利用工程散射片测量太阳光谱观测设备的平场

白先勇^{1,2}, 冯志伟¹, 邓元勇^{1,2}, 张志勇^{1,2*}, 郭晶晶^{1,2}

1. 中国科学院国家天文台, 北京 100101;

2. 中国科学院太阳活动重点实验室, 北京 100101

* E-mail: polarimetry@163.com

收稿日期: 018-09-17; 接受日期: 2018-12-29; 网络版发表日期: 2019-08-12

国家自然科学基金(批准号: 11873062, 11427901, 11427803, 11773072, 11773038, 11773040, 11703042, U1731241)和中国科学院战略性先导科技专项(A类)(编号: XDA15320102, XDA15052200, XDA15010800)资助项目

摘要 针对大口径小视场的太阳光谱观测设备, 提出一套基于工程散射片的平场测量装置和方法. 根据太阳观测的视场角以及太阳光谱观测设备的参数, 确定了采用散射角为 1° 、强度分布为平顶的工程散射片. 模拟了日面中心宁静区 $189'' \times 189''$ 观测视场内太阳光经过工程散射片后, 在焦面处获得散射光场的均匀性, 结果表明其均匀度为99.24%, 接近理想的均匀面光源. 利用国家天文台怀柔太阳观测基地的太阳光谱观测系统开展了平场测量, 将工程散射片置于焦面附近, 可有效缩小工程散射片的口径, 同时利用小角度转动光栅有限位置的方法测量了该光谱观测设备的平场, 包括狭缝和光谱方向的不均匀性. 实测结果表明, 平场改正后狭缝方向的大尺度强度变化和日震磁像仪(HMI)相同视场的强度接近, 光谱方向高频的探测器脏点得到有效校正, 通过交叉定标和自定标验证了平场测量的有效性.

关键词 工程散射片, 太阳光谱仪, 图像分析, 平场, 光度测量

1 引言

光谱观测在太阳物理中起着举足轻重的作用, 利用光谱信息既可以诊断太阳大气的温度、密度、压力、速度等热力学参数, 也可以精确诊断磁场等电磁参数^[1]. 光栅光谱仪作为色散系统在太阳光谱观测中应用广泛. 天基太阳光谱观测如日本Hinode卫星上的偏振光谱仪(spectro-polarimeter)^[2], 地基太阳光谱观测设备如美国大熊湖太阳天文台1.6 m望远镜上配备的快速成像光谱仪(fast imaging solar spectrograph)^[3]. 国

内紫金山天文台、南京大学、云南天文台的太阳望远镜上均配备光栅光谱仪^[4-7].

然而由于存在各种仪器效应, 光谱仪获得的数据必须要经过平场、暗场、波长定标等标定流程后方可用于科学研究^[8,9]. 其中平场描述整个观测设备强度响应的非均匀性, 这种非均匀性可以来自光学元件制造的非均匀性、瑕疵、灰尘以及探测器响应的非均匀性^[10-16]等. 通常, 太阳光谱观测设备强度响应的不均匀性既包括空间方向(x)的不均匀性, 也包括光谱方向(λ)的非均匀性^[7]. 空间方向的不均匀性可能导致一些

引用格式: 白先勇, 冯志伟, 邓元勇, 等. 利用工程散射片测量太阳光谱观测设备的平场. 中国科学: 技术科学, Bai X Y, Feng Z W, Deng Y Y, et al. Flat-fielding of the solar spectrograph with the engineered diffuser (in Chinese). Sci Sin Tech, doi: 10.1360/N092018-00316

低对比度的目标不可分辨, 波长方向的不均匀性可能导致一些弱的吸收或发射线不可分辨. 可见, 平场测量和改正正是获得高精度光谱数据的必要环节.

对于空间方向的不均匀性, 平场测量的关键是在观测视场内获得均匀的面光源. 太阳观测中, 太阳不是均匀面源, 既存在临边昏暗等大尺度渐变特征, 也存在米粒等小尺度变化特征. 为获得均匀面光源, 可以选取日面中心宁静区(小视场如 $180''$), 随机移动望远镜指向实现图像抖动, 通过多帧叠加获得均匀面光源, 多数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]. 此外, 该方法也可以用于获得光谱方向的不均匀性. 其原理为: 通过多帧叠加可以消除小尺度太阳特征视向速度引起的波长漂移, 通过波长定标校正光谱弯曲后沿狭缝方向进行平均, 得到波长 λ 方向平均光谱, 扣除平均光谱后得到光谱方向的不均匀性^[7].

尽管上述方法在太阳光谱观测设备中应用广泛, 但也存在一定缺陷. 一方面, 对于大口径望远镜而言, 要实现随机抖动, 对机械结构要求较高; 另一方面, 随机抖动望远镜的频率较低, 多帧叠加需要的时间较长(通常几十分钟), 牺牲了宝贵的科学观测时间.

工程散射片(engineered diffuser)是近年来随着光束整形技术发展起来的新型散射器件. 相比传统的毛玻璃(透过率40%左右)和全息漫射体(散射轮廓为高斯轮廓), 工程漫射片可提供不同形状的非高斯强度分布. 该器件采用表面浮雕法在基底表面获得一定排列方式的微观散射结构, 可以获得高透过率(>90%)和更为均匀的小角度散射, 可望用于生成平场测量的均匀面光源. 目前, 国际上一些正在推进中的太阳光谱观测计划也提出采用工程散射片进行平场测量的方案, 例如美国高山天文台提出的大口径日冕仪计划(<https://www2.hao.ucar.edu/cosmo/documentation>). 但目前尚未见到相关的理论分析或实验验证等报道.

为此, 本文开展了工程散射片应用于大口径小视场太阳光谱观测设备平场测量的方法研究, 并利用国家天文台怀柔观测基地的太阳光谱观测系统完成了平场测量与改正实验. 将工程散射片置于第一焦面前, 太阳光经过工程散射片后, 平滑掉日面上的米粒等小尺度特征, 在观测视场内生成均匀的面光源, 用于获得空间方向的不均匀性; 同时可以平滑掉太阳小尺度特征引起的波长漂移, 用于获得光谱方向的不均匀性,

达到和随机移动太阳望远镜指向同样的效果. 此外, 通过工程散射片平滑日面特征, 替代了随机移动太阳望远镜的时间平滑, 可以有效缩短平场测量的时间. 工程散射片测量平场时只需移入望远镜光路系统, 无需对望远镜光路系统进行调整.

2 工程散射片测量平场的原理

2.1 会聚太阳光经工程散射片后散射斑对应视场的计算

对于大口径小视场的太阳光谱观测设备, 如果将工程散射片置于主镜前方, 需要的工程散射片口径和主镜的口径相当. 为缩小工程散射片的口径, 将其置于焦面前方, 此时的示意图如图1所示. 图中口径为 S_M , 焦距为 f 的望远系统成像于焦面处. 当工程散射片插入焦面前方, 与焦面距离为 d 的位置时, 需要的工程散射片最小口径为

$$\begin{aligned} S_E &= 2d \times \tan\left(\frac{S_M}{2 \times f}\right) \\ &= 2d \times \tan\left(\frac{1}{2 \times F_{\text{ratio}}}\right), \end{aligned} \quad (1)$$

式中, F_{ratio} 表示焦比. 可见工程散射片的最小口径与焦面的距离成正比, 与望远系统的焦比成反比, 焦比越大, 工程散射片的口径越小. 中心视场点经过散射角为 θ 的工程散射片后形成的散射斑大小 S 可由如下公式计算(<https://www.rpcphotonics.com/how-to-use-engineered-diffusers/>):

$$S = 2d \times \tan\frac{\theta}{2}. \quad (2)$$

可见, 散射斑的大小与距离 d 及散射角 θ 成正比. 假设观测目标的视场为 O_{FOV} , 其经过焦距为 f 的望远系统后, 在焦面上成的像大小为 $f \times \tan(O_{\text{FOV}})$, 此时散射斑大

图1 (网络版彩图)工程散射片在会聚光路中的使用示意图
Figure 1 (Color online) Schematic diagram of the engineered diffuser used in the converging optical path.

小 S 对应的观测目标的视场 S_{FOV} 为

$$S_{\text{FOV}} = \frac{S \times O_{\text{FOV}}}{f \times \tan(O_{\text{FOV}})} = \frac{2d \times \tan\frac{\theta}{2} \times O_{\text{FOV}}}{f \times \tan(O_{\text{FOV}})}. \quad (3)$$

引入工程散射片后, 焦面上中心视场由点散射为 $S \times S$ 大小的面, 对应视场为 $S_{\text{FOV}} \times S_{\text{FOV}}$, 工程散射片起到了模糊日面特征的效果, 通过降低观测目标的均匀度, 生成用于平场测量的均匀面光源. 散射斑对应视场 S_{FOV} 和散射角 θ 、与焦面的距离 d 、焦距 f 、观测目标的视场 O_{FOV} 均有关.

2.2 太阳光经工程散射片后在观测视场内散射光源的均匀性

当前, 国内尚未有生产工程散射片的公司, 本文用的工程散射片来自美国RPC Photonics公司(<https://www.rpcphotonics.com/how-to-use-engineered-diffusers/>), 尺寸为50 mm×50 mm×2.2 mm, 玻璃基底, 价格约4000元(更大口径需要定制, 最大口径220 mm×220 mm). 厂商提供的参数如下: 散射强度为100%均匀区域的散射角为1°, 强度在90%对应的散射角为1.4°, 强度在50%对应的散射角为1.7°. 为方便模拟, 对工程散射片的散射曲线进行了简化, 一维的散射曲线见图2. 其中图2(a)为模拟用到的太阳图像, 图2(b)为一维的散射曲线, 100%均匀区域为直线, 角度为1°, 两边区域为半高全宽0.7°的高斯函数, 和厂家提供的强度在50%对应的散射角为1.7°一致.

文中模拟用到的全日面太阳像来自太阳动力学天文台(Solar Dynamics Observatory)上的日震磁像仪(helioseismic and magnetic imager, HMI)观测的白光连续

谱^[17], 采集时间为2017年5月12日05时10分(世界时, 和下面实验时间相近). HMI空间分辨率1"左右, 未采用自适应光学和短曝光采集图像时, 地基观测的太阳像分辨率受视宁度的限制多在1"~3", 所以HMI观测的全日面像可以作为模拟的输入. 地面观测视宁度大于1"时, 宁静区图像的对比度比HMI观测得更差, 此时模拟以HMI的观测作为输入更为严苛. 模拟还用到工程散射片的理论散射轮廓, 与图2(b)不同之处在于模拟中输入的为二维散射轮廓. 工程散射片散射斑对应视场计算利用式(3), 具体参数为 $d=50$ mm, $f=2800$ mm, $O_{\text{FOV}}=0.53^\circ$ (与实验平台参数一致), $\theta=1^\circ$ 散射角每度对应的观测目标视场为61.13". 通常, 大口径太阳望远镜选用的视场较小, 约为180", 模拟时截取189"×189"大小的HMI日面中心宁静区, 记为 I_{HMI} .

模拟用的公式如下:

$$I_c = I_{\text{HMI}} * \text{PSF}_E, \quad (4)$$

式中, PSE_E 代表工程散射片的散射轮廓, $*$ 表示卷积. 输入的189"×189"大小的日面中心宁静区经过工程散射片卷积后输出的图像更加模糊, 卷积前后的结果见图2(a)和(c), 对比二者可以发现, 卷积后太阳宁静区不均匀的米粒特征消失, 整个视场内散射后的太阳光比较均匀. 为定量描述太阳光经工程散射片后在189"观测视场内散射光源的均匀性, 我们借用国家照度标准中对均匀度的定义: 均匀度=最小亮度/平均亮度^[18]. 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理论均匀度为99.24%(卷积前HMI该区域实测的均匀度12.5%), 可见, 工程散射片距离焦点50 mm时在焦面上散射的光

图2 (网络版彩图) (a) HMI观测的日面中心189"×189"区域的宁静区图像; (b) 工程散射片的散射曲线; (c) 模拟的焦面F1处太阳光经工程散射片后在相同视场内散射的光源像

Figure 2 (Color online) (a) Quiet region image near disk center observed by HMI; (b) the scatter profile of the engineer diffuser used in the simulation; (c) the simulated light source image of the scattered sunlight after the engineer diffuser in the same field of view as (a) at Focal plane F1.

源均匀性十分理想, 可以视作均匀面光源, 用于整个光谱观测系统的平场测量. 如想进一步增加散射光源的均匀度, 需要增加 S_{FOV} , 根据式(3), 此时可以增加工程散射片到焦面的距离 d 、增加工程散射片的散射角 θ 或减少望远镜的焦距 f . 值得一提的是, 上述模拟用的是工程散射片的理论轮廓, 限于加工工艺, 散射轮廓在模拟基础上存在小的抖动, 导致散射光源的均匀度降低. 此时, 可以将工程散射片进行旋转, 积分后的散射轮廓更接近模拟轮廓.

3 实验平台和数据采集

工程散射片测量平场的实验平台为怀柔太阳观测基地的太阳光谱观测系统, 其光路图如图3所示. 太阳光经定天镜引光系统进入口径280 mm的RC(Ritchey Chrétien system)式望远镜(焦比为10), 在焦点F1处形成直径约为26 mm的全日面太阳像(每毫米对应73.85"). 在工程散射片测量平场的实验中, 在焦点F1处安放了一个直径为2.8 mm的视场光阑, 选择的视场为206.78". 光线经视场光阑后进入一组准直、成像镜组, 其中准直镜焦距200 mm, 成像镜焦距400 mm. 像放大2倍后成像在光谱仪入射狭缝位置. 该光栅光谱仪为焦距3000 mm的Czerny-Turner系统. 探测器像元大小

7.4 μm , 实际使用像元数 $1\text{k} \times 0.7\text{k}$, 其中0.7k对应空间狭缝方向, 相应的空间分辨率为0.27"像元, 对应视场为189". 在太阳观测常用的H α 谱线(6563 Å)附近光谱分辨率约0.018 Å/像元.

当测量平场时, 工程散射片切入光路, 置于焦点F1前. 需要指出的是, 工程散射片不能置于焦点F1处, 否则其自身不均匀的特征也将成像在探测器上, 不再是均匀面光源. 工程散射片与焦点之间的距离、工程散射片的散射角度可以根据光路参数、对平场测量精度的要求进行优化. 实验中与焦点的距离 d 、焦距 f 、观测视场 O_{FOV} 和上面模拟用的参数一致, 此时太阳光经工程散射片后的均匀度为99.24%, 此时平场测量的理论精度约为1%.

平场采集模式工作流程如下: (1) 太阳光引入RC望远镜, 调节定天镜的指向, 全日面像中心和视场光阑的中心重合; (2) 工程散射片切入光路, 开始平场采集; (3) 依次转动光栅, 采集光谱在探测器不同位置的8帧图像 I_s^k ; (4) 采集相应的暗场图像 d_j ; 最后, 工程散射片移除光路, 恢复常规观测模式, 采集观测像 I_s 和相应的暗场像 d_s .

4 平场计算过程和改正效果

平场采集模式下小角度转动光栅得到的8帧图像见图4(a)~(h), 采集时间为2017年5月12日05时09分至05时13分(世界时), 当天天气晴, 无云. 图中吸收最深的区域即为H α 谱线(6563 Å)对应区域, 光谱色散方向为横轴, 狭缝方向为纵轴. 狭缝方向的不均匀性在图中表现为横条纹. 根据最左侧和最右侧的横条纹互相关对齐, 可以准确计算狭缝方向的倾斜, 垂直狭缝方向即为光谱色散方向. 二者之差为5像元, 对应0.29°. 图4中的图像已整体旋转0.29°, 此时转动光栅仅仅表现为横轴方向的移动. 将光谱图沿着狭缝方向平均, 可以抽取出一条高信噪比的光谱, 根据H α 谱线的线心, 可以计算不同帧图像之间的位移量. 每帧图像相对第一帧的偏移量分别为(0, 0), (-346, 0), (-170, 0), (-18, 0), (127, 0), (-622, 0), (-460, 0), (-295, 0).

尽管工程散射片可以保证观测视场内面光源的均匀性, 但不会在光谱方向进行平滑, 光谱色散方向仍然存在不均匀性, 所以图4中可以看到许多光谱. 换而言

图3 (网络版彩图) 怀柔太阳观测基地的太阳光谱观测系统光路图和工程散射片安放位置示意图(右上角小图为装在机械结构上的工程散射片)

Figure 3 (Color online) Optical configuration of the solar spectrograph installed at Huairou Solar Observing Station and the position of the engineer diffuser used for flat-field measurement.

图4 (网络版彩图)平场采集模式下, 转动光栅采集的8帧图像

Figure 4 (Color online) Eight frames acquired with the flat-fielding observing mode.

之, 对于光谱观测, 加入工程散射片后仅保证狭缝方向均匀, 光谱色散方向仍然不均匀, 图4采集的图像不能直接视作平场, 还需要扣除光谱方向的不均匀性, 这和随机移动望远镜方法一样. 对于光谱方向的不均匀, 因有8个不同位置的光谱图, 可以根据上述位移量, 利用Kuhn等人^[19]和Chae^[20]提出的移动太阳像的方法, 迭代平场. 本文采用Chae^[20]的平场计算方法, 其基本工作原理如下:

$$I_{s,i,j}^k = c_k o_{i-x_k,j-y_k} f_{i,j}, \quad (5)$$

式中, $I_{s,i,j}^k$ 代表第 k 帧观测像 I_s^k 中第 i 行第 j 列像素的观测值, $f_{i,j}$ 代表该像素光谱平场, $o_{i-x_k,j-y_k}$ 代表相对第一帧参考像移动 (x_k, y_k) 位移量后的目标像, c_k 代表光栅第 k 个位置图像采集过程中观测像整体强度的变化. 对式(5)取对数, 可得

$$\log(I_{s,i,j}^k) = \log(c_k) + \log(o_{i-x_k,j-y_k}) + \log(f_{i,j}). \quad (6)$$

基于式(6), 利用光栅8个不同位置的观测像, 可以构建如下的最小二乘目标函数:

$$\chi^2 = \sum_{ijk} \left[\log(c_k) + \log(o_{i-x_k,j-y_k}) + \log(f_{i,j}) - \log(I_{s,i,j}^k) \right]^2. \quad (7)$$

通过求解上述目标函数的极小值可以得到平场 $f_{i,j}$, 更详细的计算过程可以参考Chae^[20]. 根据上述方法计算的平场结果见图5(a). 根据平场的来源, 可以将图5(a)中的平场分为两类: 一类是狭缝空间方向的不均匀性, 结果见图5(b); 另一类是光谱方向的不均匀性, 结果见图5(c). 对比图5(a)~(c)可以发现, 图5(a)总平场中主要的亮暗条纹特征来自于狭缝方向的不均匀性, 扣除狭缝方向的不均匀性后, 光谱方向的不均匀性(图5(c))主要为小尺度的脏点.

图6展示了平场改正的效果. 图6(a)为常规观测采集的日面中心附近的一帧太阳光谱, 图中可以看到H α 谱线以及一些脏点和横条纹. 图6(b)为平场改正后的图像, 平场改正用的公式为

$$I_{fc} = (I_s - d_s) / f, \quad (8)$$

式中, I_{fc} 代表平场改正后的图像, f 代表图5(a)的平场. 因曝光时间很短, 且探测器可以自动扣除本底, 所以此处忽略暗场 d_s . 平场改正公式简化为

$$I_{fc} = I_s / f. \quad (9)$$

对比图6(a)和(b)可以发现, 平场改正后, 狭缝方向的不均匀性(横条纹)基本消失, 光谱图中小尺度的脏点也基本消失. 平场改正效果十分显著.

为定量评价平场改正效果, 我们抽取两条线, 一条代表狭缝方向不均匀性的竖直线L1, 另一条代表光谱方向不均匀性的水平线L2, 平场改正前后的结果见

图 5 (网络版彩图) (a) 工程散射片和转动光栅方法得到的平场; (b) 平场中狭缝方向的不均匀性; (c) 平场中提取的光谱色散方向的不均匀性. 箭头标识的位置为脏点

Figure 5 (Color online) (a) The flat fields obtained with the engineer diffuser and rotating the grating; (b) the non-uniformity along the slit in the flat fields; (c) the non-uniformity along the dispersion direction in the flat fields. The arrows mark the location of dirty spots.

图 6 (网络版彩图) (a) 2017年5月12日采集的日面中心附近的光谱图; (b) 平场改正后的光谱图. L1和L2是图7定量分析中用到的两条线

Figure 6 (Color online) (a) The original spectral image observed near disk center on May 12, 2017; (b) the corresponding flat-fielded spectral image. L1 and L2 are two lined used for analysis in Figure 7.

图7(a)和(b). 从图7(a)可知, 参照均匀度的定义平场改正前(点线)观测数据中的均匀度约为60%, 平场改正后(实线)观测数据中的均匀度明显改善, 大于90%. 需要注意的是图7(a)为日面中心宁静区的观测数据, 观测目标自身带有不均匀性, 而且观测数据含有噪声. 此外, 我们也根据图2模拟中用到的HMI数据, 选取和文中光谱观测相同的视场, 提取一条直线, 结果见图7(a)中虚线, 对比图7(a)实线, 可以发现平场改正后狭缝方向的大尺度不均匀性和HMI观测中大尺度不均匀性基本一致, 我们通过和HMI观测数据的交叉对比验证了平场改正的有效性. 图7(b)中实线和点线分别为平场改正前后L2线上600~700像素位置的强度变化, 平场改正前(点线), 该区域强度最弱的位置对应一脏点区域, 造成透过率降低, 观测值偏小. 观测数据中的不均匀度为68%, 改正后为92%, 平场改正后脏点对透过率

的影响基本消失.

5 结论和讨论

针对大口径小视场的太阳光谱观测设备, 本文提出了一种新的、高效、简便易行的平场测量方法, 该方法将工程散射片置于焦面前方, 既可以平滑日面小尺度的不均匀性, 在观测视场内形成均匀的面光源, 也可以避开散射片自身不均匀性的影响, 还可以有效缩小工程散射片的口径, 扩展了其在小视场大口径太阳望远镜上的适用性. 该方法通过工程散射片实现空间平滑, 相比常用的随机移动太阳望远镜指向的方法, 可以有效减少平场测量的时间. 利用怀柔太阳观测基地的太阳光谱观测系统, 开展了平场测量验证实验, 主要结论如下.

图7 (网络版彩图) (a) 图6中L1处平场改正前(点线)后(实线)对比, 虚线为相近视场内HMI观测的结果; (b) 图6中L2处平场改正前(点线)后(实线)对比

Figure 7 (Color online) (a) The comparison of the data along L1 line before (red dotted line) and after (green solid line) flat-fielding. The blue dash line is the data from HMI with the same field of view and pointing. (b) The comparison of the data along L2 line before (red dotted line) and after (green solid line) flat-fielding.

利用空间望远镜HMI实测的连续谱全日面像, 结合怀柔太阳观测基地的太阳光谱观测设备所用RC望远镜的焦距以及工程散射片的散射角度、散射形状、与焦点的距离、视场光阑大小, 模拟了太阳光经过工程散射片在第一焦面上散射光源的均匀性, 模拟结果表明, 搭建的实验系统散射光源的均匀度好于99%。

利用怀柔太阳观测基地的太阳光谱观测设备和大小为 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 、散射角为 1° 的工程散射片生成均匀面光源, 通过转动光栅获得8个不同波长位置的光谱, 结合Chae^[20]平场计算方法迭代出整个光谱观测系统的平场。狭缝方向的均匀度低达60%, 光谱图中脏点引起的不均匀度为68%, 平场改正后这些不均匀性基本消失, 平场改正后狭缝方向的大尺度强度分布和根据HMI实测的相同视场的观测基本一致, 验证了工程散射片测量平场的有效性。

需要注意的是, 经工程散射片在第一焦面观测视场内散射光源的均匀性和工程散射片的散射角度、望远镜焦距、工程散射片和焦面的距离均相关, 文中仅仅给出了计算公式, 并模拟了怀柔太阳观测基地的太

阳光谱观测设备相应参数时的情况, 扩展到其他的光谱仪需要类似的计算和模拟。此外, 本文模拟仅是基于简单的几何光学的模拟, 加入工程散射片后对光路的影响需要采用光学追迹软件进行详细的模拟, 这也是下一步的工作。因工程散射片置于第一焦面前方, 所以此时测量的平场为第一焦面至探测器之间的平场, 并非整个光谱仪系统的平场。但通常第一焦面前的镜面和探测器之间不是点对点的成像, 所以其不均匀性对最终平场的影响较小, 这点可以在文中平场改正后并未发现引入和常规观测不一致的不均匀性得到验证。文中模拟采用的工程散射片理论散射轮廓, 限于加工误差等原因, 真实的散射轮廓可能在模拟轮廓的基础上增加一些小尺度的变化, 进而降低散射光源的均匀性。上述问题可以通过转动工程散射片解决, 通过转动提高散射光源的均匀性, 进一步提高平场测量的精度。最后, 文中所用工程散射片基于玻璃基底, 其最大透过波长约为 $2.5\text{ }\mu\text{m}$, 仅可用于可见光和近红外波段的平场测量, 扩展到其他波段还需要寻找合适的基底材料, 目前市场尚未有对应产品。

致谢 感谢中国科学院国家天文台怀柔太阳观测基地的观测人员在观测期间给予的帮助。

参考文献

- 1 Fang C, Huang Y R. The observational study of solar bidimensional spectra: Its present and future (in Chinese). *Prog Astron*, 1995, 13: 3–11 [方成, 黄佑然. 太阳二维光谱观测研究的进展和展望. *天文学进展*, 1995, 13: 3–11]
- 2 Lites B W, Ichimoto K. The SP_PREP data preparation package for the Hinode spectro-polarimeter. *Sol Phys*, 2013, 283: 601–629
- 3 Chae J, Park H M, Ahn K, et al. Fast imaging solar spectrograph of the 1.6 meter new solar telescope at big bear solar observatory. *Sol Phys*, 2013, 288: 1–22
- 4 Fang C, Huang Y R. The solar tower telescope of Nanjing University and its multiple solar spectrograph (in Chinese). *Acta Astronom Sin*, 1983, 24: 3–9 [方成, 黄佑然. 南京大学太阳塔及多波段太阳光谱仪. *天文学报*, 1983, 24: 3–9]
- 5 Li H, You J Q, Wu Q D, et al. Updated multichannel infrared solar spectrograph at Purple Mountain Observatory. *Chin Phys Lett*, 2002, 19: 742–744
- 6 Liu Z, Xu J, Gu B Z, et al. New vacuum solar telescope and observations with high resolution. *Res Astron Astrophys*, 2014, 14: 705–718
- 7 Cai Y, Xu Z, Li Z, et al. Precise reduction of solar spectra observed by the one-meter new vacuum solar telescope. *Sol Phys*, 2017, 292: 150
- 8 Lan C, Li C L, Wang L, et al. Preflight spectral calibration of hyperspectral carbon dioxide spectrometer of TanSat (in Chinese). *Opt Precis Eng*, 2017, 25: 2064–2075 [兰超, 李诚良, 王龙, 等. 碳卫星高光谱CO₂探测仪发射前光谱定标. *光学精密工程*, 2017, 25: 2064–2075]
- 9 Li F T, Li Z G, Wang X X, et al. Self-calibrated spectral radiance standard source (in Chinese). *Opt Precis Eng*, 2017, 25: 2004–2010 [李福田, 李志刚, 王晓旭, 等. 自校准型光谱辐亮度标准光源. *光学精密工程*, 2017, 25: 2004–2010]
- 10 Liu H Z, Shi Z L, Feng B, et al. Mechanism and calibration of non-uniformity for IR polarization imagery obtained with integrated micro-polarizer array (in Chinese). *Opt Precis Eng*, 2018, 26: 480–491 [刘海峥, 史泽林, 冯斌. 微偏振片阵列红外成像非均匀性产生机理及其校正. *光学精密工程*, 2018, 26: 480–491]
- 11 Zheng L L, Jin G, Qu H S, et al. Non-uniformity correction for multi-channel TDI CCD imaging system in wide response range (in Chinese). *Acta Opt Sin*, 2017, 37: 1111001 [郑亮亮, 金光, 曲宏松, 等. 多通道宽响应域TDI CCD成像系统的非均匀性校正. *光学学报*, 2017, 37: 1111001]
- 12 Shi H L, Li Z W, Luo H Y, et al. Non-uniformity of optical field after filter in spatial heterodyne spectrometer (in Chinese). *Acta Opt Sin*, 2016, 36: 001 [施海亮, 李志伟, 罗海燕, 等. 空间外差光谱仪滤光片光场非均匀性研究. *光学学报*, 2016, 36: 001]
- 13 Leng H B, Yi B, Xie S Q, et al. Adaptive nonuniformity correction for infrared images based on temporal moment matching (in Chinese). *Acta Opt Sin*, 2015, 35: 113–118 [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. *光学学报*, 2015, 35: 113–118]
- 14 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: 295–301 [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: 295–301]
- 15 Bai X Y, Deng Y Y, Wang Y R, et al. The measurement of flat fields and polarization offset from the routine observation data of a solar rotation (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2018, 63: 301–310 [白先勇, 邓元勇, 王怡然, 等. 利用太阳自转提取全日面太阳望远镜的平场和偏振本底. *科学通报*, 2018, 63: 301–310]
- 16 Wang Y Y, Bai X Y, Liu S Q, et al. Flat-field measuring and correction method for full-disk solar image based on ground glass (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2017, 62: 3057–3066 [王怡然, 白先勇, 刘四清, 等. 基于毛玻璃的全日面太阳像平场测量和改正方法. *科学通报*, 2017, 62: 3057–3066]
- 17 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). *Sol Phys*, 2012, 275: 261–284
- 18 National Standardization Technical Committee. Architectural Lighting (GB50034-2004) (in Chinese). Beijing: China Standard Press, 2004 [中华人民共和国建设部. 建筑照明设计标准(GB50034-2004). 北京: 中国建筑工业出版社, 2004]
- 19 Kuhn J R, Lin H, Loran D. Gain calibrating nonuniform image-array data using only the image data. *Publ Astron Soc Pacif*, 1991, 103: 1097–1108
- 20 Chae J. Flat-fielding of solar magnetograph observations using relatively shifted images. *Sol Phys*, 2004, 221: 15–21

Flat-fielding of the solar spectrograph with the engineered diffuser

BAI XianYong^{1,2}, FENG ZhiWei¹, DENG YuanYong^{1,2}, ZHANG ZhiYong^{1,2} & GUO JingJing^{1,2}

¹ National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

² Key Laboratory of Solar Activity, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

A flat-fielding method with an engineered diffuser is proposed, especially being suitable for the solar spectrograph with relative larger aperture and smaller field-of-view. According to the field-of-view of solar observation and the configuration of the solar spectrograph, we finally chose the engineered diffuser with a scattering angle of 1° and the top-hat intensity distribution. We simulated the uniformity of the scattered sunlight after the engineer diffuser at the focal plane within the field-of-view of $189'' \times 189''$ near the solar disk center. The simulation result shows that the uniformity is 99.23%, which is very close to the ideal uniform light source. The engineered diffuser is employed for the flat-field measurement of the solar spectrograph installed at Huairou Solar Observing Station, belonging to National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences. The size of the engineered diffuser can be reduced significantly by installing it near the focus plane. During the flat-field measurement time, we also rotate the grating at several fixed position with a tiny rotation angle. The result indicates that the non-uniformity of the solar spectrograph could be well corrected, including both the non-uniformity from the slit and that from the spectral direction. The large scale distribution of the flat-fielding spectral map in the slit direction agrees well with that from the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI). The dirty dots can also be removed after the flat-fielding process. The validity of flat-field measurement with the engineered diffuser is conformed with the self-calibration and the cross calibration.

engineered diffuser, solar spectrograph, image analysis, flat-fields, photometry measurement

doi: [10.1360/N092018-00316](https://doi.org/10.1360/N092018-00316)