

低相干光源干涉系统在大口径拼接子镜间 相位误差检测上的应用

宋贺伦^{1,2} 李华强^{1,2} 鲜浩¹ 杨若夫^{1,2} 黄健^{1,2} 姜文汉¹

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

摘要 针对大口径望远镜拼接式主镜, 提出一种基于迈克耳孙干涉原理的低相干光源干涉检测系统。应用该系统对拼接子镜间相位失调误差进行实时检测, 进而对失调子镜进行相应校正, 以实现拼接子镜的共面排布。给出了低相干光源干涉检测系统的具体结构, 叙述了干涉检测系统的检测原理, 提出应用双中心波长组合低相干光源进行拼接子镜间相位误差检测, 分析了系统最低信噪比。结果表明, 双中心波长组合低相干光源系统, 可以提高低相干光源干涉中心条纹的信号分辨能力, 借以提高检测精度, 使得低相干光源干涉测量系统对拼接子镜间的相位失调误差进行高精度提取。

关键词 光学设计; 低相干光源; 干涉系统; 拼接子镜; 相位误差

中图分类号 TN21; TN27 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082808.1523

Application of Low-Coherence-Source Interferometric System to Phase Error Detection of Segmented Primary Mirrors for Large-Aperture Telescope

Song Helun^{1,2} Li Huaqiang^{1,2} Xian Hao¹ Yang Ruofu^{1,2} Huang Jian^{1,2} Jiang Wenhan¹

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

Abstract For the large aperture telescope with segmented primary mirrors, a low-coherence-source interferometric detection system based on the Michelson interferometric principle was put forward to detect the phase error between the segmented mirrors, correct the misaligned segments and achieve the mirror coplanar. The concrete structure of the interferometric detection system with the low-coherence source was presented, and the detection principle of the interferometric detection system was narrated. Double-center-wavelength combination low-coherence-source light sources were applied to detecting the phase error of the segmented mirrors and the minimum signal-to-noise ratio was analyzed. The result shows that the application of the double-central-wavelength combination low-coherence source light sources system largely raises the ability of signal distinguishing of the center fringe of the interferograms, improves the measurement accuracy, and makes the low-coherence-source interferometric detection system extract the phase error with high precision.

Key words optical design; low-coherence source; interferometric system; segmented mirrors; phase error

1 引 言

随着望远镜主镜口径的增加, 单块大口径主镜的制造显得越来越难, 一般认为, 单块大口径主镜的极限制造口径为 8 m。主镜拼接技术是实现大口径望远镜主镜的关键技术, 由拼接式主镜所形成的望

远镜光学系统与单块整镜相比较, 其所面临的主要问题就是拼接子镜间的共相位, 即拼接子镜间的相位调整。对拼接子镜间的相位误差的高精度检测, 并进行相应校正是解决该问题的关键。

拼接子镜间的相位误差是由于子镜间的失调误差

收稿日期: 2007-11-27; **收到修改稿日期**: 2008-01-24

基金项目: 国家 863 计划(60408005)资助课题。

作者简介: 宋贺伦(1980—), 男, 博士研究生, 主要从事光电检测系统设计方面的研究。E-mail: songhelun@126.com

导师简介: 姜文汉(1936—), 男, 院士, 博士生导师, 主要从事自适应光学等方面的研究。E-mail: adopse@ioe.ac.cn

所引起的,每块子镜均有 6 个自由度^[1],每个自由度对应一个需要检测的相位误差。在需要解决的相位失调误差当中,子镜间垂向上的相对平移相位失调误差是最要解决的,也是最难解决的。国外发展了很多对拼接子镜之间进行相对平移相位失调误差提取的相关技术,如衍射技术^[2,3],主要是提取子镜间区域的衍射图像,借以决定子镜间相对平移相位失调误差;曲率传感技术^[4,5],通过测量子镜间边缘的相位不连续性重构子镜间相对的相对平移相位失调误差;相位差异技术^[6,7],应用迭代的方法来探测与测量数据相匹配的光瞳像差,测量数据通过一对焦内和离焦的图像来获得。

2 系统结构原理

相位误差检测系统是基于分振幅式的迈克尔逊干涉系统,结合所需检测参量的特点而设计的,具有结构简单、性能稳定、检测精度高等显著特点。图 1 给出了干涉系统测量原理结构图。

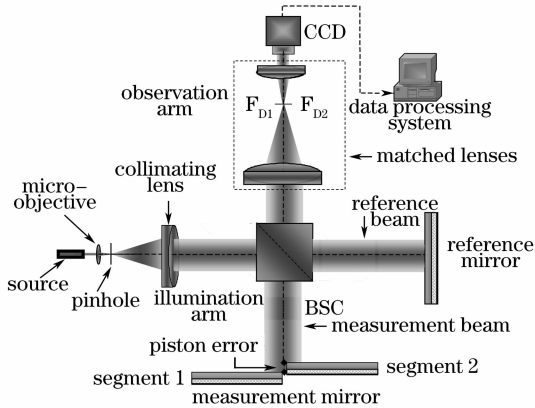


图 1 干涉系统测量原理结构图

Fig. 1 Principle scheme of the interferometric system measurement

该干涉检测系统的光源光束经准直系统准直后,通过分光立方体棱镜(BSC)将其分成两部分,即测量光束和参考光束。测量光束垂直入射到被检拼接子镜后被反射,同时参考光束入射到参考镜后也被反射,这两束被反射回来的光束经过分光棱镜后进入系统的探测臂部分后产生干涉,干涉图形为两组干涉直条纹,一组为子镜 1 上测量波前的反射光束和参考镜上参考波前的反射光束之间产生的干涉条纹,另一组为子镜 2 上波前的反射光束与参考镜上参考波前的反射光束之间产生的干涉条纹。这两组干涉条纹通过 CCD 面阵光电探测器进行成像。

检测系统对单色光干涉而言,当拼接子镜间相

对平移相位失调误差为 $\lambda/2$ 的整数倍时,在确定子镜间平移相位失调误差过程中将会存在一定的模糊性^[8],所以为实现相位误差的绝对测量,还要应用低相干光源进行平移相位失调误差的绝对检测。通过数据处理系统来比较两组干涉条纹之间的不匹配性,进而对拼接子镜之间的平移相位失调误差进行高精度提取。

检测系统的检测精度很大程度上依赖于干涉图形中央零级条纹的提取精度,而干涉图形中央零级条纹的提取精度又取决于中央零级条纹与 ± 1 级条纹之间的强度差,因此需要降低系统的最低信噪比(Signal-to-noise ratio, SNR)。理论分析表明,双中心波长组合光源技术能大大降低系统的最低信噪比,这就大大提高了干涉条纹的分辨率,进而提高了相位误差的检测精度。

3 干涉系统数值仿真分析

应用单中心波长高斯型低相干光源作为光源系统,所成干涉条纹的归一化强度可表示为^[9]

$$I_0(x) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \exp \left[- \left(\frac{2x}{L_c} \right)^2 \right] \cos \left(\frac{2\pi x}{\lambda} \right) \right\}, \quad (1)$$

式中 λ 为中心波长, L_c 低相干光源相干长度, x 为干涉系统引入的光程差(OPD)。

应用双中心波长组合高斯型低相干光源照明时,由于两种波长的光互不相干,干涉条纹总强度是各级条纹强度的线性叠加^[10]。假设两光源的光强度相等,此时干涉条纹归一化强度的交变成份为

$$I_{ac}(x) = \left\{ \frac{1}{2} \exp \left[- \left(\frac{2x}{L_{c1}} \right)^2 \right] \cos \left(\frac{2\pi x}{\lambda_1} \right) + \exp \left[- \left(\frac{2x}{L_{c2}} \right)^2 \right] \cos \left(\frac{2\pi x}{\lambda_2} \right) \right\}. \quad (2)$$

式中 $\lambda_1, \lambda_2, L_{c1}, L_{c2}$ 分别为两低相干光源的中心波长和相干长度。假设 $L_{c1} = L_{c2} = L_c$, 于是有

$$I_{ac}(x) = \frac{1}{2} \exp \left[- \left(\frac{2x}{L_c} \right)^2 \right] \left[\cos \left(\frac{2\pi x}{\lambda_1} \right) + \cos \left(\frac{2\pi x}{\lambda_2} \right) \right] = \exp \left[- \left(\frac{2x}{L_c} \right)^2 \right] \cos \left(\frac{2\pi x}{\lambda_a} \right) \cos \left(\frac{2\pi x}{\lambda_m} \right). \quad (3)$$

式中 $\lambda_a = 2\lambda_1\lambda_2/(\lambda_1 + \lambda_2)$, $\lambda_m = 2\lambda_1\lambda_2/(\lambda_1 - \lambda_2)$, (3) 式表述了周期为 λ_a 的余弦函数,其振幅受周期为 λ_m 的余弦波调制,整个输出强度又受高斯函数 $\exp[-(2x/L_c)^2]$ 的调制。图 2 给出了当 $\lambda_1 = 633 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 685 \text{ nm}$, $L_c = 18 \mu\text{m}$ 时干涉条纹强度分布曲线图。

干涉光强包络函数可表示为

$$I_c(x) = \exp \left[- \left(\frac{2x}{L_c} \right)^2 \right] \cos \left(\frac{2\pi x}{\lambda_m} \right), \quad (4)$$

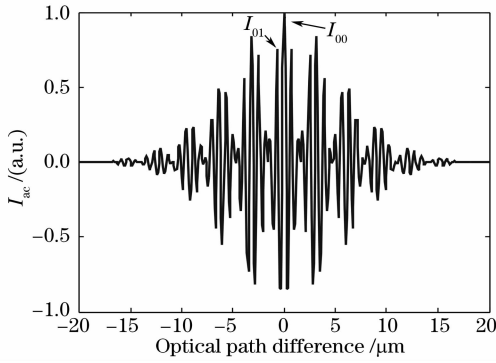


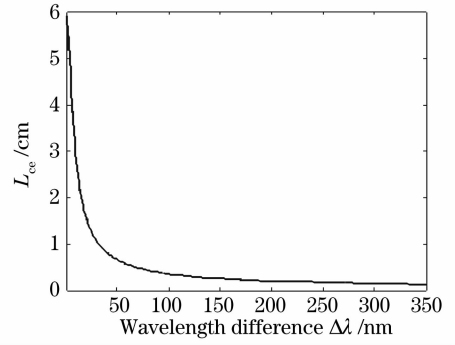
图2 双中心波长组合光源干涉条纹强度分布曲线

Fig. 2 Computer-simulated interference fringe intensity patterns with two-wavelength combination source

当 $x = \pm \lambda_m/4$, $I_c(x) = 0$ 。此时干涉条纹包络宽度为 $2\lambda_m/4 = \lambda_m/2$ 。一般情况下,双中心波长组合光源的相干长度经常用等效相干长度 L_{ce} 来表示,该值为当干涉条纹包络下降到峰值强度的 $1/e$ 时的光程差全宽值^[11,12], $L_{ce} = 2x_0$, x_0 满足

$$\exp\left[-\left(\frac{2x_0}{L_{ce}}\right)^2\right]\cos\left(\frac{2\pi x_0}{\lambda_m}\right) = \frac{1}{e}. \quad (5)$$

图3给出了在不同波长组合的情况下,等效相干长度 L_{ce} ($L_{ce} = 2x_0$) 随波长差 $\Delta\lambda$ ($\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$) 的变化趋势。

图3 等效干涉长度 L_{ce} 与波长差 $\Delta\lambda$ 的关系曲线Fig. 3 Relation between the equivalent coherence length L_{ce} and the wavelength difference $\Delta\lambda$

由图3可见,等效干涉长度 L_{ce} 随波长差 $\Delta\lambda$ 的增加而逐渐变小。图2中,中心条纹包络的零级条纹峰值强度可表示为

$$I_{00} = I_{ac}(0) - I_{ac}(\lambda_a/2) = 1 + \exp\left[-\left(\lambda_a/L_{ce}\right)^2\right]\cos(\pi\lambda_a/\lambda_m). \quad (6)$$

中心条纹包络的次级条纹峰值强度可表示为

$$I_{01} = I_{ac}(\lambda_a) - I_{ac}(\lambda_a/2) = \exp\left[-\left(2\lambda_a/L_{ce}\right)^2\right]\cos(2\pi\lambda_a/\lambda_m) + \exp\left[-\left(\lambda_a/L_{ce}\right)^2\right]\cos(\pi\lambda_a/\lambda_m). \quad (7)$$

I_{01} 的归一化为

$$I_{01n} = \frac{I_{01}}{I_{00}} = \frac{\exp\left[-\left(2\lambda_a/L_{ce}\right)^2\right]\cos(2\pi\lambda_a/\lambda_m) + \exp\left[-\left(\lambda_a/L_{ce}\right)^2\right]\cos(\pi\lambda_a/\lambda_m)}{1 + \exp\left[-\left(\lambda_a/L_{ce}\right)^2\right]\cos(\pi\lambda_a/\lambda_m)}. \quad (8)$$

由双中心波长组合光源的波长差 $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$, λ_a, λ_m 可进一步表示为

$$\lambda_a = \frac{2\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} = 2\lambda_1\left(1 - \frac{\lambda_1}{2\lambda_1 + \Delta\lambda}\right), \quad (9)$$

$$\lambda_m = \frac{2\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} = 2\lambda_1\left(1 + \frac{\lambda_1}{\Delta\lambda}\right). \quad (10)$$

所以

$$\frac{\lambda_m}{\lambda_a} = 1 + \frac{2\lambda_1}{\Delta\lambda}. \quad (11)$$

把(9)式~(11)式代入(8)式可见, I_{01} 是波长差 $\Delta\lambda$ 的函数,中心条纹包络的零级条纹峰值强度 I_{00} 与次级条纹峰值强度 I_{01} 之间差值的归一化强度表达式为

$$\Delta I_{01n} = \frac{I_{00} - I_{01}}{I_{00}} = 1 - I_{01n}. \quad (12)$$

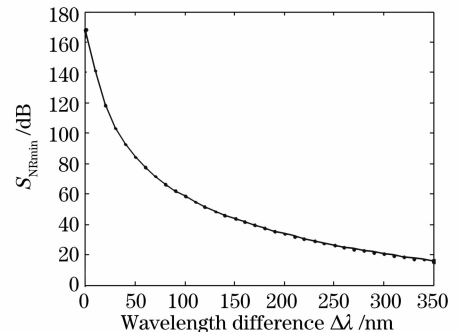
在低相干光源干涉检测系统当中,为了精确辨别出中心条纹的具体位置, ΔI_{01n} 的值应大于系统的噪声,否则由于噪声的干扰,干涉条纹信息很难被辨别出^[13],所以应尽量降低探测系统的最低信噪比。

$$S_{NR \min} = \frac{1}{\Delta I_{01n}} = \frac{I_{00}}{I_{00} - I_{01}} = \frac{1}{1 - I_{01n}}. \quad (13)$$

将最低信噪比以 dB 为单位表示为

$$S_{NR \min}(\text{dB}) = -20\lg(\Delta I_{01n}) = -20\lg(1 - I_{01n}). \quad (14)$$

图4给出了系统的最低信噪比与波长差 $\Delta\lambda$ 之间的关系曲线;图5给出了系统的最低信噪比与等

图4 最低信噪比(dB)与波长差 $\Delta\lambda$ 之间的关系曲线Fig. 4 Relation between the minimum SNR (dB) and the wavelength difference $\Delta\lambda$

效相干长度 L_{ce} 之间的关系曲线。

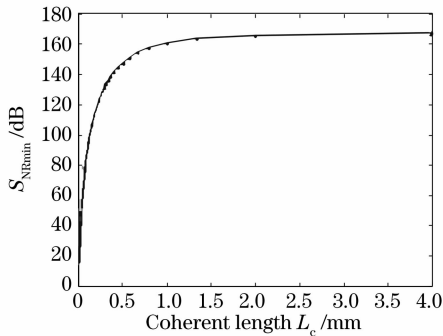


图 5 最低信噪比(dB)与等效相干长度 L_{ce} 之间的关系曲线

Fig. 5 Relation between the minimum SNR (dB) and the equivalent coherence length L_{ce}

由图 4、图 5 可见,系统的最低信噪比与波长差 $\Delta\lambda$ 成非线性反比关系(与等效相干长度 L_{ce} 成非线性正比关系),即随着波长差 $\Delta\lambda$ 的增加(等效相干长度 L_{ce} 的减小),系统的最低信噪比逐渐减小,中心条纹具体位置的判别越容易,即有效提高了该检测系统的检测精度。

4 结 论

应用双中心波长组合低相干光源干涉系统对接镜子间的相位失调误差进行检测,虽然从某种程度上增加了光源系统的复杂性,且使检测系统的造价有所提高,但应用双中心波长组合低相干光源作为该检测系统光源,却是提高系统分辨率、检测精度的有效方法。理论分析表明,采用双中心波长组合低相干光源可大幅度降低检测系统的最低信噪比,进而使中心条纹具体位置的判别越容易,解决了当只使用单中心波长的低相干光源时带来的干涉零级条纹判别困难的难题。同时采用双中心波长组合低相干光源进行相位失调误差的检测,免除了复杂的信号处理和大量的计算机计算,对接镜子间相位失调误差的高精度提取具有实际意义。

致谢 感谢饶长辉研究员、向银辉书记给予的热心帮助。

参 考 文 献

- 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
- R. W. Cohen, T. S. Mast, J. E. Nelson. Performance of the W. M. Keck Telescope active mirror control system[C]. *Proc. SPIE*, 1994, **2199**: 105~116
- G. A. 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
- R. G. Paxman, J. R. Fienup. Optical misalignment sensing and image reconstruction using phase diversity[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1988, **5**(6): 914~922
- 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
- Wang Xuefeng, Wang Xiangzhao, Qian Feng *et al.*. Laser diode interferometer used to measure displacements in large range with a nanometer accuracy[J]. *Chin. 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
- 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
- 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决方案研究[J]. *光学学报*, 1999, **19**(11): 1536~1540
- Chen Hongfang, Ding Xuemei, Zhong Zhi *et al.*. Effect of nonlinearity by the rotation of the polarizer in laser heterodyne interferometry[J]. *Chin. 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
- 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
- Zhao Pei, Wu Fuquan, Hao Dianzhong *et al.*. Measurement of the delay of the quarter-wave plate by phase modulated ellipsometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 379~382
赵 培,吴福全,郝殿中等. 1/4 波片延迟量的相位调制椭圆偏测量法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3): 379~382
- Lei Ming, Yao Baoli. Theoretical and experimental studies on multi-beam interference by using pyramid lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 757~762
雷 铭,姚保利. 多棱锥镜产生多光束干涉场的理论和实验研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 757~762
- Rao Yunjiang, Wang Xijing, Zhu Tao *et al.*. Demodulation algorithm for frequency division multiplexed fiber-optic Fizeau strain sensor networks[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 997~1000
饶云江,王希晶,朱 涛等. 光纤菲佐传感器频分复用网络解调方法研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 997~1000