

# 全视场外差长腔干涉测量技术

伍洲<sup>1,2,3</sup>, 李杨<sup>1,2,3\*\*\*</sup>, 相里斌<sup>1,2\*\*</sup>, 张文喜<sup>1,2,3\*</sup>, 孔新新<sup>1,2</sup>, 尚万祺<sup>1,2,3</sup>, 吕彤<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院光电研究院, 北京 100094;

<sup>2</sup>中国科学院计算光学成像技术重点实验室, 北京 100094;

<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 提出了一种适用于长焦光学镜片面形测量的新型激光干涉仪。利用全视场外差移相技术能有效抑制振动和大气等环境因素对长腔干涉测量的影响,采用 Twyman-Green 干涉仪结构,实现测量波面和参考波面的外差相干测量。搭建了实验验证系统,实验证明该方案能较好地抑制外界振动和大气湍流对测量精度的影响,实现了较高精度的长腔干涉测量,仪器的 RMS(Root Mean Square)重复测量精度达到  $0.45\% \lambda$ 。该技术可以作为长腔干涉测量的可选方案之一。

**关键词** 测量; 全视场外差; 长腔干涉; 面形检测; 低差频移相

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0912003

## Full-Field Heterodyne Long-Cavity Interferometry

Wu Zhou<sup>1,2,3</sup>, Li Yang<sup>1,2,3\*\*\*</sup>, Xiangli Bin<sup>1,2\*\*</sup>, Zhang Wenxi<sup>1,2,3\*</sup>,  
Kong Xinxin<sup>1,2</sup>, Shang Wanqi<sup>1,2,3</sup>, Lü Tong<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Computational Optical Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences,  
Beijing 100094, China;

<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** This paper proposes a new laser interferometer which is suitable for measuring the profile of an optical lens with a long focal length. Full-field heterodyne phase-shift technology is used to suppress the effects of factors such as vibration and the atmosphere on long-cavity interferometry. The heterodyne coherent measurement of the measured and reference wavefronts is achieved using a Twyman-Green interferometer structure. Experimental equipment is developed, and an experiment is conducted to prove that the novel setup can suppress the influences of external vibration and atmospheric turbulence on the measurement accuracy, achieving a long-cavity measurement with a root mean square repeated measurement accuracy of  $0.45\% \lambda$ . Thus, this technology can prove to be a valuable alternative to traditional long-cavity interferometry.

**Key words** measurement; full-field heterodyne; long-cavity interference; surface shape measurement; low difference-frequency phase-shift

**OCIS codes** 120.3180; 120.3940; 120.4640; 230.1040

## 1 引 言

在大型光学系统主镜、长焦光学元件等光滑表面的干涉测量中,干涉腔较长,振动、气流等环境因素对测量精度具有较大的影响,甚至会导致无法测量。高精度长腔干涉测量是干涉测量领域重要的研究方向之一。Ruiz 等<sup>[1]</sup>认为环境噪声频谱主要集

中在 100 Hz 以下,噪声峰值频率为 30 Hz。通过提高采样帧频,缩短采样时间,能够实现长腔干涉测量。长腔干涉测量主要采用单幅图采样法<sup>[2]</sup>、随机移相法<sup>[3]</sup>、振动探测补偿法<sup>[4]</sup>和空间移相法等技术方案。其中,同步移相干涉测量技术解决了瞬态移相测量的难题,如 Koliopoulos 等<sup>[5]</sup>提出了采用 4 个 CCD 同时获得 4 幅相移干涉图的技术, Hettwer

收稿日期: 2019-03-29; 修回日期: 2019-05-02; 录用日期: 2019-05-21

基金项目: 国家自然科学基金(61605217)

\* E-mail: zhangwenxi@aoe.ac.cn; \*\* E-mail: xiangli\_aoe@163.com; \*\*\* E-mail: liyang@aoe.ac.cn



光;另一束光经移频后透射,将其作为测量光,经一块 1/4 波片(光轴与光束传播面夹角为 45°)与一个消波前畸变的标准透镜出射,发散照射到被测镜面。将标准透镜焦面与被测镜焦面调整至重合,测量光经原路返回经 1/4 波片后偏振方向旋转 90°,经 PBS 棱镜 3 反射进入接收探测模块。参考光同样偏振转向,透射进入接收探测模块。参考光与测量光在检偏方向为 45°的偏振片后形成干涉,干涉光经透镜 1 和透镜 2 组成的成像扩束系统后由高速探测器接收,产生干涉图。在成像扩束系统中插入一个分光片,分出一部分能量聚焦在分划板上,用以辅助监视和调整。测量时通过调整高速相机前后位置,可以选择将高速相机对焦在标准透镜的后焦面附近,与被测镜形成共轭。更换不同  $F$  数的标准透镜可以使全视场外差干涉仪灵活地适配不同相对孔径的被测球面,去掉标准透镜则可以将全视场外差干涉仪用于平面的检测。

图 2 所示为双频光源模块的实物图,激光器采用光纤布拉格光栅单纵模窄线宽激光器,波长为 633 nm,采用自主研发的声光移频器移频。为较好地隔绝外界低频噪声的干扰,同时使探测器的帧频能够满足采样定理,两束光的差频设置为 100 Hz,差频率率稳定度为  $0.01 \times 10^{-6}$ ,相位噪声优于  $-135$  dBc/Hz@1 kHz。光束准直口径为 9 mm,透镜 1 和透镜 2 的焦距分别为 90 mm 与 120 mm。探测器为高帧频 CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor Transistor) 探测器,面阵大小为 1280 pixel  $\times$  1024 pixel,设置探测器的帧频为 500 frame/s。

#### 4 实验数据分析

进行长腔干涉测量时,空气扰动是主要影响因素。由于大气环境时刻在变化,通常采用多次测量

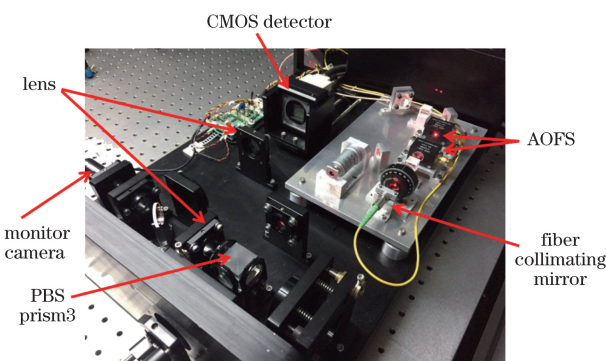


图 2 双频光源模块实物图

Fig. 2 Physical map of dual-frequency laser source

取平均的方法抑制空气扰动的影响。因此,可将动态长腔干涉测量仪器性能的评估分为两个方面: 1) 在无空气扰动时仪器测量结果的准确性,即通过近距离测量分析仪器的精度,确保远距离测量结果的误差来源主要为大气湍流引起的误差; 2) 进行远距离测量时能够获得面形测量的结果,由于远距离测量的误差来源主要为大气湍流,可以通过多次采样取平均的方法抑制大气湍流的影响,提高长腔测量的精度。由于近距离和远距离测量结果的主要误差源不同,进行远距离测量时大气实时环境、测量取平均的次数和测量结果都不相同,因此长腔测量的重复测量精度并不能作为仪器性能的考核指标。为了验证研制的实验系统的性能,进行了针对近距离的性能测量实验和针对远距离的功能测量实验。

利用研制的外差干涉仪对凹球面镜进行了测量,图 3(a)所示为干涉腔长为 0.25 m 时,近距离实测的不同时刻干涉数据立方体,图 3(b)所示为干涉图上两点灰度值(DN)与采样点数的关系曲线。从图 3(b)可以看出,两点的灰度值均呈正弦分布,但相位不同,通过数字解调能够得到每一点的相位值,从而反演出面形参数。由于干涉腔长较短,外界振

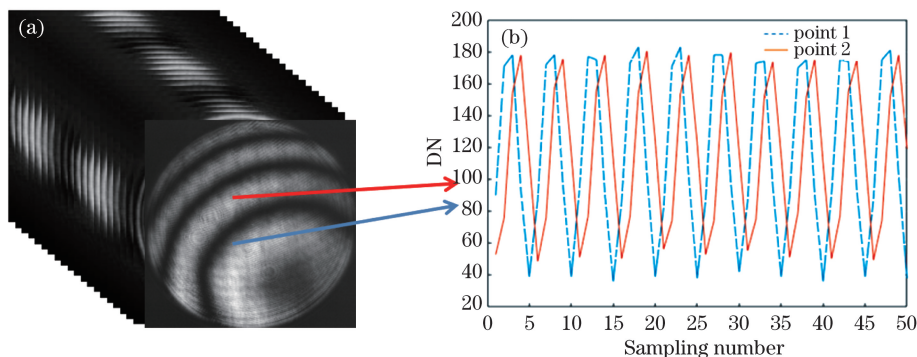


图 3 干涉腔长为 0.25 m 时近距离实测的干涉数据。(a)不同时刻的干涉数据立方体;(b)固定点不同时刻的干涉数据曲线

Fig. 3 Interference data measured at close range with interference cavity length of 0.25 m.

(a) Interference data cube at different time; (b) interference data curves of fixed point at different time



动和大气湍流的干扰较小,故采用单个周期数据即可以获得高精度面形信息,测量结果如图 4 所示。

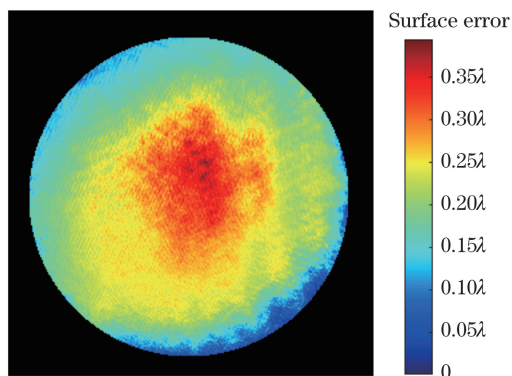


图 4 近距离测量面形结果

Fig. 4 Surface measurement result at close distance

为了进一步验证干涉仪的重复测量精度,在相同条件下进行多次信号采集(共进行了 48 次测量),测量获得的面形 RMS 结果分布如图 5 所示。取三次相位的平均作为一组测量,先对每组测量得到的数据进行数字解调,再进行相位解缠和 Zernike 多项式拟合处理后,最后得到面形信息。共测得 16 个面形 RMS 值,计算可得 16 个结果的标准差为 0.288 nm(即  $0.45483\lambda/1000, \lambda = 633 \text{ nm}$ )。

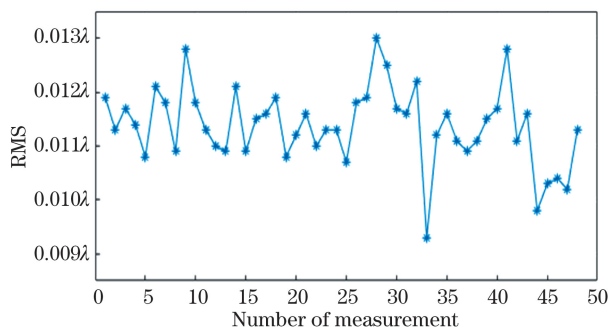


图 5 48 次 RMS 重复测量结果

Fig. 5 RMS after repeated measurement for 48 times

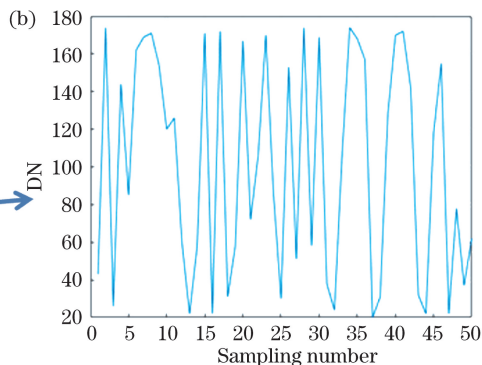
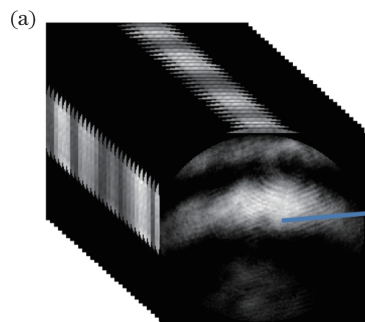


图 7 干涉腔长为 25 m 时采集的干涉数据。(a)不同时刻的干涉数据立方体;(b)固定点不同时刻的干涉曲线

Fig. 7 Collected interference data with interference cavity length of 25 m. (a) Interference data cube at different time; (b) interference data curve of fixed point at different time

针对 Twyman-Green 型干涉系统可能导致的系统误差较大的情况,利用对标准镜进行空腔测量的方法进行了系统误差校正,得到的系统误差测量结果如图 6 所示。系统空腔误差的峰值(PV)为  $0.103\lambda$ ,RMS 值为  $0.00783\lambda$ 。

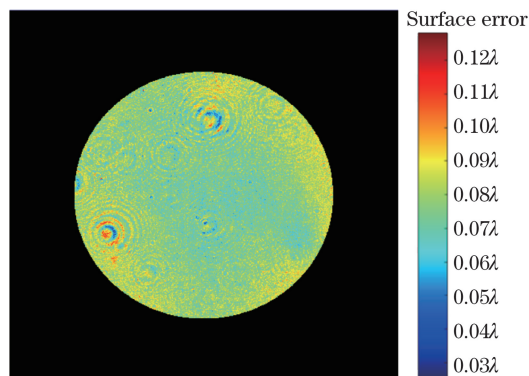


图 6 系统误差测量结果

Fig. 6 Measurement result of system error

为了进一步验证该设备在干涉腔较长时的测量能力,利用其对 25 m 干涉腔长的镜片面形进行了测量。干涉数据立方体如图 7(a)所示,图 7(b)为干涉图上两点的灰度值与采样点数的关系曲线。可以看出由于干涉腔长较长,环境振动和大气湍流对测量的干扰较大,灰度值的变化已完全看不出正弦趋势。利用单个周期数据难以准确获得相位信息,需要采用多周期数据进行反演。利用探测的 0.1 s 数据(10 个采样周期),可以重构出长干涉腔镜面面形。图 8 为干涉腔长为 25 m 时获得的被测面形结果,其中图 8(a)为被测面形误差图,图 8(b)为被测面形三维图。

## 5 结 论

针对长腔干涉测量难题,提出了采用全视场外

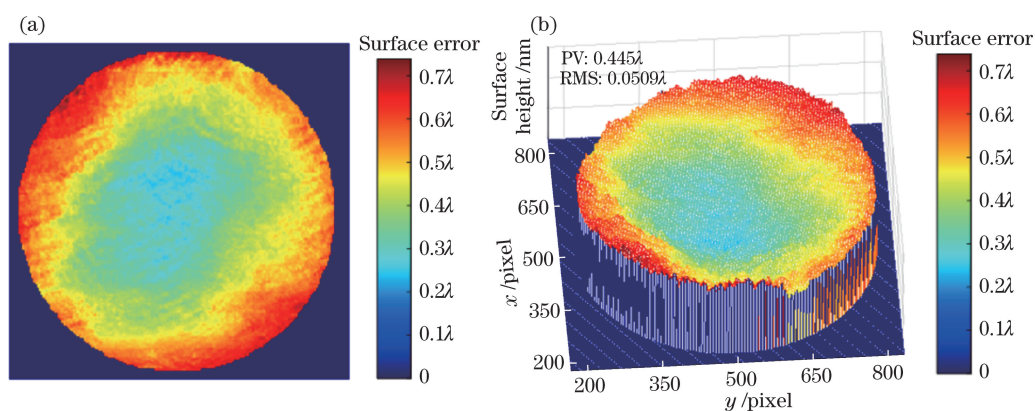


图 8 干涉腔长为 25 m 时获得的被测面形。(a)被测面形误差图;(b)被测面形三维图

Fig. 8 Measured surface with interference cavity length of 25 m. (a) Error of measured surface;  
(b) 3D map of measured surface

差技术进行长腔干涉测量的方案。研制了一种全视场外差长腔测量干涉仪,仪器的 RMS 重复测量精度可达  $0.45\%_0\lambda$ 。在干涉腔长为 25 m 时,利用该仪器能够获得被测镜面的面形,该仪器满足多数长腔干涉测量的需求。相对于现有长腔干涉测量的干涉仪,该仪器能够同时抑制振动和大气湍流对测量精度的影响,测量精度较高,同时具有参考光与测量光分光比可调、适用范围广等优点。该技术方案可作为长腔干涉测量的可选方案之一。

### 参 考 文 献

- [1] Ruiz P D, Huntley J M, Shen Y J, *et al.* Vibration-induced phase errors in high-speed phase-shifting speckle-pattern interferometry[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(13): 2117-2125.
- [2] Kujawinska M, Wojciak J. Spatial-carrier phase-shifting technique of fringe pattern analysis[J]. *Proceedings of SPIE*, 1991, 1508: 61-67.
- [3] Hayes J. Dynamic interferometry handles vibration[J]. *Laser Focus World*, 2002, 38(3): 109-116.
- [4] Liu J Y, Yamaguchi I. Mirror surface testing by optical feedback interferometry using laser diode[J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3782: 407-414.
- [5] Koliopoulos C L. Simultaneous phase-shift interferometer[J]. *Proceedings of SPIE*, 1992, 1531: 119-127.
- [6] Hettwer A, Kranz J, Schwider J. Three channel phase-shifting interferometer using polarization-optics and a diffraction grating [J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(4): 960-966.
- [7] Millerd J E, Brock N J, Hayes J B, *et al.* Pixelated phase-mask dynamic interferometer[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5531: 304-314.
- [8] Brock N, Hayes J, Kimbrough B, *et al.* Dynamic interferometry[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5875: 58750F.
- [9] Morimoto Y. Subnanometer displacement measurement by averaging of phase difference in windowed digital holographic interferometry[J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(2): 025603.
- [10] Kimbrough B T. Pixelated mask spatial carrier phase shifting interferometry algorithms and associated errors [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(19): 4554-4562.
- [11] Gross M, Goy P, Forget B C, *et al.* Heterodyne detection of multiply scattered monochromatic light with a multipixel detector[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(11): 1357-1359.
- [12] Atlan M, Gross M, Absil E. Accurate phase-shifting digital interferometry[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(11): 1456-1458.
- [13] Wu Z, Zhang W X, Bin X L, *et al.* Full-field heterodyne dynamic interferometry based on Hertz-level low differential-frequency acousto-optic frequency shifter[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10329: 1032905.
- [14] Deng Q Y, Tang Y, Zhou Y, *et al.* High-resolution surface topography measurement based on frequency-domain analysis in white light interferometry[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(6): 0604001. 邓钦元,唐燕,周毅,等.基于白光干涉频域分析的高精度表面形貌测量[J].*中国激光*, 2018, 45(6): 0604001.
- [15] Pitter M C, See C W, Somekh M G. Full-field heterodyne interference microscope with spatially incoherent illumination[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(11): 1200-1202.
- [16] Lo Y L, Chih H W, Yeh C Y, *et al.* Full-field heterodyne polariscope with an image signal processing method for principal axis and phase

- retardation measurements[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(31): 8006-8012.
- [17] Xu C. Study of dynamic interferometry technology and application[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2009: 21-24.  
徐晨. 动态干涉测试技术与应用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009: 21-24.
- [18] Lü X, Xiangli B, Zhang W X, *et al.* Multiframe full-field heterodyne digital holographic microscopy[J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(5): 050901.
- [19] Yatabe K, Ishikawa K, Oikawa Y. Hyper ellipse fitting in subspace method for phase-shifting interferometry: practical implementation with automatic pixel selection[J]. *Optics Express*, 2017, 25(23): 29401-29416.
- [20] Yatabe K, Ishikawa K, Oikawa Y. Improving principal component analysis based phase extraction method for phase-shifting interferometry by integrating spatial information[J]. *Optics Express*, 2016, 24(20): 22881-22891.