

使用最小二乘迭代相移方法测量透明元件*

李泾渭, 辛 青, 郁 杰, 侯昌伦

(杭州电子科技大学 电子信息学院, 浙江 杭州 310000)

摘 要: 为了更精确地测量透明平板前后两个面的面形相位分布, 提出了一种基于最小二乘迭代的相移算法。通过一次最小二乘相移算法后, 可以得到相应的透明平板面形图, 但是由于初始得到的相位值存在误差, 因此得到的面形图精度并不会很高。因此需要通过得到的面形图推导出准确的相位值, 本算法通过最小二乘法多次迭代的方法, 计算出较准确的初始相移值。对该方法进行仿真实验后, 可知此算法的测量精度较高且抗噪能力比较好, 仿真得到面形图的 PV 值与 RMS 值误差值均小于 0.006λ 。在实际测量结果中, 得到测量结果的 PV 值误差小于 0.09λ , RMS 误差小于 0.02λ 。测量到的面形与物体真实面形接近, 测量精度较高。

关键词: 干涉; 最小二乘迭代算法; 相移算法; 面形检测; 多表面干涉

中图分类号: TN247; O438

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200753

中文引用格式: 李泾渭, 辛青, 郁杰, 等. 使用最小二乘迭代相移方法测量透明元件[J]. 电子技术应用, 2021, 47(1): 100-107.

英文引用格式: Li Jingwei, Xin Qing, Yu Jie, et al. Measure transparent elements using least squares iterative phase shift method[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(1): 100-107.

Measure transparent elements using least squares iterative phase shift method

Li Jingwei, Xin Qing, Yu Jie, Hou Changlun

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

Abstract: In order to measure the surface phase of the front and back of the transparent plate more accurately, a phase shift algorithm based on least squares iteration is proposed. After a least squares phase shift algorithm, the corresponding transparent flat surface pattern can be obtained, but the accuracy of the obtained surface map is not high because there is an error in the initial phase value. Therefore, it is necessary to derive the accurate phase value from the obtained surface map. The algorithm calculates the more accurate initial phase shift value by the method of least squares and multiple iterations. After the simulation experiment of the method, it is known that the measurement accuracy of this algorithm is high and the anti-noise ability is better. The error of the PV value and RMS value of the surface map is less than 0.006λ . In actual measurement results, the PV error of the measurement result is less than 0.09λ , and the RMS error is less than 0.02λ . The measured shape is close to the true shape of the object, and the measurement accuracy is high.

Key words: interference; least squares iterative algorithm; phase shift algorithm; shape detection; multi-surface interference

0 引言

光学元件面形最主要的检测方法是相移干涉法, 在传统情况下, 被检测的光学元件只有一个光滑表面, 使用传统的相移干涉算法, 能检测到高精度的光学元件面形^[1-2]。但是, 当传统的相移干涉算法检测前后两个表面都光滑的光学元件时, 由于被测元件前后两个表面都会产生反射光, 所形成的干涉图像由多表面干涉形成, 传统的相移干涉无法分离各自的干涉条纹, 故无法测得此时的光学元件的面形。

目前常用的消除多表面干涉的方法是使用折射率匹配的消光漆或凡士林涂抹在被测光学元件的后表面,

抑制后表面的反射, 或者使用多模激光器^[3]使后表面的反射光与测试光不相干。但是前者方法需要接触测试面, 可能导致其面形遭到破坏; 后者方法使用的实验装置过于复杂, 其受环境影响较大, 其结果不够精确。TSURUTA T 等学者使用白光干涉仪测量多表面面形^[4], 此后其他作者也使用了白光干涉测量法^[5-6], 此方法可以使多个表面引起的干涉条纹交替分离, 由分离的干涉条纹可以测量出测试元件的面形现状。但是, 由于此测量方法使用白光 LED 作为光源, 其相干长度允许范围小于 $2\mu\text{m}$, 并且, 当测试样品的厚度大于 1mm 时, 由于透射光的光程差的零位置随每个波长不同而不同, 测量精度会降低。此外, 徐建程等提出了一种单幅三表面干涉条纹空域傅里叶分析方法^[7], 此方法基于多表面干涉

* 基金项目: 国家重点研发计划重大科学仪器设备开发专项(2016YFF0101908)

时每个面反射率不同,在频谱域中各个面的反射条纹将被分离,但是需要引入空间载波且精度较低。

使用波长调谐干涉仪^[8-10],可以解决上述问题。如果波长调谐干涉仪的光源波长根据时间线性变化,其与干涉光束的光程差成比例,当扫描时的波长变化小于1 nm时,其表面面形将以纳米精度确定^[11-13]。由于使用单色光作为光源,干涉图像由不同表面形成的干涉条纹组成,为了在干涉图像中正确地提取特定干涉信号的相位,需要使用一个特殊的相移算法。本文基于最小二乘拟合算法,使用最小二乘迭代的方法对多表面干涉图进行分析,并使用窗函数对不同表面的干涉图进行分离。

1 原理

1.1 多表面干涉原理

图1为用泰曼格林干涉仪测量透明板的干涉条纹图。如图所示,波长可调谐的激光器首先经过一块准直透镜将光束准直,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便再次进入分光镜中,并产生干涉。最后将干涉光透过凸透镜,将其会聚至CCD,由CCD采集干涉条纹。

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将由这三种不同的干涉叠加而成。

假设参考面为面1,为理想平面,其相位分布为0,测试面的前表面为面2,后表面为面3,这三个面反射的光都会进入CCD,形成多表面干涉图。面1与面2的光形成的干涉图为 I_1 ,则 I_1 的表达式为:

$$I_1(x, y) = a_1(x, y) + b_1(x, y) \cos\left[\frac{4\pi}{\lambda} L(x, y)\right] \quad (1)$$

式中 $a_1(x, y)$ 表示干涉条纹的背景, $b_1(x, y)$ 为干涉条纹的

调制度, λ 表示激光的初始波长, $L(x, y)$ 为两个面之间的距离,即为干涉腔长。面1、面3与面2、面3都会产生如式(1)所示的双光束干涉。

1.2 相移算法

相移算法有很多种,如特征多项式法^[14],它基于算法和多项式之间的一一对应的关系,推导出满足如何要求的算法,直到任意算法,在使用此方法时需要使用的样本数太大;平均方法^[15],此方法通过相位偏导公式,减小系统的误差;辅助函数的加法^[16-17],该方法可以用于具有周期性但并不一定是正弦相位的测量系统,但是此算法的误差略大;联立线性方程的方法^[18-19],适用于相移校准器不准确的情况下,消除非正弦特性的影响;扩展平均方法^[20],此算法可以消除相移误差校准和检测器的非线性误差,但是对相移图的帧数要求过高;递归方法^[21]对于不同的误差源不敏感;最小二乘拟合算法^[9]可以在较短的时间内计算出面形,但是当出现误差时,其精度不高。上述算法大多都用于双光束的干涉,存在相应的优点和缺点。本文使用的最小二乘迭代算法是在最小二乘拟合算法的基础上实现的,弥补了最小二乘法对误差的不敏感。

当激光的波长改变了 m 次后,即激光的波长由 λ 变为 $\lambda - \Delta\lambda_m$,则第 m 次的干涉条纹 I_{1m} 可表示为:

$$I_{1m}(x, y) = a_1(x, y) + b_1(x, y) \cos\left[\frac{4\pi}{\lambda + \Delta\lambda_m} L\right] \quad (2)$$

将式(2)的三角函数中的式子展开为:

$$\frac{4\pi}{\lambda + \Delta\lambda_m} L = \frac{4\pi}{\lambda} L - \frac{4\pi\Delta\lambda_m}{\lambda(\lambda + \Delta\lambda_m)} L \quad (3)$$

式(3)中的 $\frac{4\pi}{\lambda + \Delta\lambda_m} L$ 项为被测面的相位分布,记为 $\varphi_1(x, y)$ 。

在实际测量过程中 $\Delta\lambda_m = \lambda$, $\frac{4\pi\Delta\lambda_m}{\lambda(\lambda + \Delta\lambda_m)} L$ 可改写为 $\frac{4\pi\Delta\lambda_m}{\lambda^2} L$,

记为 $\theta_{1,m}$ 。则式(3)可写为:

$$I_{1,m}(x, y) = a_1(x, y) + b_1(x, y) \cos[\varphi_1(x, y) + \theta_{1,m}] \quad (4)$$

CCD中的干涉条纹表示为:

$$I_m^t = A_m + \sum_{i=1}^3 b_m \cos[\varphi_i(x, y) + \theta_{i,m}] \quad (5)$$

式中 t 表示干涉条纹强度的理论值, i 表示第 i 幅双表面干涉条纹, A_m 表示背景值。其干涉条纹的第 (x, y) 个像素的最小二乘误差表示为:

$$S(x, y) = \sum_{m=1}^M [I_m^t(x, y) - I_m(x, y)]^2 \quad (6)$$

式中 $I_m(x, y)$ 表示实际得到的干涉条纹强度。假设 $\theta_{1,m}$ 已知,式(6)可改写为:

$$S = \sum_{m=1}^M (a + b \cos\theta_{1,m} + c \sin\theta_{1,m} + d \cos\theta_{2,m} + e \sin\theta_{2,m} + f \cos\theta_{3,m} + g \sin\theta_{3,m} - I)^2 \quad (7)$$

式中 $a = A_m$, $b = b_m \cos\varphi_1$, $c = b_m \sin\varphi_1$, $d = b_m \cos\varphi_2$, $e = b_m \sin\varphi_2$, $f = b_m \cos\varphi_3$, $g = b_m \sin\varphi_3$,根据最小二乘原理,若要使其误差最

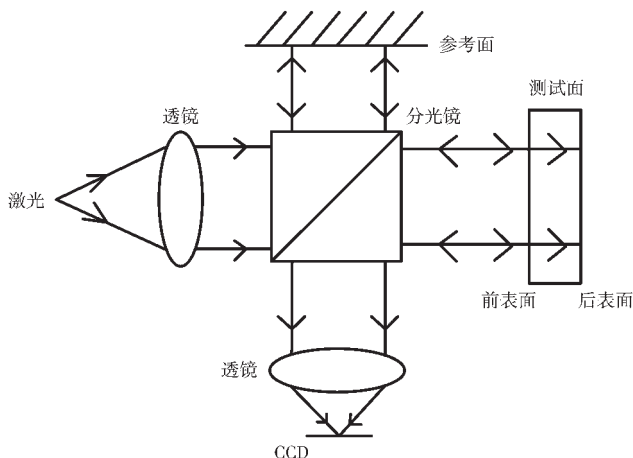


图1 泰曼格林干涉仪示意图

小,则其偏导为0,根据其偏导求解各个未知量,可以将其改写为矩阵方程求解,其矩阵方程为:

$$AX=Y \quad (8)$$

矩阵中各个量的表示为:

$$A = \begin{bmatrix} M & c_1 & s_1 & c_2 & s_2 & c_3 & s_3 \\ c_1 & c_1^2 & c_1 s_1 & c_1 c_2 & c_1 s_2 & c_1 s_2 & c_1 s_3 \\ s_1 & c_1 s_1 & s_1^2 & c_2 s_1 & s_1 s_2 & c_3 s_1 & s_1 s_3 \\ c_2 & c_1 c_2 & c_2 s_1 & c_2^2 & c_2 s_2 & c_2 c_3 & c_2 s_3 \\ s_2 & c_1 s_2 & s_1 s_2 & c_2 s_2 & s_2^2 & c_3 s_2 & s_2 s_3 \\ c_3 & c_1 s_2 & c_3 s_1 & c_2 c_3 & c_3 s_2 & c_3^2 & c_3 s_3 \\ s_3 & c_1 s_3 & s_1 s_3 & c_2 s_3 & s_2 s_3 & c_3 s_3 & s_3^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$X = [a \ b \ c \ d \ e \ f \ g]^T \quad (10)$$

$$Y = [\sum I \ \sum I_{c_1} \ \sum I_{s_1} \ \sum I_{c_2} \ \sum I_{s_2} \ \sum I_{c_3} \ \sum I_{s_3}]^T \quad (11)$$

式中 $c_i = \cos \varphi_i$, $s_i = \sum_{i=1}^3 \sin \varphi_i$ 。根据矩阵,至少需要7幅不同相移量的干涉图,才可以解出 X 。得到 X 后,则其对应的波前相位为: $\varphi_1 = \arctan(-\frac{c}{b})$, $\varphi_2 = \arctan(-\frac{e}{d})$, $\varphi_3 = \arctan(-\frac{g}{f})$ 。由此,便可求出被测透明物体的前后表面

面形,但是由于在求此面形时,其相移量为假设的值,与真实相移值有较大的误差,由此得到的面形也存在较大误差。根据最小二乘迭代算法,将得到的 φ_1 、 φ_2 、 φ_3 作为已知量,求相应的相移量,则式(7)可写为:

$$S_m = \sum_{m=1}^M (a' + b' \cos \varphi_1 + c' \sin \varphi_1 + d' \cos \varphi_2 + e' \sin \varphi_2 + f' \cos \varphi_3 + g' \sin \varphi_3 - I)^2 \quad (12)$$

式中 $a' = A_m$, $b' = b_m \cos \theta_{1,m}$, $c' = b_m \sin \theta_{1,m}$, $d' = b_m \cos \theta_{2,m}$, $e' = b_m \sin \theta_{2,m}$, $f' = b_m \cos \theta_{3,m}$, $g' = b_m \sin \theta_{3,m}$, 根据最小二乘原理,其矩阵方程为:

$$A'X' = Y' \quad (13)$$

矩阵中各个量的表示为:

$$A' = \begin{bmatrix} N & c'_1 & s'_1 & c'_2 & s'_2 & c'_3 & s'_3 \\ c'_1 & c'^2_1 & c'_1 s'_1 & c'_1 c'_2 & c'_1 s'_2 & c'_1 s'_2 & c'_1 s'_3 \\ s'_1 & c'_1 s'_1 & s'^2_1 & c'_2 s'_1 & s'_1 s'_2 & c'_3 s'_1 & s'_1 s'_3 \\ c'_2 & c'_1 c'_2 & c'_2 s'_1 & c'^2_2 & c'_2 s'_2 & c'_2 c'_3 & c'_2 s'_3 \\ s'_2 & c'_1 s'_2 & s'_1 s'_2 & c'_2 s'_2 & s'^2_2 & c'_3 s'_2 & s'_2 s'_3 \\ c'_3 & c'_1 s'_2 & c'_3 s'_1 & c'_2 c'_3 & c'_2 s'_2 & c'^2_3 & c'_3 s'_3 \\ s'_3 & c'_1 s'_3 & s'_1 s'_3 & c'_2 s'_3 & s'_2 s'_3 & c'_3 s'_3 & s'^2_3 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$X' = [a' \ b' \ c' \ d' \ e' \ f' \ g']^T \quad (15)$$

$$Y' = [\sum I \ \sum I_{c'_1} \ \sum I_{s'_1} \ \sum I_{c'_2} \ \sum I_{s'_2} \ \sum I_{c'_3} \ \sum I_{s'_3}]^T \quad (16)$$

式中 $c'_i = \sum \cos \varphi_i$, $s'_i = \sum \sin \varphi_i$, N 表示干涉图像素点的位

置。由矩阵方程得到的相移量分布为: $\theta_1 = \arctan(-\frac{c'}{b'})$,

$\theta_2 = \arctan(-\frac{e'}{d'})$, $\theta_3 = \arctan(-\frac{g'}{f'})$ 。将得到的相移量作为参

数带入矩阵方程又可求得对应的相位分布,如此迭代,即由相移量求相位分布,由相位分布求相移量。最终,迭代结束的收敛条件为:

$$\max \{ |\delta_n(k) - \delta_1(k)| - |\delta_n(k-1) - \delta_1(k-1)| \} < 10^{-4} \quad (17)$$

式中 k 表示迭代次数。此时得到的相位分布即为最终值。

2 仿真实验与分析

2.1 仿真三表面干涉条纹

模拟得到的三表面面形为:

$$\begin{cases} \phi_1 = 0.5x^2 + y \\ \phi_2 = 0.1x^3 + y \\ \phi_3 = \phi_1 - \phi_2 \end{cases} \quad (18)$$

式中 x 和 y 的范围为0至512,其单位为像素。根据上式看得到模拟的面形如图2所示,其中图2(a)为 ϕ_1 所对应的面形,图2(b)为 ϕ_2 所对应的面形,图2(c)为 ϕ_3 所对应的面形。其三表面所得到的最终干涉条纹如图3所示。

2.2 使用最小二乘迭代算法求其面形

本次仿真使用7幅多表面干涉条纹作为原始数据,对其进行表面面形的恢复。对多表面干涉条纹图使用汉明窗作为窗函数,窗函数如图4(a)所示,此窗函数可以减小旁瓣对算法的影响,有效分离不同的干涉条纹。图4(b)为没有加窗函数时干涉条纹的频谱值,如图所示,此频谱图旁瓣较大,对运算的结果存在较大的误差。图4(c)为加窗函数时的频谱图,如图所示,此频谱图的旁瓣被窗函数所削减,其旁瓣的值趋向于0。

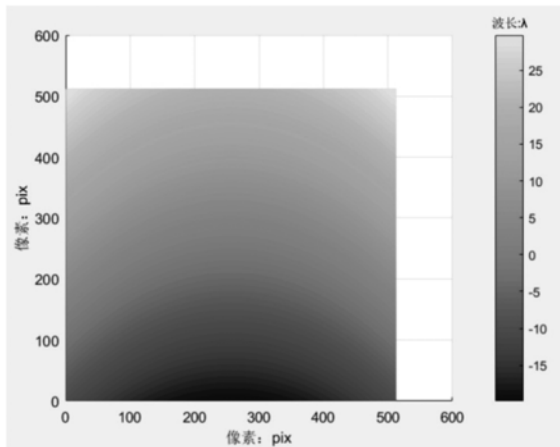
干涉图的初始相移量为: $\theta_1 = \frac{\pi}{8}$, $\theta_2 = \frac{\pi}{10}$, $\theta_3 = \frac{\pi}{15}$ 。其中 θ_1 表示第一个面形的初始相移量, θ_2 表示第二个面形的初始相移量, θ_3 表示第三个面形的初始相移量。并且第一个面形每次相移 $\frac{\pi}{8}$, 第二个面形每次相移 $\frac{\pi}{10}$, 第三个面形每次相移 $\frac{\pi}{15}$ 。同时在模拟相移的过程中,对初

始相移量加入一个随机值。通过最小二乘迭代算法进行12次迭代运算,使其达到收敛条件,得到的面形图如图5和图6所示。其中图5为解包裹之前的面形图,图6为解包裹后的相位图。

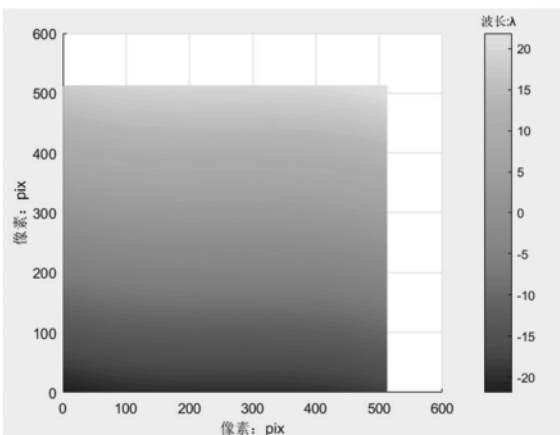
最终得到的面形与原始面形进行对比,发现其相位提取误差为:PV值与RMS值误差均小于 0.006λ 。并且由次算法得到的面形与原始面形分布大致一样。

2.3 对比仿真

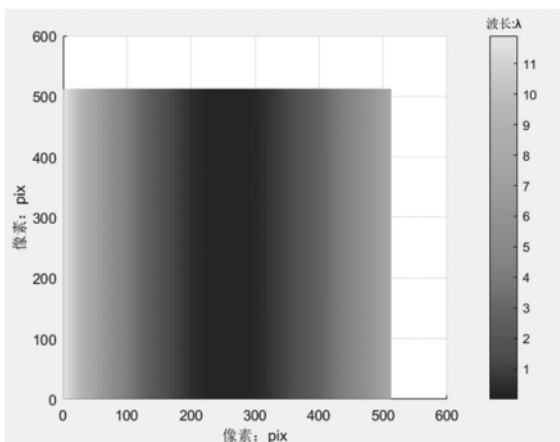
如使用的相移算法为最小二乘算法,即不加入迭代过程,其最终的面形图如图7、图8所示。图7为最小二乘法得到的前后表面的面形图,从图中可以看出其面形



(a) 第一个面形



(b) 第二个面形



(c) 第三个面形

图2 仿真三表面形图

图与迭代算法得到的面形差异不大,但是 PV 值和原始面形差异较大。此算法得到的面形 PV 值误差小于 0.03λ , RMS 值误差小于 0.008λ 。

使用单幅干涉图,利用傅里叶变换测得的前后表面面形^[22]如图 8 所示。从图中可以看出,利用傅里叶变换得到的面形图其边缘位置误差较大,整体面形与原始图

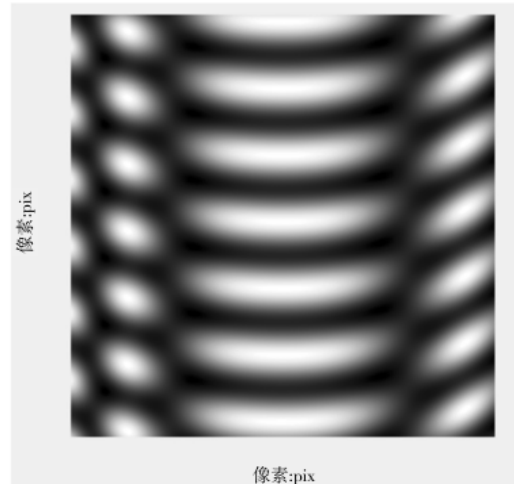
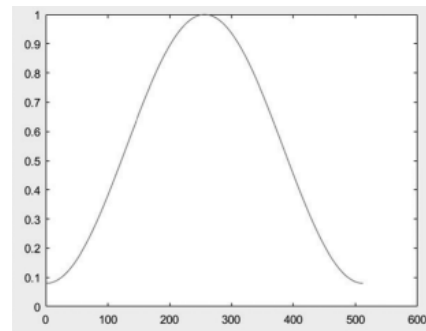
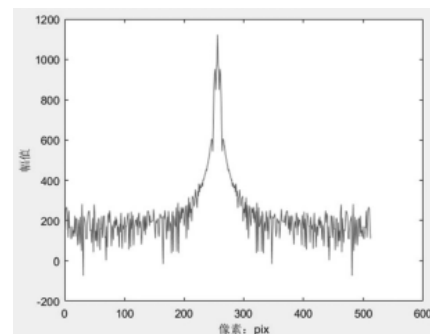


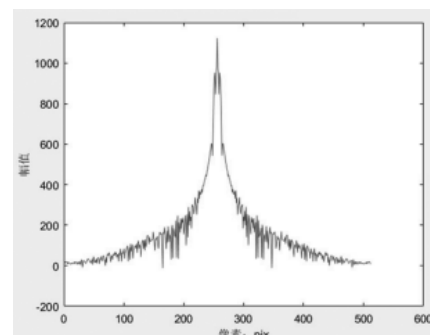
图3 多表面干涉图



(a) 窗函数



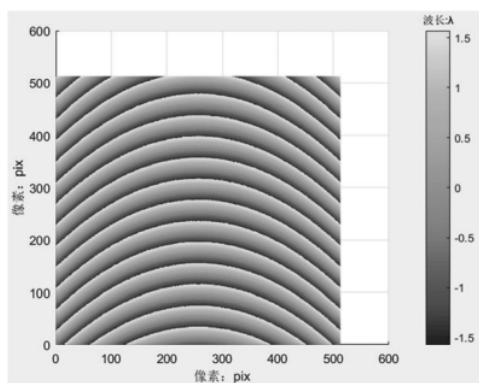
(b) 未加窗函数的干涉图



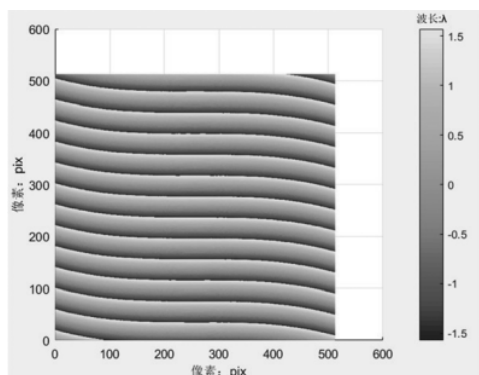
(c) 加窗函数的干涉图

图4 频谱图

对比也存在一定的差距。此方法得到的面形的 PV 值误

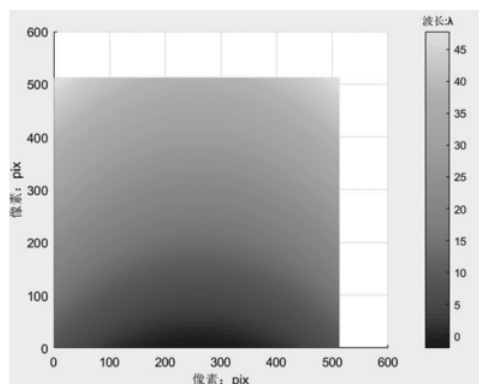


(a) 第一个面形的包裹相位图

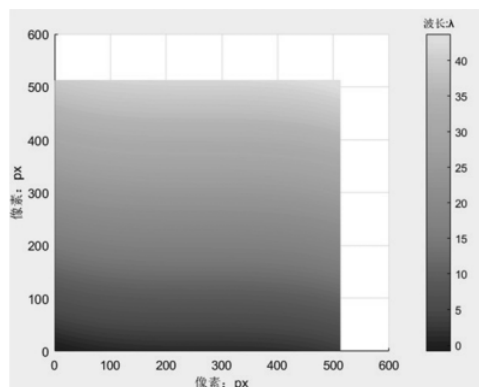


(b) 第二个面形的包裹相位图

图 5 解包裹之前的面形图

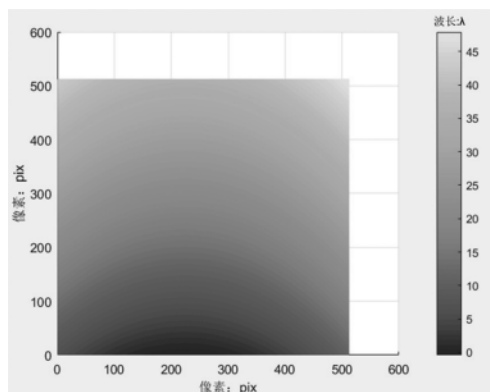


(a) 第一个面形图

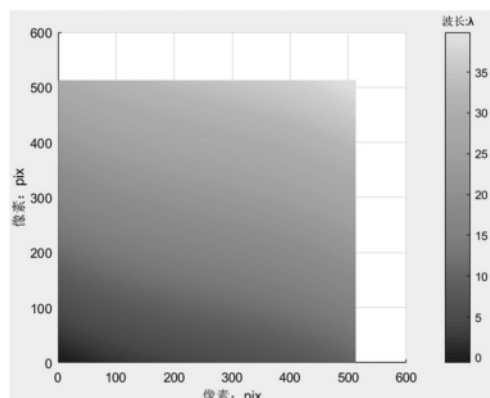


(b) 第二个面形图

图 6 解包裹后的面形图



(a) 第一个面形图



(b) 第二个面形图

图 7 最小二乘得到的面形图

差均在 0.05λ 范围内, RMS 值误差小于 0.03λ 。

由此可知, 最小二乘迭代算法计算表面面形的精度好于其他两种算法, 面形差异与原始输入面形的差距不大。此算法使面形的精度再一次得到了提高。

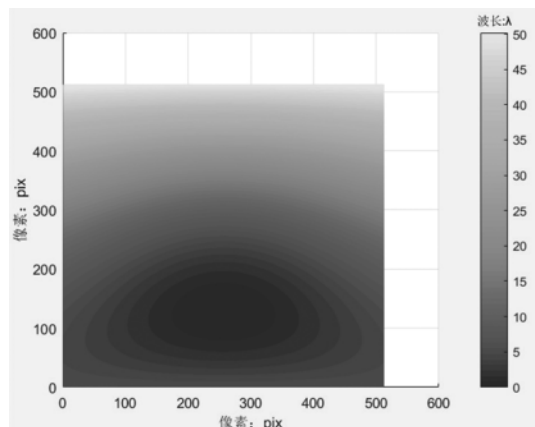
3 实验

本文使用苏州维纳仪器有限责任公司的自制干涉仪得到相应的干涉条纹。其干涉仪如图 9 所示, 由该干涉图得到的多表面干涉条纹如图 10 所示。

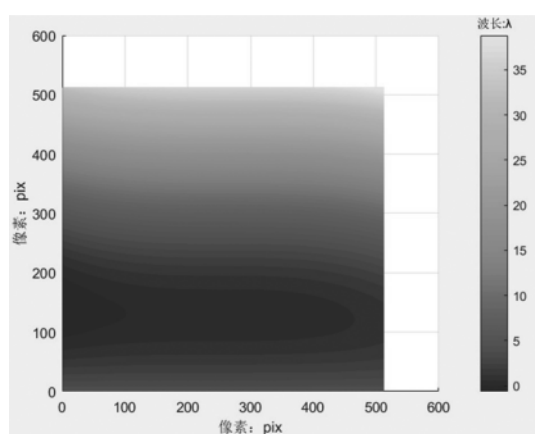
由上述干涉条纹图, 截取其中的 256×256 个像素点作为实验的原始数据, 根据其原始干涉图, 苏州维纳仪器有限责任公司自制的干涉仪所得的面形如图 11 所示。

使用相同的干涉条纹, 使用最小二乘迭代算法得到的面形如图 12 所示。

根据所得的面形可知, 其中图 11 是由自制的干涉仪测量得到的面形结果, 图 12 是由最小二乘迭代算法得到的面形, 图 11 所得的面形与图 12 所得的面形轮廓大致相同。比较第一个表面的面形, 图 11(a) 面形与图 12(a) 面形的 PV 值误差为 0.032λ , RMS 值误差为 0.008λ 。比较第二个表面的面形, 图 11(b) 面形与图 12(b) 面形的 PV 值误差为 0.086λ , RMS 值误差为 0.018λ 。根据上述分析可知, 使用最小二乘迭代算法求得的面形值 PV 值



(a) 第一个面形图



(b) 第二个面形图

图8 傅里叶变换得到的面形图

小于 0.09λ , RMS 值小于 0.02λ 。

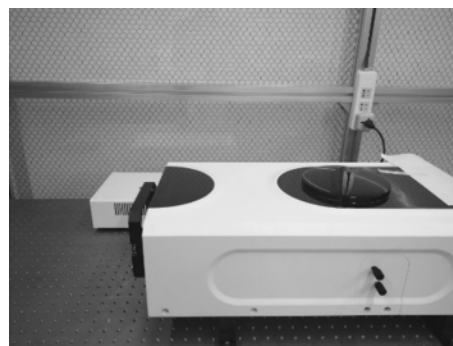


图9 干涉仪装置图

4 结论

本文提出了最小二乘迭代算法,通过不断迭代最小二乘算法,优化了基于最小二乘的相移算法,最终得到精度更高的面形图。该算法可以对多表面干涉时产生的干涉条纹进行运算,从而得到每个表面的面形。由仿真实验可知,当使用该算法对多表面干涉图进行相位提取时,其 PV 误差值小于 0.006λ 。当使用最小二乘法或单幅干涉图傅里叶变化法时,其得到的相位 PV 误差均大于 0.01λ 。虽然该算法需要得到相移时的初始相移值与大致的相移量,但是该算法可以通过每次的迭代校正相移量,由此无需精确的相移值,从而使得到的面形值更加精确。

参考文献

- [1] 于雪莲,田佳峻,姚勇,等.基于单幅干涉图的波前重构技术研究[J].光学与光电技术,2010(1):47-51.
- [2] 刘剑,田爱玲,刘丙才,等.一种变频相移干涉测量的相

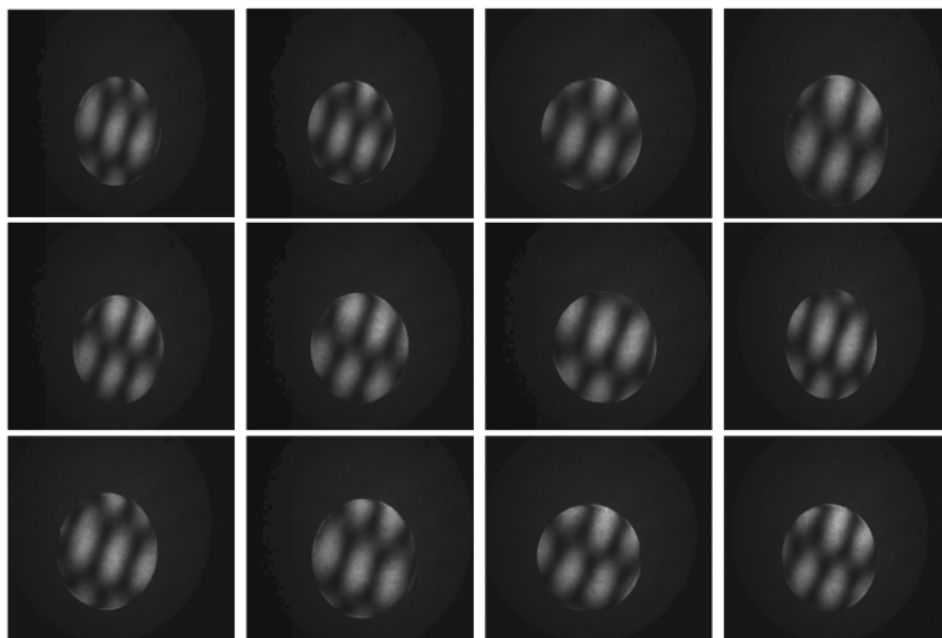
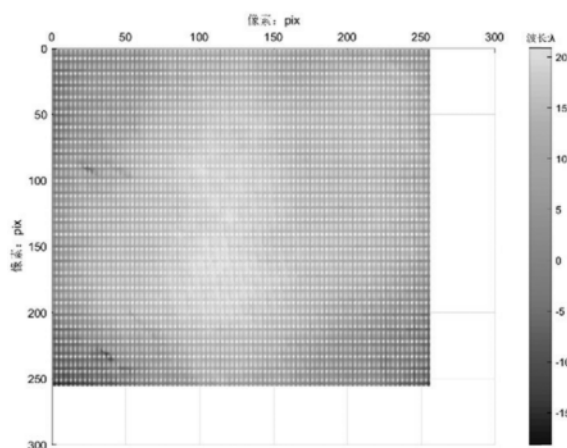
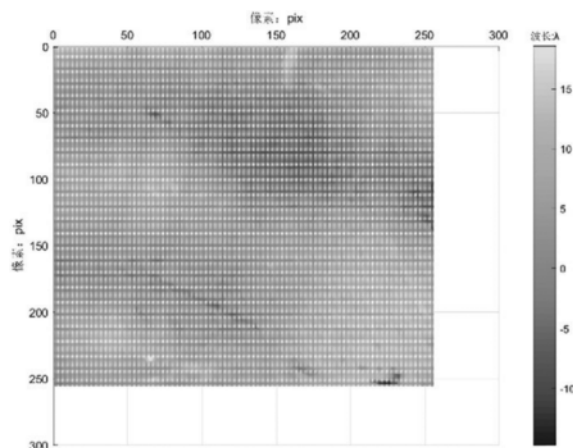


图10 由波长调谐激光干涉仪得到的干涉图

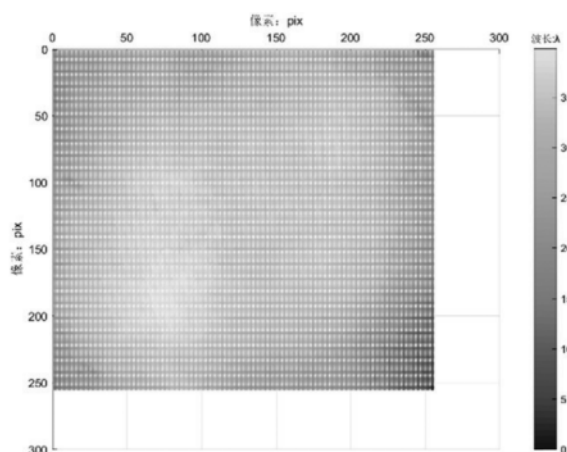


(a) 第一个表面的面形

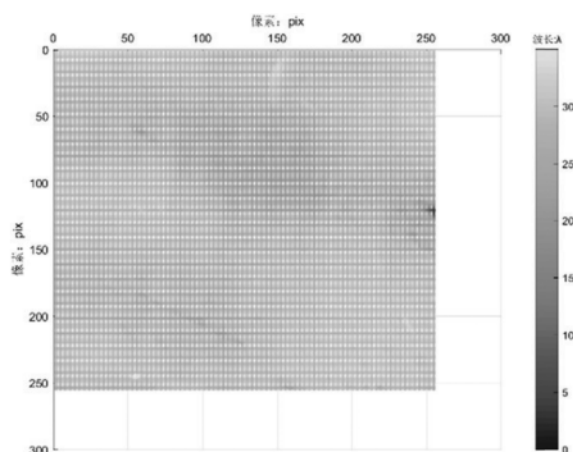


(b) 第二个表面的面形

图 11 由波长调谐激光干涉仪得到的干涉图



(a) 第一个表面的面形



(b) 第二个表面的面形

图 12 由最小二乘迭代得到的面形图

位提取算法[J].光学学报, 2016, 34(3): 112-116.

- [3] Chiayu Ai. Multimode laser Fizeau interferometer for measuring the surface of a thin transparent plate[J]. Applied Optics, 1997, 36 (31): 8135-8138.
- [4] TSURUTA T, ICHIHARA Y. Accurate measurement of lens thickness by using white-light fringes[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1975(S1): 369.
- [5] HOPLER M D, ROGERS J R. Interferometric measurement of group and phase refractive index[J]. Applied Optics, 1991, 30(7): 735-744.
- [6] GROOT P, DECK L. Surface profiling by analysis of white-light interferograms in the spatial frequency domain[J]. Journal of Modern Optics, 1995, 42(2): 389-401.
- [7] 徐建程, 石崎凯, 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.
- [8] ISHII Y, CHEN J, MURATA K. Digital phase-measuring interferometry with a tunable laser diode[J]. Optics Letters, 1987, 12(4): 233-235.
- [9] OKADA K, SAKUTA H, OSE T, et al. Separate measure-

ments of surface shapes and refractive index inhomogeneity of an optical element using tunable-source phase shifting interferometry[J]. Applied Optics, 1990, 29(22): 3280-3285.

- [10] FUKANO T, YAMAGUCHI I. Separation of measurement of the refractive index and the geometrical thickness by use of a wavelength-scanning interferometer with a confocal microscope[J]. Applied Optics, 1999, 38(19): 4065-4073.
- [11] DECK L L. Fourier-transform phase-shifting interferometry[J]. Applied Optics, 2003, 42(13): 2354-2365.
- [12] HIBINO K, OREB B F, FAIRMAN P S. Wavelength-scanning interferometry of a transparent parallel plate with refractive-index dispersion[J]. Applied Optics, 2003, 42(19): 3888-3895.
- [13] HIBINO K, OREB B F, FAIRMAN P S, et al. Simultaneous measurement of surface shape and variation in optical thickness of a transparent parallel plate in wavelength-scanning Fizeau interferometer[J]. Applied Optics, 2004, 43 (6): 1241-1249.
- [14] SURREL Y. Design of algorithms for phase measurements

- by the use of phase stepping[J].Applied Optics, 1996, 35(1): 51-60.
- [15] SCHWIDER J, BUROW R, ELSSNER K E, et al. Digital wave-front measuring interferometry: some systematic error sources[J].Applied Optics, 1983, 22(21): 3421-3432.
- [16] LARKIN K G, OREB B F. Design and assessment of symmetrical phase-shifting algorithms[J].Journal of the Optical Society of America A, 1992, 9(10): 1740-1748.
- [17] MALACARA-DOBLADO D, DORRÍO B V, MALACARA-HERNÁNDEZ D. Graphic tool to produce tailored symmetrical phase-shifting algorithms[J].Optics Letters, 2000, 25(1): 64-66.
- [18] HIBINO K, OREB B F, FARRANT D I, et al. Phase-shifting for nonsinusoidal waveforms with phaseshift errors[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1995, 12(4): 761-768.
- [19] HIBINO K, OREB B F, FARRANT D I, et al. Phase shifting algorithms for nonlinear and spatially nonuniform phase shifts[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1997, 14(4): 918-930.
- [20] 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.
- [21] PHILLION D W. General methods for generating phase-shifting interferometry algorithms[J].Applied Optics, 1997, 36(31): 8098-8115.
- [22] 李泾渭, 辛青, 侯昌伦. 通过傅里叶变换测量多表面面形[J].光学精密工程, 2019(6): 1277-1285.
- (收稿日期: 2020-07-15)
- 作者简介:
- 李泾渭(1994-), 男, 研究生, 主要研究方向: 通过激光干涉技术检测多表面面形的技术。
- 辛青(1981-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向: 纳米材料与器件的制备与研究。
- 侯昌伦(1976-), 通信作者, 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 光学检测、光学成像和微光学传感器, E-mail: hou_cl@hdu.edu.cn。

(上接第 85 页)

- [4] MENDES P R D C, NORMEY-RICO J E, ALBA C B. Economic energy management of a microgrid including electric vehicles[C].Innovative Smart Grid Technologies Latin America, 2016.
- [5] 刘新天, 秦稳稳, 郑昕昕. 电动汽车无线充电系统拓扑与控制策略研究[J].电子技术应用, 2017, 43(5): 155-158.
- [6] 谢檬, 赵录怀, 王娟. 分布式发电微网控制系统的设计[J].电子技术应用, 2017, 43(6): 151-154, 158.
- [7] 庄怀东, 吴红斌, 刘海涛, 等. 含电动汽车的微网系统多目标经济调度[J].电工技术学报, 2014(S1): 374-382.
- [8] 茆美琴, 孙树娟, 苏建徽. 包含电动汽车的风/光/储微电网经济性分析[J].电力系统自动化, 2011, 35(14): 30-35.
- [9] 王璟, 王利利, 郭勇, 等. 计及电动汽车的微网经济调度方法[J].电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 111-117.
- [10] 吴红斌, 侯小凡, 赵波, 等. 计及可入网电动汽车的微网系统经济调度[J].电力系统自动化, 2014, 38(9): 77-84.
- [11] 梁子鹏, 陈皓勇, 王勇超, 等. 含电动汽车的微网鲁棒经济调度[J].电网技术, 2017(8): 256-267.
- [12] 阮文骏, 王蓓蓓, 李扬, 等. 峰谷分时电价下的用户响应行为研究[J].电网技术, 2012, 36(7): 86-93.
- [13] 朱兰, 刘仲, 唐陇军, 等. 充放电不确定性响应建模与电动汽车代理商日前调度策略[J].电网技术, 2018, 42(10): 3305-3314.
- [14] 王蓓蓓, 孙宇军, 李扬. 不确定性需求响应建模在电力积分激励决策中的应用[J].电力系统自动化, 2015, 39(10): 93-99.
- [15] 杨晓东, 任帅杰, 张有兵, 等. 电动汽车可调度能力模型与日内优先调度策略[J].电力系统自动化, 2017, 41(2): 84-93.
- [16] 张莉, 张松. 电动汽车充电站的充放电控制策略研究[J].电子技术应用, 2018, 44(11): 150-153, 157.
- [17] 李睿雪, 胡泽春. 电动公交车光储充电站日运行随机优化策略[J].电网技术, 2017(12): 41-49.
- (收稿日期: 2020-03-10)
- 作者简介:
- 金商鹤(1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力设计。
- 张宇(1970-), 通信作者, 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 电力设计, E-mail: zhangyuxue637388@126.com。
- 王育飞(1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 电力设计。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所