

InSAR 相位解缠算法的实验对比研究

刘志敏^{①,②}, 张景发^①, 罗毅^①, 李永生^①, 刘修国^②

(^① 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085; ^② 中国地质大学(武汉)信息工程学院, 武汉 430074)

摘要: 相位解缠是 InSAR 处理中的一个关键步骤, 相位解缠算法的选取很大程度上影响着最终的结果。本文主要介绍和比较了 6 种常用的相位解缠算法, 并选取西藏当雄地区的地震同震影像进行实验分析, 对解缠结果的质量进行评价比较。结果表明: 统计耗费网络流算法结果充分顾及了相干图所包含的信息, 获得了一个较优的全局解, 解缠结果的连续性较好。而且直接处理感兴趣的且数据质量好的离散区域, 实现效率高, 可以将误差限制在一个小范围内, 防止误差的再传递, 解缠结果较精确。

关键词: 相位解缠; InSAR; 统计耗费网络流; 枝切法

doi: 10.3969/j.issn.1000-3177.2012.02.014

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3177(2012)120-0071-06

Experimental and Comparative Study of InSAR Phase Unwrapping Algorithms

LIU Zhi-min^{①,②}, ZHANG Jing-fa^①, LUO Yi^①, LI Yong-sheng^①, LIU Xiu-guo^②

(^① *The Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085;*

^② *Faculty of Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074)*

Abstract: Phase unwrapping is crucial in InSAR processing, and the suitable phase unwrapping algorithm influences the final result to a large degree. We mainly introduce and compare 6 phase unwrapping algorithms, and obtain unwrapping results by processing co-seismic images in Dangxiong, Tibet. With evaluating and comparing these results, we conclude that Snaphu algorithm makes full allowance of the information in coherence map, obtains better global optima, and has a good continuity. In addition it can directly process the discrete area that is interested and of high-quality. Snaphu algorithm has a high efficiency and can limit the error in a small area, which prevents the error from spreading and gets an accurate result.

Key words: phase unwrapping; InSAR; Snaphu algorithm; branch-cut algorithm

1 引言

合成孔径雷达干涉测量 (INSAR) 技术诞生于 20 世纪 60 年代末, 是将由雷达影像复数数据导出的相位信息作为信息源提取地表三维信息的一项技术^[1]。当前 INSAR 主要应用于大规模 DEM 生成和地表形变检测。相位解缠是合成孔径雷达干涉测量的关键步骤之一, 它的准确性直接影响到最终结

果的精确性。二维相位解缠的研究起始于 20 世纪 70 年代末, 是由于自适应光学和补偿式成像的发展需要而进行的, 经过发展已经形成了一些较成熟的算法。但是由于雷达阴影、去相关等因素引起的噪声和伪信号等等造成相位数据不连续, 给相位解缠带来很大困难, 解缠的结果往往有较大的误差, 由此得到的 DEM 就会与实际值之间有较大差别。因此需要对相位解缠算法进行深入研究, 给出各解缠算

收稿日期: 2011-03-15 修订日期: 2011-05-16

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (40774023); 科技支撑计划 (2008BAC35B041-1); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项 (ZDJ 2007-1) 共同资助。

作者简介: 刘志敏 (1990~), 女, 硕士研究生, 研究方向, 遥感地震应用。

E-mail: smilelzm@126.com

法的特点和适用情况,最大可能地减小解缠误差,得到最好结果^[2]。

2 相位解缠算法

目前存在的相位解缠算法主要分为三大类:路径跟踪法、最小范数法及网络流法。

2.1 路径跟踪法

(1) 枝切法

路径跟踪法主要包括枝切法、质量图引导路径跟踪法和最小不连续法等^[3]。枝切法^[4]的核心思想是通过连接邻近的奇点使奇点达到平衡。奇点平衡的意思是分割路径连接等量的正负奇点对,如果奇点通过分割路径和图像边界相接,那么也认为奇点是平衡的。并且在整个分割路径的产生过程中,要求始终满足路径长度和最小的原则。Goldstein 算法是最简单的算法,也是目前运算速度最快的算法,效果也比较好。但是由于忽视了相位值的质量问题,可能会导致分割路径产生的位置出现错误。该算法在质量好的区域,具有很高的解缠精度;但在质量差的区域,容易形成“孤岛”,导致解缠失败,并且该算法采用的最邻近原则也不能保证枝切线放置的位置是最合理的。

(2) 最小不连续法

最小不连续法^[5]基于路径跟踪思想,即以干涉图中总的积分路径长度最短为原则连接残差点生成积分路径。生成合理的积分路径有两个关键步骤:首先在干涉图上确定残差点的位置以及极性,然后按照一定的准则连接起来,理论上可以得到最优结果。在整幅图像中循环搜索相位不连续区域,使整个图像的相位不连续最小,所以可以接受中间结果作为输入数据从而进行正确解缠,能得到理想的效果,但缺点是解算时间长,效率不高,对计算机性能要求也较高,该算法有待于进一步改进。最小不连续法可采用质量值作为权值来提高解缠的准确度和可靠度。

(3) 质量图引导路径跟踪法

质量图引导路径跟踪法^[6]是利用一些辅助信息进行质量评价来指导相位解缠。干涉处理中常通过分析相位质量图如设置阈值、利用自适应阈值或者使用相干图等,来确定相位数据质量,从而将积分路径沿高质量的像元进行,避过低质量像元,最大限度地避免误差的传递。一般来说质量指导的路径跟踪算法要比枝切法运算速度慢,不过如果能获取可靠的相位质量数据,该算法比枝切法解缠效果更好。

但由于该算法不识别残差点,因此在某些情况有可能会引入 2π 倍的相位误差。

2.2 最小范数算法

基于最小范数的算法^[7]中,最小二乘算法是最容易实现而且是较为成熟的一种,我们以其为代表来说明其算法特点和数据处理方法。最小二乘方法不完全依靠路径搜索来进行,而是用最小二乘方法去计算解缠以后相位梯度与未解缠相位梯度之差的最小值。由于最小二乘算法不像枝切法那样去回避枝切线,所以利用最小二乘得出的结果一般都很平滑,所以它并不一定与真实的解缠结果一致。这是因为大部分最小二乘算法并没有整周数的限制条件,也就是说缠绕相位与真实相位不必存在整周期的互差。因此最小二乘算法具有全局性、平滑、高效率的解缠结果,但有时它会产生一个整体的偏差。

2.3 共轭梯度法(是改进的一种最小范数法)

共轭梯度法^[9]是一个典型的共轭方向法,它的每一个搜索方向是互相共轭的,而这些搜索方向仅仅是负梯度方向与上一次迭代的搜索方向的组合,因此,存储量少,计算方便。Ghiglia 和 Romero(1994)提出 T 先验共轭梯度法(Preconditioned Conjugate Gradient, PCG),该方法采用迭代求解未加权最小二乘的方法来计算加权最小二乘的解,因而 PCG 算法比起未加权的最小二乘方法而言效率较低,但是其结果相对较精确,因为通过干涉图复数影像相关性获取的权阵,允许相关性低的地区相位存在较大的跳变。

2.4 网络流法

基于网络规划的相位解缠算法^[8]的主要思想是最小化解缠相位的导数与缠绕相位的导数之间的差异,关键在于如何将相位解缠算法中的最小化问题转化为求解最小费用流的问题。转化为求解最小费用流的网络优化问题大大降低了相位解缠算法的时间和空间复杂度。而且该方法还可以将误差限制在一个小范围内,防止误差的再传递,解缠结果较精确。但是该方法也存在一个很重要的问题,即如何确定加权矩阵来保证解缠结果的精确性。目前已经提出很多参数来确定权重,如相关系数、影像强度、残差密度和相位梯度等。基于网络规划解缠方法引入了 Delaunay 三角网,使得可以忽略含有大量噪声的区域或者是不感兴趣的区域,而直接处理感兴趣的且数据质量好的离散区域。实现效率高,可以将误差限制在一个小范围内,防止误差的再传递,解缠结果较精确。

3 实验及结果分析

为了对上述 6 种算法进行统一的分析和比较, 现选取相同的两幅数据采用同一软件进行实验处理。通过对解缠结果的详细分析, 给出各解缠算法的特点和适用情况。

2008 年 10 月 6 日 16 时 30 分西藏自治区当雄县(29°48'N, 90°21'E)发生 Ms6.6 级地震, 如图 1 所示。本实验所使用的数据是西藏当雄地区的两幅 ENVISAT ASAR 数据, 时间分别为 20080504 和 20081026。采用中国地震局地壳应力研究所开发的软件 ICD-INSAR 进行处理。

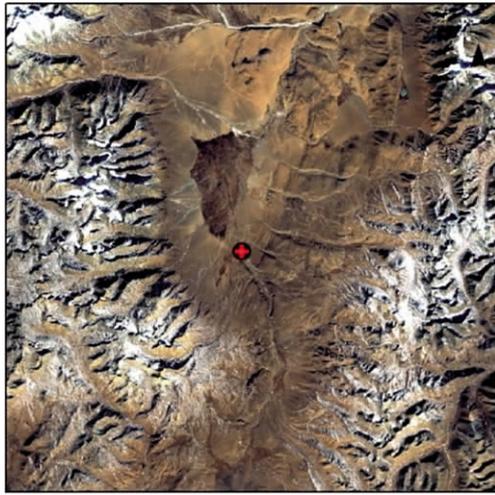
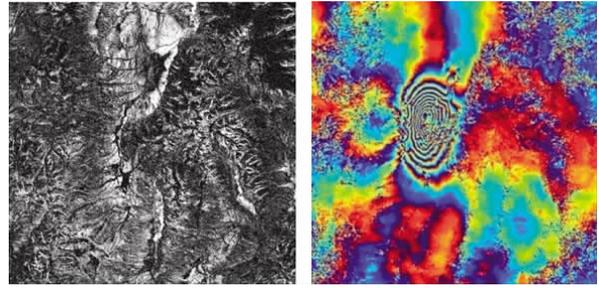


图 1 2008 年 10 月 6 日当雄震中 ALOS 影像, 图中十字表示震中

计相干值可以看出影像中心区域相干性较高(相干值 > 0.6), 四周边缘地区相干性较低(相干值 < 0.2)。干涉图通过均值滤波后锐化并增强了边缘, 并且削弱了干涉图中的噪声。干涉图条纹变得非常清晰, 图像更加平滑, 视觉效果好。而且干涉图条纹没有发生移动, 干涉图条纹边缘梯度也没有发生明显变化。



(a) 为相干图 (b) 为滤波后的干涉图

图 2 干涉处理过程图

表 1 所示为滤波后干涉图经过各解缠方法解缠后的结果值统计, 结果显示统计耗费网络流方法的均值和方差较小。图 3 所示为形变区(即结果图中心红色区域)各解缠方法统计直方图, 比较看出统计耗费网络流方法的直方图更加平滑, 分布较好。最小范数法、质量图路径跟踪法、最小不连续法直方图虽然分布较好, 但是毛刺较多。共轭梯度法直方图分布不好, 且毛刺很多, 认为是与其解缠中将误差传递, 造成系统性的偏差有关。枝切法直方图较平滑, 但是分布不好, 且零值较高, 认为是与其解缠中在图像中心区域存在较大的斑块, 解缠不成功有关。

图 2 所示为相干图和滤波后的干涉图。通过统

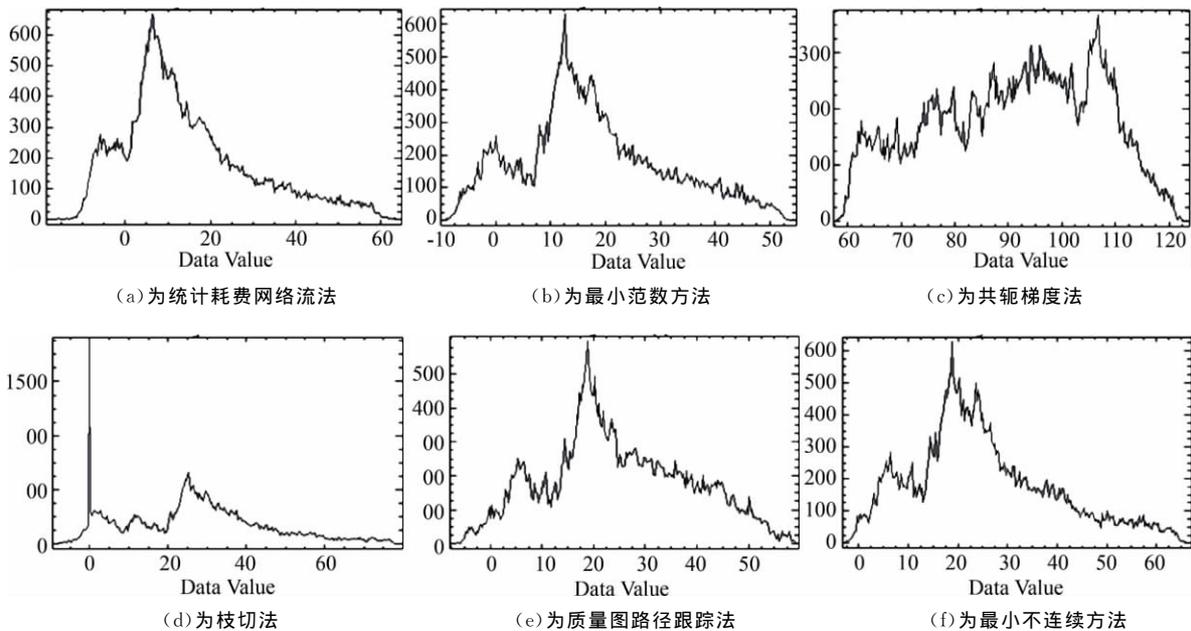


图 3 形变区各解缠方法直方图比较

表 1 解缠方法统计比较

解缠方法	最小值	最大值	平均值	标准差
统计耗费网络流法	-27.320313	64.845703	0.094906	7.310354
枝切法	-15.556262	79.913475	15.853155	8.778961
最小不连续法	-6.901264	67.347107	11.889786	7.058085
最小范数法	-13.256419	54.780731	5.221689	6.69352
质量图引导路径跟踪法	-8.561524	59.714024	11.652504	6.963701
共轭梯度法	-17.449596	157.14616	84.153862	28.11525

图 4 所示为 6 种解缠方法下相同两点间的剖面图。可以看到统计耗费网络流法、最小不连续法、最小范数法的剖面图走势大致相同。枝切法剖面线有大量零值区域出现,表明这些区域没有正确解缠。质量图路径跟踪法剖面线虽然没有零值出现,但是也有一些区域突变为较低值,不符合整体走势,表明

质量图路径跟踪法在相位图的指导下解缠有一定的帮助,避免了一些不能解缠的斑块出现。共轭梯度法剖面线很光滑,但是整体走势与其他解缠方法差别较大,表明其可能将误差引入到整个解缠过程中,导致解缠结果不准确。

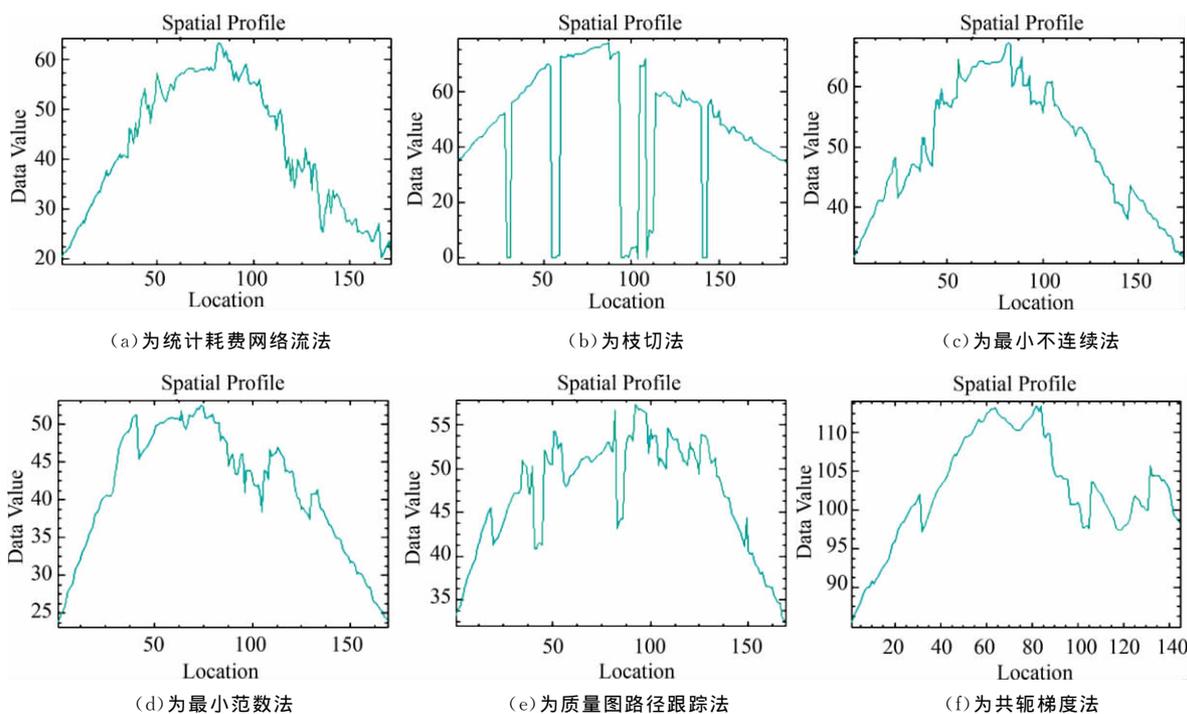


图 4 不同解缠方法相同两点剖面图比较

表 2 差值图统计比较

解缠方法	最小值	最大值	平均值	标准差
统计耗费网络流法	-6.271928	6.278321	-0.025051	2.402746
枝切法	-6.131539	3.29258	-0.076862	1.222591
最小不连续法	-3.759717	2.523482	0.180015	3.038521
最小范数法	-3.831629	2.45157	0.162975	3.023575
质量图引导路径跟踪法	-5.419965	0.863304	-0.121606	2.284328
共轭梯度法	-1.741841	4.541739	0.417622	2.984069

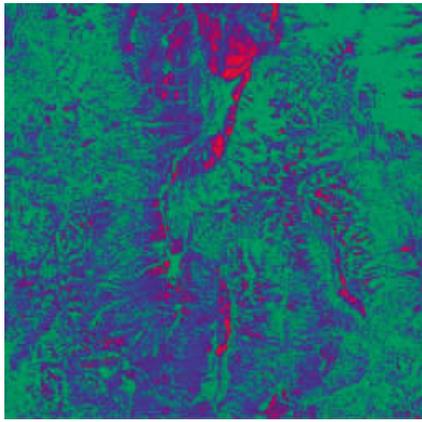
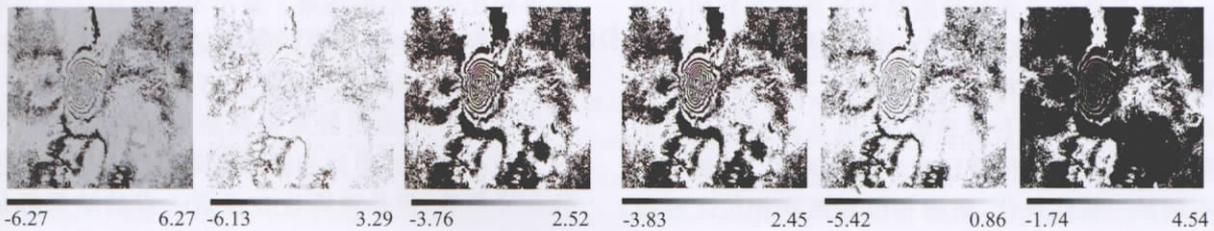


图 5 相干图的密度分割图(其中绿色代表相干值为 0.0385~0.2452;蓝色代表相干值为 0.2452~0.5554;红色代表相干值为 0.5554~0.8655)

由图 5 可以看到图像四周边角、中间区域为低相干区,相干值小于 0.2。由图 6 及表 2,我们可以看到差值和分布情况。最理想的情况就是差值图全

为零值,即颜色为颜色条带图的零值处色彩。但是由于低相干性、解缠方法自身及解缠过程中引起的误差,不可能达到理想情况。综合看出统计耗费网络流法差值图平均值近于零值,在 ENVI 中查看其在低相干区的数值也很小,证明该方法解缠效果很好。枝切法差值图平均值为 -0.07,说明解缠结果还是比较精确。最小不连续方法和最小范数方法均值分别为 0.18 与 0.16,说明其精确性不如前两种者。在 ENVI 中查看到其在低相干区的数值较大,说明其对低相干区不能进行很好的解缠。质量图路径跟踪法差值图均值为 -0.12,在 ENVI 中查看到其在低相干区的数值较小,说明在质量图的指导下,解缠精确性有了一定提高。共轭梯度法差值图均值最大,为 0.41,说明解缠结果误差较大。在 ENVI 中查看到其在低相干区的数值也较大,说明该方法在相干性低的区域解缠效果不好。



(a)为统计耗费网络流法 (b)为枝切法 (c)为最小不连续方法 (d)为最小范数方法 (e)为质量图路径跟踪法 (f)为共轭梯度法
图 6 不同解缠方法解缠后再缠绕结果与滤波后干涉图的差值图

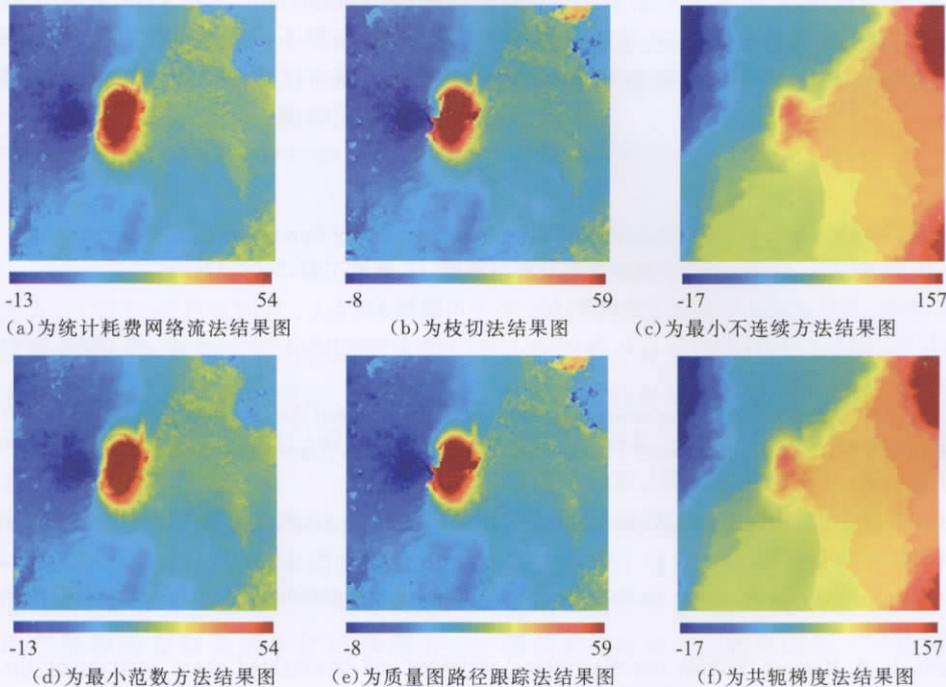


图 7 解缠结果图比较

通过对图 7 所示不同相位解缠方法下解缠结果图的分析比较,并联系前面图表的分析,我们可以看

到:统计耗费网络流算法结果充分顾及了相干图所包含的信息,获得了一个较优的全局解,解缠结果的

连续性较好,对于低相干区域也能很好地完成解缠。但是由于网络流算法的复杂性,其耗时最多,且对计算机的性能要求也较高^[10]。

枝切法结果图中图像中心区域有大量斑块产生,似“孤岛”,经分析干涉图和相干图该区域的值发现该区域相干性较低,造成该区域相位无法解缠。图像中部由于地形因素有大量的不连续区,残差点过多,造成在相位解缠的过程中无法确定正确的枝切线,形成误差传递,解缠结果误差很大。但是枝切法无论是解缠精度还是解缠效率都令人比较满意。当干涉图的数据质量较好,残差点较少时,枝切法可以在很短的时间内得到比较精确的结果。但当图质量较差,残差点较多时,该算法由于不能准确连接枝切,因而无法选择合适的积分路径,有时会造成错误的 2π 跳跃,导致误差的传递^[11]。

最小不连续法结果图中连续性较好,得到一个较好的全局解。但是计算时间较长,计算效率较低。

最小范数法得到的解缠结果虽然有很好的连续性和平滑性,但是该算法在任意一点的结果都是不精确的。与枝切法相比,虽然最小二乘法的这种全局最优使它不会留下解缠孤岛,但是数据质量低的局部地区误差容易传播到整个图像区域。解缠相位并不满足一致性条件,解缠相位和缠绕相位之差也不是整周相位。如果额外加上一致性条件限制,又会降低解缠的计算效率^[12]。

质量图路径跟踪法由于采用相干图引导,因而减少了不能解缠的区域(黑色斑块),但是解缠结果中也存在太多的断点和不确定性,解缠结果不够精确。

共轭梯度法结果图与其他5种方法的结果图差别很大。解缠结果很不准确,特别是图像中心震中区域没有得到很好的形变结果。分析该方法是较典型的最小二乘法,其解缠结果比较平滑,对噪声区域也能解缠,但同时将误差传递到高质量区域,造成了系统性的偏差。

4 结 论

通过对当雄地震同震影像的干涉处理,并进行解缠算法的实验分析,我们得到:共轭梯度法的解缠结果不连续点最少,比较平滑并且是整体连续的,但是解缠的同时将误差传递到高质量区域,产生了系统性的偏差,解缠效果不好。对于噪声较多的干涉图可使用该方法进行解缠。枝切法的解缠结果不连续点最多,出现大量斑块,但是枝切法无论是解缠精度还是解缠效率都令人比较满意。当干涉图的数据质量较好,残差点较少时,枝切法可以在很短的时间内得到比较精确的结果。最小不连续法结果图中连续性较好,得到一个较好的全局解。但是计算时间较长,计算效率较低。该算法有待于进一步改进,可采用质量值作为权值来提高解缠的准确度和可靠度。最小范数法得到的解缠结果虽然有很好的连续性和平滑性,但是该算法在任意一点的结果都是不精确的,可以考虑加上一致性的限制条件。质量图路径跟踪法由于采用相干图引导,因而减少了不能解缠的区域(黑色斑块),但是解缠结果中也存在太多的断点和不确定性,解缠结果不够精确。统计耗费网络流方法连续性较好,对于低相干区域也能很好地完成解缠。

参考文献

- [1] Akira Hirose, Ryo Yamaki. Phase Unwrapping with Phase-Singularity Spreading[C]//IGARSS2006.
- [2] 季灵运,王庆良,杨成生,郝明. 相位解缠算法的分析与评价[J]. 测绘工程, 2008, 17(5).
- [3] 王超,张红,刘智. 星载合成孔径雷达干涉测量[M]. 科学出版社, 2002.
- [4] Goldstein R M, Zebker H A, Werner C L. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping[J]. Radio Science, 1998, 23(4): 713-720.
- [5] Thomas J. Flynn. Two-dimensional phase unwrapping with minimum weighted discontinuity[J]. J. Opt. Soc, 1997, 14(10).
- [6] Ghiglia DC, Pritt MD. Two-dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software[M]. New York: Wiley-Intersci, 1998: 493.
- [7] Pritt M D, Shipman J S. Least-squares two-dimensional phase unwrapping using FFT'S[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens, 1994, 32(3): 706-708.
- [8] Costantini M. A phase unwrapping method based on network programming[Z]. Proc. Fringe'96 Workshop, Zurich, Switzerland, 1996.
- [9] D. C. Ghiglia, L. A. Romero. Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods[J]. Opt. Soc. Amer. A, 1994, 11(1): 107-117.
- [10] 于勇,王超,张红,刘智,高鑫. 基于不规则网络下网络流算法的相位解缠方法[J]. 遥感学报, 2003, 7(6).
- [11] 高勇. 干涉 SAR 的二维相位解缠算法研究[J]. 地理学与国土研究, 2000, 16(4).
- [12] 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).