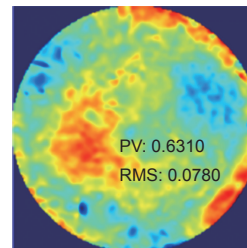


DOI: 10.12086/oe.2018.170536

大口径光学元件瞬态波前检测

孟 诗, 陈 磊*, 朱文华, 孙沁园, 张 瑞

南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094



摘要: 为瞬态测量大口径光学元件波前, 提出一种基于斜入射结构的近红外反射式错位点衍射干涉原理的 $\Phi 400$ mm 瞬态波前检测方法。该方案将待测光分成两束互相错位的参考光与测试光, 从而在干涉图中引入高线性载频, 采集到对比度良好的干涉图后, 利用傅里叶变换相位解调法从单幅干涉图中提取待测波前相位, 实现瞬态波前动态测量。实验光路总长近 20 m, 极易受气流的影响, 且由于气流干扰随时间变化, 该系统本身可以看作是大口径光学元件瞬态波前发生与检测装置。测试结果与 SID4 波前传感器比较, 波前均方根 (RMS) 小于 $1/50 \lambda$, 可知所提方法可以实现大口径瞬态波前的高分辨率与高精度检测。

关键词: 光学测量; 点衍射干涉仪; 大口径; 瞬态波前

中图分类号: TH74; O436.1

文献标志码: A

引用格式: 孟诗, 陈磊, 朱文华, 等. 大口径光学元件瞬态波前检测 [J]. 光电工程, 2018, 45 (1): 170536

Instantaneous wavefront measurement of large aperture optical elements

Meng Shi, Chen Lei*, Zhu Wenhua, Sun Qinyuan, Zhang Rui

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

Abstract: In order to measure the instantaneous wavefront of large aperture optical elements, a method based on the structure of oblique incidence of reflective shearing point diffraction interferometer is proposed. A lateral displacement between the reference wavefront and the test wavefront is formed after passing this structure. The shear of two beams introduces linear spatial carrier frequency to the point diffraction interferogram. After receiving a good contrast interferogram, wavefront phase is retrieved by Fourier transform (FT) automatically to realize the dynamic measurement of instantaneous wavefront. The optical path is up to 20 m, so the air current is a significance factor to the result. Besides, because of the air current, the system itself can be seen as a instantaneous wavefront happening and measurement of large aperture optical elements. The results indicate that the root mean square value is in accord with that acquired by SID4 wavefront sensor (less than $1/50\lambda$), so about the repeated accuracy. The method proposed can be applied in high resolution and accuracy measurement of instantaneous wavefront.

Keywords: optical measurement; point diffraction interferometer; large aperture; instantaneous wavefront

Citation: Meng S, Chen L, Zhu W H, et al. Instantaneous wavefront measurement of large aperture optical elements[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45 (1): 170536

收稿日期: 2017-10-10; 收到修改稿日期: 2017-12-16

基金项目: 国家自然科学基金 (U1231111); 江苏省自然科学基金 (BK2012802) 资助项目

作者简介: 孟诗 (1993-), 女, 硕士研究生, 主要研究工作是波前检测技术。E-mail: 470244873@qq.com

通信作者: 陈磊 (1964-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学动态干涉测试及光学测试仪器的研究。

E-mail: chenlei@mail.njust.edu.cn

1 引言

近年来,将点衍射干涉方法用于大口径瞬态波前检测已经成为波前检测的一项热门技术,尤其在天文光学、视光学以及惯性约束聚变(inertial confinement fusion, ICF)等领域^[1],由于点衍射干涉法具有精度高、结构简单、抗干扰能力强且测试精度不受参考平面影响等众多优点,在检测领域得到广泛的应用。目前主流的波前测量方法为夏克-哈特曼传感器法和干涉法,夏克-哈特曼传感器法是基于子孔径或者微透镜阵列在不同波前倾斜下的不同位置进行波前检测,适用于大动态范围内的测量,但子孔径拼接法拼接难度大,微透镜阵列法精度受制于加工水平,测得面型精度低于干涉法^[2-3]。干涉法波前检测主要分为横向剪切法和点衍射干涉法,剪切法提取干涉图中波前梯度,通过重建算法恢复待测波面,若要实现高精度以及高分辨率的要求,剪切干涉仪尺寸需很大且重建算法复杂^[4-5]。点衍射干涉法同样通过解调干涉图的方式恢复待测波面,不同于剪切法,点衍射干涉法精度不受参考面型制约,恢复的是波面本身而非波面梯度。21世纪以来,关于波前检测的研究发展迅速。2004年,Millerd等^[6]通过在点衍射干涉仪中加入微透镜阵列和偏振点衍射板获得四幅相移干涉图进而提出了一种瞬态波前检测方法。2006年,Neal和Wyant^[7]在文章中提出用于点衍射干涉系统的双折射针孔板,这也是一种利用偏振的方法就参考波面与待测波面分开的方法。2007年,北京理工大学刘克^[8]提出相移式点衍射干涉仪,通过光栅移

动来实现时间移相,2012年,杜永兆等^[9]构建了一种环形共光路的点衍射干涉系统,并利用傅里叶变换法解调待测波面相位信息。2013年,白福忠等^[10-11]根据马赫-曾德尔干涉法提出了适用于自适应光学领域的同步相移点衍射干涉法。2014年南京理工大学的李金鹏、陈磊等^[12]将其运用于大口径瞬态波前测量上。

本文提出了一种基于近红外反射式错位点衍射干涉原理的 $\Phi 400$ mm大口径瞬态波前检测方法,为了满足大口径瞬态波前检测高分辨率高精度的要求,利用反射错位的方法使参考球面波与测试球面波产生横向错位,从而在干涉图中引入高线性载频,所得干涉图利用傅里叶变换相位解调法^[13-15],直接从中恢复波前分布,实现瞬态波前的动态测量。

2 理论推导

反射式错位点衍射干涉仪的波前检测原理如图1所示。

待测波前与点衍射板成 θ 角入射到其前表面狭缝上,一部分光被直接反射作为待测光,另一部分光透过狭缝经后表面镀增反膜的部分反射至前表面针孔处,经针孔衍射产生理想球面波作为参考光,两束光在CCD靶面处形成干涉,成像透镜对出瞳位置成像。由于两束光波在横向上的错位,从而引入了高线性载频。调整入射角 θ 在干涉图中引入尽可能接近于奈奎斯特频率而不高于其线性载频。

如图1所示, O' 、 P' 分别是 O 和针孔的共轭点,

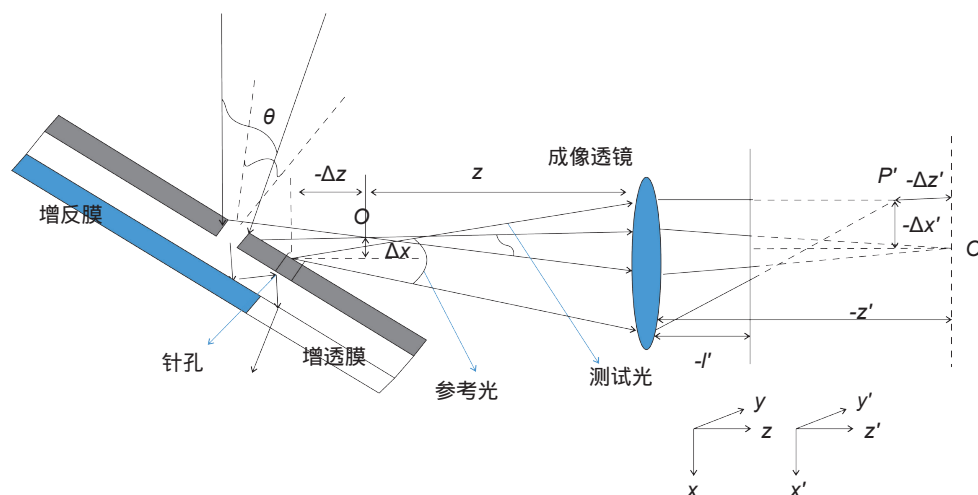


图1 反射式错位点衍射干涉仪原理图

Fig. 1 Principle of the near infrared reflective shearing point diffraction interferometry

以 O' 点为坐标原点建立坐标系, 将待测波前记作 CCD 靶面处的波前表达式记为 $W_A(x, y)$, 则待测光的复振幅:

$$U_T(x', y') = \frac{t_1 A}{l' - z'} \times \exp\{ik[r_T(x', y') + W_A(x', y')]\} \quad (1)$$

式中: t_1 是狭缝所镀薄膜的折射率, A 是入射波面的振幅, l' 是成像透镜到 CCD 靶面的距离, $-z'$ 是成像镜头到共轭点 O' 的距离, $k=2\pi/\lambda$, λ 是入射光波长, $r_T(x', y')$ 是待测波面在 CCD 靶面内 (x', y') 处的曲率半径:

$$r_T(x', y') = l' - z' - \frac{x'^2 + y'^2}{2(l' - z')} + \frac{(x'^2 + y'^2)^2}{8(l' - z')^3} \quad (2)$$

同样, 参考光的复振幅可表示为

$$U_R(x', y') = \frac{t_2 A}{l' - z' + \Delta z'} \exp[ikr_R(x', y')] \quad (3)$$

式中: t_2 是针孔的衍射能量, $r_R(x', y')$ 是参考波前的曲率半径:

$$r_R(x', y') = l' - z' + \Delta z' + \frac{(x', \Delta x')^2 + y'^2}{2(l' - z' + \Delta z')} - \frac{[(x' + \Delta x')^2] + y'^2}{8(l' - z' + \Delta z')^3} \quad (4)$$

式中: $\Delta x'$ 和 $\Delta z'$ 是参考波前和待测波前在成像区域的横向和径向剪切量。

经推导, 横向和径向剪切量可表示为

$$\Delta x = 2h \cos \theta \tan[\arcsin(\frac{\sin \theta}{n})] \quad (5)$$

$$\Delta z = \frac{\Delta x}{\tan \theta} \quad (6)$$

测试波前与参考波前叠加形成的干涉图光强分布:

$$I(x_n, y_n) \approx \frac{A^2}{(l' - z')^2} \times \{t_1^2 + t_2^2 + 2t_1 t_2 \cos[ik(W_A + W_S)]\} \quad (7)$$

利用几何光学推导可得:

$$W_S = C + \frac{\Delta x}{2F} x_n - \frac{\Delta z}{8F^2} (x_n^2 + y_n^2) - \frac{\Delta x^2}{16(l' - z\beta)F^2} (3x_n^2 + y_n^2) - \frac{\Delta x}{16\beta^2 F^3} x_n (x_n^2 + y_n^2) + \frac{3\Delta z}{128\beta^2 F^4} (x_n^2 + y_n^2)^2 \quad (8)$$

式中: F 为测试光 F 数, C 为常数项, (x_n, y_n) 为归一化坐标, x 方向上的倾斜系数可表示为 $\Delta x/2F$, 所引入的载频数可表示为

$$f = \frac{\Delta x}{\lambda F} \quad (9)$$

由式 (5) 和式 (9) 可知, 调节入射角的大小可以实现引入载频数的变化。波面轴向错位引入的离焦系数可以在干涉图处理时去除, 则光强分布可以简化为下式:

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi f x + k(W_A - W_S)] \quad (10)$$

本文中对于 W_A 的求解是利用傅里叶变换相位解调法^[13-14]处理单幅干涉图恢复待测波前。

3 实验结果

根据图 2(a) 光路搭建测试光路如图 2(b) 所示。

工作波长 1313 nm 的近红外光纤光源作为点光源通过空间滤波器产生标准球面波, 经扩束后透过分束器入射到直径 400 mm, F 数 10 的离轴抛物镜上, 离轴抛物镜实现会聚波面与准直波面的转换, 准直光束入射到反射平面镜后反射回到离轴抛物镜再次转换为

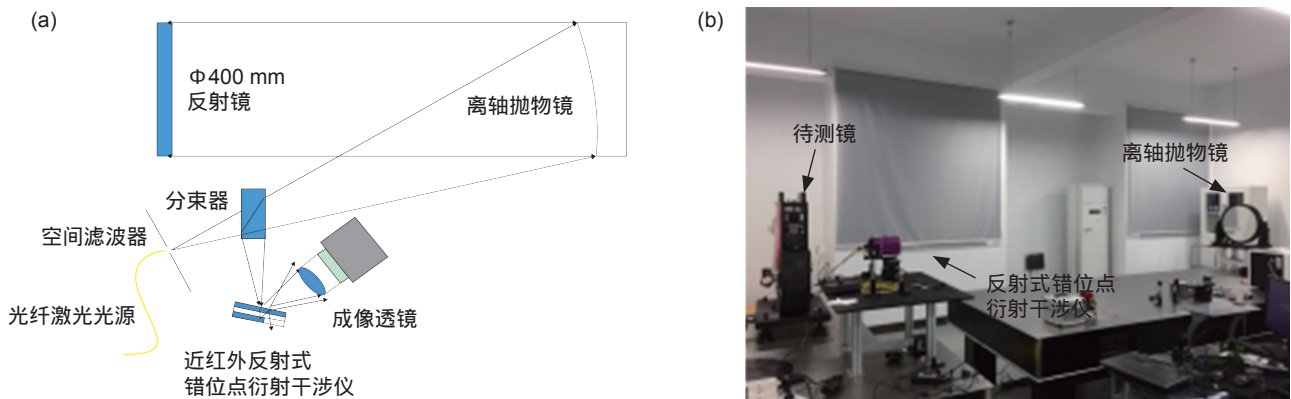


图 2 光路示意图。(a) 测试光路图; (b) 实际搭建光路图
Fig. 2 Optical path diagram. (a) The testing optical path; (b) The optical path in reality

会聚光束,形成的待测光束经分光镜反射进入干涉仪中,一部分在狭缝处直接反射形成待测波面,另一部进入针孔后衍射形成标准球面波作为参考波前,与待测波前进行干涉,形成的线性载频干涉图经成像透镜被 CCD 采集。实验光路总长近 20 m,极易受气流的影响,且由于气流干扰随时间变化,该系统本身可以看作是大口径光学元件瞬态波前发生与检测装置。

CCD 采集到的一帧线性干涉图,如图 3 所示。

测量实验在室温、湿度较恒定的情况下在每天早、中、晚进行多次测量,持续了近一个月的重复性实验,得到大量波面测试数据结果,将所测数据总结成表,表 1 为某一天内一次测量所得的 30 组瞬态波面的数据信息——峰谷值 (peak-valley value, PV) 和均方根值 (root-mean-square, RMS)。

将 30 天中每天所得 90 组测试数据均值用折线图表示,如图 4(a)、图 4(b) 测试实验重复精度很高,

偶尔受路过车辆导致的震动以及人员走动测量数据产生些许变化。图中每个点的值为该天所有所测结果的均值。

为验证检测方案的正确性,采用 SID-4 所测得到的检测结果作为比对基准。为减小气流对测量结果所产生的影响,取 50 次结果的平均值作为测量所得面形结果。SID-4 测量面形结果如图 5(a) 所示, PV 值为 0.573λ , RMS 值为 0.800λ , 两者波面相减结果如图 5(b) 所示,经 Zernike 拟合后,可得, PV 值为 0.011λ , RMS 值为 0.003λ 。由此可知,所提方法与 SID-4 测量结果面形轮廓与面形数据基本一致。

4 讨论

4.1 针孔尺寸对误差的影响

本系统光路简单,系统误差主要来源于针孔尺

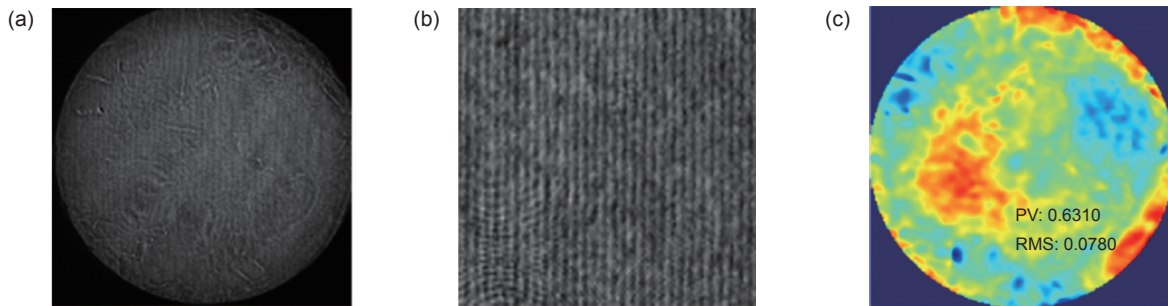


图 3 (a) CCD 采集到的干涉图; (b) CCD 采集到的干涉图区域放大; (c) 恢复得到的面形
Fig. 3 (a) Interferogram collected by CCD; (b) A small piece of area after being amplified; (c) Wavefront recovered

表 1 室温 15°C、湿度 50% 情况下某次恢复的 30 组波面数据
Table 1 Wavefront information of 30 cases recovered at 15°C and 50% humidity

序号	PV/ λ	RMS/ λ	序号	PV/ λ	RMS/ λ	序号	PV/ λ	RMS/ λ
1	0.616	0.079	11	0.654	0.079	21	0.577	0.087
2	0.689	0.079	12	0.596	0.080	22	0.654	0.079
3	0.641	0.080	13	0.581	0.081	23	0.662	0.078
4	0.609	0.079	14	0.594	0.081	24	0.673	0.079
5	0.631	0.079	15	0.608	0.081	25	0.676	0.078
6	0.642	0.078	16	0.615	0.081	26	0.660	0.077
7	0.607	0.079	17	0.573	0.084	27	0.661	0.077
8	0.599	0.078	18	0.630	0.084	28	0.624	0.074
9	0.644	0.079	19	0.606	0.085	29	0.559	0.083
10	0.573	0.080	20	0.594	0.086	30	0.567	0.082

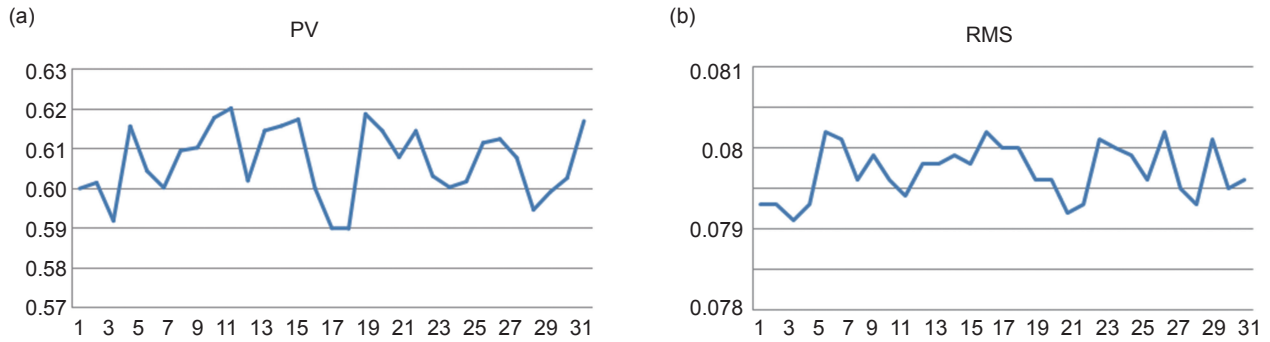


图4 (a) 恢复面形峰谷值 (PV) 分布; (b) 恢复面形均方根值 (RMS) 分布

Fig. 4 Distributions of PV (a) and RMS (b)

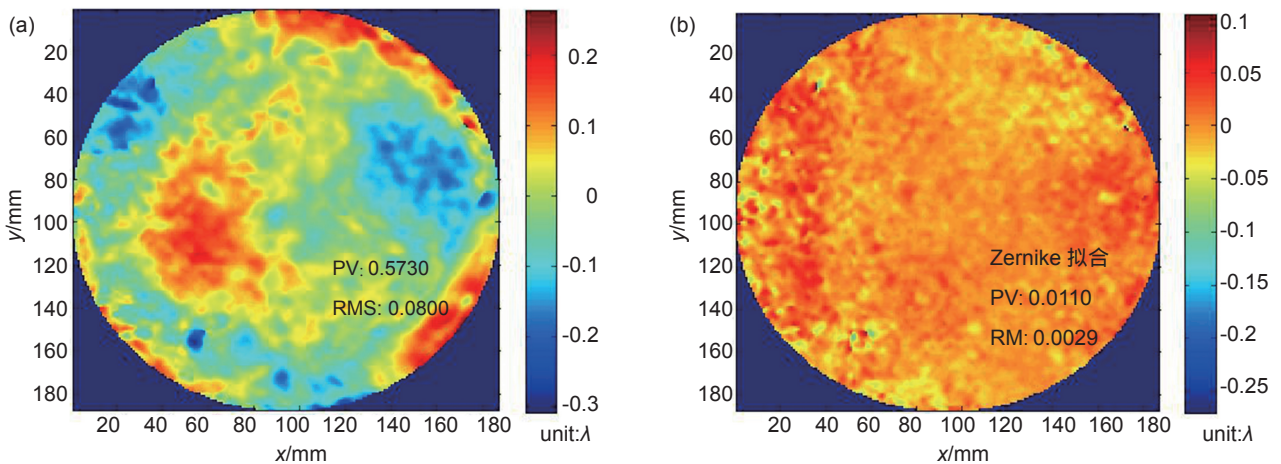


图5 (a) SID-4 恢复得到的面形; (b)SID-4 测量面形与图 3(c) 面形差值

Fig. 5 (a) Wavefront recovered by SID-4; (b) D-value of SID-4 wavefront and Fig. 3(c)

寸大小以及圆度所带来的误差。一方面针孔必须足够小以满足针孔衍射产生的参考波前为标准球面波; 另一方面, 针孔如果太小会对光路的对准带来困难。研究表明, 小孔直径小于光学系统衍射得到的艾里斑直径的一半时, 出射的球面波质量符合作为参考光的要求。本系统中, 艾里斑直径为 $32 \mu\text{m}$, 所以选择小孔直径为 $16 \mu\text{m}$, 符合实验要求。另外, 针孔设计成椭圆形以达到在光轴与衍射板成 45° 斜入射放置的情况下, 针孔与光轴垂直面的投影为圆形, 从而保证参考波前质量。

4.2 干涉载频和条纹对比度对误差的影响

在傅里叶相位解调算法中, 载频是影响精度的重要因素, 研究指出干涉图的条纹数越多, 获得细节的分辨能力就越高, 相位解调结果与移相算法越一致。根据式 (5)、式 (9) 可以看出改变横向位移, 调整入射角可以实现载频数的调节, 减小对测量误差的影响。

根据条纹对比度公式 $K = 2ab / (a^2 + b^2)$ 可知, 该

系统的条纹对比度是可调的, 因为式 (1) 根据菲涅尔理论, 不同偏振方向的光经分光膜的反射率不同, 因此半波片可以改变带测光 a 的光强大小。式 (2) 表示小孔衍射产生的标准球面波光强由针孔直径决定, 前表面狭缝对光线的遮挡也会对参考光的光强产生影响, 所以不同点衍射板的光强 b 是不同的。调整 a 的大小改变条纹对比度对误差的影响。

5 结 论

本文提出一种基于近红外反射式错位点衍射干涉原理的大口径瞬态波前检测方法, 通过一个月的实验验证其重复性, RMS 值相差仅接近 $1/50\lambda$, 可以看出其重复精度较高。经实验验证恢复所得待测波前 PV 与 RMS 值与 SID4 传感器所得结果基本一致, 可知, 结果精度较高, 满足大口径光学元件波前高分辨率、高精度的要求以及自动化测量的可行性。但由于该测量系统为长腔系统, 不可避免, 受气流和平台振动的

影响较大, 实验对环境要求较高。

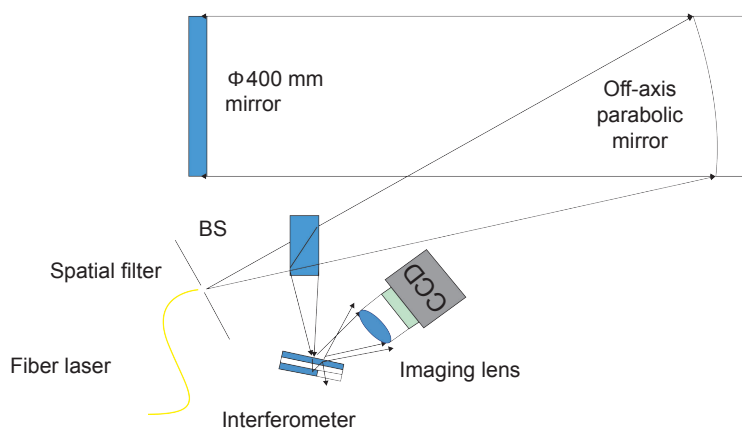
参考文献

- [1] Malacara D. *Optical Shop Testing*[M]. Hoboken, N.J: Wiley, 2007.
- [2] Hernandez-Gomez C, Collier J L, Hawkes S J, *et al.* Wave-front control of a large-aperture laser system by use of a static phase corrector[J]. *Applied Optics*, 2000, **39**(12): 1954–1961.
- [3] Zhang J P, Zhang X J, Zhang Z Y, *et al.* Test of rotationally symmetric aspheric surface using Shack-Hartmann wavefront sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(3): 492–498.
张金平, 张学军, 张忠玉, 等. Shack-Hartmann 波前传感器检测大口径圆对称非球面反射镜[J]. 光学精密工程, 2012, **20**(3): 492–498.
- [4] He X, Ma J. Design of common path radial shearing interferometer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(9): 2029–2035.
何煦, 马军. 共光路径向剪切干涉仪的设计[J]. 光学精密工程, 2011, **19**(9): 2029–2035.
- [5] Ling T, Liu D, Yang Y Y, *et al.* Off-axis cyclic radial shearing interferometer for measurement of centrally blocked transient wavefront[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(14): 2493–2495.
- [6] Millerd J E, Martnek S J, Brock J N, *et al.* Instantaneous phase-shift point-diffraction interferometer[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, **5380**: 422–429.
- [7] Neal M R, Wyant C J. Polarization phase-shifting point-diffraction interferometer[J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(15): 3463–3476.
- [8] Liu J F, Li Y Q, Liu K. Technical problems in phase-shifting point diffraction interferometer[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, **28**(4): 179–182.
刘景峰, 李艳秋, 刘克. 移相式点衍射干涉仪的几个关键技术[J]. 仪器仪表学报, 2007, **28**(4): 179–182.
- [9] Du Y Z, Feng G Y, Li H R, *et al.* Circular common-path point diffraction interferometer[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(19): 3927–3929.
- [10] Wu Y Q. Cyclic common-path point-diffraction interferometer based on Fourier-transform method[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2014.
吴亚琴. 基于傅里叶变换法的环形共光路点衍射干涉仪[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2014.
- [11] Wu Y Q, Bai F Z, Liu Z, *et al.* Circular common-path point-diffraction interferometer[J]. *Optical Technique*, 2014, **40**(5): 421–424.
吴亚琴, 白福忠, 刘珍, 等. 环形共光路点衍射干涉仪[J]. 光学技术, 2014, **40**(5): 421–424.
- [12] Li J P, Chen L, Wan J, *et al.* Evaluation of $\Phi 400$ mm instantaneous wavefront using grating point diffraction interferometry[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(6): 1538–1546.
李金鹏, 陈磊, 万骏, 等. 光栅点衍射干涉法检测 $\Phi 400$ mm 瞬态波前[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(6): 1538–1546.
- [13] Lu Z X, Jin C S, Ma D M, *et al.* Analysis of effect of tiny pinhole deviation on far-field wave-front quality[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0812002.
卢增雄, 金春水, 马冬梅, 等. 微小孔偏差对远场波前质量影响分析[J]. 光学学报, 2011, **31**(8): 0812002.
- [14] Takeda M, Ina H, Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1982, **72**(1): 156–160.
- [15] Roddier C, Roddier F. Interferogram analysis using Fourier transform techniques[J]. *Applied Optics*, 1987, **26**(9): 1668–1673.

Instantaneous wavefront measurement of large aperture optical elements

Meng Shi, Chen Lei*, Zhu Wenhua, Sun Qinyuan, Zhang Rui

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



The testing optical path

Overview: In order to measure the instantaneous wavefront of large aperture optical elements, a method based on the structure of oblique incidence of reflective shearing point diffraction interferometer is proposed. In the measurement, the near infrared fiber laser, which operates at 1313 nm wavelength, works as a light source. The light beam transmits through the spatial filter to generate a standard spherical wavefront. The standard spherical wavefront passes through the beam splitter and then it reaches the off-axis parabolic mirror whose diameter is 400 mm and F number is 10. The off-axis parabolic mirror realizes the transformation between the convergent wavefront and the collimation wavefront. The collimated wavefront reaches back to the off-axis mirror after being reflected by the mirror under test. The wavefront to be measured is splitted into two parts. One part is reflected directly from the slit and forms the wavefront to be measured, the other part transmits through the slit and is diffracted by the pinhole to get a standard spherical wavefront works as the reference wavefront. These two kinds of wavefront form interference fringe at the target surface of the CCD and the imaging lens images the location of the exit pupil. Because of the transverse dislocation of the two beams of light, high linear carrier frequency of the interferogram is introduced. The frequency of the linear carrier is set, by adjusting the incidence angle θ , near the Nyquist frequency as close as possible. After receiving a good contrast interferogram, wavefront phase is retrieved by Fourier transform (FT) automatically to realize the dynamic measurement of instantaneous wavefront. On the basis of scalar diffraction theory and Fourier optics theory, a theoretical model of instantaneous wavefront was established and formula of linear carrier was derived. Furthermore, to study the effect which the lateral and axial defocus of pinhole have on diffraction intensity and reference wavefront quality, a mathematical model of convergent beam diffraction by a pinhole is established based on Fresnel diffraction theory. F number of the converging beam, diameter of the pinhole and so on are also taken into account. The optical path is up to 20 m, due to the long cavity of the optical path, the air current is a significance factor to the result. Besides, because of the air current, the system itself can be seen as a instantaneous wavefront happening and measurement of large aperture optical elements. The results indicate that the root mean square value is in accord with that acquired by SID4 wavefront sensor (less than $1/50\lambda$), so about the repeated accuracy. The testing method proposed can be applied in high resolution and accuracy measurement of instantaneous wavefront

Citation: Meng S, Chen L, Zhu W H, *et al.* Instantaneous wavefront measurement of large aperture optical elements [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45** (1): 170536.

Supported by National Natural Science Foundation of China (U1231111) and National Natural Science Foundation of Jiangsu (BK2012802)

*E-mail: chenlei@mail.njust.edu.cn