

文章编号: 1001-3806(2011)02-0214-04

## 大口径低分辨率干涉图的3维形貌还原方法

温承华, 黄磊, 张海涛, 邱运涛, 巩马理\*

(清华大学精密仪器与机械学系摩擦学国家重点实验室光子与电子研究中心, 北京100084)

**摘要:** 为了有效处理大口径干涉仪测量过程中得到的低分辨率干涉图, 采用一种通过调和处理和3值化等过程的处理方法, 对实验获得的大口径干涉仪无法处理的干涉图进行了相位滤波处理并还原了对应的3维形貌, 同时与传统Goldstein方法处理的结果进行了对比。结果表明, 该方法提高了低分辨率干涉图的可还原性, 为干涉图后续处理提供了有效手段。

**关键词:** 图像处理; 干涉图; 3维形貌还原; 相位

**中图分类号:** TH744.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.02.020

### A method to restore 3-D surface of large area and low resolution interferogram

WEN Cheng-hua, HUANG Lei, ZHANG Hai-tao, QIU Yun-tao, GONG Ma-li

(Center for Photonics and Electronics, State Key Laboratory of Tribology, Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** For the purpose of dealing with low-resolution interferograms acquired by large-diameter interferometer, a method was presented including homogenization and ternary and so on. The acquired interferograms, which couldn't be processed by interferometers, were filtered and the 3-D surfaces were restored. Compared with the traditional Goldstein filter method, the results show that this method enhances the restoration possibility of low resolution interferogram, and paves the way for its latter process.

**Key words:** image processing; interferogram; 3-D surface restoration; phase

## 引言

干涉图的噪声处理也称滤波, 对于干涉相位图的后续处理如相位解缠、3维形貌还原等都有很重要的意义。为了获得更好的滤波效果, 研究人员不断提出新的干涉相位图滤波方法。比较经典的方法有时域的Lee滤波方法<sup>[1]</sup>、频域的Goldstein滤波方法<sup>[2]</sup>、应用离散小波变换(discrete wavelet transform, DWT)的干涉相位图滤波方法<sup>[3]</sup>。然而, 上述处理方法仅是对于小口径干涉图有非常良好的滤波效果, 对于大口径干涉图的滤波处理的研究相对较少。另外还有一种静态小波变换<sup>[4]</sup>的滤波方法也是将大口径干涉图通过分块处理小干涉图的方法。

干涉图的3维形貌还原技术目前主要采用移相干

涉术。移相干涉术自20世纪70年代提出以来, 至今已发展成为高精度光学干涉测试的最重要的一种方法。移相式数字平面干涉仪<sup>[5-6]</sup>测量光学平面平整度的不确定度可达 $\lambda/50$  ( $\lambda = 0.633\mu\text{m}$ )。然而对于大口径且分辨率不高的干涉图, 移相干涉术提取的干涉图相位存在非常大的误差<sup>[7]</sup>。另外移相干涉术也无法处理单幅干涉图。

本文中给出了一种对单幅“大口径、低分辨率”干涉图的滤波处理和3维形貌还原的方法。处理的干涉图有两个, 其中一个是由42cm ZYGO干涉图测量得到, 图像分辨率为250像素×250像素; 另一个是由82cm ZYGO干涉仪测量得到, 图像分辨率为1000像素×1000像素。由于干涉条纹密集和干涉条纹噪音较多, ZYGO干涉仪没有给出其3维面形图。采用本文中的方法, 得到了该干涉图的3维面形图, 但是由于无法获得原始3维面形数据, 重建精度有待进一步的研究。该方法无法有效处理干涉图局部连通的情况, 这是由于采用的是单个原点向外扩散分别对干涉图每个像素点赋值来还原3维面形。

**作者简介:** 温承华(1986-), 男, 硕士研究生, 主要从事主动反射镜方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: gongml@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2010-04-21; 收到修改稿日期: 2010-06-01

## 1 方法与原理

### 1.1 整体调和处理

在大尺度的干涉测量中,得到的干涉图的整体光强的分布很不均匀。这样直接采用等照度等方式处理干涉图就会带来很大的误差。因此,需要采用一个光强的面形调和函数来使得光强均匀化,以便于后续处理。一种简单且有效的处理方法就是通过求局部光强的平均值作为参考值,这里的局部光强包含几个明条纹和暗条纹,取平均值后能很好地反映该局部的实际光强大小。然后该局部的所有像素点的光强值除以参考值作为对应像素点的相对光强值。如下式所示:

$$P_{\Omega^*}(x,y) = \frac{\sum_{\Omega^*} I(x,y)}{\sum_{\Omega^*} 1} \quad (1)$$

$$J(x,y) = \frac{I(x,y)}{P(x,y)} \quad (2)$$

式中, $\Omega^*$ 是局部区域, $I(x,y)$ 是坐标 $(x,y)$ 处的光强值, $P_{\Omega^*}(x,y)$ 是在局部区域 $\Omega^*$ 内的光强平均值。 $J(x,y)$ 是 $(x,y)$ 处的相对光强值。

### 1.2 “三值化”处理

一般ZYGO干涉仪得到的干涉图是TIFF格式的图形,这种图形的像素点是 $1000 \times 1000$ 。而测量大口径的形貌表面时,由于尺度大原因导致的表面峰谷值较大(大于 $20\lambda$ ),进而干涉图的条纹相对较密。这样两像素点间的相位跳跃可能很大,例如,如果一个明条纹的宽度只有2个像素点,那么相应的两像素点相位差值为 $45^\circ$ 。本文中考虑一种更适合计算机处理的方式,就是将所有的像素点划分为3类,分别是明值(值为1)、暗值(值为0)和中值(值为0.5)。

在讨论“三值化”前,先简单介绍下“二值化”的情况。这里“二值化”就是上述“三值化”没有中值的情况。“二值化”中,“明值”和“暗值”分别代表对应点处在明条纹和暗条纹的情况。如下式所示:

$$Q(x,y) = \begin{cases} 1, (J(x,y) > 1) \\ 0, (J(x,y) \leq 1) \end{cases} \quad (3)$$

式中, $Q(x,y)$ 表示 $(x,y)$ 像素点对应的明暗条纹。这样整个图形就被分解成归属于明暗条纹的点组成,并且很容易找到归属与同一个明条纹(或暗条纹)的点,因为同一个明(暗)条纹的连续性。为后面面形的恢复做好了铺垫。

之所以采用“三值化”,是因为考虑到有些像素点特别是明、暗条纹中间过度点是很难区分处于明条纹还是暗条纹,而且由于干涉图本身光强分布不均的

原因有可能导致个别像素点出现偏差。“三值化”的“中值”就是用于处理这种个别像素点的。其表达式如下:

$$Q(x,y) = \begin{cases} 1, (J(x,y) > 1.05) \\ 0.5, (J(x,y) \in [0.95, 1.05]) \\ 0, (J(x,y) < 0.95) \end{cases} \quad (4)$$

### 1.3 干扰数据纠正

虽然经过整体调和后的干涉图像光强分布较为均匀,“三值化”后的数据大部分能满足对应阈值,但是仍然存在干扰数据。其中上面“三值化”的“中值”也可以看成是干扰数据<sup>[8]</sup>。

“中值”的纠正就是“中值”归属为“明值”还是“暗值”的过程。一般遵循的原则是“区域少数服从多数”。当然考虑同一个明(暗)条纹的连续性,也要采用到数据修正的方法,尽量保证同一明(暗)条纹中间的暗(明)斑的干扰数据得到纠正。干扰数据纠正的表达式如下(当 $Q(x,y)=0.5$ 时):

$$Q(x,y) = \begin{cases} 1, (\sum Q(x-1:x+1, \\ y-1:y+1) > 4.5) \\ 0, (\sum Q(x-1:x+1, \\ y-1:y-1:y+1) \leq 4.5) \end{cases} \quad (5)$$

因为考虑到“三值化”后的数据具有很高的细节性,本例中不采用Fourier函数等通用滤波方法来纠正干扰数据。

### 1.4 3维形貌还原

干扰数据纠正后的图形已经具有比较理想的干涉图形貌。需要通过选定原点,采用同一明(暗)条纹的值相等,相邻明暗条纹间相差半个波长的方式扩展,恢复所有像素点对应的3维面形的相对高度值。这种还原方法对于原点的选择比较注重,并且对于相邻明暗条纹间是增加或减少半个波长要引入梯度的量。梯度取正时为增加,梯度为负时为减少。可以通过如下式表示:

$$S_{\Omega_2}(x,y) = S_{\Omega_1}(x,y) + 0.5\lambda G(\Omega_1, \Omega_2) \quad (6)$$

式中, $S(x,y)$ 表示 $(x,y)$ 像素点对应的3维形貌高度值, $\Omega_1, \Omega_2$ 表示相邻的明暗(暗明)条纹,同一明(暗)条纹有相同的高度值, $\lambda$ 为干涉图使用的波长, $G(\Omega_1, \Omega_2)$ 表示从 $\Omega_1$ 到 $\Omega_2$ 的梯度方向值(梯度为正时 $G=1$ ,梯度为负时 $G=-1$ )。

3维形貌还原采用“聚类”和“拓展”的方式。“聚类”就是将同属同一个明(暗)条纹的点聚为一类。“拓展”则是从一个已经聚集的类延展到相邻的类进而延展到整个干涉图像素点。“聚类”和“拓展”的过程可通过从一个原点迭代实现。上述的 $\Omega_1, \Omega_2$ 就是

两个相邻的类。从  $\Omega_1$  到  $\Omega_2$  的重建过程就是“拓展”过程。

由于明暗条纹间过度的位置对应的值有突变,使得还原后的 3 维形貌图出现突变的边缘(明暗条纹的边缘),需要采用一种平滑处理的方法来平滑 3 维形貌图并减小干涉图的误差。

该平滑处理的方式是在一个像素点周围的小区域内,通过加权取平均值的方式取得平均值作为该像素点平滑处理后的值。表达式如下:

$$S^*(x, y) = \sum_{\Omega'} S(x', y') T_{\Omega'}(x', y') \quad (7)$$

$$\sum_{\Omega'} T_{\Omega'}(x', y') = 1 \quad (8)$$

(7)式中,  $S^*(x, y)$  表示平滑处理后的 3 维形貌  $(x, y)$  像素点对应的高度值。  $\Omega'$  为以  $(x, y)$  像素点为中心的局部区域,  $(x', y')$  为  $\Omega'$  内的像素点。  $T_{\Omega'}(x', y')$  表示  $(x', y')$  像素点对于  $(x, y)$  像素点的权值, 满足权值和为 1 的归一化条件。

### 1.5 相位恢复与检验

上述“3 维形貌还原”过程中的平滑处理,实际上就对相位进行了平滑恢复。本来按照“2 值化”处理后像素点的相位误差最大可以达到 1/4 个波长,平滑处理后相位误差将大大减少,特别是对于连续光滑表面的干涉图。同时,可以通过 3 维形貌图的等高线图来检验 3 维形貌还原的好坏情况。如果等高线图与干涉图的形状非常接近,说明形貌还原过程误差很小。如果等高线图与干涉图的形状差别较大,则需重新选择各处理函数重新还原形貌。

### 1.6 图像处理的程序流程

整个流程如图 1 所示。其中,流程图中的图形预

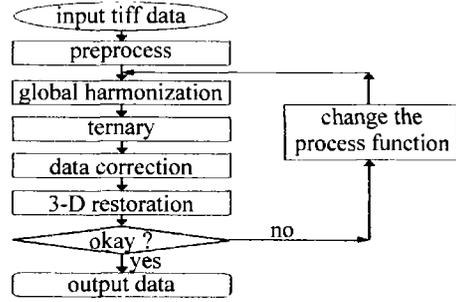


Fig. 1 Flow chart of imaging process

处理主要是指对干涉图的预先处理,包括攫取干涉图中有效面形部分的数据,将倾斜的干涉图旋转成方便处理的竖直形状干涉图。这在第 2 节的干涉图处理实例中都使用到。

## 2 干涉图处理实例

图 2a~图 2f 是采用 42cm ZYGO 干涉仪测量的干涉图。该干涉图经过压缩后分辨率只有 250 像素 × 250 像素。图 2a 是原始干涉图。图 2b 是原干涉图的光强分布,其中局部区域  $\Omega^*$  采用的是 5 像素 × 5 像素。图 2c 是经过光强调和后的干涉图,可以看出,调和后光强的分布较原干涉图均匀很多。图 2d 是经过“3 值化”处理后并且对“中值”纠正处理后的干涉图。图 2e 是通过迭代 128 次“聚类”、“拓展”后的 3 维形貌图。图 2f 是该 3 维形貌图的等高线图。对比图 2f 和图 2d 可以看出,局部面形未能还原,这是由于在“3 维形貌还原”步骤中采用单个原点向外扩展会出现因图像质量差而无法还原的问题。同时,采用单个原点向外扩展的过程也无法有效处理有局部连通的干涉图。如果局部连通现象不多,可以通过采用多个基点向外扩展的方式实现。

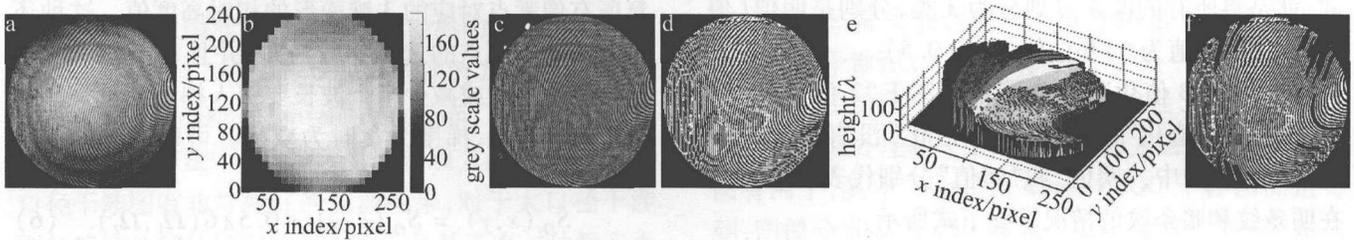


Fig. 2 Process steps of interferogram of medium size

a—original interferogram b—homogenization function c—after homogenization d—after ternary e—3-D surface appearance f—contour map

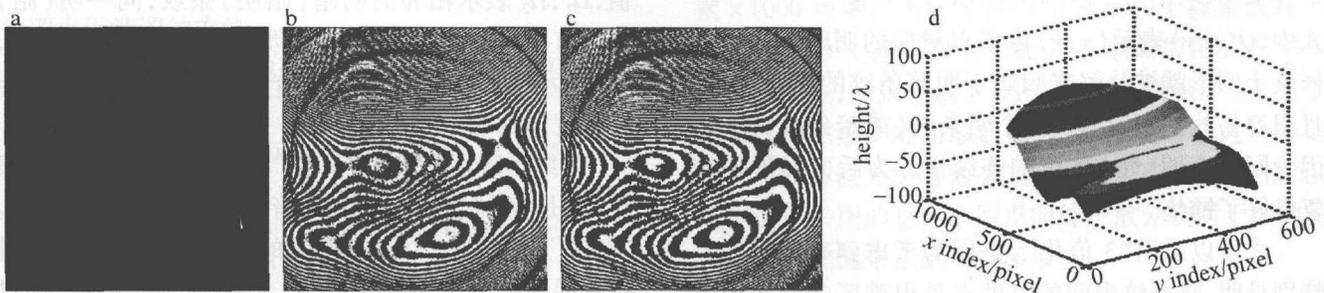


Fig. 3 Process steps of interferogram of large size

a—original interferogram b—after ternary c—after filtering d—3-D surface appearance

图3a到图3d是采用82cm ZYGO干涉仪测量的干涉图,该干涉图的分辨率是1000像素×1000像素。从图3a看出,原始干涉图有效面形部分并没有充满这个图形,并且有效面形呈现一定选择角度。经过预处理、整体调和处理和“3值化”后,干涉图的面形情况见图3b。图3b经过干扰数据纠正后的干涉图参见图3c。然后迭代256次3维形貌还原,再平滑化处理后得到3维形貌,见图3d。图中存在一个局部连通现象,通过采用两个基点处理的方式,顺利地还原了干涉图的3维形貌。

### 3 实验结果分析

用本文中“3值化”处理算法处理图3a所示的原始干涉图(有效口径400mm×400mm,图像大小1000×1000,峰谷值 $67\lambda$ )。并与传统的Goldstein滤波对比,从而说明本算法在低分辨率干涉相位图滤波上的优势。经过试验比较,对干涉图的局部(150×150大小范围),采用单原点拓展方式,Goldstein滤波强度参量 $\alpha=0.8, \alpha \in [0,1]$ <sup>[2]</sup>。原始干涉相位图局部以及对应的Goldstein滤波和“3值化”滤波情况如图4所示。

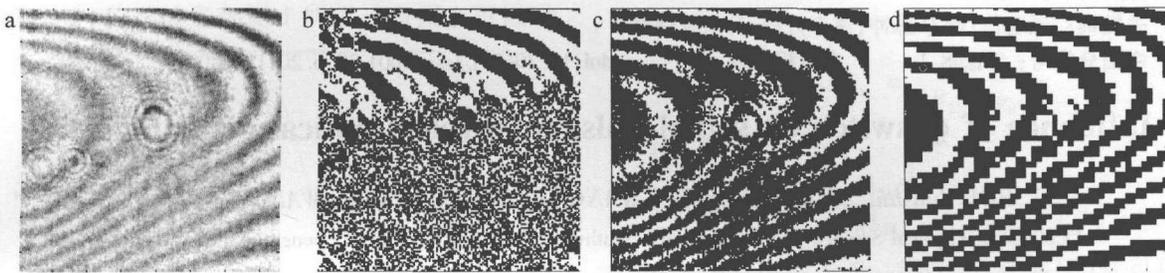


Fig. 4 Interferogram with different filters

a—original interferogram b—goldstein method c—novel method, after ternary d—novel method, after filtering

本节中用残余点<sup>[9]</sup>的数目来评价滤波效果,计算各滤波结果中的残余点数目如表1所示。

Table 1 Residues contrast with using different filters

filter method	original interferogram	Goldstein method	novel method after ternary	novel method after filtering
number of residues	5734	11375	1765	197

比较表1的数据,对于这种在400mm×400mm范围内有效数据只有1000×1000个、峰谷值大于 $20\lambda$ 的低分辨率干涉图,采用传统的Goldstein滤波方式反而使残余点数增大了接近两倍,而且从图4b可见,Goldstein滤波也导致了严重的失真现象。采用本算法则大大地降低了残余点数,而且从图4d可见,本算法可以处理这种低分辨率干涉图。

### 4 结论

小口径干涉相位图的处理方法目前已经有很多行之有效的方法。但对于大口径低分辨率的相位图,这些经典的方法反而带来更大的误差。给出了一种有效处理大口径低分辨率干涉图的方法,并通过MATLAB编程实现了对ZYGO干涉仪干涉图的相位处理和3维面形形貌的还原。由于无法得到原始面形的数据,该方法的重建精度有待进一步研究。

#### 参 考 文 献

[1] LEE J S, PAPATHANASSIOU K P, AINSWORTH T L. A new tech-

nique for noise filtering of SAR interferometric phase images[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(5): 1456-1465.

- [2] GOLDSTEIN R M, WERNER C L. Radar interferogram filtering for geophysical applications[J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25(21): 4035-4038.
- [3] MARTINEZ C L, FABREGAS X. Modeling and reduction of SAR interferometric phase noise in the wavelet domain[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(12): 2553-2566.
- [4] WANG P, WANG Y F, ZHANG B Ch, et al. In SAR interferogram filtering method in stationary wavelet domain[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2008, 23(1): 70-74 (in Chinese).
- [5] ZHU R H, CHEN J B, WANG Q, et al. A new algorithm on phase shifting interferometry—the overlapping averaging 4-frame algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 1994, 14(12): 1288-1293 (in Chinese).
- [6] CHEN J B, SONG D Zh, ZHU R HONG, et al. High accuracy and large aperture optical standard—phase shifting digital flat interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 1995, 15(4): 480-485 (in Chinese).
- [7] LIU J F, LI Y Q, LIU K. Technical problems in phase-shifting point diffraction interferometer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(4): 179-182 (in Chinese).
- [8] ZHANG J, LI G H, HAO D Zh. The theory of correcting the deviation of retardation of wave-plate[J]. Laser Technology, 2006, 30(4): 361-365 (in Chinese).
- [9] GOLDSTEIN R M, ZEBKER H A, WERNER C L. Satelliteradar interferometry: two dimensional phase unwrapping[J]. Radio Science, 1988, 23(4): 713-720.