

# 一种地基太阳望远镜焦点探测方法

方玉亮<sup>1,2</sup>, 柳光乾<sup>1</sup>, 金振宇<sup>1\*</sup>, 李鹏飞<sup>1,2</sup>, 刘 忠<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院云南天文台, 云南 昆明 650216;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 太阳强热辐射导致太阳望远镜光机系统热形变, 引发较明显的时变焦点位置漂移。离焦像差影响高分辨观测, 降低观测图像的空间分辨率, 因此需要探测并补偿望远镜的离焦像差。由于大气湍流的影响, 一般的基于图像处理的方法不能有效地运用于地基太阳望远镜。而天文望远镜常用的基于 Shack-Hartman 波前探测的方法, 在观测太阳边缘和低对比度的太阳米粒结构时无法工作。因此, 提出一种基于图像能谱分析的焦点探测方法, 该方法以图像能谱比的低频分量平均值作为焦点探测评价函数, 能够消除目标信息的影响和平滑大气湍流的影响。实验证明, 该方法的探测精度和探测时间分辨率能满足地基太阳望远镜不同观测目标的高分辨观测的需要。

**关键词** 成像系统; 地基太阳望远镜; 焦点探测; 能谱分析; 大气湍流

中图分类号 P111 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.0711003

## A Focus Detection Method for Ground-Based Solar Telescope

Fang Yuliang<sup>1,2</sup>, Liu Guangqian<sup>1</sup>, Jin Zhenyu<sup>1</sup>, Li Pengfei<sup>1,2</sup>, Liu Zhong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming, Yunnan 650216, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Intense solar radiation leads to thermal deformation of the solar telescope opto-mechanical system, triggering obvious time-varying focus shifts. Defocus aberration has an adverse effect on high-resolution observation and reduces the image spatial resolution. Therefore, the defocus aberration is necessary to be detected and compensated. Considering the effects of atmospheric turbulence, the focus detection method based on general image processing can not be applied well on ground-based solar telescopes. The focus detecting method based on Shack-Hartman wavefront detection which commonly used in astronomical telescopes is invalid at observing the solar limb and the low contrast solar granulation. The focus detecting method based on image power spectrum analysis is provided. This method used the average value of the low-frequency components of the image spectrum ratio as the cost function for focus detection, which can effectively eliminate the impact of object structure and atmospheric turbulence. Experimental results show that the detecting accuracy and frequency of this method can meet the requirement of high-resolution observations for different objects on ground-based solar telescope.

**Key words** imaging systems; ground-based solar telescope; focus detection; power spectrum analysis; atmospheric turbulence

**OCIS codes** 110.6770; 070.4790; 260.5950

## 1 引 言

天文观测特别是太阳观测的重要目标之一是获得高空间分辨率的观测结果, 影响望远镜高分辨观测的一个重要因素是望远镜的像差。由于太阳辐射和环境温度变化导致望远镜镜面支撑和连接机构的热胀冷

收稿日期: 2017-01-12; 收到修改稿日期: 2017-04-05

基金项目: 国家自然科学基金(11573068, 11273059)

作者简介: 方玉亮(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事天文技术与方法方面的研究。E-mail: fyul@ynao.ac.cn

导师简介: 刘 忠(1968—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事天文技术与方法方面的研究。

E-mail: lz@ynao.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: kim@ynao.ac.cn

缩,太阳望远镜往往会产生较明显的像差,其中最主要的像差是离焦像差。根据高分辨观测的要求,一米新真空太阳望远镜(NVST)离焦像差的容差应小于  $0.2\lambda$ ,但在一整天的观测中离焦像差远远超过了  $0.2\lambda$ ,最大可达到  $2.8\lambda$ <sup>[1]</sup>。荷兰开放望远镜(DOT)在一整天的观测过程中最大焦点偏移量是焦点容许偏移量的 10 倍<sup>[2]</sup>。太阳望远镜在一天的观测中离焦是非常严重的,如果不对离焦像差进行探测并补偿,将严重影响高分辨观测,因此,探测并补偿望远镜离焦像差是一项非常重要且必需的工作。

目前,基于图像处理的焦点探测方法是比较广泛应用的方法<sup>[3]</sup>,该方法先扫描采集一段范围内的图像,然后通过清晰度评价函数来判断焦点位置。清晰度评价函数是自动调焦技术的重要部分,直接影响着自动调焦精度,为此研究人员提出许多不同的清晰度评价函数,如基于空域灰度的算法<sup>[3]</sup>、频域功率谱函数<sup>[4]</sup>、最小熵算法<sup>[5]</sup>以及过亮区域的特殊情况下的对焦评价函数<sup>[6]</sup>。地基望远镜无法避免大气湍流的影响,离焦和大气湍流都会造成图像模糊,一般的基于图像处理的方法很难分离焦和大气湍流的影响,因此无法有效地应用于地基望远镜。太阳观测图像中最常用图像质量评价方法是对比度均方根法<sup>[7]</sup>,DOT 就采用该方法来判断焦点是否偏移,但是为了避免大气湍流等其他因素的影响,它通过分光的方法把焦前和焦后太阳图像同时成像在同一个相机上,然后以焦前和焦后图像的对比度均方根的差值来判断焦点偏移<sup>[2]</sup>。针对地基天文望远镜的斑点像宽度法<sup>[8]</sup>和基于高分辨统计重建的望远镜像质评价方法<sup>[9-10]</sup>,主要适用于点源星象目标。而一些全日面太阳望远镜会用太阳边缘对比度梯度来作为焦点探测评价函数<sup>[11]</sup>。

对于太阳非特定局部目标高分辨观测的太阳望远镜(如 NVST),其观测目标的对比度有很大的差异性,太阳黑子比太阳米粒结构的对比度高,不同区域的太阳米粒结构的对比度也会随距日面中心距离增加而降低<sup>[7]</sup>,日面边缘虽然有很高的对比度,但是没有太多的结构信息。天文望远镜常用基于 Sharck-Hartman 波前探测的焦点探测方法<sup>[8]</sup>和太阳自适应光学系统,无法在观测日面边缘和低对比度的太阳米粒结构时工作,因此,高分辨观测只能依赖事后天文高分辨统计重建<sup>[12]</sup>,此时,高精度的调焦就显得更为重要。针对地基太阳望远镜不同观测目标的调焦需要和大气湍流的影响,提出一种对目标信息不敏感、能够平滑大气湍流影响的焦点探测方法。本文从太阳观测图像的能谱分析出发,提出了统计谱比(SRPS)焦点探测方法。该方法以能谱比的低频分量的平均值作为焦点探测评价函数,通过谱比方式消除目标信息的影响,通过统计平均方式平滑大气湍流的影响。并进行了实验研究,实验结果表明,该方法可行并且具有较高的探测精度。

## 2 SRPS 焦点探测方法

### 2.1 SRPS 焦点探测评价函数

基于图像处理的焦点探测方法需要扫描采集成像系统从焦前到焦后的图像,然后分析比较不同位置的图像信息得到焦点位置。图像的能谱信息包含着望远镜的离焦信息,但是为了减少目标相关信息和大气湍流的影响,需要消除目标相关信息和平滑大气湍流造成的扰动。

通过谱比法来消除目标信息,在望远镜成像系统从焦前到焦后的一段距离内等距离间隔的  $N$  个离焦位置点扫描采集  $N$  幅短曝光图像,对这些图像进行谱比分析:

$$R_i(u, v) = \frac{|I_i(u, v)|^2}{\langle |I_i(u, v)|^2 \rangle}, \quad (1)$$

式中  $R_i(u, v)$  为离焦位置  $i$  处采集的短曝光图像的功率谱比值,  $|I_i(u, v)|^2$  为在离焦位置  $i$  处采集的短曝光图像的能谱,  $\langle |I_i(u, v)|^2 \rangle$  为扫描采集的所有短曝光图像功率谱的统计平均值

$$\langle |I_i(u, v)|^2 \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |I_i(u, v)|^2. \quad (2)$$

假设线性空不变,望远镜的成像过程在频域中可描述为

$$I(u, v) = F(u, v) H(u, v), \quad (3)$$

式中  $F(u, v)$  是目标的傅里叶变换,  $H(u, v)$  是大气-望远镜综合系统的光学传递函数。在短时间扫描采集的过程中,假设  $F(u, v)$  不变,把(3)式代入(1)式可得

$$R_i(u, v) = \frac{|H_i(u, v)|^2}{\langle |H_i(u, v)|^2 \rangle}. \quad (4)$$

由(4)式可知,通过除法得到的功率谱比值  $R_i(u, v)$  消除了目标相关信息。

大气湍流造成的扰动在近场近似时可以只考虑光波相位扰动的影响,相位扰动服从高斯统计<sup>[13]</sup>,可以通过多组数据平均来平滑大气湍流的影响。在相同的  $N$  个离焦位置点进行  $M$  次扫描采集,然后对不同组间相同离焦位置点的图像谱比值进行平均:

$$\bar{R}_i = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M R_{ij}, \quad (5)$$

式中  $R_{ij}$  是第  $j$  组位置  $i$  的谱比值。为了便于比较不同离焦量下  $\bar{R}_i(u, v)$  的区别,把二维函数转化成单一数值指标

$$Q_i = \frac{1}{P} \sum_{w=1}^b \bar{R}_i(\omega), \quad (6)$$

式中  $\omega = \sqrt{u^2 + v^2}$  为焦点探测评价函数,  $[a, b]$  是一维频率,  $[a, b]$  是选取的频率范围,  $P$  是  $[a, b]$  范围内的取值数量。与低频分量相比,离焦像差对图像能谱高频分量的影响更为显著<sup>[14]</sup>,但是大气湍流也对图像能谱高频分量影响更明显,并且实测图像能谱高频分量信噪比比低频分量低,因此,频率范围选取的是低频部分。

## 2.2 焦点探测评价函数曲线拟合

选取  $\bar{R}_i$  的低频分量进行平均得到的一维函数  $Q_i$  来作为焦点探测评价函数,当采集组数足够多的时候,大气湍流的影响能够被充分地平滑,从  $Q_i$  能得到比较平滑的单峰曲线,从而能够得到比较精确的焦点位置。但是当采集组数多时需要更多的时间,对一个具有时变离焦像差的望远镜来说,焦点探测的时间分辨率越小越好。因此在有限采集组数的情况下,需要对  $Q_i$  进行曲线拟合,从拟合曲线的峰值点来确定焦点位置。图 1 是模拟望远镜(望远镜口径为 1 m, 焦比  $f=26$ , 中心波长  $\bar{\lambda}=0.7058$  nm)在不同大气湍流<sup>[15]</sup>条件下的 SRPS 焦点探测评价函数曲线,散点图是数据点,曲线是对这些数据点的高斯拟合曲线。图 1(a)和(b)是模拟扫描 1000 组数据进行统计平均的结果,散点图和高斯拟合曲线基本重合,散点图很平滑,能够得到单峰值点;图 1(c)和(d)是扫描 10 组数据的结果,散点图起伏变化较大,视宁度  $r_0$  差的时候起伏更大,无法从散点图得到峰值点,但是随着离焦量的变化,散点图呈明显的单峰变化趋势,因此通过曲线拟合能够得到峰值点,从而得到焦点位置。图 1(c)和(d)得到的焦点位置与实际焦点位置偏差分别是  $244 \mu\text{m}$  和  $73 \mu\text{m}$ ,而图 1(a)和(b)的偏差均小于  $38 \mu\text{m}$ ,因此在理想条件下,模拟实验具有非常高的焦点探测精度。

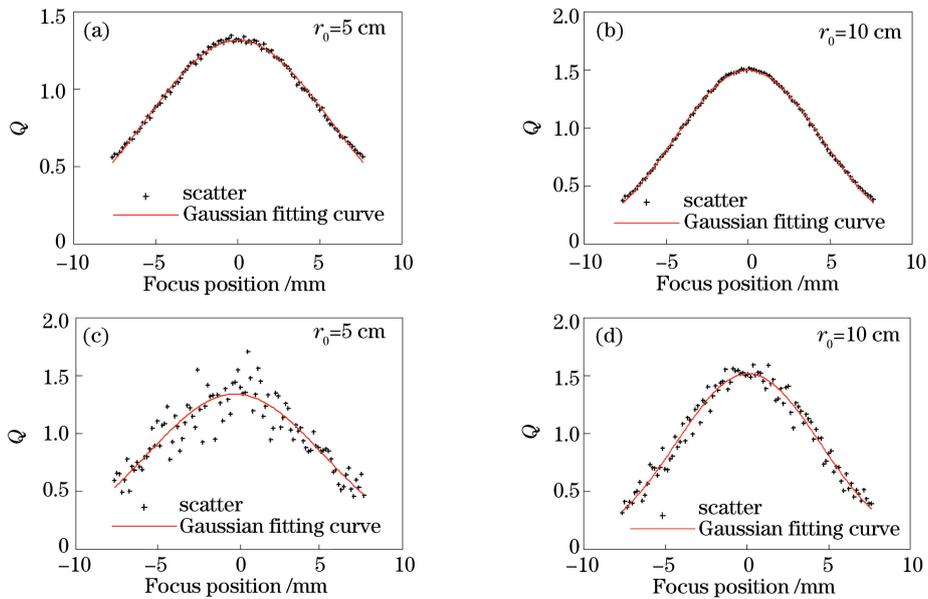


图 1 模拟数据的焦点探测评价函数曲线。(a)(b) 1000 组;(c)(d) 10 组

Fig. 1 Focus measurement evaluation function curves of simulation data. (a)(b) 1000 groups; (c)(d) 10 groups

## 2.3 大气湍流影响的统计平滑

为了平滑大气湍流的影响,需要每个离焦位置点处采集多幅图像用于谱比的统计平均,一种更容易实现

的方式是在扫描过程中每个离焦位置点采集多幅图像,扫描一次完成(称为单组多幅),而另外一种方式需要对每个离焦位置进行较高精度的重复定位(称为多组单幅)。大气湍流造成的相位扰动和对数振幅扰动服从高斯随机统计<sup>[13]</sup>,在较短时间间隔内近似满足平稳性,两个时间点的大气湍流的统计特性随时间间隔的减小而接近。多组单幅的扫描方式可以使一次扫描的不同离焦位置点的大气湍流统计特性更为相近。在单组多幅采集方式下,模拟了每个离焦位置点视宁度变化情况下的焦点探测实验,图 2(a)是调焦评价函数曲线,图 2(b)是相应的视宁度变化曲线,从图 2 可以看到,当视宁度起伏变化时,焦点探测评价函数不再具有单峰变化趋势,因此不能非常准确的判断焦点位置。尽可能在短时间内完成一次不同离焦位置的扫描采集能够使每个离焦位置点的大气湍流统计特性比较相近,从而提高焦点探测的精度,因此选用单幅多组的扫描方式采集图像。

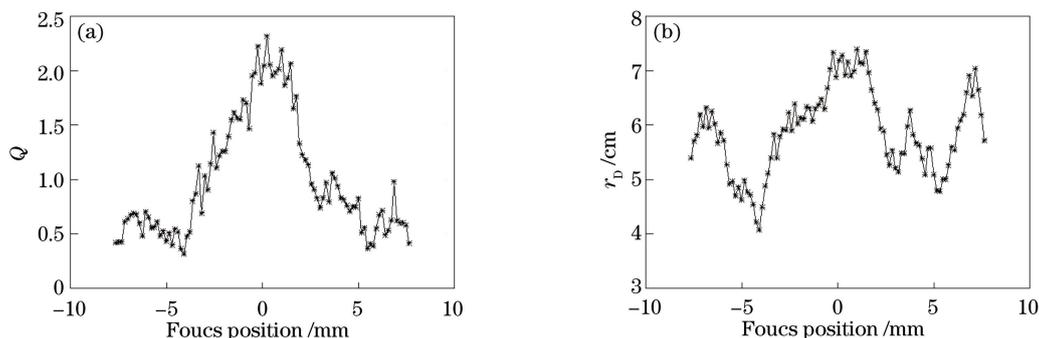


图 2 (a)视宁度变化的调焦评价函数曲线;(b)视宁度变化曲线

Fig. 2 (a) Focus measurement evaluation function curve of the variational seeing; (b) seeing curve

### 3 实测实验

#### 3.1 焦点探测系统简介

实测实验是在抚仙湖 NVST 成像系统中分出的实验通道上进行,焦点探测系统望远镜后端光路如图 3 所示,F3 表示的是望远镜的第三焦点。焦点探测装置由电控平移台搭载相机组成,实物如图 4 所示,相机负责采集太阳图像,电控平移台负责把相机移动到指定位置和记录位置信息,焦点探测系统参数如表 1 所示。

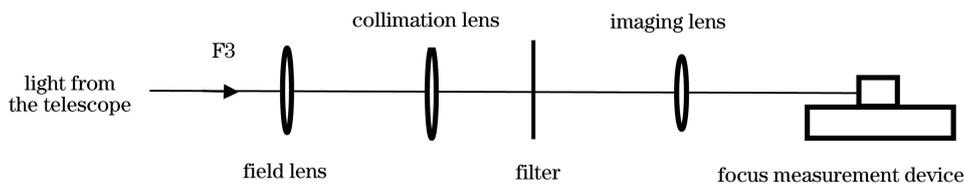


图 3 焦点探测系统光路示意图

Fig. 3 Diagram of the focus measurement system

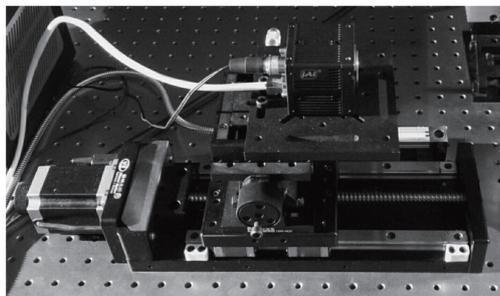


图 4 焦点探测装置

Fig. 4 Focus measurement device

表 1 焦点探测系统参数

Table 1 Parameters of focus measurement system

Parameter	Value	Parameter	Value
Telescope aperture	0.98 m	Camera pixels	1392 pixel×1040 pixel
Focal ratio	26	Pixel size	6.45 μm
Center wave	0.7058 nm	Maximum frame rate	30 frame/s
Bandpass	1 nm	Position accuracy	10 μm

### 3.2 不同观测目标下的焦点探测实验

太阳黑子、太阳米粒结构和太阳边缘的焦点探测实验结果分别如图 5~7 所示。图 5~7 中(a)是焦点探测评价函数曲线,曲线的横坐标是电控平移台的位置值。图 5~7 中(b)是评价函数曲线得到的焦点位置距离最近的一张图像。图 5~7 中(c)和(d)是与图 5~7 中(b)相距大约为 3.8 mm 的前后两张图像,这个距离相对应的离焦像差是  $\lambda$ 。由图 5~7 的焦点探测评价函数曲线得到的焦点位置分别是 18.835, 20.365, 15.850 mm。不同观测目标下,调焦评价函数曲线散点图都具有较好的单峰趋势。由于大气湍流的影响,不能通过图像的清晰度来判断 SRPS 焦点探测的精确度,但是可以判断焦点探测的正确性,探测得到的焦点位置附近的图像都具有较好的清晰度。因此,SRPS 焦点探测法对这三种比较典型的观测目标都具有较好的适用性。

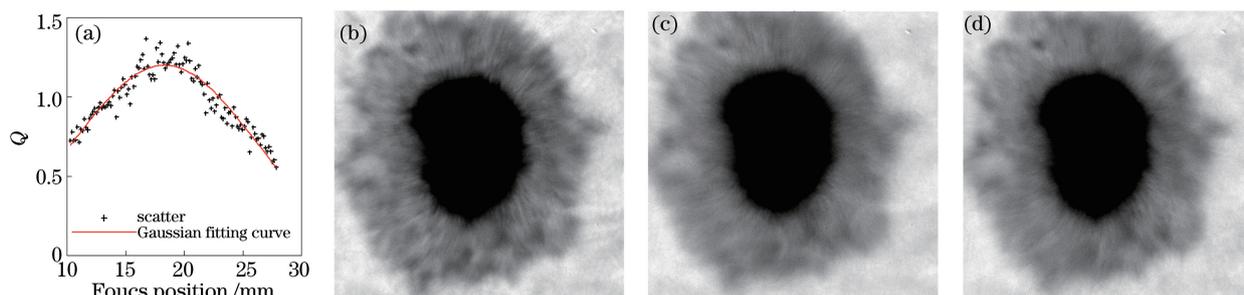


图 5 太阳黑子的焦点探测实验。(a)焦点探测评价函数曲线;(b)  $i=18.852$  mm 的采集图像;  
(c)  $i=15.027$  mm 的采集图像;(d)  $i=22.674$  mm 的采集图像

Fig. 5 Focus measurement experiment for sunspot. (a) Focus measurement evaluation function curve;  
(b) image at  $i=18.852$  mm; (c) image at  $i=15.027$  mm; (d) image at  $i=22.674$  mm

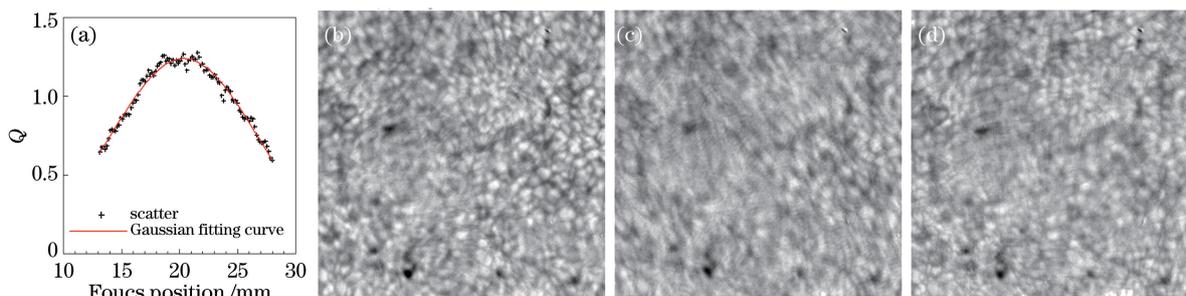


图 6 太阳米粒结构的焦点探测实验。(a)焦点探测评价函数曲线;(b)  $i=20.349$  mm 的采集图像;  
(c)  $i=16.598$  mm 的采集图像;(d)  $i=24.098$  mm 的采集图像

Fig. 6 Focus measurement experiment for solar granulation. (a) Focus measurement evaluation function curve;  
(b) image at  $i=20.349$  mm; (c) image at  $i=16.598$  mm; (d) image at  $i=24.098$  mm

### 3.3 焦点探测精度评估实验

NVST 没有其他精确的焦点探测方式,而且有较明显时变焦点位置漂移,因此很难获得较为客观的焦点位置与 SRPS 焦点探测得到的焦点位置作比较。但是 NVST 的调焦机构有比较精确的位置,通过调节调焦机构能够得到比较精确的焦点偏移量。因此,可以通过调焦机构的位置来评估焦点探测精度。焦点探测精度评估实验过程如下:

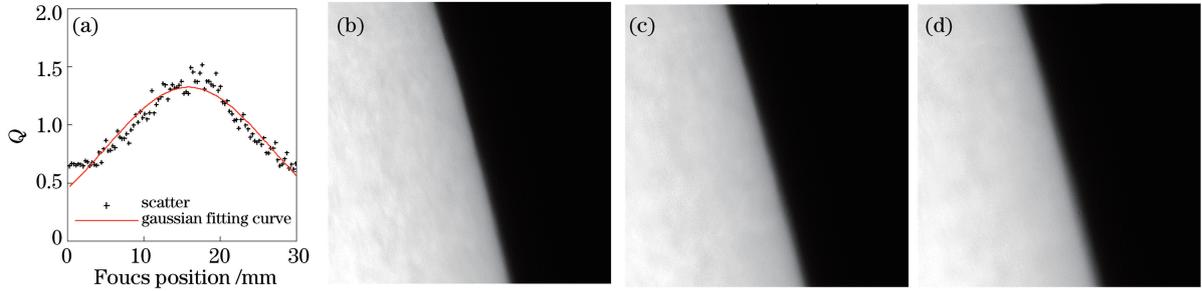


图 7 太阳边缘的焦点探测实验。(a)焦点探测评价函数曲线;(b)  $i=15.875$  mm 的采集图像;  
(c)  $i=11.977$  mm 的采集图像;(d)  $i=19.777$  mm 的采集图像

Fig. 7 Focus measurement experiment for solar limb. (a) Focus measurement evaluation function curve;  
(b) image at  $i=15.875$  mm; (c) image at  $i=11.977$  mm; (d) image at  $i=19.777$  mm

- 1) 在调节望远镜焦点前,测量一次焦点位置  $p_1$ ;
- 2) 调节望远镜调焦机构,使焦点位置偏移  $x$ ,再测一次焦点位置  $p_2$ ;
- 3) 计算  $\Delta=p_1-p_2$ ,并比较  $\Delta$  与  $x$  之间的绝对偏差  $E_{\text{error}}=|\Delta-S|$  来评估焦点探测的精度。

为了减少温度变化导致的望远镜焦点位置偏移对评估实验的影响,尽量减小实验过程 1) 和 2) 之间的时间间隔,并选择温度变化较小的时段进行实验。图 8 是 58 次实验得到的焦点探测绝对偏差散布图,绝对偏差的平均值是  $445 \mu\text{m}$ ,相对应的离焦像差是  $0.117\lambda$ 。

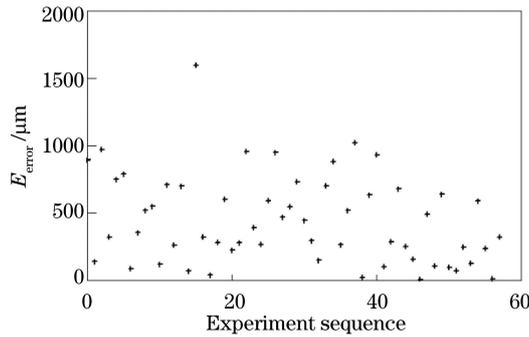


图 8 焦点探测绝对误差

Fig. 8 Absolute error of focus measurement

从焦深角度来看,当离焦距离处在焦深内时系统成像是清晰的,当焦点探测精度小于焦深时视为可行。望远镜焦深计算公式为

$$\delta = \pm 2\bar{\lambda}f^2, \quad (7)$$

把  $f=26$  和  $\bar{\lambda}=0.7058 \text{ nm}$  代入(7)式得到焦深  $\delta = \pm 954 \mu\text{m}$ ,而焦点探测的绝对偏差平均值为  $445 \mu\text{m}$ ,因此从焦深角度,SRPS 的探测精度是能够满足要求的。

从天文高分辨统计重建的角度来看,当离焦像差小于  $0.2\lambda$  时对高分辨统计重建无明显影响,因此探测精度应小于  $0.2\lambda$ <sup>[1]</sup>。SRPS 得到焦点探测绝对偏差为  $0.117\lambda$ ,能够满足天文高分辨统计重建需要。

文献[1]中通过实测温度变化估计了 NVST 的离焦像差变化,发现最快温度变化时段的离焦像差变化率是  $0.02\lambda \cdot \text{min}^{-1}$ ,按照高分辨观测的要求,需要 10 min 以内完成一次离焦像差的补偿。在焦点探测实验中,完成一次扫描组数  $M=10$ 、每组位置点  $N=100$  的焦点探测需要大概 6 min,因此 SRPS 焦点探测方法的时间分辨率也能够满足太阳望远镜高分辨观测的要求。

## 4 结 论

针对地基太阳望远镜,提出了 SRPS 焦点探测方法,该方法以统计功率谱比值的低频分量平均值作为焦点探测评价函数来判断焦点位置。该方法对目标信息不敏感,在不同观测目标条件下均有效。该方法的焦点探测绝对误差的平均值为  $445 \mu\text{m}$ (相对应的离焦像差为  $0.117\lambda$ ),能够满足太阳望远镜高分辨观测的调焦

需求。该方法的时间分辨率也能够满足离焦像差缓变的太阳望远镜的要求。SRPS 焦点探测方法已经应用于 NVST 日常观测过程中离焦像差的测量和修正。

## 参 考 文 献

- [1] Fang Yuliang, Jin Zhenyu, Liu Zhong, *et al.* A study of influences of defocus aberrations on high-resolution image reconstruction for data from the mew vacuum solar telescope of the YNAO [J]. *Astronomical Research and Technology*, 2015, 12(2): 183-188.  
方玉亮, 金振宇, 刘 忠, 等. 一米新真空太阳望远镜离焦对高分辨太阳观测图像重建的影响[J]. *天文研究与技术*, 2015, 12(2): 183-188.
- [2] Bettonvil F C, Suetterlin P, Hammerschlag R H, *et al.* Multi-wavelength imaging system for the Dutch open telescope [C]. *SPIE*, 2003, 4853: 306-317.
- [3] Sun Y, Duthaler S, Nelson B J. Autofocusing algorithm selection in computer microscopy[C]. *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2005: 70-76.
- [4] Zhao Zhibin, Liu Jinghong. Power spectra based auto-focusing method for airborne optoelectronic platform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(12): 3495-3500.  
赵志彬, 刘晶红. 基于图像功率谱的航空光电平台自动检焦设计[J]. *光学学报*, 2010, 30(12): 3495-3500.
- [5] Guo L, Jiang A, Liu Z, *et al.* Minimum entropy for the space solar telescope automatic focus [C]. *SPIE*, 2005, 5642: 385-390.
- [6] Wang Yeru, Feng Huajun, Xu Zhihai, *et al.* An autofocus evaluation function based on the saturate pixels removing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(12): 1210001.  
王焯茹, 冯华君, 徐之海, 等. 基于饱和像素剔除的自动对焦评价函数[J]. *光学学报*, 2016, 36(12): 1210001.
- [7] Deng H, Zhang D, Wang T, *et al.* Objective image-quality assessment for high-resolution photospheric images by median filter-gradient similarity [J]. *Solar Physics*, 2015, 290(5): 1479-1489.
- [8] Holmes R, Sickmiller B, Steinhoff N, *et al.* Accurate focus correction for large telescopes [C]. *Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, 2015, 1: 68.
- [9] Jin Z, Lin J, Liu Z. High-resolution image reconstruction technique applied to the optical testing of ground-based astronomical telescopes [C]. *SPIE*, 2008, 7012: 70122U.
- [10] 林 京, 刘 忠, 金振宇. 天文高分辨像复原技术检测地基天文光学望远镜成像质量 [J]. *天文研究与技术-国家天文台台刊*, 2004, 1(3): 188-195.
- [11] Silva-López M, Garranzo-García D, Sánchez A, *et al.* Analysis and evaluation of the Full Disk Telescope refocusing mechanism for the Solar Orbiter mission [J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(8): 084104.
- [12] Xiang Y, Liu Z, Jin Z. High resolution reconstruction of solar prominence images observed by the New Vacuum Solar Telescope [J]. *New Astronomy*, 2016, 49: 8-12.
- [13] Goodman J W. *Statistical optics* [M]. Qin Kecheng, Liu Peisen, Cao Qizhi, *et al.* Transl. Beijing: Science Press, 1992: 362-375.  
顾德门. *统计光学* [M]. 秦克诚, 刘培森, 曹奇志, 等译. 北京: 科学出版社, 1992: 362-375.
- [14] Zhang Ning, Shen Xiangheng, Ye Lu, *et al.* Influence of high frequency spectrum of photoelectric measurement equipment images to the subjective evaluation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4): 0411002.  
张 宁, 沈湘衡, 叶 露, 等. 光电测量设备图像高频频谱对主观评价的影响 [J]. *光学学报*, 2016, 36(4): 0411002.
- [15] Johansson E M, Gavel D T. Simulation of stellar speckle imaging [C]. *SPIE*, 1994, 2200: 372-383.