

引入质量图指导的改进的枝切法

李泓宇 宋红军 王 辉

(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

摘 要:相位解缠技术是干涉 SAR 数据处理的重点和难点。在已有的相位解缠算法中,枝切法因为其运行速度快、解缠效果较好等优点得到了广泛地应用。但是,枝切法常常产生无法解缠的“孤立区域”和误差的大面积传递。针对这两个缺点,提出了质量图指导的改进枝切法。利用质量图指导枝切线的放置,并在路径积分过程中,引入质量图指导积分路径的选择。实验结果表明,引入质量图指导的改进枝切法能够有效地避免孤立区域的产生和误差的大面积传递。该方法组合了枝切法和质量图法,解缠效果优于上述两种算法。

关键词:枝切法;相位解缠;质量图

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.604

Quality-guided improved branch cut phase unwrapping method

Li Hongyu Song Hongjun Wang Hui

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Phase unwrapping is a key step in InSAR processing. Among the existing methods, the Goldstein branch-cut method is widely used, because its fast processing and good result. However, the branch-cut method usually produces some “isolated area” which could not be unwrapped. Besides, it may cause large area error passing. This paper presents a quality-guided improved branch cut phase unwrapping method. This method uses quality map to guide the placement of branch cuts. Besides, in path following integrating process, quality map is used to guide the integrating path. Experiment shows that, this method is capable of avoiding “isolated area” and large area error passing. The proposed method is a combination of branch cut method and quality-guided path following method. It's performance is better than those two methods.

Keywords: branch-cut; phase unwrapping; quality map

1 引 言

干涉合成孔径雷达(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术在实际处理生成干涉相位图的过程中,由于三角函数的周期性,获得的干涉相位差是真实相位的主值,也就是缠绕相位。缠绕相位在 $[-\pi, \pi)$ 之间, InSAR 技术获取高程需要对缠绕相位进行解缠,得到真实相位^[1-3]。相位解缠算法是利用 InSAR 技术获取高精度 DEM 的关键,展开后的 InSAR 相位差直接关系到 DEM 信息提取的准确性和精确性^[4]。由于地面起伏的复杂性和干涉影像对的数据本身质量的差异,使得相位解缠算法的研究至今仍然是 InSAR 技术的一个重点和难点^[5]。

目前常用的相位解缠算法被分为两类^[6]:路径积分法和全局优化法。其中,全局优化法通过目标函数最优化的

方法直接对真实相位做出估计。全局优化法主要有最小二乘(least square, LS)^[7]和最小代价流(minimum cost-flow, MCF)^[8]算法。最小二乘法在缠绕相位和真实相位的相位梯度场之间进行最小二乘拟合。该方法得到的解缠相位通常过于平滑,偏离实际。MCF 算法将优化问题等效为网格规划,也被称为网络流法。该方法在处理大尺度干涉相位图时会产生巨大的运算负担。

路径积分法在相位梯度场中选取适当的积分路径,将相位梯度进行积分得到真实相位。主要包括枝切法^[9]、质量图法^[10]、掩膜割线法^[6]和最小不连续法^[11]。枝切法首先在干涉相位图中寻找残差点,然后利用枝切线把残差点连接起来,最后选取与枝切线不相交并能走遍全图的路径进行积分。该方法运行时间短,但枝切线的放置遵循总长度最小原则,容易形成封闭的“孤立区域”,影响解缠结果。

收稿日期:2016-03

质量图法依照像素质量从高到低,将像素点连接起来作为积分路径。该方法造成的误差传递最小,但解缠效果完全依赖于质量图本身的质量。掩膜割线法是一种结合质量图法和枝切法的相位解缠方法,但是它过分依赖相干质量图。最小不连续法假设真实相位是一个光滑曲面,以真实相位分布中的跳变最小为目标。该方法在真实相位不满足光滑曲面时效果很差。

本文在分析了枝切法和质量图法的解缠效果后提出了引入质量图指导的改进枝切法。该方法在枝切线放置和路径积分过程中均引入质量图作为指导,能够有效的避免“孤立区域”的产生和误差的大面积传递。

2 枝切法

枝切法以枝切线最短为原则放置枝切线,具体步骤如下:

1) 识别残差点

对相位图中的每4个相邻像素按照一定的方向积分。如果积分为零,则不是残差点。如果积分为 2π ,则为正残差点,如果积分为 -2π ,则为负残差点。残差点本来位于4个像素的中心,但为了处理方便,通常把残差点定位于4个像素中左上角的那个像素。

2) 生成枝切线

对相位图中的像素按照从左到右、从上到下的顺序进行搜索。对每一个找到的还未平衡的残差点,以该像素点为中心,在 3×3 的搜索窗中寻找其他残差点。搜索的过程有以下3种可能:

①没有找到残差点并且没有碰到边界。这种情况下,增加搜索窗的大小继续寻找,直到找到其他残差点或边界,或者达到最大搜索窗大小为止。如果最大搜索窗里仍然找不到其他残差点,则将该残差点与最近的边界相连。

②搜索窗内碰到了边界。直接将残差点与边界相连,然后标记为平衡。因为连接到边界以后,没有任何路径能围绕着它们积分了。

③找到其他残差点。将两个残差点用枝切线连接起来。如果找到的残差点还未平衡,则极性累加,当极性累加为零时,标记残差点像素为平衡。当极性累加不为零时,以新连接的残差点为新的搜索窗中心继续寻找。如果找到的残差点已经平衡,则连接以后极性不变,并以新连接的残差点为新的搜索窗中心继续寻找。

重复上面的过程,直到所有残差点都平衡为止。

3) 以绕过枝切线的路径进行积分

以任意一个非枝切线的像素为起点进行积分,积分路径绕过枝切线。非枝切线像素解缠完成后,对枝切线进行解缠。枝切线上的像素利用其相邻的已经解缠的非枝切线像素进行平均即可。

枝切法计算速度快,效率高。但在欠采样区域和相位噪声严重的区域中,会造成误差的 2π 跳跃,导致误差传递。枝切线的放置还有可能出现交叉,被枝切线包围的区

域将成为无法解缠的“孤立区域”。针对枝切法的缺陷,本文提出了一种改进的枝切法。

3 引入质量图指导的改进的枝切法

枝切法的缺点主要有两个:

1) 残差点较多的区域,枝切线的放置容易产生无法解缠的孤立区域。

2) 忽略相位质量,在连接距离最近的残差点时,会产生错误,在积分过程中造成 $2n\pi$ 的累加误差。

改进的枝切法引进了质量图。一方面,在第二步放置枝切线中,利用质量图指导枝切线的放置。另一方面,质量图为积分路径的选择提供依据。下面对改进的枝切法进行介绍。

3.1 改进1:质量图指导枝切线放置

枝切法把残差点定位于4个相邻像素点的左上角,枝切线经过相位像素点,这种设置是造成枝切线围成“孤立区域”的主要原因。如果按照残差点的定义,将残差点定位于4个相邻像素中间,枝切线经过相位像素点之间,则能够避免产生大多数的“孤立区域”。示例如图1所示。

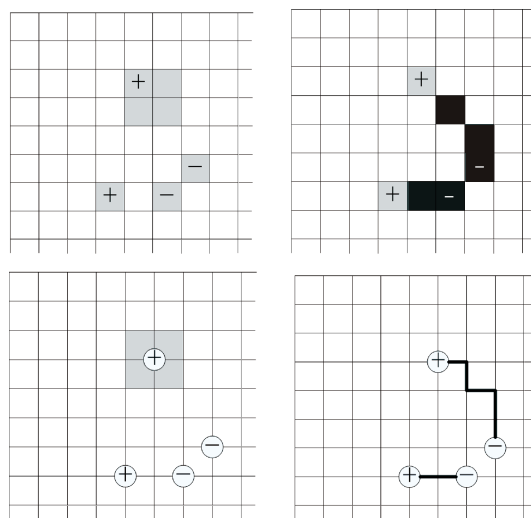


图1 枝切线放置位置的比较

在把枝切线限定在相位像素之间以后,在枝切线长度最小的前提下,有多种枝切线放置方式,具体如何放置将会影响最终解缠结果。如图2所示,灰色区域的像素点和白色区域的像素点服从不同的统计分布,分隔处对应地表的断层。在分隔线附近产生了两个残差点。A、B和C分别标出了3个像素点的位置,其中,A和C位于断层右侧,B位于断层左侧。明显地,A的相位应该由C的相位积分得到。图2(b)给出了枝切法生成的枝切线。该枝切线把A和C分开,A的相位由B的相位积分得到,这样得到的结果是错误的。这时引入质量图,质量图在相位分布断层处表现为低质量,枝切线沿着低质量的方向放置(如图2(c)所示),则可以避免产生上述错误。

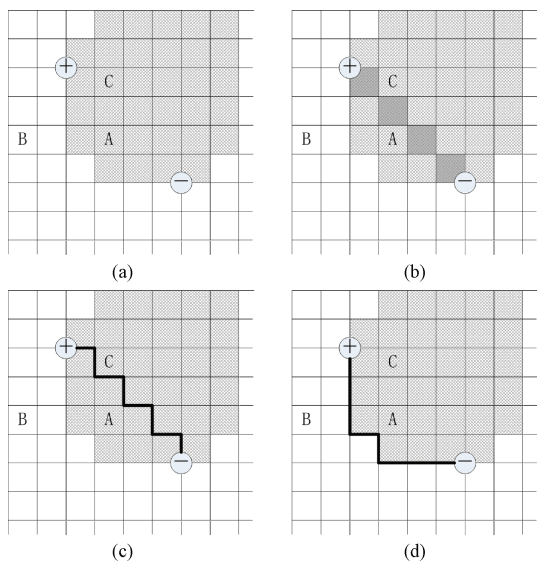


图2 质量图指导枝切线放置示意

以图2为例,质量图指导枝切线放置可以递归实现,具体步骤如下:

- 1) 设正残差点为起点,负残差点为终点;
- 2) 比较起点的右侧和下侧像素的质量,质量较差的一侧放置枝切线;
- 3) 把枝切线末端的点设为新的起点;
- 4) 判断起点与终点是否重合。如果重合,则枝切线放置结束;如果没有重合,则回到第2步继续执行。

3.2 改进2:质量图指导路径积分

枝切法的最短路径并不能保证分割的正确。如图3所示,枝切线的连接并没有把整个断层对应的部分分割开。在路径积分时,像素A和B的相位将从箭头指向处积分得到,这就产生了很大误差,而且这个误差会大面积传递。如果采用质量图指导路径积分,则可以避免这种误差的产生和传递。质量图在断层部分表现为差的质量,在路径积分时将最后处理。此时A和B的相位将由正确的路径积分得到。

综上所述,改进的质量图指导的枝切法首先规定枝切线位于相位像素之间,这在很大程度上避免了“孤立区域”的产生。然后利用质量图指导局部枝切线的放置,使枝切线附近的像素点的解缠更加正确。最后,在枝切法的第3步利用质量图指导的路径积分进行相位解缠,进一步避免了枝切线连接错误产生的解缠误差和误差的大面积传递。

4 实验结果与分析

实验将意大利 Etna 火山的干涉相位图分别截取 71×76 和 256×256 的两块缠绕相位进行解缠。缠绕相位及其对应的残差点分布分别如图4和图5所示。

利用枝切法,质量图法和改进的枝切法对上面两组实验数据进行解缠的结果分别如图6和图7所示。

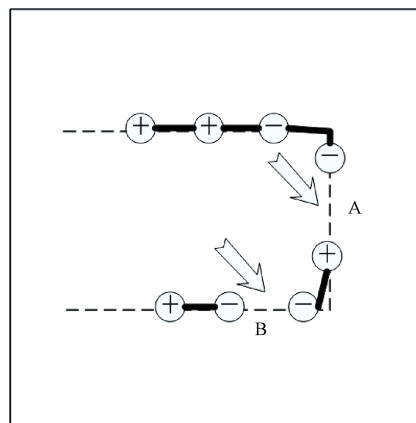
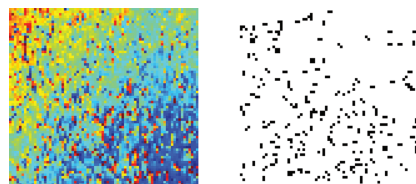
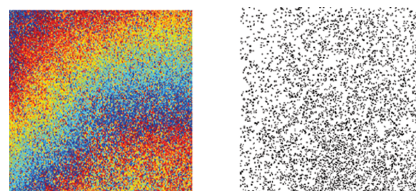
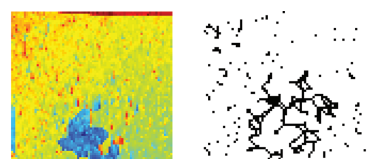
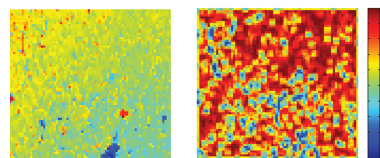


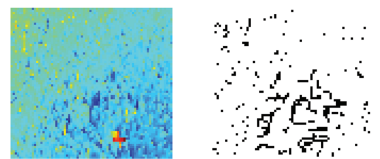
图3 无质量图指导路径积分可能导致的错误

图4 71×76 缠绕相位及其残差点分布图5 256×256 缠绕相位及其残差点分布

(a) 枝切法解缠相位和枝切线分布



(b) 质量图法解缠相位和质量图



(c) 改进枝切法的解缠相位和枝切线分布

图6 71×76 数据的解缠结果

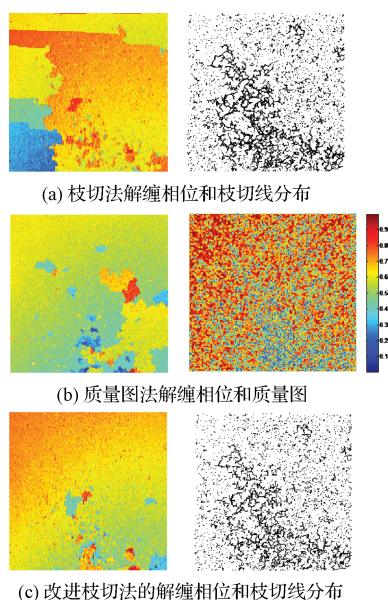


图7 256×256数据的解缠结果

上面两组实验的结果分别体现了改进枝切法相对于枝切法的两个优点。在实验1中,枝切法对数据1的解缠结果在图像下部出现了“孤立区域”,而改进枝切法避免了该“孤立区域”的出现。在实验2中,枝切法对数据2的解缠结果中出现了大面积的误差传递,解缠失败,而改进的枝切法利用了质量图作为积分路径的指导,具有误差传递最小的优点。另外,与质量图法比较,改进的枝切法设置枝切线作为路径积分屏障,能够减少对质量图本身的依赖。因此,引入质量图的改进的枝切法能够有效的进行相位解缠,解缠效果优于枝切法和质量图法。

5 结论

本文提出了一种引入质量图的改进枝切法。该方法在枝切法的基础上,引入质量图指导枝切线的放置,并在最后积分过程中,利用质量图指导积分路径的选择。改进的方法克服了枝切法的缺陷:避免了不应出现的“孤立区域”的产生和误差的大面积传递。同时,改进的方法对质量图本身好坏的依赖不大。实验证明,改进方法的解缠效果优于枝切法和质量图法,是一种有效的相位解缠方法。

参考文献

- [1] BAMLER R AND HARTL P. Synthetic aperture radar interferometry[J]. *Inverse Problems*, 1998, 14(4).
- [2] ROSEN P A, HENSLEY S, JOUGHIN I R, et al. Synthetic aperture radar interferometry[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2000, 88(3): 333-382.
- [3] 曹名字,李世强,李宁. 多基线 InSAR 最大后验高程反演算法的改进[J]. *国外电子测量技术*, 2015, 34(7):55-61.
- [4] 廖明生,林琿. 雷达干涉测量—原理与信号处理基础[M]. 北京:测绘出版社,2003.
- [5] 李平湘,杨杰. 雷达干涉测量原理与应用[M]. 北京:测绘出版社, 2006.
- [6] GHIGLIA D C, PRITT M D. Two-dimensional phase unwrapping: theory, algorithms, and software[M]. NY: Wiley, 1998.
- [7] GHIGLIA D C, ROMERO L A. Robust two dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1994, 11(1): 107-117.
- [8] COSTANTINI M. A novel phase unwrapping method based on network programming[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(3): 813-821.
- [9] GOLDSTEIN R M, ZEBKER H A, WERNER C L. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping[J]. *Radio Science*, 1988, 23(4): 713-720.
- [10] XU W, CUMMING I. A region-growing algorithm for InSAR phase unwrapping[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(1): 124-134.
- [11] FLYNN T J. Two-dimensional phase unwrapping with minimum weighted discontinuity[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1997, 14(10): 2692-2701.

作者简介

李泓宇,1988年出生,工学博士在读,主要研究方向为干涉合成孔径雷达信号处理技术。
E-mail:lihongyu881105@126.com