

文章编号: 0258-7025(2008)05-0748-04

# 基于迈克耳孙干涉系统的拼接主镜 共相位检测技术

宋贺伦<sup>1,2</sup> 姜文汉<sup>1</sup> 鲜浩<sup>1</sup> 李华强<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; <sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 为实现地基拼接式大口径望远镜主镜整体面形连续性, 提出了一种新方法, 对拼接子镜的相互位置误差进行高精度检测, 并进行相关校正, 从而使望远镜取得或接近于其衍射极限的光学成像质量。拼接子镜间需要进行校正的位置误差包括子镜间的倾斜误差和垂向平移误差, 其中子镜之间的垂向平移误差需要被校正到 100 nm 以下, 相当于入射光波长的几分之一。为实现此目标, 在基于迈克耳孙干涉原理的基础上设计出一套相位误差检测系统, 应用 He-Ne 激光与白光作为其光源系统, 对拼接主镜子镜间相位误差进行高精度检测, 同时解决了垂向平移误差的  $\lambda/2$  相位模糊性问题。系统的不确定度为 8~10 nm, 检测范围为 45~60  $\mu\text{m}$ 。对系统的设计进行了分析, 并仿真出基于该检测系统的理论干涉图形, 得出理想的检测结果。

**关键词** 光电子学; 迈克耳孙干涉系统; 主镜; 共相位

**中图分类号** TN 249; P 111.2 **文献标识码** A

## Technology of Co-Phasing of the Segmented Mirrors Based on a Michelson Interferometric System

Song Helun<sup>1,2</sup> Jiang Wenhan<sup>1</sup> Xian Hao<sup>1</sup> Li Huaqiang<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> *Institution of Optics & Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China*  
<sup>2</sup> *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract** For a large aperture ground-based telescope with segmented primary mirrors, in order to guarantee the continuity of the figure of the total mirrors, a new interferometric detection method was put forward to detect the phase errors between the segmented mirrors, and correct the misaligned segments correspondingly. This method could make the telescope achieve optical image with diffraction limit. The segment misalignment errors between the segments include tip/tilt error and piston error, the segment piston error between the individual segments must be reduced to less than 100 nm. We have considered an interferometric piston error measurement system based on a Michelson interferometer layout for accomplishing such object. The innovation introduced in the optical design of the interferometer is the simultaneous use of both monochromatic and white-light source that allowing the system to measure the piston error with an uncertainty of 8~10 nm in the range of 45~60  $\mu\text{m}$ . Simultaneously a detailed description about the optical system layout and the theoretic interferograms was gotten.

**Key words** optoelectronics; Michelson interferometric system; mirrors; co-phasing

## 1 引 言

对下一代大口径望远镜, 随着望远镜主镜口径的逐渐增加, 大口径单块主镜的制造显得越来越困

难, 由于相关技术及客观条件的限制, 一般认为单块大口径主镜的制造极限为 8.4 m。在进行天文成像的时候, 若主镜为单块主镜, 在忽略大气湍流等因素

收稿日期: 2007-08-25; 收到修改稿日期: 2007-11-05

基金项目: 国家 863 计划资助项目。

作者简介: 宋贺伦(1980—), 男, 吉林人, 博士研究生, 主要从事光电检测系统设计等方面的技术研究。

E-mail: songhelun@126.com

导师简介: 姜文汉(1936—), 男, 浙江人, 中国工程院院士, 主要从事自适应光学等方面的技术研究。

E-mail: wenhan\_jiang@126.com

对成像质量影响的情况下,根据瑞利判据,望远镜成像的衍射极限角  $\theta$  与望远镜口径  $D$  的关系为  $\theta = 1.22\lambda/D$  ( $\lambda$  为入射光波长)。可见,提高望远镜的口径可以大幅度提高望远镜的成像分辨率<sup>[1]</sup>。拼接式大口径望远镜主镜与单块主镜相比,虽然在实现主镜大口径方面具有很大优势,但用拼接方式来实现的大口径主镜的方案也存在一些问题,在这些问题当中,最重要的就是要保证拼接主镜间的面形连续性问题,即通过某种相位调整的方法使得拼接子镜间的垂向平移误差尽可能小,以实现子镜间的共面,进而在进行天文成像的时候,使望远镜的成像分辨率达到或接近单块主镜同等口径上的成像分辨率,这是在设计拼接式望远镜过程中所追求的目标。

国外发展了很多提取拼接子镜之间垂向平移误差的相关技术,譬如衍射技术<sup>[2]</sup>、曲率传感技术<sup>[3]</sup>、相位多样性技术<sup>[4]</sup>等。

本文基于迈克耳孙干涉原理,利用 He-Ne 激光和白光作为光源,通过干涉检测技术对拼接子镜间的垂向平移误差进行检测,子镜间的垂向平移误差由干涉产生的两组干涉图形的不匹配性来进行提取。

## 2 自由度分析

拼接子镜间的相位误差是由于子镜的失调误差所引起的,每块子镜均有 6 个自由度<sup>[5]</sup>,每个自由度的失调都将导致一个相位误差。图 1 给出了基于三维坐标参考系统下的三块拼接子镜的某种拼合形式,并给出了拼接子镜 1 相对于拼接子镜 2 的相位误差。在参考系统中, $y$  轴为沿着拼接主镜面局部垂直方向, $z$  轴为沿着拼接镜面的分界面方向, $x$  轴为沿着拼接主镜表面,且垂直于  $y$  轴及  $z$  轴。拼接子镜间的相位误差包括主镜平面内沿两水平轴( $x$  轴和  $z$

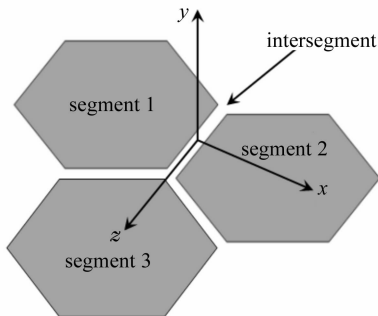


图 1 三维坐标系统内拼接子镜的自由度分析图

Fig. 1 Analysis about freedom of motion of mirrors in three-dimensional coordinate reference system

轴)方向上的相对平移误差;绕  $y$  轴的相对旋转误差;绕  $x$  轴和  $z$  轴的相对旋转误差(绕  $x$  轴的相对旋转误差称为 tilt error,绕  $z$  轴的相对旋转误差称为 tip error);沿垂直轴( $y$  轴)方向上的相对平移误差(piston error)。

在拼接子镜间的相位误差中,垂向平移误差是在进行子镜间相位调整过程中最难解决,也是最需要解决的问题,误差的校正与否直接影响到拼接式望远镜的成像质量。

## 3 系统设计原理

相位误差检测方法是在分振幅式迈克耳孙干涉系统的基础上进行相应的改进,结合所需检测参数的特点而设计出来的,具有结构简单、性能稳定、检测精度高等显著特点。该检测系统同时应用单色光源与白光光源(高斯型)进行检测,所以要求其测量臂和参考臂是完全几何对称的,因为补偿板具有高色散性,故不予采用<sup>[6,7]</sup>。图 2 给出了系统测量原理结构图。

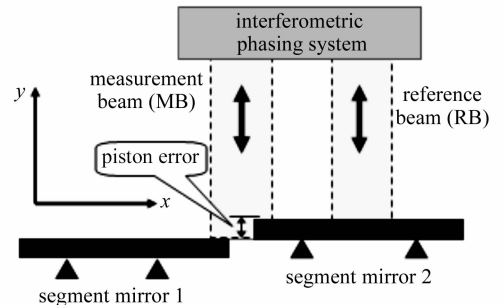


图 2 干涉检测系统测量原理

Fig. 2 Theoretic structure of the interferometric system

干涉检测系统的光源光束经准直后,通过分光立方体棱镜(BSC)将其分成两部分,即测量光束(MB)和参考光束(RB)。为了对拼接主镜间的垂向平移误差进行测量,干涉检测系统的测量光束垂直发射到两块拼接子镜的分界面处,参考光束则完全垂直照射到其中一块子镜上,并且光束尽可能靠近子镜间连接区域边缘。两束相干光被反射后,再次经分光棱镜,沿干涉仪的观测臂产生干涉。具体来说将产生两组干涉图形:一组是子镜 2(segment 2)上参考波前的反射光与子镜 1(segment 1)上测量波前的反射光相干涉所形成的条纹;另一组是子镜 2 上参考波前的反射光与同一子镜上测量波前的反射光相干涉所形成的条纹,两组干涉图形由 CCD 相机进行探测。子镜间垂向平移误差的存在将使所得两组干涉图形间的干涉条纹不匹配,所以利用这两组

干涉图形间的不匹配性,进而提取出子镜间的相位失调误差<sup>[8]</sup>。

## 4 理论分析

当干涉检测系统由 He-Ne 光作为光源时,所得干涉条纹的强度分布为

$$I = I_0(1 + k\cos \varphi), \quad (1)$$

式中  $I_0$  为干涉图形光强的平均值,  $k$  为干涉条纹的对比度,  $\varphi$  为干涉仪两臂间相位差, 其值为

$$\varphi = 2\pi\delta/\lambda, \quad (2)$$

$\delta$  为干涉系统两臂的光程差,  $\delta = 2xn$ ,  $x$  为被检测的两拼接子镜间的垂向平移误差值,  $n$  为空气的折射率。系统在单色光照明下的干涉仿真图形如图 3 所示, 波长  $\lambda$  为 632.8 nm。

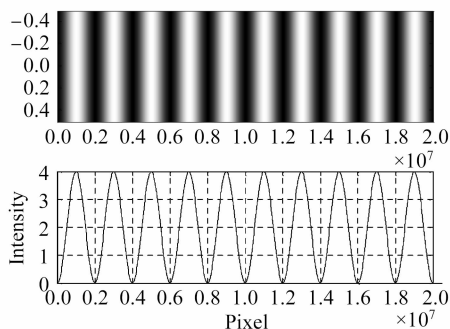


图 3 单色光照明下干涉条纹仿真图及其强度分布

Fig. 3 Fringe characteristic and light intensity distribution of the monochromatic simulated interferogram

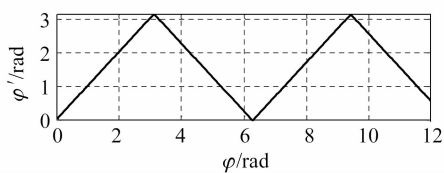


图 4 相位差  $\varphi$  的取值估计

Fig. 4 Plot of the phase estimate obtained from a single interference measurement

对于(1)式,若  $I_0$  与  $k$  为已知,则相位差  $\varphi$  的估计值  $\varphi'$  为

$$\varphi' = \arccos(\cos \varphi), \quad (3)$$

$\varphi'$  与  $\varphi$  的关系如图 4 所示,估计值  $\varphi'$  只有在  $0 < \varphi < \pi$  内取值才是唯一的。

由上可知:对单色光干涉图形,两组干涉条纹每相对移动一个条纹间隔  $b$ ,则相对应子镜间的垂向平移误差偏移为  $\lambda/2n$ ,当拼接子镜间垂向平移误差大小为  $\lambda/2n$  的整数倍时,将产生相同的条纹间移动间隔。这样,对于在确定子镜间垂向平移误差过程中,将会存在一定的模糊性,所以为实现该相位误差

的绝对测量,还要用白光作为光源进行垂向平移误差的绝对测量。

## 5 仿真分析

根据迈克耳孙干涉理论,在 CCD 成像系统探测区域内呈现一组干涉直条纹<sup>[9,10]</sup>。通过理论仿真,

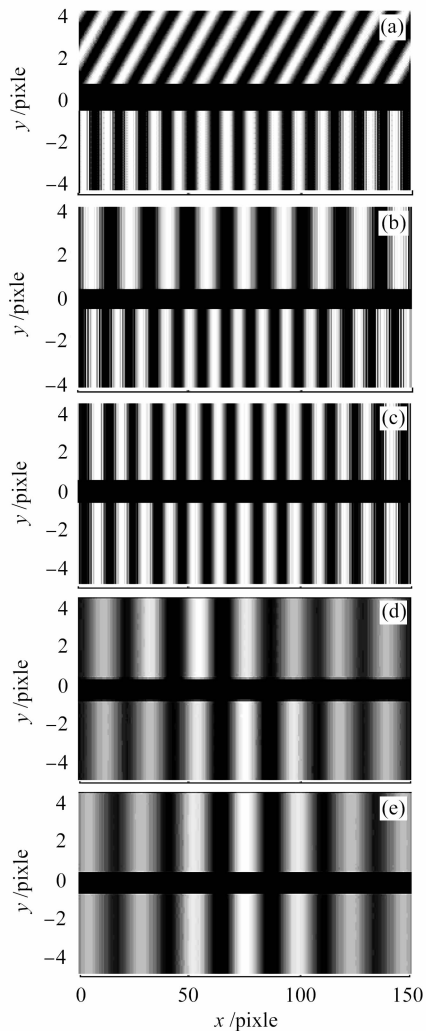


图 5 不同照明、不同位置误差时的干涉图形。(a) 单色光照射(tilt=0; tip≠0);(b) 单色光照射(tilt≠0; tip=0);(c) 单色光照射(tilt=0; tip=0);(d) 白光照射(tilt=0; tip=0; piston≠0);(e) 白光照射(tilt=0; tip=0; piston=0)

Fig. 5 Interferograms with different misalignment error and different light illumination. (a) monochromatic light illumination (tilt=0; tip≠0); (b) monochromatic light illumination (tilt≠0; tip=0); (c) monochromatic light illumination (tilt=0; tip=0); (d) white-light illumination (tilt=0; tip=0; piston≠0); (e) white-light illumination (tilt=0; tip=0; piston=0)

得出在不同照明光源、不同形式的相位失调误差时的干涉图形,如图 5 所示,单色光波长取为 632.8 nm,高斯型白光取双中心波长  $\lambda_1 = 633$  nm,  $\lambda_2 = 825$  nm,相干长度  $L_{c1} = L_{c2} = L_c = 18 \mu\text{m}$ 。

用单色光进行照明时,若子镜间存在 tip/tilt 角位移误差,则会对干涉图上层干涉条纹产生影响,具体来说,镜间相对 tilt 角位移误差将使上层干涉条纹周期产生变化,子镜间相对 tip 角误差将使上层干涉条纹的方向偏离其垂直方向,

应用宽光谱白光光源进行垂向平移误差的提取,可以解除关于子镜间垂向平移误差峰谷(PV)值的周期性问题。

通过仿真分析可以看出,拼接子镜间垂向平移误差峰谷值的分布曲线是收敛的(图 6),通过对垂向平移误差峰谷值的分析,可以衡量垂向平移误差的大小及变化规律。

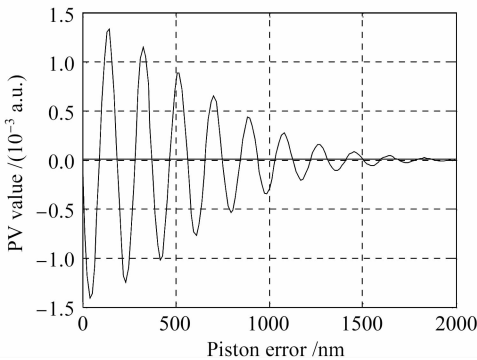


图 6 白光照明时子镜间垂向平移误差的峰谷值分析结果

Fig. 6 Results of PV value plotted with respect to the piston error (horizontal axis) for white-light illumination

## 6 结 论

该检测系统可以在白天的情况下对拼接子镜进行相位误差检测,大大节省了天文观测的时间。子镜间的相位误差通过所成干涉图形的不匹配性进行提取,应用单色光和白光所成的干涉条纹解决垂向平移相位误差的  $\lambda/2$  模糊性问题。系统在进行望远镜拼接主镜镜面相位误差检测时,检测精度及检测

范围完全满足望远镜成像质量要求,检测方案性能可靠,可操作性强。后续工作将针对该相位误差的提取算法作进一步的分析,以求进一步完善检测系统。该检测方案在应用于地基望远镜拼接镜面面形检测的同时,对于空间望远镜拼接主镜而言,也是一种理想的子镜间相位误差检测方案。

## 参 考 文 献

- 1 G. Chanan, M. Troy, F. Dekens *et al.*. Phasing the mirror segments of the Keck telescopes: the broadband phasing algorithm [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(1):140~155
- 2 R. Cohen, T. Mast, J. Nelson. Performance of the W. M. Keck telescope active mirror control system [C]. *SPIE*, 1994, **2199**:105~116
- 3 G. Chanan, M. Troy. Strehl ratio and modulation transfer function for segmented mirror telescopes as functions of segment phase error [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(31):6642~6647
- 4 R. G. Paxman, J. R. Fienup. Optical misalignment sensing and image reconstruction using phase diversity [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1988, **5**(6):914~922
- 5 G. Chanan, C. Ohara, M. Troy. Phasing the mirror segments of the Keck telescopes II: the narrow-band phasing algorithm [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(25):4706~4714
- 6 Wang Xuefeng, Wang Xiangzhao, Qian Feng *et al.*. Laser diode interferometer used to measure displacements in large range with a nanometer accuracy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(5):455~458  
王学锋,王向朝,钱 锋等. 用于纳米精度大范围位移测量的半导体激光干涉仪[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(5):455~458
- 7 Lu Min, Wang Ming, Hao Hui. Measurement of flow velocity using self-mixing speckle interference generated in laser diode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2):190~194  
陆 敏,王 鸣,郝 辉. 半导体激光器的自混合散斑干涉测量流体速度[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2):190~194
- 8 Cao Jianian, Zhang Likun, Li Xuyou *et al.*. Phase modulation and demodulation of interferometric fiber-optic hydrophone using phase-generated-carrier techniques [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(11):1536~1540  
曹家年,张立昆,李绪友等. 干涉型光纤水听器相位载波调制及解调方案研究[J]. *光学学报*, 1999, **19**(11):1536~1540
- 9 Chen Hongfang, Ding Xuemei, Zhong Zhi *et al.*. Effect of nonlinearity by the rotation of the polarizer in laser heterodyne interferometric [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(9):1281~1285  
陈洪芳,丁雪梅,钟 志等. 激光外差干涉检偏器旋转误差对非线性误差的影响[J]. *中国激光*, 2005, **32**(9):1281~1285
- 10 Wang Yanping, Peng Renjun, Wu Jian *et al.*. Superresolution imaging by fringes [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(1):51~54  
王艳平,彭仁军,吴 健等. 条纹法实现高分辨率成像[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(1):51~54