

# 基于边缘检测的最小不连续相位展开算法

张 婷 路元刚 张旭苹

(南京大学工程管理学院光通信工程研究中心, 江苏 南京 210093)

**摘要** 为克服 Flynn 最小不连续相位展开算法效率较低的缺陷, 以快速高效地展开包裹相位图, 提出了一种基于边缘检测的最小不连续相位展开新算法。先对孤立噪声点预处理并将其排除在增长环搜寻扫描区域外, 然后利用边缘检测技术检测出相位不连续区域, 并把其作为扫描区域。由于利用边缘检测使增长环搜寻所需的扫描范围在很大程度上缩小, 最小不连续相位展开算法的效率得到了很大提高。详细描述了新算法的原理和实现步骤, 并用计算机模拟和实际的包裹相位图来验证其有效性。相位展开结果表明, 新算法能正确展开这些包裹相位图, 且较最小不连续算法有更高的效率。

**关键词** 信息光学; 图像处理; 相位展开; 边缘检测

**中图分类号** TN911.73 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092901.0180

## Minimum-Discontinuity Phase Unwrapping Algorithm Based on Edge Detection

Zhang Ting Lu Yuangang Zhang Xuping

(*Institute of Optical Communications Engineering, School of Engineering and Management, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China*)

**Abstract** A new minimum-discontinuity unwrapping algorithm based on edge detection is proposed to overcome the disadvantage of Flynn's minimum-discontinuity approach and unwrap the wrapped phase images rapidly and efficiently. In the new algorithm, isolated noisy pixels are excluded from the scanning areas of searching for improving loops firstly, and then the phase's discontinuous areas within wrapped phase image are detected based on edge detection techniques and taken as the scanning areas. Because the required scanning range is cut down to a large extent by use of edge detection methods, the efficiency of the minimum-discontinuity phase unwrapping algorithm is significantly improved. The principle and implementation steps of the new algorithm are described in detail, and some computer simulation and experimental wrapped phase images are used to verify the effectiveness of the algorithm. Unwrapped results show that the proposed algorithm works perfectly and is more effective than the Flynn's minimum discontinuity-approach.

**Key words** information optics; image processing; phase unwrapping; edge detection

## 1 引 言

相位展开方法<sup>[1]</sup>主要可分为空间相位展开方法和时间相位展开方法。时间相位展开方法<sup>[2~4]</sup>需在不同时刻产生不同频率的投影光栅图像, 测量速度和应用范围受到很大的限制, 严格地说, 是三维相位展开方法。空间相位展开方法仅需根据包裹相位图的  $2\pi$  相位跳变及其展开相位图的连续特征等空间信息进行相位展开, 效率高, 适用范围广, 从本质上

是二维相位展开方法。二维相位展开方法大体可分为三类: 路径积分法<sup>[5~9]</sup>、最小范数法<sup>[10~13]</sup>、网络流算法<sup>[14,15]</sup>。此外, 遗传算法<sup>[16]</sup>等也被尝试用于解决相位展开问题。路径积分相位展开方法又包括分支阻断法、质量引导算法、掩膜阻断法、最小不连续算法等。其中 T. J. Flynn<sup>[7]</sup>提出的最小不连续算法能够成功展开多种类型的包裹相位数据, 然而在整個包裹相位图像中循环扫描, 寻找相位不连续区域,

**收稿日期**: 2008-04-14; **收到修改稿日期**: 2008-06-11

**基金项目**: 国家自然科学基金(60607007)资助课题。

**作者简介**: 张 婷(1985-), 硕士研究生, 主要从事二维相位展开技术方面的研究。E-mail: zhangting85@gmail.com

**导师简介**: 路元刚(1977-), 副教授, 主要从事光学干涉测量方面的研究。E-mail: luyg@nju.edu.cn

需经历规模庞大的扫描循环过程,但其中大量的扫描过程对于最终的展开是无贡献、冗余的。因而最小不连续算法存在占用资源大,运行效率低的缺陷。因此,本文提出了一种基于边缘检测的最小不连续相位展开新算法。

## 2 基本原理

相位展开,实际上是对于每一个像元包裹相位值加上  $2\pi$  的整数倍得到展开相位的过程。一对相邻的像素如果它们的包裹相位值的差超过  $\pi$ ,称为一个“不连续”。设任意像元  $(m,n)$  处的包裹相位为  $\phi_{m,n}$ ,展开相位为  $\phi_{m,n}$ :

$$\phi_{m,n} = \psi_{m,n} + 2\pi c_{m,n}, \quad (1)$$

式中整数  $c_{m,n}$  为“包裹数”。在包裹数  $c_{m,n}$  的选取上,以使  $(m,n)$  处的展开相位与其相邻像元展开相位之间的“不连续”最小为原则。展开相位之间的不连续表现为展开相位值的跳跃。沿垂直方向和水平方向,定义像元  $(m,n)$  处的跳跃数分别为

$$\begin{aligned} v_{m,n} &= \text{Int}\left(\frac{\phi_{m,n} - \phi_{m-1,n}}{2\pi}\right), \\ z_{m,n} &= \text{Int}\left(\frac{\phi_{m,n} - \phi_{m,n-1}}{2\pi}\right), \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $\text{Int}(\cdot)$  表示取最接近的整数。

将(1)式代入(2)式得

$$\begin{aligned} v_{m,n} &= c_{m,n} - c_{m-1,n} + \text{Int}\left(\frac{\psi_{m,n} - \psi_{m-1,n}}{2\pi}\right), \\ z_{m,n} &= c_{m,n} - c_{m,n-1} + \text{Int}\left(\frac{\psi_{m,n} - \psi_{m,n-1}}{2\pi}\right), \end{aligned} \quad (3)$$

从(3)式可见,如果跳跃数  $v_{m,n}$  或  $z_{m,n}$  数值加1,将会引起包裹数  $c_{m,n}$  的数值加1或  $c_{m-1,n}$  的数值减1,所以跳跃数变化会引起包裹数变化。反之亦然。整个数据区域跳跃数总和定义为

$$E = \sum |v_{m,n}| + \sum |z_{m,n}|, \quad (4)$$

它是全局相位不连续性的衡量标准。

若提供质量图,可以根据质量图选取权重:

$$\begin{aligned} \omega_{m,n}^v &= \min(q_{m,n}, q_{m+1,n}), \\ \omega_{m,n}^z &= \min(q_{m,n}, q_{m,n+1}), \end{aligned} \quad (5)$$

式中  $q_{m,n}$  为质量图对应像素的质量值。则带权重的跳跃数和为

$$E_w = \sum \omega_{m,n}^v |v_{m,n}| + \sum \omega_{m,n}^z |z_{m,n}|. \quad (6)$$

最小不连续算法的目标就是通过一定的操作改变跳跃数数值,使得  $E$  达到最小,最终得到最小加权不连续解。算法通过对原始的包裹相位图反复进行一系列的基本操作,使得每次操作都能减小  $E$  的

值,直到再没有可行的操作可改善得到的结果。这种基本操作具体通过生成一个闭合环,将图像分割为两个相互独立的像素子集,对其中一个子集的像素相位值增加  $2\pi$ ,分割线位置的跳跃数值将随之改变1或-1,而环的位置也标识着这种操作引起的跳跃数发生改变的位置。这种基本操作只需保证移除的“不连续”的数目比添加上的“不连续”多。此时,生成的环也称为“增长环”。

假设在包裹相位图的像元阵列平面上交错分布着另一个称为“节点”阵列的两维阵列,其阵列点在水平和垂直方向上与像元点之间的距离为相邻像元间距的  $1/2$ ,如图1所示。图中实心圆点“ $\cdot$ ”表示像元,空心方形点“ $\square$ ”为节点;连接节点与节点之间的箭头,表示被该箭头分离的一对相邻像素跳跃数的变化,称为“边”。像元上的数字表示包裹相位值,箭头上的数字表示边的值,边的值根据跳跃数值以及边的取向来确定,具体数值为1或-1。每一条边都分隔开一对像素,表示这对像素的跳跃数值的变化。按规定,方向向左的边,表示相应位置垂直跳跃数值的增加趋势,向右则表示减小趋势;方向向下的边,表示相应位置水平跳跃数值的增加趋势,向上则表示减小趋势。跳跃数的变化相应将引起(4)式中  $E$  的变化。算法通过扫描计算,不断在节点间添加上边,生成了一系列节点树。每一个节点孤立或是一个节点树的根节点,或能够从某个节点树的根节点沿一条唯一的路径到达它。而如果添加上某条边后刚好和原有的边首尾相接,就形成一个闭合环,就是“增长环”,此时将触发一个基本操作。若环为逆时针走向,则表示将对环内包围的像素相位加  $2\pi$ ,反之若为顺时针走向,则表示环外的像素相位加  $2\pi$ ,同时环上的边也将被移除。随之,衡量全局不连续性的跳跃数总和将趋于减小。

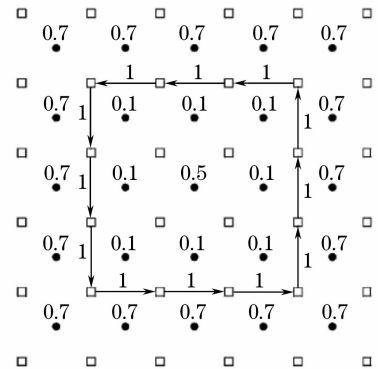


图1 边和节点示意图

Fig. 1 Schematic of nodes and edges

算法重复该过程直到没有新的增长环被搜寻到,没有新的基本操作触发。此时,全局不连续也趋于最小。此时展开得到的相位,就是一个最小不连续解。

### 3 基于边缘检测的最小不连续相位展开新算法

采用数字图像处理技术中的边缘检测技术,结合形态学图像处理中的膨胀、腐蚀等操作,确定出相位不连续所在的区域,在该区域扫描寻找增长环进行跳跃数增减操作,使全局相位不连续最小,可成功展开包裹相位图。这种基于边缘检测的方法,去除了不包含相位不连续的冗余区域,使增长环的循环搜寻过程恰当地限制在相位不连续所在的有效区域,极大地改善了算法的运行效率。

#### 3.1 新算法总体流程

在基于最小不连续算法基本思想的基础上,在进入循环扫描搜索增长环的阶段前,先利用包围孤立噪声相位点的相邻四节点跳跃数值的分布进行去噪预处理。经过这个预处理阶段,可避免在后继的循环扫描过程中处理这些点,减少不必要的添加边操作。然后利用边缘检测技术,检测出相位不连续所在的有效区域,定为“扫描区”,从而把循环扫描寻找增长环的过程限定在该区域内。

基于边缘检测的最小不连续算法的步骤为:

- 1) 读取数据,并进行归一化处理,计算输入相位的跳跃数;
- 2) 根据包围孤立噪声点的相邻四节点的特征

值,进行孤立噪声点扫描预处理;

- 3) 利用边缘检测算子计算出相位跳变区域作为扫描区域,并设为 0、1 二值模板。

根据图像特征,对于检测出的相位跳变区域进行膨胀、腐蚀等操作,以确保得到的相位跳变区域连续完整,作为寻找增长环的扫描区;

- 4) 在扫描区不断循环扫描生成闭合增长环,触发基本操作,对跳跃数增减,移除增长环;

- 5) 依据跳跃数计算展开相位。

可见,新算法与 T. J. Fylnn 提出的最小不连续算法相比,扫描区域的面积显著减少。

#### 3.2 孤立噪声点预处理

很多包裹相位图像存在孤立的噪声点,也就是包裹相位图中的某些点与它周围的四个邻域点存在不连续。对这些点先进行预处理,相当于在扫描前的一个去噪过程,可避免在后期的扫描中这些点引起的冗余边的添加,在一定程度上可缩短扫描的过程。这些点在其跳跃数的数值上都有一定的特征,处理后对应的跳跃数可直接置零,即消除该处的不连续。

最小不连续算法中的边具有方向性,添加某个方向的边也意味着对对应跳跃数值进行增减的改变。从节点  $(m, n)$  到节点  $(m', n')$  的边,其值标记为  $\delta V(m, n, m', n')$ , 设为 1 或 -1, 表示对应像素点跳跃数值的增或减。通过添加边的方向与边的值配合对跳跃数进行改变。添加边的方向性代表着对应跳跃数的增加或减少,每个边也对应着它的数值  $\delta V$ 。具体设置如表 1 所示,其中符号 -- 表示相应的值减 1, ++ 表示相应的值加 1。

表 1 边的方向与数值设置规定

Table 1 Definition of the direction and value of edges

Edge added from node $(m, n)$ to node $(m', n')$	Value of jump count	$\delta V(m, n, m', n')$	Change of jump count
	$v_{m', n'} = 0$ or $-1$	-1	$v_{m', n'} --$
	$v_{m', n'} = 1$	1	
	$v_{m, n} = 0$ or $1$	-1	$v_{m, n} ++$
	$v_{m, n} = -1$	1	
	$z_{m', n'} = 0$ or $1$	-1	$z_{m', n'} ++$
	$z_{m', n'} = -1$	1	
	$z_{m, n} = 0$ or $-1$	-1	$z_{m, n} --$
	$z_{m, n} = 1$	1	

当相邻四个节点的边首尾相接构成一个环时,如果四条边对应的数值都是正数,也就是 1,那么该环必然为增长环。逆时针情况的增长环,四节点水平跳跃数为  $\begin{bmatrix} * & 1 \\ * & -1 \end{bmatrix}$ 、垂直跳跃数为  $\begin{bmatrix} * & * \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$ ,表示节点所包围的像素点的相位值比它的四个邻域高;顺时针情况的增长环,四节点水平跳跃数为  $\begin{bmatrix} * & -1 \\ * & 1 \end{bmatrix}$ 、垂直跳跃数为  $\begin{bmatrix} * & * \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$ ,表示节点所包围的像素点的相位值比它的四个邻域低(\*为任意数)。满足这两种情况的相邻四节点构成的增长环,根据表 1 的跳跃数改变规则,跳跃数将全部变为 0,消除了该处的不连续。

算法先扫描出符合上述两种跳跃数情况的 4 节点,将其对应跳跃数置零,在进入循环扫描前先消除这类孤立噪声点,可避免循环扫描中的冗余扫描。

### 3.3 基于边缘检测技术检测“扫描区”

最小不连续算法的核心步骤在于扫描搜寻增长环,触发基本操作,使不连续趋于最小。只有生成了增长环,才对最后的展开有贡献。而这些环产生的像元位置与原始包裹相位图可检测到的图像边缘轮廓区域基本吻合,所以通过边缘检测技术以及膨胀腐蚀等图像处理操作,如果能够标识出增长环可能出现的位置,设定为扫描区,其他不可能包含相位不连续的区域设定为“非扫描区”,循环扫描区域的面积显著减少,而且也将对增长环的产生起引导作用,避免了很多冗余边的产生,达到提高效率的目的。

经典的边缘检测方法是对原始图像中像素的邻域来构造边缘检测算子,不同的检测算子得到不同的效果<sup>[16,17]</sup>,实验证明 Sobel 边缘检测算子和 Canny 边缘检测算子在本算法中具有较好的使用效果。

Sobel 微分算子是一种(3×3)的模板下的全方向微分算子。它是在求梯度之前首先对邻域平均或加权平均,然后微分,一定程度上可以抑制噪声。Sobel 微分算子的定义如下:

$$\begin{aligned} D_x &= [f(x+1, y-1) - f(x-1, y-1)] + \\ &\quad 2[f(x+1, y) - f(x-1, y)] + \\ &\quad [f(x+1, y+1) - f(x-1, y+1)], \\ D_y &= [f(x-1, y+1) - f(x-1, y-1)] + \\ &\quad 2[f(x, y+1) - f(x, y-1)] + \\ &\quad [f(x+1, y+1) - f(x+1, y-1)], \\ \Delta f &= \sqrt{D_x^2 + D_y^2}, \end{aligned} \quad (7)$$

式中  $f(x, y)$  为要处理的像素,  $D_x$  和  $D_y$  分别为  $x, y$  两分量的微分算子,  $\Delta f$  为 Sobel 算子处理后得到的结果。经过 Sobel 锐化算子处理过后,必须对其设定一个合适的阈值,将图中小于阈值的点设为 0,大于阈值的点设为 1,得到二值图像。由于该算法对边缘检测的要求是得到的边缘区必须是连通不间断的,才能保证增长环能有效生成。所以, Sobel 算子检测出的边缘比较粗,容易出现边缘模糊现象,但选取合适的阈值可得到连贯的轮廓,比较适用于具有简单清晰轮廓、包含少量噪声的图像数据。

Canny 算子是一个具有滤波、增强和检测的多阶段的优化算子。设  $I$  表示图像,  $G$  为二维高斯函数,  $G_n$  为  $G$  的一阶微分,

$$G_n = \frac{\partial G}{\partial n} = n \nabla G, \quad (8)$$

式中  $n = \frac{\nabla(Gf)}{|\nabla(Gf)|}$ ,  $\nabla G = \left( \frac{\partial G}{\partial x}, \frac{\partial G}{\partial y} \right)$ 。Canny 算法首先用高斯函数与图像卷积,平滑图像,然后通过计算梯度幅值将局部强度值有明显变化的点突出出来,再经过一个非极大值抑制的过程,求出局部最大值:

$$\frac{\partial}{\partial n} G_n f = \frac{\partial^2}{\partial n^2} G f = 0, \quad (9)$$

最后通过双阈值来连接边缘。Canny 算子边缘提取的结果位置比较准确,提取边缘为单像素的。对于干涉合成孔径雷达(IFSAR)数据图像以及磁共振数据图像,由于图像本身边缘比较清晰细密,用 Canny 算子可更有效地检测出所需要的区域。

由于包裹相位图有很多过渡区域,所以现有边缘检测技术并不能很准确地检测出这些过渡区域,这样检测出的边缘难免会呈现断续的现象,导致扫描区域间断而无法实现闭环的检测,而不满足扫描区连通的要求。所以,对于利用边缘检测技术检测出的边界区域,还需进行一个边缘检测后处理过程,以保证扫描区的连续性,使闭合增长环能够顺利生成。这个步骤通常可利用形态学图像处理中的膨胀和腐蚀<sup>[17]</sup>来实现。根据不同的图像,对于膨胀和腐蚀的结构元素需进行一定的调整,通常采用方形或三角形的结构元素。

由于设定了扫描区,使得增长环的生成过程只能沿着一定的方向和路径,排除了很多冗余边的生成,使得寻找增长环的过程更加迅速有效,同时噪声也不易传播到其他区域。

## 4 结果与讨论

### 4.1 模拟数据的相位展开

图 2(a)为计算机模拟的局部带噪声的平面剪切包裹相位图,图像大小为  $257 \text{ pixel} \times 257 \text{ pixel}$ ,对图像归一化后,在中间  $57 \text{ pixel} \times 57 \text{ pixel}$  区域叠加了期望值为 0、方差为 0.1 的高斯噪声。针对该数据图像,新算法采用了 Sobel 算子进行边缘检测,并选取适当阈值分离背景与目标边缘,再对其用结构元素为  $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$  的全 1 矩阵进行膨胀操作,然后用结构元素是  $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$  的全 1 矩阵对上述结果进行腐蚀操作,得到“扫描区”,如图 2(b)中的白色区域所示。在扫描区循环扫描增长环,增减

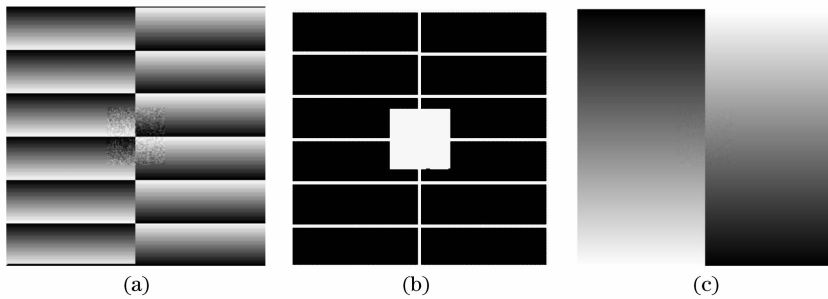


图 2 图像中心区域带高斯噪声的平面剪切包裹相位图的展开。(a)包裹相位图,(b)利用 Sobel 算子并经膨胀与腐蚀处理后得到的“扫描区”(白色区域),(c)新算法的相位展开结果

Fig. 2 Unwrapping of a planar shear wrapped phase image with Gaussian noise in central area. (a) wrapped phase image, (b) “scanning area” (white areas) obtained by using Sobel operator, dilation and erosion operator, (c) unwrapped result by the new algorithm

表 2 新算法与最小不连续算法对带噪声平面剪切包裹相位图的展开效率比较

Table 2 The efficiency comparison between the new method and Flynn's algorithm in unwrapping the noisy planar shear wrapped phase data

Algorithm	Relative area to be scanned / %	Number of generated edges	Number of generated improving loop	Relative processing time / %
Flynn's minimum discontinuity approach	100	644318	28	100
New algorithm based on edge detection	10.5	121088	25	24.2

图 3(a)为计算机模拟的一个螺旋剪切表面的包裹相位图,图像大小为  $257 \text{ pixel} \times 257 \text{ pixel}$ ,它包含相互卷绕同时互为倾斜的两个平面,两个平面间存在的轮廓不连续,构成了螺旋剪切的边界。处理该数据,使用了相位导数方差质量图<sup>[1]</sup>,如图 3(b)所示。对该数据边缘检测采用了同噪声平面剪切图一样的 Sobel 算子和膨胀与腐蚀处理方法,并且对跳跃数不为 0 的连续像素区进行了单像素细线化,进一步减少了扫描区域,并且引导了增长环的生成路径,最终获得的扫

环上的跳跃数,最后展开得到的相位图,如图 2(c)所示。从展开效果看,新算法和最小不连续算法<sup>[7]</sup>得到的相位展开值与无噪声剪切图的理论展开值的标准差均为  $0.148 \text{ rad}$ ,展开结果在视觉上完全相同。而从效率上,如表 2 所示,经过边缘检测后,扫描区的面积仅占原扫描面积的  $10.5\%$ ,同时由于检测出边缘的限制,引导了增长环的生成路径,避免了许多冗余边的生成。最小不连续算法循环生成的边的数目为 644318,形成并移除的增长环数量为 28,而新算法循环生成的边的数目为 121088,形成并移除的增长环数量为 25,运行时间是最小不连续算法运行时间的  $24.2\%$ ,在效率上有了很大的提高。

描区为图 3(c)中的黑色区域。新算法得到的展开结果及其三维显示分别如图 3(d)和图 3(e)所示。新算法的展开结果与最小不连续算法得到的结果差异主要是在螺旋臂边缘的局部像素如图 3(f)所示,灰色区域为无差异区域,白色和黑色区域为差异区域,占总面积的  $1.84\%$ 。这个差异对于展开的效果没有实质性的影响。而从表 3 可见,与最小不连续算法相比,新算法生成的边数和增长环数小了一个量级,时间也仅为最小不连续算法的  $21.5\%$ ,运行效率显著提高。

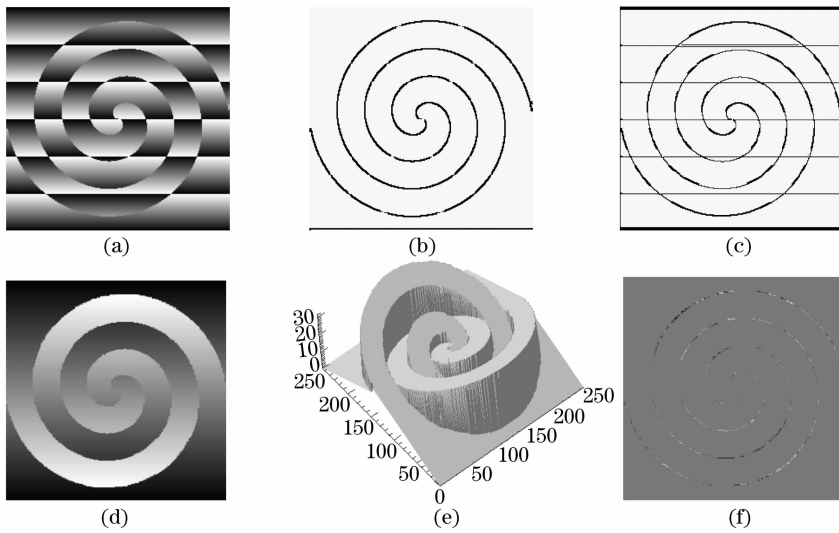


图 3 螺旋剪切包裹相位图的展开。(a)包裹相位图,(b)质量图,(c)利用 Sobel 算子检测并经膨胀与腐蚀处理得到的“扫描区”(黑色区域),(d)新算法的相位展开结果,(e)对应(d)的三维显示,(f)新算法和最小不连续算法展开结果的差异

Fig. 3 Unwrapping of a spiral shear wrapped phase data. (a) Wrapped phase image, (b) quality map, (c) “scanning areas” (black areas) obtained by using Sobel operator, dilation and erosion operator, (d) unwrapped result by the new algorithm, (e) three-dimensional rendering of Fig. 3 (d), (f) difference between the results obtained by new and Flynn’s algorithm

表 3 新算法与最小不连续算法对螺旋剪切包裹相位图的展开效率比较

Table 3 Efficiency comparison between the new and the Flynn’s minimum discontinuity algorithm in unwrapping the spiral shear wrapped phase data

Algorithm	Relative area to be scanned / %	Number of generated edges	Number of generated improving loop	Relative processing time / %
Flynn’s minimum discontinuity approach	100	2424434	476	100
New algorithm based on edge detection	10.21	262668	77	21.5

### 4.2 实测数据的相位展开

图 4(a)为一实际测量获得的干涉合成孔径雷达 (IFSAR)干涉相位图像<sup>[1]</sup>,图像大小为 512 pixel × 512 pixel,有比较清晰的轮廓,但部分区域质量较低。针对该数据图像,新算法采用了 Canny 算子进行边缘检测,得到二值边缘,并且对其进行膨胀操

作,得到检测出来的“扫描区”,如图 4(b)。图 4(c)是原最小不连续算法成功展开相位图与原包裹相位图相比跳跃数发生改变的区域。图 4(b)的区域基本覆盖了图 4(c)的区域,所以在检测出的扫描区内扫描,就可对需改变的跳跃数进行增长操作,而不会对展开效果有影响。图 4(d)是最后展开得到的相

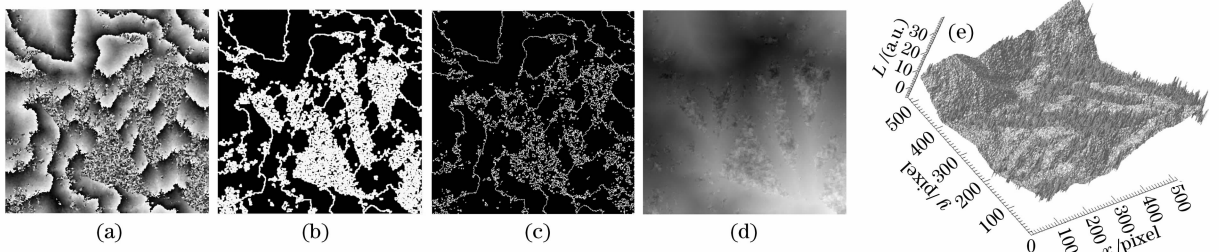


图 4 IFSAR 干涉图展开结果。(a)包裹相位图,(b)利用 Canny 算子检测并膨胀后得到的“扫描区”(白色区域),(c)原 Flynn 算法展开后跳跃数变化区域,(d)新算法相位展开结果,(e)对应(d)的三维表示

Fig. 4 Unwrapping of an interferometric synthetic aperture radar (IFSAR) wrapped phase image with surface discontinuities. (a) Wrapped phase image, (b) “scanning areas” (white areas) obtained by edge detection using Sobel operator and dilation operation, (c) change areas of jump numbers by the use of Flynn’s minimum discontinuity approach, (d) unwrapped result by new algorithm, (e) three-dimensional rendering of Fig. 4(d)

位图,图 4(e)是其相应的三维表示。比较新算法和最小不连续算法的展开结果,存在差异的部分为整个图像面积的 2.36%,基本上都分布在原包裹图像

的高噪声区域,展开效果比较理想,而效率上则提高许多,如表 4 所示。

表 4 真实 IFSAR 包裹相位图的新算法与原算法展开效率比较

Table 4 Efficiency comparison of the new algorithm and the Flynn's minimum discontinuity approach in unwrapping the IFSAR wrapped phase data

Algorithm	Relative area to be	Number of generated	Number of generated	Relative processing
	scanned /%	edges	improving loop	time /%
Flynn's minimum discontinuity approach	100	7166970	4973	100
New algorithm based on edge detection	35.23	1374523	4356	31.82

可见,新算法可以在保证展开效果的情况下,显著提高其效率,是一种快速可靠的相位展开方法。

## 5 结 论

针对最小不连续算法效率较低的缺陷,提出了一种快速、可靠的相位展开新算法。在基于最小不连续算法的基础上,预处理消除了孤立噪声点,然后利用边缘检测技术有效减少扫描范围,加速增长环的生成,从而显著提高了效率。计算机模拟相位图 and 实际相位图的相位展开结果表明,本文算法在效率上优于最小不连续算法,并能得到较好的相位展开结果。

## 参 考 文 献

- 1 D. C. Ghiglia, M. Pritt. *Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software* [M]. New York: Wiley-Interscience Publication, 1998
- 2 J. M. Huntley, H. Saldner. Temporal phase unwrapping algorithm for automated interferogram analysis[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(17): 3047~3052
- 3 Lei Zhihui, Li Jianbing. Full automatic phase unwrapping method based on projected double spatial frequency fringes [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 39~42  
雷志辉,李健兵. 基于双频投影条纹的全自动相位解包裹方法 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(1): 39~42
- 4 Gai Shaoyan, Da Feipeng. A new fast phase unwrapping method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 259~267  
盖绍彦,达飞鹏. 一种新的快速解相位方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 259~267
- 5 R. M. Goldstein, H. A. Zebker, C. L. Werner. Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping [J]. *Radio Science*, 1988, **23**(4): 713~720
- 6 T. J. Flynn. Consistent 2-D phase unwrapping guided by a

- quality map [C]. *Proc. International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1996. 2057~2059
- 7 T. J. Flynn. Two-dimensional phase unwrapping with minimum weighted discontinuity [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(10): 2692~2701
  - 8 Yuangang Lu, Xiangzhao Wang, Guotian He. Phase unwrapping based on branch cut placing and reliability ordering [J]. *Opt. Eng.*, 2005, **44**(5): 055601
  - 9 Lu Yuangang, Wang Xiangzhao, He Guotian *et al.*. Quality-guided phase unwrapping based on placement of branch cuts [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 460~464  
路元刚,王向朝,何国田等. 基于分支设置的质量导引相位展开算法 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(4): 460~464
  - 10 D. C. Ghiglia, L. A. Romero. Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(1): 107~117
  - 11 D. C. Ghiglia, L. A. Romero. Minimum  $L^p$ -norm two-dimensional phase unwrapping [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1996, **13**(10): 1999~2013
  - 12 Yuangang Lu, Xiangzhao Wang, Xuping Zhang. Weighted least-squares phase unwrapping algorithm based on derivative variance correlation map [J]. *Optik*, 2007, **118**(2): 62~66
  - 13 Zhu Yongjian, Liu Liren, Luan Zhu *et al.*. New quality map based on modulation for phase unwrapping algorithm [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(5): 667~672  
朱勇建,刘立人,栾竹等. 相位解包裹算法中基于调制度的新质量图 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 667~672
  - 14 M. Costantini. A novel phase unwrapping method based on network programming [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, **36**(3): 813~821
  - 15 F. Carballo, P. W. Fieguth. Probabilistic cost functions for network flow phase unwrapping [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, **38**(5): 2192~2201
  - 16 A. Collaro, G. Franceschetti, F. Palmieri *et al.*. Phase unwrapping by means of genetic algorithms [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1998, **15**(2): 407~418
  - 17 Milan Sonka, Vaclav Hlavac, Roger Boyle. *Image Processing, Analysis, and Machine Vision* [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2002. 77~93, 563~573