

一种分区域的复合相位解缠算法

钟何平¹ 周萌² 唐劲松¹

1 海军工程大学海军水声技术研究所,湖北 武汉,430033

2 海军工程大学训练部,湖北 武汉,430033

摘要:提出了一种分区域的复合相位解缠算法。首先根据相位质量图将缠绕相位分成高、低质量区域,并采用质量引导算法求解初始解缠相位。然后采用区域生长法识别出所有的低质量区域,每个低质量区域信息单独存储。最后依次对每个低质量区域进行最小不连续优化,获取最终的解缠相位。对 InSAR 干涉相位图的解缠试验结果表明,该方法计算效率较最小不连续性算法高一个量级,而计算精度优于质量引导算法,在两者之间取得了很好的平衡。

关键词:相位解缠;质量引导;最小不连续;复合算法

中图法分类号:P225; TN958 **文献标志码:**A

相位解缠是干涉信号处理中极其关键的步骤,其本质是从缠绕相位中恢复真实相位差,已广泛应用于干涉合成孔径雷达(InSAR)信号处理中^[1,2]。相位解缠精度直接影响到 InSAR 所生成的数字高程模型(digital elevation model, DEM)精度,因此,解缠精度与速度同样重要。

目前对相位解缠算法的研究主要是从解缠精度和解缠速度两个方面进行的。大多数相位解缠算法中,解缠精度与解缠速度成反比,同时兼顾解缠速度和解缠精度非常困难。目前相位解缠算法主要分为路径跟踪算法^[3]、最小范数法^[4]和网络流法^[5,6]等。路径跟踪法的特点是通过显性或隐性的方式生成枝切线,将误差限制在噪声区域,但低质量区域容易出现误差累积。最小范数算法是将相位解缠问题转化为最小化全局函数优化问题,通过寻求一个全局的解缠相位来拟合观测的缠绕相位,但若权重设置不当会将误差传递到高质量区域。网络流法将相位解缠问题转化为求解最小费用流的网络优化问题,以达到降低相位解缠算法时间和空间复杂度的目的。在已有的相位解缠算法中,质量引导算法是一种非常可靠的方法,其解缠结果完全取决于相位质量图,大量学者对可靠的相位质量图计算方法^[7,8]进行了深入研究。为了加速质量引导过程,文献^[3]提出了量化质量引导策略,极大地优化了解缠速度。质量引

导相位解缠算法的特点是速度快,解缠结果中无解缠“死区”,高质量区域解缠结果可靠,低质量区域容易出现误差累积。最小不连续算法^[9]是一种全局优化算法,它以解缠结果中的最小不连续性为优化目标,解缠结果比较平滑,文献^[10,11]对最小不连续算法进行了速度优化。最小不连续算法的特点是解缠速度慢,但解缠结果不连续性小,可以有效抑制低质量区域的误差累积。

本文在充分利用质量引导相位解缠算法和最小不连续相位解缠算法各自优点的基础上,提出了一种复合相位解缠算法。首先根据相位质量图进行高低质量区域分割,然后采用量化质量引导算法进行初始解缠相位求解,最后依次对每个低质量区域进行最小不连续优化,消除初始解缠结果中的累积误差。试验结果表明,本文方法在保持高质量区域解缠精度的同时,可以有效抑制误差传播,且能极大优化解缠速度。

1 基本理论

1.1 相位解缠

相位解缠就是从缠绕相位数组中恢复真实相位差的过程。解缠前后缠绕相位 $\psi(x, y)$ 和解缠相位 $\varphi(x, y)$ 之间满足如下关系:

$$\psi(x, y) = W[\varphi(x, y)] = \text{mod}\{\varphi(x, y), 2\pi\},$$

$$0 \leq \psi(x, y) < 2\pi \quad (1)$$

式中, W 是缠绕运算。当所有相邻点相位差满足采样定理时, 直接沿任意一路径进行积分就可以获得解缠相位, 但实际上, 部分成像区域相干性低下, 不满足采样定理, 增加了相位解缠的难度。

1.2 质量引导算法

质量引导算法是一种路径跟踪相位算法, 其解缠顺序完全取决于质量图, 它基于如下假设, 即质量图可以引导积分路径, 这些积分路径所包围的区域不包括未平衡的残差点。快速质量引导算法^[3]的基本操作流程如下。

- 1) 计算相位质量图, 将质量等级设置为 1 000, 然后将质量值用 1~1 000 的整数表示;
- 2) 找出具有最高相位质量值的相位点 x_1 , 将其缠绕相位作为解缠相位;
- 3) 对 x_1 的未解缠邻域相位点进行解缠;
- 4) 将解缠后的邻域节点按照相位质量值加入到优先队列;
- 5) 在优先队列中找出具有最高质量值的节点 x_2 ;
- 6) 将 x_2 从优先队列中移除, 并跳转到步骤 3)。

1.3 最小不连续算法

相位解缠的实质就是在每个缠绕相位 $\psi(x, y)$ 加上一个 2π 的整数倍 $c_{m,n}$ 来恢复真实相位的过程。其中, 解缠相位 $\varphi(x, y)$ 与缠绕相位 $\psi(x, y)$ 之间满足:

$$\varphi(x, y) = \psi(x, y) + 2\pi \cdot c_{m,n} \quad (2)$$

式中, $c_{m,n}$ 称为缠绕数。在已有相位解缠算法中, 最小不连续算法能够成功对不同质量的干涉图进行相位解缠, 其基本原理如下: 如果相邻相位的差值在幅度上超过 π , 就认为这两点之间不连续, 相邻像元可以为水平方向, 也可以为垂直方向。最小不连续算法就是选择满足整体解缠相位不连续性最小的缠绕数矩阵 C 。整体解缠相位的不连续性 E 可以由垂直跳跃数 $v_{m,n}$ 和水平跳跃数 $z_{m,n}$ 来计算, 分别定义如下:

$$\begin{cases} v_{m,n} = \text{Int}\left(\frac{\varphi_{m,n} - \varphi_{m-1,n}}{2\pi}\right) \\ z_{m,n} = \text{Int}\left(\frac{\varphi_{m,n} - \varphi_{m,n-1}}{2\pi}\right) \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\text{Int}(\cdot)$ 表示取其最邻近的整数值。因此, 解缠相位的跳跃数幅度和为:

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

E 即为全局解缠相位不连续性的衡量标准, 也是最小不连续相位解缠算法的优化目标。在给定质量图的情况下, 还可以拓展为带权重的最小不连

续算法, 抑制优化过程中的误差传递。最小不连续算法的最大缺点就是优化过程速度慢。

2 算法描述

2.1 区域分割

复合相位解缠算法的第一步就是进行高、低质量相位区域分割, 分割结果在本质上是一个只包含 0、1 两个元素的二维数组, 称之为掩膜。掩膜可以有效屏蔽不包含有效相位或相位质量很低的区域, 也可以作为复合相位解缠算法分区域解缠的基础。通常, 采用相关系数图提取掩膜比较可靠, 在无法获得相关系数图时, 相位梯度变化质量图是最可靠的相位质量图。此时应先根据干涉图计算出相位梯度变化质量图, 然后进行掩膜提取。质量图是干涉相位可靠性的直接度量, 因此, 最简单的掩膜提取方法就是为质量图设置一个阈值, 低于阈值的区域, 掩膜设置为 1, 认为该区域内的干涉相位是不可靠的; 高于阈值的区域, 掩膜设置为 0, 认为该区域内的干涉相位是可靠的。如果掩膜值设置过低, 不能充分屏蔽掉低质量区域, 采用路径跟踪算法进行解缠时, 误差就容易向低质量区域传播; 反之, 阈值设置过高, 有些高质量区域将被误认为低质量区域, 采用最小不连续算法优化低质量区域解缠结果时, 会增加优化时间。因此, 掩膜提取的标准是既要屏蔽掉低质量相位区域, 又要使屏蔽的区域尽量小。计算出质量图后, 采用图像分割法中的最大类间方差法^[12]进行阈值计算。在提取的初始掩膜中, 噪声区域容易出现错误的高质量区域。为消除噪声区域中的错误高质量区域, 需要对初始掩膜进行形态学上的闭合操作, 以更好地区分高质量区域和低质量区域。

2.2 低质量区域识别

完成高、低质量区域分割后, 应准确识别出所有的低质量区域, 以便将优化区域限制在低质量区域, 节省优化时间。区域分割的结果为一个掩膜图, 只包含 0、1 两个元素, 0 表示高质量相位点, 1 表示低质量相位点, 如图 1(a) 所示。图 1 中灰度区域表示高质量区域, 白色区域为低质量区域, 整个干涉图被分为两个高质量区域和 3 个低质量区域, 其中低质量区域 2 内部包含一个高质量区域。低质量区域的识别涉及两个问题, 一是同一低质量区域的判断, 二是低质量区域的存储。对于同一低质量区域的判断采用区域生长法, 低质量区域识别的具体流程如下。

(1) 按照先行后列的顺序依次扫描掩膜数组,直至发现未归类的低质量相位点。如果没有发现未归类的低质量相位点,算法结束。

(2) 以当前低质量相位点为种子,并将其作为已归类标记,然后将与其相连的低质量相位点放入队列。

(3) 从当前队列中取出一个节点,将其作为已归类标记,并将其四邻域中未归类的低质量相位点放入队列。这个过程一直持续到队列为空,当前低质量区域生长完毕为止。在生长过程中,将低质量区域按照顺序进行编号。随后跳转到步骤(1)。

按照先行后列的顺序对低质量区域进行识别时,图 1(a)中 3 个低质量区域的种子点均位于该

区域的第一行。对图 1(a)中低质量区域进行标识后的结果如图 1(b)所示,分别采用从 1 开始的不同整数在高低质量区域的分割结果数组对低质量区域进行标识。

低质量区域的存储采用图 1(c)所示的链表结构,其中第 1 维表示区域编号,将该区域内的节点统一放入到当前指针所指的链表。链表节点包含 3 个元素,即当前节点的行数、列数和指向下一个节点的指针。完成低质量区域标识后,直接对低质量区域进行顺序扫描,将低质量区域编号为 i 的节点插入到下标为 i 的数组指针所指向的队列。完成一次低质量区域识别数组的遍历,即可完成低质量区域二维存储结构的建立,实现低质量区域的相位分区域存储。

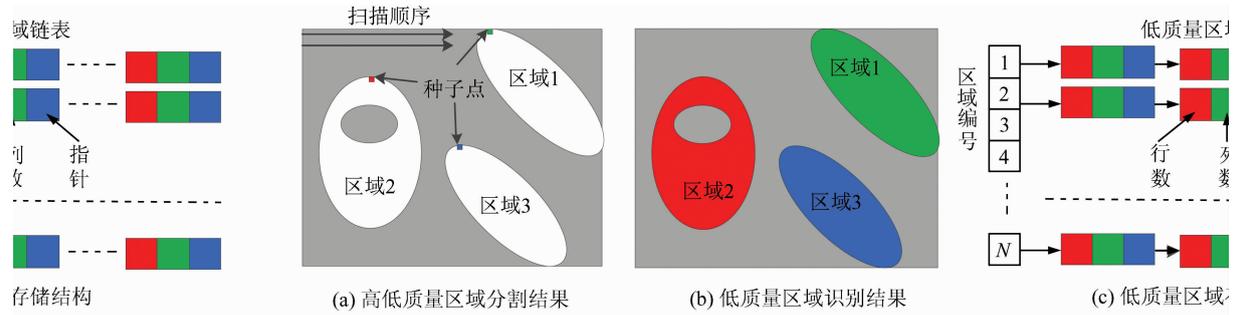


图 1 低质量区域识别
Fig. 1 Low Quality Areas recognition

2.3 低质量区域优化

完成高低质量区域分割后,应采用量化质量引导算法对整块干涉相位图进行相位解缠,获得初始解缠结果。在初始相位解缠结果中,假设高质量区域和低质量区域的个数分别为 N_H 和 N_L ,第 i 个高质量区域和低质量区域的不连续性大小分别记为 D_{h_i} 和 D_{l_i} ,第 i 个低质量区域与高质量区域边界的不连续性记为 E_{D_i} ,则初始解缠结果中的总不连续性大小可表示为:

$$E = \sum_{i=1}^{N_H} D_{h_i} + \sum_{i=1}^{N_L} D_{l_i} + \sum_{i=1}^{N_L} E_{D_i} \quad (5)$$

由于质量引导算法在高质量区域的解缠结果可靠,因此高质量区域的不连续性非常小,可以近似为零,或者固定小常数。这时要使初始解缠结果中的不连续性 E 最小,等价于使 $\sum_{i=1}^{N_L} D_{l_i}$

+ $\sum_{i=1}^{N_L} E_{D_i}$ 最小。由于每一个低质量区域内部及其与高质量区域边界的不连续性大小是相互独立的,只需每一个低质量区域的 $D_{l_i} + E_{D_i}$ 最小,则总解缠结果中不连续性最小。

对于每个低质量区域的优化,主要通过生长树来寻找增长环,然后将增长环消除来减小低质量区域内部及其与高质量区域边界的不连续性。在最小不连续算法中^[12],跳跃数和缠绕数可以相互推导。缠绕数 $c_{m,n}$ 的增加将导致跳跃数 $v_{m,n}$ 、 $z_{m,n}$ 的增加和 $v_{m-1,n}$ 、 $z_{m,n-1}$ 的减小。同理,如果一个区域像元的缠绕数都增加 1,则这块区域周围的跳跃数都增加或减小 1。相反,跳跃数的变化也反映缠绕数的变化。消圈时重复遍历当前低质量区域,直至低质量区域内不存在增长环为止。完成所有低质量区域的增长环消除后,再根据此时的跳跃数,计算出每个相位节点对应的缠绕数,得到最终的解缠结果。

2.4 复合相位解缠算法流程

复合相位解缠算法的总体流程如图 2 所示。首先根据缠绕相位图计算出相位质量图,采用最大类间方差方法计算出高低质量区域的分割阈值,并直接利用二值化方法对质量图进行二值分割,获得初步的高低质量区域分割结果。然后采用形态方法中的闭合操作对初始分割结果进行处理,获得较好的高低质量区域分割结果,并采用区域

生长法逐个识别出所有的低质量区域,将其存储在二维链表中。最后根据相位质量图进行量化质量引导求解初始解缠结果,并对每个低质量区域逐个优化,求解最终解缠相位。

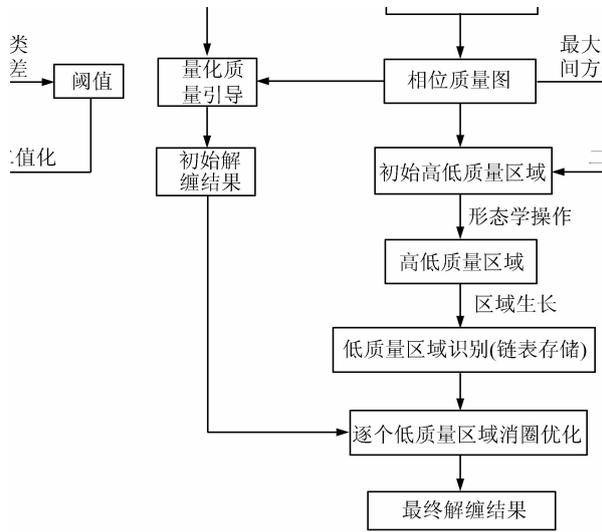


图2 复合相位解缠算法流程

Fig. 2 Flow Chart of the Combined Phase Unwrapping Algorithm

3 试验及结果分析

为验证本文所提出的复合相位解缠算法的效果,对不同解缠算法进行了测试。测试环境为CPU为Intel(R) Pentium(R) G840 2.8 GHz,内存为4 GB,操作系统为Windows XP,软件环境为Visual Studio 2008。

试验选用了一幅大小为2 048像素×2 048像素的TerraSAR-X干涉数据,如图3(a)所示,其残差点数为138 341。干涉图中存在大片的低质量区域,低质量区域的存在给相位解缠带来了困难。试验过程中相位质量图选用可靠性较高的相位梯度变化质量图,窗口大小设置为3×3,采用量化质量引导时,质量等级设置为1 000。对二值化后的高低质量区域进行形态学上的闭合操作时,结构元素选用半径为5的圆形。测试不同相位解缠算法运行时间时,均采用Release模式对原程序进行了优化。试验过程中采用了量化质量引导算法,带权重最小不连续算法,网络流算法和本文所提算法,然后分别从解缠结果质量和算法效率两个方面对不同解缠方法进行了比较分析。

图3(a)所对应的相位质量图如图3(b)所示。从图3(b)中可以看出,干涉图中存在大量低质量

区域。采用最大类间方差法获取的质量阈值为0.843。先对质量图进行二值化,然后进行形态学处理后的低质量区域分割结果如图3(c)所示,共521个低质量区域。直接采用量化质量算法求解的解缠结果如图3(d)所示,低质量区域存在严重的误差累积现象。采用带权重的最小不连续算法进行解缠的结果如图3(e)所示,解缠结果不连续性与图3(d)相比大幅度降低,但在图3(e)中箭头所示宽度窄的高质量区域仍然存在相位跳变,权重没有有效阻止误差由低质量区域向高质量区域传播。最小费用流算法的解缠结果如图3(f)所示,图中箭头所示高质量位置仍然存在相位跳变现象。采用复合相位解缠方法所得到的解缠结果如图3(g)所示,其解缠结果中对应的低质量区域和高质量区域解缠结果分别如图3(h)和图3(i)所示。复合算法在有效优化低质量区域解缠结果的同时,保持了高质量区域解缠结果的连续性,整个相位解缠结果连续性良好。

此外,我们还从干涉相位图解缠结果中的不连续长度、不连续数目、相位梯度和解缠时间4个方面比较了量化质量引导算法、带权重最小不连续算法、网络流算法和本文所提算法的解缠性能,结果列于表1。从表1中可以看出,量化质量引导算法解缠结果中具有最大的不连续长度、不连续数目和相位梯度,但是解缠时间最少,仅为1 049 ms。带权重最小不连续算法和网络流算法解缠结果中的不连续性几乎相同,远小于量化质量引导算法解缠结果中的不连续性。但在解缠时间方面,带权重最小不连续算法需要223 607 ms,网络流算法只需62 337 ms。本文所提算法解缠结果中的总体不连续性比带权重最小不连续算法和网络流算法稍大,但其显著特点是高质量区域不存在相位跳变,而且解缠时间与带权重最小不连续算法相比大幅度降低,仅需74 863 ms。复合相位解缠算法的解缠时间主要包括两个部分,一是预处理时间,主要进行量化质量引导和低质量区域分割与识别;二是低质量区域的最小不连续优化。采用本文所提方法进行解缠时,预处理时间为1 862 ms,低质量区域优化时间为73 001 ms。从复合相位解缠算法解缠时间构成上看,低质量区域的优化时间占主要部分,高达97.5%。

4 结语

本文提出了一种分区域的复合相位解缠算法。首先根据相位质量图对干涉相位进行高低质

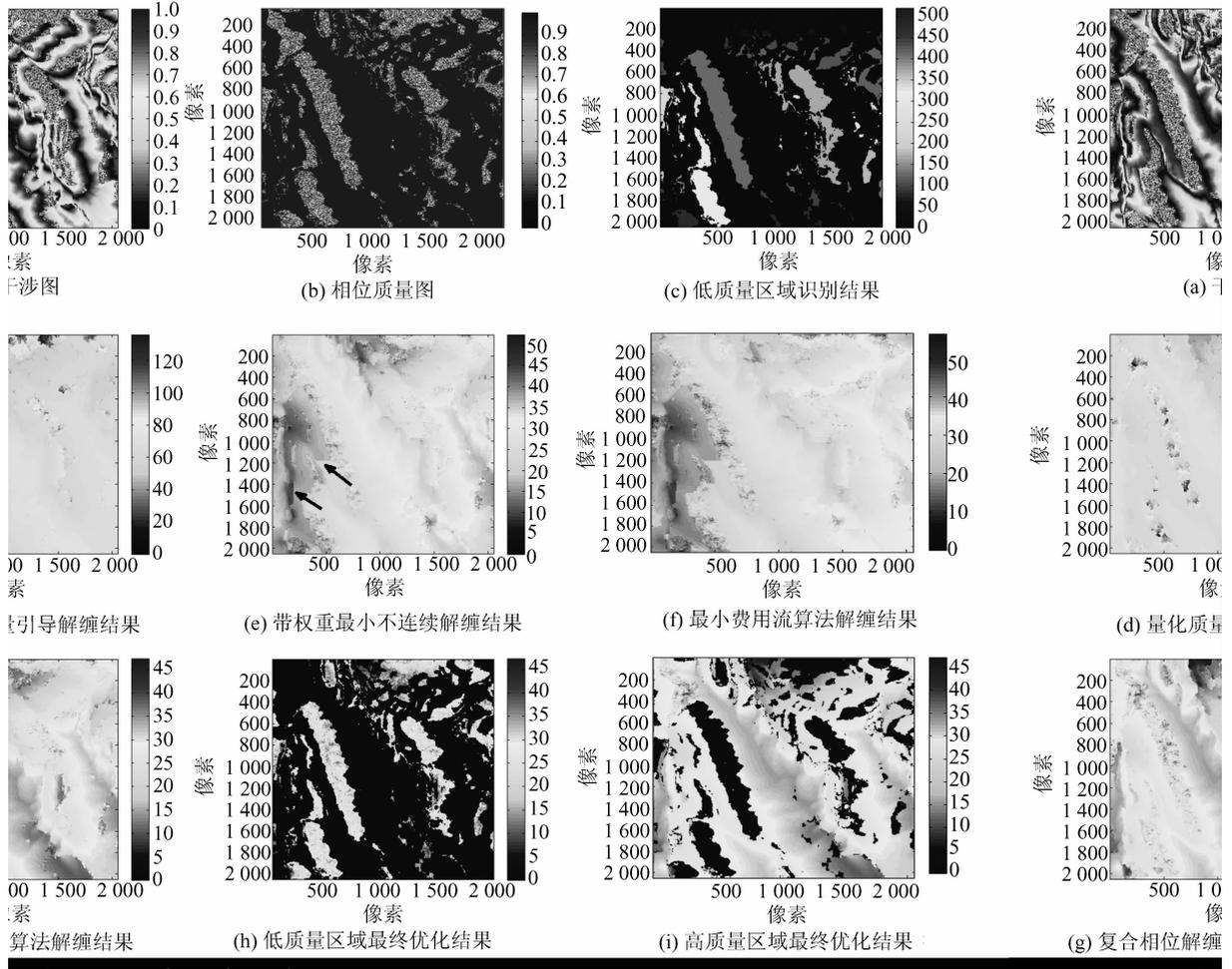


图 3 TerraSAR-X 干涉图解缠试验

Fig. 3 Unwrapping Test on TerraSAR-X Interferogram

表 1 不同相位解缠算法性能比较

Tab. 1 Performance Comparison Among Different Phase Unwrapping Algorithms

解缠方法	不连续长度	不连续数目	相位梯度	解缠时间/ms
量化质量引导算法	253 690	373 084	2 211 895	1049
带权重最小不连续算法	150 801	151 102	1 592 958	223 607
网络流算法	150 765	150 867	1 594 651	62 337
本文所提算法	156 081	156 597	1 643 966	74 863 ^①

注: 预处理时间为 1 862 ms, 低质量区域优化时间为 73 001 ms。

量区域分割,然后将量化质量引导相位解缠结果作为复合相位解缠算法的初始解缠相位,最后根据识别出的低质量区域,逐个进行最小不连续优化,获取最终解缠相位。复合相位解缠算法中对低质量区域的优化是独立进行的,可以针对不同低质量区域特征选用不同处理方法,也可以根据低质量区域的大小选择不同优化次序。从试验结果中可以看出,复合相位解缠算法的时间主要消耗在低质量区域的优化上,下一步工作主要围绕如何加速低质量区域的优化展开。

参 考 文 献

[1] Ghiglia C D, Pritt D M. Two-dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithm, and Software[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1998

[2] Xu Caijun, Wang Hua. Comparison of InSAR Phase Unwrapping Algorithms and Error Analysis [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(1): 67-71 (许才军, 王华. InSAR 相位解缠算法比较及误差分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(1): 67-71)

[3] Zhong Heping, Tang Jinsong, Zhang Sen, et al. A Fast Phase Unwrapping Algorithm Based on Quan-

- tized Quality Map and Priority Queue[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(3): 342-345(钟何平,唐劲松,张森,等.利用量化质量图和优先队列的快速相位解缠算法[J].武汉大学学报·信息科学版,2011,36(3):342-345)
- [4] Chen Qiang, Yang Yinghui, Liu Guoxiang, et al. InSAR Phase Unwrapping Using Least Squares Method with Integer Ambiguity Resolution and Edge Detection[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(3): 441-448(陈强,杨莹辉,刘国祥,等.基于边界探测的InSAR最小二乘整周相位解缠方法[J].测绘学报,2012,41(3):441-448)
- [5] Carballo G F. Statistically-based Multiresolution Network Flow Phase Unwrapping for SAR Interferometry[D]. Sweden:Kungliga Tekniska Hogskolan, 2000
- [6] Chen C W. Statistical-cost Network-flow Approaches to Two-dimensional Phase Unwrapping for Radar Interferometry[D]. California:Stanford University,2001
- [7] Cho B L,Kong Y K, Kim Y S. Quality Map Extraction for Radar Interferometry Using Weighted Window[J]. *Electronics Letters*, 2004, 40(8): 472-473
- [8] Quan C, Tay C J, Chen L, et al. Spatial-fringe-modulation-based Quality Map for Phase Unwrapping[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(35): 7 060-7 065
- [9] Flynn T J. Two-dimensional Phase Unwrapping with Minimum Weighted Discontinuity[J]. *Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*, 1997, 14(10): 2 692-2 701
- [10] Zhang Ting, Lu Yuangang, Zhang Xuping. The Application of Tabu Search on Minimum Discontinuity Phase Unwrapping Algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(8): 2 169-2 174(张婷,路元刚,张旭苹.禁忌搜索在最小不连续相位展开算法中的应用[J].光学学报,2009,29(8):2 169-2 174)
- [11] Zhang Ting, Lu Yuangang, Zhang Xuping. Minimum-discontinuity Phase Unwrapping Algorithm Based on Edge Detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(1): 180-186(张婷,路元刚,张旭苹.基于边缘检测的最小不连续相位展开算法[J].光学学报,2009,29(1):180-186)
- [12] Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-level Histograms[J]. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, 1979, 9(1): 62-66

A Combined Phase Unwrapping Algorithm by Regions Partition

ZHONG Heping¹ ZHOU Meng² TANG Jinsong¹

¹ Naval Institute of Underwater Acoustic Technology, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

² Department of Training, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

Abstract: We propose a combined phase unwrapping algorithm using region partitioning. The wrapped phase image is partitioned into high and low quality areas according to its quality map, and a quality guided algorithm is performed to get the initial unwrapped result. A quality guided strategy is adopted to identify low quality areas, and each low quality area is stored separately. The low quality areas are optimized by a minimum discontinuity phase unwrapping algorithm one by one, and then the final unwrapped result is obtained. An unwrapping test performed on an InSAR interferogram shows that the proposed algorithm is more efficient than the minimum discontinuity phase unwrapping algorithm, and the unwrapped result was more accurate than results obtained from a quality guided algorithm.

Key words: phase unwrapping; quality guided; minimum discontinuity; combined algorithm

First author: ZHONG Heping, PhD, specializes in signal processing of interferometry and parallel computing. E-mail: zheping525@sohu.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41304015, 61671461; China Postdoctoral Science Foundation, No. 2015M582313.