

# 关于云南天文台 2.4 m 地平式 反射望远镜的 CCD 平场

姚保安<sup>1</sup>, 李少昆<sup>2</sup>

(1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院云南天文台, 昆明 650011)

**摘要:** 为了定量估计云南天文台 2.4 m 地平式反射望远镜在配置新 CCD 照相机后散射光的消除程度, 在  $B, V, R, I$  各波段分别拍摄了天顶区附近的晨昏蒙影天空平场。实测表明, 如果不同旋转角度所拍平场取平均, 对于视场的绝大部分区域 (不包括视场的 4 个角以及尘粒像斑区域), 该望远镜受散射光的影响为  $-0.25\% \sim +0.25\%$ ; 但是对于需要平场精度为  $0.1\% \sim 0.2\%$  的观测工作, 该望远镜有困难。未来使用  $6000 \times 6000$  CCD (更大视场) 时, 散射光的影响有待再次测定。

**关键词:** 2.4 m 望远镜; CCD 平场; 散射光

**中图分类号:** P111.21, TH751<sup>+</sup>.1

## 1 引言

世界上现有的按标准设计的反射望远镜, 绝大多数都受残留散射光影响<sup>[1]</sup>。另外, 赤道式与地平式反射望远镜所受影响不同<sup>[2]</sup>。在赤道式反射望远镜做时间序列较差测光时, 只要待测星的像位于 CCD 的固定像元上, 即使 CCD 平场不太准确也能得到高精度的测光结果。当需要  $0.1\% \sim 0.2\%$  的平场精度时, 可以采用夜天平场。地平式反射望远镜的特点是, 其 CCD 相机置于旋转器上, 并在跟踪天体时不停旋转, 以消除地球自转的影响。因此, 上述用于赤道式望远镜的方法失效, 在 CCD 平场测量时, 消除散射光的影响比赤道式更为重要。

2006 年云南天文台开始安装 2.4 m 地平式反射望远镜, 2009 年为其配置了 VersArray  $1340 \times 1300$  CCD 照相机 (视场为  $4'48'' \times 4'40''$ )。另外, 国家天文台 (NAOC) 兴隆观测站的 EOS 1 m 地平式反射望远镜也配置了 VersArray  $1340 \times 1300$  CCD 照相机 (视场为  $11'6'' \times 11'3''$ ), 其残留散射光明显<sup>[2]</sup>。因此, 必须对云南高美古的 2.4 m 望远镜做类似的散射光检测。观测方法和结果在第二章叙述, 简短的讨论在第三章。

## 2 方法和结果

2008 年 10 月云南天文台 2.4 m 地平式反射望远镜上安装了借来的 Andor DW436  $2048 \times 2048$  CCD, 其像元大小为  $13.5 \mu\text{m}$  见方, 采用半导体制冷, 工作温度为  $-55^\circ\text{C}$ , 视场大小为  $4'57'' \times 4'57''$ 。该 CCD 照相机的滤光片有系统问题。2009 年 1 月换成了 VersArray  $1340 \times 1300$  CCD, 其像元大小为  $20 \mu\text{m}$  见方, 视场为  $4'48'' \times 4'40''$ , 在  $-110^\circ\text{C}$  的环境中工作。

## 2.1 散射光存在的证据

2.4 m 望远镜的挡光筒是标准设计, 其内壁经发黑处理, 虽然其发黑工艺相当好, 但仍不是绝对黑, 因此必然残留散射光。关键是, 在观测对象所要求的精度范围内, 其影响是否可忽略。

我们通过比较 CCD 在不同旋转角度拍摄的平场, 判断其影响大小。

均匀面光源经望远镜到达 CCD 上的平场照度  $C$ , 并非常数, 而是有一分布:  $C = C_{ij}$ , 这里  $i$  和  $j$  分别为 CCD 像元的列和行<sup>[2]</sup>。在极坐标下,  $C = C(r, \theta)$ , 其坐标原点可以取在望远镜的光轴中心, 也可取在旋转器的中心。为使地平式反射望远镜的平场与旋转器的旋转角度无关, 必须满足两个条件: 首先,  $C = C(r, \theta) = C(r)$ , 即平场照度的分布是中心对称的, 与  $\theta$  无关; 其次, 旋转器的中心与望远镜的光轴中心重合, 但并不需要 CCD 芯片的中心与旋转器的中心重合。

然而, 目前世界上没有哪架地平式反射望远镜完全满足这两点, 包括此 2.4 m 望远镜。取坐标原点在望远镜的光轴中心, 讨论为什么  $C(r, \theta) \neq C(r)$ 。因为 CCD 照相机测光用的宽带玻璃滤光片如果镀膜, 如 BFOSC 上所用的<sup>[3]</sup>, 会产生某些不对称, 并呈现为某种照度梯度。对于通常的宽带玻璃滤光片,  $C(r, \theta)$  的分布如呈现梯度, 则此梯度主要由残留散射光引起。

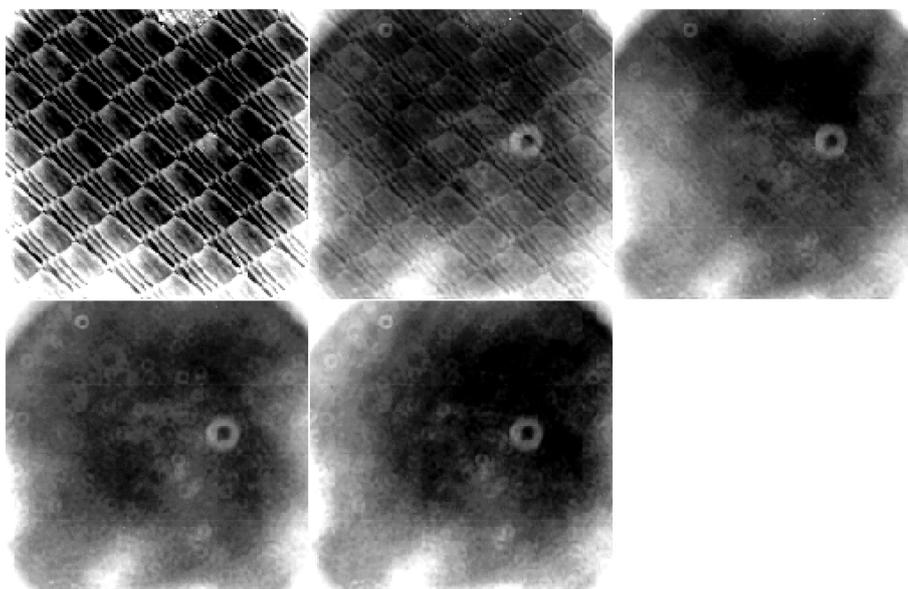


图 1 云南天文台 2.4 m 反射望远镜各波段所拍天空平场像。自左上至向右下其波段分别为:  $U, B, V, R, I$ 。其中  $V, I$  波段的图于 21 日拍摄, 其它于 23 日晨曦时拍摄。

我们于 2010 年 2 月 21 日 (晴夜) 拍摄了  $V$  和  $I$  波段的黄昏天空平场, 又在 2010 年 2 月 23 日拍摄了晨曦时 (多云)  $U, B, V, R, I$  各波段的天空平场, 见图 1 (图为负像)。图中的  $V$  和  $I$  波段的平场为 21 日晴夜所拍,  $U, B, R$  波段的平场为多云的 23 日所拍。图 1 中每个波段的图都是由对应滤光片的多幅图平均而得, 需要指出的是, 虽然在多云天拍摄, 但多幅图彼此相除所得商像都高度均匀。各图中 4 角的照度较弱, 估计系因 CCD 照相机的快门 (可能还有滤光片) 尺寸太小所致, 在以下讨论中, 对此问题不予考虑。从图中心向边缘照度减弱是正常的, 但其上半部照度明显比下半部的强, 显然照度分布不是中心对称, 而是存在某种梯度。

例如，对图 1 的 *I* 波段平场自右上至左下的扫描结果见图 2，可见其像元照度并不对称分布。

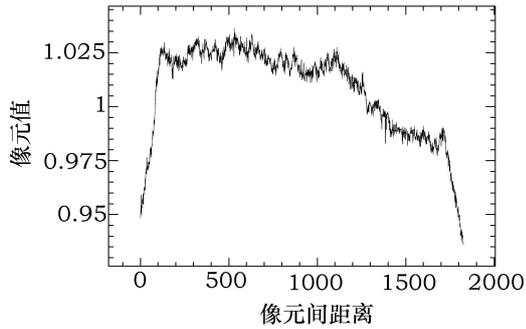


图 2 图 1 中的 *I* 波段像自右上至左下的扫描结果

最能清楚显示散射光存在的，是两幅不同旋转角度所拍平场之商。在同一旋转角度，用相同露光时间，连续拍摄多幅平场，取其平均以增加信噪比。再立即旋转 CCD 于不同角度，再拍摄多幅平场加以平均。同一旋转角度所拍平场彼此一致，其商像如图 3 所示。但是，不同旋转角度的两个平场相除之商就显露出明显图案 (各图像都已扣除 bias)，主要是一种梯度，见图 4。对图 4 中各波段分图沿对角线扫描，结果分别见图 5,6,7,8 (*U* 波段未拍不同旋转角度的像)。对图 4 中 *I* 波段商像做等光图，见图 9，更清楚地显示出了梯度。



图 3 同一旋转角度所拍平场彼此相除所得的商像。

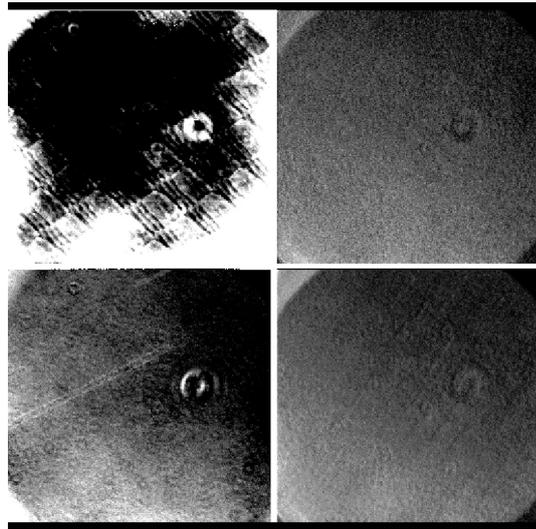


图 4 不同旋转角度所拍平场彼此相除所得的商像。自左上至右下，其波段分别为：*B*, *V*, *R*, *I*。

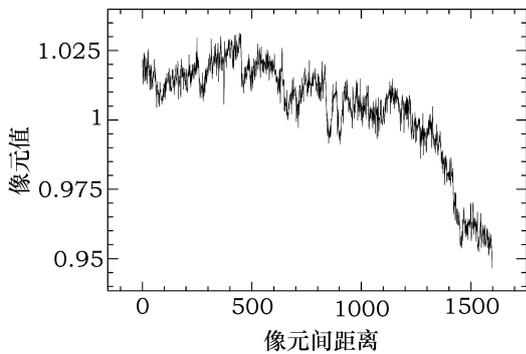


图 5 图 4 中 *B* 波段商像沿对角线的扫描结果。

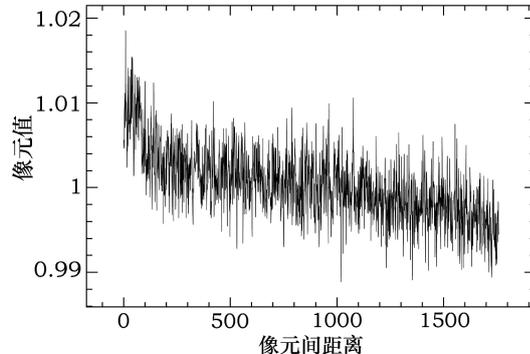


图 6 图 4 中 *V* 波段商像沿对角线的扫描结果。

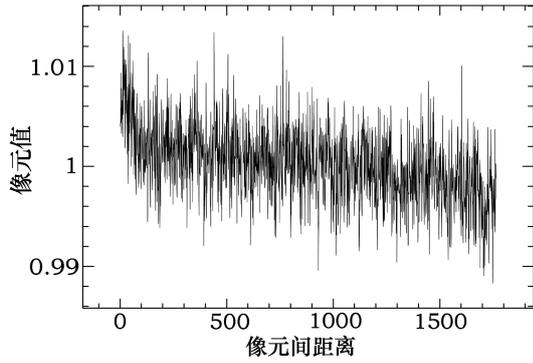


图 7 图 4 中 R 波段商像沿对角线的扫描结果。

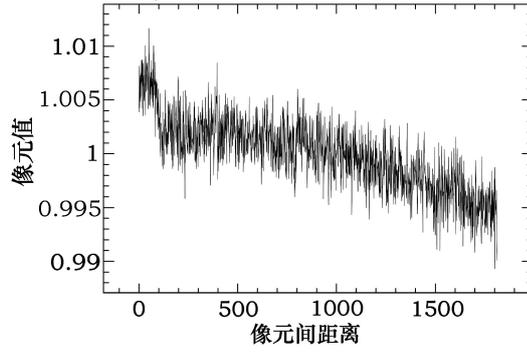


图 8 图 4 中 I 波段商像沿对角线的扫描结果。

### 2.2 误差估计

本节对此望远镜的观测结果做粗略的误差估计。设两颗比较星，其亮度相同，真强度为  $I$ ，在旋转器为某起始角度时，测得的强度分别为  $I_1^\circ$  和  $I_2^\circ$ 。由于 CCD 各像元的灵敏度不同，要除以平场做平场改正。在 CCD 上，两颗星的像所在位置处，起始观测时其平场值分别以  $ff_1^\circ$  和  $ff_2^\circ$  表示（平场已归一化）。因此， $I_1^\circ/ff_1^\circ = I$  和  $I_2^\circ/ff_2^\circ = I$ 。其星等差为：

$$\Delta m^\circ = -2.5 \lg \left( \frac{I_1^\circ/ff_1^\circ}{I_2^\circ/ff_2^\circ} \right) = 0. \quad (1)$$

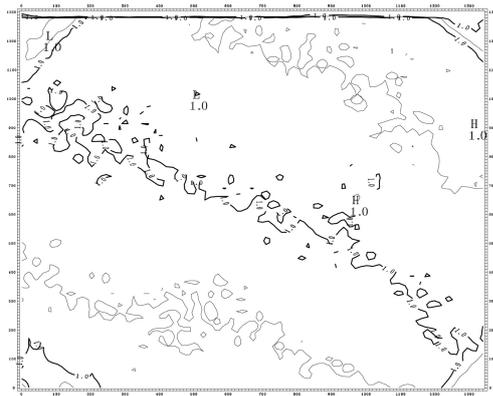


图 9 图 4 中 I 波段商像的等光图。

随后做时间序列较差测光。随着地球自转，旋转器不断旋转，到另一角度时，对应平场值  $ff_1$  和  $ff_2$ 。两颗比较星此时测得的强度分别为  $I_1$  和  $I_2$ ，应有： $I_1/ff_1 = I$ ， $I_2/ff_2 = I$ （亦即  $I_1 = I \times ff_1$ ， $I_2 = I \times ff_2$ ）。但观测者只有起始观测时的平场可用，而  $ff_1$  和  $ff_2$  未知。因此实测所得强度为  $I_1/ff_1^\circ$  和  $I_2/ff_2^\circ$ ，星等差：

$$\Delta m = -2.5 \lg \left( \frac{I_1/ff_1^\circ}{I_2/ff_2^\circ} \right) \neq 0. \quad (2)$$

亮度相同的星测出了不同的强度，相当于亮度不变的星测成了变星，其星等差随着地球自转不断变化。以  $d(\Delta m)$  表示  $\Delta m$  的变化，则有：

$$d(\Delta m) = \Delta m - \Delta m^\circ = -2.5 \lg \frac{(I_1/ff_1^\circ)/(I_2/ff_2^\circ)}{(I_1^\circ/ff_1^\circ)/(I_2^\circ/ff_2^\circ)}. \quad (3)$$

因为  $I_1 = I \times ff_1$ ， $I_2 = I \times ff_2$ ， $I_1^\circ = I \times ff_1^\circ$ ， $I_2^\circ = I \times ff_2^\circ$ ，代入上式，则有：

$$d(\Delta m) = -2.5 \lg \frac{ff_1/ff_1^\circ}{ff_2/ff_2^\circ}. \quad (4)$$

即，两幅不同旋转角度所拍的平场相除，它们的商不是均匀的像，其极小与极大值的对数之差，就是星等差的最大变化量。

图4是  $B, V, R, I$  各波段所得商像。用其对角线扫描结果(图5,6,7,8),就可估计测量误差(星等差)。

对于晴天拍摄的  $V$  和  $I$  波段像,以及多云天拍摄的  $R$  波段像,这种影响很小(不考虑图中4个角及尘埃像斑处)。图6,7,8中的极大值约为1.005,极小值约为0.995,代入式(4),得  $d(\Delta m) \leq 0.01 \text{ mag}$ 。

对许多观测项目,0.01 mag的精度已经足够。但  $B$  波段观测是例外,由图5可见,其误差显然大于0.06 mag,这可归因于拍摄不同旋转角度的  $B$  波段平场时,天空背景发生了变化。对于赤道式望远镜,即使平场有系统误差,拍时间系列的较差测光时,只要星像的位置在CCD上固定,变星与比较星的星等差,只存在一个零点差;而地平式的观测不单有零点差,而且还歪曲了光变曲线的形状。另外,尘埃像斑处的平场精度与其它处不同(见2.4节)。

### 2.3 不同旋转角度平场的平均

为了减小这种系统误差,可以将不同旋转角度所拍平场加以平均<sup>[4]</sup>。

#### 2.3.1 $V$ 和 $I$ 波段

对于  $V$  和  $I$  波段,只在2月21日拍摄了2个旋转角度( $0^\circ$  和  $180^\circ$ )的多幅平场。用2个角度所拍平场的平均像,分别与各角度的平场相除,所得商像见图10( $V$ 波段)和图11( $I$ 波段)。

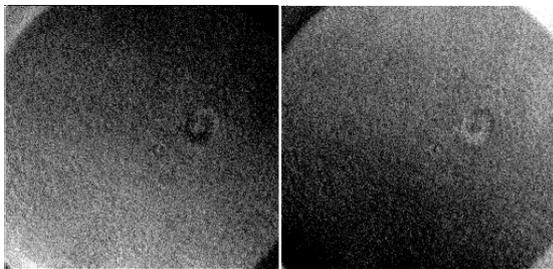


图10  $V$  波段观测的2个旋转角度的平均平场与各角度的平场相除所得商像。

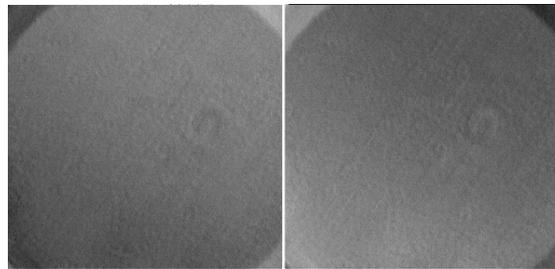


图11  $I$  波段观测的2个旋转角度的平均平场与各角度的平场相除所得商像。

图10中左、右分图的对角线扫描结果见图12和13。图11中左、右分图的扫描结果见图14和15。显然,不计平场像4个角区域,  $V$  和  $I$  波段观测的最大误差为0.005 mag。

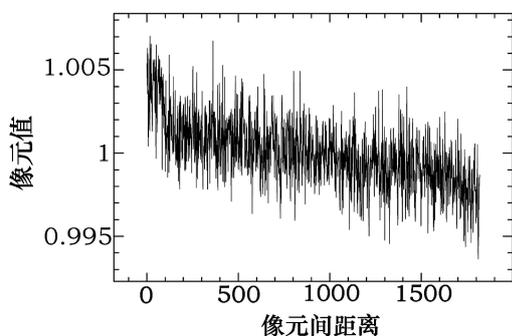


图12 图10中左分图的对角线扫描结果。

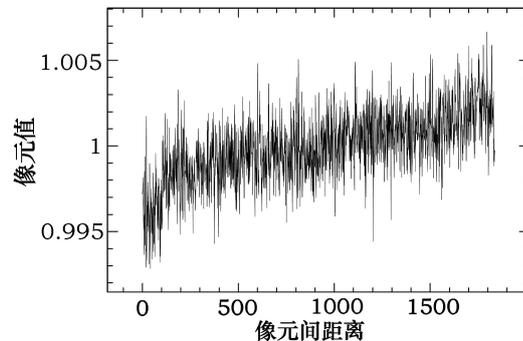


图13 图10中右分图的对角线扫描结果。

#### 2.3.2 $B$ 和 $R$ 波段

以2月23日(多云天)用到的  $B$  和  $R$  滤光片为例。对于  $B$  波段观测,其在3个旋转角度

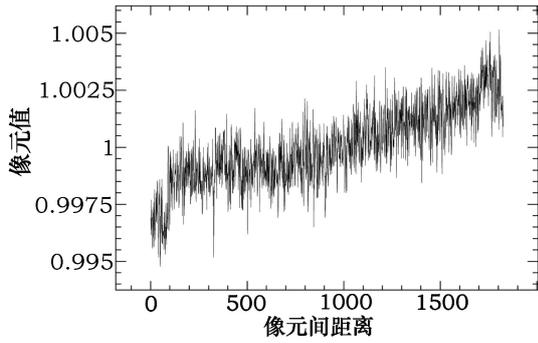


图 14 图 11 中左分图的对角线扫描结果。

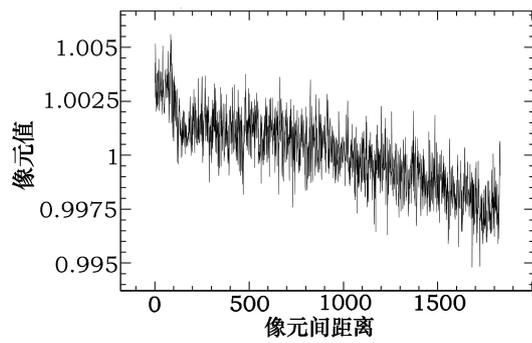


图 15 图 11 中右分图的对角线扫描结果。

( $0^\circ, 60^\circ, 240^\circ$ ) 所拍平场取平均, 再分别与各角度的平场相除, 其商像见图 16。图 16 中各分图的对角线扫描结果见图 17,18,19。由图可见, 不计平场像 4 个角落, 其值的范围都在  $\pm 0.005$  内, 亦即星等误差  $\leq 0.01 \text{ mag}$ 。对  $R$  滤光片在 3 个旋转角度所拍平场做类似的平均和相除, 其商像见图 20。图 20 各分图的扫描结果见图 21,22,23。其结果与  $B$  波段相似。

由于观测时间限制, 在  $B, R$  波段各自只拍摄了 3 个旋转角度的平场,  $V, I$  波段只拍摄了 2 个旋转角度的平场, 但可以预知, 对各滤光片在多个旋转角度所拍平场分别加以平均, 是提高测量精度的有效方法。

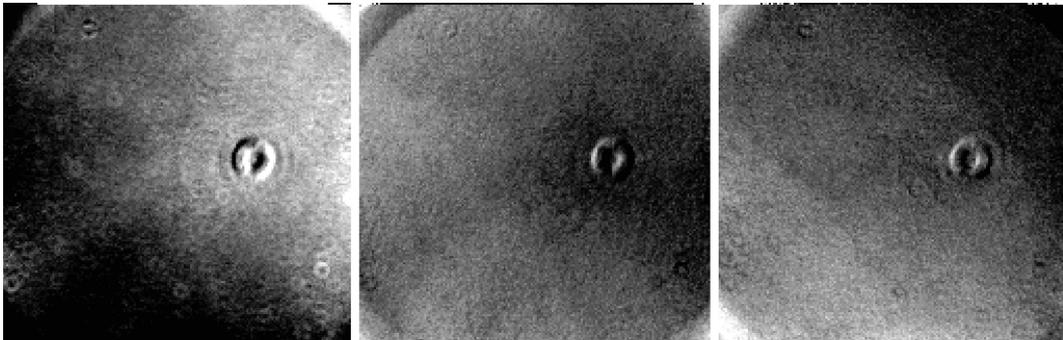


图 16  $B$  波段观测的 3 个旋转角度的平均平场与各角度的平场相除所得的商像。

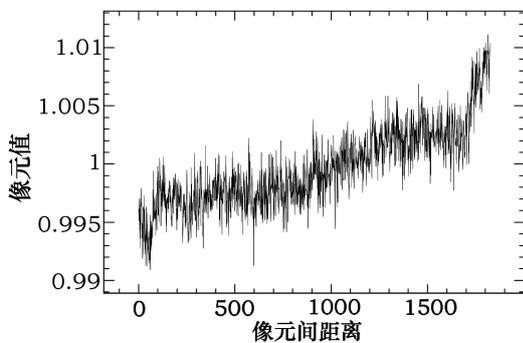


图 17 图 16 中左图的对角线扫描结果。

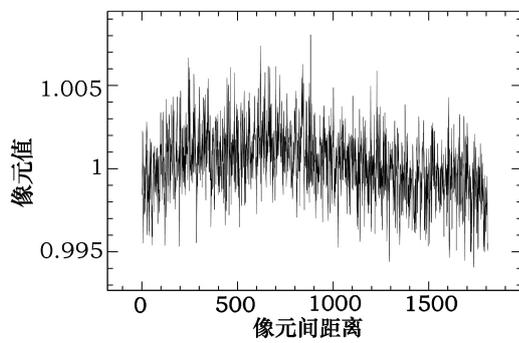


图 18 图 16 中的中间图的对角线扫描结果。

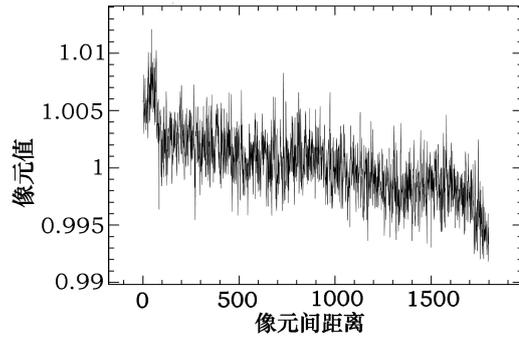


图 19 图 16 中右图的对角线扫描结果。

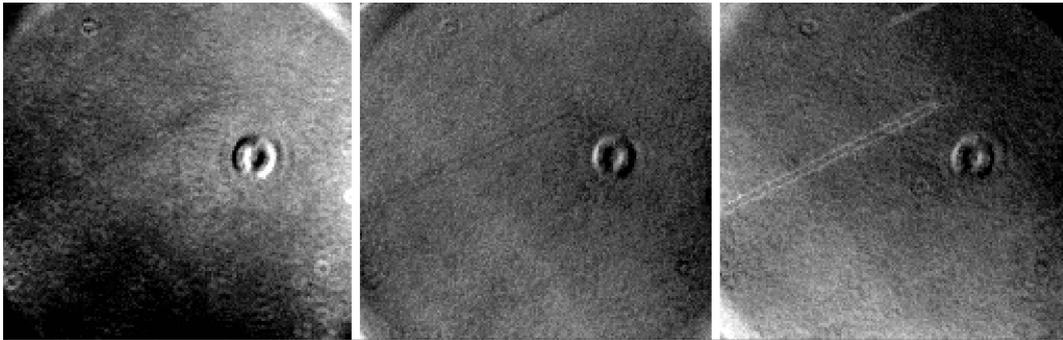


图 20  $R$  波段观测的 3 个旋转角度的平均平场与各角度的平场相除所得的商像。

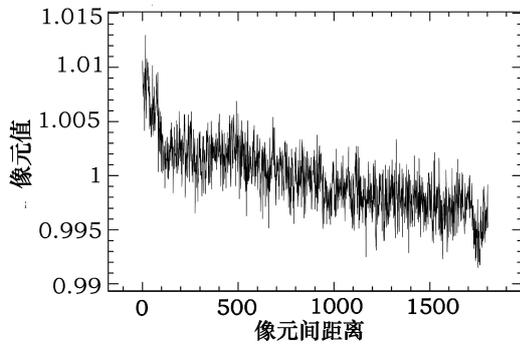


图 21 图 20 中左图的对角线扫描结果。

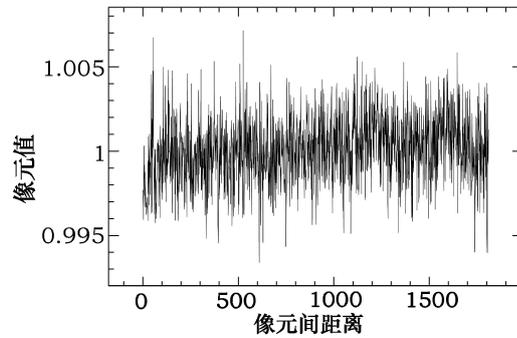


图 22 图 20 中的中间图的对角线扫描结果。

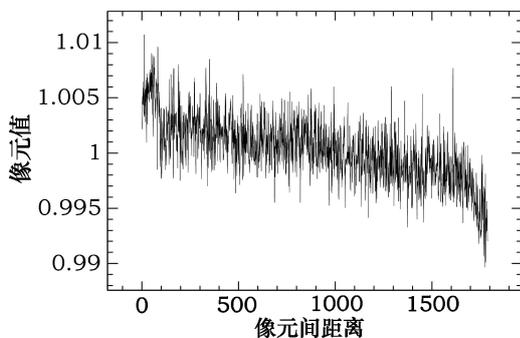


图 23 图 20 中右图的对角线扫描结果。

## 2.4 尘粒像斑处的平场测量精度

### 2.4.1 $B$ 滤光片

由图 1、图 4 等可见, 在 CCD 图像的右半部有一圆斑, 此类斑由落在 CCD 照相机滤光片或者窗口上的尘粒(或者水珠)引起, 本文中的圆斑, 估计由窗口上的尘粒或者水珠引起, 因为它在各波段像中的位置相同。对于  $B$  波段滤光片, 图 16 中穿过其圆斑的扫描结果见图 24, 25, 26。由图可见, 在这样的局部区域, 即便采用不同旋转角度的平均平场, 其误差仍达  $\pm 1\%$ 。即星等差可达 0.02 mag。

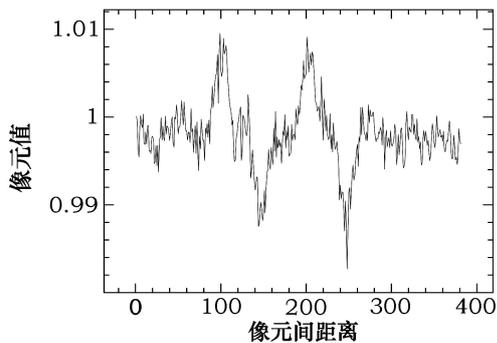


图 24 图 16 中左图的穿过圆斑的扫描结果。

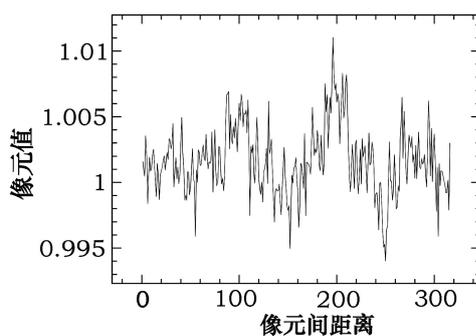


图 25 图 16 中中间图的穿过圆斑的扫描结果。

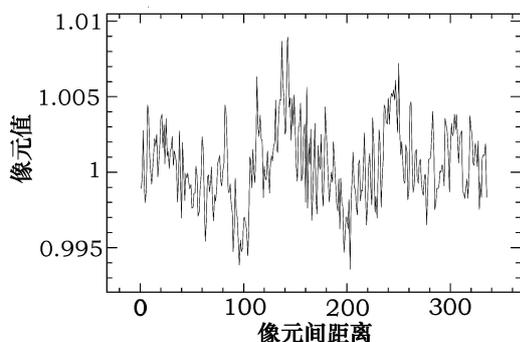


图 26 图 16 中右图的穿过圆斑的扫描结果。

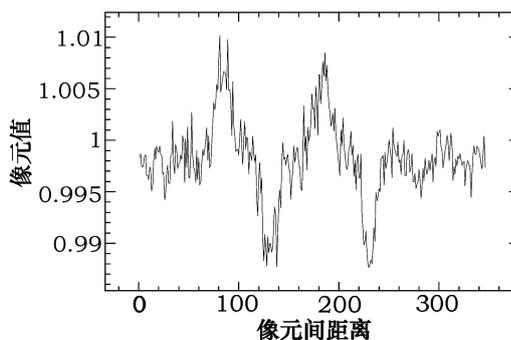


图 27 图 20 中左图的穿过圆斑的扫描结果。

### 2.4.2 R 滤光片

对于 R 滤光片，做穿过图 20 中圆斑的扫描，其左图的结果见图 27 (其它图略)。它的测量误差比 B 的稍小，但也接近 0.02 mag。

也许，晴朗的测光夜所拍摄平场像中，尘粒像斑处的测量误差会较小，这需要观测验证。

## 3 讨论

(1) 由照相机旋转角度的变化引起所拍平场的变化，是一类系统误差，即使待测星再明亮，输入信噪比再高，也避免不了此误差的产生。

为了消除天文望远镜的残留散射光，至少已有两架地平式和两架赤道式反射镜改造了挡光筒。它们是：西班牙的 2.56 m NOT 反射镜 (地平式)，墨西哥的 2.1 m San Pedro Martir 反射镜 (地平式)，CTIO 台的 0.9 m 反射镜 (赤道式)，新西兰的 1 m McLellan 反射镜 (赤道式)。另外，美国 KPNO 台的 2.1 m 反射镜 (赤道式) 也做过类似改造 (虽然可能是暂时改造)。

这些改造工作的细节，见文献 [2] 中的参考文献，此处不再叙述。虽然云南天文台 2.4 m 望远镜的挡光筒没有做类似改造，但是其发黑工艺不错。因而此望远镜的平场精度，足以满足多数研究课题的需要。

如果研究对象对测光精度要求高，建议谨慎使用此望远镜。例如  $\delta Sct$  变星，其主周期变幅不过 0.01 mag 量级，而其高阶谐波的变幅远小于 0.01 mag。要消除这种误差，即使可能，也非常麻烦。

(2) 此望远镜 CCD 照相机视场仅为  $4'48'' \times 4'40''$ 。NAOC 兴隆观测站的 EOS 1 m 镜，

虽然残留散射光明显,却是对其整个  $11'.6 \times 11'.3$  视场而言的,在  $4'48'' \times 4'40''$  的视场内,其散射光影响远小于1%<sup>[2]</sup>。

云南天文台计划中的 CCD 是  $6000 \times 6000$ , 此大尺寸 CCD 带来的大视场,需要再次检测其残留散射光的影响。

(3) 随着望远镜的长期使用,落尘(CCD 所拍图像上的像斑)的数量必然增加,如果不经常清洁有关表面,会影响地平式望远镜的高精度测光。

**致谢** 在乔荣川研究员的观测时间内,由他和张会彦、廖石龙取得了本文所用的观测资料,特此致谢。

#### 参考文献:

- [1] 姚保安, 林清. 天文学报, 1997, 38: 312
- [2] 姚保安, 王叔和, 唐正宏. 天文学进展, 2008, 26(4): 369
- [3] YAO B, LIN H. ChJAA, 2002, 2: 563
- [4] Bruntt H, Grundahl F, Tingley B *et al.* A&A, 2003, 410: 323

## Note on the CCD Flat Fielding at the 2.4-m Alt-azimuth Reflector of Yunnan Observatory

YAO Bao-an<sup>1</sup>, LI Shao-kun<sup>2</sup>

(1. *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030;*  
2. *Yunnan Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011*)

**Abstract:** In order to estimate the influence of scattered light for the 2.4-m Alt-azimuth Reflector of Yunnan Observatory, twilight flat fields near zenith in  $B, V, R$  and  $I$  were obtained. For most area of the field of view except the four corners and the area of dust image, the influence is  $-0.25\% \sim +0.25\%$  if the average of field flats obtained at different orientation of the camera is used. But it is unsuitable for observations requiring  $0.1\% \sim 0.2\%$  precision. When the  $6000 \times 6000$  CCD (a wider field of view) is attached to the reflector as planned, the influence of scattered light has to be checked again.

**Key words:** 2.4-m Reflector; CCD Flat Fielding; scattered light