

单幅干涉条纹图的高精度波面重建技术

田爱玲, 刘婷, 刘剑, 刘丙才, 王红军

(西安工业大学 陕西省薄膜与检测技术重点实验室, 陕西 西安 710032)

摘要: 结合莫尔条纹、傅里叶变换和数字相移技术实现了对单幅干涉条纹图的高精度相位计算和波面重建。首先,用计算机生成与被处理干涉条纹频率相近的数字相移条纹图,与实际干涉条纹图叠加得到相移莫尔条纹图;然后,利用傅里叶变换、双频滤波、傅里叶反变换和相移技术得到干涉条纹图的相位数据;最后利用波面拟合技术重构原干涉条纹图对应的波面形状。研究表明,该技术不仅消除了干涉仪硬件相移产生的非线性误差和滤波时的频谱移中误差,高精度获得了单幅干涉条纹图对应的波前,而且简化了系统的机械结构。同时,对环境的要求明显降低,特别适用于生产现场的检测。

关键词: 波面重建; 干涉条纹; 数字相移; 莫尔条纹; 傅里叶变换

中图分类号: TH741 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)04-1203-05

High precision wavefront reconstruction technology for single interferogram

Tian Ailing, Liu Ting, Liu Jian, Liu Bingcai, Wang Hongjun

(Shanxi Province Key Lab of Thin Film Technology and Optical Test, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

Abstract: Moiré fringe, Fourier transform and digital phase shifting techniques are combined together to realize high precision phase calculation and wavefront reconstruction for the single interferogram. First, four digital phase shifting fringes, which the frequency is similar with the original fringe tested, were generated by computer, and phase shifting Moiré fringes are formed by superposition of original and digital fringes. Then, the phase of original interferogram was obtained through Fourier transform, double frequency filtering, inverse Fourier transform and phase shift technology. Finally, the wavefront shape related original interferogram was reconstructed by wavefront fitting. The experimental result shows that this technology not only removes both of nonlinear error from traditional hardware phase shifting and spectral shift error, and get wavefront with high precision for single interferogram, but also simplifies the mechanical structure of system. At the same time, it reduces the demands on the environment, so it is very much suitable to use in work shop.

Key words: wavefront reconstruction; interference fringe; digital phase shift; Moiré fringe; fourier transform

收稿日期: 2014-08-20; 修订日期: 2014-09-25

基金项目: 陕西省科技厅资助项目(2014KW05, 2014JM8333); 陕西省教育厅资助项目(12JS048, 13JS039)

作者简介: 田爱玲(1964-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事光学精密测量技术方面的研究。Email: tian21964@sohu.com

0 引言

光学表面面形的检测^[1]是光学零件检测中最重要的、最基本的检测项目之一,检测的精度将直接影响光学零件的质量,同时也是光学检测水平高低的重要标志,因而具有重要的意义。为了提高测量效率,科研团队们都在优化、寻找高精度的、快速、实时的方法用来检测光学表面面形^[2]。

目前光学表面检测主要使用干涉测量技术,干涉测量具有高精度、非破坏性和快速测量的优点。被广泛采用的干涉测量方法有相移法和传统的傅里叶变换方法。相移法通常可以分为时间移相和空间移相,时间移相法^[3]在相位提取上精度高,实现比较方便,但是由于实现相移的PZT的压电陶瓷材料性质决定了它本身具有的非线性关系,其非线性会在相移时引入较大的误差。要求在相移过程中图像背景、对比度以及被测相位都稳定不变,不能在较复杂的环境下进行工作。空间移相法^[4]对环境稳定性要求不高,可以避免时间相移的非线性问题。但是经实践证明,只有各个探测器或探测器的不同部分都具有相同的光电性质,其空间位置与干涉图才能有非常好的位置匹配,实现高精度的空间相移。傅里叶变换可对单幅干涉图进行处理获得待测波面的相位信息,相比于相移法,它不易受外部测量环境变化影响。但是傅里叶变换法处理干涉图时对干涉图的载频数和窗函数有严格的要求。傅里叶变换法求解相位时,对被测对象有限制,如果被测面高低变化较快条纹就会出现堆积,造成采样不足的缺点;并且传统的傅里叶变换会产生采样偏差,正一级移中产生误差、频率泄露的缺点,从而影响相位的提取精度。

为了解决上述条纹处理技术中存在的问题,文中研究了一种新的基于数字移相、傅里叶变换和莫尔条纹^[5-7]的图像处理方法,实现了高精度和动态测量。不仅消除了传统的硬件移相误差,避免了产生采样偏差,简化了复杂的系统结构,而且降低了对干涉环境的要求。

1 测量原理

为了方便说明问题,这里采用一维表达式。假设

待处理的单幅干涉条纹用公式(1)表示如下:

$$I_0 = a_0 + b_0 \cos(2\pi f_0 x + \theta_0) \quad (1)$$

式中: I_0 为干涉条纹的强度; a_0 为振幅; b_0 为振幅调制; f_0 为干涉条纹的空间载频; θ_0 表示待处理干涉条纹在某处的相位。用计算机生成与公式(1)表示的单幅干涉图振幅和频率相等的数字条纹。但是由于处理误差,总会存在一些偏差,表示如下:

$$I_i = b_i \cos(2\pi f_i x + \theta_i) \quad (2)$$

式中: I_i 为相移数字条纹的强度; b_i 为振幅调制; f_i 为数字条纹的空间载频率,且 $f_i = f_0 \pm f_{\Delta}$ (f_{Δ} 为生成条纹与待处理条纹之间的频率差); θ_i 为数字条纹的相位。为了高精度获得干涉条纹的相位,文中引入四步相移技术,所以 $i=1, 2, 3, 4$ 。

采用乘法处理方法将待处理干涉图与数字条纹叠加,得到莫尔条纹^[8-9]。

$$\begin{aligned} I_0 * I_i &= [a_0 + b_0 \cos(2\pi f_0 x + \theta_0)] * [b_i \cos(2\pi f_i x + \theta_i)] = \\ & a_0 b_i \cos(2\pi f_i x + \theta_i) + b_0 b_i \cos(2\pi f_0 x + \theta_0) * \\ & b_i \cos(2\pi f_i x + \theta_i) \end{aligned} \quad (3)$$

按照积化和差公式展开,上式可表示为:

$$\begin{aligned} I_0 * I_i &= a_0 b_i (2\pi f_i x + \theta_i) + b_0 b_i / 2 \cos[2\pi x(f_0 - f_i) + \theta_0 - \theta_i] + \\ & b_0 b_i / 2 \cos[2\pi x(f_0 + f_i) + \theta_0 + \theta_i] \end{aligned} \quad (4)$$

计算机生成的数字条纹没有包含常数项,所以叠加后也没有常数项。公式(4)的第二项和第三项都包含了原干涉图的相位信息。其中,第二项表示两幅条纹图的空间频率之差,为低频,可以经过傅里叶变换和低通滤波^[10-11]得到。差频莫尔条纹 I_m 表示如下:

$$I_m = \frac{b_0 b_i}{2} \cos(2\pi f_{\Delta} x + \theta_0 - \theta_i) \quad (5)$$

由于文中采用四步相移的数字条纹图,可以得到四步相移的差频莫尔条纹图,此时被测波面相位为:

$$\theta_0 = \arctan \frac{I_{m1} - I_{m2}}{I_{m1} - I_{m3}} \quad (6)$$

式中: $I_{m1}, I_{m2}, I_{m3}, I_{m4}$ 分别为滤波后四步相移的差频莫尔条纹的强度。对公式(6)求得的相位进行解包和波面拟合,即可得到条纹表达的表面面形信息。

在低通滤波处理时, f_{Δ} 很小,因此其差频项分布在零频附近,频谱提取非常困难。为了能够准确提取所需的差频项,提出了一种不同于传统的提取正一级或负一级频谱的滤波方法,即同时提取差频的正负两级频谱,理论分析如下。对公式(5)进行傅里叶

变换,得到:

$$\begin{aligned}
 F(I_m) &= F\{b_0 b_i / 2 \cos(2\pi x f_{\Delta} + \theta_0 - \theta_i)\} = \\
 &= b_0 b_i / 2 F\{\cos(2\pi x f_{\Delta} + \theta_0 - \theta_i)\} = \\
 &= b_0 b_i / 2 \cdot \frac{1}{2} [\delta(f+f_{\Delta}) + \delta(f-f_{\Delta})] \quad (7)
 \end{aligned}$$

式中: $\delta(f-f_{\Delta})$ 为正一级频谱; $\delta(f+f_{\Delta})$ 为负一级频谱。若滤波时只提取正一级频谱,反傅里叶变换后为公式(8)所示:

$$\begin{aligned}
 F^{-1}\left\{\frac{b_0 b_i}{2} \cdot \frac{1}{2} \delta(f-f_{\Delta})\right\} &= \frac{b_0 b_i}{2} \cdot \frac{1}{2} e^{i2\pi f_{\Delta} x} = \\
 \frac{b_0 b_i}{4} \cos(2\pi f_{\Delta} x) + \frac{b_0 b_i}{4} i \cdot \sin(2\pi f_{\Delta} x) \quad (8)
 \end{aligned}$$

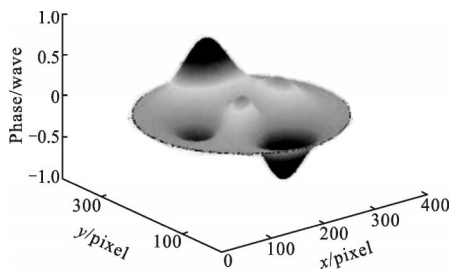
若滤波时提取正负两级频谱,经过反傅里叶变换后为公式(9):

$$\begin{aligned}
 F^{-1}\left\{\frac{b_0 b_i}{2} \cdot \frac{1}{2} [\delta(f+f_{\Delta}) + \delta(f-f_{\Delta})]\right\} &= \\
 \frac{b_0 b_i}{2} F^{-1}\left\{\frac{1}{2} [\delta(f+f_{\Delta}) + \delta(f-f_{\Delta})]\right\} &= \frac{b_0 b_i}{2} \cdot \cos(2\pi f_{\Delta} x) \quad (9)
 \end{aligned}$$

比较公式(8)和(9)可知,其不同之处在于前者包括实部和虚部,而后者只有实部,且实部和虚部的模相等。因为文中采用相移技术求解相位,所以正负两极频谱的滤波等同于常规的正一级频谱滤波并移中的方法。同时,减少了频谱移中过程及移中误差,提高了相位提取的精度。

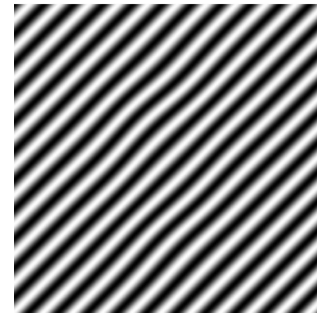
2 仿真实验及分析

为了验证上述方法的可靠性,采用仿真方法对一个有一定形貌偏差的平面进行测量。图 1(a)为待测量的原始光学表面,图 1(b)为图 1(a)表面对应的干涉条纹。其中面形的 PV 值为 0.105λ , RMS 值为 0.015λ 。为了便于傅里叶变换处理,这里引入了一定倾斜。



(a) 原始波面的三维图

(a) 3D surface of the original wavefront



(b) 计算机仿真的干涉条纹图

(b) Computer simulation of interference fringe

图 1 计算机仿真的干涉条纹图及原始波面的三维图

Fig.1 Computer simulation of interference fringe and the 3D surface of original wavefront

计算得到干涉条纹在 x 、 y 方向的空间载频,生成与待处理干涉条纹频率和振幅相近的四步相移条纹,如图 2 所示。

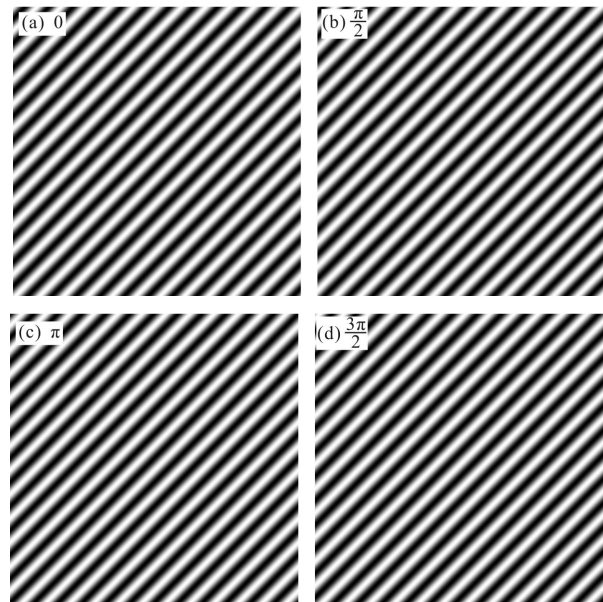
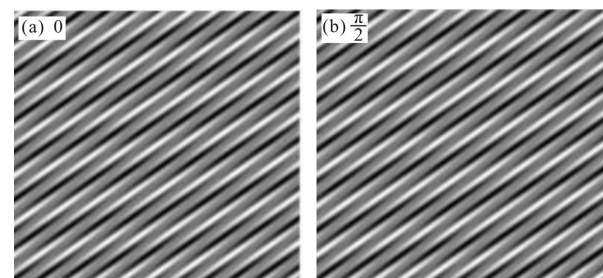


图 2 数字条纹图

Fig.2 Digital fringe pattern

待测的原始干涉图和相移的数字条纹图进行相乘叠加,获得数字相移的莫尔条纹,如图 3 所示。



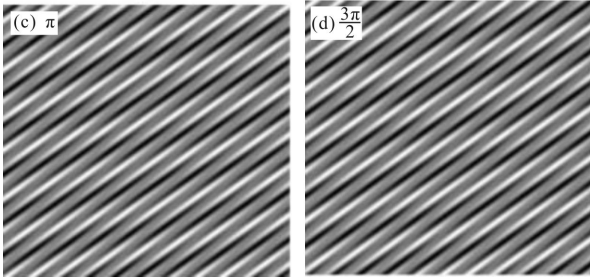


图 3 相移莫尔条纹
Fig.3 Phase shift Moiré

对相移的莫尔条纹进行傅里叶变换、低通滤波(正负差频频谱)和反傅里叶变换,得到具有差频的相移莫尔条纹,图 4 所示为正负两极差频频谱滤波和反傅里叶变换得到的相移条纹。

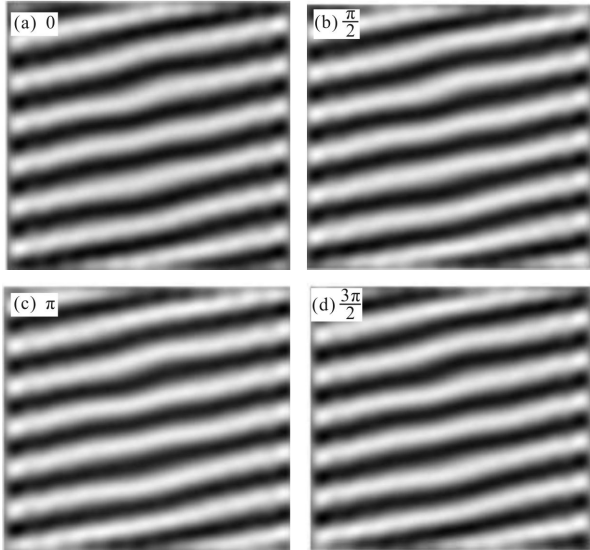


图 4 正负两级差频频谱滤波后的数字相移条纹
Fig.4 Digital frequency spectrum after filtering the positive and negative two-stage differential phase shift fringes

为了说明滤波方法的有效性,进行了大量的仿真实验。表 1 给出了不同滤波方法的一组结果对比。

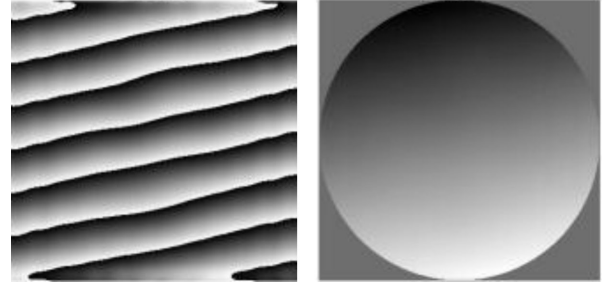
表 1 不同滤波方法的比较

Tab.1 Comparison of different filtering results

Method	PV	RMS
Original surface form deviation	0.105 λ	0.017 λ
Two-stage filter	0.0877 λ Absolute error 0.017 λ Relative error 0.165	0.016 λ
One-series filter	0.0759 λ Absolute error 0.029 λ Relative error 0.28	0.014 λ

对比结果表明,滤波时取正负两级与只取正一级的结果精度相当,所以文中选用正负频谱滤波的方式进行后面的实验及分析。

利用公式(6)对图 4 所示的相移条纹进行相位求解,最后得到相位包裹图和解包裹图如图 5 所示。



(a) 包裹相位图 (b) 解包裹后的相位图

(a) Wrapped phase diagram (b) Unwrapping the phase diagram

图 5 利用四步相移得到的相位图

Fig.5 Using a four-step phase shift resulting phase diagram

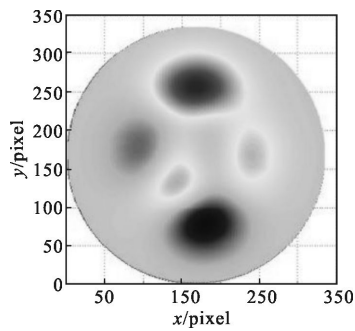
为了得到消除常数项、倾斜项和离焦项的连续表面面形,需要对相位数据进行转换和拟合,最终的仿真结果对比见表 2。

表 2 仿真结果对比

Tab.2 Comparison of the simulation results

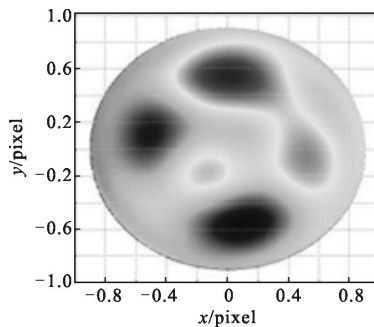
Method	PV	RMS
Original surface form deviation	0.105 λ	0.017 λ
Method proposed in this paper	0.0877 λ Absolute error 0.0173 λ Relative error 0.165	0.016 λ
Standard four-step phase-shifting	0.0859 λ Absolute error 0.019 λ Relative error 0.182	0.015 λ
Fourier transform method	0.0841 λ Absolute error 0.021 λ Relative error 0.199	0.015 λ

文中采用 36 项泽尼克多项式拟合,得到被测面的面形如图 6 所示。图 6(b)为采用文中方法得到的表面面形,图 6(c)为用标准四步相移得到的面形,图 6(d)为傅里叶变换法得到的面形。分析图表发现,文中提出的方法与标准四步相移和傅里叶变换法的仿真结果相近,PV 的相对误差可以降低到 17%,与标准四步相移法(18%)、傅里叶变换法(20%)的相对误差精度相当,说明文中方法是有效可行的。



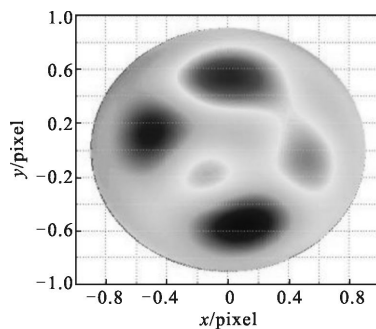
(a) 原始波面

(a) Original wavefront



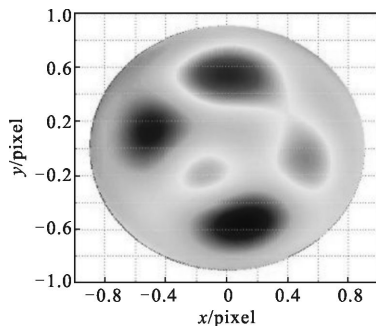
(b) 数字相移法波面重建的结果

(b) Simulation result by the digital phase shift method



(c) 标准四步相移法波面重建的结果

(c) Simulation result by the four step phase shift method



(d) 傅里叶变换法波面重建的结果

(d) Simulation result by the Fourier transform method

图6 不同算法下的波面重建结果

Fig.6 Wavefront reconstruction results under different reconstruction algorithms

3 结论

应用上述研究的成果,利用莫尔条纹和数字相移技术实现了对单幅干涉条纹图的波面重构,对干涉图进行有效的相位提取,引入数字相移避免了传统硬件相移产生的误差,两级滤波的方式消除了快速傅里叶变换精度低的缺点。仿真实验结果表明:数字相移法可对平面实现实时快速、高精度的面形检测。该方法应用简单方便、成本较低,为今后对干涉图的处理多了一种依据。

参考文献:

- [1] Ma Shaopeng, Chang Jinguan, Dai Shuhong. Temporal phase unwrapping method for the application of three-dimensional shape measurement system[J]. *Optical Technology*, 2002, 28(5): 31-35. (in Chinese)
- [2] Creath K, Wyant J C. Moire and Fringe Projection Techniques [M]. New York: John Wiley and Sons, 1992: 653-685.
- [3] Zhu Rihong, Chen Lei, Wang Qing. Phase-shifting interferometry and its application [J]. *Applied Optics*, 2006, 5(2): 85-88. (in Chinese)
- [4] Fang Cheng, Yang Lun. Speckle interferometry fringe processing and phase-shifting technique[J]. *Tool Technology*, 2011, 45(5): 91-94. (in Chinese)
- [5] Huang Weishi, Caoxiang Qun. Moire fringes optics [J]. *Instrument Manufacturing*, 1979(6): 56-61. (in Chinese)
- [6] Asundi Anand K. Moire methods using computer-generated gratings[J]. *Optical Engineering*, 1993, 32(1): 107-116.
- [7] Dai Xianglu, Xie Huimin, Wang Qinghua. Geometric phase analysis based on the windowed Fourier transform for the deformation field measurement [J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 58: 119-127.
- [8] Duan Cunli, Chen Fang, Qi Ruili. Study on a new method of 3D shape measurement of objects using Moiré fringes[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008(7): 1425-1429.
- [9] Asundi A, Yung K H. Phase-shifting and logical Moré[J]. *Optical Society of America*, 1991, 8(10): 1591-1599.
- [10] Wu Hongsheng, Zeng Qifeng, Qiao Dong, et al. Improve signal quality raster moire filter method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, (8): 1944-1949. (in Chinese)
- [11] Zhao Yulin, Zhai Shuling, Zhang Qican. Fourier transform profilometry filtering window orientation selection[J]. *Optical and Optoelectronic Technology*, 2013, 11(1): 42-44. (in Chinese)