

密集残差点区域的解缠算法

魏志强, 金亚秋

复旦大学 波散射与遥感信息教育部重点实验室, 上海 200433

摘要: 针对其他路径跟踪相位解缠算法对密集残差点的干涉图像解缠的不足, 提出适用于残差点不同分布的两种路径跟踪相位解缠算法: 区域分片连接法和中心扩展搜索法。这两种方法能有效地避免过长的枝切线和残差点的多次连接, 既提高了解缠精度, 又保留了路径跟踪法在运算速度上的优势。将上述方法应用于 ENVISAT-ASAR 图像, 结果证明了本文方法是一种有效的 InSAR 处理方法。

关键词: InSAR, 图像配准, 相位解缠

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A

1 引言

干涉 SAR (InSAR) 通过 2 部天线或 2 次重复轨道观测地面的同一地区, 获取 2 景干涉的复图像, 经过滤波、配准、干涉、去除平地效应、解缠等处理, 可反演出三维 DEM。其中主要难点是相位解缠。

对已配准的两幅图像进行干涉处理, 得到干涉图像。由于干涉过程中的缠绕, 相位是以 2π 为模的相位, 因此, 需对干涉图像的缠绕相位进行解缠, 以恢复被“模糊”掉的整数倍周期相位。路径跟踪法是基本的相位解缠算法 (Ghiglia & Pritt 1988)。它利用局部相位数据的信息, 在干涉图像中沿着一定的路径对缠绕相位进行积分, 以得到全局相位的解缠。Goldstein et al (1988), Prati et al (1990), Buckland et al (1995) 和 Wei et al (2007) 等, 均提出了不同的路径跟踪算法。针对密集残差点的干涉图像, 提出 2 种新的路径跟踪相位解缠算法: 区域分片连接法 (MPA, multipatching algorithm) 和中心扩展搜索法 (CEA, center expanding algorithm)。

2 相位解缠算法

本文采用由粗到精的两级配准策略。以 2003-12-03 和 2004-01-07 的 2 景伊朗 Bam 地区 ENVISAT-ASAR 图像为实验的主副图像 (轨道号为 9192 和 9693)。

对完成配准的主副图像做干涉处理, 经过去除

平地效应和滤波等处理, 得到干涉图像, 其部分干涉相位如图 1。

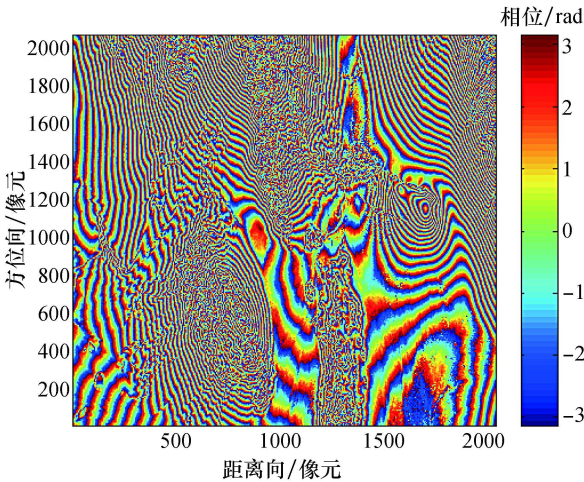


图 1 干涉相位图
Fig 1 Interferogram

路径跟踪相位解缠方法具有速度快、对残差点较少的干涉图像解缠精度较高的优点, 是 InSAR 处理中首选的解缠算法 (Buckland et al 1995)。但在相干质量较差的图像中, 由于残差点密集, 枝切线设置不当会造成部分区域被枝切线包围, 导致该区域无法解缠, 从而降低了解缠精度。另外, 枝切线越短, 解缠精度越高 (Huntley & Buckland 1995)。因此, 路径跟踪解缠算法需要解决 2 个问题: 连接残差点的枝切线整体要短; 避免枝切线交叉和残差点的多次连接, 尤

其对大尺寸、密集残差点的干涉图像。

本文提出 2 种路径跟踪相位解缠算法:区域分片连接法以及中心扩展搜索法。前者先将干涉图像分割成多片极性平衡区域,然后对每片区域的异性残差点按最近距离原则建立枝切线。后者是由图像中心向外逐步扩展,搜索并连接最近距离的异性残差点。区域分片连接法适用于残差点分散地分布在多片极性平衡区域的干涉图像,其步骤为:

首先,将整个图像分成很多片极性平衡的区域,从左上角开始依据残差点最近距离原则搜索邻近的残差点,直至该片区域所有残差点极性平衡或搜索到边界为止。然后,对每片区域内的残差点,采用整体最近距离原则进行连接,具体如下:

- (1)如果只有一个残差点,则必为边界点,将其作为枝切点。
- (2)如果有 2 个残差点,则直接相连成为枝切线。

(3)对于多个残差点的情形,先求出正残差点的数目 m 、负残差点的数目 n 和边界点的数目 k 。如果 $m=n$ 转步骤 (4)处理,若有边界残差点,则它们本身即为枝切点。

若 $m-n>k$ 选取与 k 个边界点最近的 $m-n$ 个正残差点组成矩阵 P , k 个边界残差点组成矩阵 B 。求数组 P 和 B 的距离矩阵。矩阵中距离最小元素对应的残差点对连接成为枝切线,同时,将已连接的正残差点从数组 P 中删除,加入至数组 B 。这时,矩阵的大小变为 $(m-n-1) \times (k+1)$ 。继续选择距离矩阵中最小的元素,重复上述操作,直至 P 数组大小变为 0, B 数组大小变为 $m-n+k$ 剩余的边界点作为枝切点。

若 $m-n<k$ 求 m 个正残差点与 k 个边界残差点的距离矩阵,用枝切线连接距离最短的 $m-n$ 对残差点,剩余的边界点作为枝切点。

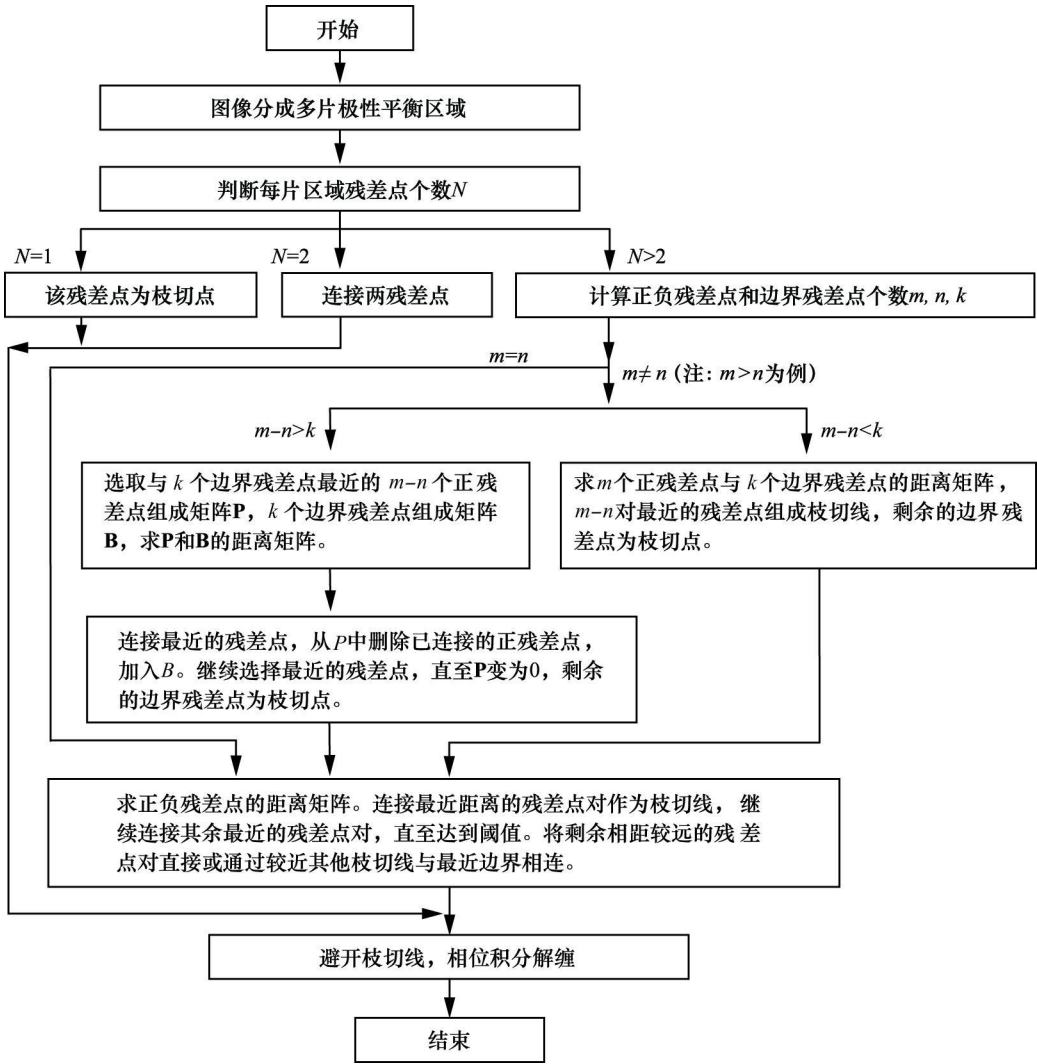


图 2 区域分片连接法流程图

Fig 2 A flow of phase unwrapping algorithm for MPA

此时,正残差点数目等于负残差点数目,转步骤(4)处理。

若 $n > m$,同理。

(4)如果 $m = n$ 求正负残差点的距离矩阵。用枝切线连接距离最近的残差点对,将矩阵中该对残差点所在行列的元素设为极大值,继续寻找其余距离最小的残差点对并连接,直至达到距离阈值。将剩余相距较远的残差点对直接或通过较近其他枝切线与最近边界相连。

最后,避开枝切线,相位积分解缠。其流程图如图 2。

如果残差点密集分布于整个干涉图像,或分片后的残差点极性平衡的区域过大,则采用中心扩展搜索相位解缠算法,其步骤为:

首先,建立干涉图像的正负残差点的距离矩阵,对距离小于阈值(本文选取 4 个像元的距离)的残差点对,按照最近距离原则连接。然后,对剩余的正负残差点采用如下方法连接:

(1)以干涉图像中心像素为窗口中心建立大小为 $W \times W$ 的扩展窗口, W 初值为 3。

(2)若窗口尺寸小于等于图像尺寸,搜索该窗口内未被连接的残差点,若不存在,则转步骤(3);若存在,则将未连接的残差点放入某一队列,对该队列中的每个残差点进行步骤(4)处理,处理完毕,转步骤(3)。若窗口尺寸大于图像尺寸,则结束。

(3)窗口中心不变,将窗口扩展为 $(W + 2) \times (W + 2)$,转步骤(2)。

(4)以该残差点为中心建立搜索窗口,若在窗口内搜索到异性残差点,则将该两残差点相连,否则扩大搜索窗口,直至搜索到异性残差点或至边界为止。对搜索窗口内有相同距离的异性残差点,则根据这些残差点与另外异性残差点的距离来判定连接,以求枝切线整体更短。当扩展窗口扩展至靠近图像边界时,将孤立的残差点与最近边界直接或间接相连。

最后,避开枝切线,相位积分解缠。其流程图如图 3。

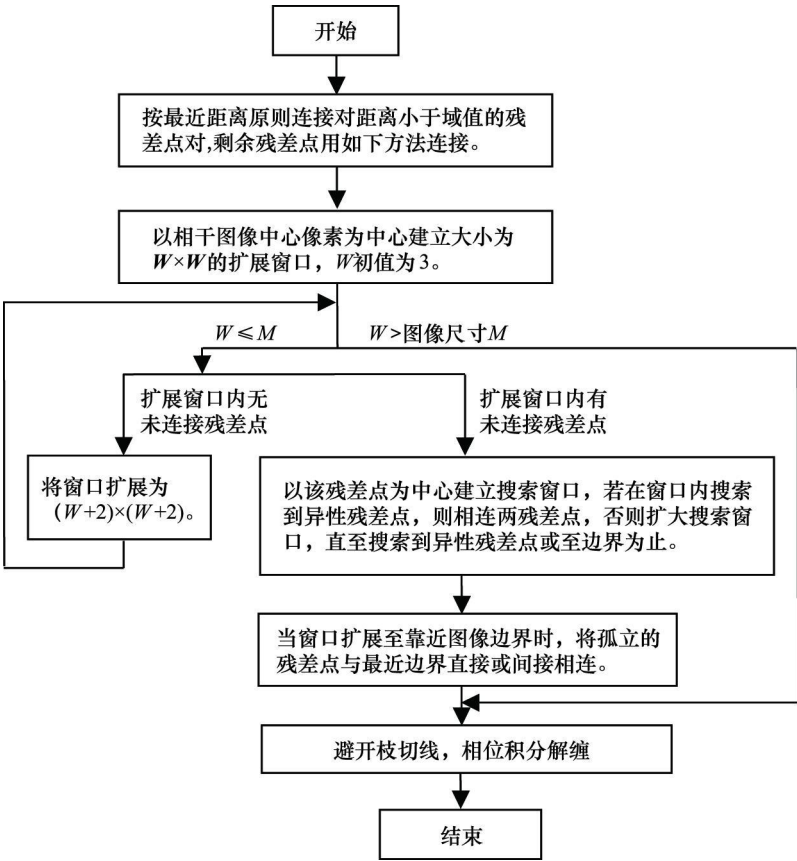


图 3 中心扩展搜索法流程图

Fig 3 A flow of phase unwrapping algorithm for CEA

3 实验结果与讨论

使用上述 2 种路径跟踪解缠算法对残差点较

密集的干涉相位图像 (图 1)进行相位解缠,反演 DEM, 并与 Goldstein 和 mask-cut 方法相比, 如图 4。

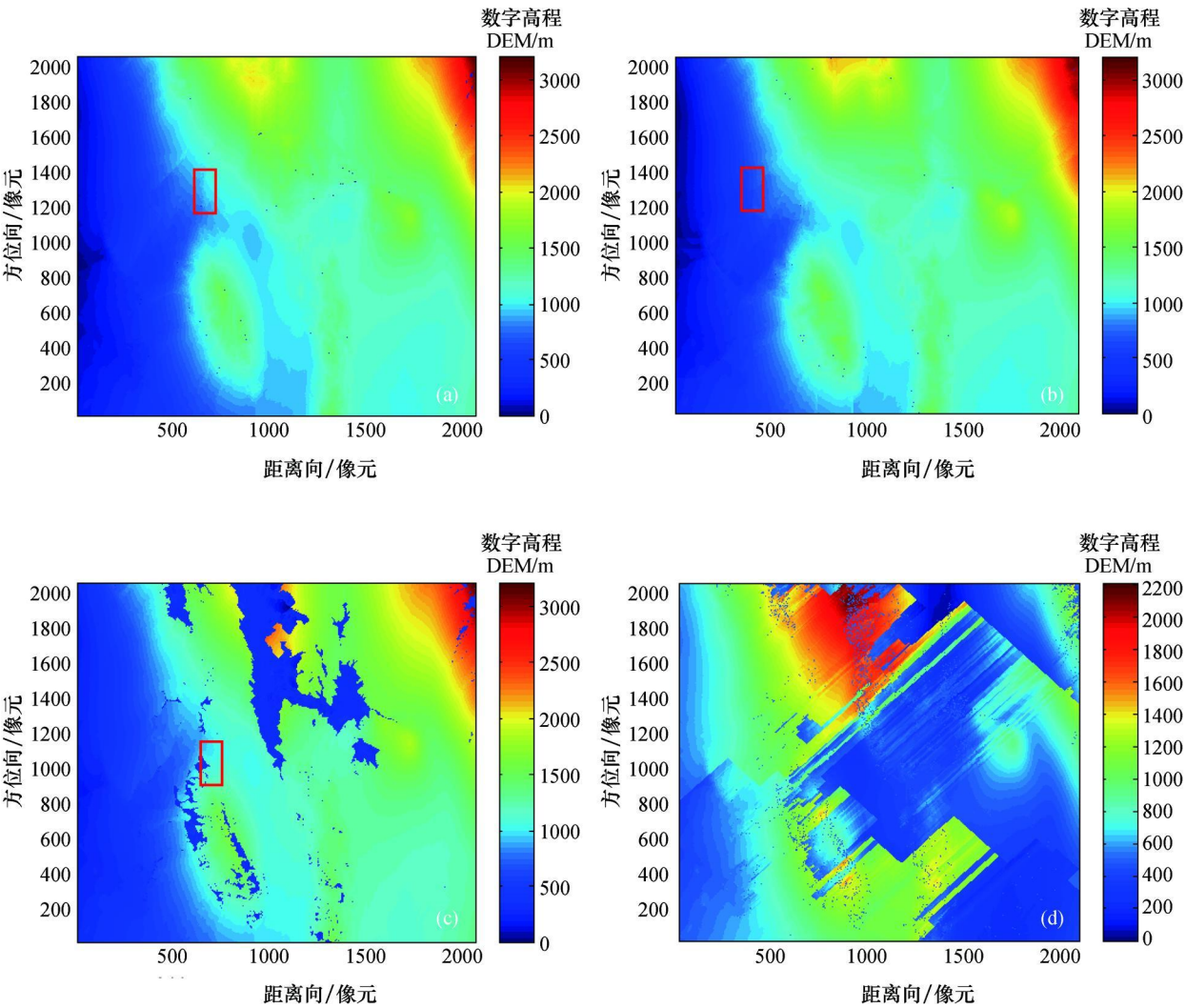


图 4 (a), (b), (c)和 (d)分别为 MPA, CEA, Goldstein和 mask-cut等算法反演 DEM 图
Fig 4 Retrieved DEM from Fig 2 by using MPA, CEA, Goldstein and mask-cut approaches

尽管没有该地区真实的 DEM 做定量比较,但从反演结果上仍易看出:在相干性较高的区域 (图 4 中左侧等区域),这几种算法反演结果很好。在相干性较低的区域 (图 4 中间区域),Goldstein 法和 mask-cut 法反演的 DEM 存在大量没有被解缠的孤立区域 (图 4 中突变的深蓝色区域),即“解缠孤岛”,反演精度低于本文方法。将图 4 中红色方框区域内的枝切线放大观察,如图 5。红色像素表示正残差点,绿色像素表示负残差点,蓝色像素表示枝切点。图 5(c)Goldstein 方法中,在残差点密集的区域,其枝切线设置不当,残差点被多次连接,枝切

线较长,且相互交叉,以至这些被枝切线围成的封闭区域无法解缠。造成了图 4(c)中的“解缠孤岛”。而图 5(a), (b)本文的 2 种方法中,每个枝切线只连接 2 个异性的残差点,比较简洁,整体长度较短,没有产生无法解缠的封闭区域。为了避免尺寸较大的干涉图像易产生过长枝切线,区域分片连接法将整个图像分割成多片极性平衡的区域,分别连接每片内的最近异性残差点;而中心扩展搜索法从图像中心向外搜索,并将未连接的残差点与其最近的异性残差点相连接。为了避免残差点的多次连接造成枝切线围成封闭区域,

这 2 种算法都采用成对连接最近的异性残差点。如果分割后的区域仍较大,区域分片连接法最后连接的枝切线可能相对较长,如图 5(a)。中心扩展搜索法生成的枝切线长度整体差异相对较小,枝切线方向一般呈向外扩散状,如图 5(b)。两者的运算速

度也不同,区域分片连接法采用了分片处理的策略,降低了运算的复杂度,运算速度较快。中心扩展搜索法对扩展窗口内所有未连接的残差点分别建立搜索窗口,其运算速度比区域分片连接法相对稍慢。对于干涉图像(图 1)解缠的运行时间,如表 1。

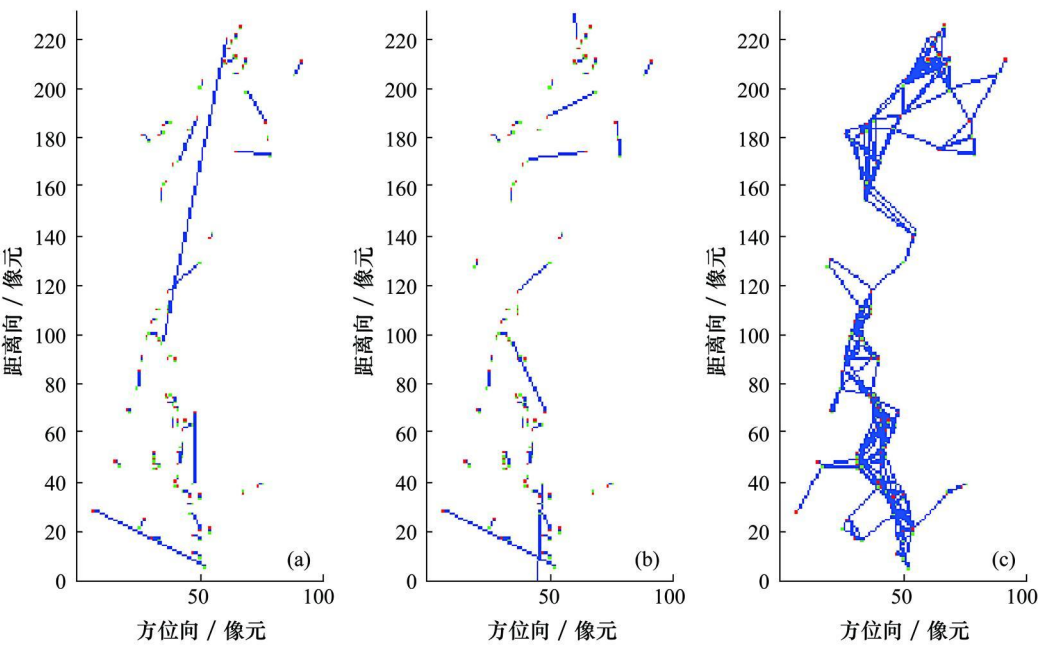


图 5 (a), (b)和 (c)为 MPA, CEA 和 Goldstein解缠算法设置的枝切线
Fig 5 Branch cuts of MPA, CEA and Goldstein approaches

表 1 解缠算法处理 2048×2048图像的时间
(IBM 微机主频: 2 8GHz)

Table 1 Average execution time
(2 8GHz IBM PC)

方法	Golstein	MPA	CEA	Mask-cut
时间 /s	5.08	18.36	47.22	148.17

这 2 种算法与 Goldstein法均是通过寻找并连接最近异性残差点来平衡残差点对整个图像解缠的影响。它们的解缠速度量级基本相近,另外,解缠速度还与图像尺寸残差点数量、分布,等有关。mask-cut方法识别残差点并产生分割掩模,然后通过多态操作进行细化,最后沿着分割掩模进行路径积分实现了相位解缠,其解缠速度相对较慢。

这 2 种算法也存在一些不足,对于干涉质量很低的图像,在按照最近距离搜索并连接异性残差点的最后,可能会出现较长的枝切线(仍比其他方法的枝切线短),造成枝切线两侧较明显的相位差别。而且枝切线的相交,尤其在相干性较低和图像边界

附近(剩余未连接的残差点与边界直接相连),可能会导致少量像素的“解缠孤岛”,如图 4(a), (b)中间和右上角等处。

4 结 论

本文提出了 2 种路径跟踪相位解缠算法:区域分片连接法和中心扩展搜索法。采用不同异性残差点搜索配对的策略,它们生成的枝切线较短,避免了残差点的多次连接,提高了解缠精度。实验结果表明,这 2 种算法具有解缠精度高,运算速度快等优点,尤其适用于尺寸较大、残差点较密集的干涉图像。

REFERENCES

Buckland J.R., Huntley J.M., Tumer S.R.E. 1995. Unwrapping noisy phase maps by use of a minimum cost matching algorithm. Appl Opt 34(23): 5100- 5108

Ghiglia D. C., Pritt M. D. 1998. Two-dimensional phase unwrapping: theory, algorithms and software. New York: John Wiley & Sons

- Sons Ine
- Goldstein R. M., Zebker H. A., Werner C. L.: 1988. Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping. *Radio Science* **23**(4): 713–720
- Huntley J.M., Buckland J.R.: 1995. Characterization of sources of 2π phase discontinuity in speckle interferograms. *J. Opt. Soc. Am.-A*, **12**(9): 1990–1996
- Prati C., Giani M., Leutat N.: 1990. SAR interferometry: a 2-D phase unwrapping technique based on phase and absolute values information. *Proceedings of the 1990 International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Washington, D. C.
- Wei Z. Q., Xu F., Jin Y. Q.: 2007. phase unwrapping for SAR interferometry based on ant colony optimization algorithm. *Int. J. Remote Sens.* **29**(3): 711–725

Registration and phase unwrapping algorithms for InSAR images with dense residues

WEI Zhi-qiang, JIN Ya-qiu

Key Laboratory of Wave Scattering and Remote Sensing Information
Ministry of Education, Fudan University, Shanghai 200433, China

Abstract This paper introduces a procedure of Interferometric SAR (InSAR) processing including the algorithms of image registration and phase unwrapping. A coarse-to-fine fast registration framework based on the mean square difference function is proposed. Aiming at the interferogram with large size and dense residues, two unwrapping algorithms are presented: one is the multi-patches method to connect opposite residues, and another one the center expanding method to search opposite residues. These two algorithms can avoid long branch cuts and excessive connection of residues, and are well employed in the experiments of ENVISAT-ASAR datasets. Compared with conventional methods, our results of registration and unwrapping show good advantages in InSAR data processing.

Key words InSAR, image registration, phase unwrapping