

改进的枝切法在相位展开中的应用

张妍¹, 冯大政², 曲小宁², 顾潮琪¹

(1. 西北工业大学电子信息学院 西安 710072;

2. 西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

【摘要】该文在Goldstein枝切法的基础上提出了一种改进的枝切法。该算法对干涉图中的正负残差点进行组合,再以枝切线的长度和作为评价对干涉图中的正负残差点进行重新替换组合,使整体枝切线的长度和减小,有效地克服了相位解缠时在残差点密集区易出现的“孤岛现象”问题。仿真数据以及实测数据验证了该算法的可行性和有效性。

关键词 枝切法; 干涉合成孔径雷达; 相位解缠; 残差点

中图分类号 TN957

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2013.04.005

Application of a Novel Branch-Cut Algorithm in Phase Unwrapping

ZHANG Yan¹, FENG Da-zheng², QU Xiao-ning², and GU Chao-qi¹

(1. College of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University Xi'an 710072;

2. National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University Xi'an 710071)

Abstract Interferometric synthetic aperture radar (InSAR) measures the height of the object based on the distance difference reflected by the absolute phase difference of the corresponding pixels on two pieces of synthetic aperture radar (SAR). But in fact the phase difference is restricted to $(-\pi, \pi)$, which causes phase wrap. The branch-cut method is one of the most important approaches for the phase unwrapping. In this paper, an improved branch-cut algorithm is proposed based on the Goldstein algorithm. The positive and the negative residues in the interference image are combined in this algorithm and then re-combined and replaced by using the length of the branch-cut as criteria so that the overall length of the branch-cut can be reduced gradually and the "isolated island phenomenon" in the unwrapping process can be overcome effectively. The proposed method has been verified through both the simulated and experimental data.

Key words branch-cut; InSAR; phase unwrapping; residue

合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)具有全天候、高精度三维测绘的优点,已经成为遥感领域的研究热点,但在实际测量中,得到的干涉相位差被限制在 $(-\pi, \pi]$ 之间,所以如何从缠绕相位中恢复丢失掉的相位信息,得到实际的干涉相位是InSAR信号处理的关键步骤。

InSAR相位解缠的方法主要可以分为两大类。一类是将相位解缠问题转化为求解数学最小范数极值问题的整体法,目前较多使用的方法是以最小二乘法为代表^[1-2]的相位展开方法,其思想是最小化展开相位梯度与缠绕相位梯度间的均方误差,以求得最接近于真实值的解缠相位。但此类方法中每个像素点的解缠结果都是近似值,由残差点引起的误差

会扩散至整个图像中去,从而影响相位展开的精度。另一类主要的相位展开算法是基于路径跟踪的相位解缠法^[3-5],也称为局部法。其中以文献[6]提出的枝切法最为经典,它通过识别干涉图中的正负残差点并在之间建立路径枝切线,积分时避开这些枝切线来实现相位解缠。该方法的优点是消除了相位展开时由于积分路径不同而出现的相位展开结果不一致,避免了误差的传播。但利用该方法建立的枝切线长度较长,在残差点密集区容易因枝切线形成环路导致相位无法展开。此外,网络流法^[7]、局部频率估计法^[8-9]以及结合了局部法和全局法的合成相位展开法^[10-11]都在InSAR的相位展开中得到了应用,而利用多基线进行的相位解缠^[12-13]近年来也取

收稿日期: 2011-10-09; 修回日期: 2012-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(60971111)

作者简介: 张妍(1979-), 女, 博士, 主要从事InSAR信号处理方面的研究。

得了一定的研究进展。

本文针对Goldstein算法容易出现“孤岛现象”的缺点,根据枝切线尽量选择距离相近的残差点之间的连接设置原则,提出了一种改进的枝切法,通过干涉图中的正负残差点的组合优化建立枝切线,使整体枝切线的长度较Goldstein法得到大幅度减小,同时通过仿真数据和实测数据的实验,证明了该方法能够有效的解决Goldstein法在残差点密集的区域相位解缠失败的问题。

1 基本Goldstein枝切法

在干涉相位图中,理想条件下的相位梯度应小于 π ,此时进行相位解缠时就可以直接对缠绕相位进行积分:

$$I = \int_C \nabla \varphi(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{r} + \varphi(\mathbf{r}_0) \quad (1)$$

式中, C 是定义域 D 内任意连接 \mathbf{r}_0 和 \mathbf{r} 的路径;而 $\nabla \varphi(\mathbf{r}) = \nabla \phi(\mathbf{r}) + n_{\nabla}(\mathbf{r})$, $\nabla \phi(\mathbf{r})$ 是展开相位梯度; $\nabla \varphi(\mathbf{r})$ 是缠绕相位梯度,作为展开梯度 $\nabla \phi(\mathbf{r})$ 的估计; $n_{\nabla}(\mathbf{r})$ 为误差;积分时可以忽略。

在实际干涉测量中,由于存在相位噪声并且有欠采样的现象,所以展开的相位梯度有时候会大于 π ,而此时相邻的4个像素点的中心旋度 $\nabla \times \nabla \varphi(\mathbf{r}) = \pm 2\pi \neq 0$,本文将其定义为残差点(“+2 π ”表示为正残差点,“-2 π ”表示为负残差点),而正是由于残差点的存在,使得相位展开的最终结果与计算时选取的积分路径的有着直接的关系。

1988年,美国喷气推进实验室的Goldstein等人提出了Goldstein算法,它是相位展开算法,首先识别二维干涉图像上的残差点,然后通过建立的枝切线将这些残差点连接起来,而在相位展开过程中积分时避开枝切线,从而达到防止误差扩散的目的。其具体的方法如下:首先扫描整幅干涉相位图中并生成残差点分布图,然后在残差点图中找到一个残差点并以其为中心在 3×3 的邻域内进行搜索,如果找到另一个残差点,则将它们连接形成分支(搜索到点的极性如果和原来的点相反,则该条分支线就被标记为无极性,然后继续搜索;搜索到点的极性如果和原来的点极性相同,则搜索中心移到新找到的点继续搜索)。假如在邻域内没有找到残差点,则将邻域扩大到 5×5 或 7×7 ,一直到干涉图的边缘。重复上面的过程直到用枝切线连接并平衡所有的残差点,最后在相位展开时绕过建立的枝切线对被缠绕相位的梯度进行积分,就可以得到原始的相位平面。

2 改进的枝切法

枝切法的原理是通过连接并平衡干涉图上的残差点,以求得相位展开时需要避开的枝切线,而残差点连接成分枝的策略不同,则形成的枝切线不同,得到的相位展开结果也不同。建立的枝切线长度越短相位的解缠效果越好,所以应尽可能选择距离短的正负残差点之间的连接。而残差点的发生概率以相关值在0.3~0.5之间的两幅干涉图像中为百分之一到千分之一,如果图像较大的话,残差点的个数将是一个庞大的数字。假设正负残差点的个数分别为 N 个,那么它们的组合就有 $N!$ 之多,找出最优组合的计算量过大。本文算法的思路为从某一残差点出发,在一定范围内搜索极性相反的残差点(这里先设为5),如果找到则将两个点进行虚拟结合并定义为近点对。如未找到则扩大搜索范围直到找到极性相反的残差点,此时将两个点进行虚拟结合并定义为远点对。当所有残差点都进行虚拟组合后则以“远点对”的正残差点为中心重新进行搜索,搜索半径为此“远点对”的枝切线长,对半径内的所有“近点对”和“远点对”重新进行替换组合。替换的原则为函数fitness的值是否减小为基准。fitness的计算如下:

$$\text{fitness} = \sum_{i=1}^N [(x_i^+ - x_i^-)^2 + (y_i^+ - y_i^-)^2]^{1/2} \quad (2)$$

式中, x_i^+ 、 y_i^+ 、 x_i^- 、 y_i^- 分别是正负残差点的坐标; N 为此范围内的枝切线数。

随着评价价值fitness的不断减小,枝切线的长度也随之减小。对于所有虚拟结合的枝切线重复进行以上步骤,直到评价价值不再变小趋于收敛为止。图1所示为残差点的再结合演示图。

具体步骤如下:

1) 在二维干涉图中识别正负残差点,同时在残差点图中标示出残差点的位置。

2) 以正残差点为中心,在半径为5的范围内进行搜索,如果在该范围内搜到负残差点,则将这一对正负残差点定义为“近点对”;如果没有搜索到则将这个正残差点定义为“远点”。

3) 以“远点”为中心,逐渐扩大搜索半径重新进行搜索(如到边界处仍未找到负残差点则以边界点作为负残差点),直到所有的“远点”都搜索到负残差点,并与负残差点组合成为“远点对”。

4) 以“远点对”的正残差点为中心重新进行搜索,搜索半径为此“远点对”的枝切线长,对半径内的所有“近点对”和“远点对”重新进行替换组

合。替换的原则以式(2)的评价值是否减小为基准。

5) 如果替换后评价值没有减小的话, 对搜索半径内的正负残差点重新替换组合, 重复步骤4)。

6) 对所有的“远点对”进行步骤4)和步骤5)的操作。

通过以上的步骤运算, 残差点的组合距离总和趋于最短, 则可以得到最终经过优化产生的枝切线, 如果步骤3)中替换的次数以平均 K 次计算的话, 所有的处理共需要 $K \times N$ 次操作, 由于 $K \ll N$, 所以比起运算量 $N!$ 会有很大幅度的降低。

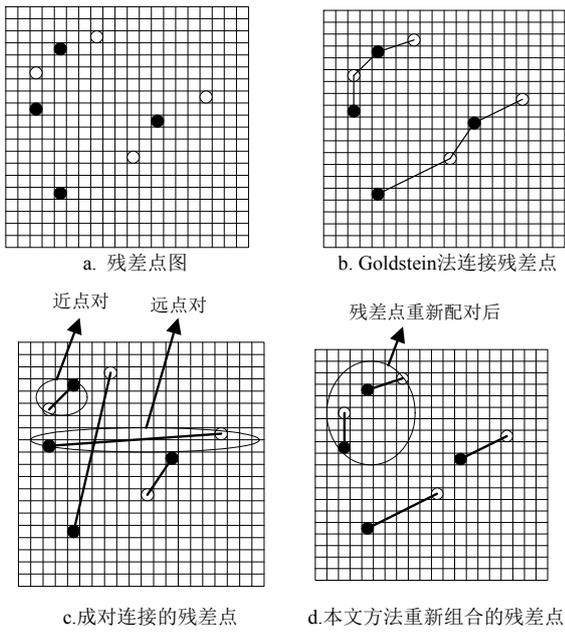


图1 残差点的再结合

3 仿真结果及分析

3.1 仿真实验

仿真数据利用Matlab软件中peaks函数产生, 干涉相位图大小为 128×128 , 并在仿真的过程中加入了1视相干系数为0.9、分布在 $[-b, b]$ 的均匀噪声, 其对应的噪声标准差为 0.650 rad (方差为 0.4225 rad^2), $b=1.1258 \text{ rad}$ 。图2为仿真数据枝切线和相位展开图。

通过对比可以看出, 使用Goldstein法建立的枝切线长度较长, 并且在残差点密集的区域形成枝树, 而利用本文的方法连接正负残差点所建立的枝切线, 不仅枝切线的长度较短, 且没有形成枝切树, 从图2e和图2f的最终展开结果也可以看出采用Goldstein法由于枝切线形成的环路导致大部分地区相位展开效果很差, 且存在未解开的区域, 而本文方法展开的效果较好。

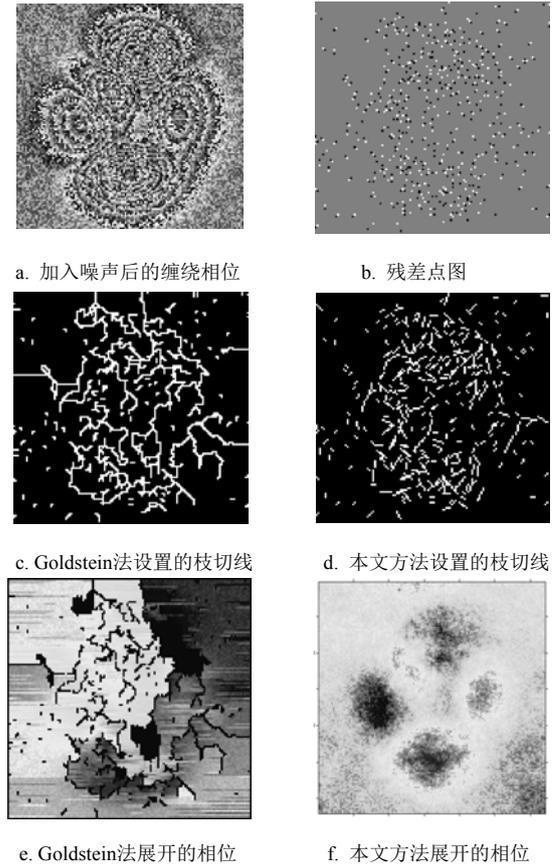


图2 仿真数据枝切线和相位展开图

3.2 实测数据实验

实测数据为Etna火山观测录取的数据, 干涉图大小为 512×512 , 并经自适应方向窗滤波器^[14]滤波。如图3a所示, 图3b为实测数据的残差点图, 与图3a比较可知, 残差点密度较大的区域分布在干涉条纹不清晰的区域。

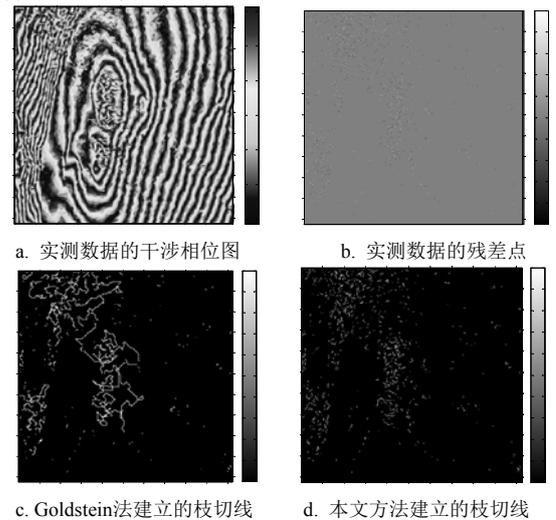


图3 实测数据的枝切线比较

图3c和图3d分别是利用Goldstein法和本文方法建立的枝切线, 可以明显看出利用Goldstein法的枝

切线长度大于本文方法,且在残差点密集地区形成了环路。

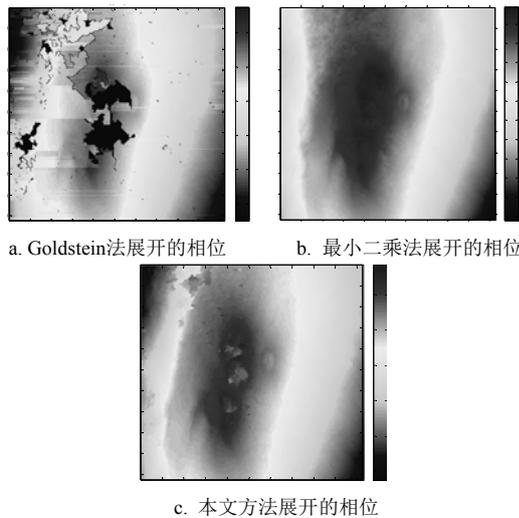


图4 实测数据各种方法展开结果

图4a是Goldstein法展开的相位,可以很清楚地看出,部分地区的相位未能展开,形成了空洞。图4b是利用最小二乘法展开的结果,图4c是本文方法展开的结果,虽然两者都将整幅图像展开,但由于最小二乘法本身引起的误差扩散,展开的图像边缘较为模糊。而本文方法则很好地恢复了原始的相位。表1为不同算法运算时间的比较。

表1 相位展开时间比较

算法	时间/s	未展开区域
Goldstein法	320	有
最小二乘法	2 672	无
本文方法	335	无

4 结束语

Goldstein方法由于计算简便,运行速度较快得到了广泛的关注和使用,但由于它在残差点密集的区域建立的枝切线容易形成环路,使得一部分区域无法解缠。本文在Goldstein枝切法的基础上对局部枝切线的连接进行了改进,仿真数据以及实测数据证明了该算法不仅减小了连接正负残差点的枝切线总长度,且在残差点密集区域有效地避免了“孤岛效应”的形成。

参 考 文 献

[1] PRITT M D, SHIPMAN J S. Least-squares two-dimensional phase unwrapping using FFT's[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing Letters, 1994, 32(3): 706-708.
 [2] FORNARO G, SANSOSTI E A. Two dimensional region growing least squares phase unwrapping algorithm for interferometric SAR[J]. IEEE Trans on Geoscience and

Remote Sensing Letters, 1999, 37(5): 2215-2226.
 [3] BIOUCAS-DIAS J M, VALADAO G. Phase unwrapping via graph cuts[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2007, 16(3): 698-709.
 [4] KAROUT S, GDEISAT M, BURTON D, et al. Two-dimensional phase unwrapping using a hybrid genetic algorithm[J]. Applied Optics, 2007, 46(5): 730-743.
 [5] 魏志强, 金亚秋. 基于蚁群算法的干涉SAR相位展开算法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(3): 518-523.
 WEI Zhi-qiang, JIN Ya-qiu. InSAR phase unwrapping algorithm based on ant colony algorithm[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(3): 518-523.
 [6] GOLDSTEIN R M, ZEBKER H A, WERNER C L. Satellite radar interferometry: two dimensional phase unwrapping[J]. Radio Science, 1988, 23(4): 713-720.
 [7] COSTANTINI M. A novel phase unwrapping method based on network programming[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing Letters, 1998, 36(3): 813-821.
 [8] SUO Zhi-yong, LI Zhen-fang, BAO Zheng. A new strategy to estimate local fringe frequencies for InSAR phase noise reduction[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing Letters, 2010, 7(4): 771-774.
 [9] MCKILLIAM R G, QUINN B G, CLARKSON I. Frequency estimation by phase unwrapping[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing Letters, 2010, 58(6): 2953-2963.
 [10] 武楠, 冯大政, 刘宝泉. 一种基于枝切法和有限元法的干涉SAR合成相位展开方法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(4): 846-850.
 WU Nan, FENG Da-zheng, LIU Bao-quan. A phase unwrapping approach based on the branch-cut method and finite element method for interferometric SAR[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(4): 846-850.
 [11] 钟和平, 唐劲松, 张森. 一种基于质量引导和最小不连续合成的InSAR相位解缠算法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(2): 369-374.
 ZHONG He-ping, TANG Jin-song, ZHANG Sen. A combined phase unwrapping algorithm based on quality guided and minimum discontinuity for InSAR[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(2): 369-374.
 [12] 刘慧, 周荫清, 徐华平. 多基线干涉SAR的相位估计[J]. 宇航学报, 2008, 29(6): 1991-1994.
 LIU Hui, ZHOU Yin-qing, XU Hua-ping. An estimate method for multi-baseline InSAR phase[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(6): 1991-1994.
 [13] YU H W, LI Z F, BAO Z. A cluster analysis based efficient multibaseline phase unwrapping algorithm[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 49(1): 478-487.
 [14] WU N, FENG D Z, LI J X. A locally adaptive filter of interferometric phase images[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing Letters, 2006, 3(1): 73-77.

编辑 税红