



基于枝切线和可靠度的区域增长相位解包裹算法

张睿, 严利平, 张海燕, 冯浩亮, 楼盈天, 周砚江

(浙江理工大学纳米测量实验室, 杭州 310018)

摘要: 为了提高相位解包裹精度, 提出了一种基于枝切线阻止误差传播和可靠度指引路径的解包裹算法。该算法首先计算像素点是否为残差点, 根据残差点生成枝切线; 然后计算像素点的可靠度, 以两相邻像素可靠度之和作为边的可靠度, 并按可靠度大小对边排序; 接着从可靠度最大的边开始判断, 若边对应的任一点未解包且未解包点不在枝切线上, 则对边进行解包操作; 若边对应的两点都已解包且不属于同一解包区域, 则对解包区域进行归并操作; 最后对枝切线解包。仿真和实验结果表明: 该算法能有效减少误差传播, 提高相位解包裹精度。

关键词: 相位解包裹; 残差点; 枝切线; 可靠度; 区域增长

中图分类号: TN247

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2019)07-0474-08

Region-growing phase unwrapping algorithm based on branch-cuts and reliability

ZHANG Rui, YAN Liping, ZHANG Haiyan, FENG Haoliang, LOU Yingtian, ZHOU Yanjiang

(Nanometer Measurement Laboratory, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of phase unwrapping, an unwrapping algorithm based on branch-cuts and reliability was proposed, which stops error propagation by branch-cut and guides the unwrapping path by reliability. Firstly, whether the pixel is the residue was calculated, and branch-cuts were generated according to the residue. Then, the reliability of pixels was calculated. The sum of reliabilities of two adjacent pixels was deemed as the reliability of the edges, and the edges were sorted according to the reliability. Next, the judgement started from the edge with the largest reliability. If any point corresponding to the edge is not wrapped, and the unwrapping point is not on the branch-cuts, unwrapping operation is conducted for the edge. If two points corresponding to the edge have been unwrapped and do not belong to the same unwrapping region, merger operation is conducted for the unwrapping region. Finally, the branch-cuts were unwrapped. Simulation and experiment show that the algorithm can effectively reduce error propagation and improve the accuracy of phase unwrapping.

Key words: phase unwrapping; residue; branch-cuts; reliability; region-growing

0 引言

数字散斑干涉测量技术因其高精度、高灵敏度、非接触测量等优点, 广泛应用于形貌测量^[1-2]、无损

检测^[3]、形变测量^[4-5]等领域。数字散斑干涉测量技术通过提取相位信息获得所需测量信息, 然而直接获得的相位是被包裹在 $(-\pi, \pi]$ 范围内的包裹相位, 需要通过相位解包裹技术将其恢复到连续相位。

收稿日期: 2018-12-26 网络出版日期: 2019-03-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51475435); 浙江省自然科学基金项目(LZ18E050003)

作者简介: 张睿(1992-), 男, 安徽蚌埠人, 硕士研究生, 主要从事计算机应用技术方面的研究。

通信作者: 严利平, E-mail: yanliping@zstu.edu.cn

能否正确地解出连续相位,直接关系到能否正确地获得所需的测量值,因此相位解包裹成为数字散斑干涉测量技术领域的一个研究重点^[6]。

局部解包裹算法是解包裹算法中具有代表性的一类算法,众多学者对其进行了大量的研究,提出了许多相关的算法,其中典型的有枝切算法、区域增长算法等。枝切法最初由 Richard 等^[7]提出,该算法通过识别包裹相位中的残差点,以枝切线上残差点极性和为零为原则生成最短枝切线来阻止解包路径穿过误差区域,从而减少误差传播。其中,枝切线的长度是影响其解包精度的重要因素。随后, Buckland 等^[8]提出了一种最小成本匹配解包裹算法,该算法优化了枝切线长度,从而提高了抗噪性能。于向明等^[9]提出了优化枝切线设置的相位解包裹方法,采用遗传算法对枝切线的长度进行了优化,从而减少了封闭区域数量。王军飞等^[10]提出了一种改进的积分算法,使用行扫描积分法提高了解包速度。Du 等^[11]提出了一种空间域算法,采用空间上的乘法运算来实现频谱的频移,从而提高了解包速度。然而学者们忽略了从优化解包路径层面提高枝切法解包精度。

区域增长算法中最为经典的是 Miguel 等^[12]提出的基于可靠度指引路径的区域增长解包裹算法,该算法利用可靠度指引区域扩张路径进行区域展开,最终将区域展开归并至整体相位展开。该算法中可靠度基于二阶差分运算,可以有效地表征像素的可靠性及检测出残差点。Yan 等^[13]利用可靠度的优点,提出了基于可靠度的加权最小二乘算法,提高了解包精度。然而基于可靠度的区域增长算法是根据两相邻像素的可靠度之和作为区域扩张路径的指引,存在一像素点可靠度大、一像素点可靠度小的情况,从而导致将低可靠度像素点先展开的问题。

由于传统的枝切算法存在解包路径选择问题, Miguel 算法存在解包误差较大问题,针对这两类算法的不足,本文提出了一种基于枝切线和可靠度的区域增长解包裹算法。该算法利用可靠度指引解包裹路径,解决了枝切算法的解包路径选择问题,利用枝切线阻止低可靠度像素点先展开,解决了 Miguel 算法的解包误差较大问题,融合了两种算法的优点,从而提高了解包精度。

1 基于可靠度的区域增长算法

基于可靠度的区域增长算法的基本思想为:以

可靠度作为区域扩张的路径指引,进行局部区域解包并扩展至整体解包。假设 $M \times N$ 个像素点的二维包裹相位,点 (m, n) 处的包裹相位为 $\Phi(m, n)$,对应的连续相位为 $\varphi(m, n)$,则包裹相位与连续相位之间的关系可以表示为:

$$\varphi(m, n) = \Phi(m, n) + 2k(m, n)\pi, \quad (1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N) \quad (1)$$

其中: $k(m, n)$ 为使等式成立的任意整数。图 1 为以 (i, j) 为中心的 3×3 像素的包裹相位,点 (i, j) 的可靠度 $R(i, j)$ 定义为:

$$R(i, j) = \frac{1}{\sqrt{H^2(i, j) + V^2(i, j) + X^2(i, j) + Y^2(i, j)}} \quad (2)$$

其中:

$$H(i, j) = \text{mod}(\Phi(i-1, j) - \Phi(i, j)) - \text{mod}(\Phi(i, j) - \Phi(i+1, j)),$$

$$V(i, j) = \text{mod}(\Phi(i, j-1) - \Phi(i, j)) - \text{mod}(\Phi(i, j) - \Phi(i, j+1)),$$

$$X(i, j) = \text{mod}(\Phi(i-1, j-1) - \Phi(i, j)) - \text{mod}(\Phi(i, j) - \Phi(i+1, j+1)),$$

$$Y(i, j) = \text{mod}(\Phi(i-1, j+1) - \Phi(i, j)) - \text{mod}(\Phi(i, j) - \Phi(i+1, j-1)),$$

mod 为对 2π 的取模函数。

$(i-1, j-1)$	$(i, j-1)$	$(i+1, j-1)$
$(i-1, j)$	(i, j)	$(i+1, j)$
$(i-1, j+1)$	$(i, j+1)$	$(i+1, j+1)$

图 1 3×3 像素的包裹相位

Miguel 算法解包过程为:首先计算像素点的可靠度,然后计算两相邻像素可靠度之和作为边的可靠度,并按可靠度大小对边排序,算法总是选择可靠度最高的边,判断边对应两点的解包情况,若两点都未解包,则以可靠度高的点为准对可靠度低的点解包;若其中一点已解包,则以已解包点为准,对另一点解包;若两点都已解包,但不属于同一解包区域,则以所属解包区域点数多的点为准,对所属解包区域点数少的点解包,并将对应的 2π 差值补到小区域余下像素点,两区域合并。

2 改进的区域增长算法

Miguel 算法从可靠度最大的边开始解包,由于

边的可靠度等于对应两像素点可靠度之和,存在一像素点可靠度大、另一像素点可靠度小的情况。可靠度小说明该点数据可靠性低,极有可能是误差点。若对这样的边解包,会导致解包路径穿过误差区域,从而造成误差传播。而枝切线可以很好地解决这种不足,因此使用枝切线对 Miguel 算法进行改进,可提高算法在较高噪声时的鲁棒性。

在设置枝切线之前,需要计算包裹相位中的残差点,如图 2 所示,按逆时针计算包裹相位中相邻四点 (i, j) 、 $(i, j+1)$ 、 $(i+1, j+1)$ 和 $(i+1, j)$ 的差分 d_1 、 d_2 、 d_3 和 d_4 。若 $d_1 + d_2 + d_3 + d_4$ 的值为 2π , 则点 (i, j) 为正残差点;若 $d_1 + d_2 + d_3 + d_4$ 的值为 -2π , 则点 (i, j) 为负残差点;若 $d_1 + d_2 + d_3 + d_4$ 的值为 0, 则点 (i, j) 为正常点。

$$d_1 = \text{mod}(\Phi(i, j+1) - \Phi(i, j) + \pi) - \pi \quad (3)$$

$$d_2 = \text{mod}(\Phi(i+1, j+1) - \Phi(i, j+1) + \pi) - \pi \quad (4)$$

$$d_3 = \text{mod}(\Phi(i+1, j) - \Phi(i+1, j+1) + \pi) - \pi \quad (5)$$

$$d_4 = \text{mod}(\Phi(i, j) - \Phi(i+1, j) + \pi) - \pi \quad (6)$$

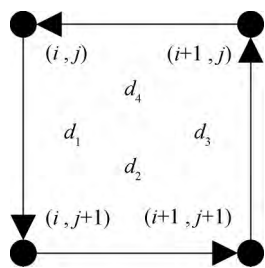


图 2 残差点的计算方法示意图

基于枝切线阻止误差传播和可靠度指引解包路径的改进区域增长算法的流程如图 3 所示,实现步骤为:

a) 计算除边界像素外所有点是否为残差点(边界像素值为 0),以枝切线上的残差点极性和为零为原则,生成最短枝切线;

b) 计算除边界像素外所有点的可靠度(边界像素值为 0);

c) 计算所有边的可靠度,边的可靠度等于其对应两点可靠度之和;

d) 将边按可靠度从大到小排序;

e) 取出未处理的可靠度最高的边,并判断边对应两点的解包情况;

f) 若两点都未解包且都不在枝切线上,则以可靠度高的点为准对可靠度低的点解包,将两点标记为新的解包区域;若其中一点已解包且另一点不在枝切线上,则以已解包点为准,对另一点解包,并放

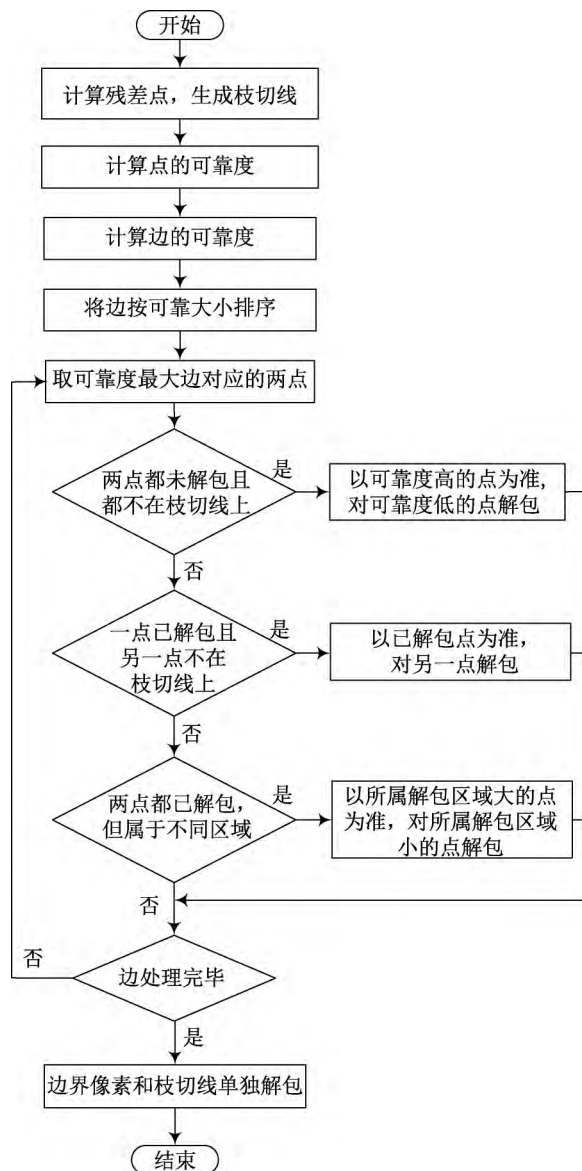


图 3 改进算法的流程

入已解包点所属区域;若两点都已解包,但不属于同一区域,则以所属解包区域点数多的点为准,对所属解包区域点数少的点解包,并将对应的 2π 差值补到小区域余下所有点,将两区域合并为一个区域;

g) 转步骤 e, 循环直到所有边被处理;

h) 边界像素和枝切线单独解包。

现以图 4 所示的 4×4 像素的包裹相位为例,详细说明改进算法解包过程。图 4(a) 为点的可靠度和枝切线,图 4(b) 为两点之间边的可靠度。算法从可靠度最高的边开始解包,因此首先展开可靠度为 4.5 的边,边对应的两点都未解包,以可靠度为 3.5 的点为准,对可靠度为 1.0 的点解包,可靠度为 4.4 的边类似处理,解包结果如图 4(c) 所示。然后展开可靠度为 4.2 的边,由于可靠度为 3.5 的点已解包,以其为准对可靠度为 0.7 的点解包,解包结果如

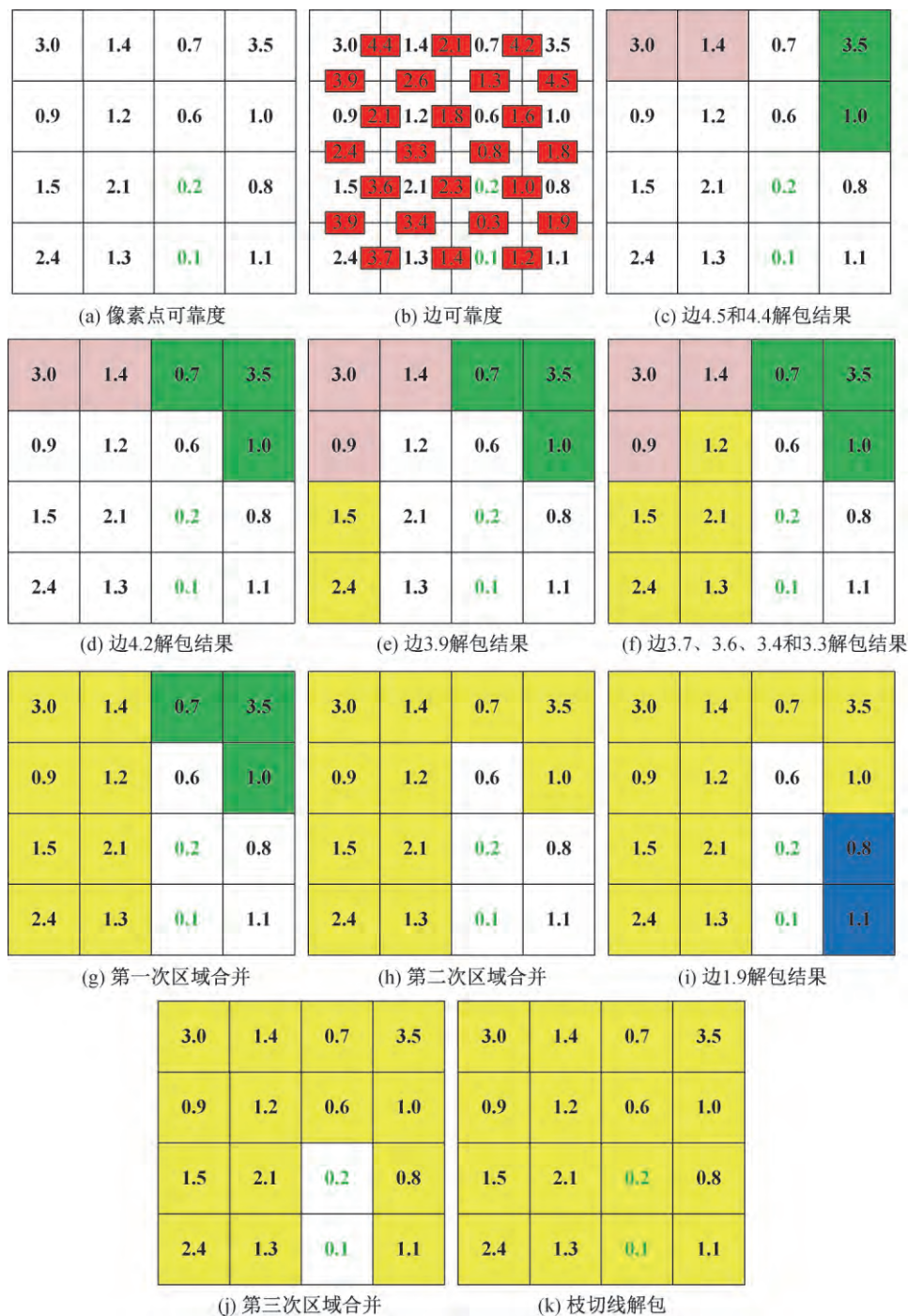


图 4 改进算法解包过程

图 4(d)所示。然后展开可靠度为 3.9 的两条边(具体顺序与排序有关),按上述方法展开,结果如图 4(e)所示。在依次展开可靠度为 3.7、3.6、3.4、3.3 的边后(在展开可靠度为 3.4 的边时,对应两点都已解包且属于同一区域,不予以处理),解包结果如图 4(f)所示。然后展开可靠度为 2.6 的边,由于对应两点都已解包,但不属于同一区域,以可靠度为 1.2 的点为准(所在区域解包点数多),对可靠度为 1.4 的点解包,对应的 2π 差值补到小区域余下所有点,

两区域合并,如图 4(g)所示。可靠度为 2.4 的边不予以处理。然后展开可靠度为 2.3 的边,由于边对应的两点中存在一点在枝切线上,放弃处理。然后展开可靠度为 2.1 的两条边,按上述方法展开,结果如图 4(h)所示。然后展开可靠度为 1.9 的边,解包结果如图 4(i)所示。展开可靠度为 1.8 的两条边后,解包结果如图 4(j)所示,其余边均不处理。最后以可靠度为 2.1 的点为准(其余已解包点均可),沿着枝切线解包,解包结果如图 4(k)所示,至此解包完成。

3 仿真和实验

为了验证本文提出算法的有效性,进行了仿真和实验验证,并将改进算法解包结果与枝切法、Miguel 算法解包结果进行了对比。仿真和实验环境均为: windows 732 位, Matlab2014a 32 位, Celeron(R) Dual-Core CPU T3000, 1.80 GHz, 3GB RAM。

3.1 仿 真

首先对含有全局噪声的包裹相位,分别采用枝切法、Miguel 算法和改进算法进行解包,解包结果如图 5 所示。图 5(a)为 Matlab 中 peaks 函数生成的相位图,图片大小为 256×256 像素;图 5(b)为 5

(a)中加入全局噪声后的包裹相位,噪声类型:randn 函数生成的服从标准正态分布的均值为 0、标准差为 0.7 的随机高斯噪声;图 5(c)为枝切线;图 5(d)为 Miguel 算法解包结果;图 5(e)为枝切算法解包结果;图 5(f)为改进算法解包结果。将各算法解包结果数据与图 5(a)的数据相减,得到的误差数据如表 1 所示。

表 1 含有全局噪声时三种算法解包结果比较

解包裹算法	时间/s	误差绝对值 平均值/rad	误差标准 差/rad
Miguel 算法	24.321992	6.8238	9.6920
枝切算法	20.553372	0.8531	1.7272
改进算法	24.491725	0.5580	0.7010

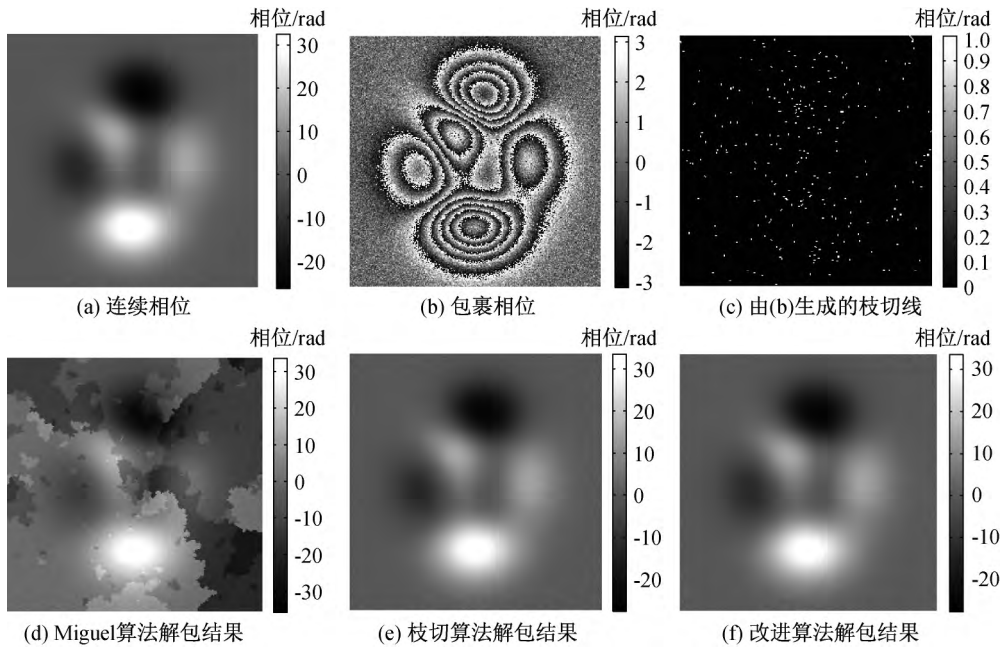


图 5 含有全局噪声的包裹相位的解包结果

从仿真结果可以看出,在全局噪声较强时,Miguel 算法解包误差绝对值平均值和误差标准差大,解包效果差;枝切算法解包误差绝对值平均值较小,而误差标准差较大,解包结果比较平滑;改进算法解包误差绝对值平均值和误差标准差均较小,解包结果较平滑;三种算法运行时间相当。全局仿真数据表明,改进算法有效地抑制了误差传播,提高了解包精度。

然后对另一全局噪声较弱、局部噪声较强的包裹相位图,同样采用三种算法进行了解包,结果如图 6 所示。图 6(a)为 Matlab 程序生成的相位图,图片大小为 256×256 像素;图 6(b)为 6(a)中同时加入全局和局部噪声后的包裹相位,全局噪声类型:

randn 函数生成的服从标准正态分布的均值为 0、标准差为 0.4 的随机高斯噪声,局部噪声类型:randn 函数生成的服从标准正态分布的均值为 0、标准差为 0.8 的随机高斯噪声,局部噪声区域为 50×50 像素;图 6(c)为枝切线。从图 6(c)可以看出,在局部噪声区域,由于残差点分布密集,枝切线比较明显,而局部以外的区域,由于全局噪声减弱,残差点减少,因此枝切线数量少且短。图 6(d)为 Miguel 算法解包结果;图 6(e)为枝切算法解包结果;图 6(f)为改进算法解包结果。将各算法解包结果数据与图 6(a)的数据相减,得到的误差数据如表 2 所示。

从仿真结果可以看出,在局部噪声较强时,

表 2 含有全局和局部噪声时三种算法
解包结果比较

解包裹算法	时间/s	误差绝对值平均值/rad	误差标准差/rad
Miguel 算法	25.429946	12.8525	15.0604
枝切算法	20.219133	0.4371	1.0132
改进算法	25.578124	0.3440	0.4429

Miguel 算法解包误差绝对值平均值和误差标准差大,解包效果差;枝切算法解包误差绝对值平均值较小,误差标准差差强人意,图 6(e)上侧和右侧边界存在解包误差;改进算法解包误差绝对值平均值和误差标准差较小,解包结果较平滑;三种算法运行时间相当。局部仿真数据表明,改进算法有效地抑制了误差传播,提高了解包精度。

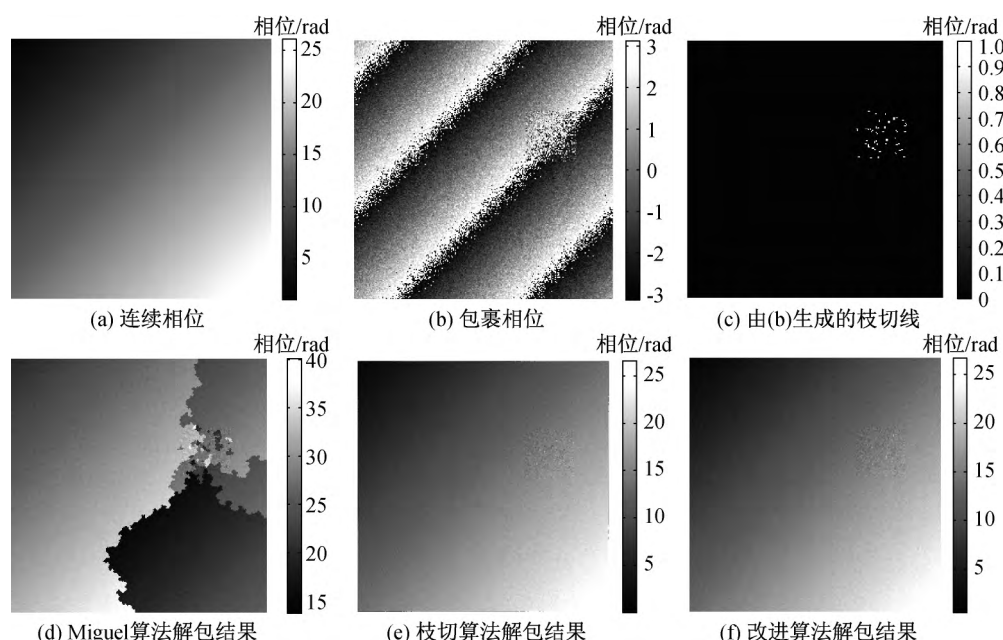


图 6 包含全局噪声和局部噪声的包裹相位的解包结果

3.2 实验

为了验证改进算法的实用性,搭建了如图 7(a)所示的基于空间载波的一维散斑干涉形变测量光路。激光器射出的激光经分光片分成两束光,一束作为物光,另一束作为参考光。物光经过反射镜和扩束镜打到待测物上,经待测物漫反射形成散斑场,并经过成像透镜、小孔光阑和立方棱镜汇聚打到 CCD 上;参考光经光纤耦合器耦合进光纤,在光纤输出端经光纤转接板后以一定倾斜角照射到立方棱镜,最后经立方棱镜打到 CCD 上,与物光在 CCD 上形成散斑干涉场。实际搭建的光路如图 7(b)所示,其中 CCD 采用凯视佳的 MU3S230 M 型号的 CMOS 相机,激光器采用长春新产业光电公司的 MSL-FN-671 nm 的单模激光器,待测物为背面带有螺旋测微杆的薄铝圆片。

实验过程如下:a)通过旋转待测物背面的螺旋测微杆,使其产生离面形变量,采集变形前后的两幅散斑干涉图;b)对干涉图做傅里叶变换,提取正一级频谱,再对频谱图做傅里叶逆变换和反正切运算,

获得干涉图的包裹相位;c)将变形前后干涉图的包裹相位相减,获得与待测物形变量相关的包裹相位,再进行 5 次 3×3 的相位滤波后,得到图 8(a)所示包裹相位图,大小为 700×700 像素。

对实验获得的包裹相位采用枝切法、Miguel 算法和改进算法分别进行解包裹,解包结果如图 8 所示。其中,图 8(b)为枝切线;图 8(c)为 Miguel 算法解包结果;图 8(d)为枝切算法解包结果;图 8(e)为改进算法解包结果;图 8(f)为 $x=294$ 时,枝切法和改进算法相位数据对比。Miguel 算法运行时间为 632.757294 s,枝切算法运行时间为 203.075530 s,改进算法运行时间为 628.923769 s。从图 8(c)—(e)可以看出,Miguel 算法解包结果存在多处误差,这是解包路径穿过误差区域所致,枝切法和改进算法由于采用了枝切线,解包误差被消除。从图 8(f)可以看出,改进算法解包结果比枝切法更平滑,这是由于改进算法采用了可靠度指引解包路径。实验表明,改进算法有效地抑制了误差传播,提高了解包精度。

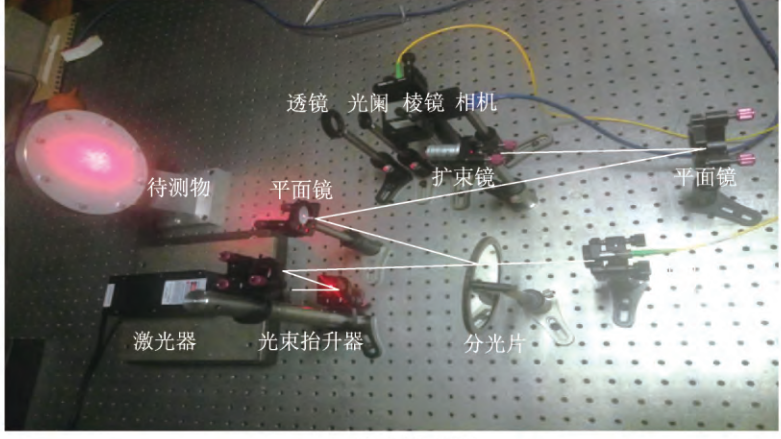
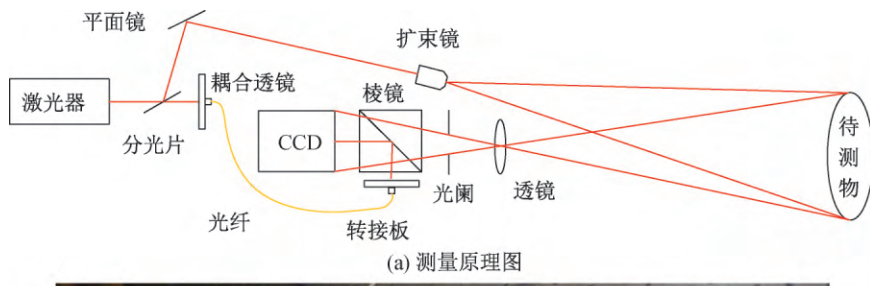


图7 基于空间载波的一维散斑干涉实验

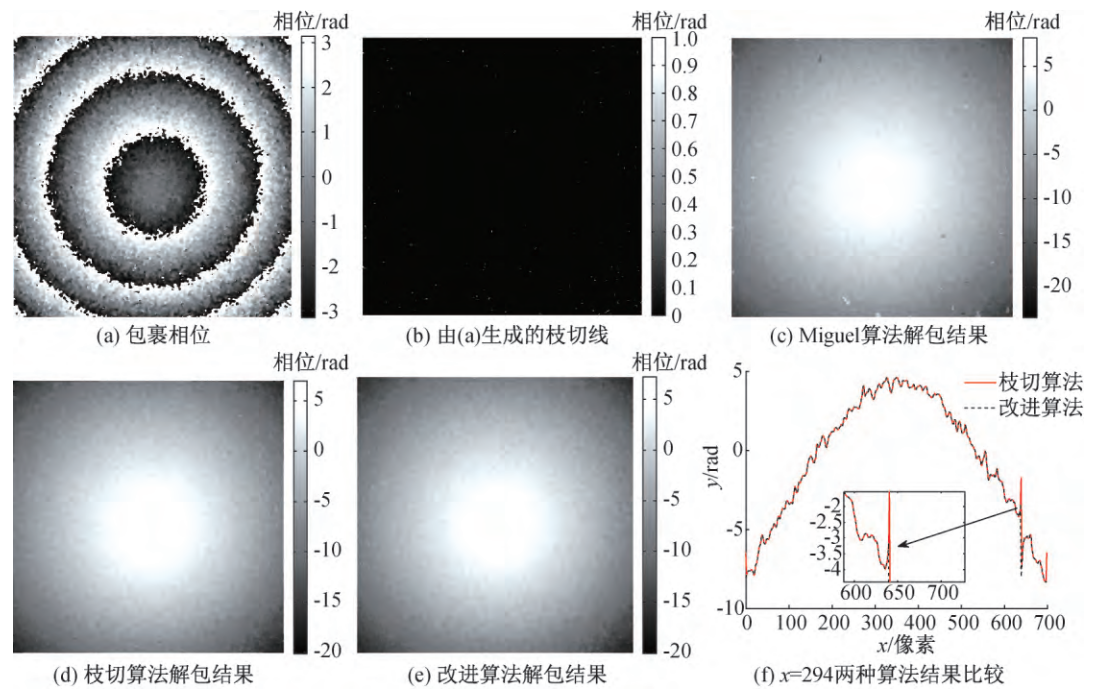


图8 散斑干涉实验相位解包结果

4 结 语

本文提出了一种基于枝切线和可靠度的区域增长解包裹算法。该算法结合了枝切线能够阻止解包路径穿过误差区域从而减少误差传播的优点和可靠度能够可靠地指引解包路径从而提高解包精度的优点。采用了枝切法和 Miguel 算法作为对比算法,进

行了仿真和实验测试。仿真和实验结果表明,改进算法比两种对比算法精度更高,证实了改进算法的有效性。然而算法的高精度是以时间的消耗为代价,因此改进算法的运行时间亟待优化。

参考文献:
[1] 许仁超,周方艳,张启灿. 基于双目视觉的数字散斑时空

- 相关三维面形测量[J]. 激光杂志, 2018, 39(3):32-36.
- [2] 杭超, 燕群. 基于投影散斑的结构表面形貌测量[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(19):230-236.
- [3] 陈肖, 陆锦玲, 李鹏程. 生物组织黏弹性激光散斑检测方法研究进展[J]. 中国激光, 2018, 45(2):0207005.
- [4] 赵冉, 孙平. 一种基于散斑相关理论测量变形相位的新方法[J]. 光学学报, 2016, 36(6):0612004.
- [5] 李翔宇, 黄战华, 朱猛, 等. 瞬态形变的高速时域散斑干涉测量[J]. 光学学报, 2015, 35(6):121-127.
- [6] 韩宇, 张启灿, 吴应山. 三种基本相位展开算法及其融合算法的性能比较[J]. 光学学报, 2018, 38(8):0815006.
- [7] Richard M G, Howard A Z, Charles L W. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping[J]. Radio Scienc, 1988, 23(4):713-720.
- [8] Buckland J R, Huntley J M, Turner S R E. Unwrapping noisy phase maps by use of a minimum-cost-matching algorithm[J]. Applied Optics, 1995, 34(23):5100-5108.
- [9] 于向明, 孙学宏, 刘丽萍, 等. 优化枝切线设置的孔径雷达相位解缠方法[J]. 测绘科学, 2015, 40(9):43-47.
- [10] 王军飞, 彭军还, 杨红磊, 等. 改进积分法的 InSAR 相位解缠算法[J]. 测绘科学, 2016, 41(12):85-88.
- [11] Du G L, Wang M, Zhou C L, et al. A simple spatial domain algorithm to increase the residues of wrapped phase maps[J]. Journal of Modern Optics, 2016, 64(3):231-237.
- [12] Miguel A H, David R B, Michael J L, et al. Fast two-dimensional phase-unwrapping algorithm based on sorting by reliability following a noncontinuous path [J]. Applied Optics, 2002, 41(35):7437-7444.
- [13] Yan L P, Zhang H Y, Zhang R, et al. A robust phase unwrapping algorithm based on reliability mask and weighted minimum least-squares method[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 112:39-45.

(责任编辑:康 锋)