

文章编号 1004-924X(2019)06-1277-09

通过傅里叶变换测量多表面面形

李泾渭, 辛 青, 侯昌伦*

(杭州电子科技大学 电子信息学院, 浙江 杭州 310000)

摘要:为了更简便、准确地测量透明平行板,提出了一种基于区域生长算法与傅里叶变换的单幅三表面干涉条纹相位恢复方法。通过傅里叶变化将三表面干涉条纹图由空域变化到频谱域。不同表面的干涉条纹在频谱域中对应的位置不同,通过改变区域生长算法中的参数,提取出合适的区域,最终得到面形。该方法可以由单幅三表面干涉条纹图同时得到透明平行板前后两个表面的面形。分析了由算法求得的表面面形的误差,通过叠加分离的双表面干涉图与原三条纹图进行比较,得到相应的误差分布图,通过误差分布图可以改善算法的精度。将得到的面形与 Zygo 干涉仪得到的面形进行对比,发现该方法测量精度较高,其相位提取误差 PV 值小于 0.12λ , RMS 值小于 0.065λ ;重复性得到验证,其重复率可靠度优于 $\lambda/100$ 。测量到的面形与物体真实面形接近,测量方法更加简便。

关键词:干涉测量;傅里叶变换;相位恢复;多表面干涉条纹;平行平板;区域生长

中图分类号:O438; TN247 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20192706.1277

Measuring multi-surface shape by Fourier transform

LI Jing-wei, XIN Qing, HOU Chang-lun*

(College of Electronic Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310000, China)

* Corresponding author, E-mail: hou_cl@hdu.edu.cn

Abstract: To measure transparent parallel plates more easily and accurately, a phase recovery method based on the region growing algorithm and Fourier transform for single three-surface interference fringes was proposed. Through the Fourier transform, the three-surface interference fringe pattern was changed from the spatial to the spectral domain. Because the interference fringes of different surfaces have different positions in the spectral domain, the appropriate regions were extracted by changing the parameters in the region-growing algorithm, and the final surface was obtained. By this method, the planar shapes of the front and rear surfaces of the transparent parallel plate can be simultaneously obtained from a single three-surface interference fringe pattern. From an error analysis of the surface shapes obtained by the algorithm, a superimposed and separated double-surface interferogram was compared with the original three-striped graph to obtain the corresponding error distribution graph. The accuracy of the algorithm was improved through the error distribution graph. A comparison of the obtained surface shapes with that obtained by a Zygo interferometer reveals that the method had high measurement accuracy with a phase extraction error PV value of less than 0.12λ and a Root Mean Square(RMS) value of less than 0.065λ . A verification of the repeatability shows that the repetition rate is reliable, and the degree is better than $\lambda/100$. The measured surface shape

收稿日期:2018-11-15;修订日期:2019-01-07.

基金项目:国家重点研发计划重大科学仪器设备开发专项(No. 2016YFF0101908)

approximated the real surface shape of the object, and the measurement method proved to be simpler than the original method.

Key words: interferometry; Fourier transform; phase recovery; multi-surface interference fringe; parallel plate; region growing

1 引 言

在超光滑表面的精密元件表面检测中,对其干涉条纹进行分析是目前的主流方法。在分析干涉条纹时,通常能用到的方法为相移法^[1]或傅里叶变换分析法^[2]。其中,相移法通常需要采用压电陶瓷或波长可调节激光器^[3],并对干涉条纹进行多次记录,在记录干涉条纹的过程中易于受到环境和实验装置等外界条件的干扰,在测量过程中准确记录干涉条纹的难度较高。1982年,Takeda等人首次提出使用傅里叶变换对干涉条纹进行分析^[4]。1986年,Bone等人将傅里叶分析扩展到二维的情况^[5]。20世纪90年代,Okada等人提出利用波长调谐的相移方法在多光束干涉条纹中提取需要的信息。2015年,张望平等人使用时域傅里叶变换法从一系列干涉条纹图中快速地恢复出物体的相位^[6]。田爱玲等人也使用傅里叶变换实现了单幅干涉条纹图的高精度相位计算和波面重建^[7]。傅里叶变换法已越来越普遍,相对于相移法,它具有分析速度快、对环境要求低、测量系统的机械结构简化等优点。但是,傅里叶变换分析法大多应用于双光束干涉的条纹图中,当干涉条纹图为多光束干涉时则使用波长可调谐的相移器移相,通过最小二乘迭代法得到每组双表面干涉条纹的实际相移值,从而提取平板前后表面的面形^[8-9]。波长调谐移相由于需要多次移相,得到多组干涉条纹,因此易受环境的影响。

传统的干涉测量中干涉条纹是由参考面与一个测试面反射的光干涉得到的,此时只产生一组干涉条纹。当被测元件为透明物体时,干涉条纹由三个表面干涉得到,分别为前表面与参考面形成的干涉条纹,后表面与参考面形成的干涉条纹,前表面与后表面形成的干涉条纹。干涉条纹由三组不同表面的干涉条纹叠加而成,使用传统方法分析会产生较大的误差^[10-11]。为了解决由多表

面干涉引起的多幅干涉图叠加的问题,通常采用漆或凡士林涂抹在测量样本的后表面,以抑制后表面对激光的反射,但是清洗被测物后表面的过程会破坏其表面面形,影响后表面面形的测量准确性^[12]。2006年,徐建军等人采用傅里叶分析法对三表面干涉条纹进行分析,并提取了平板前、后表面的面形信息,但是由于该方法采用汉宁窗滤波得到面形,因此精度并不是很高。

本文在测量多光束干涉时引入载波信息,提取载波干涉条纹,并将载波干涉条纹进行傅里叶变换,得到其频域信息^[13]。在其频域内,不同的干涉条纹,其高频成分的分布也不一样,因此可以从频谱域中提取不同的干涉条纹^[14]。此时就将多表面干涉条纹分离成为多幅由两个表面干涉形成的单干涉条纹,再由傅里叶分析得到单幅干涉条纹的波前相位信息,进而得到被测物体表面的面形。但是,在使用单幅干涉图获得面形时,需要在频域中提取其一级频谱中心所在区域的波面;然而此波面的边缘是不规则的,传统的窗函数无法精确地提取波面,最终导致面形精度不高。本文采用区域生长算法提取此波面,该算法具有不依赖生长区域的边界形状,可以自动绕过无效区域进行扩展的性质,因此可以更精确地提取到频谱域中一级频谱中心所在区域的波面,最终得到的面形精度也更高。

2 傅里叶干涉原理

2.1 泰曼格林干涉仪测量原理

图1为用泰曼格林干涉仪测量透明板的原理图。激光首先经过一块准直透镜进行准直,由准直透镜发出的平行光进入到分光镜中,反光镜将激光分成两束,一束激光射向参考面,另一束激光射向测试面,这两束激光由于反射再次进入分光镜中,并产生干涉。最后干涉光透过凸透镜会聚至CCD,由CCD采集干涉条纹。

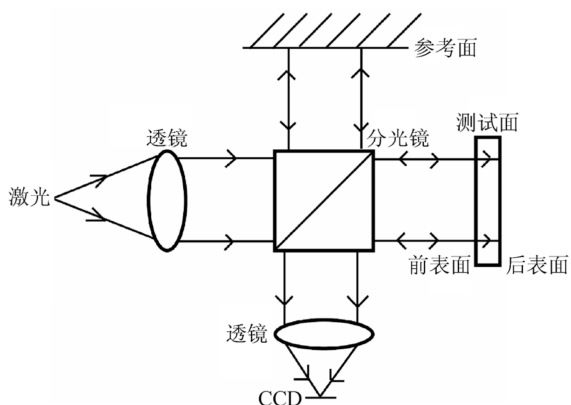


图 1 泰曼格林干涉仪示意图

Fig.1 Schematic of Twyman-Green interferometer

2.2 多表面干涉原理

由于被测面是透明板,当激光射向透明板时,其前表面与后表面都会反射激光。这两束光与参考面反射回的光束均存在一定的相位差,因此三束光两两之间会产生干涉,换言之,参考光与前表面的光束,参考光与后表面的光束,前表面的光束后表面的光束都会产生干涉。最终产生的干涉条纹是由这三种不同的干涉条纹叠加而成。

假设参考面为理想平面,其相位分布为 0,三个光束干涉的强度分布通常可以表示为:

$$i(x, y) = a(x, y) + b(x, y)\cos(\varphi_1 + 2d_1) + c(x, y)\cos(\varphi_2 + 2d_2) + d(x, y)\cos(\varphi_1 - \varphi_2 + 2d_3), \quad (1)$$

式中: x 和 y 表示干涉条纹的平面坐标, $a(x, y)$ 为条纹的背景, $b(x, y), c(x, y), d(x, y)$ 为条纹的调制度, φ_1, φ_2 分别为测试板前后表面的相位, d_1, d_2 与 d_3 分别表示参考光与前表面光束、参考光与后表面光束、前表面光束与后表面光束的光程差。

由于式(1)中存在多个未知量,无法直接算出其前后表面的相位分布,需要对公式(1)进行变换。为了方便后续的处理,引入了空间载频。将参考波在 x 方向与 y 方向上倾斜,使得干涉条纹在某一个方向上变得密集。引入载波的干涉条纹的光强分布可表示为:

$$i(x, y) = a(x, y) + b(x, y)\cos(\varphi_1 + 2d_1 + 2\pi f_1) + c(x, y)\cos(\varphi_2 + 2d_2 + 2\pi f_2) + d(x, y)\cos(\varphi_1 - \varphi_2 + 2d_3 + 2\pi f_3), \quad (2)$$

式中: f_1, f_2, f_3 分别为参考面与前表面、参考面与后表面、前表面与后表面引入的载波频率。为求出被测物体前后两个面的相位分布 φ_1 与 φ_2 ,

将式(2)改成复数表达式:

$$i(x, y) = a + b_2 e^{i2\pi f_1} + b_1^* e^{-i2\pi f_1} + c_1 e^{i2\pi f_2} + c_1^* e^{-i2\pi f_2} + d_1 e^{i2\pi f_3} + d_1^* e^{-i2\pi f_3}, \quad (3)$$

式中: $a = a(x, y), b_1 = \frac{1}{2} b(x, y) e^{i(\varphi_1 + 2d_1)}, c_1 = \frac{1}{2} c(x, y) e^{i(\varphi_2 + 2d_2)}, d_1 = \frac{1}{2} d(x, y) e^{i(\varphi_1 - \varphi_2 + 2d_3)}$, * 表示共轭。对式(3)进行二维傅里叶变换得:

$$I(f) = A(f) + B(f - f_1) + B^*(f - f_1) + C(f - f_2) + C^*(f + f_2) + D(f - f_3) + D^*(f + f_3), \quad (4)$$

式中: $A(f)$ 为干涉图背景光强的频谱分布函数, $B(f), C(f), D(f)$ 分别为 b_1, c_1, d_1 所对应的频谱, f 表示频率矢量。由式(4)可知,频率 $f_1, f_2, f_3, -f_1, -f_2, -f_3$ 以及原点处皆为峰值点,若取得适当的载频,可以将这 7 个峰分开,在滤波后提取的条纹不失真。

本文采用区域生长算法对其频谱图进行滤波。区域生长算法又称作种子点法,它的原理是找到一个种子点,之后向四周的 8 个领域点扩展,再将 8 个领域点作为第二批种子,这些点向其各自的领域扩展,直到所有的有效信息点都被遍历,便达成了将所需的区域提取的目的,换言之也就达到了滤波的目的。采用区域生长算法对频谱图进行滤波,其原因是频谱域中需要提取的区域的边界形状是不规则的,区域生长算法不依赖生长区域的边界形状,可以自动绕过无效的区域进行扩展。

根据区域生长原理,滤波时需要确定所选区域的种子像素,在生长区域中将相邻像素包含进来的准则,以及停止生长的条件。

在确认种子点时,确定第一个种子点十分重要,因为它是整个区域生长的基石。对第一个种子点的选择依据为:该种子点应是有效的数据,且其周围 8 个领域的点也是有效数据,这样才能保证第一个种子点在 8 个方向都可以生长。根据式(4)可以确定在频谱域中图像正负一级的频谱中心,这些频谱中心点是所要提取区域的最高点,区域内其他点都比频谱中心点小。因此,将这些频谱中心点作为种子点,可以更好地制定区域生长准则。

区域生长准则:由于所需要提取的是一个波面,波面的最高点已经确定,即第一种子点。之后

扩展区域的点必然小于第一种子点,且大概率小于其上一级的种子点。当种子点周围邻域的点小于种子点,则将此点作为有效区域;当种子点周围邻域的点略大于其上一级种子点,但是之后的趋势是减少的,那么这个点也是有效区域点;如果种子点周围的点比种子点大,且往后将会持续增加,则剔除此点。如图 2 所示,此图为某一个一级频谱中心点所在的行向量的分布图,其中 a 是第一种子点, a 点是处于最大值的点,点 b 比其上一级的种子点略大,但是之后整体趋势为减小,故取 b 点为有效点。点 c 与点 d 是两个比其上一级种子点大的点,且这两个点所在的区域整体都是增长的,故需剔除这两个点所处波面的所有的点。

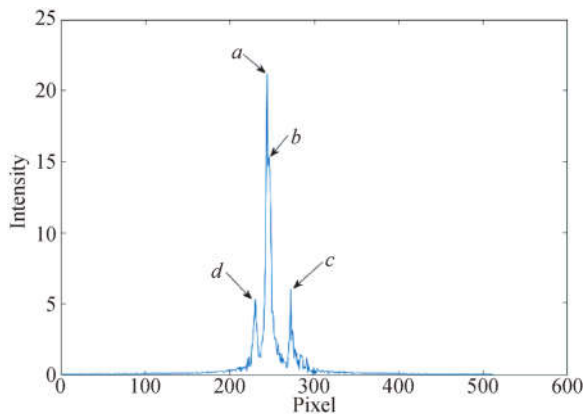


图 2 行向量分布图

Fig. 2 Distribution of row vectors

生长停止条件:当根据种子生长规则最终发现没有可取的种子点时,就停止生长,所得波面即为最终滤波完的波面。

由一级频谱中心提取到三种不同的干涉条纹的频谱域,将得到的频域移至原点后反傅里叶变换得到 $b_1(x, y)$, $c_1(x, y)$, $d_1(x, y)$ 。假设提取到的干涉条纹为参考面与前表面形成的干涉条纹,则反傅里叶变换得到的是 $b_1(x, y)$, $b_1(x, y)$ 所对应面形的相位分布为:

$$\varphi_1 = \arctan \frac{\text{Im}(b_1(x, y))}{\text{Re}(b_1(x, y))}, \quad (5)$$

式中 $\text{Im}(b_1(x, y))$ 与 $\text{Re}(b_1(x, y))$ 分别为 $b_1(x, y)$ 的虚部与实部。再对式(5)进行解包裹操作,即可得到被测面的相位信息。由式(5),将前表面与参考面形成的干涉相位记作 φ_1 ,后表面与参考面形成的干涉相位记作 φ_2 ,前表面与后表面形成的干涉相位记作 φ_3 。其前表面面形为 $\varphi_1 \lambda / 4\pi$,后表面

面形为 $\frac{\varphi_2 \lambda}{4\pi n} - (n-1) \frac{\varphi_1 \lambda}{4\pi n}$,其中 n 是透明板的折射率。

3 实 验

本文采用 K9 透明玻璃平行板作为待测基片,采用 ZYGO 干涉仪进行干涉实验,通过 CCD 采集到的 512×512 pixel 干涉条纹如图 3 所示,其三维频谱图如图 4 所示。由图 4 可以看出,除了中心零频信息外,还存在其他 6 个峰,并且 6 个峰中心对称。由于多表面干涉图由三组不同的干涉条纹叠加而成,这 6 个峰值信息便是加入载波后被分离的三种干涉条纹,其中三个峰值是正一级频谱,其余为负一级频谱。

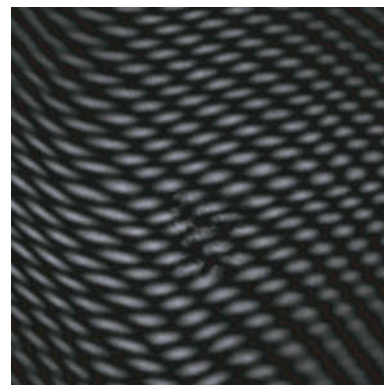


图 3 干涉条纹图

Fig. 3 Interference fringe pattern

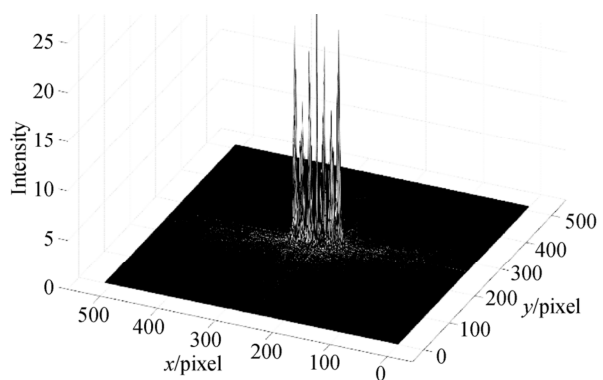


图 4 干涉条纹的频谱图

Fig. 4 Spectrum of interference fringes

找到频谱图中正一级峰的峰值点,本文通过单小琴在使用二维 FFT 法对单幅空间载波干涉条纹处理时采用的分布函数方式提取峰值点^[15],图 5 是三个正一级峰值点经反傅里叶变换后得到

的条纹图。其中,图 5(a)是前表面与参考面干涉频谱波峰所对应的条纹图,图 5(b)是后表面与参考面干涉频谱波峰所对应的条纹图,图 5(c)是前表面与后表面干涉频谱波峰所对应的条纹图。从图 5 可以看出,其一级频谱中心点得到的干涉条纹走势与图 3 中多重干涉条纹走势相近。由于区域生长时,第一个种子点及其周围 8 个领域的点都是有效数据,分布函数得到的峰值点是所要提取的波峰的最高点,因此峰值点必为有效数据,且峰值点周围 8 个领域所在的点也均为有效数据点,符合上述要求。并且当取一级频谱中心点为第一个种子点时,由于其周围的点都小于第一个种子点,后续更容易确定区域生长规则。

确定峰值点后,根据区域生长算法,将峰值点作为第一个种子,向外生长,此时便需要决定区域生长的准则。在确定准则前,要明确在使用区域生长算法提取波峰时,此波峰是最高点,再由这个最高点向其四周扩散的。如果此波峰是一个理想波峰(即在此波峰的最高点与最低点一直保持单调递减的状态),那么只需要保证扩展的点小于其上一级的种子点,便可以取得这些点。但是在实际的波峰中,波峰到波谷的点不可能一直单调递减,如图 2 所示,图中的 *b* 点是一个需要取得的点,但是 *b* 点周围的点不是理想的单调递减,所以需要确定一个阈值用以分辨图 2 中点 *b* 与 *c* 和 *d* 的区别。在实验中,首先会分析一系列波形的走向,算出波形中不可取的点与其上一级种子点的差

值,并算出相差的百分比,将此百分比作为阈值。当存在点的值大于其上一级种子点的阈值时,将此点作为怀疑点,通过向后扩展 3 步的方法,若之后的 3 个点都比前一级种子点大,那么不包含此点;若存在有些点比前一级种子点小,那么将这个点作为扩展的点(前一级种子点视为已经被扩展的点)。

图 6 是其中一个峰值像素点一行与一列的峰值,此峰值点在整个图像中位于(222,265)的位置。图 6(a)是峰值处的列波形,即整个图像 265 列的波形,图 6(b)是峰值处的行波形,即图像 222 行的波形。从图 6(a)中看到,整个波形中只存在一个峰值,并且峰值点为第 265 列,虽然有些点没有严格的单调递减,但是都在可控范围内,因此图 6(a)的波形不需要设置阈值,所有值都可以被取得。但是在图 6(b)中,可以看出除了在第 222 行存在峰值点,在 250 行左右也存在一个峰值点,在提取此部分图像像素点时,不需要取 222 行之外的峰值点,换言之,250 行所在的峰值点是不符合准则的,需要剔除。由波形算出,当第一个增长的点和其上一级种子点相差的百分比是 39.39%,将这个值作为区域生长的阈值。在区域生长的时候,存在值比其上一级种子点大 39.39%时,则将此点作为怀疑点,再向后遍历 3 步,分辨出此点是否被包含。按此规则扩展图像,当没有符合规则的种子时,图像生长完成,即成功滤波得到想要的区域。

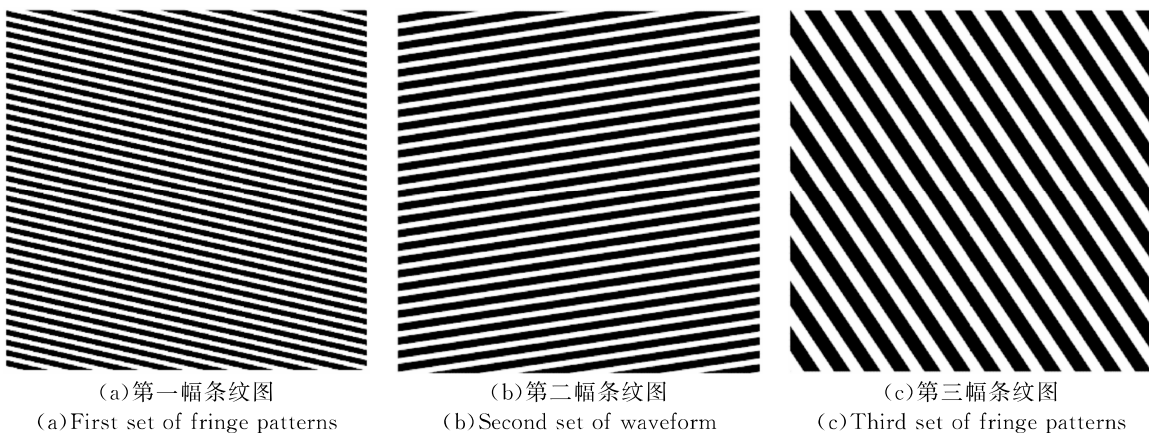


图 5 由峰值点得到的条纹图

Fig. 5 Fringe pattern obtained from peak point

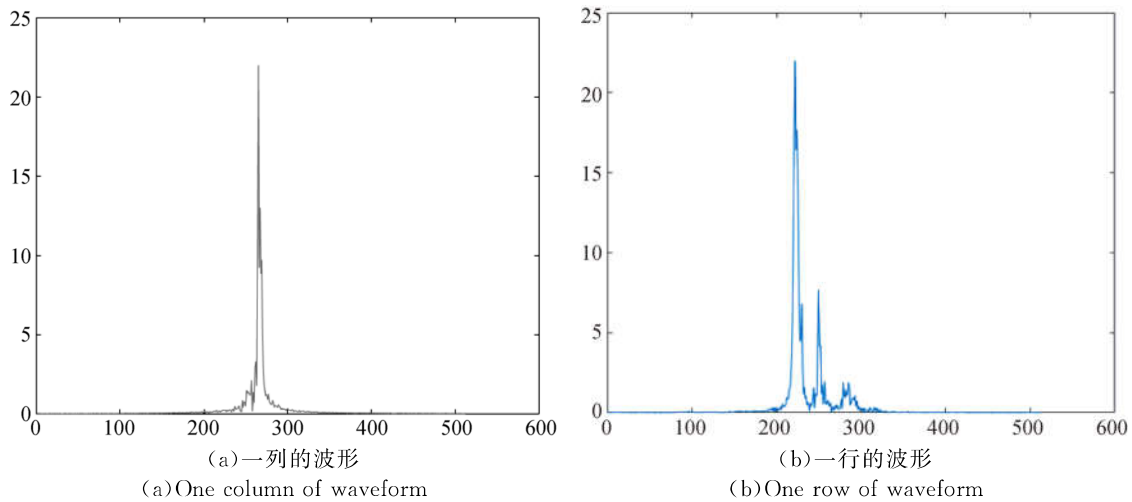


图 6 种子像素点周围的波形
Fig. 6 Waveforms around seed pixel

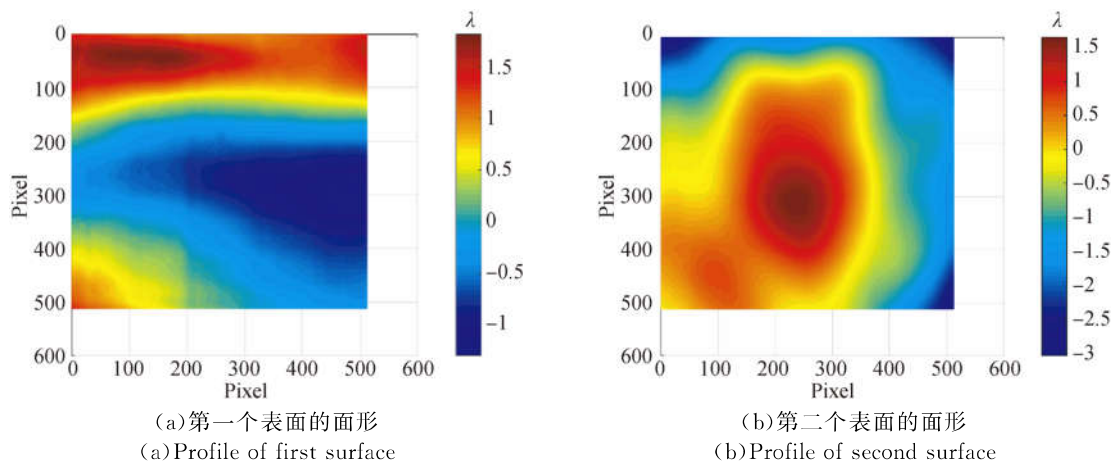


图 7 由图像区域算法滤波得到的面形
Fig. 7 Surface shape obtained by image region algorithm

根据求得的前后表面面形(见图 7)可知,其第一个表面面形的 PV 值为 3.106λ ,均方根值(Root Mean Square,RMS)值为 0.797λ ,其第二个表面面形的 PV 值为 4.679λ ,RMS 值为 0.857λ 。图 8 为 Zygo 干涉仪测得的透明板前后表面面形,图 8(a)为第一个表面的面形,其 PV 值为 3.220λ ,RMS 为 0.809λ ,图 8(b)为第二个表面的面形,其 PV 值为 4.568λ ,RMS 为 0.798λ 。将自己分离得的面形与 Zygo 干涉仪测量的面形进行比较可得:其轮廓图基本一致,两个表面的 PV 值相差为 0.114λ

和 0.111λ ,RMS 值相差为 0.012λ 和 0.061λ 。

图 9 是误差分布图。其中,图 9(a)是第一个面形的误差分布,其 PV 值为 0.677λ ,RMS 为 0.066λ 。图 9(b)是第二个面形的误差分布,其 PV 值为 1.699λ ,RMS 为 0.130λ 。误差产生的原因是由于没有引入更合适的载波,使得干涉图在频谱域中各个一级点的波峰距离很近,最终导致分离得到的波形不完美。但是,本文采用的分离波形算法,在引入载波不良的情况下依旧可以得到高精度的面形。

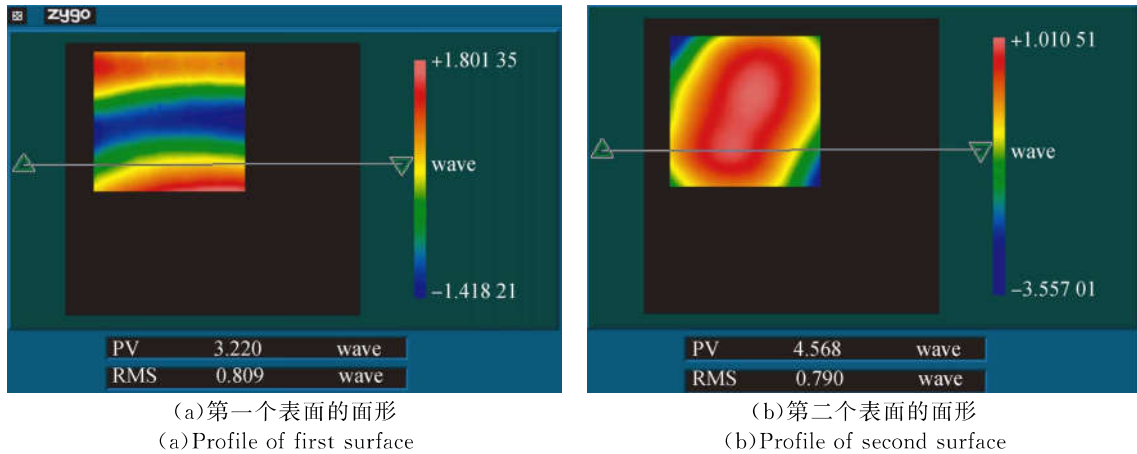


图 8 Zygo 干涉仪测试的面形

Fig. 8 Surface shape obtained by Zygo interferometer

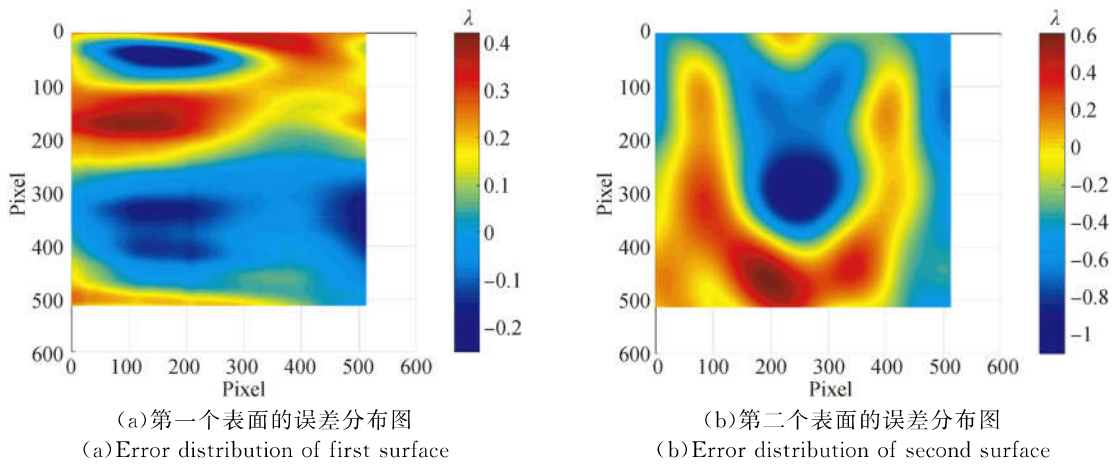


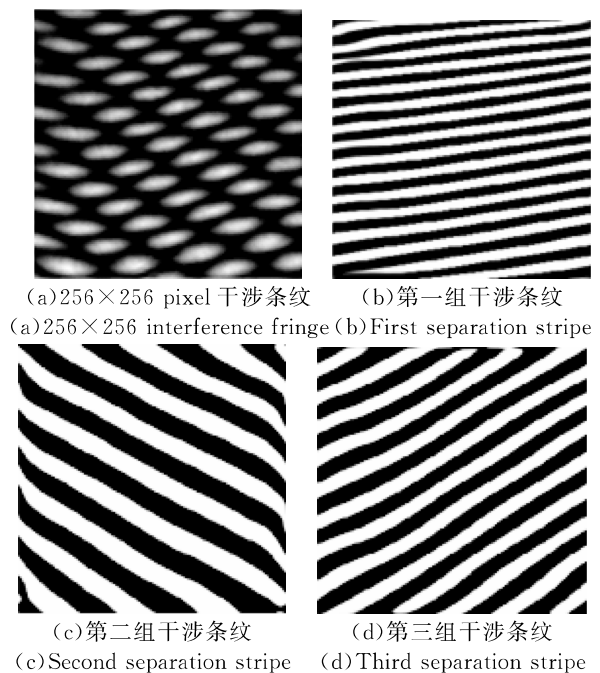
图 9 误差分布图

Fig. 9 Error distribution

4 误差分析

4.1 算法误差分析

本实验根据分离的条纹形状验证面形精度,为了更好地说明其分离后的条纹进行叠加与原干涉图的关系,本次使用一幅 256×256 pixel 的干涉图进行验证。图 10 为验证过程,图 10(a)为一幅测得的 256×256 pixel 的干涉条纹图,图 10(b)~10(d)是用区域生长算法分离的原干涉图中叠加的 3 种干涉条纹,图 10(e)是上述 3 种干涉条纹相加得到的。对图 10(e)与图 10(a)做差,得到其误差分布如图 10(f)所示。从图 10(f)看到,其边沿部分误差较大,整体大致与原图一致。



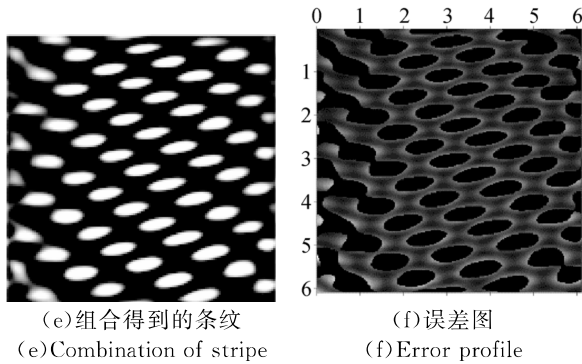
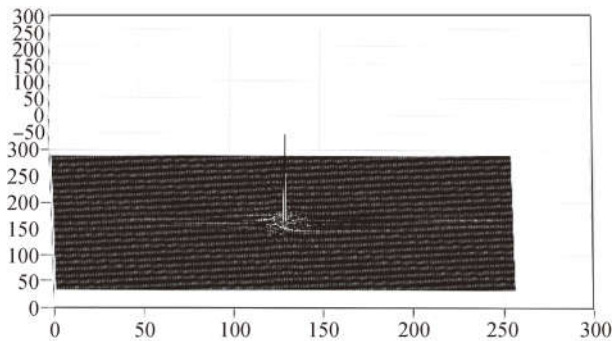


图 10 验证算法过程图

Fig. 10 Process of algorithm verification

为了进一步对算法误差进行分析,在频谱域中将其正负一级峰值所对应的峰都去除,只留下零频的峰。图 11(a)在频谱域中去除其他峰,图中只保留中心零频的峰。图 11(b)是将其频谱域进行反傅里叶变换得到的空域图,可以看出在去除其正负一级峰值区域后,留下的为干涉条纹的噪声(即为干涉条纹的背景图),这从另一个角度反映出所提取的 6 个峰的区域就是需要的双表面干涉形成的干涉条纹。



(a) 频域图

(a) Spectrum diagram



(b) 空域图

(b) Airspace figure

图 11 频域分析

Fig. 11 Frequency domain analysis

4.2 重复性误差分析

在本实验中,在不同时间内多次测量透明平行板的 PV 值,将此结果作为重复性误差分析的数据,表 1 是在 3 个不同的时间测量同一块平行板得到的平行板前后表面的 PV 值。由表 1 可以看出,前表面 PV 值的重复性为 0.7%,RMS 值的重复性为 0.2%,后表面 PV 值的重复性为 0.8%,RMS 值的重复性为 0.3%。与单幅条纹空域傅里叶法中的重复性进行对比^[13],其前表面 PV 的重复性为 1.05%,其后表面为 0.69%,RMS 值重复性分别为 0.05%与 0.13%,数据与本文大致持平。

表 1 重复性误差测量结果

Tab. 1 Measurement results of repeatability (λ)

不同时间	第一个表面 PV 值	第一个表面 RMS 值	第二个表面 PV 值	第二个表面 RMS 值
1	3.106	0.797	4.679	0.857
2	3.106	0.799	4.673	0.857
3	3.108	0.797	4.671	0.857
4	3.113	0.797	4.675	0.854
平均值	3.108	0.798	4.675	0.856
可靠率	0.007	0.002	0.008	0.003

5 结 论

本文提出了单幅三表面干涉条纹的相位恢复方法,基于区域生长算法和傅里叶变换法,只要求单幅三表面干涉图便可以同时测出透明板前后表面的面形,硬件要求与操作度简单,运算速度快,对环境影响小,重复性高。在提取不同干涉条纹所对应的频谱域区域时,可根据实际的旁瓣范围调整区域生长算法的参数,使提取到的旁瓣区域更加完整。将获得的面形与 Zygo 干涉仪测得的面形进行比较,其相位提取误差 PV 值小于 0.12λ ,RMS 值小于 0.065λ 。重复性验证结果表明,其重复率可靠度优于 $\lambda/100$ 。为了进一步提高面形精度,此后将引入相移法,并在本文算法的基础上减少环境对相移法的影响。

参考文献:

- [1] PHILLION D W. General methods for generating phase-shifting interferometry algorithms [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(31):8098-8115.
- [2] 粟银, 范琦, 王云飞, 等. 干涉条纹的高准确度傅里叶变换分析[J]. 光子学报, 2015, 44(11):94-99.
SU Y, FAN Y, WANG Y F, *et al.*. High accuracy fourier transform analysis of interference fringes [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(11): 94-99. (in Chinese)
- [3] YAMAMOTO A, YAMAGUCHI I. Profilometry of sloped plane surfaces by wavelength scanning interferometry [J]. *Optical Review*, 2002, 9(3):112-121.
- [4] TAKEDA M, INA H, KOBAYASHI S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1982, 72(1):156-160.
- [5] BONE D J, BACHOR H A, SANDEMAN R J. Fringe-pattern analysis using a 2-D Fourier transform [J]. *Applied Optics*, 1986, 25(10):1653.
- [6] 张望平, 吕晓旭, 刘胜德, 等. 基于时域傅里叶变换的广义相移相位恢复方法[J]. 中国激光, 2015, 42(9):262-268.
ZHANG W P, LÜ X Y, LIU SH D, *et al.*. Generalized phase shift phase recovery method based on time domain Fourier transform [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(9): 262-268. (in Chinese)
- [7] 田爱玲, 刘婷, 刘剑, 等. 单幅干涉条纹图的高精度波面重建技术[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(4): 1203-1207.
TIAN A L, LIU T, LIU J, *et al.*. High precision wavefront reconstruction technique for single interference fringe pattern [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(4): 1203-1207. (in Chinese)
- [8] OKADA K, SAKUTA H, OSE T, *et al.*. Separate measurements of surface shapes and refractive index inhomogeneity of an optical element using tunable-source phase shifting interferometry [J]. *Apply Optics*, 1990, 29(22):3280.
- [9] KIM Y, HIBINO K, HANAYAMA R, *et al.*. Multiple-surface interferometry of highly reflective wafer by wavelength tuning [J]. *Optics Express*, 2014, 22(18):21145-211456.
- [10] SCHMIT J, CREATH K. Extended averaging technique for derivation of error-compensating algorithms in phase-shifting interferometry [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(19):3610-3619.
- [11] DECK L L. Fourier-transform phase-shifting interferometry [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(13):2354-2365.
- [12] REN H, MA L, LIU X, *et al.*. Optical element test with multiple surface interference [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5): 1144.
- [13] 徐建程, 石琦凯, 柴立群, 等. 三表面干涉条纹空域傅里叶分析[J]. 中国激光, 2006, 33(9): 1260-1264.
XU J CH, SHI Q K, CHAI L Q, *et al.*. Three-surface interference fringe spatial Fourier analysis [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(9): 1260-1264. (in Chinese)
- [14] QIAN. Applications of windowed Fourier fringe analysis in optical measurement; A review [J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2015, 66:67-73.
- [15] 单小琴. 单幅载波条纹图相位提取方法的研究[D]. 南京:南京理工大学, 2011.
SHAN X Q. *Research on Phase Extraction Method of Single Carrier Stripe Pattern* [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)

作者简介:



李泾渭(1994—),男,浙江绍兴人,硕士研究生,2017年于吉林建筑大学获得学士学位,主要从事通过激光干涉技术检测多表面面形技术的研究。E-mail: jingweili@hdu.edu.cn

通讯作者:



侯昌伦(1976—),男,湖北荆门人,博士,副教授,1998年、2005年于浙江大学分别获得学士、博士学位,主要从事从事光学检测、光学成像和微光学传感器方面的研究。E-mail: hou_cl@hdu.edu.cn

导师简介:



辛青(1981—),女,湖北武汉人,副教授,2003年、2005年于武汉大学分别获得学士、硕士学位,2009年于浙江大学获得博士学位,主要从事纳米材料与器件的制备与研究。E-mail: xinqing@hdu.edu.cn