

# 恒星干涉仪中的高速倾斜镜应用研究\*

梅 蓉<sup>1,2,3†</sup> 胡中文<sup>1,2</sup> 徐 腾<sup>1,2</sup> 孙长胜<sup>1,2,3</sup>

(1 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所 南京 210042)

(2 中国科学院天文光学技术重点实验室 南京 210042)

(3 中国科学院大学 北京 100049)

**摘要** 在恒星干涉仪中, 高速倾斜镜(Fast-steering mirror, FSM)因分辨率高、响应频率快等特点被广泛应用于校正大气湍流、仪器内部振动等引起的波前倾斜. 一方面, 针对倾斜镜本身在加工、装调中引入的镜面与触动物偏转轴不共面等误差进行系统分析, 通过数值方法研究了上述因素在倾斜镜工作时产生的附加光程差(Optical Path Difference, OPD), 并讨论了该光程差对恒星干涉仪条纹跟踪精度的影响; 另一方面, 两臂光束之间的平行度误差是造成干涉条纹可见度损失的主要因素之一, 通过分析大气扰动引起的波前倾斜对条纹可见度的影响, 提出了一种基于单一阵列探测器、简单高效的星光平行度实时校正方案, 并结合室内实验论证了该方案的可行性. 实验结果表明: 经高速倾斜镜校正后的星光方向平行度初步满足了恒星干涉仪系统对波前倾斜的需求.

**关键词** 大气效应, 仪器: 干涉仪, 技术: 干涉, 技术: 图像处理, 恒星: 成像

**中图分类号**: P111; **文献标识码**: A

## 1 引言

长基线恒星光干涉技术是提高空间分辨率天文观测的主要方法之一<sup>[1]</sup>. 自上世纪70年代第1个具有现代意义的恒星干涉仪I2T (2-Telescope Interferometer)问世以来, 一大批恒星干涉仪相继建成, 例如Mark-III (Mark-III恒星干涉仪)<sup>[2]</sup>、SUSI (悉尼大学恒星干涉仪)<sup>[3]</sup>、KECK (基于Keck望远镜的干涉仪)<sup>[4]</sup>、VLTI (甚大望远镜干涉仪)<sup>[5]</sup>等. 恒星光干涉技术不仅能够提高对微弱辐射目标的探测能力, 而且可以在地面实现对天体目标的高分辨率研究, 例如恒星角直径、双星距等天体物理量的测量.

针对大气湍流对光干涉的影响<sup>[6-7]</sup>问题, 研究人员开展了一系列理论分析, 大气扰动对光干涉的影响可以分为3个方面<sup>[8]</sup>: (1)每个通光孔径波前的平均相位和振幅发生时间波动; (2)大尺度的大气扰动使光程差(Optical Path Difference, OPD)发生变化; (3)每个孔径的相位和振幅发生空间波动. 受大气湍流和望远镜跟踪引起的倾斜抖动影响, 在观测过程中恒星干涉仪两臂上的光束不断产生相对倾斜, 从而使条纹可见度大大降低.

2016-12-20收到原稿, 2017-04-11收到修改稿

\*国家自然科学基金项目(11273038)、中国科学院先导B项目(XDB09040104)资助

†rmei@niaot.ac.cn

而恒星干涉仪中要求条纹可见度的损失率小于5%<sup>[9]</sup>, 与之对应的两光束之间的倾斜角需要小于0.2", 所以保持干涉光束之间的平行度是干涉仪的关键技术之一.

高速倾斜镜(Fast-steering mirror, FSM)系统是一种位于光源目标和接收器之间快速精确控制光束方向的反射镜装置, 利用压电驱动器驱动反射镜使光束产生小角度的快速偏转. 角分辨率精度高、运动惯性小、响应速度快等显著优点使得其在自适应光学系统和天文望远镜等跟踪控制中有广泛应用.

本文首先针对高速倾斜镜在校正双光束平行度时, 倾斜镜与偏转轴不共面、光瞳不在倾斜镜镜面上以及镜面与光轴存在夹角等因素分析了倾斜镜在工作时产生的附加光程差, 其次对高速倾斜镜在星光平行度校正的应用进行了实验研究.

## 2 星光波前倾斜跟踪和校正研究

### 2.1 两光束波前平行度要求的分析

在恒星干涉仪中, 星光经过两个分立的定天镜后, 通过干涉仪的光束传输系统和合束器后进行双光束干涉. 双光束干涉时检测器在采样间隔 $\tau$ 中接收到的总的光能量<sup>[10-12]</sup>:

$$I = \tau I_{\lambda} \int_0^{2\pi} \int_2^a \{1 + V \cos [\Phi_0 + \Delta\varphi(\rho, \xi)]\} d\rho d\xi, \quad (1)$$

其中 $\Phi_0 = \frac{2\pi s_0}{\lambda} + \phi$ ,  $\lambda$ 为光波长,  $\phi$ 指条纹相位,  $s_0$ 是在 $\tau$ 时间间隔内一个不变的光程差,  $I_{\lambda}$ 表示某一波长下探测器上的平均光强,  $a$ 为光束半孔径,  $\Delta\varphi(\rho, \xi) = \frac{2\pi}{\lambda} \sin\theta \rho \sin\xi$ ,  $\theta$ 表示受波前倾斜影响星光在合束时两光束之间存在的微小夹角,  $\rho$ 、 $\xi$ 分别为光束截面上极坐标分量,  $V$ 为条纹对比度,  $\Delta\varphi(\rho, \xi)$ 是光束口径内任一点处两束光的相位差. 对(1)式积分, 并且令 $x = \frac{2\pi a \sin\theta}{\lambda}$ , 则:

$$I = \tau I_{\lambda} S \left[ 1 + \frac{2J_1(x)}{x} V \cos \Phi_0 \right], \quad (2)$$

式中 $J_1(x)$ 为 $x$ 的1阶贝塞尔函数,  $S$ 为截面面积. 因此条纹可见度损失因子 $\eta$ 为:

$$\eta = \frac{2J_1(x)}{x}. \quad (3)$$

在 $\eta$ 确定的情况下, 对应的允差 $\theta$ (单位为")为:

$$\theta = \frac{\lambda \sqrt{8(1-\eta)}}{2\pi a} \times 206265. \quad (4)$$

用波长为500 nm的光源、300 mm的光束孔径仿真两束波前不完全平行的相干光, 经过干涉系统产生的干涉条纹的可见度与两光束之间的夹角关系如图1所示, 两光束的夹角 $\theta$ 越大, 条纹可见度越小. 当两光束夹角达到0.419"时, 条纹的可见度为0, 无法从背景中辨识出干涉条纹, 所以在恒星干涉仪的系统中星光平行度的校正模块必不可少.

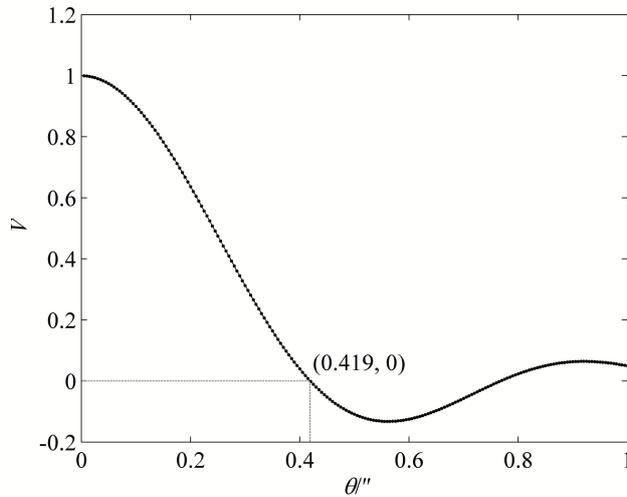


图 1 条纹可见度与两光束间的夹角的关系

Fig. 1 The relation between the fringe visibility and angle between two beams

## 2.2 高速倾斜镜引起的高频光程差分析

在恒星干涉仪中, 当集光孔径小于相干长度时干涉光波前本质上是相等的, 受大气高频扰动使光波前发生相对倾斜, 两相干光束波前不完全平行, 通过倾斜镜系统校正时可能产生光程差和横向偏移量, 因为是高频扰动, 所以产生的误差无法通过后续延迟线系统补偿校正. 考虑到星光校正系统是一个时间相干系统, 所以只需要分析倾斜镜产生的光程差对条纹可见度的影响. 本文从倾斜镜与偏转轴不共面、光瞳不在倾斜镜位置以及镜面与光轴的夹角3个方面分析了倾斜镜引起的光程差变化. 校正系统采用的倾斜镜是柔性轴系结构<sup>[13]</sup>: 4个驱动器和一个固定的支点形成一个对称的结构. 光线经过倾斜镜后的光路图如图2所示,  $O$ 为倾斜镜的偏转点,  $\alpha$ 为倾斜镜与光轴之间的夹角称为偏转角,  $\theta$ 为两光束之间的倾斜角,  $m$ 为偏转点与倾斜镜镜面之间的距离称为偏转距,  $l$ 为偏转点与光瞳位置之间的距离. 利用光线追迹法计算在没有倾斜镜校正前光线垂直入射倾斜镜面中心后, 反射到下一个器件上的光程, 即图2所示的 $PA$ 、 $AB$ 和光线发生 $\theta$ 倾斜, 倾斜镜进行校正工作时光线再被反射到下一个器件上的光程即图所示的 $PA''$ 、 $A''B''$ 之间的变化, 便可以得知倾斜镜在校正时引起的高频光程差.

大气的高频随机抖动使两相干光束波前不再完全平行, 它们之间的倾斜角达到 $1''$ , 经过1:30缩束后, 倾斜角增大到 $30''$ , 以 $\theta = 30''$ 为例, 通过计算得到如图3所示的关系.

从图3 (a)可以看出: 当光瞳与镜面位置相距5 m时, 偏转轴在镜面时的光程差最大, 达到52.885 nm. 偏转角产生的光程差与偏转距成负相关, 偏转角越大, 倾斜镜引起的光程差的变化率越大. 偏转距在10 mm以内, 不同的偏转角引起的光程差变化在0.1 nm之内, 所以偏转距和偏转角对光程差的影响都很小, 几乎可以忽略. 如果光瞳不在倾斜镜镜面上, 结合倾斜镜以及光瞳的机械结构设计和光路设计, 他们之间的位置距离应该会大于10 mm. 从图3 (b)可以看出: 光瞳与倾斜镜的距离大于10 mm后, 光程差与之成正相关. 当光瞳与倾斜镜的距离达到7.38 m时, 光程差为78 nm时, 超过相干长度的十分之

一, 超出恒星干涉仪对光程差的要求. 可以看出: 光瞳与镜面的位置以及偏转点的中心偏差是影响倾斜镜产生光程差的主要因素.

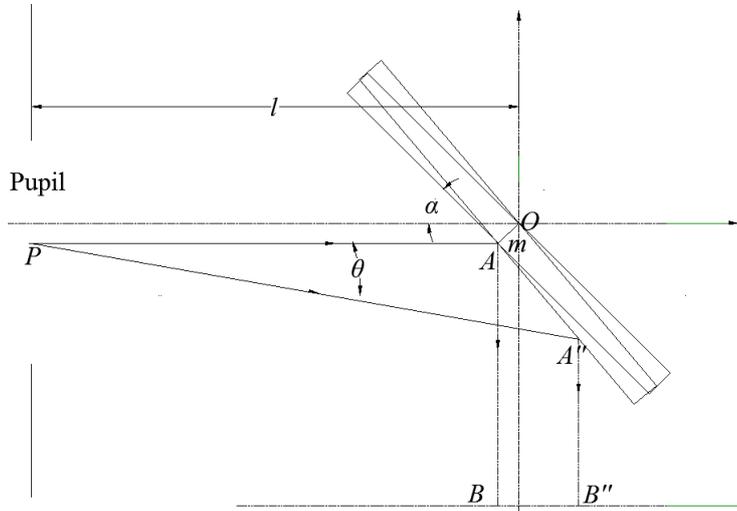


图 2 倾斜镜的高频误差分析图

Fig. 2 The diagram of high frequency error analysis of fast-steering mirror

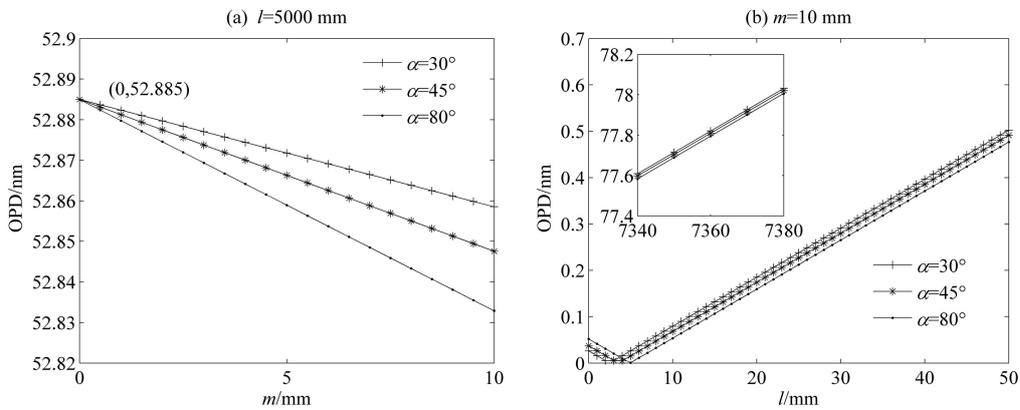


图 3 倾斜镜引起的光程差曲线图. (a)表示光瞳与镜面的位置相距5 m时, 光程差与倾斜镜的偏转距 $m$ 以及偏转角 $\alpha$ 的曲线图. (b)表示偏转距 $m=10$  mm时, 光程差与偏转角 $\alpha$ 以及光瞳与镜面的距离 $l$ 的曲线图.

Fig. 3 The optical path difference (OPD) caused by FSM. Panel (a) is the relation of OPD with the deflection distance  $m$  and angle  $\alpha$  when the distance between pupil and FSM is 5 m. Panel (b) is the relation of OPD with the deflection angle  $\alpha$  and the distance  $l$  from pupil to FSM when the deflection distance  $m$  is 10 mm.

将偏转轴与镜面的距离调至最大, 根据光源的波长合理地控制光瞳与镜面的位置, 可以忽略倾斜镜产生的光程差对干涉条纹可见度的影响.

### 2.3 星光平行度跟踪校正原理及其实验系统

星光平行度的校正包括两个过程, 在对星观测之前使用激光光路校准系统, 当定天镜处于自准直状态下, 交替遮挡从定天镜上返回的准直光束, 在EMCCD (电子倍增电荷耦合元件)上得到星光的两个参考质心位置. 当星光平行度校正系统工作时, 将EMCCD上得到的星光质心与参考质心进行比较, 得到控制反馈量并且通过命令的方式发送给倾斜镜控制器. 这种检测的方法避免了使用两个探测器, 从而减小了因为光路不一致、探测器响应不一致等原因造成的系统误差.

基于上述原理, 在实验室搭建了如图4所示的实验装置. 光束通过迈克尔逊干涉系统, 一个臂上的反射镜由PZT (压电陶瓷)驱动使镜面产生角度偏移, 另一个臂上的反射镜为压电倾斜镜Tip/Tilt, 以跟踪的形式校正PZT引入的光束方向扰动. 在两臂上分别放置了两个半透半反镜, 用以监测两路光的平行度, 两路监测光错开一定角度, 经过透镜会聚到探测器CCD (电荷耦合元件)上, 并在CCD上形成两个会聚光斑. 如果PZT扰动前后两个光斑的质心位置保持不变, 则说明两相干光束完全平行. 整个跟踪校正系统主要由CCD相机、上位机、倾斜镜及其控制器组成. 上位机对CCD相机输出的每个光子的坐标进行处理得到两个光斑的质心坐标和距离. 待系统稳定后, 先采集一幅图像作为参考图像求得两个质心之间的距离 $r_0$ . 如图5所示, 在校正过程中, 通过计算实时采集到的图像和参考图像的质心偏移量 $\Delta r$ , 上位机再通过转换得到倾斜镜控制器所需要的控制量, 然后将控制量发送给控制器, 经过数/模转换器和高压放大器去驱动微位移驱动器, 使得由压电控制的反射镜发生偏转而调整两光束之间的夹角, 使其尽可能满足平行度的要求.

通过虚拟技术软件<sup>[14]</sup>自行编写程序进行跟踪校正, 程序中包括对CCD相机曝光时间参数的设置、硬件的初始化、图像采集、图像处理、图像定位、倾斜镜的控制模块等部分. 根据星光平行度校正原理, 在进行实时采集之前先采集到的一幅图像, 作为目标参考图像. 考虑到实际星像图像包含很多椒盐噪声, 所以图像处理用 $3 \times 3$ 的中值滤波器对光斑周围的离散的白点进行滤波处理. 图像定位考虑计算速度, 采用传统的质心法<sup>[15-17]</sup>, 传统质心法的原理是以图像灰度为权值的加权型方法. 设图像的尺寸为 $M \times N$ , 则光斑质心计算公式:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N i \times I(i, j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I(i, j)}, \quad (5)$$

$$y = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N j \times I(i, j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I(i, j)}, \quad (6)$$

其中 $I(i, j)$ 代表图像中的第 $i$ 行第 $j$ 列像素点的灰度值. 考虑到星光比较微弱, 暗噪声对质心位置影响很大, 本实验采取图像分割求质心的方法. 先用二值化处理图像求得两个光斑的粗略质心 $(x_1, y_1)$ 和 $(x_2, y_2)$ , 再在 $(x_1, y_1)$ 和 $(x_2, y_2)$ 周围分别选取 $7 \times 7$ 的窗口作为恒定目标窗口. 目标窗口通过截取CCD实时采集到的图像减去背景参考图像形成目标图像, 通过计算实时目标图像和目标参考图像的矢量差偏移量, 发送给倾斜镜控制器进行控制校正.

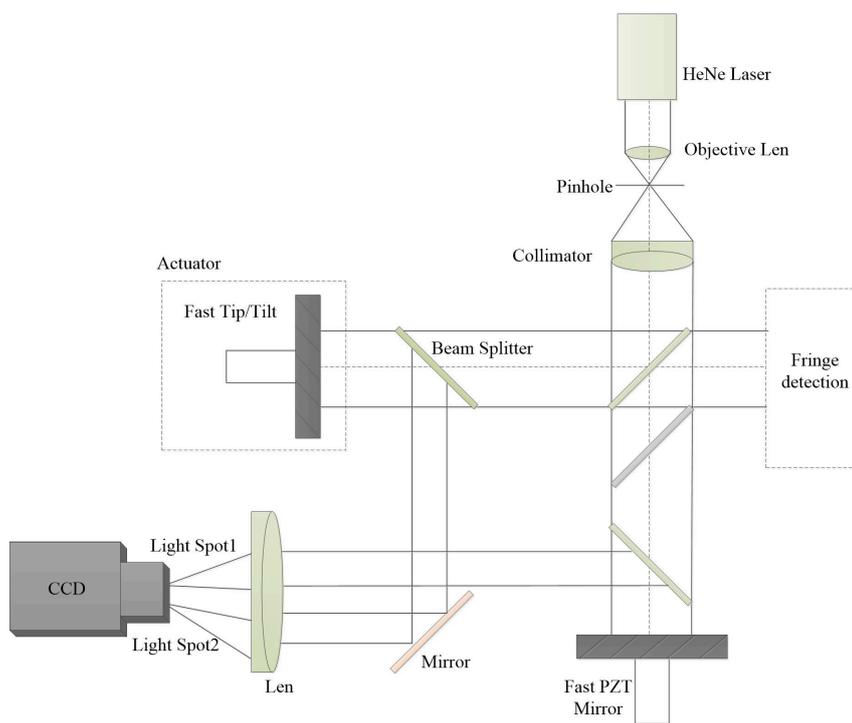


图 4 星光平行度校正装置示意图

Fig. 4 The correcting setup of starlight parallelism

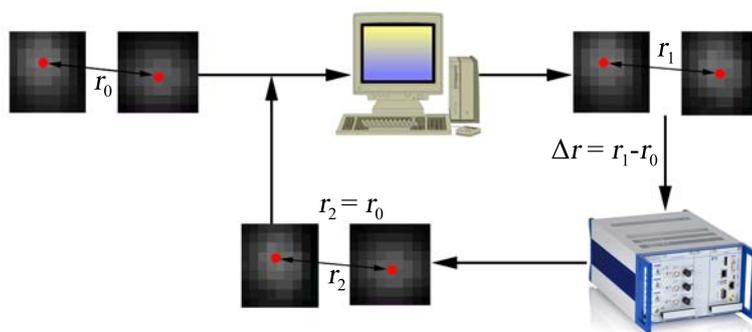


图 5 星光平行度校正算法图

Fig. 5 The algorithm of starlight parallelism correction

倾斜镜坐标轴和CCD相机坐标轴之间的差异会给整个校正系统带来误差, 需要将倾斜镜和CCD相机的系统对应起来, 计算出CCD和倾斜镜之间的变换矩阵  $T$  即可. 如图6所示, 通过实验测量, 倾斜镜的运动是服从线性关系的, 从而倾斜镜系统与CCD系统之间可以采用相似变换模型.  $v_x$  和  $v_y$  分别表示倾斜镜在  $x$  和  $y$  方向运动时的归一化电压值,  $v_z$  表示倾斜镜校正本身的各项误差引起的光程差变化产生的电压值, 不为零, 这种光程差是高频的, 不能发生后才校正, 但可以通过增加平移量并改进校正算法进行事前校

正, 校正公式为:

$$\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \end{bmatrix} = k\mathbf{T} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}; \quad \mathbf{T} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \end{bmatrix},$$

其中 $\Delta X$ 和 $\Delta Y$ 表示CCD上两个光斑质心偏移量的差值;  $k$ 表示尺度因子, 可以通过不断优化 $k$ 将模型变得精准;  $a_{11}$ 、 $a_{12}$ 、 $a_{13}$ 、 $a_{21}$ 、 $a_{22}$ 和 $a_{23}$ 表示变换矩阵 $\mathbf{T}$ 的6个系数.

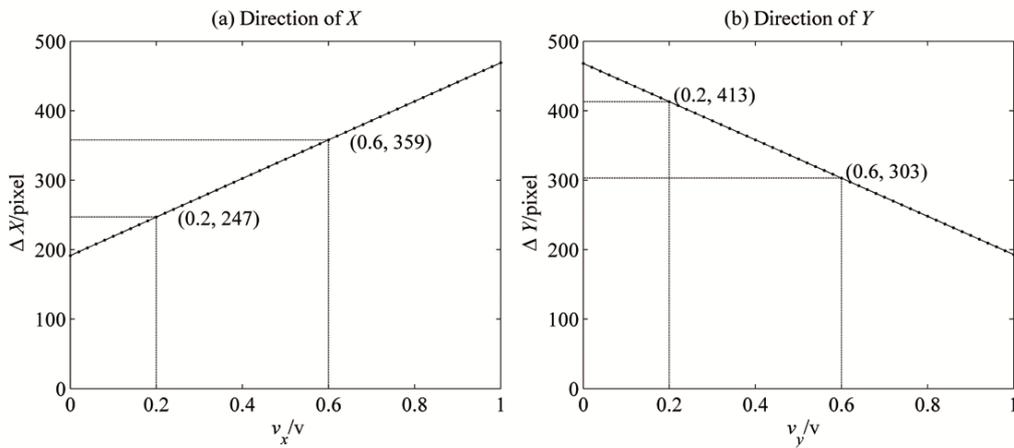


图 6 倾斜镜归一化的电压变化值与质心位置的曲线图. (a) X方向移动; (b) Y方向移动

Fig. 6 Relation between the normalized voltage of FSM and the variation of centroid. Movement in the direction of X (a) and Y (b).

考虑倾斜镜引起的高频光程差可以通过2.2节提出的合理控制光瞳与镜面的位置以及偏转点中心的位置校正, 将其控制在几十纳米内, 因此对实际实验系统中光瞳与镜面的位置在50 cm时产生的光程差可以忽略不计, 相似变换模型中倾斜镜可以只考虑 $x$ 和 $y$ 两个方向.

### 3 星光平行度校正的结果分析

本实验系统的光束口径为10 mm, 在波长为500 nm的激光源的照射下, 向PZT振镜发送振幅为18  $\mu\text{m}$ 、频率为2 Hz的正弦波振动命令. 此时PZT振镜对应的光斑质心出现扰动, 受CCD读出速度207 fps (帧率)限制, 倾斜镜的校正频率达到100 Hz, 光斑质心跟踪校正的结果如图7所示. 曲线 $a$ 表示没有扰动源时的质心的变化, 曲线 $b$ 表示施加正弦信号后质心的变化, 曲线 $c$ 表示经过倾斜镜校正之后的质心变化. 图7 (a)–(b)表明: X、Y方向在没有外界扰动, 仅在自身平台振动以及大气湍流的影响下两个光斑的质心偏移量为0.1 pixel, 可以认为它是背景噪声. 施加频率2 Hz、振幅18  $\mu\text{m}$ 的正弦信号后质心偏移量达到1.1 pixel, 经过倾斜镜校正系统之后, 质心偏移量控制在0.4 pixel之内.

图8给出校正前后某一时刻的干涉条纹图. 图8 (a)是校正前某一时刻的图, 条纹的对比度为0.93, 两光束合方向间的倾斜角为2.4", 图8 (b)是校正之后某一时刻的图, 条纹

的对比度为0.98, 两光束合方向间的倾斜角为 $0.79''$ . 表1和表2分别给出 $X$ 、 $Y$ 方向在没有施加扰动源仅在自身环境振动下、施加扰动源后没有经过倾斜校正以及施加扰动源并经过倾斜镜跟踪校正后的两束光之间的倾斜角和条纹可见度值.

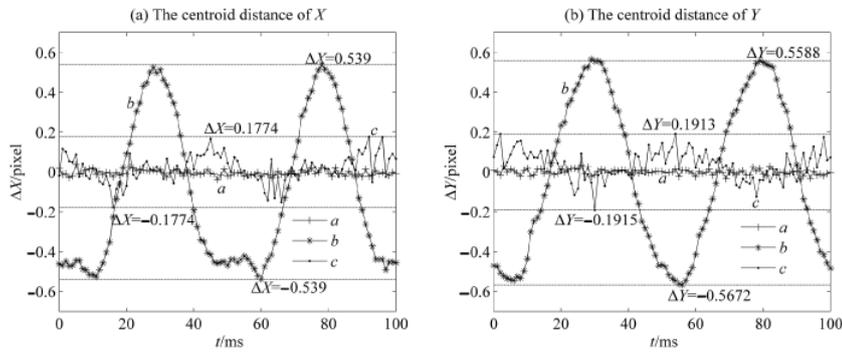


图 7 质心差值随时间 $t$ 的变化曲线图. (a)  $X$ 方向; (b)  $Y$ 方向. 曲线 $a$ 表示没有扰动源时质心变化; 曲线 $b$ 表示施加正弦信号的扰动源后质心的变化; 曲线 $c$ 表示校正之后的质心变化.

Fig. 7 The relation between time and the difference of centroid. (a)  $X$  direction; (b)  $Y$  direction. The line  $a$  is the difference of centroid without disturbance source; The line  $b$  is the difference of centroid after a sinusoidal turbulence source is added; The line  $c$  is the corrected difference of centroid.

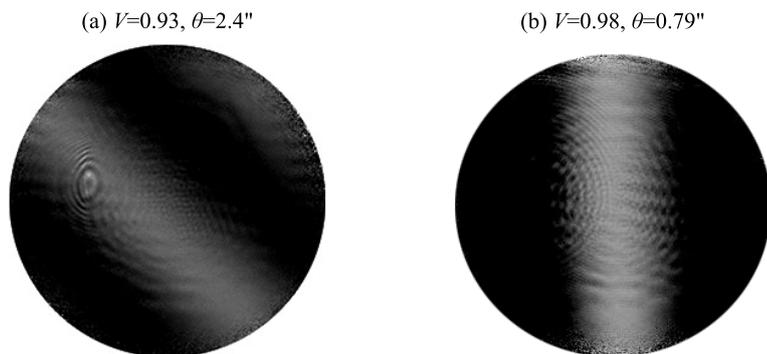


图 8 (a) 倾斜校正前干涉条纹图; (b) 倾斜校正后干涉条纹图

Fig. 8 (a) The fringe before tilt correction; (b) The fringe after tilt correction

表 1 两束星光的质心差在 $X$ 方向的变化

Table 1 The centroid differences of the two star beams in  $X$  direction

	Without disturbance	With disturbance	After correction
$\theta/''$	0.0763	1.6454	0.5416
$\eta$	0.9993	0.6977	0.9638

表 2 两束星光的质心差在 Y 方向的变化  
**Table 2 The centroid differences of the two star beams in Y direction**

	Without disturbance	With disturbance	After correction
$\theta/''$	0.1526	1.7187	0.5843
$\eta$	0.9971	0.6735	0.9579

从图7-8以及表1-2可以很直观地看出倾斜镜的校正作用, 条纹质量在校正倾斜项后得到提高. 倾斜镜校正后综合 X、Y 两个方向的合方向的夹角约为 $0.7967''$ , 而实际设计的对天观测的系统光束口径为300 mm, 且实际系统和实验室模拟系统有4倍的缩束关系, 所以对实际观测系统而言, 校正后的夹角为 $0.1992''$ , 该系统的跟踪结果初步满足恒星干涉仪所需要的 $0.2''$ 的平行度要求.

## 4 结论

本文首先通过理论分析和数值模拟研究了星光的倾斜度对条纹可见度的影响, 搭建了基于高速倾斜镜的星光平行度跟踪校正的实验系统, 通过数值分析, 研究了高速倾斜镜引起的高频光程差, 结果显示: 倾斜镜校正时引起的光程差主要归因于倾斜镜与光瞳的位置以及偏转点中心的偏差, 这一结果对指导光路设计和调试误差控制有重要的意义. 开发的跟踪校正系统在曝光时间10 ms的情况下, 校正频率能够达到100 Hz, 对天校正精度控制在 $0.2''$ , 从而将可见度损失降为5%以内. 实验结果表明: 高速倾斜镜能够有效解决大气扰动对星光方向的平行度的影响, 为后续室外恒星干涉仪的观测提供了技术参考.

## 参考文献

- [1] 王海涛, 周必方. 光学精密工程, 2003, 45: 320
- [2] Shao M, Colavita M M, Hines B E, et al. A&A, 1988, 193: 357
- [3] Robertson J G, Irelan M J, Tango W J, et al. Proceedings of SPIE, 2012, 8445: 84450N
- [4] Colavita M M, Wizinowich P L, Akeson R L, et al. PASP, 2013, 125: 1226
- [5] Glindemann A, Abuter R, Carbognani F, et al. Proceedings of SPIE, 2000, 4006: 2
- [6] 曹青华. 光束通过湍流大气干涉的初步探讨. 成都: 电子科技大学, 2006
- [7] 丰帆, 李常伟. 光学学报, 2017, 37: 35
- [8] Wolf E. Progress in optics Volume XVII. New York: North-Holland Publishing Company, 1980
- [9] 王正明, 李再雄, 许林生. 陕西天文台台刊, 1998, 21: 65
- [10] 王正明. 天文光干涉测量. 北京: 科学出版社, 1996
- [11] 王海涛, 朱永凯, 蔡佳慧, 等. 光学学报, 2009, 29: 1397
- [12] 王正明, 肖金宏, 徐家岩, 等. 天文学报, 1992, 33: 75
- [13] 范伟军, 蒋筱如, 王海涛. 桂林理工大学学报, 1999, 19: 193
- [14] 王阳, 王竹林. 兵工自动化, 2009, 28: 89
- [15] 王丽丽, 胡中文, 季杭馨. 天文学报, 2012, 53: 441
- [16] Wang L L, Hu Z W, Ji H X. ChA&A, 2013, 37: 230
- [17] 高鹏飞, 胡中文, 戴松新. 天文学报, 2016, 57: 336

## Research on the Application of Fast-steering Mirror in Stellar Interferometer

MEI Rong<sup>1,2,3</sup> HU Zhong-wen<sup>1,2</sup> XU Teng<sup>1,2</sup> SUN Chang-sheng<sup>1,2,3</sup>

(1 *Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, National Astronomical Observatories,  
Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042*)

(2 *Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics &  
Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042*)

(3 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

**ABSTRACT** For a stellar interferometer, the fast-steering mirror (FSM) is widely utilized to correct wavefront tilt caused by atmospheric turbulence and internal instrumental vibration due to its high resolution and fast response frequency. In this study, the non-coplanar error between the FSM and actuator deflection axis introduced by manufacture, assembly, and adjustment is analyzed. Via a numerical method, the additional optical path difference (OPD) caused by above factors is studied, and its effects on tracking accuracy of stellar interferometer are also discussed. On the other hand, the starlight parallelism between the beams of two arms is one of the main factors of the loss of fringe visibility. By analyzing the influence of wavefront tilt caused by the atmospheric turbulence on fringe visibility, a simple and efficient real-time correction scheme of starlight parallelism is proposed based on a single array detector. The feasibility of this scheme is demonstrated by laboratory experiment. The results show that starlight parallelism meets the requirement of stellar interferometer in wavefront tilt preliminarily after the correction of fast-steering mirror.

**Key words** atmospheric effects, instrumentation: interferometers, techniques: interferometric, techniques: image processing, stars: imaging