

采用短相干光源的动态斐索干涉仪

孙沁园, 陈磊, 郑东晖, 朱文华, 张瑞, 丁煜

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 为了实现斐索型干涉仪的动态干涉测试, 研究了一种采用短相干光源的动态斐索干涉仪。以中心波长为 638 nm、带宽为 0.1 nm 的二极管泵浦固体激光器作为光源, 与偏振延迟装置结合得到一对短相干正交线偏振光, 通过调节光源模块中两支线偏振光的光程差来匹配斐索干涉腔的长度, 从而获取一对光程差为 0 的相干光束。使用偏振相机采集得到四幅位相依次相差 $\pi/2$ 的移相干涉图, 按照四步移相算法解算相位, 恢复待测元件的表面面形。采用光强归一化算法有效地抑制了偏振态误差导致的移相干涉图光强不一致在最终恢复波面中引入的一倍频波纹误差。采用琼斯矢量和琼斯矩阵分析了干涉图对比度与 s 光和 p 光光强比值的的关系, 并分析了 1/4 波片方位角误差对最终恢复波面的影响。利用该装置和 Zygo GPI XP 型干涉仪测量了同一块光学平晶, 其均方根值相差 0.024λ , 峰谷值相差 0.026λ 。

关键词: 光学测量; 动态干涉仪; 短相干光源; 偏振移相

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0220001

Dynamic Fizeau interferometer using low-coherence light source

Sun Qinyuan, Chen Lei, Zheng Donghui, Zhu Wenhua, Zhang Rui, Ding Yu

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to realize dynamic interference measurement of Fizeau interferometer, a dynamic Fizeau interferometer using low-coherence light source was proposed. A diode-pumped solid-state laser with a central wavelength of 638 nm and a bandwidth of 0.1 nm as the light source was used to produce a pair of orthogonal linearly polarization lights with low-coherence, combined with a polarization delay device. Then a pair of coherent beams with zero optical path difference (OPD) were acquired through adjusting OPD of the linearly polarization lights to match cavity length of Fizeau interferometer. Four interferograms with $\pi/2$ phase shift in a phase-shifting sequence were obtained by a pixelated polarizer-based camera, by using the 4-bucket algorithm, the surface shape of optical elements was derived. An optical intensity normalization algorithm was adopted to suppress the phase error, which was caused by the intensity inconsistency due to polarization error, and had the same spatial frequency as the fringes. The relationship between interferogram contrast and ratio of s-polarized light and p-polarized light was deduced through Jones vector and Jones matrix. Besides, the effect of azimuth error of the quarter wave

收稿日期: 2017-08-05; 修订日期: 2017-10-03

基金项目: 国家重大科学仪器开发专项(2013YQ150829)

作者简介: 孙沁园(1994-), 女, 硕士生, 主要从事动态干涉测量方面的研究。Email: sunqinyuan@njust.edu.cn

导师简介: 陈磊(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光学计量测试与光电智能化仪器等方面的研究。

Email: chenlei@njust.edu.cn

plate on the final recovery wave surface was analyzed. An optical flat was measured by this interferometer and Zygo GPI XP interferometer, the difference of root-mean-square and peak-to-valley were 0.024λ and 0.026λ respectively.

Key words: optical measurement; dynamic interferometer; low-coherence light source; polarization phase-shifting

0 引言

近年来,动态干涉测试技术发展迅速,并且在天文光学、强激光、核聚变等领域中得到了广泛应用。动态干涉仪在同一时间采集至少三幅移相干涉图,通过移相算法解算待测相位,能够从原理上抑制环境振动和空气扰动引入的测量误差,实现对光学元件面形及瞬态波前的实时检测^[1-7]。

目前,动态干涉仪均基于偏振干涉原理,采用空间分光、偏振元件移相的方案实现同步移相。Koliopoulos 使用多个 PBS 进行分光,采用四个 CCD 相机同时获得四幅具有不同移相量的干涉图,该方案对四个 CCD 的空间位置和一致性要求很高,光学结构比较复杂^[8];Hettwer 等人采用一维光栅分光,采用 1/4 波片引入移相,在同一个 CCD 上得到三幅位相差为 $\pi/2$ 的移相干涉图^[9];钱克矛等利用龙基光栅分光,通过偏振片组在四幅干涉图之间引入移相,实现动态波前测量^[10];Millerd 发明了一种采用光全息器件、位相掩模板、偏振器的技术方案优化了动态移相干涉测量系统的光学结构,能够在 CCD 相机上同时获得四幅相位差为 90° 的移相干涉图^[11],之后又对位相掩模板进行了改进,用微偏振移相阵列代替原来的全息分光位相掩模技术^[12];Yoneyama 实现了基于微延迟阵列的同步移相方案,用于检测光学材料内部应力^[13]。以上同步移相干涉仪均采用泰曼型干涉仪方案,这种方案对分光镜等光学元件的要求很高,难以制成大口径干涉仪,且干涉仪光源采用激光光源,相干长度较长,测量时容易受到光学元件多次反射寄生条纹的干扰,影响测量精度。斐索干涉仪采用共光路结构,可以有效抑制干涉仪内部光学元件引入的系统误差,仪器精度主要依赖于参考镜光学质量,目前口径大于 100 mm 的激光干涉仪基本都采用斐索型式。然而也由于其共光路结构,正交偏振的参考光与测试光之间不易引入偏振器件进行空间移

相,难以实现动态干涉测量。Baoli Yao 等人采用面形精度优于 $\lambda/10$ 的 1/4 波片,在产生参考光的同时,实现对测试光偏振态的调制,结合空间分光移相系统,搭建了斐索动态干涉仪^[14]。以上方案采用相干性良好的激光光源,在测量光学元件时,同样容易受到光学元件多次反射引入的寄生干涉条纹的干扰,导致测量失败。Szwaykowski 等人提出了一种斐索型同步移相专利技术^[15-16],光源经过渥拉斯顿棱镜产生两束有一定夹角的正交线偏振光,通过倾斜参考镜和测试镜,使参考光和测试光通过空间滤波器,然后经过 x -cube 棱镜分光及偏振器件延迟,形成三幅移相干涉图并由三个 CCD 同步采集。该方案能够避免杂散光进入 CCD 产生寄生条纹,具有干涉图分辨率高的优点,但由于参考光和测试光不共光路,从而引入较大的轴外像差。朱秋冬设计了一种可调扩展光源照明的同轴斐索型同步移相干涉仪^[17],采用扩展光源作为系统光源,通过调整光源轮廓尺寸改变光源的空间相干性,使得除参考光和测试光之外的其余各组干涉条纹消失,用 CCD 采集四幅移相干涉图,采用移相算法恢复待测面形。Millerd 采用中心波长为 658 nm、相干长度为 300 μm 的半导体激光二极管作为系统光源,搭建了同步移相斐索干涉仪,采用微波调制的方法改变光源相干性,调制频率高达 1 GHz,可应用于平行薄板面形以及材料均匀性的测量,不会产生自干扰寄生条纹^[18]。

文中研究了一种采用短相干光源的动态斐索干涉仪,该干涉仪选用中心波长为 638 nm 的二极管泵浦固体激光器作为系统光源,结合微偏振阵列位相掩模技术,实现对光学元件表面面形的动态测量。为了抑制待测光学元件前后表面多次反射产生的寄生条纹的干扰,该干涉仪光源采用短相干光源,通过调整干涉腔长能够保证只有参考光与测试光的光程差等于零,才能发生干涉。为了抑制干涉图的空间位置配准误差,通过偏振相机采集光强图,按照微偏振阵

列微偏振元的分布规律抽取得到四幅同步移相干涉图,根据四步移相算法解算相位。此外,干涉仪采用共光路斐索型结构,可选取不同 F 数的准直物镜进行扩束,实现对大口径光学元件表面面形的动态测量。

1 原理

短相干动态斐索干涉仪系统结构如图 1 所示,

包括短相干光源模块、斐索干涉模块和偏振移相模块。为了消除被测件前后表面多次反射引入的干扰条纹,干涉仪需要采用短相干激光光源。激光束通过偏振片和 1/2 波片后形成线偏振光,由偏振分光棱镜(PBS)分解为 p 光和 s 光,移动导轨在 p 光和 s 光之间引入 2Δ 的光程差,经 PBS 合束之后进入斐索干涉模块。

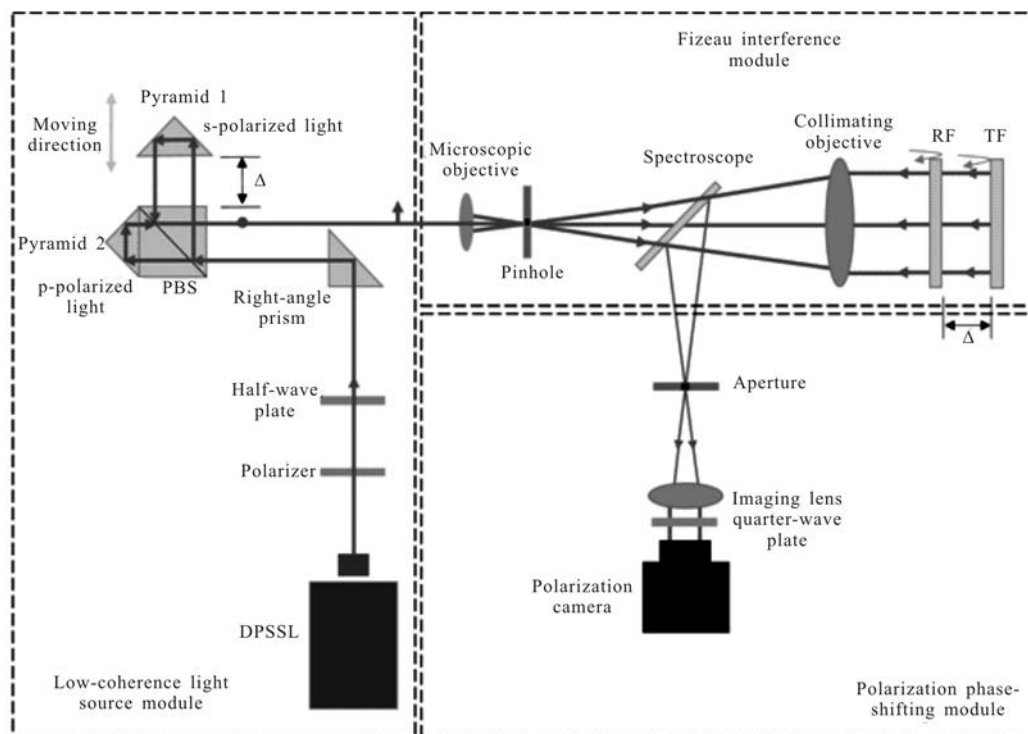


图 1 采用短相干光源的动态斐索干涉仪

Fig.1 Dynamic Fizeau interferometer using low-coherence light source

p 光和 s 光经扩束准直后分别在参考镜和测试镜的前后表面反射,分别产生四束线偏振光为 R_p 、 R_s 、 T_p 、 T_s , 其干涉组合共有六种, R_pR_s 、 R_pT_p 、 R_pT_s 、 R_sT_p 、 R_sT_s 、 T_pT_s , 其中 R_pR_s 、 R_pT_p 、 R_sT_s 、 T_pT_s 的光程差为 2Δ , R_pT_s 的光程差为 4Δ , 通过调节光源模块中角锥 1 的光程 Δ 来匹配斐索干涉腔的长度,从而获取一对光程差为 0 的两只光,分别为 R_s 和 T_p (参考镜后表面反射的 s 光和测试镜前表面反射的 p 光)。由于系统采用的是短相干激光光源,只有光程差约为 0 的 R_s 和 T_p 才能干涉,其余光束组合均不发生干涉,有效地抑制了待测样品前后表面多次反射产生的寄生条纹的干扰,它们经薄膜分光镜反射进入偏振移相模块。

偏振移相模块中,移相器由 1/4 波片和微偏振

阵列组成,参考光和测试光经核心移相器件 1/4 波片后形成一对正交的左旋圆偏振光和右旋圆偏振光,偏振相机由微偏振阵列和 CCD 组成,微偏振阵列每相邻四个微偏振元构成一组移相单元。在偏振相机上采集得到一帧干涉图,在 CCD 靶面上干涉叠加的光强分布可以表示为:

$$I(\alpha_i) = \frac{1}{2} \{ I_{ts} + I_{tp} - 2\sqrt{I_{ts}I_{tp}} \sin[2k\delta_z - 2\alpha_i] \} + \frac{1}{2} (I_{tp} + I_{ts}) \quad (1)$$

式中: I_{ts} 、 I_{tp} 、 I_{ts} 、 I_{tp} 分别表示经参考镜后表面反射的 s 光、 p 光和经测试镜前表面反射的 s 光、 p 光光强; δ_z 表示待测面的面形偏差; α_i 为每组移相单元的偏振片透振方向,分别为 0° 、 45° 、 90° 、 135° ,对应的移相量分别为 0 、 $\pi/2$ 、 π 、 $3\pi/2$,根据微偏振元的分布规

律, 抽取出四幅位相依次相差 $\pi/2$ 的干涉图, 采用四步移相算法即可解算相位, 获取待测面的面形信息。

2 实验与结果

文中搭建了实验光路, 如图 2 所示, 其中图 2(a) 为该干涉仪的斐索干涉模块, 图 2(b) 为短相干光源模块和偏振移相模块, 系统光源采用中心波长为 638 nm、带宽为 0.1 nm 的二极管泵浦固体激光器, 其相干长度约为 4 mm, 经扩束后的有效光束直径为 100 mm, 参考镜选取口径 150 mm、峰谷值为 $\lambda/20$ 的标准平晶, 使用偏振相机采集图像。

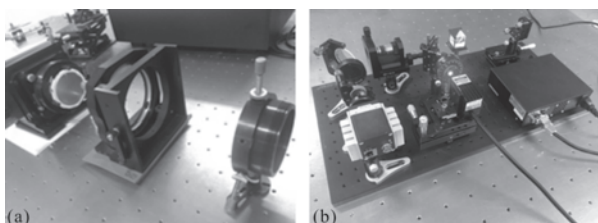


图 2 实验装置图

Fig.2 Experimental installation

利用该系统测量一个口径为 90 mm 的待测平面的面形偏差, 瞬时采集一幅光强图并按照微偏振元的分布规律抽取得到四幅同步移相干涉图, 如图 3(a) 所示, 对干涉图进行光强归一化处理, 根据四步移相算法解算相位, 如图 3(b) 所示。经过计算, 被测波面的均方根值(RMS)为 0.600λ , 波面的峰谷值(PV)为 2.164λ 。

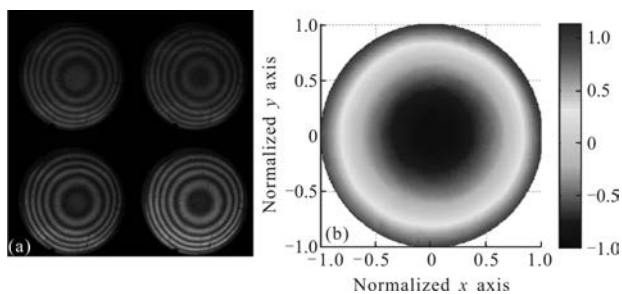


图 3 实验采集同步移相干涉图(a)和相位分布图(b)

Fig.3 Simultaneous phase shifting interferograms (a) and phase map (b)

为了验证该方法的有效性, 在相同实验条件下, 使用 Zygo 公司生产的 GPI XP 型干涉仪 (时间移相测量) 测量了这对参考镜与测试镜, 测量结果如图 4 所示, 得到均方根值为 0.624λ , 波面的峰谷值为 2.190λ , 两种方法得到的测量结果基本吻合, 验证了短相干动态斐索干涉仪的正确性。

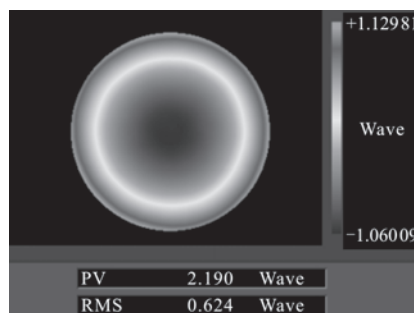


图 4 Zygo GPI XP 型干涉仪测试结果

Fig.4 Testing result with Zygo GPI XP

3 讨论

3.1 短相干光源特性参数分析

根据原理要求, 光源相干长度要小于干涉腔长的两倍。以往方案中采用 LED 作为短相干光源, 其优点是光谱为高斯分布, 而且只有一个包络, 但由于其相干长度过短, 大约在 μm 量级, 光程匹配比较困难, 而且发散角大, 光能利用率不高。半导体激光器相干长度较长, 为了满足短相干的要求, 需要采用电流调制的方法破坏其相干性。综合多方面的考虑, 该实验中选用二极管泵浦固体激光器(DPSSL)作为系统光源, 其相干长度较短能够有效抑制待测镜前后表面多次反射产生寄生条纹的干扰, 但又不至于过短难以调节到零光程差位置, 而且光能较为集中。

DPSSL 的中心波长和带宽与其注入电流有关, 用日本横河 AQ6370 光谱仪测量了 DPSSL 在不同注入电流下的波长和带宽。最小注入电流为 0.06 A 时开始出现光谱, 最大注入电流可达 0.19 A, 每增加 0.01 A 测量一个数据, 每个数据处测量五次取平均值。得到激光器的中心波长、带宽和注入电流关系如图 5 所示。从图 5 中可以看出, 激光器的中心波长随

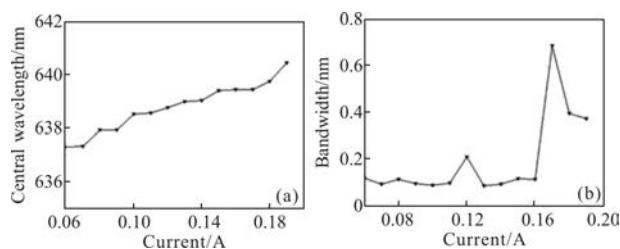


图 5 激光器中心波长和注入电流大小关系(a)和激光器带宽和注入电流大小关系(b)

Fig.5 Relationship between central wavelength and the injection current (a) and between bandwidth and injection current (b)

着注入电流增大也逐渐增大, 电流从 0.06 A 增大到 0.19 A, 中心波长相应地从 637.303 8 nm 增大到 640.463 2 nm。激光器的带宽在注入电流逐渐增大的过程中基本保持稳定, 除了电流值为 0.12 A 和超过 0.16 A 的粗大误差之外, 激光器的带宽基本稳定在 0.1 nm 上下波动。

为了研究激光器输出中心波长及带宽的稳定性, 选取注入电流为 0.13 A 时, 每隔 30 s 测量一组数据, 共采集 15 组数据, 得到的中心波长和带宽如图 6 所示。从图中可以看出, 激光器输出带宽的多次测量结果较为稳定, 激光器输出中心波长也比较稳定, 但随时间有略微变大的趋势。

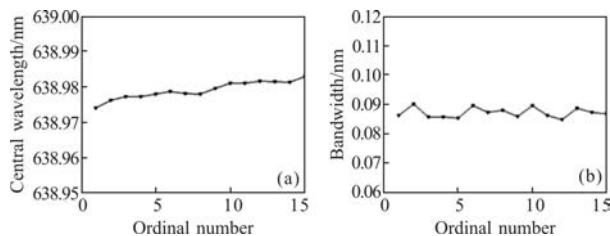


图 6 激光器中心波长稳定性(a)和激光器输出带宽稳定性(b)
Fig.6 Stability of central wavelength of laser (a) and bandwidth of laser (b)

实验中设置激光器注入电流为 0.13 A, 中心波长为 638.979 1 nm, 相干长度约为 4 mm, 已知待测面形的 PV 值在 μm 量级, 调整干涉腔长超过 4 mm 也很容易实现。此外, 从中心波长和带宽稳定性实验结果看来, 其中心波长与带宽随时间的波动幅度不大, 能够满足短相干动态斐索干涉仪的测量需求。

3.2 偏振器件误差矫正

在此主要讨论偏振移相模块中核心移相器件 1/4 波片的方位角误差对测量结果的影响, 理论上, 1/4 波片的快轴应与水平方向成 45°, 但在实验过程中存在调整误差, 在恢复波面时引入移相误差。参考光和测试光经过 1/4 波片和微偏振阵列后的光强表示为:

$$I(\alpha_i) = E_{rs}^2 \left[\cos^2 \alpha_i + \frac{1}{2} \sin 2\theta \sin 2(\alpha_i - \theta) \right] + E_{\phi}^2 \left[\sin^2 \alpha_i - \frac{1}{2} \sin 2\theta \sin 2(\alpha_i - \theta) \right] + E_{rs} E_{\phi} \{ \cos(-\varphi) \sin 2\alpha_i + \sin 2(\alpha_i - \theta) [\sin(-\varphi) - \cos(-\varphi) \cos 2\theta] \} \quad (2)$$

式中: α_i 为微偏振阵列中每组移相单元中的偏振片透振方向, 分别为 0°、45°、90°、135°; θ 为 1/4 波片的实际方位角; φ 为待测相位。可以得到四幅移相干涉

图的光强 I_1, I_2, I_3, I_4 。根据四步移相算法的位相求取公式 $\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{I_1 - I_3}{I_2 - I_4} \right)$ 可以推导得出:

$$\Delta\varphi = \left(\frac{\partial\varphi}{\partial I_1} \cdot \frac{\partial I_1}{\partial\theta} + \frac{\partial\varphi}{\partial I_2} \cdot \frac{\partial I_2}{\partial\theta} + \frac{\partial\varphi}{\partial I_3} \cdot \frac{\partial I_3}{\partial\theta} + \frac{\partial\varphi}{\partial I_4} \cdot \frac{\partial I_4}{\partial\theta} \right) \Delta\theta = \left[\frac{(I_{rs} - I_{\phi}) \sin\varphi}{\sqrt{I_{rs} I_{\phi}}} \right] \Delta\theta \quad (3)$$

式中: $\Delta\theta$ 为 1/4 波片的方位角误差; $\Delta\varphi$ 为待测相位误差。从该式可以看出, 参考光与测试光的光强直接影响波面测量误差。参考光与测试光光强一致时, 波面测量误差为零; 参考光与测试光光强不一致时, 波面测量误差与 1/4 波片方位角误差成线性关系。令 $I_{rs} = \beta I_{\phi}$, $\sin\varphi = 1$, 图 7 为 β 分别取 0.8、0.9、0.95 时波面测量误差最大值与 1/4 波片方位角误差之间的关系。

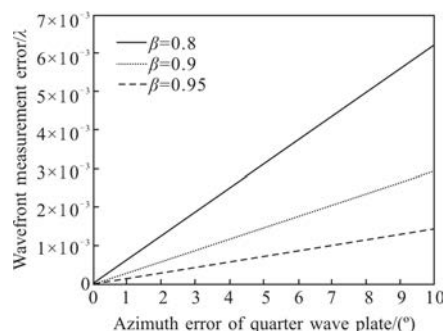


图 7 波面测量误差与 1/4 波片方位角误差之间的关系
Fig.7 Relationship between wavefront measurement error and azimuth error of quarter wave plate

从图中可以看出, 保证参考光与测试光的光强比值大于 0.8, 1/4 波片的方位角误差在 5° 之内时, 波面测量误差的最大值不超过 $\lambda/300$ 。

3.3 光强归一化算法

1/4 波片的方位角误差造成偏振相机采集得到的四幅移相干涉图的光强不一致, 在最终恢复波面中引入一倍条纹周期的波纹误差, 为了抑制该误差, 对四幅移相干涉图采用最小二乘法拟合, 得到每幅干涉图的背景和调制度, 进行光强归一化处理, 再用四步移相算法解算相位, 恢复待测面形。

为了显示光强归一化算法消除一倍频波纹误差的效果, 将离焦消去, 得到使用光强归一化算法前后的相位分布, 如图 8 所示。图 8(a) 为四步移相算法解算结果, 相位分布图中存在一倍条纹周期的波纹误差, 图 8(b) 对移相干涉图进行光强归一化处理, 按照移相算法解调得到的相位分布, 可以看出, 波纹误

差得到明显的抑制。

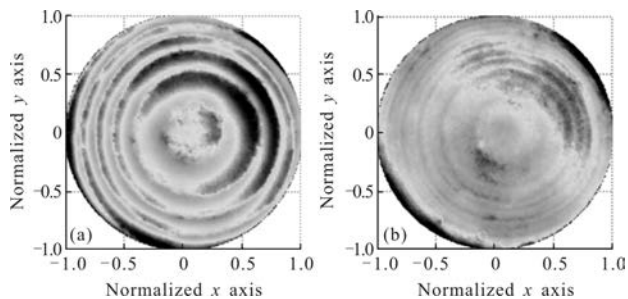


图 8 四步移相算法相位解调结果(a)和光强归一化算法相位解调结果(b)

Fig.8 Phase demodulation result derived by 4-bucket phase shifting algorithm (a) and phase demodulation result derived by optical intensity normalization algorithm (b)

3.4 干涉图对比度与光强比例的关系

进入偏振移相模块的有四束光，共有六种干涉组合，只有光程差小于光源相干长度的两只光才能发生干涉，其余光作为背景光叠加，影响干涉条纹的对比度，从而影响恢复波面的精度，干涉场某点附近干涉条纹的对比度由下式表示，假设参考面和测试面的反射率分别为 R_r 和 R_t ：

$$K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \frac{2\sqrt{I_s R_r \cdot I_p (1 - R_r)^2 R_t}}{(I_s + I_p)[R_r + (1 - R_r)^2 R_t]} \quad (4)$$

根据数学推导，当 $I_s = I_p$ 时，干涉图对比度取得极大值。在此干涉仪中，调整光源模块的 1/2 波片使得 p 光和 s 光的光强相同，此时干涉图对比度达到最好。假设 s 光光强是 p 光光强的 ρ 倍，即 $I_s = \rho I_p$ ，那么干涉条纹对比度可以由下式表示：

$$K = \frac{2\sqrt{\rho} \cdot \sqrt{R_r (1 - R_r)^2 R_t}}{(1 + \rho)[R_r + (1 - R_r)^2 R_t]} \quad (5)$$

式中： $\frac{2\sqrt{\rho}}{1 + \rho}$ 为调制因子，图 9 是调制因子与 s 光和

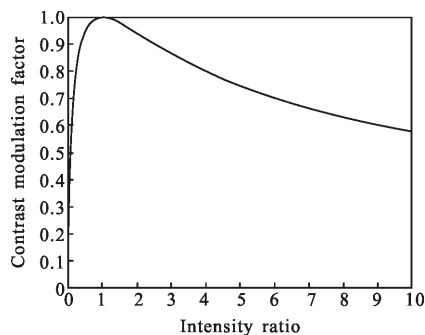


图 9 对比调制因子与光强比率之间的关系

Fig.9 Relationship between contrast modulation factor and intensity ratio

p 光光强比值 ρ 的关系曲线，从图中可以看出， $\rho=1$ 时，对比调制因子达到最大值为 1，光强比值 ρ 在 0.8~1.2 范围内都能够保证对比调制因子大于 0.99，可以看出，要获得较好对比度对光强比值 ρ 的要求不是很严格。转动 1/2 波片能够改变 p 光和 s 光的光强比值，从而改变干涉图的对比度，但并不引入移相误差。

4 结论

文中研究了一种采用短相干光源的动态斐索干涉仪，该干涉仪采用二极管泵浦固体激光器作为短相干光源，结合微偏振阵列位相掩模技术，实现对光学元件表面面形的动态测量。该方案不仅能够有效地抑制待测件前后表面多次反射寄生条纹的干扰，而且相比于之前的分光方案抑制了干涉图的位置配准误差，干涉仪的斐索共光路结构也减少了系统误差。理论分析了核心移相器件 1/4 波片的方位角误差引入的波面测量误差，分析表明波面误差对 1/4 波片快轴方位角的小幅误差并不敏感，保证参考光与测试光的光强比值大于 0.8，1/4 波片的方位角误差在 5° 之内，能够控制波面测量误差的最大值不超过 $\lambda/300$ 。针对移相干涉图光强不一致在波面中引入的一倍频相位误差，提出光强归一化算法处理移相干涉图，按照移相算法解算相位即可有效抑制一倍频波纹误差。通过搭建实验系统，对一块光学平晶的表面面形进行了测量，恢复待测面面形的形状以及面形指标与在 Zygo GPI XP 型干涉仪上测量结果基本一致，验证了该干涉仪对于光学元件面形高精度检测的有效性。

参考文献：

[1] Zhang Yu, Jin Chunshui, Ma Dongmei, et al. Key technology for fiber phase-shifting point diffraction interferometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 254-259. (in Chinese)
张宇, 金春水, 马冬梅, 等. 光纤相移点衍射干涉仪关键技术[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 254-259.

[2] Xu Chen, Chen Lei, Zuo Fen. Experiment on low-coherence polarization phase-shifting Fizeau interferometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S1): 26-29. (in Chinese)
徐晨, 陈磊, 左芬. 短相干光源偏振移相 Fizeau 干涉仪的实验研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(S1): 26-29.

- [3] Liu Bingcai, Li Bing, Tian Ailing, et al. Compensation and identification of noncommon path error in lateral shearing interferometry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2406–2410. (in Chinese)
刘丙才, 李兵, 田爱玲, 等. 横向剪切干涉中非共光路误差的识别与补偿 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(8): 2406–2410.
- [4] Zhao Weiqian, Li Wenyu, Zhao Qi, et al. Surface measurement by randomly phase shifting interferometry of measured element [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(9): 2167–2172. (in Chinese)
赵维谦, 李文宇, 赵齐, 等. 被测件随机移相干涉面形测量方法 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(9): 2167–2172.
- [5] Xia Zhilin, Zeng Xiang, Liu Shijie, et al. Filter calculation based on wavefront figures [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(12): 3033–3040. (in Chinese)
夏志林, 曾翔, 刘世杰, 等. 基于波面面形的滤波计算 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(12): 3033–3040.
- [6] Lv Qiang, Li Wenhao, Bayanheshig, et al. Interferometric precision displacement measurement system based on diffraction grating [J]. *Chinese Optics*, 2016, 10(1): 39–50. (in Chinese)
吕强, 李文昊, 巴亚贺希格, 等. 基于衍射光栅的干涉式精密位移测量系统 [J]. 中国光学, 2016, 10(1): 39–50.
- [7] Mu Zhiya, Ai Hua, Fan Xiaohe, et al. Inference fringe image registration using total least square method [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(6): 625–632. (in Chinese)
穆治亚, 艾华, 樊孝贺, 等. 采用整体最小二乘法的条纹图配准方法 [J]. 中国光学, 2016, 9(6): 625–632.
- [8] Koliopoulos C L. Simultaneous phase shift interferometer [C] //SPIE, 1991, 1513: 119–127.
- [9] 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.
- [10] Qian K, Wu X, Asundi A. Grating-based real-time polarization phase-shifting interferometry: error analysis [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(13): 2448.
- [11] Millerd J E, Brock N J. Methods and apparatus for splitting, imaging, and measuring wavefronts in interferometry: US, US6304330[P]. 2001–09–21.
- [12] Millerd J E, Brock N J, Hayes J B, et al. Pixelated phase-mask dynamic interferometer [C] //SPIE International Symposium on Optical Science and Technology, International Society for Optics and Photonics, 2004, 5531: 304–314.
- [13] Yoneyama S, Kikutaa H, Moriwaki K. Simultaneous observation of phase-stepped photoelastic fringes using a pixelated microretarder array [J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(8): 1678–1678.
- [14] Abdelsalam D G, Yao B, Gao P, et al. Single-shot parallel four-step phase shifting using on-axis Fizeau interferometry [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(20): 4891–4895.
- [15] Szwaykowski P, Castonguay R J, Bushroe F N. Simultaneous phase shifting module for use in interferometry: US, US7483145[P]. 2009–07–17.
- [16] Szwaykowski P, Bushroe F N, Castonguay R J. Interferometric system with reduced vibration sensitivity and related method: US, US 8004687 B2[P]. 2011–12–09.
- [17] 朱秋冬, 王姗姗. 可调扩展光源照明的同轴斐索型同步移相干涉仪: 中国, CN 101788263 A[P]. 2010–11–03.
- [18] Kimbrough B, Millerd J, Wyant J, et al. Low-coherence vibration insensitive Fizeau interferometer [C] //SPIE, 2006, 6292: 62920F.