity is 99.98%, which is very close to the ideal and uniform area source. Moreover, the flat-field of the 12 cm ground-based coronagraph is measured. The observational result indicates that the non-uniformity of the coronagraph imaging can be observed with this method, such as the fringes on the detector. The result after flat-field correction agrees well with the radial distribution of the background luminance of coronagraph and sky. Lastly, the flat-fields from the opal glass are compared with the sky flats in order to evaluate the validity of flat-field measurement with opal glass. Their correlation coefficient is 99.94% and the corresponding linear fitting slope is 1, which shows a strong correlation.

Key words optical devices; diffuser; coronagraph; image analysis; flat-fields; photometry measurement

OCIS codes 230.1980; 120.5820; 100.2960; 350.1260

收稿日期: 2016-11-11; **收到修改稿日期:** 2017-01-12

基金项目: 国家自然科学基金(11427901, 11503063, 11427803, 11273034, 11373040, 11573012)、中国科学院先导 B 项目(XDB09040200)、中国科学院太阳活动重点实验室开放课题(KLSA201514, KLSA201515, KLSA201616)

作者简介: 白先勇(1988—),男,博士研究生,主要从事太阳观测数据定标方面的研究。E-mail: xybai@bao.ac.cn

导师简介: 邓元勇(1965—),男,博士,研究员,主要从事太阳物理和天文仪器方面的研究。E-mail: dyy@bao.ac.cn

1 引 言

当今,无论是地基还是空间的太阳观测设备,基于日冕仪的日冕观测都是其重要构成部分。日冕观测对日冕物理、空间物理、空间环境监测预警和预报研究等都具有十分重要的意义。日冕对应太阳大气的最外层,根据其形成机制不同可以分为发射线日冕和白光日冕。相应地,日冕仪根据其观测对象的不同可以分为发射线日冕仪和白光日冕仪,其中发射线日冕仪在发射线极窄的波长范围内观测日冕,白光日冕仪在较宽的波长范围内观测日冕。日冕的亮度沿径向呈指数衰减,在 $1.3R_{\odot}$ (R_{\odot} 指太阳半径) 处其亮度约为日面亮度的百万分之一^[1]。因日冕亮度相比日面亮度差别较大,观测时需要掩体遮挡日面的辐射,将日面亮度减少到小于日冕亮度的级别,进而提取出日冕信息。根据掩体位置的不同又可以分为内掩式和外掩式日冕仪。当前我国自主研制的 12 cm 地基日冕仪为内掩式日冕仪,观测视场为 $\pm(1.3\sim 3)R_{\odot}$ [$\pm(0.347^{\circ}\sim 0.8^{\circ})$], $\pm 1.3R_{\odot}$ 内的日面辐射被日冕仪内的掩体、吸光槽和 Lyot 光阑等结构吸收^[2]。

日冕仪的数据定标旨在扣除观测数据中的暗场和平场等仪器效应,获得真实的日冕图像,是用户基于日冕仪数据开展科学和应用研究的基础。平场描述望远镜系统引起的成像非均匀性,可能来自光学元件的灰尘、光学元件制造的非均匀性、探测器不同像元响应的非均匀性^[3-4]等。事实上,不仅仅是日冕仪,几乎所有的天文望远镜在数据定标中都需要扣除平场的影响。平场测量的关键是在观测视场内获得均匀面光源。例如,夜天文观测中获得均匀面光源的方法有:将光源照射在漫反射幕布上散射出均匀的面光源,即圆顶平场^[5];在日出或日落前后背对太阳的方向选择一块无云、均匀的天区,将该天区视作均匀面光源,即天空平场^[6]。而太阳观测中,太阳为面源,既存在临边昏暗现象,也存在米粒等现象,不是均匀面光源。为了获得均匀面光源,可以选取日面中心宁静区(小视场如 $3'$),随机移动望远镜,通过多帧叠加获得均匀面光源,许多大口径太阳望远镜观测视场较小,均使用该方法测量平场^[7],但其不适用于大视场观测,如全日面太阳或日冕观测。

利用非均匀面光源,也可得到平场信息。Kuhn 等^[6,8]于 1991 年提出可以移动望远镜测量几帧太阳像在探测器不同位置的观测图像,然后计算不同帧图像之间的位移。假设观测过程中太阳的强度和形态不发生变化,对齐后两帧图像强度之比等于探测器不同位置的平场之比,基于此原理可以利用多张图像迭代出平场,该方法被广泛用于全日面的观测中,如深空太阳天文台上的日震磁像仪^[9],大气成像阵列^[10]等。

上述平场测量方法是太阳观测常用的方法,但是无法应用在日冕仪的平场测量中。对于选取日面中心宁静区,随机移动望远镜的方法仅可用于小视场观测,12 cm 地基日冕仪总视场约 $1.6^{\circ}(\pm 0.8^{\circ})$,该方法不再适用;利用 Kuhn 提出的方法也存在一些困难,原因是该方法需要移动太阳像,可能会导致太阳偏出掩体,无法进行日冕观测。此外,太阳被掩体遮挡,日面位置无法准确估计,难以计算不同帧图像之间的位移量。夜天文观测用到的圆顶平场、天空平场可以用于日冕仪的平场测量。

由此可见,日冕仪平场测量可用的方法只有圆顶平场和天空平场。圆顶平场需要额外的人造光源和投影幕布,实施起来比较麻烦。既然平场测量的关键在于在观测视场内获得均匀面光源,且圆顶平场和天空平场都是基于多次散射的方法获得均匀面光源,其扩散器件分别为投影幕布和大气。在诸多类型的扩散器件中,经乳白玻璃扩散后的光源更接近朗伯光源,且乳白玻璃为透射式的扩散器件。光源需要放在乳白玻璃前方,因为日冕观测的观测目标是太阳,位置在乳白玻璃正前方,恰好满足该条件。太阳经乳白玻璃后,在后方的日冕仪观测视场内扩散出均匀面光源,可以直接用于平场测量。基于此,本文提出一种新的平场测量方法,利用太阳经乳白玻璃后可以在日冕仪观测视场内扩散出均匀面光源的特性,测量日冕仪的平场。首先,模拟太阳经乳白玻璃后在日冕仪视场内扩散光源的均匀性。其次,展示乳白玻璃测量平场的方法和结果。最后,和天空平场的测量结果进行对比,验证乳白玻璃测量日冕仪平场的有效性。

2 模拟太阳经乳白玻璃后在日冕仪观测视场内扩散光源的均匀性

不同类型的扩散器件中,经乳白玻璃扩散后的光源更接近朗伯光源^[11],并且乳白玻璃造价低廉,工艺成熟,是日冕仪平场测量首选的扩散器件。乳白玻璃选用的是埃特蒙特公司的产品,大小为 $150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ 。为测试其性能,委托中国计量科学研究院测量了乳白玻璃的漫透射比,测量扩散角度范围 $\pm 80^{\circ}$,

每隔 1° 进行一次测量,共有 161 个测量值。测量的漫透射比随扩散角的变化趋势参见图 1 的十字线,实线是归一化后的理论余弦曲线。二者对比可见,乳白玻璃在小扩散角内($\pm 30^\circ$)十分接近余弦分布,在大扩散角时稍微偏离余弦分布。

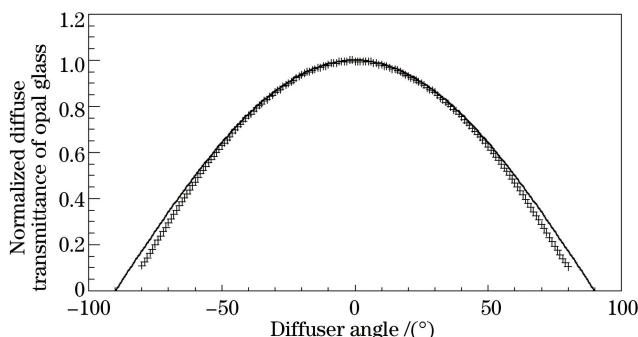


图 1 乳白玻璃在不同扩散角下归一化的漫透射比

Fig. 1 Normalized diffuse transmittance of the opal glass at different diffuse angles

太阳经乳白玻璃后的扩散光源可以用太阳卷积乳白玻璃的扩散性质求得,利用二维卷积公式模拟了太阳经乳白玻璃后在日冕仪观测视场内扩散光源的形态分布,卷积程序使用的是 Interactive Data Language 自带的 convol.pro。因测量乳白玻璃漫透射比时只选用了 $\pm 80^\circ$,并没有覆盖整个扩散范围 $\pm 90^\circ$,所以模拟时选用理论的二维余弦函数来描述乳白玻璃的扩散性质,每个维度角度范围为 $\pm 90^\circ$ 。太阳强度分布选用色球像,观测波长为 656.28 nm ($H\alpha$ 谱线),观测数据来自中国科学院国家天文台怀柔太阳观测基地太阳磁场和活动望远镜^[12]。太阳有效视场 $\pm 0.267^\circ$ ($\pm 16'$) 内的值为实测值,其他角度值为 0。选用色球像的原因是色球特征较多,光强分布不均匀性较高,可以更好地显示太阳经乳白玻璃后在日冕仪观测视场内扩散光源的均匀性。模拟的结果如图 2 所示,图中显示的视场和 12 cm 地基日冕仪观测视场一致 [$\pm(0.347^\circ \sim 0.8^\circ)$]。由图 2(a)可以看出未加乳白玻璃时,日冕仪在观测视场内 [$\pm(0.347^\circ \sim 0.8^\circ)$] 观测的是日冕像,在掩体内遮挡的即为太阳像,因日冕亮度和日面亮度相差很大(百万分之一的量级),所以模拟时日面外的强度值可以近似看作 0。由图 2(b)可见,太阳色球像经乳白玻璃扩散后,在 $\pm(1.3 \sim 3)R_\odot$ 的视场内扩散的光源没有色球的暗条、谱斑等高频细节,太阳的临边昏暗特征也基本消失,扩散后的光源强度分布更接近乳白玻璃本身的扩散轮廓,在 $\pm(0.347^\circ \sim 0.8^\circ)$ 小角度范围内,光源分布比较均匀,强度变化很小。为定量描述太阳经乳白玻璃后在日冕仪视场内扩散光源的均匀性,根据国家照度标准对均匀度的定义,均匀度为最小亮度除以平均亮度^[13]。均匀度等于 1,代表光源十分均匀,偏离 1 的程度越大,均匀性越差。利用上述定义计算的均匀度为 99.98%,可见太阳经乳白玻璃后在日冕仪观测视场内扩散光源的均匀性十分理想,可以看作均匀面光源,用于日冕仪的平场测量。

此外,还可以估算太阳经乳白玻璃后在日冕仪视场内扩散光源的透射率,理论模拟仍然采用二维余弦函数。在归一化的二维余弦函数中取出日冕仪视场 $\pm(1.3 \sim 3)R_\odot$ 对应的范围,将该范围值求和,其近似等于透射率,实际透射率还应考虑乳白玻璃的整体透射率,约为 0.4^[11],最终计算得到太阳经乳白玻璃后在日冕

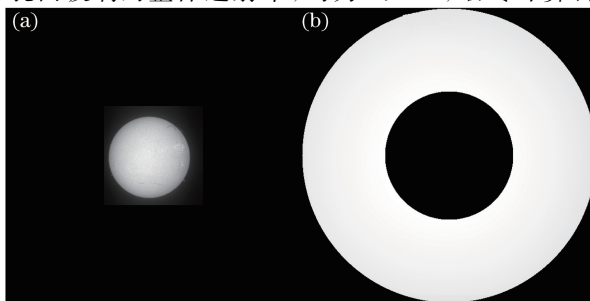


图 2 (a) 观测的太阳像; (b) 太阳经乳白玻璃后在日冕仪视场内扩散的光源像

Fig. 2 (a) Observed solar image; (b) diffused light source image of sunlight passing through opal glass in field of view of coronagraph

仪视场内扩散光源的透射率约为 5.56×10^{-5} 。在 $1.5R_{\odot}$ 处日冕亮度约为 $(10^{-6} \sim 10^{-7})B_{\odot}$, B_{\odot} 为日面亮度。太阳经乳白玻璃后在日冕仪视场内的扩散光源亮度接近日冕亮度,平场观测和常规日冕观测时的曝光时间基本一致。

3 测量方法和结果

3.1 利用乳白玻璃测量平场的方法

利用乳白玻璃测量日冕仪平场时将乳白玻璃置于物镜前方,示意图如图 3 所示。因观测目标是日冕,观测时日冕仪指向太阳,太阳光经乳白玻璃扩散后的均匀光源进入日冕仪的光学系统,经日冕仪内的视场光阑选择出 $\pm(1.3 \sim 3)R_{\odot}$ 的视场,经滤光系统选择出观测的波段,最后成像在探测器上,并经图像采集系统采集平场图像。

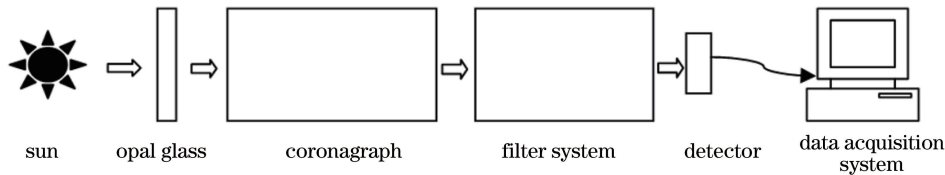


图 3 乳白玻璃测量日冕仪平场的示意图

Fig. 3 Schematic diagram of flat-field measurement of coronagraph with opal glass

利用乳白玻璃测量平场的步骤为:

- 1) 指向太阳,测量日冕像 S ,关闭镜盖,和日冕观测曝光时间一致,采集日冕像对应的暗场像 d ;
- 2) 将乳白玻璃置于日冕仪物镜前方,测量多帧平场像 f_i ;
- 3) 将乳白玻璃移出,关闭日冕仪镜盖,和平场观测曝光时间一致,采集多帧平场像对应的暗场像 d_i 。

平场数据的处理步骤为:

- 1) 依次读取平场像对应的暗场像 d_i ,对这些暗场像求平均抑制噪声,得到最终暗场数据 d_f ;
- 2) 依次读取各帧平场像 f_i ,对每帧平场像减去相应的暗场数据 d_f ;
- 3) 求平均并归一化,得到最终平场数据 f 。

3.2 日冕仪平场测量和改正结果

实际观测中,位于无穷远的日冕 O 经日冕仪在探测器接收的信号 S 为

$$S = O \times f + d + n, \quad (1)$$

式中 f 为日冕仪的平场, d 为暗场, n 为测量噪声。不考虑测量噪声 n ,由(1)式可得日冕仪观测的日冕数据的平场改正公式为

$$O = (S - d)/f. \quad (2)$$

12 cm 地基日冕仪采用的探测器来自美国 PI 公司,型号是 PIXEL2048,像元数 $2048 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$,像元大小 $13.5 \mu\text{m} \times 13.5 \mu\text{m}$,最高采样速率 2.5 frame/s ,探测器采用电制冷,最低制冷温度达 $-55 \text{ }^\circ\text{C}$ 。平场测量实验时间为 2015 年 9 月 30 日,地点在西藏羊八井国际宇宙射线观测站。图 4 是观测的原始日冕像[图 4(a)]和平场改正像[图 4(b)],原始日冕像的曝光时间为 0.4 s。由图 4 可见,原始日冕像中有一些高频条纹,日冕仪用的探测器在实验室检测时也存在类似的条纹,说明这些条纹主要来自探测器系统,非真实的日冕信息。平场改正后条纹基本消失,说明平场测量和改正有效。

为更直观地展示平场改正前后的效果,在原始日冕像中选择两个切片[图 4(a)],一个横向切片,对应图像中心位置,一个竖向切片,对应条纹区域。这两个切片平场改正前后的效果分别如图 5(a)和图 5(b)所示,横轴为切片上的像元数,纵轴为探测器的读数,实线为原始日冕像,虚线为乳白玻璃平场改正像。由图 5(a)可见,原始日冕像中掩体外沿径向方向的亮度先增加后减弱,这和天空背景或日冕亮度沿径向减弱的事实相悖。平场改正后,图像亮度沿径向逐渐减弱,说明平场改正方法有效。由图 5(b)可见,平场改正后一些探测器的条纹造成的图像亮度抖动基本消失。上述平场改正时用到的平场数据如图 6(a)所示,平场像曝光时间为 6 s,因观测时间限制,仅仅采集了 7 frame 平场像来计算平均平场,归一化时选用的是 $\pm(1.3 \sim 3)R_{\odot}$ 视场

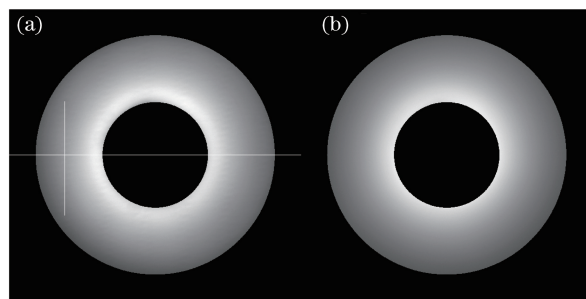


图 4 (a) 原始日冕像和 (b) 乳白玻璃平场改正像

Fig. 4 (a) Original coronal image and (b) flat-field correction image with opal glass

内所有像元亮度的最大值。图 6 中可以看出平场中包含一些高频的条纹和整个光路的不均匀性(如平场 f 亮度在掩体边缘附近较弱)。这些条纹、不均匀性和原始日冕像[图 4(a)]的分布特征类似,所以平场改正后能得到图 5(a)和图 5(b)所示的改正结果。

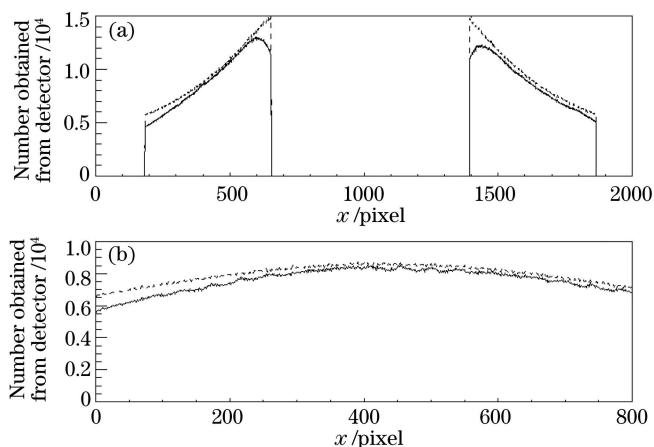


图 5 (a) 横线 and (b) 竖线对应区域的原始日冕像和乳白玻璃平场改正像

Fig. 5 Original coronal image and flat-field correction image with opal glass corresponding to regions in (a) horizontal line and (b) vertical line

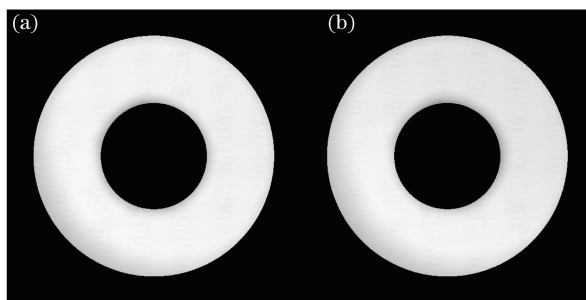


图 6 (a) 乳白玻璃测量的平场; (b) 天空平场

Fig. 6 (a) Flat fields measured with the opal glass; (b) sky flats

3.3 乳白玻璃测量平场和天空平场的对比

为验证乳白玻璃测量平场的有效性,采用交叉对比的方法,将其和天空平场的测量结果进行了对比,归一化后的天空平场如图 6(b)所示。采集天空平场时选择和太阳相差 90° 的无云天空,曝光时间为 120 s,因曝光时间较长只拍摄了 4 frame 天空平场,扣除暗场后求平均,归一化也是用的 $\pm(1.3\sim 3)R_\odot$ 。视场内所有像元亮度的最大值。由天空平场可见,在掩体边缘附近,其亮度也存在减弱的现象,平场中存在一些高频的探测器条纹。对比乳白玻璃测量的平场[图 6(a)]和天空平场,可以发现二者细节基本一致,说明二者平场测量的形态一致。为定量对比二者的测量结果,将乳白玻璃测量的平场和天空平场做了散点图,结果如图 7 所

示。图 7 中横轴代表乳白玻璃测量的平场,纵轴代表天空平场,画图前需将每个二维的平场图像转化成一维数组。若乳白玻璃测量的平场和天空平场完全一致,二者的数值相等,此时在散点图中将 45° (沿着 x 轴逆时针方向为正)对角线分布,如果二者值完全相反,在散点图中沿着 135° 对角线分布。由图 7 可见,散点多数分布在 45° 对角线附近,说明两种平场的测量结果基本一致,偏离对角线的散点表示平场不一致的区域,其中对角线上方的区域代表天空平场值略大,对角线下方的区域代表乳白玻璃测量的平场值略大。二者相关系数为 99.94%,此外还进行了线性拟合,得到的拟合结果为

$$f_s = -0.0015 + 1.006 \times f_o, \quad (3)$$

式中 f_s 代表天空平场, f_o 代表乳白玻璃测量的平场。两种方法测量的平场无论是相关系数还是线性拟合结果均接近 1,说明利用乳白玻璃测量的平场比较准确,验证了该方法的可行性和有效性。

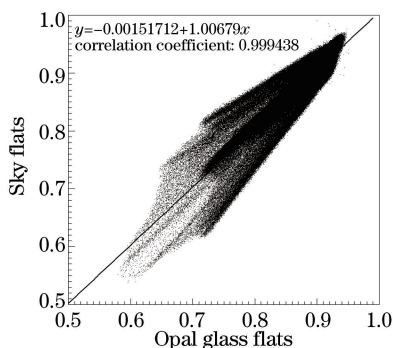


图 7 乳白玻璃测量的平场和天空平场的散点图

Fig. 7 Scatter diagram of opal glass measured flats and sky flats

4 分析与讨论

利用乳白玻璃测量平场时,日面的中心位置和乳白玻璃的安装角度均会影响太阳经乳白玻璃后在日冕仪观测视场内扩散光源的均匀性。模拟太阳经乳白玻璃后在日冕仪视场内扩散光源的均匀性时假设日面中心位置与掩体中心重合,乳白玻璃安装时的光轴方向和日冕仪光轴方向一致,所以此时扩散的面光源亮度分布关于掩体中心对称。日面中心位置不在掩体中心,或者乳白玻璃安装时光轴方向和日冕仪光轴方向存在些许偏差,将会导致观测视场内扩散的光源亮度分布不再对称,影响其均匀性。利用同样的模拟方法,模拟了日面中心和掩体中心位置不重合、乳白玻璃安装光轴方向和日冕仪光轴一致时观测视场内扩散光源的均匀性。因日冕仪的掩体为 $\pm 1.3R_\odot$,所以日冕观测时太阳在横轴和纵轴方向偏离的最大角度约 $0.3R_\odot$,对应 0.08° ,此时扩散光源的均匀度为 99.96%。当日面中心和掩体中心位置重合,乳白玻璃安装的光轴方向和日冕仪光轴方向存在 5° 的偏差时,观测视场内扩散光源的均匀度为 99.88%。实际装调时,乳白玻璃安装的光轴方向和日冕仪光轴方向的偏差一般小于 5° ,所以无论是日面中心和掩体中心的位置存在些许偏差,还是乳白玻璃安装时和日冕仪光轴方向存在些许的安装误差,太阳经乳白玻璃扩散后在日冕仪视场内扩散光源的均匀度均大于 99%,此时仍满足均匀面光源的条件。

利用乳白玻璃测量平场,尽管光源均匀性较好,但也存在一些问题,如引起额外的杂散光。原因是日冕观测时进入筒壁的光多数是来自太阳附近的平行光,这些光发散角很小,而加入乳白玻璃后,这些光被扩散到各个角度,照射在筒壁上,增加了日冕仪的杂散光。假如日冕仪的消杂散光能力较差,视场外的杂散光进入观测视场,最终测量的平场中存在杂散光的干扰。庆幸的是,日冕仪设计时采用了多种消杂散光的方法,其杂散光抑制水平很高,但仍不敢保证平场观测和日冕观测时杂散光的影响一致。从乳白玻璃测量的平场和天空平场的对比可以看出,二者的散点图并不都沿对角线分布,某些点偏离对角线,偏离较小的散点可以认为是测量噪声的影响,偏离较大的散点可能是乳白玻璃测量平场时受较强杂散光影响的结果。当然, 1.6° ($\pm 3R_\odot$)视场内天空亮度也不是绝对的均匀面光源,而且没有选择晨昏时背对太阳的天空,而是选择和太阳相差 90° 的天空,这会进一步增加天空亮度的不均匀性,二者的差异也无法排除天空亮度不均匀性的影响。

5 结 论

针对我国在研的 12 cm 地基日冕仪,设计了一套基于乳白玻璃测量日冕仪平场的装置和方法。模拟了太阳经乳白玻璃后在日冕仪视场内扩散光源的均匀性,模拟结果表明其均匀度为 99.98%,十分接近理想的均匀面光源。即使在日面中心偏离掩体的中心位置,乳白玻璃安装光轴方向和日冕仪光轴方向存在 5° 偏差时,光源的均匀度仍优于 99%。此外,利用这套装置测量了 12 cm 地基日冕仪的平场,平场中包括日冕仪系统低频的不均匀性,如掩体附近光强偏弱以及探测器的高频条纹,平场改正后的图像不仅消除了探测器的条纹,而且符合日冕和天空背景亮度的径向分布。为进一步评价乳白玻璃测量平场的有效性,将其和天空平场进行了对比,二者的形态分布基本一致,定量研究表明二者相关系数为 99.94%,线性拟合斜率为 1,具有极高的相关性。尽管利用乳白玻璃测量日冕仪平场可能会引起额外的杂散光,但该方法相比天空平场,开展日冕观测时就可以开展平场测量,观测时间比较灵活,曝光时间也比天空平场短(文中数据天空平场曝光是乳白玻璃测量平场的 20 倍,利用晨昏蒙影平场曝光时间更长),搭建和测量方法也十分简便,具有较高的实用价值。接下来,还需要进一步分析乳白玻璃引起额外杂散光的影响以及对该方法能否应用到外掩式日冕仪中进行考量。

致谢 感谢中国科学院长春光学精密机械与物理研究所所有参与日冕仪试观测的人员在观测期间给予的帮助。

参 考 文 献

- [1] Zhang Zhenda. Corona physics[M]. Beijing: Science Press, 2000.
章振大. 日冕物理[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [2] Bu Heyang. The key technique for suppressing the stray light of ground-based coronagraph[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012: 1-2.
卜和阳. 地基日冕仪杂散光抑制的关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2012: 1-2.
- [3] Sun Hui, Xu Shuyan, Sun Shouhong, *et al.* Research on evaluation method of optical imaging sensors' photon response non-uniformity noise[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(4): 042302.
孙 慧, 徐抒岩, 孙守红, 等. 光电成像传感器光子响应非均匀性噪声评价方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(4): 042302.
- [4] Leng Hanbing, Yi Bo, Xie Qingsheng, *et al.* Adaptive nonuniformity correction for infrared images based on temporal moment matching[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0410003.
冷寒冰, 易 波, 谢庆胜, 等. 基于时域矩匹配的红外图像自适应非均匀性校正[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0410003.
- [5] Zhou Xu, Burstein David, Byun Yong-Ik, *et al.* Dome-diffuser flat-fielding for schmidt telescopes [J]. The Astronomical Journal, 2004, 127(6): 3642-3652.
- [6] Kuhn J R, Lin H, Loranz D. Gain calibrating nonuniform image-array data using only the image data[J]. Astronomical Society of the Pacific, 1991, 103(668): 1097-1108.
- [7] Wang Rui, Xu Zhi, Jin ZhenYu, *et al.* The first observation and data reduction of the multi-wavelength spectrometer on the new vacuum solar telescope[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2013, 13(10): 1240-1254.
- [8] Jongchul Chae. Flat-fielding of solar magnetograph observations using relatively shifted images [J]. Solar Physics, 2004, 221(1): 15-21.
- [9] Wachter R, Schou J, Rabello-Soares M C, *et al.* Image quality of the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) onboard the Solar Dynamics Observatory (SDO) [J]. Solar Physics, 2012, 275(1): 261-284.
- [10] Boerner Paul, Edwards Christopher, Lemen James, *et al.* Initial calibration of the Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO) [J]. Solar Physics, 2012, 275(1): 41-66.
- [11] Smith W J. Modern optical engineering[M]. New York: McGraw-Hill Companies, 2000: 108-197.
- [12] Zhang Hongqi, Wang Dongguang, Deng Yuanyong, *et al.* Solar Magnetism and the Activity Telescope at HSOS [J]. Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics, 2007, 7(2): 281-288.
- [13] 中华人民共和国建设部. 建筑照明设计标准 GB 50034-2004[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.