

摘要：相位展开主要用于车轮探伤时提取车轮外形信息，不同算法展开后相位的质量也是不同的。介绍了传统的质量图引导的相位展开算法，针对该算法在处理问题时的不足，对其进行改进，得到了一种新的质量图引导的相位展开算法。该算法将像素点二阶差分值的倒数定义为质量点，通过将相邻像素点进行平均，得到全新的质量值，引导相位展开。通过比较枝切法、质量图导向法、最小二乘法以及本文的改进算法四种相位展开算法的仿真实验，结果表明该算法展开误差小，计算速度快，能够有效处理相位展开中不连续的问题。最后通过车轮实验验证了结果。

关键词：质量图导向法；质量图；相位展开；质量值；可靠度

中图分类号：O438.2 文献标识码：A 文章编号：1006-883X(2018)07-0007-07

收稿日期：2018-05-10

# 一种新的质量图引导的相位展开算法

姜文印

西南交通大学现代物理研究所，四川成都 610000

## 一、引言

质量图导向跟踪算法<sup>[1]</sup>，是一种依据相位质量图进行相位展开的算法。质量图导向法的根本是进行像素扩散，利用一个表征相位质量的质量图来引导相位展开。质量图导向法的重要部分是质量图，质量图的好坏直接影响着该算法的展开结果。

1991年，Bone提出用包裹相位数据的二阶差分作为质量图<sup>[2]</sup>；Xu和Ai使用干涉测量得到的干涉条纹的调制度作为质量导引依据<sup>[3]</sup>；后来Xu和Cumming使用IFSAR数据中的相关系数作为质量图指导IFSAR数据的展开<sup>[4]</sup>；2005年，Herraez等提出了基于合并聚类的质量引导算法<sup>[5]</sup>。

本文针对已经获得的质量图展开工作，探索包裹相位图在解包裹过程中，不同的积分路径对于结果的影响。通过探索，找到了新的解包裹路径。利用质量图上各个像素点二阶差分值的倒数来表征质量值，根据质量值进行相位展开。该方法可以大大缩短计算时间，同时提高计算结果，符合预期的要求。

## 二、基本原理

### 1、传统质量引导算法

质量图导向法的基本操作流程如下<sup>[6-7]</sup>：

(1) 从质量高的像素点出发，然后检查这个像素点附近的4个像素点，然后对这4个像素点进行相位展开，相位解缠；

(2) 将进行了相位解缠的临近像元周围的像素(未进行相位解缠)储存到“邻接列”中；

(3) 根据相位的质量图，从“邻接列”中选出质量高的像素进行解缠，并更新这一列；

(4) 重复(1)、(2)步骤，直至所有相位解缠完毕。

图1是质量图导向法的展开过程，首先，在一幅

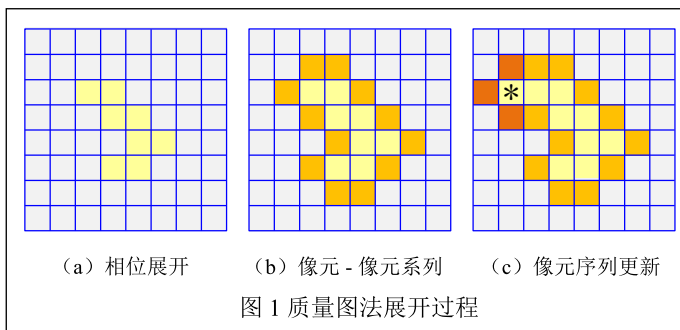


图1 质量图法展开过程

相位图中选择质量最高的将它们标记起来，如图 1 (a) 所示区域。然后对这些区域进行相位展开。然后，再在这些展开区域的旁边，选择质量次高的区域，进行相位展开。最后，重复上述步骤，直到所有相位图都被展开完毕。

质量图导向法的根本在于一个高质量的质量图<sup>[8-9]</sup>，路由质量图决定。质量图导向法能够比较完整的展开所需相位。

质量图导向法的优点<sup>[10]</sup>有很多，能将质量高的区域完美地展开。对于质量不好的区域，策略是尽量对它们进行完整地展开。相位展开的误差能够被限制在一定的区域内，能够克服误差的积累和传递。

但是质量图导向法也有缺点<sup>[11]</sup>，如果一幅质量图的高质量区域很少，那么展开的结果不是很完美，如果质量低的区域很多，将会导致很多错误的展开，如果噪声点非常多，会导致该方法展开错误，尤其在局部区域更为严重。

## 2、质量图函数

质量图的构造有多种方式<sup>[12]</sup>，而质量图的选取会影响展开的效果，比如可以利用相关函数、伪相关函数、相位偏微分函数、最大相位梯度等函数<sup>[13]</sup>。通过这些函数来构造，得到表示各像素点好坏程度，指导积分路径的选取。利用像素点的二阶差分的倒数来表征像素点的可靠度，二阶差分可以计算包裹相位的凹/凸度，使用二阶差分可以更好地检测出一幅相位图中可能存在的噪声。

为了计算像素点  $(i, j)$  的二阶差分，取一个  $3 \times 3$  的窗口，其中包含像素点  $(i, j)$  及其正交及对角上的 8 个相邻像素点，如图 2 所示。

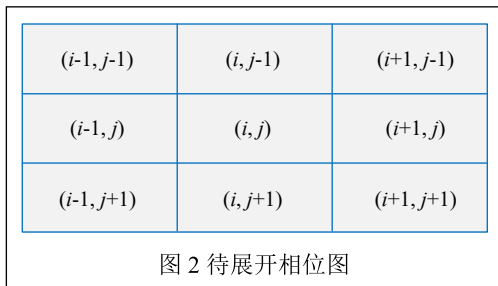


图 2 待展开相位图

设待展开相位图  $A$  如图 2 所示，相位图大小为  $3 \times 3$ ，那么  $A$  中点  $(i, j)$  处的二阶差分  $D$  定义为：

$$D(i, j) = [H^2(i, j) + V^2(i, j) + D_1^2(i, j) + D_2^2(i, j)]^{1/2} \quad (1)$$

其中， $V = \text{unwrap}(A(i, j-1) - A(i, j)) - \text{unwrap}(A(i, j) - A(i, j+1))$

$$H = \text{unwrap}(A(i-1, j) - A(i, j)) - \text{unwrap}(A(i, j) - A(i+1, j))$$

$$D_1 = \text{unwrap}(A(i-1, j-1) - A(i, j)) - \text{unwrap}(A(i, j) - A(i+1, j+1))$$

$$D_2 = \text{unwrap}(A(i-1, j+1) - A(i, j)) - \text{unwrap}(A(i, j) - A(i+1, j-1))$$

$\text{unwrap}$  表示解包操作： $\text{unwrap}(x) = x - 2\pi \cdot \text{round}(\frac{x}{2\pi}, 5)$

通过上面的计算，得到了这个像素点的差分，这个差分是像素质量值的真实反映，通过差分能够导出质量值的计算。质量值的定义为：

$$M = \frac{1}{D} \quad (2)$$

由此得到的质量值就能真实地反映出一幅相位图上像素质量的好坏，这也是进行相位展开的重要依据。

假设  $A_1$  和  $A_2$  是两个相邻的像素， $B$  是这两个相邻像素之间的连接线，则有：

$$M_B = M_1 + M_2 \quad (3)$$

其中， $M_B$ —连接线的质量值；

$M_1, M_2$ — $A_1, A_2$  的质量值。

## 3、算法的具体步骤

(1) 依据公式 (1)、(2) 计算待展开相位图各个点像素的质量值，边界不是连续的，不对边界处理；

(2) 通过公式 (3)，计算相邻像素点的质量值；

(3) 对质量值按照从高到低的顺序排序；

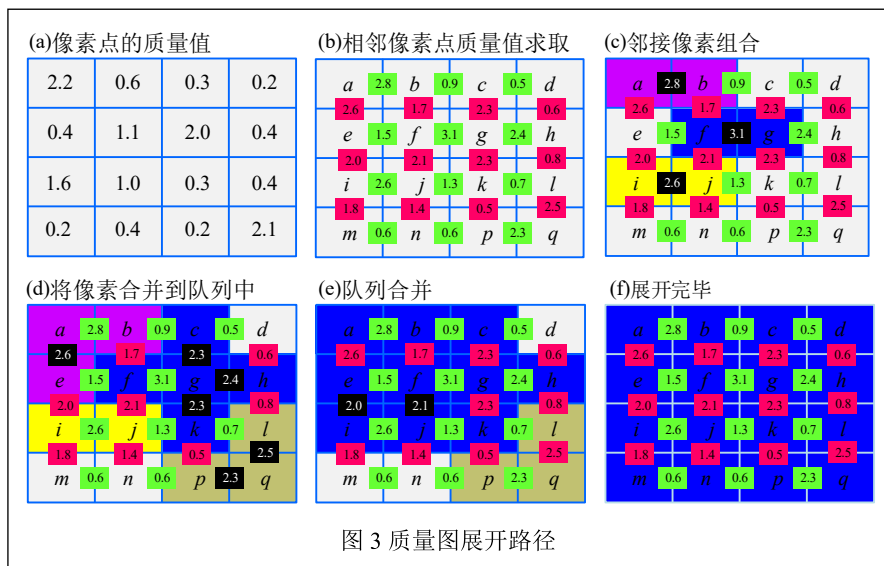
(4) 从最高的质量值开始，确定这个质量值的相邻两个像素点  $A_1$  和  $A_2$ ，然后按照下面三种情况处理：

$A_1$  和  $A_2$  没有进行相位展开：判断  $A_1$  和  $A_2$  质量值大小，如果  $M_{A_1} \geq M_{A_2}$ ，则以  $A_1$  为基准，对  $A_2$  进行相位展开，并把这两个相位合并到一个群组；

$A_1$  和  $A_2$  中有一个像素已经进行了相位展开：假设  $A_1$  已经完成了相位展开，那么它是有群组  $M$  的，则以  $A_1$  为基准，对  $A_2$  进行相位展开，并且将  $A_2$  加入到  $M$  群组中；

$A_1$  和  $A_2$  都已完成相位展开：假设  $A_1$  所在的群组为  $M$ ， $A_2$  所在的群组为  $N$ ，像素数目分别为  $m$  和  $n$ ，如果  $m \geq n$ ，则以  $M$  为基准，将  $N$  进行变换然后进行合并；

(5) 循环操作，直至展开整个相位图。



种两个展开队列相邻接的情况，根据邻接队列内质量点的多少为判断基准。以质量点多的队列为基准，将另一个队列进行相位展开。可以看到，*gfhck* 是 5 个质量点，而 *ij* 区是 2 个质量点，即以 *gfhck* 为基准，将 *ij* 对 *gfhck* 进行相位展开，同时把 *ij* 加入到 *gfhck* 队列中。同理  $M=2.0$  时，以 *gfhckij* 为基准，将 *abe* 对 *gfhckij* 相位展开，同时将 *abe* 加入到 *gfhckij* 队列中。如图 3(e) 中的蓝色部分。

通过上面的具体步骤，可以对质量图上各个点进行合理的相位展开。

#### 4、展开实例

图 3 给出了一幅质量图的展开过程。图 3(a) 是一幅质量图，对其进行划分，标记每个像素点的质量值。图 3(b) 是相邻区域进行质量相加，在得到了一幅质量图所有相连接的质量加权和以后，从最大值的区域开始依次进行相位展开。

加权和最大值是 3.1，也就是 *f, g* 区域，首先判断 *f, g* 的质量值。若  $M_f > M_g$ ，则以 *f* 为基准，将 *g* 对 *f* 进行相位展开；反之则以 *g* 为基准，将 *f* 对 *g* 进行相位展开；相等则任意展开。展开后，*f* 和 *g* 就变成了相同的相位区域，如 3(c) 中的蓝色区域。同理，处理接下来的质量值 2.8 (*a, b* 区，紫色) 和 2.6 (*i, j* 区，黄色)。

当质量值为 2.6 时，出现单个区域和多个区域接触的情况，即 *e* 区域和 *ab* 区域，此时以 *ab* 区域为基准，将 *e* 对于 *ab* 进行相位展开，展开后 *e* 与 *ab* 区域为同一相位展开区域，那么就把 *e* 加入到 *ab* 区域中来，如图 3(d) 所示。根据以上原则，依次处理  $M=2.5$ 、2.4、2.3 时的相位展开。

如图 3(e) 所示，当  $M=2.1$  时，邻接区域为蓝色 *fgchck* 区和黄色 *ij* 区。对于这

通过这种方法，不断地进行相位展开，直到所有的区域都被进行了相位展开，如图 3(f)。可以看出，所有的区域都按照一开始找寻的质量值最大的区域来进行相位展开，这里的区域是这幅相位图上质量最好的区域，按照这两个区域进行相位展开，所得到的结果是最接近真实相位的。

#### 三、仿真分析

用仿真平台对 peaks 函数进行仿真分析，并加入噪声系数为 0.5 的随机噪声，其中仿真的三维原始图如图 4(a) 所示，对其添加频率是 1/8 的正弦光栅，得到受 peaks 函数高度调制的变形光栅，利用傅里叶变换轮廓术得到其包裹相位如图 4(b) 所示。

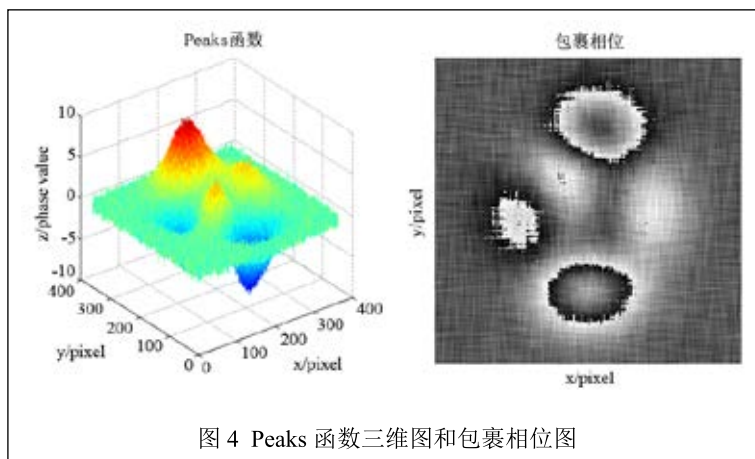


图 5 是运用枝切法进行相位展开的结果图。可以看到，得到的三维模型能够较好地还原真实的相位的三维模型，还原结果能够真实有效地反应真实相位图，但是也可以看到该三维模型有几处明显地跳变，对于该跳变地区，是残差点较密集的区域，也就是枝切线形成闭合的区域。

图 6 是通过质量图导向算法进行相位展开的结果。可以看出，在二维图中有几处比较明显的相位缺陷，这部分缺陷是质量最不好的区域。在三维展开模型中，大部分区域用质量图方法可以很好地恢复展开的相位，被恢复的相位是平滑的、连续的，但是也有几处相位跳变的区域。

图 7 表示运用最小二乘法进行相位展开得到的结果。将图 6 和图 7 对比发现，最小二乘法展开的结果值明显比质量图导向法平滑和连续，没有突兀的跳变区域，也没有大规模不平滑的区域。虽然展开结果的三维模型是平滑的，但是对于原有相位图来说，相位图的信息误差在每个点都有，误差被平均了，并没有消除。在相位质量非常差的地方，展开的结果也是很差的。

图 8 是本文改进算法进行相位展开得到的结果。可以看到，在二维展开图中，相位展开的结果明显比上面三种算法效果好。展开的相位图像比较平滑，而且跟原始相位图像相符。有几处明显的跳变现象，这是因为条纹图中加入了随机噪声和调制光栅导致的跳变。而三维图像比较平滑，较为真实地还原了原始三维图像的相位信息，虽然有突变的区域，但是误差在允许的范围内。这种算法可以有效地避免相位展开过程中拉线现象的产生，能够有效的避免误差的传播。

#### 四、车轮实验

##### 1、实验

选取真实的车轮作为实验对象，通过采

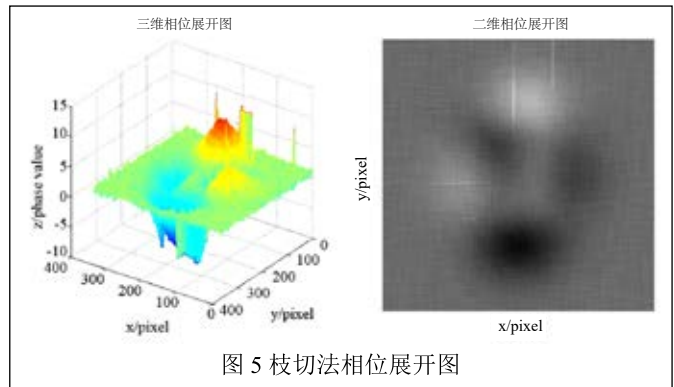


图 5 枝切法相位展开图

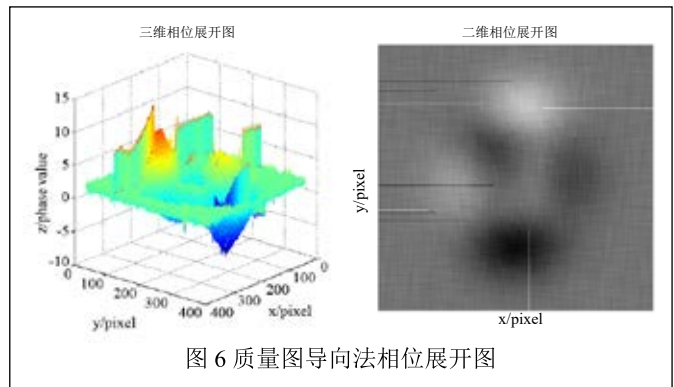


图 6 质量图导向法相位展开图

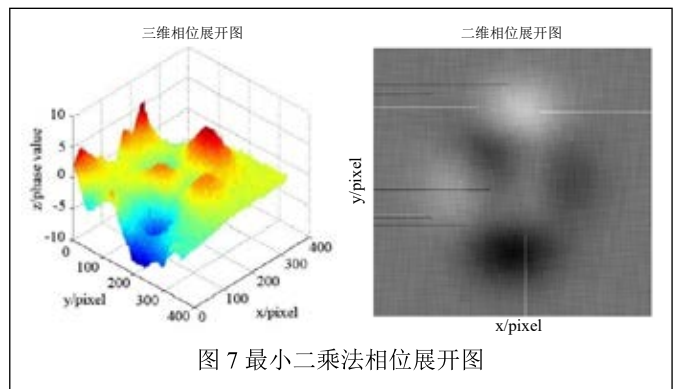


图 7 最小二乘法相位展开图

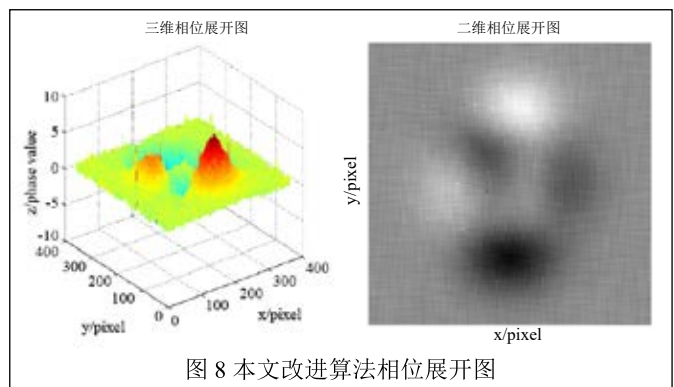


图 8 本文改进算法相位展开图



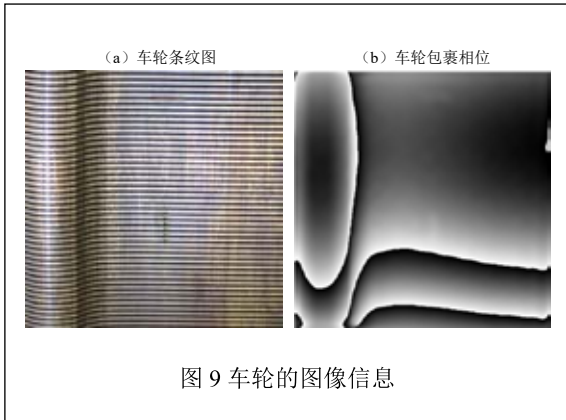


图9 车轮的图像信息

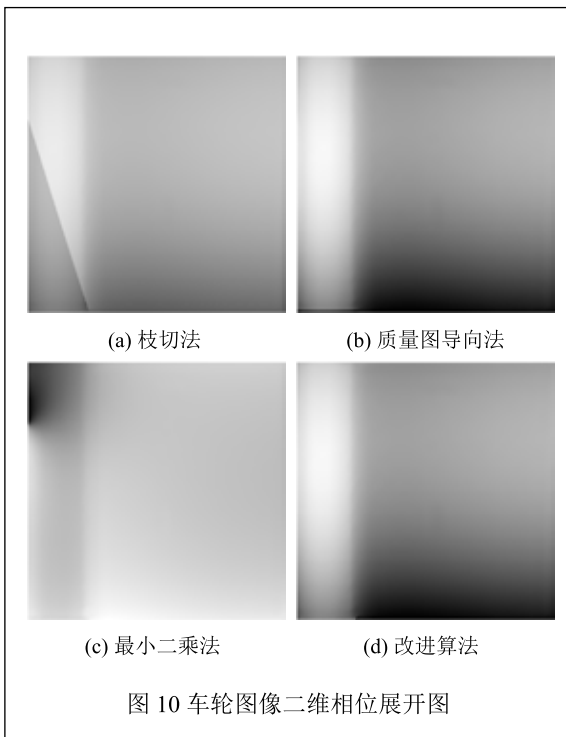


图10 车轮图像二维相位展开图

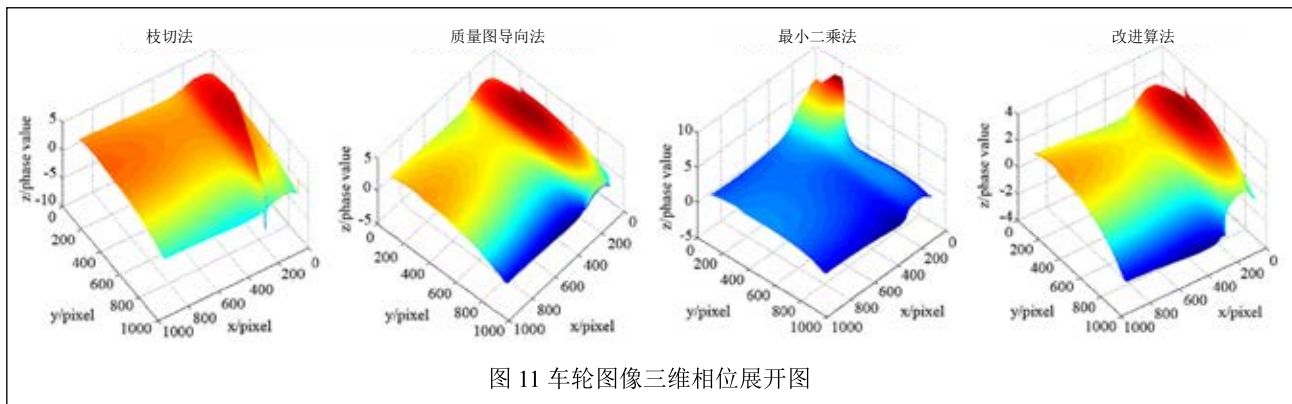


图11 车轮图像三维相位展开图

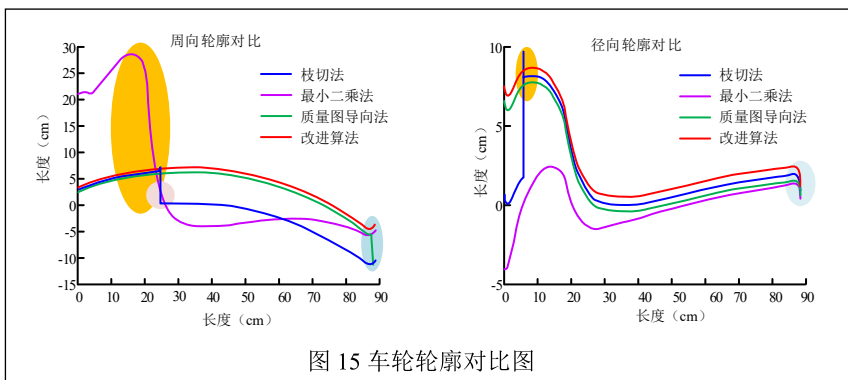
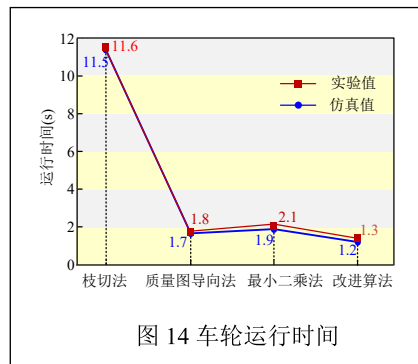
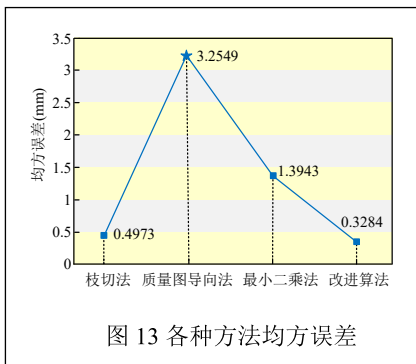
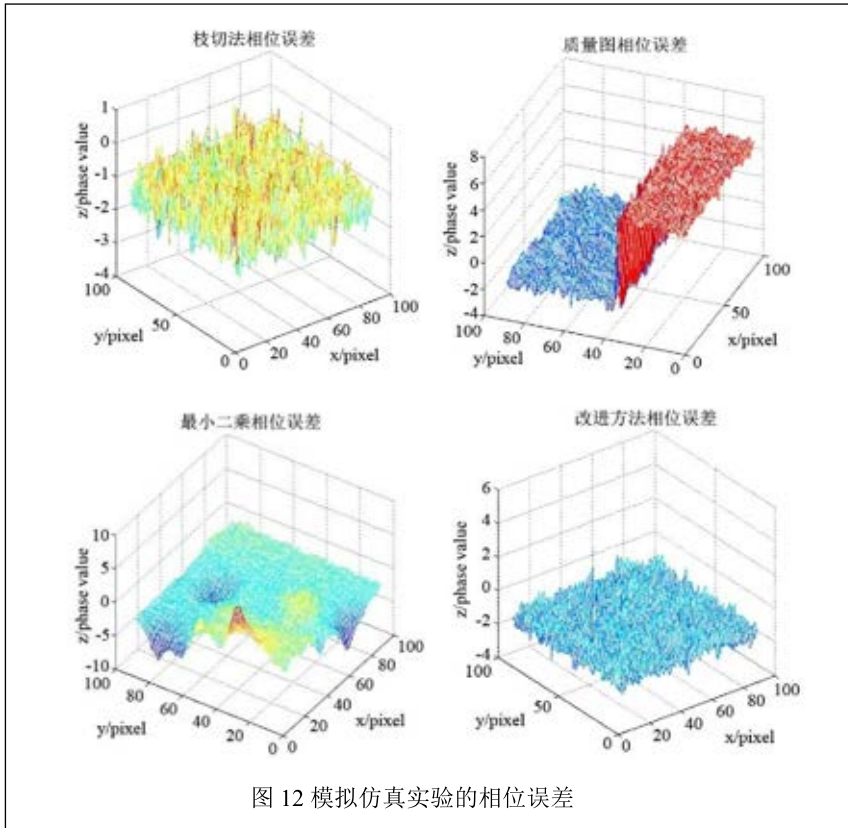
集车轮的图像信息，产生车轮相位图像，并且对该相位图像通过四种算法进行相位展开，然后将展开的结果进行比较。

图9(a)是车轮条纹图。车轮条纹在车轮边缘处有明显的扭曲，因此在相位展开过程中会导致误差的产生。在做实验的过程中，选择了一部分扭曲的条纹进行展开，目的就是分析这四种算法对误差处理的程度。

图9(b)是加入了随机噪声和调制光栅后的包裹相位图。从图上可以看到有几处明显的跳变区域，把这些区域进行相位展开，然后对比几种方法得到的结果，做出分析和结论。

图10是用枝切法、质量图导向法、最小二乘法、改进算法进行相位展开的二维图。在枝切法相位图左下方，有一处明显的错误，这是枝切线闭合导致的展开错误；最小二乘法明显与其他不同，相位图整体上与真实相位图有较大差异，因为最小二乘法是全局的平均，会将误差平均到整体。质量图导向法和改进算法在相位展开中展开的结果较好，但是质量图导向法在展开图像下方的区域时，会有些许误差产生，这是由于质量图质量的高低决定的，改进算法展开的相位图能够较好地恢复出真实相位。

图11采用上述四种方法的三维展开图。枝切法在车轮相位扭曲的区域，三维图像跳变很严重，这个跳变区域就是二维图像上产生闭合枝切线的区域，在该图上，还有好几处因误差传播导致的拉线现象。质量图导向法在车轮相位扭曲的区域虽然没有拉线现象产生，但是出现了跳变现象。最小二乘法在整体上由于全局的平均作用导致其三维展开图与真实图差距过大，而且在车轮图像跳变区域，三维图也产生了跳变。运用改进算法得到的三维图与真实车轮三维图像较为吻合，说明该算法能够较好地进行相位展开，恢复出真实相位，而且在真实车轮图像跳变的区域，该三维图上并没有发现跳变。



所以改进算法在处理相位展开问题中是一种较好的选择。

## 2、误差分析

图 12 是四种方法模拟仿真实验的误差数据图。从图中可以看到，其他三种方法模拟出的结果或多或少都有误差，通过改进算法得到的结果误差很小。

图 13 是各种算法的均方误差。从图中能够直观地看到，均方误差由小到大依次为：改进算法 (0.3284) < 枝切法 (0.4973) < 最小二乘法 (1.3943) < 质量图导向法 (3.2549)，这说明从误差角度分析，改进算法所展开的相位是最接近真实相位的。

## 3、运行时间

图 14 是四种算法仿真模拟运行时间和实验运行时间。可以看出，在运行时间上，枝切法处理速度最慢，而改进算法处理速度快，处理结果好。

## 4、车轮轮廓曲线对比

图 15 是运用四种算法展开的车轮轮廓周向和径向对比图。

从周向对比可以看到，枝切法在 20cm~30cm 区域内有一处明显的跳变，在车轮其他位置的展开结果误差也较大；最小二乘法结果明显与其他三条曲线不同，在起始位置就相差较大；质量图导向法曲线很好地再现了车轮的真实轮廓，但在车轮尾部还是产生了跳变，显示对该区域的相位处理能力不足。本文改进算法曲线能够较好恢复出真实车轮轮廓信息，没有产生跳变和误差，因此是一种比较可靠的算法，在处理相位展开问题上有较好的表现。

从径向对比图可以直观地看到，枝切法左上角有一处明显的跳变；最小二乘法从一开始就产生了明显的跳变；质量图导向法和改进算法都能够很好地恢复出车轮的轮廓信息，因此这两种算法在相位展开中都有可取之处，是不错的相位展开算法。

## 五、结论

相位展开问题是光学领域的一个重要问题。对于基于相位测量技术问题来说是不可避免的。在实际应用中, 由于各种因素的影响, 相位展开就变得十分困难, 也就吸引了许多学者的研究, 各种方法不断涌现。正是基于此, 本文对于相位展开问题进行了研究。通过上面的分析和实验, 发现改进算法在运行时间和产生的误差方面, 均优于其他三种方法结果, 对于车轮轮廓的恢复也更加真实可靠, 在进行无损检测和处理其他相位展开问题时有一定的能力, 是需要的理想算法。该改进的算法是一种真实可行的算法, 具有运行速度快、处理结果好的特点。当然鉴于笔者能力有限, 时间仓促等因素, 在实验中也遇到了一些问题。这些问题需要后续处理, 在这里就不一一赘述了。

## 参考文献

- [1] 吴明云. 二维相位展开算法的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [2] J. A. Quiroga, A. Gonzalez-Cano, E. Bernabeu. Phase-unwrapping Algorithm Based on an Adaptive Criterion[J]. Applied Optics, 1995, 34(14): 2560-2563.
- [3] A. Asundi, W. Zhou. Fast Phase-Unwrapping Algorithm Based on a Gray-Scale Mask and Flood Fill[J]. Applied Optics, 1998, 37(23): 5416-542.
- [4] L. Xue, X. Su. Phase-Unwrapping Algorithm Based on Frequency Analysis for Measurement of a Complex Object by the Phase-Measuring-Profilometry Method [J]. Applied Optics, 2001, 40(8): 1207-121.
- [5] X. Su, W. Chen. Reliability-guided Phase Unwrapping Algorithm: A Review[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2004, 42(3): 245-261.
- [6] R. M. Goldstein, H. A. Zebker, C. L. Werner. Satellite Radar Interferometry: Two-dimensional Phase Unwrapping[J]. Radio Science, 1988, 23(4): 713-720.
- [7] Q. Lin, J. F. Vesecky, H. A. Zebker. New Approaches in Interferometric SAR Data Processing[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 1992, 30(3): 560-567.
- [8] G. Fornaro, G. Franceschetti, R. Lanari, et al. Interometric SAR phase unwrapping by using the finite element method[J], IET Radar, Sonar & Navigation, 1997, 144(5): 266-274.
- [9] C. W. Chen, H. A. Zebker. Network Approaches to Two-dimensional Phase Unwrapping: Intractability and Two New Algorithms[J]. Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision, 2000, 17(3): 401-414.
- [10] C. W. Chen, H. A. Zebker. Phase Unwrapping for Large SAR Interferograms: Statistical Segmentation and Generalized[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2002, 40(8): 1709-1719.
- [11] M. Costantini. A Phase Unwrapping Method Based on Network

Programming[A]. In: Proceedings of the Fringe'96 Workshop ERS SAR interferometry[C]. Zurich, Switzerland, 1996, 261-272.

[12] W. Xu, I. Cumming. A Region-growing Algorithm for InSAR Phase Unwrapping[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(1): 124-134.

[13] M. Suzuki, M. Kanaya, Applications of Moiré Topography Measurement Methods in Industry [J]. Optics & Lasers in Engineering, 1988, 8(3): 171-181.

## A New Phase Unwrapping Algorithm Based on Quality Map Guidance

JIANG Wen-yin

(Institute for Modern Physics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610000, China)

**Abstract:** Phase unwrapping algorithm is mainly used to extract the profile information of wheels in flaw detection. The quality values of phases are also different for different algorithms. The traditional quality-map-guided phase unwrapping algorithm is introduced firstly in this paper. A new quality-map-guided phase unwrapping algorithm is proposed aiming at the shortages of the traditional. This algorithm defines the reciprocal of the second order difference value of pixel point as the quality point. By averaging the quality values of adjacent pixel points, a new quality value is obtained to guide the phase unwrapping. The simulation results of four phase unwrapping algorithms- Branch-cut method, quality map guidance, least squares method, improved algorithm presented in this paper are compared and show that the improved algorithm has smaller error and faster calculating speed, and can deal with the problem of discontinuity in phase unwrapping effectively. Finally, the practical wheel experiments are completed and also verify the conclusion.

**Key words:** quality map guidance; quality map; phase unwrapping; quality value; reliability

## 作者简介

姜文印: 西南交通大学现代物理研究所, 硕士, 主要从事物理理论研究。

通讯地址: 北京市石景山区玉泉路19号(乙)院中科院高能物理研究所

邮编: 100000 邮箱: jiangwy@ihep.ac.cn