基于毛玻璃的全日面太阳像平场测量和改正方法

王怡然^{1,2}, 白先勇^{1,3*}, 刘四清^{1,2}, 邓元勇³, 孙越强^{1,2}

1. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院国家天文台, 北京 100012

* 联系人, E-mail: xybai@bao.ac.cn

2016-12-30 收稿, 2017-03-07 修回, 2017-03-10 接受, 2017-06-02 网络版发表

国家自然科学基金(11503063, 11178005, 11427901)资助

摘要 全日面太阳光球像和色球像是监测太阳活动的主要数据, 对望远镜观测的原始图像进行平场改正是数据处理过程中的基础工作. 本文尝试利用毛玻璃测量全日面太阳光球和色球像的平场, 通过理论模拟和实地测量验证了该方法的有效性. 首先, 模拟计算了太阳经毛玻璃扩散后在观测视场内形成的面光源的均匀性, 其均匀度为99%, 可以用来测量平场. 其次, 在全日面太阳光球和色球望远镜上的实验结果表明, 本方法获得的平场像能够改正原始观测像中高频的脏点和光路不均匀性, 因平场观测和常规观测图像中杂散光影响不同, 导致平场改正像存在低频失真, 但可通过理论临边昏暗图像对平场改正像进行低频信息修正. 修正后的平场改正像与理论临边昏暗像相关系数达到0.99以上. 最后, 以HMI发布的光球像和GONG发布的色球像作为参考像, 选取活动区所在小视场和宁静区大视场, 分别与利用本方法实验改正后的光球像和色球像进行了结构相似度等方面的量化对比. 对比结果表明, 改正像的各项指标均优于原始像. 本文提出的平场测量和改正方法简便易行, 且容易实现自动化测量, 为全日面太阳望远镜的平场测量和改正提供了新方法.

关键词 毛玻璃, 太阳望远镜, 平场测量, 图像处理, 空间环境

太阳爆发活动是太阳风暴的起源, 其典型的两种现象是耀斑和日冕物质抛射^[1]. 太阳爆发活动的监测和相关的科学与应用研究对全面认识太阳风暴的产生机制、爆发过程以及其对人类社会的影响具有重大的科学意义和应用价值. 目前国内观测太阳爆发活动的数据主要有全日面太阳光球和色球像、局部光球和色球像、太阳矢量磁场像^[2]、日冕像^[3]等.

太阳观测数据的处理基于相应望远镜的原始观测数据, 扣除其中的仪器效应, 生成高级别的数据产品, 进而开展太阳活动监测、太阳爆发相关科学和空间环境预报研究. 平场改正的目的是扣除望远镜的光学系统和探测器的成像不均匀性, 通常是数据处

理的第1步, 其改正的质量关系到后续数据处理的效果, 也会影响到基于数据的科学与应用研究. 造成这种不均匀性的因素很多, 如光学系统的渐晕、光学元件的脏点、光学元件本身透过率的不均匀、探测器不同像元感光的不均匀性等^[4].

按照测量原理的不同, 目前常用的平场测量方法主要分为两大类: 一类是以均匀面光源为目标直接采集平场像, 平场采集和改正过程简便易行; 另一类是以非均匀面光源为目标, 通过图像移动和数学计算获得平场像. 典型的第1类方法有晨昏蒙影天空平场法和圆顶平场法^[5], 这也是夜天文望远镜常用的方法^[6]. 但这两种方法所利用的均匀面光源亮度远小

引用格式: 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

Wang Y R, 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, doi: 10.1360/N972016-01477

于太阳亮度,会造成平场测量与常规观测所用曝光时间不一致的问题,甚至受限于相机的最大曝光时间,无法进行全日面太阳望远镜的平场测量.历史上,由于很难获得与太阳光强度相近的均匀面光源,全日面太阳像的平场测量多采用第2类方法,即通过移动多张太阳像,计算其位移量,利用数学算法拟合平场^[7-9].这一类方法平场测量时需要移动望远镜获得多张位于探测器不同位置的太阳图像,操作比较复杂、耗时较长;数据处理时多张太阳像需要精确对齐;迭代平场的算法复杂,且拟合平场计算量较大^[10];在移动太阳像时,杂散光对不同帧移动太阳像的影响不同,所以迭代的平场也受杂散光的影响.对于太阳活动监测的望远镜,用户更希望在观测时段内尽可能多得获得常规观测数据,平场测量耗时尽可能短、测量和改正过程简便易行进而便于实现自动化.寻找简便易行的平场测量和改正方法,用于太阳活动监测望远镜的数据处理便是本文的出发点.对比上述两类平场测量方法,第2类方法在平场测量方式和平场计算方面均比较复杂,实现自动化的难度较大,第1类方法显然更适合用于太阳活动监测望远镜的数据处理.经过大量的调研发现,可以利用太阳这一天然面光源,通过毛玻璃扩散太阳光,在观测视场内获得与太阳光强相近的、均匀的面光源,用于平场测量.这样的平场测量方法简单,拍摄的图像即为平场像,平场改正过程计算量小,比较接近用于太阳活动监测望远镜数据处理的需求.

1 毛玻璃透过率和均匀性的计算

望远镜曝光时间的设置取决于观测对象的光强.因此,如果能够获得与太阳光强度相近的、均匀性好

的面光源,就可以采用与常规观测相近的曝光时间进行平场测量.本文所提出的方法是直接以太阳为入射光源,将经过毛玻璃扩散后观测视场内的光源作为均匀面光源,进行平场测量.因此,毛玻璃在视场范围内出射光强与入射光强的比值决定了平场测量时需要的理论曝光时间.将这一比值定义为视场范围内的透过率,简称透过率.平场测量的准确性和平场改正的效果则取决于扩散后视场范围内所获得面光源的均匀性,简称均匀性.本文对毛玻璃的透过率进行了计算,并对太阳和毛玻璃在观测视场内形成的面光源均匀性进行了模拟和计算.

所选择的实验材料是THORLABS公司的型号为DG05-220的毛玻璃,出射光在 $0^\circ\sim 180^\circ$ 范围内总透射率约为75%^[11].图1(a)为厂家提供的毛玻璃的漫透射率和散射角的分布曲线(一维).平行光正入射到毛玻璃后的扩散光线呈高斯分布,扩散角峰值半宽约 15° .

根据厂家提供的技术参数对透过率进行了理论计算,公式如下:

$$T_{\text{field}} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N A_f(i, j)}{\sum_{p=1}^M \sum_{q=1}^M A_e(p, q)} \times r_o, \quad (1)$$

上式中 A_e 表示毛玻璃扩散后 $\pm 90^\circ$ 范围内的出射光, A_e 是归一化、峰值半宽 15° 、服从二维高斯分布的数组. p 和 q 的取值范围为 $[1, M]$,成线性关系对应了 $0^\circ\sim 180^\circ$ 的出射光角度, $A_e(p, q)$ 则表示在 (p, q) 所对应的角度方向出射光强度占总出射光强度的比值. A_f 表示观测视场内的出射光,是 A_e 中心附近的元素.由于实际观测时,观测视场稍大于全日面太阳像尺寸,因此计算时 A_f 为 A_e 中心附近 $34'$ 范围内对应的元素.由于 A_e 中

图1 (网络版彩色)利用毛玻璃扩散太阳光在观测视场形成面光源的模拟.(a)不同目数的毛玻璃在不同扩散角下的漫透射比;(b)观测的色球像;(c)模拟色球像经过毛玻璃扩散后的均匀面光源,显示区间为 $[0.9, 1]$

Figure 1 (Color online) Simulation of area light diffused by ground glass in field of view. (a) Transmission of various ground glasses under different output angle; (b) observed chromospheres image; (c) simulation image of chromospheres through ground glass, section $[0.9, 1]$

以 M 个元素表达了 180° 的范围,按照角分辨率一致的原则, A_f 的尺寸 $N=M/180^\circ \times 34'$, N 四舍五入取整。 r_o 是出射光总透射率,计算时 r_o 取0.75。经过计算,透过率 $T_{\text{field}} \approx 0.0012$ 。这也就意味着利用这一型号的毛玻璃观测太阳时,观测视场光的强度为入射光强的0.1%~0.2%。

为了评价太阳光经过毛玻璃后所形成的观测视场内的面光源均匀性,进行了数值模拟。以实测色球图像 M_e 作为太阳光源,卷积表示毛玻璃扩散情况的结果 M_o 即表示了色球像经毛玻璃扩散后的结果, M_o 的尺寸与 A_e 是一致的。按照透过率计算 A_f 的取值方法,在 M_o 中取出与 A_f 位置相对应的元素,定义为 M_{flat} 。 M_{flat} 表示的就是色球像经过毛玻璃扩散后在视场内形成的光源。

卷积前后的结果如图1所示。图1(c)为模拟色球像经过毛玻璃扩散后在观测视场内形成的均匀面光源。该图像已经做过归一化,显示区间为[0.9, 1]。由图可见,太阳色球像中的细节全部模糊了,整个视场的光强非常均匀。为定量衡量太阳经毛玻璃扩散后在视场内的均匀性,借用国家照度标准中采用的均匀度来描述均匀性,均匀度=最小亮度/平均亮度^[12]。如果均匀度等于1,光源十分均匀,偏离1越大,均匀性越差。利用上述定义计算的均匀度为99%。可见太阳经毛玻璃扩散后在望远镜观测视场内的均匀性很好,可以看作均匀面光源用来测量平场。

2 平场测量装置设计和改正方法

设计的利用毛玻璃测量平场的装置如下图2所示。这个装置包括毛玻璃、望远系统、滤光系统、探测器以及图像采集系统。太阳光通过毛玻璃后,扩散成半宽约 15° 的面光源。该面光源进入望远系统后,经过光阑选择在有效视场(约 $34'$)内形成均匀的面光源,并经过滤光系统选择出需要的观测波长,成像在探测器,并经图像采集系统接收并存储。

图2 平场测量装置示意图

Figure 2 Flat field measurement device schematic diagram

利用毛玻璃测量和改正全日面光球和色球像平场的步骤为:(1)在望远镜前端加入毛玻璃,测量平场像和平场对应的暗场像;(2)移除毛玻璃,测量常规观测太阳像和太阳像对应的暗场像;(3)计算得到平场改正像。平场改正像的计算公式为

$$c = (o - d_o) / (f - d_f), \quad (2)$$

上式 c 为平场改正像, o 为原始观测像, d_o 为原始观测像对应的暗场像, f 为平场测量像, d_f 为平场测量时对应的暗场像。

如果平场观测和常规观测杂散光影响一致,利用(2)式得到的平场改正像反映的即是观测目标的真实信息。根据第1节的模拟计算结果,太阳经过毛玻璃扩散后,日面上的高频细节被模糊掉了,在观测视场内形成了均匀的面光源。但由于毛玻璃的扩散角远大于观测视场,扩散后的太阳光会有一些角度打在望远镜筒壁上,限于望远镜有限的消杂光能力,导致平场观测会存在比常规观测时更多的杂散光。因杂散光影响多是渐变的,相比脏点等不均匀性属于低频信息,导致直接利用(2)式进行平场改正会在平场改正像中引入杂散光的影响,最终导致平场改正像相比观测目标存在低频失真。这也是夜天文圆顶平场大视场精确光度标定经常遇到的问题^[13]。对于太阳观测,低频失真影响的是太阳的临边昏暗轮廓,所以可以用理论的临边昏暗轮廓进行修正。对平场改正像的低频修正采用多尺度形态学滤波和中值滤波相结合的方法^[14,15],得到平场改正像的低频像 M_{low} ,再利用理论临边昏暗轮廓进行拟合。

临边昏暗理论轮廓的计算公式^[16]如下:

$$P(\mu) = A_0 + A_1\mu + A_2\mu^2 + A_3\mu^3 + A_4\mu^4 + A_5\mu^5, \sum A_n = 1.0. \quad (3)$$

根据实际的观测谱线,在文献中选择与之最接近的参考谱线,确定多项式系数 $A_0 \sim A_5$ 。生成的理论临边昏暗像 M_{limb} 圆心位置、日面半径和图像尺寸与平场改正像相同。平场改正像低频修正公式为

$$c' = c / M_{\text{low}} \times M_{\text{limb}}, \quad (4)$$

c' 即为修正后的平场改正像.按照上述的平场测量装置和改正方法,在全日面光球望远镜和色球望远镜平台上进行了实验验证.

3 全日面光球像的实验

以中国科学院国家天文台怀柔太阳观测基地的全日面光球磁场望远镜为平台,进行了全日面光球像的平场测量和改正实验.该望远镜的观测谱线为 Fe I 532.4 nm,探测器像元数为992×992,观测视场为33',常规观测时曝光时间为10 ms,平场测量时曝光时间为10 s,二者相差1000倍,和第2节计算的透过率基本一致.图3展示的是2015年8月11日进行实验的情况.

3.1 原始像高频失真改正

图3(a)~(c)分别为光球原始观测像、毛玻璃平场

像和平场改正像.图3(a)中高频的脏点在图3(c)中已经被改正掉,但是图3(c)的中心区域变暗,说明低频信息出现失真.为了更直观地显示平场改正的效果,选择了一个同时包含活动区和若干脏点的正方形区域进行放大.图3(d)和(e)中用箭头标识了所选择的局部视场中3个典型灰尘或脏点,在局部平场像图3(e)中体现的非常明显.对比平场改正前后的局部图像图3(d)和(f)可以发现,在完成平场改正后,灰尘和脏点在图3(f)中相应位置已经消除.这说明平场处理在全日面光球观测像高频细节的改正方面确实能起到很好的作用.而且,对比局部图像中展示的活动区部分可以看出,经过平场改正后,活动区的细节结构没有模糊和失真.选取图3(a)和(c)的点划线处做剖面线展示在图3(g)中, L1和L2分别为原始像和平场改正像的剖面线,图像已经过归一化. L3为理论的临边昏暗曲线.通过图3(g)的曲线对比,可以发现: (1) L1和L2

图3 (网络版彩色)全日面光球像的平场测量与改正. (a) 光球原始观测像; (b) 毛玻璃平场像; (c) 平场改正像; (d)~(f) 相应的局部图像; (g) 原始观测像和平场改正像的剖面线对比

Figure 3 (Color online) Flat-field measurement and correction of full-disk photosphere image. (a) Original photosphere image; (b) flat-field image with ground glass; (c) flat-field corrected image; (d)~(f) the corresponding small areas; (g) section lines of (a) and (c)

的曲线局部毛刺形状相同, 高频细节方面保持一致, 这说明平场改正过程中保留了原始观测像中的高频信息; (2) L1与L3不一致是由于望远镜系统本身的仪器效应导致的; L2与L3不一致, 改正后的图像仍然不符合理论临边昏暗的变化趋势. 第2节提到, 相比原始像, 杂散光对平场像的影响更为严重. 平场改正过程中, 杂散光造成平场改正像的低频信息失真. 因此, 还需要对平场改正像进行低频信息修正.

3.2 平场改正像低频信息修正

平场改正像低频信息修正的方法是提取图像的低频信息, 然后按照理论临边昏暗轮廓进行修正. 按照第2节所述的修正方法对平场改正像进行了修正, 结果如图4所示.

图4展示了平场改正像修正的结果, 图4(a)~(c)分别为理论临边昏暗像、平场改正像和低频修正后的平场改正像. 图4(d)中显示的是图4(a)~(c)中点划线处归一化的剖面线. 可以看出, 修正后的平场改正像的高频信息与直接平场改正像保持一致, 并且在低频方面符合理论临边昏暗的趋势. 至此, 基本还原出观测目标——太阳光球的真实信息.

4 全日面色球像的实验

2015年9月28日, 以位于西藏羊八井地区地基日

冕仪上的全日面色球望远镜为平台进行了验证. 该望远镜的观测谱线为Ha 656.3 nm, 探测器像元数为2048×2048, 观测视场为34', 常规观测时曝光时间为10 μ s, 平场测量时曝光时间为10 ms, 二者相差1000倍, 和第2节计算的透过率基本一致. 图5展示了实验中平场改正的过程和结果.

图5(a)为原始观测像, 图5(b)为平场像, 图5(c)为平场改正像. 在进行平场测量时, 均匀面光源进入望远镜后, 经过圆形视场光阑的选择后在CCD上成像, 因此图5(b)中边缘呈现明显的圆形. 图5(d)~(f)为在图5(a)~(c)中选取了大小为120"×120"的局部图像(矩形区域), 图5(d)中箭头标识出的脏点在平场局部像图5(e)中体现的尤其明显, 经过平场改正后, 图5(f)中相应位置脏点已被去掉. 图5(g)为原始像和平场改正像点划线处的剖面线, 并加入理论临边昏暗曲线, 用于说明图像强度变化趋势. 通过对比可以得到与光球像实验相同的结论, 即平场改正保留了原始像中目标的高频信息, 但是因平场观测和常规观测杂散光影响不同导致平场改正像的低频失真. 因此, 按照与光球像实验中相同的方法, 对色球平场改正像进行了低频信息修正, 结果见图6. 图6(d)中显示的是图6(a)~(c)中归一化后的剖面线. 可以看出, 修正后的平场改正像的高频信息与直接平场改正像保持一致, 并且在低频方面符合理论临边昏暗的趋势. 对

图4 (网络版彩色)全日面色球平场改正像的低频修正. (a) 理论临边昏暗像; (b) 平场改正像; (c) 低频修正后的平场改正像; (d) 剖面线对比
Figure 4 (Color online) Low frequency amendment of full-disk photosphere flat-field corrected image. (a) Theoretical limb-darkening image; (b) flat-field corrected image; (c) amendatory image; (d) the corresponding section lines

图5 (网络版彩色)全日面色球像的平场测量与改正. (a) 色球原始观测像; (b) 毛玻璃平场像; (c) 平场改正像; (d)~(f) 相应的局部图像; (g) 为原始观测像和平场改正像的剖面线对比

Figure 5 (Color online) Flat-field measurement of full-disk chromosphere image. (a) Original chromosphere image; (b) flat-field image with ground glass; (c) flat-field corrected image; (d)~(f) the corresponding small areas; (g) section lines of (a) and (c)

图6 (网络版彩色)全日面色球平场改正像的低频修正. (a) 理论临边昏暗像; (b) 平场改正像; (c) 低频修正后的平场改正像; (d) 剖面线对比

Figure 6 (Color online) Low frequency amendment of full-disk chromosphere flat-field corrected image. (a) Theoretical limb-darkening image; (b) flat-field corrected image; (c) amendatory image; (d) the corresponding section lines

比图6(d)和4(d)可以看出,色球(图6(d))平场改正像低频失真程度相比光球(图4(d))平场改正像小得多,这是因为实验用的色球望远镜消杂光的能力优于光球望远镜,减小了平场测量时扩散后太阳光导致的低频失真程度。

5 实验结果分析和对比

上面只是定性地分析了改正效果,为更定量地说明改正结果,采用交叉定标的方法,和其他天地基相近时间的观测数据进行了对比,并在图像低频信息和高频信息两个方面对上述两个实验结果进行了详细分析。低频方面,计算了修正像与理论临边昏暗像的相关度;高频方面,分别选择日面上有活动区存在的小视场(图7(a)和(b)中的实线区域)和宁静区的大视场(图7(a)和(b)中的虚线区域),分析了修正后图像不同视场的细节与其他设备观测像局部视场的结构相似度(SSIM),局部视场相除后峰谷值与平均值的比值(PV/MEAN)和均方根与平均值的比值(RMS/

MEAN) 3项参数^[15,17]。SSIM值用于衡量两张图像细节的相似程度,取值区间[0, 1],值越接近于1,说明两个图像相似度越高;实验像与参考像相除以后的PV/MEAN和RMS/MEAN两项参数的值越接近0,说明实验像与参考像越接近。在参考像的选择方面,色球像以全球日震网(Global Oscillation Network Group, GONG)的观测数据作为参考,光球像以日球层磁场观测仪(Helioseismic and Magnetic Imager, HMI)的观测数据作为参考。对比之前需要对参考像进行预处理,包括3个方面:(1)实验像和参考像的中心化,并进行几何改正;(2)以实验像的像元分辨率为标准,采用抽样的方法将参考像的像元分辨率与实验像统一;(3)考虑到大气对观测像有模糊作用,按照实验中原始观测像日面边缘的光强的衰减轮廓,对参考像观测数据进行了高斯卷积,统一了大气对参考像和实验像的模糊程度。图7还展示了高频对比的局部图像。

低频方面,原始色球像与理论临边昏暗像的相关系数为0.8836,修正后相关系数提高到0.9948。原

图 7 (网络版彩色)实验结果对比。(a) 改正前后的色球像与GONG数据的对比;(b) 改正前后的光球像与HMI数据的对比;(c) 338"×338"视场内((a)中实线区域)色球像与GONG的对比;(d) 1124"×1124"视场内((a)中虚线区域)色球像与GONG的对比;(e) 300"×300"视场内((b)中实线区域)光球像与HMI的对比;(f) 800"×800"视场内((b)中虚线区域)光球像与HMI的对比

Figure 7 (Color online) Comparison of test results. (a) Comparison of chromospheres images with GONG; (b) comparison of photosphere images with HMI; (c) comparison of chromosphere images in 338"×338" field, the solid area in (a); (d) comparison of chromospheres images in 1124"×1124" field, the dotted area in (a); (e) comparison of photosphere images in 300"×300" field, the solid area in (b); (f) comparison of photosphere images in 800"×800" field, the dotted area in (b)

始光球像与理论临边昏暗像的相关系数为0.8720,修正后相关系数提到0.9991.修正像与理论临边昏暗的相关系数非常接近1,说明太阳像符合理论临边昏暗轮廓.

338"×338"视场色球原始像与GONG相同区域(图7(c))的SSIM值为0.2543,修正像为0.6806,提高了167.6%,说明修正像与GONG图像的相似度更高.原始像PV/MEAN值为0.9735,修正像为0.4095;原始像RMS/MEAN值为0.0718,修正像为0.0387,说明活动区所在局部视场修正后图像与GONG图像更加接近.1124"×1124"视场色球原始像与GONG相同区域(图7(e))的SSIM值为0.0845,修正像为0.4102,提高了385.4%,说明修正像与GONG图像的相似度更高.原始像PV/MEAN值为0.9357,修正像为0.5257;原始像RMS/MEAN值为0.0720,修正像为0.0338,说明在大视场范围内修正后图像与GONG图像更加接近.需要说明的是,由于观测时色球像的观测位置并非线心,所以相比GONG的数据色球特征少些(图7(a)中可见GONG数据谱斑和暗条特征更清楚),因此二者SSIM值并没有达到非常接近1的程度.

300"×300"视场光球原始像与HMI相同区域(图7(d))的SSIM值为0.8228,修正像为0.9103,提高了10.6%,说明修正像与HMI图像的相似度非常高.原始像PV/MEAN值为1.5130,修正像为1.104;原始像RMS/MEAN值为0.0572,修正像为0.0321,说明在活动区所在小视场范围内修正后图像与HMI图像更加接近.800"×800"视场光球原始像与HMI相同区域(图7(f))的SSIM值为0.2778,修正像为0.8095,提高了191.4%,说明修正像与HMI图像的相似度非常高.原始像PV/MEAN值为1.176,修正像为1.104;原始像RMS/MEAN值为0.1245,修正像为0.0342,说明在宁静区大视场范围内修正后图像与HMI图像更加接近.

通过交叉定标可以看出,在低频方面,修正后的光球像和色球像与理论临边昏暗的相关系数达到0.99以上;在高频方面,修正像与参考像比对的各项参数均优于原始像.

6 小结

本文利用毛玻璃实现了一种针对全日面太阳望远镜的平场测量方法,并通过理论模拟计算和实地测量验证了该方法的有效性,实验平场改正取得了较好的效果.根据所选择的具体型号的毛玻璃材料

技术参数,首先进行了均匀性和透过率的模拟计算.按照本文所设计的测量实验装置和数据处理方法,分别以中国科学院国家天文台位于西藏羊八井地区地基日冕仪上的全日面色球望远镜和位于怀柔太阳观测基地的全日面光球磁场望远镜为平台,进行了平场测量方法和改正效果的验证,并与现有天地基观测数据进行交叉定标,量化地评价了改正效果.本文的主要结论有:

(1) 根据所选毛玻璃的技术参数进行模拟计算,太阳经毛玻璃后在望远镜观测视场内扩散光源的均匀性达到99%,观测视场对应的透过率约为0.1%~0.2%,在理论上证明了基于毛玻璃进行平场观测的可行性.

(2) 本文所提出的方法能够有效地改正原始观测像中由于尘埃、脏点和光路不均匀性等问题造成的高频细节失真.改正后的光球像和HMI发布的光球像在300"×300"和800"×800"视场内的结构相似度分别为0.9103, 0.8095,远大于改正前的0.8228, 0.2778.改正后的色球像和GONG发布的色球像在338"×338"和1124"×1124"视场内的结构相似度分别为0.6806和0.4106,大于改正前的0.2543和0.0845.

(3) 通过提取图像低频信息,再按照理论临边昏暗轮廓进行修正,可以有效解决因平场观测和常规观测杂散光影响不同造成的平场改正像中的低频失真问题.得到的修正像与理论临边昏暗像的相关性达到0.99以上.

7 讨论与展望

成熟的毛玻璃制造和加工技术为全日面太阳望远镜平场测量和改正提供了新的途径.毛玻璃的优势在于能够模糊太阳的细节,在观测视场内获得均匀面光源,进而测量出望远镜系统的不均匀性,通过平场改正还原全日面太阳像的本来面目.平场测量时不需要移动太阳像,操作简便.数据处理时计算量小,并且能够获得理想的改正效果,适宜用于太阳活动监测的望远镜平场改正的自动化.

虽然太阳经过毛玻璃扩散后在观测视场内得到的面光源均匀性很好,但是毛玻璃的扩散角比观测视场大很多,导致光强衰减约1000倍,相应的平场测量时的曝光时间是常规观测的1000倍.假设常规观测曝光时间为10 ms,利用毛玻璃测量平场的曝光时间就需要10 s左右.一方面有些相机不支持如此长的

曝光时间, 另一方面如果相机不制冷, 如此长时间的曝光对暗场测量会产生比较大的影响. 未来还需要寻找扩散角度更小的扩散材料, 使得平场测量和常规观测的曝光时间相近(如相差10倍左右)进而缩小平场测量与常规观测的曝光时间的差别.

文中用到的光球像和色球像来自不同的望远镜, 因其消杂散光能力不同, 所以平场改正像中的低频

失真程度也不同. 色球平场改正像低频失真程度相比光球平场改正像小得多, 这提示我们在使用毛玻璃测量平场时有望通过对望远镜的消杂光水平进行优化来减少甚至无需平场改正像的低频修正. 未来在建的全日面太阳望远镜如果考虑使用毛玻璃测量平场, 望远镜设计时需要考虑消杂光能力, 从而简化平场改正时的数据处理.

致谢 感谢中国科学院国家天文台怀柔太阳观测基地的技术人员和观测人员在观测期间给予的支持和帮助.

参考文献

- 1 General Armament Department of Electronic Information Infrastructure. Solar Storms Secret (in Chinese). Beijing: National Defense Industry Press, 2012. 5–6 [总装备部电子信息基础部. 太阳风暴揭秘. 北京: 国防工业出版社, 2012. 5–6]
- 2 Deng Y, Ai G, Wang J, et al. Reports on test observations with the multi-channel solar telescope. *Sol Phys*, 1997, 173: 207–221
- 3 Liu Y. Chinese first aircraft coronagraph settled in Lijiang, Yunnan (in Chinese). *Amateur Astronomers*, 2014, 1: 60–63 [刘煜. 国内首架日冕仪落户云南丽江. 天文爱好者, 2014, 1: 60–63]
- 4 Haldeman B J, Tufts J R, Dubberley M A, et al. Lambert: A novel compact calibration solution for superior telescope flat fielding. *Proc SPIE*, 2008, 7014: 701420
- 5 Marshall J L, Depoy D L. Flattening scientific CCD imaging data with a dome flat-field system. 2005, arXiv: astro-ph/0510233
- 6 Stetson P B, Harris W E. CCD photometry of the globular cluster M92. *Astron J*, 1988, 96: 909–975
- 7 Kuhn J R, Lin H, Lorz D. Gain calibrating nonuniform image-array data using only the image data. *Publ Astron Soc Pacific*, 1991, 103: 1097–1108
- 8 Chae J. Flat-fielding of solar magnetograph observations using relatively shifted images. *Sol Phys*, 2004, 221: 15–21
- 9 Xu G G, Zheng S, Lin G H, et al. Flat-fielding of solar H α observations based on the maximum correntropy criterion. *Astron J*, 2016, 827: 137
- 10 Denker C, Johannesson A, Marquette W, et al. Synoptic H α full-disk observations of the sun from big bear solar observatory-I. Instrumentation, image processing, data products, and first results. *Sol Phys*, 1999, 184: 87–102
- 11 Smith J W, Zhou H X, Chen Y F, trans. Modern Optical Engineering (in Chinese). Beijing: Chemical Industry Press, 2011. 185–186 [沃伦 J. 史密斯. 周海宪, 程云芳, 译. 现代光学工程. 北京: 化学工业出版社, 2011. 185–186]
- 12 Quantities and Units GB3100–3102-93. National Standardization Technical Committee. Beijing: China Standard Press, 1994
- 13 Coughlin M, Abbott T M C, Brannon K, et al. A collimated beam projector for precise telescope calibration. *Proc SPIE*, 2016, 9910: 99100V
- 14 Yang Y, Lin J, Feng S, et al. Detection and restoration of non-radial variation over full-disk solar images. *J Korean Astron Soc*, 2013, 46: 191–200
- 15 Feng S, Lin J, Yang Y, et al. Automated detecting and removing cloud shadows in full-disk solar images. *New Astron*, 2014, 32: 24–30
- 16 Neckel H, Labs D. Solar limb darkening 1986–1990 (λ 303 to 1099 nm). *Sol Phys*, 1994, 153: 91–114
- 17 Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, et al. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity. *IEEE Trans Image Process*, 2004, 13: 600–612

Summary for “基于毛玻璃的全日面太阳像平场测量和改正方法”

Flat-field measuring and correction method for full-disk solar image based on ground glass

WANG YiRan^{1,2}, BAI XianYong^{1,3*}, LIU SiQing^{1,2}, DENG YuanYong³ & SUN YueQiang^{1,2}

¹ National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³ National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

* Corresponding author, E-mail: xybai@bao.ac.cn

Full-disk solar chromosphere and photosphere images are mainly used for monitoring solar activities. Flat-field correction of observation image is a basic work during data processing. In history, it is difficult to obtain uniform area light whose intensity is similar as sun. So flat-field measurement and correction of full-disk solar image usually depend on moving images and mathematical calculation. In order to overcome some disadvantages of traditional methods, such as large calculating quantity, complicated algorithms and difficult to realize automation, we research and design a new flat-field correction method based on ground glass. In this text, sunlight diffused by ground glass in field of view is used as uniform area light for flat-field measuring. We simulated the area light that sun diffused by ground glass, calculated the uniformity of area light in field of view. The uniformity of area light is more than 99%, so it can be used as uniform area light for flat-field measurement directly. We designed flat-field measurement device and formulate steps and methods for flat-field correction. After numerical stimulation and calculation, experiments carried out on solar chromospheres telescope and photosphere telescope separately. The result shows that the flat field obtained in this text could correct high-frequency information such as spots and non-uniformity of light path. Subjected to telescopes limited ability to eliminate stray light, flat-field measurement and correction also causes low-frequency information anamorphous because the angle of diffused light is much larger than normal observation. In order to amend low-frequency information distortion, we use multi-scale morphology filtering and median filtering to extract the low-frequency image from flat-field corrected image. Then the extracted low-frequency image is amended on the basis of theoretical limb darkening image. After flat-field correction and amendment, the correlation coefficient between corrected image and theoretical image is more than 0.99. At last, photosphere image of HMI and chromospheres image of GONG are used as reference images to quantitatively evaluate corresponding result in various field of view. The preprocessing of reference images includes three steps: (1) Centralization and geometric correction of experiment images and reference images; (2) unify reference images' pixel resolution based on experiment images; (3) according to fitting intensity attenuation of experiment images' margin, convolve the same Gaussian profile to unify the atmosphere effect on reference images and experiment images. The evaluation result shows that all indexes of corrected image are better than that of origin images. The flat-field measurement and correction method in this text is simple and convenient, and it is easy to realize automation. We suggest that the above mentioned method can be considered as a new method for full-disk solar telescope flat-field measurement and correction. In the future, we need to use diffuser which output angle is smaller during flat-field measurement to shorten exposure time and narrow the exposure time difference between flat-field measurement and normal observation. If a full-disk solar telescope wants to use this method to measure and correct flat-field, the ability of stray light elimination must be considered and optimized during design stage, and the data processing would be more simple and easy.

ground glass, solar telescope, flat-field measurement, image analysis, space environment

doi: 10.1360/N972016-01477