

文章编号: 0253-2239(2010)01-0127-05

基于偏振移相的环路径向剪切干涉

孔梅梅^{1,2} 高志山¹ 陈磊¹ 徐春生^{1,3}

(¹南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094; ²南京邮电大学光电工程学院, 江苏 南京 210046)

³中兴通讯股份有限公司, 江苏 南京 210012

摘要 只需要一幅干涉图就能得到被检波面信息的径向剪切干涉, 适于动态波前的测量。将便于干涉图像处理的同步移相技术引入径向剪切干涉中, 基于环路径向剪切干涉, 利用一个正交的二维光栅分光, 采用偏振移相法, 能同时得到相移间隔 $\pi/2$ 的四幅移相干涉图。运用传统的四步移相算法, 结合波面迭代算法复原波面。通过理论公式的推导、计算机的模拟分析, 以及初步的实验测试, 验证了偏振移相应用于径向剪切干涉的可行性, 模拟结果显示均方根精度优于 $\lambda/100$ 。具有抗振特点的光栅分光偏振移相的同步移相方案, 不仅能够克服剪切干涉的单幅干涉图处理复杂的缺点, 更有利于提高剪切干涉的抗干扰能力。

关键词 光学测量; 径向剪切干涉术; 偏振移相; 动态波前检测

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103001.0127

Cyclic Radial Shearing Interferometry Based on Polarization Phase-Shifting Technique

Kong Meimei^{1,2} Gao Zhishan¹ Chen Lei¹ Xu Chunsheng^{1,3}

¹School of Electronic Engineering & Optoelectronic Techniques, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

²School of Opto-Electronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210046, China

³CTE Corporation, Nanjing, Jiangsu 210012, China

Abstract The cyclic radial shearing interferometry, which can be used to obtain the information of tested wavefront by only one interferogram, is suitable for dynamic wavefront measurements. Simultaneous phase-shifting technique which is convenient for interferogram processing, is adopted. Based on the cyclic radial shearing interferometry, one original interferogram is divided into four interferograms which have $\pi/2$ phase-shifting interval simultaneously by using a 2-dimensional orthogonal grating and polarization phase-shifting method. And the wavefront of the test piece is recovered with the 4-bucket algorithm and iteration method. The feasibility of the cyclic radial shearing interferometry based on polarization phase-shifting is validated by theoretical formula derivation, simulation analysis and primary experimental testing, the result shows that RMS precision is better than $\lambda/100$. Furthermore, the means with diffraction grating splitter and polarization phase-shifting, which is anti-vibration, not only can be used to overcome the disadvantage of complicated single interferogram processing, but also can be propitious to improve the ability of anti-disturbance of radial shearing interferometry.

Key words optical measurement; radial shearing interferometry; polarization phase-shifting; dynamic wavefront measurement

收稿日期: 2008-10-12; 收到修改稿日期: 2008-11-23

基金项目: 国家自然科学基金(60678048)资助课题。

作者简介: 孔梅梅(1983—), 女, 博士研究生, 主要从事光学测试技术与眼视光学等方面的研究。

E-mail: kongmm2004@163.com

导师简介: 高志山(1966—), 男, 博士, 教授, 主要从事光学测试、光学设计、眼科医学光学等方面的研究。

E-mail: zhishgao@mail.njust.edu.cn(通信联系人)

1 引言

光干涉测量技术中,剪切干涉无需标准的参考波面,具有光路简单、对环境扰动和机械振动不敏感等优点。其中,只需要一幅干涉图就能得到被检波面信息的径向剪切干涉,适于动态波前的实时测量,如,惯性约束聚变强激光系统瞬态激光波前的实时检测^[1,2],气体温度场的测量^[3],活体角膜地形图的测量^[4],以及非球面面型的检测^[5]。应用最多的环路径向剪切干涉中,目前都采用基于空间相位调制的傅里叶变换法作为单幅干涉图的波面复原算法^[1,2]。但是,该方法计算较复杂,而且相位调制的载频量是通过倾斜干涉部分的分光镜引入的,而分光镜的倾斜会使参与干涉的两波面中心不再完全重合,即产生了一定的横向剪切。

基于环路径向剪切干涉特点,提出了引入光栅分光偏振移相的同步移相方法,同时得到四幅移相干涉图,将四步移相算法和波面迭代算法相结合,处理干涉图、复原波面,能够克服单幅干涉图处理复杂的缺点,使径向剪切干涉测试过程快速和自动化。本文通过理论公式推导和计算机仿真分析,验证了偏振移相应用于径向剪切干涉的可行性,模拟结果显示均方根精度优于 $\lambda/100$ 。

2 环路径向剪切干涉系统

如原理图 1 所示,环路径向剪切干涉系统主要包括分光镜 BS,反射镜 M_1, M_2 和透镜 L_1, L_2 组成的一个伽利略望远系统。入射的被测波面经分束镜 BS 反射(实线)和透射(虚线)后,反射光束经 $M_1-L_1-L_2-M_2$ 形成扩束波面再由 BS 反射出,透射光束经 $M_2-L_2-L_1-M_1$ 形成缩束波面再由 BS 透射出,最后,扩束波面和缩束波面在它们的重叠区域内产生干涉。设望远系统的放大倍率 $s = |f_2'|/|f_1'|$, f_1' 和 f_2' 为望远系统中透镜 L_1, L_2 的焦距,若原始波面为

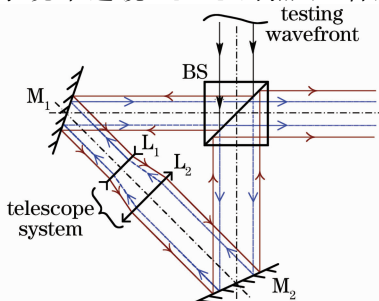


图 1 环路径向剪切干涉系统的原理图

Fig. 1 Schematic of cyclic radial shearing interferometric system

$W_0 = W(\rho, \varphi)$, ρ 和 φ 为极坐标中的极径和角度,则扩束波面 $W_e = W(s\rho, \varphi)$, 缩束波面 $W_c = W(\rho/s, \varphi)$, 两波面的光程差,即剪切波面为:

$$\Delta W(\rho/s, \varphi) = W(\rho/s, \varphi) - W(s\rho, \varphi). \quad (1)$$

由(1)式可知,对变化缓慢的被测波面,当增大望远系统的放大倍率时,可将扩束波面近似看作理想的参考平面波。重叠区域内所形成的干涉条纹可用常见的泰曼-格林(Twyman-Green)干涉或斐索(Fizeau)干涉等很好地加以解释^[1]。但在实际系统中,由于其扩束波面不一定是一个缓变的畸变小的波面,往往很难达到理想平面波程度,因此需应用高精度的迭代运算来重构原始波面^[1,2]。

而对剪切波面的分析,即干涉图的相位差分布的获得,一般通过倾斜分光镜 BS,在干涉图中引入一定的载频量,采用基于空间相位调制的傅里叶变换法^[1,2]。但是,由图 1 可知,当倾斜 BS 后,经 BS 反射的光束传播方向将发生偏折,即在干涉图中的扩束波面会产生一个横向的偏移,此时得到的干涉图就是径向和横向剪切的结果。最后的结果中就必须通过相应的算法来纠正引入的横向剪切偏差,增加了该方法的复杂性。

移相技术是高精度的干涉图分析方法^[6],但是通常的时间移相法不适于动态波前的测量,而且共光路的径向剪切干涉中不易引入移相技术。通过分析基于环路径向剪切干涉系统中的分光特点(图 1),扩束波面是经分束镜 BS 两次反射的波面,缩束波面是经 BS 两次透射的波面,提出了通过将普通的分束镜换成偏振分束镜,采用偏振移相技术,并结合光栅分光,应用空间同步移相的方法进行动态波前的瞬态测量。

3 环路径向剪切干涉中的偏振移相理论

图 2 是环路径向剪切干涉的偏振移相原理图,

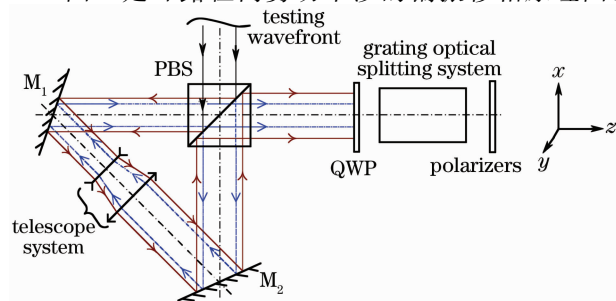


图 2 环路径向剪切干涉的偏振移相原理图

Fig. 2 Schematic of cyclic radial shearing interferometry with polarization phaseshifting

在图 1 的系统基础上,将普通的分光镜 BS 换成偏振分光镜 PBS,当被测波面进入偏振分光镜 PBS 后,PBS 将光束分为振动方向互相垂直的两束偏振光。假设 S 光反射,P 光透射,则 S 光的扩束波面和 P 光的缩束波面经快轴方向与 x 轴成 $\pi/4$ 放置的 $1/4$ 波片 QWP 后,合成为线偏振的剪切波面,其方位角与原始波面的相位成正比。

设原始波面 $W_0 = W(\rho, \varphi)$ 对应的光场复振幅分布为

$$E_0 = A \exp\{ik[W(\rho, \varphi)]\}, \quad (2)$$

其中 A 为振幅, k 为波数,则经 PBS 分光后在 QWP 前,扩束波面 $W_e = W(s\rho, \varphi)$ 与缩束波面 $W_c = W(\rho/s, \varphi)$ 光场的琼斯矢量表示为

$$\mathbf{E} = \begin{Bmatrix} a \exp\{ik[W(s\rho, \varphi)]\} \\ b \exp\{ik[W(\rho/s, \varphi)]\} \end{Bmatrix}. \quad (3)$$

$1/4$ 波片 QWP 的快轴方向与 x 轴正方向成 $\pi/4$,其琼斯矩阵为

$$\mathbf{G}_Q = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

利用一个二维正交光栅进行分光的光栅分光系统将入射光分成四个完全一致的次级光,如果分配到四个次级光束上的分光系数为 α ,它的琼斯矩阵表示为

$$\mathbf{G}_d = \alpha \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

然后这四个包含扩束波面和缩束波面的四个次级光束,分别通过一个由透光轴方向相差一定角度的四个偏振片构成的偏振片组(图 2),对于其中的一路光,假设偏振轴与 x 轴成角 θ ,其琼斯矩阵为

$$\mathbf{G}_p = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin\theta\cos\theta \\ \sin\theta\cos\theta & \sin^2\theta \end{bmatrix}. \quad (6)$$

因此,经偏振片组后,光场的琼斯矢量为

$$\mathbf{E}' = \mathbf{G}_p \mathbf{G}_d \mathbf{G}_Q \mathbf{E}. \quad (7)$$

最后,得到剪切波面的光强为

$$I = \frac{\alpha^2}{2} \{a^2 + b^2 + 2ab \sin[k(W_c - W_e) + 2\theta]\} = \frac{\alpha^2}{2} [a^2 + b^2 + 2ab \sin(k\Delta W + 2\theta)], \quad (8)$$

其中剪切波面 $\Delta W = W_c - W_e = W(\rho/s, \varphi) - W(s\rho, \varphi)$,即重叠区域的干涉图波差分布;考虑到研究的是光强的相对变化,忽略前面的系数,则

$$I = a^2 + b^2 + 2ab \sin(k\Delta W + 2\theta). \quad (9)$$

(9)式为环路径向剪切干涉中通过偏振移相得到的干涉光强表达式。可见,当偏振片的偏振方向 θ 调整到不同的角度时,相当于改变了相位差,即实现了

移相。采用这种方法实现移相,由于转角可以精密控制,故移相的精度很高。

现将四路次级光束中的偏振片分别转至 $\theta = 0, \theta = \pi/4, \theta = \pi/2, \theta = 3\pi/4$,时,四幅光的光强表示为

$$I_1 = a^2 + b^2 + 2ab \sin(k\Delta W + 0),$$

$$I_2 = a^2 + b^2 + 2ab \sin(k\Delta W + \pi/2),$$

$$I_3 = a^2 + b^2 + 2ab \sin(k\Delta W + \pi),$$

$$I_4 = a^2 + b^2 + 2ab \sin(k\Delta W + 3\pi/2). \quad (10)$$

由于实验原理是空间同步移相,同时得到四幅移相 $\pi/2$ 的干涉图,采用四步移相算法,由(10)式可得相位

$$k\Delta W = \arctan(I_1 - I_3 / I_2 - I_4), \quad (11)$$

即 $\Delta W = \arctan(I_1 - I_3 / I_2 - I_4) / k$. (12)

再对(12)式得到的包裹波面进行解包,最后应用迭代运算复原波面,即可得到原始波面。

4 模拟分析及实验验证

4.1 模拟分析

利用 Zemax 光学设计软件,结合 Matlab 工具,模拟出环路径向剪切干涉的干涉图,以及采用四步移相算法和迭代复原算法处理干涉图的结果。图 3 中,原始波面(a)为峰谷值(PV 值)1.6877 λ 的球差波面,扩束波面(b)、缩束波面(c)和剪切波面(d)分别如图所示。

图 4(a),(b)为 $\pi/2$ 相移量的四步移相干涉图,图 4(e)为由四步移相算法解得的包裹波面图,解包后再应用迭代复原算法,得到的复原波面如图 5(b)所示,与原始波面图、原始波面的峰谷值(λ_{pv})和均方根值(λ_{rms} 值)的比较分别如图 5 和表 1 所示。

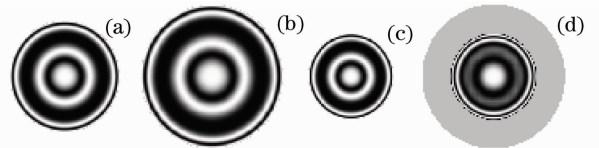


图 3 球差波面的径向剪切干涉图模拟

Fig. 3 The simulation of radial shearing interferogram of spherical aberration wavefront

表 1 含有球差的原始波面和复原波面的 PV 值、RMS 值比较

Table 1 The PV and RMS values of the original wavefront and the reconstructed wavefront (spherical-aberration wavefront)

Spherical-aberration wavefront	λ_{pv}	λ_{rms}
Original wavefront	1.6877	0.5820
Reconstructed wavefront	1.6757	0.5812

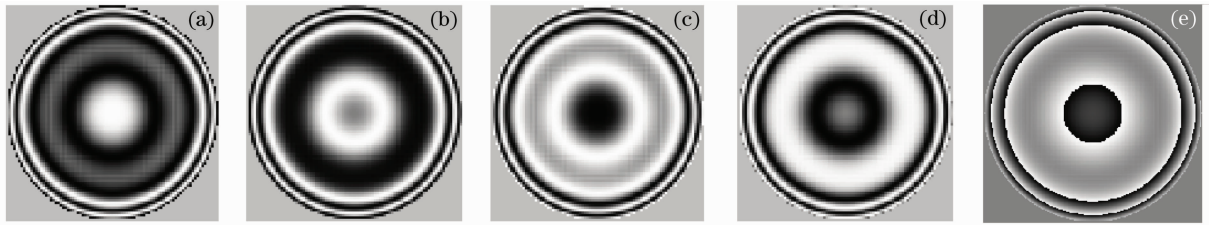


图 4 剪切干涉图的移相模拟。(a)~(d),相移量为 $\pi/2$ 的逐步移相干涉图;(e),包裹波面

Fig. 4 The simulation of radial shearing phase-shifting interferograms;(a)~(d) four interferograms which have $\pi/2$ phase-shifting interval;(5) wrapped wavefront

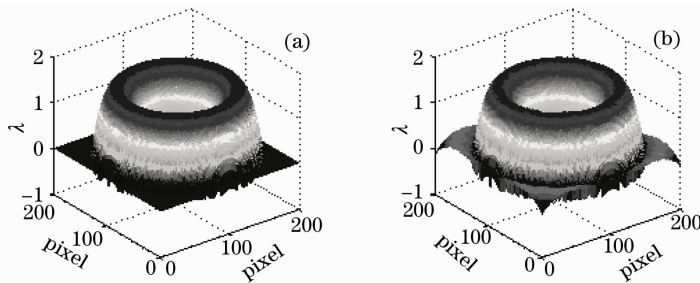


图 5 原始波面和复原波面的比较。(a)原始波面;(b)复原波面

Fig. 5 The comparison of (a) the original wavefront and (b) the reconstructed wavefront

按上述模拟方法同理可得被测波面含有其他像差时,原始波面和复原波面的 λ_{PV} 值、 λ_{rms} 值,如表 2 所示。

4.2 实验测量结果

基于上述的原理,搭建了实验系统,对一待测件进行测量,得到的实测结果如图 6 所示。从图 6(a)

的干涉图中,可以很明显的看出四幅图之间的移相效果,然后使用位置标定程序分割出空间一致的四幅干涉图,并应用自编的移相干涉和迭代复原处理软件,分别得出被测波面的未解包相位图和复原波面,如图 6(b)和 6(c)所示。经过计算得出该被测波面的 λ_{PV} 值为 1.3741λ ,波面的 λ_{rms} 值为 0.3091λ 。

表 2 含有其他像差的原始波面和复原波面的 λ_{PV} 值、 λ_{rms} 值比较

Table 2 The PV and RMS values of the original wavefronts and the reconstructed wavefronts (the other aberration wavefronts)

The other aberration wavefronts	Original wavefront	Reconstructed wavefront
	$\lambda_{PV}/\lambda_{rms}(\lambda)$	$\lambda_{PV}/\lambda_{rms}(\lambda)$
Defocus	2.0198 / 0.6625	2.0317 / 0.6712
Coma	1.1109 / 0.1918	1.1439 / 0.2006
Spherical-aberration + defocus	1.9213 / 0.5455	1.9319 / 0.5545
Spherical-aberration + defocus + coma	1.1291 / 0.1946	1.1307 / 0.2035

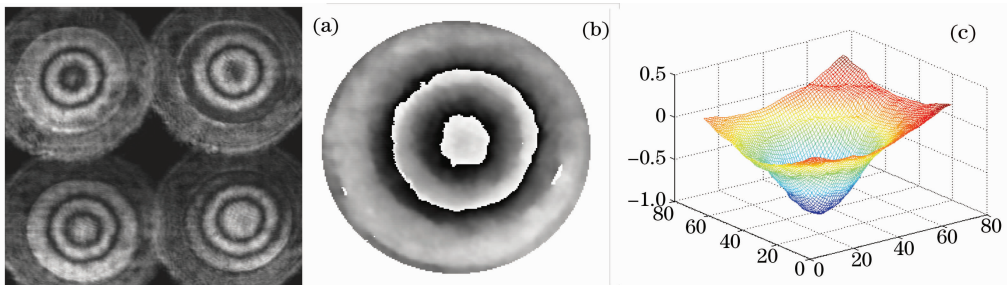


图 6 实验结果:(a)同步移相径向剪切干涉图;(b)未解包的测量相位图;(c)复原的被测波面图

Fig. 6 Experimental results;(a) Simultaneous phase-shifting radial shearing interferogram;(b) wrapped wavefront;(c) the reconstructed tested wavefront.

5 结 论

由图 5 和表 1 的模拟结果可知,波面复原的均方根精度优于 $\lambda/100$;通过理论公式的推导、计算机的模拟分析,以及初步的实验测试,验证了偏振移相应用于径向剪切干涉的可行性;而且,具有抗振特点的光栅分光偏振移相的同步移相方案^[7],不仅能够克服剪切干涉的单幅干涉图处理复杂的缺点,更有利于提高剪切干涉的抗干扰能力。

参 考 文 献

- 1 Li Dahai, Chen Huaixin, Chen Zhenpei *et al.*. Algorithm and accuracy study of wavefront reconstruction with different amplification ratio based on the cyclic radial shearing interferometer [J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **A29**(6): 503~508
李大海, 陈怀新, 陈祯培等. 径向剪切干涉波前重建算法和不同倍数下重建精度的研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(6): 503~508
- 2 Liu Dong, Yang Yongying, Xia Zuotang *et al.*. Measurement of transient near-infrared laser pulse wavefront with high precision by radial shearing interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(9): 1372~1376
刘 东, 杨雨英, 夏佑堂等. 近红外瞬态脉冲波前高精度干涉检测技术[J]. *光学学报*, 2006, **26**(9): 1372~1376
- 3 Han Daofu, Ma Li, Qi Xiaoping. Radial shearing interferometry for measuring the gas temperature field [J]. *J. Nanchang University (Natural Science)*, 2005, **29**(4): 375~377, 386
韩道福, 马 力, 戚小平. 径向剪切干涉法测量气体温度场[J]. *南昌大学学报(理科版)*, 2005, **29**(4): 375~377, 386
- 4 B. E. Garncarz, W. W. Kowalik and H. T. Kaspizak. Corneal topography measurement by means of radial shearing interference: Part II-experiment results [J]. *Optik*, 2002, **113**(1): 46~50
- 5 Wang Zhongping. *Research and Application of the Common-Path Radial Shearing Interferometry* [D]. Nanchang: Nanchang University, 2006, 48~58
王仲平. 共光路径向剪切干涉测量技术的研究及应用[D]. 南昌:南昌大学, 2006, 48~58
- 6 Gao Zhishan, Zhu Rihong, Chen Lei *et al.*. A portable phase-shifting interferometer with optical zoom system [J]. *Microwave Opt. Tech. Lett.*, 2004, **43**(5): 417~419
- 7 Xu Chunsheng. *Research of Simultaneous Phase-Shifting and Anti-Vibration Interferometry* [D]. Nanjing: Nanjing University of Sci. & Tech., 2006, 12~28
徐春生. 同步移相抗振干涉的研究[D]. 南京:南京理工大学, 2006, 12~28