

利用倾斜镜技术实现 2.4 m 望远镜的高精度跟踪 I: 原理样机设计及测试

丁永超^{1,3,4,5,7}, 王德恩², 伦宝利^{1,4,5,7}, 王传军^{1,3,4,5,7}, 辛玉新^{1,3,4,5,7}, 陈林颀^{1,3,4,5,7},
胡东霞², 代万俊², 张鑫², 陈良明², 杨英², 袁强², 陈冬晖⁶, 常亮^{1,4,5,7}

¹中国科学院云南天文台, 云南 昆明 650216;

²中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;

³中国科学院大学, 北京 100049;

⁴中国科学院天体结构与演化重点实验室, 云南 昆明 650216;

⁵中国科学院天文大科学研究中心, 北京 100012;

⁶北京北方光电有限公司, 北京 100089;

⁷云南省应用天文技术工程实验室, 云南 昆明 650216

摘要 为了获得更高质量的观测数据, 提高望远镜的工作效率, 设计了一套基于倾斜镜校正系统的原理样机, 用于提高丽江 2.4 m 望远镜的闭环跟踪精度。介绍了原理样机的研制, 并在 2.4 m 望远镜上进行了实际测试。结果表明: 该系统能实现 245 Hz 的校正频率, 望远镜的闭环跟踪精度提高了 7.3 倍, 其高色散光谱仪的星光耦合效率提高了 28.6%, 快速测光系统的成像质量得到了明显改善; 利用该系统可以满足对天文观测的要求。

关键词 成像系统; 2.4 米望远镜; 跟踪精度; 倾斜校正; 大气湍流

中图分类号 P111

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.071104

Realization of High Tracking Precision Using a Tip-Tilt Mirror for the 2.4-Meter Telescope-Part I: Prototype Design and Test

Ding Yongchao^{1,3,4,5,7}, Wang Deen², Lun Baoli^{1,4,5,7}, Wang Chuanjun^{1,3,4,5,7},
Xin Yuxin^{1,3,4,5,7}, Chen Linxie^{1,3,4,5,7}, Hu Dongxia², Dai Wanjun², Zhang Xin²,
Chen Liangming², Yang Ying², Yuan Qiang², Chen Donghui⁶, Chang Liang^{1,4,5,7}

¹Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming, Yunnan 650216, China;

²Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang, Sichuan 621900, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁴Key Laboratory for the Structure and Evolution of Celestial Objects, Chinese Academy of Sciences,
Kunming, Yunnan 650216, China;

⁵Center for Astronomical Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;

⁶China Opto-Electro Industries Co., Ltd., Beijing 100089, China;

⁷Astronomical Techniques & Engineering Laboratory of Yunnan, Kunming, Yunnan 650216, China

Abstract A prototype based on the tip-tilt mirror correction system is designed to obtain higher quality observation

收稿日期: 2017-12-03; 收到修改稿日期: 2018-01-09

基金项目: 国家自然科学基金(11573069)、云南省应用基础研究计划重点项目(2016FA001)、中国科学院青年创新促进会资助项目(2015043)

作者简介: 丁永超(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学工程和控制系统方面的研究。E-mail: dychao@ynao.ac.cn

导师简介: 常亮(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事天文仪器设计、光纤特性等方面的研究。

E-mail: changliang@ynao.ac.cn(通信联系人)

data and improve the efficiency of the telescope, which is used for the research on improving closed-loop tracking precision of the 2.4-meter telescope in Lijiang. This paper introduces the development of the prototype and carried out the actual test in the 2.4-meter telescope. The results show that the system can realize the correction frequency of 245 Hz, and the closed-loop tracking precision of the telescope is improved by 7.3 times. Meanwhile, the coupling efficiency of the high resolution echelle spectrograph is improved by 28.6%, the imaging quality of the fast photometry system is improved obviously. The system can meet the requirements of astronomical observation.

Key words imaging systems; 2.4-meter telescope; tracking precision; tip-tilt correction; atmospheric turbulence

OCIS codes 350.1260; 350.1270; 110.6770

1 引言

望远镜跟踪精度是评价望远镜性能的一个重要指标,跟踪精度的好坏直接影响观测数据的质量。利用倾斜镜技术提高望远镜的跟踪精度是克服大气抖动、望远镜跟踪误差和机械振动、弯沉等因素引起星像质心位置漂移的有效手段^[1-2]。倾斜镜作为自适应系统的一阶元件,对高分辨成像、高精度测光和高精度光谱观测,特别是对长曝光和高精度的观测终端设备尤其重要。稳定的星像对视向速度的测量十分重要,如类地行星探测,需要的视向速度精度高达米/秒甚至是亚米/秒量级,除对仪器进行恒温恒压控制外,还要求星像质心的位置变化小于 1/1000 pixel。随着倾斜镜技术的日趋成熟,国内外众多望远镜都已经利用该技术开展天文观测,如 Subaru、Keck、VLT 和丽江 1.8 m 望远镜的自适应光学系统^[3-7], Kitt Peak 2.3 m 望远镜、Calar Alto 天文台 3.5 m 望远镜和国家天文台兴隆 2.16 m 望远镜的精跟踪系统等^[8-10],其中丽江 1.8 m 望远镜在国内首先实现了将倾斜镜技术用于天文高分辨率光谱的科学观测^[11-13]。

丽江 2.4 m 望远镜是国内目前口径最大的通用

光学望远镜,近些年基于该望远镜发表了许多重要的科学成果^[14-15]。天文学家对观测数据的质量要求逐步提高,而提高望远镜跟踪精度是保证高质量观测数据的有效手段之一。为了保证 2.4 m 望远镜精跟踪系统运行的可靠性,研制了一套基于倾斜镜系统的原理样机,并于 2016 年 10 月 18 日在 2.4 m 望远镜上开展了原理性实验,实验结果验证了该方法对于提高 2.4 m 望远镜跟踪精度的可行性和有效性,为下一步研制正式的高精度跟踪系统提供了理论基础和实践经验。

2 倾斜镜系统原理

丽江 2.4 m 望远镜为典型的卡塞格林系统,系统焦比为 $f/8$,其光路图如图 1 所示^[16]。目前,2.4 m 望远镜卡焦侧口安装了高分辨率阶梯光栅光谱仪 HiRES、快速测光系统、丽江市外行星探测器 LiJET 和中国丽江积分视场光纤光谱仪 ChILI;卡焦直通口安装了云南暗弱天体光谱及成像仪 YFOSC。M4 镜可以旋转和平移,用来切换卡焦侧口和直通口的各终端设备,以实现不同目标的观测,这对于时域天文非常重要。

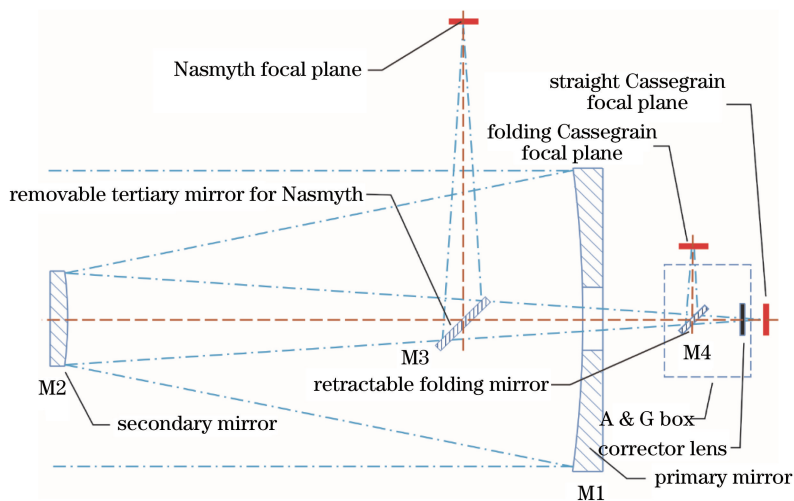


图 1 2.4 m 望远镜光路图

Fig. 1 Optical layout of 2.4-meter telescope

原理样机在基本保留原折轴结构不变的基础上,将 M4 镜改造为倾斜镜,以实现卡焦侧口仪器的跟踪校正,星光经过倾斜镜后再由分束器分为两部分,透射光进入卡焦侧口终端仪器,反射光进入快读相机中,通过高频率短曝光来实时采集目标星像,并传输到控制计算机中迅速计算与初始图像质心位置的偏移量,将偏差信号通过数模(D/A)转换器转换成电压,将电压输入控制器使得倾斜镜迅速摆动,以实时校正星像位置,稳定、锐化星像,起到提高跟踪精度的作用。

3 系统设计

由上述分析可知,在倾斜镜设计时要考虑以

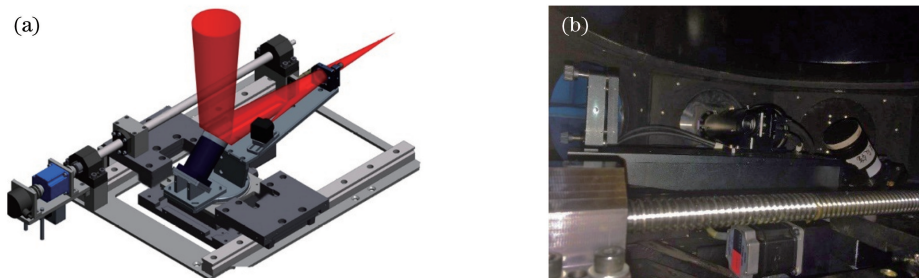


图 2 (a)倾斜镜系统结构和(b)安装测试图

Fig. 2 (a) Structure of tip-tilt mirror and (b) installation testing picture

3.1 图像采集模块

倾斜镜系统的图像采集由分束镜和快速采集相机完成。为了尽可能提高系统带宽,将倾斜镜通光口径由 166 mm 变为 50 mm,并做轻量化处理;设置分束镜透反比为 4:1,保证侧口仪器的观测效率。这样的设计使整个倾斜镜系统的质量大幅减轻,在提高系统校正频率的同时也可以减小发热带来的影响。系统采用 sCMOS 作为采集相机,其峰值量子效率为 50%。经分析,通过大气后实际进入到卡焦侧口终端仪器的效率仅 3.3%,测试系统不能用于科学观测,但能提供足够的带宽,可用于精跟踪系统的原理验证。

3.2 图像处理模块

倾斜校正依靠质心位置的偏差来实现,因此质心算法的精度和速度非常重要,比较常见的质心算法有峰值追踪、高斯拟合和灰度加权。峰值追踪算法可以寻找图像中灰度的峰值像素,并将其作为特征点求偏差,这种方法速度最快,但易受射线等噪声的影响,精度不高。高斯拟合算法是将图像按能量分布拟合成高斯函数,将中心像素作为特征点,这种算法的精度最高,但计算复杂且用时较长,不利于提高校正频率。灰度加权算法

下重要问题:1) 分束镜透反比,既要保证仪器端有足够的能量,又要尽量满足反馈的要求;2) 系统带宽,要最大程度地提高校正频率;3) 倾斜镜本身是发热源,且安置于卡焦终端箱内,会导致视宁度退化,可能会影响星像的稳定性。基于这些问题,为了能确定最适合 2.4 m 望远镜的相关参数,先设计了用于测试的原理样机,并对其进行改进,使测试系统更侧重于研究上述问题。倾斜镜系统主要由图像采集模块、图像处理模块、反馈控制模块和图形操作模块组成。倾斜镜系统结构和安装测试如图 2 所示。

是把目标按光强分布来求加权质心坐标,并将其作为参考点,理论证明其较为适用于倾斜镜的质心计算^[17]。计算公式为

$$\begin{cases} x_0 = \frac{\sum xI(x,y)^2}{I(x,y)^2} \\ y_0 = \frac{\sum yI(x,y)^2}{I(x,y)^2} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: S 为目标图像; $(x,y) \in S$; $I(x,y)$ 为像素灰度值。 $I(x,y)$ 满足

$$I(x,y) = \begin{cases} 0, & I(x,y) < T \\ I(x,y), & I(x,y) \geq T \end{cases}, \quad (2)$$

式中: T 为图像背景噪声阈值。

由于加权算法会放大噪声,产生较大的干扰,因此图像要先经过均值滤波预处理,以消除散粒噪声和像素不均匀等因素带来的噪声;同时,(2)式中的 T 可以通过对图像边缘求均值得出,能够很好地消除背景对质心定位精度的影响。

3.3 反馈控制模块

倾斜镜系统最重要的部分是电偏摆镜,由压电陶瓷(PZT)驱动的二维转动平台和平台端的反射镜组成。原理样机中倾斜镜的控制参数如表 1 所示。

表 1 倾斜镜控制系统的主要参数

Table 1 Main parameters of tip-tilt mirror system

Diameter /mm	Voltage range /V	Maximum frequency /Hz	Maximum amplitude /mrad	Offset precision /mrad
50	-20-120	900	5	0.0005

闭环反馈控制系统结构如图 3 所示。利用 16 位 D/A 转换器将位置偏差转换成电压,通过实测输入电压和倾斜镜偏转角度的关系,可以得到控制系统传递函数。倾斜镜的电压响应时间

$<500 \mu\text{s}$,这也有利于提高系统带宽。比例-积分-微分(PID)控制器用来配置反馈系统的零极点,使系统拥有较好的响应速度和精度,并使系统误差最小化。

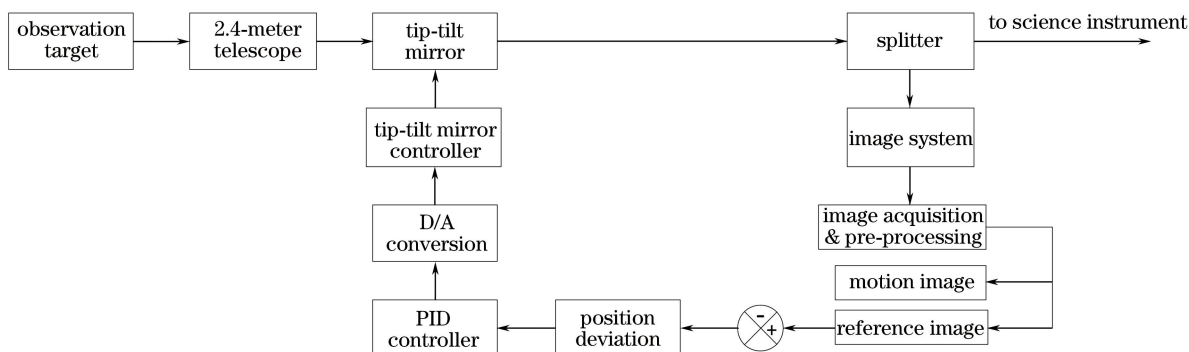


图 3 闭环反馈控制系统示意图

Fig. 3 Schematic for closed-loop feedback control system

3.4 图形操作模块

倾斜镜控制系统的软件程序是基于 Windows 系统,采用 Microsoft Visual C++6.0 语言编写的,操作模式为 GUI 界面。控制软件集成了倾斜镜系统的操作功能,实时显示帧频、星像及位置偏移;可以设置增益、曝光时间、Binning 模式和比例调节等控制参数,并能将星像锁定到相应位置。软件控制界面如图 4 所示。

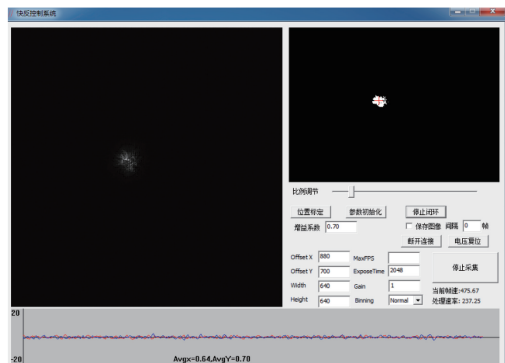


图 4 软件控制界面

Fig. 4 Software control interface

4 实验验证

2016 年 9 月,在 2.4 m 望远镜上利用卡焦侧口的终端仪器 HiRES 和快速测光系统对原理样机的效果进行了实际观测验证。由于 2.4 m 望远镜刚刚

完成主镜镀膜,机械和光学等方面均未调试到最佳状态,存在比较明显的光学像差,这表明可利用倾斜镜技术实现 2.4 m 望远镜的精跟踪,并能达到良好的效果。

4.1 HiRES 观测结果

HiRES 狭缝的精度为 $2''$ 。在相同条件下,对比分析了传统手动跟踪、望远镜闭环跟踪和倾斜镜闭环跟踪对同一目标源的观测结果。图 5 所示为三种情况下星像质心的位置变化,这里的校正频率为 245 Hz,40 s 观测时间内采集到 9800 组星像质心位置的分布。经过计算可知:传统手动控制望远镜的跟踪精度为 $1.24''$ (RMS);望远镜闭环跟踪精度为 $0.46''$ (RMS),与 2.4 m 望远镜闭环跟踪精度 $0.5''/h$ 相一致(2.4 m 望远镜采用偏置导星闭环跟踪方式);利用倾斜镜系统校正后的跟踪精度为 $0.07''$ (RMS),为望远镜本身闭环跟踪精度的 7.3 倍。图 6 为望远镜闭环跟踪和倾斜镜闭环跟踪星像质心随时间变化的曲线。

由于大气抖动,望远镜自身的跟踪精度和跟踪过程中因机械弯沉而导致的光谱仪狭缝的耦合效率会降低。另外,为减小由大气抖动带来的星像展宽和位置快速漂移,光纤光谱仪的狭缝直径(圆洞)会略大于光纤直径,因此在 Seeing(大气视宁度)较好的情况下,虽然通过狭缝监视系统会看到星像落到

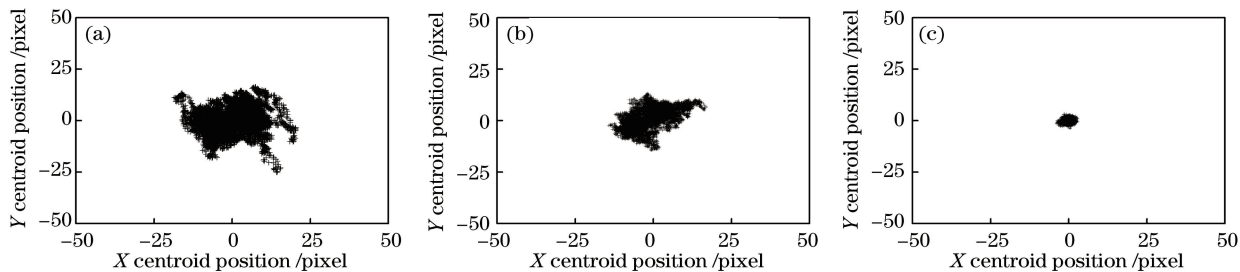


图 5 星像质心位置随时间的分布图。(a)传统手动跟踪;(b)望远镜闭环跟踪;(c)倾斜镜闭环跟踪

Fig. 5 Distribution of star image centroid position with time. (a) Traditional manual tracking; (b) telescope closed-loop tracking; (c) tip-tilt mirror closed-loop tracking

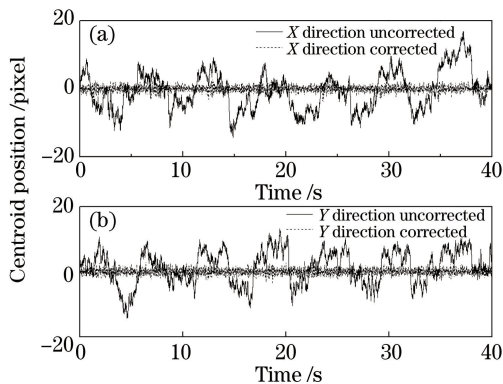


图 6 星像质心坐标随时间的变化。(a) X 方向;(b) Y 方向
Fig. 6 Variation of axis coordinates of star image centroid with time. (a) X direction; (b) Y direction

狭缝中,但星像未必能完全耦合进光纤,导致光纤耦合效率降低,严重影响光谱的信噪比。为此,分析了星光耦合效率情况,如图 7 所示,图中纵轴为采集相机模拟数字单元(ADU)的数量,校正像的峰值强度均大于未校正像,X 方向的峰值强度小于 Y 方向,星像宽度也超过 Y 方向。这表明星像在 X 方向较为分散,在 Y 方向相对集中,与图 3 中质心分布的结果具有一致性,这也说明望远镜本身的闭环跟踪在 X 方向和 Y 方向具有不一致性。从图中可明显看出,倾斜镜不光稳定了星像,还对星像起到了一定的锐化作用。通过计算可以知道,虽然倾斜镜系统分出 20% 的能量用于图像反馈计算,但是整体耦合效率提高了 28.6%。据 Seeing 的不同情况,对于高色散光谱仪来说,利用倾斜镜系统后,星光耦合效率最大可提高 40% 左右^[18]。

4.2 快速测光系统观测结果

快速测光系统由窄带滤光片和 Andor 公司 512 pixel×512 pixel 的 EMCCD 组成,工作视场为 1.45'×1.45'。测试过程中分别利用望远镜开环跟踪和倾斜镜系统闭环跟踪对同一目标进行观测,EMCCD 每幅曝光 0.2 s,取 1000 幅图像物理叠加并

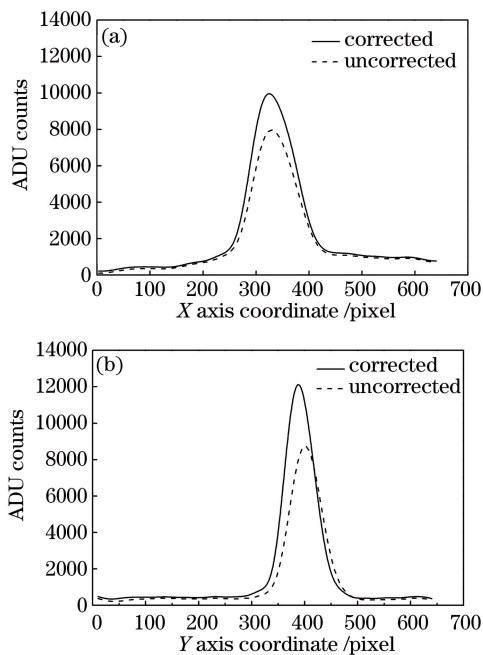


图 7 (a) X 坐标和(b) Y 坐标的能量分布

Fig. 7 Energy distributions of (a) X coordinate and (b) Y coordinate

求平均值,成像结果如图 8 所示。从图 8 中可以明显看出:未校正星像呈椭圆形,且存在拖影;倾斜校正后这些现象完全消失,且能清晰地看到图 8(a)中模糊的暗星。

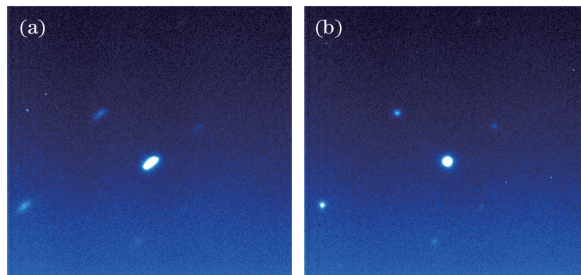


图 8 校正前后的 EMCCD 照片。(a)校正前;(b)校正后
Fig. 8 EMCCD photos before and after correction.

(a) Before correction; (b) after correction

图9为图8中心亮星子像素区域能量强度的归一化分布,图9(a)为未校正的星像,峰值强度为0.45,图9(b)的峰值强度为1,校正后的峰值强度为校正前

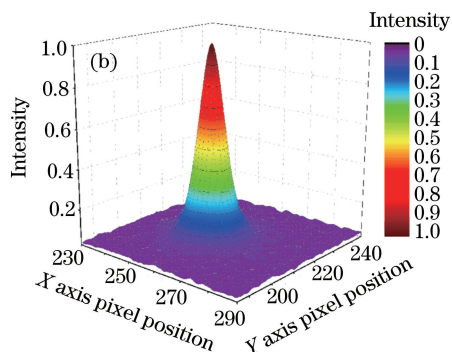
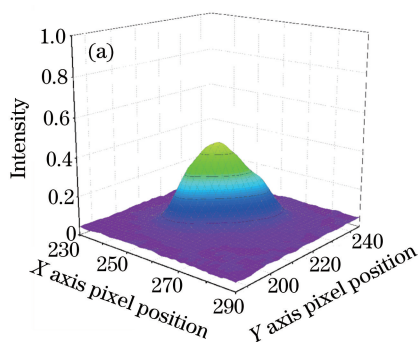


图9 星像在EMCCD上的归一化能量分布。(a)校正前;(b)校正后

Fig. 9 Normalized energy distributions of star image on EMCCD. (a) Before correction; (b) after correction

4.3 功率谱分析

从图6中不难发现,校正前X方向和Y方向的偏移均存在大幅度的近似周期性起伏,为了分析这种规律变化,进一步分析了星像质心移动的功率谱,如图10所示。从图10中可以看出:由大气湍流和望远镜机械误差带来的像移在低频段较为有效,绝大部分低阶像差被倾斜镜系统消除;而当频率高于12 Hz时,很难通过倾斜镜来校正像差。

表2为2.4 m望远镜精跟踪系统原理样机与其他望远镜跟踪数据的对比。由表2可以看出,2.4 m望远镜原理样机的性能与国内外近似口径望远镜的跟踪水平相当。

表2 其他倾斜校正望远镜与2.4 m望远镜原理样机的对比

Table 2 Comparison between others tip-tilt correction telescopes and prototype of 2.4-meter telescope

Telescope	Country	Year	Diameter /m	Bandwidth /Hz	Image quality
Ref.[6]	USA	1994	2.3	72	Motion <0.1"
Ref.[7]	Spain	1993	3.5	50	Motion <0.03"
Ref.[8]	China	2015	2.16	75	Motion <1 pixel
2.4-meter telescope	China	2016	2.4	245	Motion <0.07"

5 结论

基于2.4 m望远镜设计并研制了精跟踪系统的原理样机,实验结果说明:1) 利用该技术可以提高2.4 m望远镜的跟踪精度,由于测试系统效率低,只对亮星进行了原理性实验;2) 在Seeing变化小于光谱仪狭缝对应的天空角时,望远镜的跟踪精度主要影响星光耦合效率;3) 倾斜镜技术相当于一阶自适应光学系统,不仅可以稳定星像,还能明显锐化星像;4) 可以突破光谱仪狭缝监视系统对光谱仪极限

的2.22倍。进一步分析计算后可以得到,校正前的半峰全宽(FWHM)为2.47",校正后的FWHM为1.59",倾斜校正后50%的能量集中度提高了35.6%。

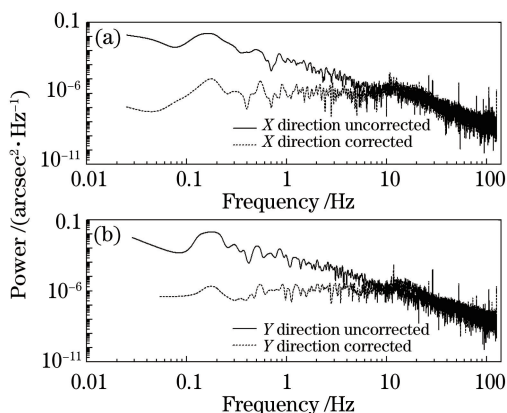


图10 像移功率谱。(a) X方向;(b) Y方向

Fig. 10 Power spectra of image motion.

(a) X direction; (b) Y direction

星等的限制,提高观测及操作效率;5) 满足2.4 m望远镜卡焦侧口所有终端设备的工作视场,对于提高2.4 m望远镜的数据质量及操作效率具有重要作用。

致谢 感谢丽江天文观测站首席科学家白金明研究员、范玉峰总工程师和观测组长王建国老师对本次实验的时间分配及协调工作给予的支持,感谢张西亮老师对于快速测光系统装调及观测策略的支持。

参 考 文 献

- [1] Feng F, Li C W. Simulation of atmospheric turbulence phase screen based on wavelet analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 0101004.
丰帆, 李常伟. 基于小波分析的大气湍流相位屏模拟 [J]. *光学学报*, 2017, 37(1): 0101004.
- [2] Li J W, Chen W B. Bandwidth of adaptive optics system in satellite-ground coherent laser communication [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(8): 0806003.
李佳蔚, 陈卫标. 星地相干光通信中的自适应光学系统带宽研究 [J]. *中国激光*, 2016, 43(8): 0806003.
- [3] Takami H, Takato N, Hayano Y, *et al.* Performance of Subaru Cassegrain adaptive optics system [J]. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 2004, 56(1): 225-234.
- [4] Wizinowich P L, le Mignant D, Bouchez A H, *et al.* The WM Keck Observatory laser guide star adaptive optics system: overview [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2006, 118(840): 310-318.
- [5] Rousset G, Lacombe F, Puget P, *et al.* NAOS, the first AO system of the VLT: on-sky performance [J]. *Astronomical Telescopes and Instrumentation*, 2003, 4839(2): 140-149.
- [6] Rao C H, Jiang W H, Zhang Y D, *et al.* Progress on the 127-element adaptive optical system for 1.8 m telescope [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7654(2): 70155.
- [7] Wei K, Zhang X, Xian H, *et al.* First light on the 127-element adaptive optical system for 1.8-m telescope [J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(11): 1019-1021.
- [8] Close L M, McCarthy D W. High resolution imaging with a tip-tilt Cassegrain secondary [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 1994, 106(695): 77-86.
- [9] Glindemann A, McCaughrean M J, Hippler S, *et al.* CHARM-A tip-tilt tertiary system for the Calar Alto 3.5 m telescope [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 1997, 109(736): 688-696.
- [10] Gao P F, Hu Z W, Dai S X. Study on the application of fast-steering mirror in astronomical instruments [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2016, 57(3): 336-343.
高鹏飞, 胡中文, 戴松新. 快速倾斜镜校正系统在天文仪器中的应用研究 [J]. *天文学报*, 2016, 57(3): 336-343.
- [11] Zhang L Y, Pi Q F, Han X L, *et al.* Chromospheric activity on late-type star DM UMa using high-resolution spectroscopic observations [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, 459(1): 854-862.
- [12] Pi Q F, Zhang L Y, Chang L, *et al.* Chromospheric activity on the late-type star V1355 Ori using Lijiang 1.8-m and 2.4-m telescopes [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2016, 16(10): 153.
- [13] Xing L F, Chang L. Lithium abundance of 17 young nearby stars: high resolution spectrograph observation by Lijiang 1.8 m telescope [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(12): 3900-3903.
邢丽峰, 常亮. 近太阳 17 颗年轻恒星锂丰度: 丽江 1.8 m 望远镜高色散光谱观测 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(12): 3900-3903.
- [14] South Astronomical Observatory. The annual report of Lijiang observatory (2008—2015) [R].
南方天文观测基地. 丽江天文观测站年报 (2008—2015) [R].
- [15] South Astronomical Observatory. The annual report of Lijiang observatory (2015—2016) [R].
南方天文观测基地. 丽江天文观测站年报 (2015—2016) [R].
- [16] Fan Y F, Bai J M, Zhang J J, *et al.* Rapid instrument exchanging system for the Cassegrain focus of the Lijiang 2.4-m telescope [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2015, 15(6): 918-928.
- [17] Shi Y P, Liu C L. Positioning accuracy improvement of spot centroid for Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(8): 081201.
师亚萍, 刘缠牢. 提高夏克-哈特曼波前传感器光斑质心的定位精度 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(8): 081201.
- [18] Chang L, Hu Z W, Xian H, *et al.* The report on the high resolution spectrometer of the 1.8-meter telescope [R]. Beijing: [s.n.], 2015: 1-26.
常亮, 胡中文, 鲜浩, 等. 1.8 米望远镜高分辨光谱仪工作汇报 [R]. 北京: [s.n.], 2015: 1-26.