

文章编号 1004-924X(2014)10-2639-06

极小孔径衍射波前测试分析

邵晶^{1,2}, 马冬梅^{1*}, 张海涛¹, 于杰¹, 周烽¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 研制点衍射干涉仪时, 小孔的形貌和装调误差会对衍射波前质量产生影响, 故本文研究了采用相位复原对小孔衍射波前质量进行测评的方法。设计并搭建了衍射波前测试装置, 对光纤衍射波前进行了测评实验。为了验证测试方法的有效性, 分别对采集的衍射图像与重构的衍射图像, 以及测试获得的振幅分布与理论计算获得的振幅分布进行了对比。结果显示, 采集图像与重构图像之间的差异为 0.32%, 验证了采用相位复原技术进行衍射波前测试方法的有效性。同时, 对干涉方法测量与相位复原结果进行了对比, 二者差异仅为 0.001 4λ RMS。

关键词: 光学检测; 点衍射干涉仪; 相位复原; 衍射波前

中图分类号: O436.1; TH744.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142210.2639

Evaluation of wavefront diffracted from ultra small aperture

SHAO Jing^{1,2}, MA Dong-mei^{1*}, ZHANG Hai-tao¹, YU Jie¹, ZHOU Feng¹

(1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: dongmei_ma2013@163.com

Abstract: As the morphology of an ultra small aperture and the assembling error will affect the quality of wavefront diffraction in development of a point diffraction interferometer, this paper explores an evaluating method for wavefront diffracted quality from the ultra small aperture based on the phase retrieval. The testing equipments for wavefront diffraction was designed and the evaluating testing experiment for the wavefront diffraction were performed. To verify the effectiveness of the method based on the phase retrieval, the captured and reconstructed images were compared, and the obtained amplitudes with the theoretical calculation and experimental test were also analyzed. The results show that the difference between captured images and reconstructed images is only 0.32%, which verifies that the proposed method is feasibility. Moreover, the interferometric measurement result was compared with that of the phase retrieval proposed in this paper, and the results show that the difference is only 0.001 4λ RMS(Root Mean Square).

Key words: optical testing; point diffraction interferometer; phase retrieval; diffractive wavefront

收稿日期: 2013-06-13; 修订日期: 2013-08-13.

基金项目: 国家重大科技专项资助项目

1 引 言

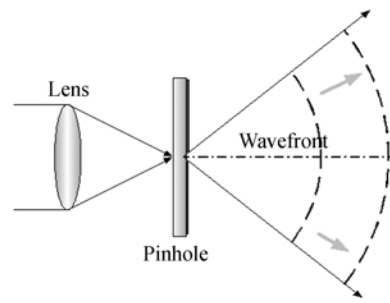
点衍射干涉仪是一种测量精度极高的光学检测设备。它采用极小孔径衍射作为测试基准波前^[1],可为高精密切影物镜的研制提供技术支持^[2-4]。极高质量球面衍射基准波前是点衍射干涉仪实现高精度测量的重要前提,因此对它进行测评是点衍射干涉仪研制过程的重要环节之一。2007年,Toshiaki等人利用移相的方式完成了双光纤之间的剪切干涉测量,用以测评光纤点衍射干涉仪的测量精度^[5]。由于无法保证两根光纤严格相同,这种测量方式难以准确地分析误差源。因此,需要一种直接测评衍射波前质量的方法,为点衍射干涉仪的研制提供技术保障^[6-8]。

相位复原技术能够通过直接采集星点图像分析光学波前的状态,不需要额外的参考光束。该技术可以用于测评点衍射干涉仪的基准波前,但是传统的相位复原技术的精度难以满足高精度测量的要求。2006年,荷兰 PHILIPS 公司采用基于扩展奈波尔-泽尼克理论的相位复原方法对一光刻系统的进行了测试,测试精度达到了 1.14 nm^[9]。由于极小孔径衍射图样与衍射基准波前之间存在一定的数学关系^[10-11],本文对用这种高精度相位复原方法测试点衍射干涉仪的基准波前进行了实验研究,设计并搭建了衍射波前测试装置,证明了该测试方法的有效性。

2 衍射波前测试原理

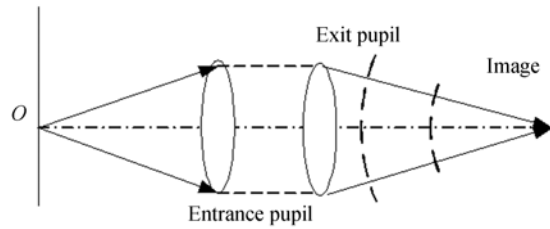
图 1 为小孔衍射和光学系统的模型。光学系统的模型为:由物点发出理想球面波,在像方得到一个被出瞳所限制的球面波。小孔衍射产生球面波前与光学系统有着相似之处。因此小孔衍射图像可以表述为光学系统点扩散函数的形式。本文通过采集小孔衍射图像,采用相位复原技术对衍射波前进行了相位提取分析。

小孔衍射的数学模型可以看作一个光学系统,衍射波前等于光学系统的光瞳波前,将光瞳函



(a) 小孔衍射模型

(a) Model of diffraction from a pinhole



(b) 光学系统模型

(b) Model of optical system

图 1 小孔衍射与光学系统之间的对比

Fig. 1 Comparison between diffraction from a pin-hole and optical system

数展开为泽尼克多项式的线性组合,得到:

$$P(u, v) = A \exp[i\phi(x, y)] = \sum \beta_n^m Z_n^m(u, v) = \sum \beta_n^m R_n^m(\rho) \cos(m\varphi), \quad (1)$$

其中: A 为光瞳振幅分布, $\phi(x, y)$ 为光瞳位相, Z_n^m 为泽尼克多项式, β_n^m 为复数泽尼克系数。得到点扩散函数的光强表达式为:

$$I = 4\beta_0^0 |V_0^0|^2 + 8 \sum_{n,m} \beta_0^0 \text{Re}(\beta_n^m) \text{Re}[i^m V_n^m V_0^{0*}] \cos(m\varphi) - 8 \sum_{n,m} \beta_0^0 \text{Im}(\beta_n^m) \text{Im}[i^m V_n^m V_0^{0*}] \cos(m\varphi) + C(x, y), \quad (2)$$

式中: Re 代表取实部, Im 代表取虚部;“ $'$ ”代表 $n = m = 0$ 项已被删除; V_n^m 为扩展奈波尔-泽尼克多项式,其表达式在文献[11-12]中有详细描述; $C(x, y)$ 为交叉项,其表达式为:

$$C(x, y) = 4 \sum_{n_1, m_1; n_2, m_2} \{ \text{Re}[\beta_{n_1}^{m_1} \beta_{n_2}^{m_2*} i^{m_1 - m_2} V_{n_1}^{m_1} V_{n_2}^{m_2*}] \times \cos(m_1 \varphi) \cos(m_2 \varphi) \}. \quad (3)$$

如果忽略交叉项的影响,对采样光强进行余弦变换得到:

$$I_d^m = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I(r, \varphi; f) \cos(m\varphi) d\varphi \approx \begin{cases} \frac{1}{2} (\beta_0^0)^2 \chi_0^0 + \sum_n \beta_0^0 \text{Re}(\beta_n^0) \chi_n^0 + \sum_n \beta_0^0 \text{Im}(\beta_n^0) \Psi_n^0, & m = 0 \\ \sum_n \beta_0^0 \text{Re}(\beta_n^m) \chi_n^m + \sum_n \beta_0^0 \text{Im}(\beta_n^m) \Psi_n^m, & m > 0 \end{cases}, \quad (4)$$

其中:

$$\chi_n^m = 8\epsilon_m \text{Re}[i^m V_n^m(r, f) V_0^{0*}(r, f)], \quad (5)$$

$$\Psi_n^m = -8\epsilon_m \text{Im}[i^m V_n^m(r, f) V_0^{0*}(r, f)]. \quad (6)$$

当 $m=0$ 时, $\epsilon_m=1$; 当 $m \neq 0$ 时, $\epsilon_m=0.5$ 。

综上可知,式(4)已被表示为 Zernike 系数乘以基函数 χ_n^m 和 Ψ_n^m 的形式。

定义内积如下:

$$(A, B) = \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty A(r, f) B(r, f)^* r dr df. \quad (7)$$

用式(4)与基函数进行内积运算,假设 β_n^m 为实数,求解方程组就能得到系数 β_n^m 。将系数 β_n^m 带入式(1),提取相位和振幅便能获得衍射波前信息。

为了采集内积运算所需的信息,本文设计了衍射波前的测试装置,装置结构如图 2 所示。小孔衍射图样通过光学放大系统成像到 CCD 相机上,光学放大系统与 CCD 相机组成光学采集系统。通过精密轴向调整机构,以焦面为中心等间隔对称采集离焦衍射图像,从而获取图像信息完成运算。

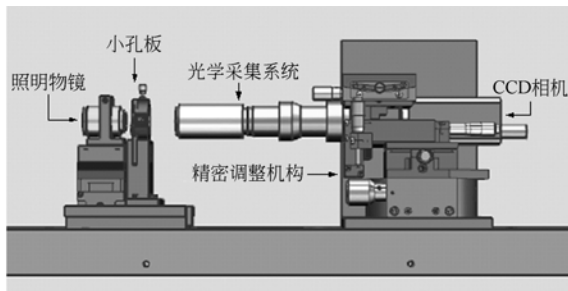


图 2 小孔衍射波前测试示意图

Fig. 2 Schematic of system for testing diffraction wavefront from a pinhole

3 测试实验

本文对一直径为 $\phi=3.5 \text{ m}$ 的光纤进行了相关测试。测试中,为了防止光纤边缘杂光进入光学采集系统影响测试结果,进入采集系统的衍射光束的数值孔径(NA)应满足: $\text{NA} < 0.5\lambda/\phi$ 。

图 3 为测试装置。激光($\lambda=532 \text{ nm}$)经过物镜被耦合进光纤后在光纤中传播,最后在光纤末端发生衍射。衍射图像被光学放大系统成像到 CCD 相机上,光学放大系统和 CCD 相机被安装在精密导轨上。通过前后移动光学放大系统和 CCD 相机组成的光学采集系统,就可以采集多幅

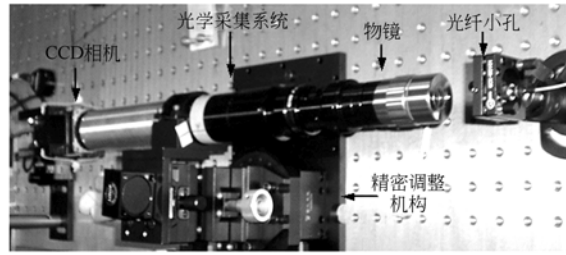


图 3 衍射波前测试装置图

Fig. 3 Device for diffracted wavefront testing

光纤衍射光束的离焦图像。本实验中光学放大系统的放大倍率为 $47\times$, CCD 相机为 BASLER 相机,像元尺寸为 $3.45 \mu\text{m}$,信噪比为 38 dB ,模数转换位数为 10 bit 。光学采集系统的离焦采样在 $-200 \sim 200 \mu\text{m}$ 。为了降低光学采集系统波像差对测试结果的影响,选取测试数值孔径 $\text{NA} = 0.056$ 。采集得到的离焦衍射图像如图 4 所示。

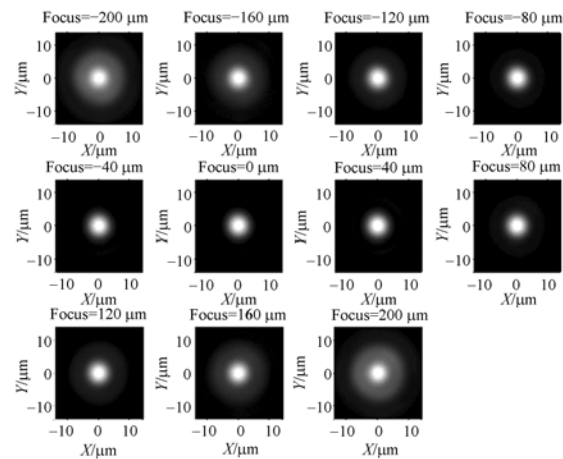


图 4 采集得到的星点图样

Fig. 4 Star images obtained in experiment

为了验证测试结果的正确性,根据已获得的测试结果重构衍射星点图像,将重构图像与采集星点图像进行比对,如图 5 所示(彩图见期刊电子版)。对不同离焦位置的衍射图像的灰度值都进行了归一化处理,比对二者的轮廓图(蓝色实线为采集图像,黑色虚线为重构图像)更容易发现二者的差异。经过比对发现,二者一致。定义测试结果重构星点图像与采集星点图像之间的差异值为:

$$E_p = \sum |\sqrt{I_m} - \sqrt{I}|^2 / \sum I_m, \quad (8)$$

其中: I_m 为复原的星点图像, I 为采集的星点图像。由式(8)可得,上述实验中重构星点图像与采

集星点图像之间的差异为 0.32%。

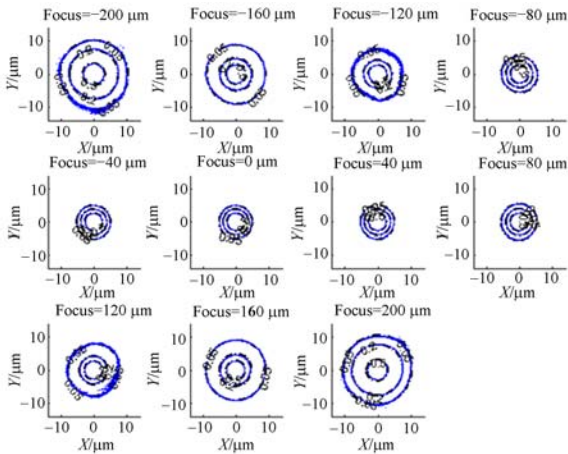


图 5 采集的星点图像与重构的星点图像之间的对比
Fig. 5 Comparison between captured images and reconstructed images

采用相位提取算法分析采集到的星点图像, 获得相关波前信息。去除倾斜和离焦量, 得到波前均方根值为 0.006 13λ, 如图 6 所示。

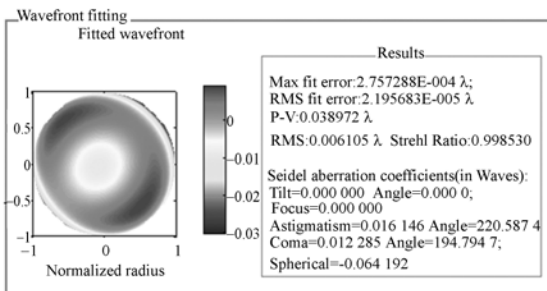
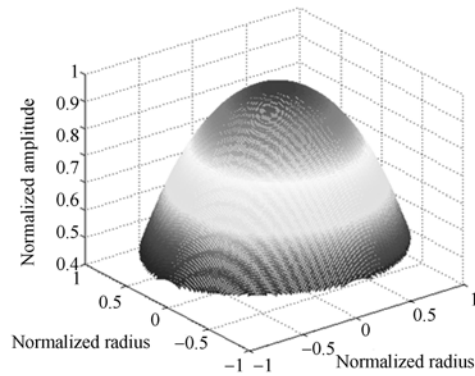


图 6 计算得到的波前信息
Fig. 6 Wavefront calculated by analysis software

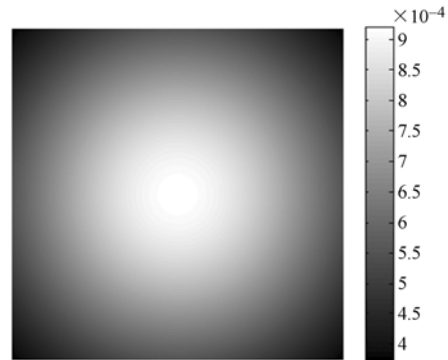
同时, 获得了光纤衍射振幅分布, 如图 7(a) 所示。与理论计算获得的衍射远场振幅分布(图 7(b))进行对比, 二者一致。

实验获得的测试结果分为两部分: 一部分为光纤衍射波前信息, 另一部分为光学放大系统的波前信息。采用标量衍射计算方法分析直径为 3.5 μm 光纤的衍射波前, 衍射波前与理想球面偏差小于 10⁻⁸ λ。因此, 相位提取的波前信息主要来源于测试装置中的光学放大系统。

为了获得光学放大系统的波前信息, 采用高精度 ZYGO 菲索干涉仪进行测试。其中, 标准参考镜 (F# 为 3.3) 参考面的面形精度 PV = 15 nm。光束进入光学放大系统出射, 利用面形精度



(a) 测试获得振幅分布
(a) Distribution of calculated amplitudes



(b) 理论计算获得的衍射远场振幅分布
(b) Theoretical amplitudes calculated with numerical method

图 7 测试获得衍射振幅分布与理论计算值的对比
Fig. 7 Comparison between calculated and theoretical amplitudes

为 31 nm PV 的球面反射镜 (F# 为 0.68) 反射测试光束, 对光学放大系统进行干涉测量(如图 8 所示)。

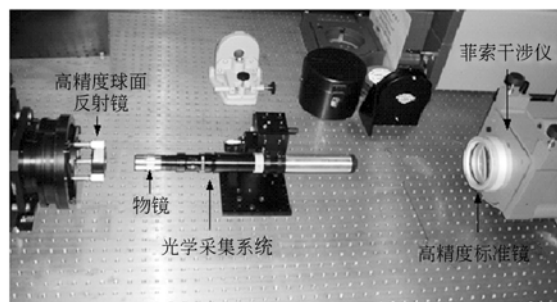


图 8 干涉测量光学放大系统装置图
Fig. 8 Setups of optical system measured with interferometric method

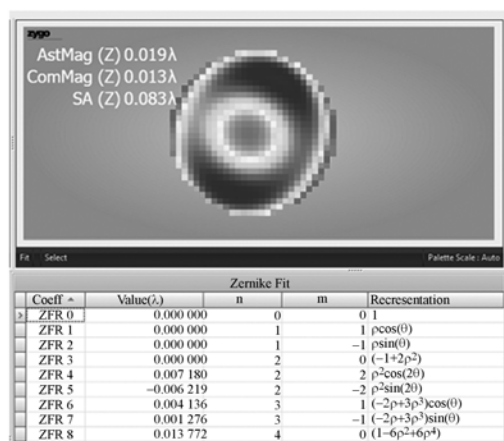


图 9 干涉测量获得的光学放大系统的波前

Fig. 9 Wavefront of optical system measured by interferometric method

图 9 展示了干涉测量获得的光学放大系统的波前信息(去除离焦倾斜分量),其波前均方根值为 0.0074λ ,球差为主要分量。与图 7 中相位提取结果进行对比,二者得到的波前结果相反。这是由于为了减少干涉测量中光学放大系统多表面反射杂光的影响,光学放大系统是倒置于干涉光

参考文献:

- [1] SOMMARGREN G E, PHILLION D W, JOHNSON M A, *et al.*. 100-picometer interferometry for EUVL[J]. *SPIE*, 2002, 4688: 316-328.
- [2] GOLDBERG K A, TEJNIL E, LEE S H, *et al.*. Characterization of an EUV Schwarzschild objective using phase-shifting point diffraction interferometry [J]. *SPIE*, 1997, 3048: 264-270.
- [3] 张海涛. 基于光学设计软件的相移点衍射干涉仪建模[J]. *中国光学*, 2010, 3(6): 616-622. ZHANG H T. Modeling for phase shifting point diffraction interferometer based on lens design software[J]. *Chinese Journal of Optics*, 2010, 3(6): 616-622. (in Chinese)
- [4] 于杰. 用于相移点衍射干涉仪的加权最小二乘相位提取算法[J]. *中国光学*, 2010, 3(6): 605-615. YU J. Weighted least square phase extraction algorithm for phase-shifting point diffraction interferometer[J]. *Chinese Journal of Optics*, 2010, 3(6): 605-615. (in Chinese)
- [5] TOSHIKI M, SATORU O, TAKA AKI N, *et*

路中的。经过分析,干涉测试结果与图 7 所示的波前测试结果一致。

4 结 论

为了减小小孔的形貌和装调误差对衍射波前质量产生的影响,本文采用相位复原的方法对小孔衍射波前质量进行了测评,设计并搭建了衍射波前测试装置,对光纤衍射波前进行了测评实验研究。通过对比采集衍射图像与重构衍射图像以及获得的振幅分布与理论计算振幅分布,验证了采用相位复原技术进行衍射波前测试的有效性。计算分析表明,测试过程中光学放大系统为测试获得的主要波前信息。用干涉方法测量了光学放大系统,并与相位复原结果进行对比,二者一致,从而进一步验证了相位复原衍射波前测试方法的可行性。

5 致 谢

感谢卢增雄博士为本文提供了光纤衍射波前的理论分析数据。

- al.*. Measurement accuracy in phase-shifting point diffraction interferometer with two optical fibers [J]. *Optical Review*, 2007, 14(6): 401-405.
- [6] 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. LU Z X, JIN CH SH, MA D M, *et al.*. Analysis of effect of tiny pinhole deviation on far-field wavefront quality[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0812002. (in Chinese)
- [7] 马强,刘伟奇,李香波,等. 点衍射干涉仪中小孔衍射波面误差分析[J]. *光学学报*, 2008, 28(12): 2321-2324. MA Q, LIU W Q, LI X B, *et al.*. Analysis of diffraction wavefront error in point diffraction interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(12): 2321-2324. (in Chinese)
- [8] 张宇,金春水,马冬梅,等. 点衍射干涉仪波前参考源标定算法的研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(3): 0308001. ZHANG Y, JIN CH SH, MA D M, *et al.*. Study of calibrating algorithm for wavefront reference

- source of point diffraction interferometer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(3):0308001. (in Chinese)
- [9] DIRKSEN P, BRAAT J J M, JANSSEN A J E M, *et al.*. Aerial image based lens metrology for wafer steppers[J]. *SPIE*, 2006, 6154:61540X.
- [10] 马冬梅, 陈土泉. 点衍射波前位相的测评[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(11):2390-2397.
MA D M, CHEN T Q. Test and evaluation of wavefront phase of point diffraction[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(11):2390-2397. (in Chinese)
- [11] 邵晶, 马冬梅. 点衍射干涉仪基准波前测试技术研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(5):0508003.
SHAO J, MA D M. Testing the criterion wavefront diffracted by point diffraction interferometer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(5):0508003. (in Chinese)
- [12] DIRKSEN P, BRAAT J J M, JANSSEN A J E M, *et al.*. Aberration retrieval using the extended Nijboer-Zernike approach [J]. *Journal of Micro lithography, Microfabrication and Microsystems*, 2003, 2(1): 61-68.

作者简介:



邵晶(1984—),男,山东烟台人,博士,2008年于山东大学获得学士学位,2013年于中科院长春光机所获得博士学位,主要从事光学检测等方面的研究。E-mail:qunying12@163.com

导师简介:



马冬梅(1963—),女,吉林长春人,研究员,博士生导师,1986年于天津大学获得学士学位,1993年,2007年于中科院长春光机所分别获得硕士、博士学位,主要从事光学检测、光电成像系统的性能测评等方面的研究。E-mail:dongmei_ma2013@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)