

文章编号: 0253-2239(2009)07-1812-06

移相干涉术中有分割遮拦干涉图的相位展开

刘 克^{1,3} 李艳秋²

(¹中国科学院电工研究所, 北京 100190; ²北京理工大学光电学院, 北京 100081; ³中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 在质量图导引路径积分法的基础上, 提出了一种适用于移相干涉术中有分割遮拦干涉图的相位展开方法, 可以有效地解决不同有效区域之间相位展开结果不连续的问题。首先, 采用图像修复方法, 根据有效区域中包裹相位的纹理特征对遮拦区域进行填充, 使被遮拦分割的各个有效区域连通, 相位展开路径可以通过各个有效区域。在此基础上, 提出了一种新的质量图, 导引相位展开沿着相位变化最小的路径穿过各个有效区域之间的填充区域, 以保证不同有效区域中属于同一干涉级次的包裹相位主值加减 2π 的倍数相同。研究表明, 这种方法能有效地防止相位展开结果中 2π 整数倍的全局误差, 使不同有效区域相位展开结果连续。

关键词 光学测量; 相位展开; 路径积分法; 质量图; 遮拦

中图分类号 TN911.74 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092907.1812

Phase Unwrapping of Interferogram with Obscurations in Phase-Shifting Interferometry

Liu Ke^{1,3} Li Yanqiu²

¹ Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China
² School of Optoelectronics Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China
³ Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract A new phase unwrapping method based on qualitymap-guided path-integral method is presented to deal with the discontinuous unwrapping result of the interferogram with obscurations in phase-shifting interferometry. First, the obscured regions are filled according to the texture feature of wrapped phase data in adjacent valid regions by image repair. The valid regions are connected together in this way and thus path-integral phase unwrapping can be conducted through different valid regions. To ensure the same addition or subtraction of integral multiple of 2π between wrapped phase in the same fringe order but different valid regions, a path-integral phase unwrapping method based on a new quality map is proposed. The new quality map can lead the integral path to follow the minimum phase variation direction through the filled regions. The unwrapping result shows that, the presented method is effective to avoid the global error of integral multiple of 2π between different valid regions in phase unwrapping of interferogram with obscurations in phase-shifting interferometry.

Key words optical measurement; phase unwrapping; path-integral method; quality map; obscuration

1 引 言

相位展开也叫相位解包裹或相位解缠, 是光学干涉测量数据处理中的关键技术之一, 被广泛应用于光学测量、干涉合成孔径雷达、自适应光学、医学磁共振成像等领域中。相位展开问题可以归结为:

在干涉条纹的空间采样频率满足 Nyquist 定律的前提下, 将各个干涉级次位于 $(-\pi, \pi]$ 主值区间内的包裹相位值加上或减去 2π 的整数倍, 重建波面实际相位^[1]。现有的相位展开方法从原理上可以分为路径积分方法和最小范数方法两种^[2], 研究主要集中在

收稿日期: 2008-06-23; **收到修改稿日期**: 2008-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(10674134)、教育部长江学者和创新研究团队计划(PCSIRT)和北京理工大学基础研究基金(20070142008)资助课题。

作者简介: 刘 克(1980—), 男, 博士研究生, 主要从事光学干涉测量技术的研究。E-mail: liukess2008@gmail.com

导师简介: 李艳秋(1962—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事精密光学和微纳技术研究。E-mail: liyanqiu@bit.edu.cn

在如何有效地抑制干涉图的噪声、无效区域、低调制度、条纹欠采样等因素引起的相位展开误差。

利用移相干涉术检测有分割遮拦的光学系统(如 RC 系统、折反系统等)或者光学元件时,干涉图被遮拦分割为多个区域,从而采用移相法计算出的包裹相位数据也被分割在不同的有效区域中,相位展开在各个有效区域中独立进行,将失去波面的连续性。图 1(a)为一个有分割遮拦的包裹相位图,图中的黑色十字线代表遮拦,将包裹相位分割为 4 块有效区域;图 1(b)为采用质量图导引路径积分法^[3]相位展开结果,图 1(a)和(b)均以灰度图像表示,最暗的地方相位值最小,最亮的地方相位值最大;包裹相位中相位最大和最小值分别为 π 和 $-\pi$;图 1(c)

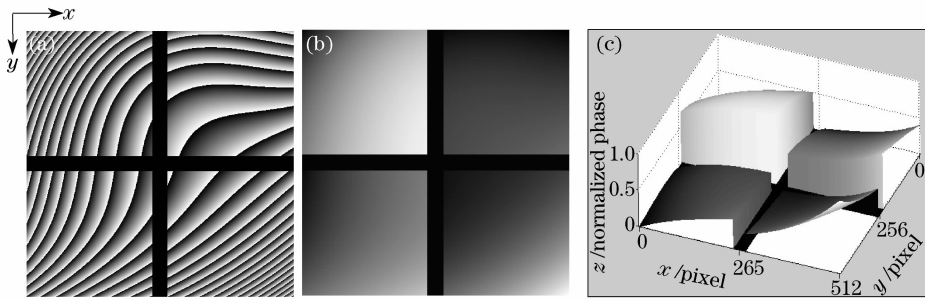


图 1 有分割遮拦干涉图的相位展开。(a)有分割遮拦包裹相位图;(b)质量图导引路径积分法展开结果;(c)图 1(b)归一化处理后的三维图

Fig. 1 Phase unwrapping of interferogram with obscurations. (a) wrapped phase with obscurations; (b) phase unwrapping result using path-integral algorithm based on quality guidance; (c) normalized 3D representation of fig. 1(b)

本文在质量图导引路径积分法的基础上,提出了一种新的适用于有分割遮拦干涉图的相位展开方法。计算机模拟和实验研究结果表明,这种方法能有效地解决有分割遮拦干涉图的相位展开问题,即使对于密集且形状不规则的有分割遮拦干涉条纹,也可以使被遮拦分割的不同有效区域之间相位展开结果连续。

2 原 理

本文提出的相位展开方法核心思想是:首先采用图像修复方法,根据有效区域包裹相位的纹理特征对遮拦区域进行填充,使被遮拦分割的各个有效区域连通;由于质量导引法使用一个表征包裹相位

为图 1(b)归一化处理后的三维图。如图 1 所示,4 块有效区域内的包裹相位被独立展开,导致 4 块区域之间产生 2π 整数倍的全局误差,相位展开结果不连续。解决这个问题关键是建立有效的判据,判断不同有效区域中属于同一干涉级次的包裹相位数据,保证其加减 2π 的倍数相同。通常,可以利用位于相邻两个有效区域边缘的数据点、条纹中心线、条纹载波频率等手段建立简单的判据,并对其中某一个有效区域展开后的相位数据实施整体加减 2π 整数倍的操作,使得两个区域中属于同一干涉级次的数据点相位差小于 2π 。但是,在干涉条纹载波频率较大(密集条纹)且像差较为严重(条纹形状不规则)时,这些判据往往失去了作用。

质量的质量图来引导相位展开路径,通过求解填充后包裹相位的质量图,就可以引导相位展开路径通过各个有效区域;在此基础上,提出了一种新的质量图,导引相位展开沿着相位变化最小的路径穿过各个有效区域之间的填充区域,以保证不同有效区域中属于同一干涉级次的包裹相位主值加减 2π 的倍数相同。

2.1 质量图导引路径积分法

Itoh^[4]指出相位展开可以通过对包裹相位梯度的积分或求和来实现,可以很容易将 Itoh 方法从一维推广到二维,实现二维相位展开,对于二维包裹相位 $\phi_{i,j}$, x 和 y 方向的包裹相位梯度 $\Delta_{i,j}^x$ 和 $\Delta_{i,j}^y$ 为

$$\Delta_{i,j}^x = \begin{cases} W[\phi_{(i+1),j} - \phi_{i,j}], & i = 0, 1, 2, \dots, M-1; j = 0, 1, 2, \dots, N \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (1)$$

$$\Delta_{i,j}^y = \begin{cases} W[\phi_{i,(j+1)} - \phi_{i,j}], & i = 0, 1, 2, \dots, M; j = 0, 1, 2, \dots, N-1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (2)$$

其中, W 为包裹算子, M 和 N 为包裹相位图的行列数。路径积分法就是沿一定的积分路径对包裹相位梯度积分, 来重建真实的相位, 其特点在于展开处理是局域的, 针对每一个像素进行的。当包裹相位图被遮拦分割为多个有效区域时, 遮拦的存在破坏了积分路径的连续性, 导致各个有效区域独立展开, 各个区域之间产生 2π 整数倍的全局误差, 这就是图 1 中包裹相位展开结果不连续的原因。

质量图导引路径积分法使用一个表征包裹相位质量的质量图引导积分路径实现相位展开, 算法实现过程如下:

- (1) 计算包裹相位的质量图, 并对所有像素点的质量值排序;
- (2) 从质量图中取出质量值最高的点作为相位展开的起点, 同时把它标记为已展开点, 把该点的 4 个相邻点分别以起始点为参照点进行相位展开, 同时把 4 个相邻点按其质量值的高低排序存放在一个毗邻队列 Q 中;
- (3) 取出 Q 中质量值最高的点, 同时把它标记为已展开点, 以该点为参照点对它的 4 个相邻点中未被展开的点进行相位展开, 并放入 Q 中, 按质量值高低对 Q 重新排序;
- (4) 重复步骤(3), 直到 Q 为空。

质量图导引法实质是一种区域增长法。在包裹相位质量较高的区域, 仅当毗邻队列中全部为质量相对较低的点时, 其相邻点才会被展开; 在包裹相位质量较低的区域, 积分路径将沿着该区域中质量相对较高的点穿过该区域, 到达另一个质量较高的区域。质量导引法的这种特点非常适合对遮拦区域填充后的包裹相位进行展开。通过定义新的质量图, 使相位展开首先在某一个有效区域内进行, 待该区域中大部分数据点展开后, 质量图导引积分路径沿着填充区域中质量较高的点穿过该区域到达另一个有效区域, 可以有效地避免填充结果不理想所导致的相位展开误差。

图 2(a) 为采用一种基于样本块匹配的图像修

复方法^[5]对图 1(a) 的遮拦区域填充后的包裹相位图。填充结果将 4 个有效区域连通, 且填充区域中绝大部分干涉级次的包裹相位与相邻有效区域对应。但是在图中白线所示的区域中出现了干涉级次的错位现象, 存在严重的相位跳变, 如图 2(b) 所示。在相位展开时, 应避免积分路径穿过该区域实现两个有效区域的连通, 否则两个有效区域之间会产生 2π 的全局误差。

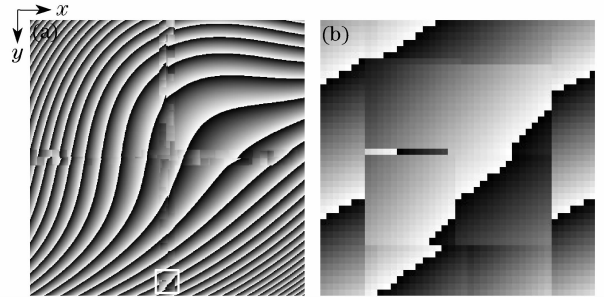


图 2 基于样本块匹配的图像修复。(a)图 1(a)中遮拦区域的填充结果;(b)图 2(a)中白线区域的放大显示
Fig. 2 Sample-based image repair. (a) Filling result of obscuration regions in Fig. 1(a); (b) magnified display of white line region in Fig. 2(a)

2.2 质量图的生成

质量图是表述包裹相位图中每个像素数据质量高低的二维数据阵列。通常, 为了抑制干涉图的噪声、低调制度等因素引起的相位展开误差, 常用的几种质量图包括伪相关质量图、相位导数偏差质量图、最大相位梯度质量图、调制度质量图等^[2, 6]。对于图 2(a) 所示的包裹相位图进行相位展开, 不仅要抑制有效区域中噪声等因素导致的局部误差, 更要防止填充区域相位不连续可能导致的各个有效区域之间 2π 整数倍的全局误差。本文提出了一种新质量图, 可以有效地解决以上问题。

相位导数偏差质量图被认为是目前对包裹相位数据质量最精确的估计^[2], 可以有效地抑制噪声、低调制度等因素导致的相位展开误差, 适用于绝大多数干涉图的相位展开。包裹相位图中 (m, n) 处的相位导数偏差质量 $q_{var, m, n}$ 定义为

$$q_{var, m, n} = \frac{\sqrt{\sum_{i=m-\frac{k}{2}}^{m+\frac{k}{2}} \sum_{j=n-\frac{k}{2}}^{n+\frac{k}{2}} (\Delta_{i,j}^x - \overline{\Delta_{m,n}^x})^2} + \sqrt{\sum_{i=m-\frac{k}{2}}^{m+\frac{k}{2}} \sum_{j=n-\frac{k}{2}}^{n+\frac{k}{2}} (\Delta_{i,j}^y - \overline{\Delta_{m,n}^y})^2}}{k^2}, \quad (3)$$

其中 k 为以 (m, n) 为中心的方形窗口尺寸, $\Delta_{i,j}^x$ 和

$\Delta_{i,j}^y$ 为(1)式和(2)式所定义的 x 和 y 方向包裹相位

梯度, $\overline{\Delta_{m,n}^x}$ 和 $\overline{\Delta_{m,n}^y}$ 为以 (m,n) 为中心的 $k \times k$ 窗口内包裹相位梯度的均值。

但是, 当包裹相位图中存在相位跃变时, 相位导数偏差质量图不能清楚地标识出这些相位不连续的位置。图 3(a) 为图 2(a) 所示包裹相位图的相位导数偏差质量图, 图中以点的亮度表示其对应的质量

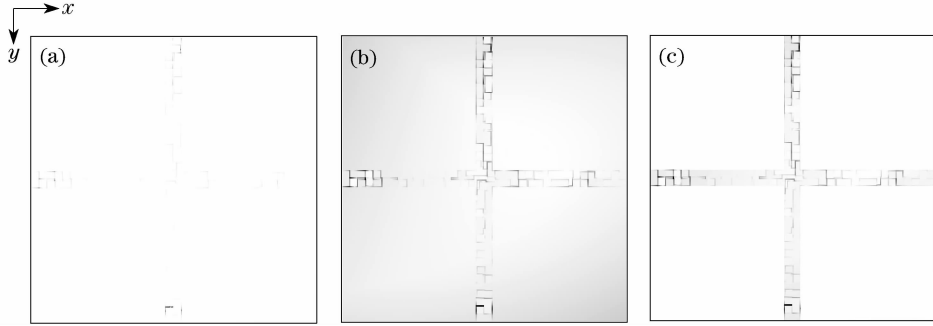


图 3 图 2(a) 中包裹相位的质量图。(a) 相位导数偏差; (b) 最大相位梯度; (c) 新质量图

Fig. 3 Quality map of wrapped phase in Fig. 2(a). (a) Phase derivative deviation; (b) maximum phase gradient; (c) new quality map

最大相位梯度质量图把当前像素的相位梯度取其邻域相位梯度中的最大值, 是一种低估包裹相位的保守策略, 但是在标识相位跃变位置时却体现出可靠性高的特点。包裹相位图中 (m,n) 处的最大相位梯度质量 $q_{\text{gra } m,n}$ 定义为

$$q_{\text{gra } m,n} = \max\{ \max[|\Delta_{i,j}^x|]_{(k \times k)}, \max[|\Delta_{i,j}^y|]_{(k \times k)} \}. \quad (4)$$

如图 3(b) 所示, 最大相位梯度质量图虽然在有效区域内低估了包裹相位的质量, 但是能够清楚地标记出填充区域中的相位跃变位置, 提供了可靠的屏障, 使得相位展开沿着填充区域中相位变化最小的路径进行, 能够有效地避免相邻有效区域之间全局误差的产生。

将这两种质量图结合起来, 在有效区域使用 $q_{\text{var } m,n}$ 定义包裹相位质量, 抑制有效区域中噪声等因素导致的相位展开局部误差; 在填充区域使用 $q_{\text{var } m,n} \times q_{\text{gra } m,n}$ 定义包裹相位质量, 防止填充区域相位跃变所导致的 2π 全局误差。新质量图定义为

$$q_{m,n} = \begin{cases} q_{\text{var } m,n}, & (m,n) \in \text{valid region} \\ q_{\text{var } m,n} \times q_{\text{gra } m,n}. & (m,n) \in \text{filled region} \end{cases} \quad (5)$$

如图 3(c) 所示, 使用新质量图导引积分路径, 相位展开将首先在某一个有效区域内进行, 待该区域内数据点展开完毕后, 相位展开将沿着相邻填充区域中相位变化最小的路径“迅速”穿过填充区域到达另一个有效区域, 以实现两个有效区域之间相位展开结果连续。对于图 2(b) 中存在严重相位跳变的区域, 与相位导数偏差质量图相比, 新质量图提供

值, 质量值高的点的对应的亮度高, 质量值低的点对应的亮度低。对比图 3(a) 和图 2(a) 可知, 该质量图不能很好地标识填充区域中的相位跃变, 使得积分路径容易穿过相位跃变位置实现相邻有效区域的相位展开, 导致 2π 整数倍的相位展开误差。

了更为可靠的隔离带, 如图 4 所示。图 4(a)、(b)、(c) 分别为图 2(b) 包裹相位图的相位导数偏差、最大相位梯度和新质量图; 图 4(d)、(e)、(f) 分别为三种质量图的三维显示, 为了便于观察, 对质量值进行了取反。在相位展开过程中, 新质量图可以利用其更为可靠的隔离带, 有效地避免使用该区域相位数据连通其相邻的两个有效区域, 防止全局误差的产生。

3 实验结果与讨论

使用本文提出的相位展开方法, 对图 1(a) 的包裹相位展开结果如图 5(a) 所示, 图 5(b) 为图 5(a) 归一化处理后的三维图。相位展开结果表明, 即使对于图 1(a) 中密集且形状复杂的包裹相位图, 这种方法也可以使相位展开沿着相位变化最小的路径穿过填充区域, 使相邻有效区域之间的相位展开结果连续。

由于需要采用图像修复方法对遮拦区域进行填充, 本方法的计算速度受填充区域大小的限制。但是, 干涉图中的分割遮拦通常是由固定镜头所需要的支架导致的, 在保证强度的情况下, 支架通常可以做到很细, 因此干涉图中分割遮拦区域面积通常较小。采用图像修复方法对遮拦区域进行填充时, 为了提高计算速度, 只需要对分割遮拦区域填充, 使得不同有效区域连通, 就可以采用质量图导引积分路径经过各个有效区域完成相位展开。

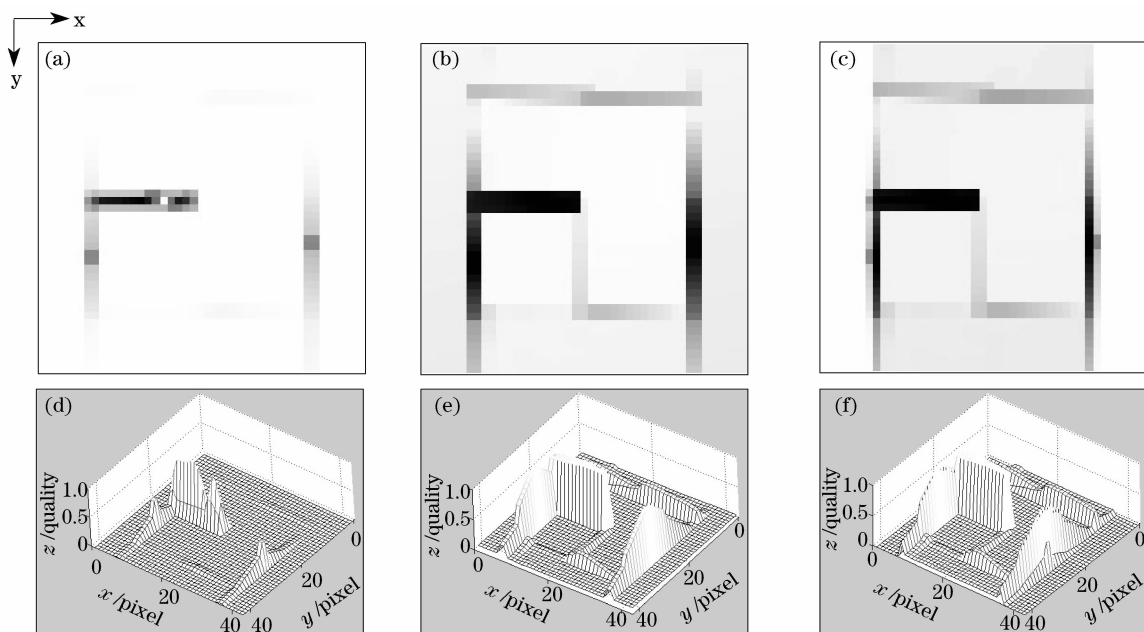


图 4 图 2(b)中包裹相位的质量图。(a)相位导数偏差;(b)最大相位梯度;(c)新质量图;(d)图 4 (a)的三维显示;(e)图 4(b)的三维显示;(f)图 4(c)的三维显示

Fig. 4 Quality map of wrapped phase in Fig. 2(b). (a) Phase derivative deviation; (b) maximum phase gradient; (c) new qualitymap; (d) 3D representation of Fig. 4(a); (e) 3D representation of Fig. 4(b); (f) 3D representation of Fig. 4(c)

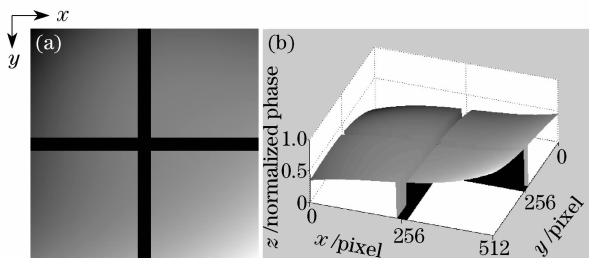


图 5 图 1(a)包裹相位展开结果。(a)二维灰度图表示;(b)三维图表示

Fig. 5 Phase unwrapping result of wrapped phase in Fig. 1(a). (a) 2D gray scale display; (b) 3D display

本方法已经成功地应用在使用自主研制的相移点衍射干涉仪测量 Schwarzschild 投影物镜波像差的干涉图处理过程中。图 6(a)为实验中采集到的移相干涉图中的一幅,已经利用区域自动识别算法^[7]进行了有效区域的选取,图像大小为 512pixel × 512pixel,干涉条纹调制度为 0.42,且噪声较严重。干涉条纹被支架遮拦分割在 3 个有效区域中,因此采用移相法提取相位得到的包裹相位图也被分割为 3 个有效区域。为了提高计算速度,图像修复时只对 3 个支架遮拦区域进行填充,如图 6(b)所示,图中有包裹相位数据部分为有效区域,白色部分为待填充区域,黑色部分为无效区域。图 6(c)为填充后的包裹相位图,仅对图 6(b)中白色区域进行了填充,计算速度为 30 s。为了进一步提高计算速度,

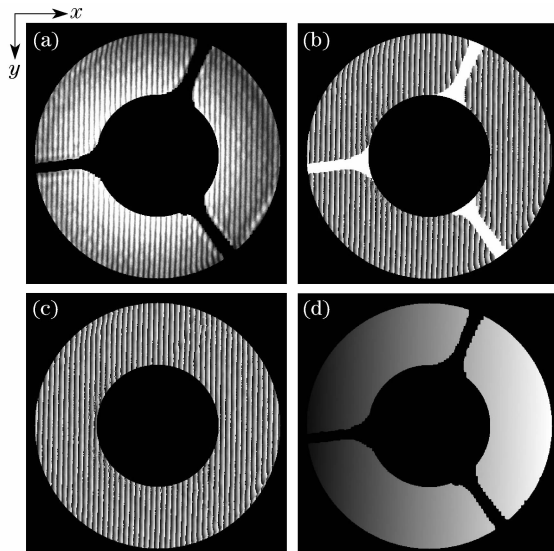


图 6 实测干涉图相位展开。(a)移相干涉图中的一幅;(b)包裹相位图;(c)遮拦区域填充后包裹相位图;(d)相位展开结果

Fig. 6 Phase unwrapping of experimentally collected interferograms. (a) One frame of phase-shifting interferograms; (b) wrapped phasemap; (c) wrapped phasemap after obscuration regions filling; (d) phase unwrapping result

可以改进算法,将待填充区域选为图 6(b)白色区域中的一小部分,使得三个有效区域连通即可。图 6 (d)为图 6(b)包裹相位展开结果的灰度图表示,实

验结果表明,即使在干涉图调制度较低,噪声较为严重的情况下,本方法仍能实现不同有效区域之间相位展开结果连续。

4 结 论

利用移相干涉术检测有分割遮拦的光学系统或者光学元件时,包裹相位数据被遮拦分割在不同的有效区域中,如果直接进行相位展开,将失去波面的连续性。在质量图导引路径积分法的基础上,提出了一种适用于有分割遮拦干涉图的相位展开方法。计算机模拟结果表明,即使对于密集且形状不规则的有分割遮拦干涉条纹,该方法也可以使被遮拦分割的不同有效区域之间相位展开结果连续。对实测干涉图的处理结果表明,该方法对于调制度较低,噪声较为严重的有分割遮拦干涉图,也可以达到较好的相位展开结果。实际应用过程中,可以根据干涉图的特点,尽可能地缩小填充区域,达到提高计算速度的目的。

参 考 文 献

- 1 Judge T. R, Bryanston-Cross P. J. A review of phase unwrapping techniques in fringe analysis [J]. *Optics and Laser in Engineering*, 1994, **21**(4):199~239
- 2 Ghiglia D. C, Pritt M. D. Two-Dimensional Phase Unwrapping Theory, Algorithms, and Software [M]. John Wiley & Sons . Inc,1998
- 3 Bone D. J. Fourier fringe analysis: the two-dimensional phase unwrapping problem [J]. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(25):3627~3632
- 4 Itoh K. Analysis of the phase unwrapping algorithm [J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(14):2470~2470
- 5 Criminisi A, Perez P, Toyama K. Object removal by exemplar-based inpainting [C]. Proceedings of the 2003 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Madison WI, 2003
- 6 Su X, Chen W. Reliability-guided phase unwrapping algorithm: a review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, **42**(3):245~261
- 7 Ge Aiming, Chen Lei, Chen Jinbang *et al.*. Digitalization processing technique for interference pattern with obstruct [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(6):775~780
葛爱明,陈 磊,陈进榜等. 有遮拦干涉图像的数字化处理技术研究[J]. *光学学报*, 2000,**20**(6):775~780