

最小独立闭合环搜索算法在探测 InSAR 相位解缠
误差中的应用^{* 1}

陈 涛^{1,2)} 秦天亦^{3,4)} 陈晓森³⁾ 王 华³⁾

- (1)中国地震局地质研究所,北京 100029

(2)地壳运动监测工程研究中心,北京 100036

(3)广东工业大学测绘工程系,广州 510006

(4)广州市国土资源与房屋管理局白云分局,广州 510405

摘 要 基于最小生成树思想,并考虑多个连通图的情况,改进了现有的闭合环搜索算法。依据边的端点和长度信息建立树与余枝,从余枝中依次寻找能生成最小环的一条优先构成闭合环,以满足最短路径条件;通过设置余枝与闭合环的一一对应关系以满足独立条件。最后,将该算法用于 InSAR 相位解缠误差的探测,明显提高了 InSAR 数据处理的效率。

关键词 最小独立闭合环;最小生成树;余枝;InSAR;相位解缠误差

中图分类号:P227 **文献标识码:**A

APPLICATION OF MINIMUM CLOSED LOOPS SEARCHING
ALGORITHM IN DETECTING INSAR PHASE UNWRAPPING ERRORS

Chen Tao^{1,2)}, Qin Tianyi^{3,4)}, Chen Xiaosen³⁾ and Wang Hua³⁾

- (1)Institute of Geology, CEA, Beijing 100029

(2)National Earthquake Infrastructure Service, Beijing 100036

(3)Department of Surveying Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006

(4) Baiyun Sub-Bureau of Land Resource and Housing Management of Guangzhou Municipality, Guangzhou 510405

Abstract Based on the Minimum Spanning Tree (MST) method, we improved the searching algorithm for minimum closed loops in consideration of multiple connected graphs. A tree and some redundant branches are built up according to the nodes and the length of edges. The minimum spanning condition was satisfied by sequentially selecting the redundant branch which can construct the minimum loop. The independent condition was satisfied by keeping one-to-one correspondence between the redundant branch and minimum loop. Finally, we applied the algorithm to detect InSAR phase unwrapping errors which greatly improved the efficiency of InSAR data processing.

Key words: minimum closed loops; Minimum Spanning Tree (MST); redundant branch; InSAR; phase unwrapping error

* 收稿日期:2013-02-08

基金项目:国家自然科学基金(41101016);中国科技部-欧洲空间局“龙计划”项目(5305);中国地震局监测预报项目“北斗导航与GPS联合应用分析”

作者简介:陈涛,男,博士生,主要从事GPS、InSAR和LiDAR等技术在构造地质中的应用研究。E-mail:tchen@neis.gov.cn

1 引言

近年来,雷达干涉测量技术(InSAR)^[1]已广泛应用于地震、火山、冰川冰盖、地面沉降及滑坡等研究。目前比较流行的相位解缠算法大致可以分为三类:基于残差点确定积分路线的残差缺口法^[2];依据最小二乘准则,由缠绕相位梯度估计解缠相位的最小二乘法^[3];以及网络流相位解缠算法^[4,5]。然而,在各项应用中相位解缠都是 InSAR 数据处理的难点。无论采用哪种方法,相位解缠后仍然需要仔细检查相位解缠误差。以前,研究者主要通过人眼观察和人工组成闭合环来发现并剔除相位解缠误差^[6],工作效率很低。因此,闭合环自动搜索算法在传统测量中得以广泛应用。如果将每个干涉图视作网络中的一条边来自动搜索闭合环并计算各环路的闭合差,非常容易找出网中是否有干涉图存在相位解缠误差,从而提高 InSAR 数据处理的效率。

罗三明等^[7]根据每一条余枝搜索到闭合环之后,再对闭合环进行优化处理,反复进行闭合环的优化步骤。但是在某些控制网中,如果边数较小的环余枝之外的边与边数较大的环不完全重叠,最终搜索出的独立闭合环有时会出现环与环包含的现象。赵一晗、伍吉昌^[8]采用基于树形结构的算法,在生成闭合环之前先分析哪一个余枝可以生成最小闭合环,从而避免出现搜索结果不满足最小条件的问题。不过,上述研究均没有考虑当起始数据包含多于一个连通图的情况下,如何分析网络图和进行相应处理,而且都只将最小独立闭合环搜索算法用于传统的控制网。InSAR 数据处理时往往根据垂直基线和时间基线来选取干涉像对,从而组成干涉图网络^[9]。虽然与 GPS 等地面控制网不完全相同,但是 InSAR 干涉图网常需要计算闭合差(理论值为0)来判断相位解缠是否正确^[6]。为此,本文改进现有的闭合环搜索算法,并将其应用于探测 InSAR 相位解缠误差。

2 最小独立闭合环搜索算法

2.1 网络图分析算法的基本思路

在常规测量中,控制网的点、边是有空间相关性的,所以一个控制网往往是一个连通图。但是由于受到相干性的限制,InSAR 干涉图网常常出现多于一个连通图的情况。针对这种情况,本文依据数据文件中的点、边列表,设计算法如下:

1)为列表中每个点、边设一个连通图编号 Index 值(默认初始为0),第一条边及其起点、终点 Index 值设为1,并设连通图个数 NetNum 为1;

2)判断下一条边,若起点和终点的 Index 值都为0,则连通图个数 NetNum 加1,然后该边及其起点、终点 Index 值赋值为 NetNum 当前值;

3)若起点、终点其中一个 Index 值为0,另一个不为0,则 Index 为0的点以及该边的 Index 值设为与另一点一致;

4)若起点、终点 Index 值都不为0且相等,则该边的 Index 值设为与起点、终点一致;

5)若起点、终点 Index 都不为0且不相等,则 Index 较大的点 Index 值记录为A,较小的点 Index 值记录为B;将 Index 较大的点即此边的 Index 值赋为B,所有处理过的有 Index 最大值的点、边 Index 值赋为A;之后连通图的个数 NetNum 减1;

6)重复2)~5)步骤,直至边列表中所有的边都进行过判断。

至此可得到连通图的个数 NetNum 及每个点、边所在连通图的编号 Index。

2.2 基于最小生成树的闭合环自动搜索算法

基于最小生成树基本思路,不需要掌握图论知识,而且容易理解,编程实现也不困难。故本文希望以最小生成树的基本思路进行闭合环搜索。在点、边分别处于哪个连通图都分析完成之后,依据边的两个端点以及长度信息,进行基于树形结构的闭合环搜索算法。首先生成当前树与余枝的列表,在列表中寻找能优先生成最小环的一个余枝,以该余枝开始生成闭合环来满足最短路径条件;通过生成闭合环过程中,余枝与闭合环间对应关系来满足独立条件。设计算法如下:

1)计算连通图中每个点的度,即与该点相连接的路线个数,找出度最大的点 D_0 ,当存在多个最大度的点时,任选其中一个;

2)将连通图中所有点、边的访问标志 Visited 值赋为 False,点 D_0 的 Visited 值设为 True,遍历 D_0 的所有邻接点 $D_i(i=1,2,3,\cdots)$,将 D_i 中所有点与对应的边 Visited 值变为 True;

3)遍历 D_i 列表中所有 Visited 值为 False 邻接点 $D_j(j=1,2,3,\cdots)$,将 D_j 中所有点与对应的边 Visited 值变为 True;

4)用 D_j 取代 D_i 重复步骤3)直到连通图中所有点的 Visited 值为 True;

5)分别将 Visited 值为 True/False 的边保存在生成树 T /余枝 S 两个列表;

6)逐个断开 S 中的边,利用 Dijkstra 算法求得两点间的最小搜索深度,找到深度最小的一个余枝 S_i ;

- 7)利用 Dijkstra 算法找到断开 S_i 情况下两点间的最短搜索路径,并添加 S_i 组成闭合环;
- 8)将 S_i 添加进列表 T ,在列表 S 中删除 S_i ;
- 9)重复 6)~8)步骤直到列表 S 为空。

至此可得到连通图中所有最小独立闭合环。对每个连通图分别进行上述搜索,可以得到整个网络图所包含的连通图中的所有闭合环。

3 应用实例

采用水准网、平面控制网、GPS 网检验上述搜索算法,均得到了正确的结果。现仅给出在 InSAR 相位解缠误差探测中的应用。

采用 ROI_PAC 软件处理 Envisat 卫星 2008—2010 年获取的青海大柴旦地区 12 幅卫星图像^[10],生成了 18 幅干涉图。数据处理中,采用 SRTM DEM 去除地形相位^[11]。干涉图组成的网络如图 1 所示。图中 18 幅干涉图对应图上的 18 条边,干涉图网络被划分为 2 个连通图,有最小独立闭合环 8 个,搜索结果见表 1。

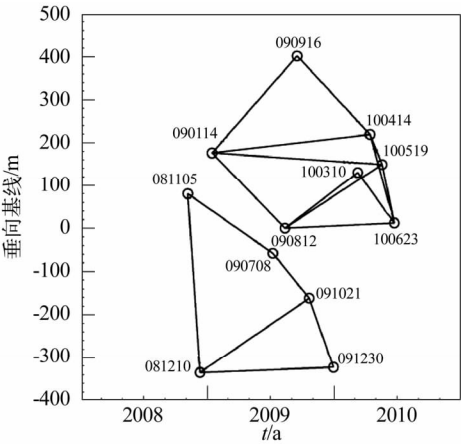


图 1 2008—2010 年青海大柴旦地区 InSAR 干涉图网
Fig. 1 InSAR interferogram network between 2008 and 2010 in Dachaidan area of Qinghai

表 1 InSAR 数据干涉图网络最小独立闭合环搜索结果
Tab.1 Minimum closed loops of InSAR interferogram network

序号	闭合环所包含的干涉图文件
1	081210-091021, 081210-091230, 091021-091230
2	081105-090708, 081105-081210, 081210-091021, 090708-091021
3	090114-090812, 090114-100519, 090812-100519
4	090114-090916, 090114-100414, 090916-100414
5	090812-100310, 090812-100623, 100310-100623
6	090114-100414, 090114-100519, 100414-100519
7	090812-100519, 090812-100623, 100519-100623
8	100414-100519, 100519-100623, 100414-100623

与水准测量闭合差计算方法类似,根据各干涉图主图像和副图像的编号(即日期)自动计算闭合环中各像元的解缠相位之和,即为该闭合环的闭合差。理论上,相同闭合环中所有像元的闭合差应该为一常数。若某像元存在相位解缠错误,则其闭合差应该与该常数相差 2π 的整数倍。因此,从闭合差图中很容易找出相位解缠误差发生的位置。图 2 是由 5 号环的 3 个干涉图计算的闭合差,由此可以很容易地找出粗差存在的位置。

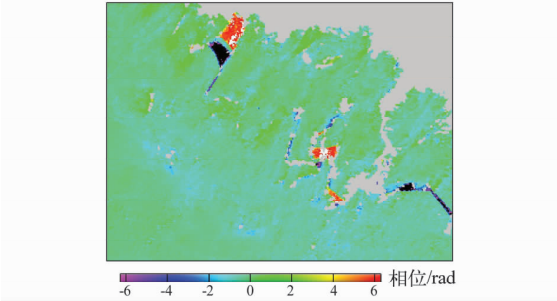


图 2 5 号环的闭合差
Fig. 2 Closure errors of the 5th loop

检查构成 5 号环的干涉图,发现干涉图 090812-100310(图 3(a))的解缠相位比较平滑,而干涉图 090812-100623(图 3(b))与 100310-100623(图 3(c))有明显的 discontinuous 相位,这正是相位解缠误差所造成的。

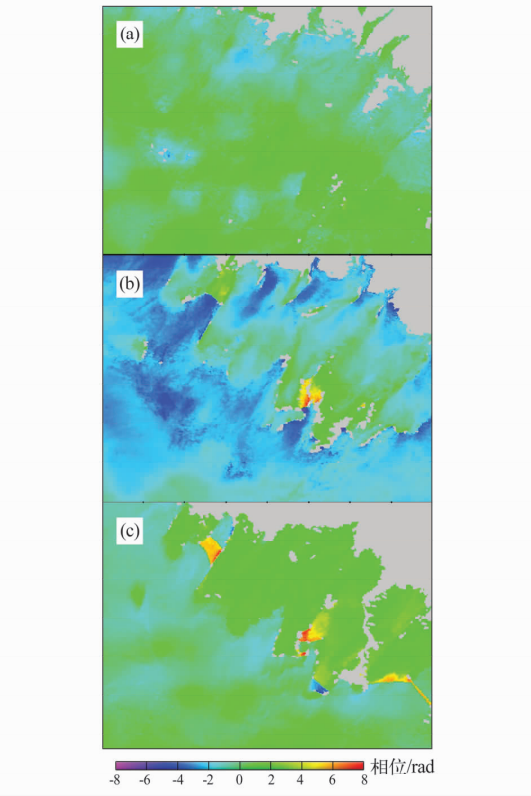


图 3 干涉图
Fig. 3 Interferograms

4 结论与展望

本文改进了现有的最小独立闭合环搜索算法,使其能在网络图被划分为多个连通图的情况下完成闭合环搜索,经检验证明了其正确性。搜索得到的闭合环能够同时满足“最小”和“独立”两个条件。此外,本文首次将闭合环搜索思想应用于探测 InSAR 相位解缠误差,得到了理想的结果,使原本需要数天才能完成相位解缠误差检验工作能够在短短几分钟内完成,大大提高了 InSAR 数据处理的效率。

当然,在 InSAR 应用中,最小独立闭合环的“最小”条件有时不仅仅指干涉图最少,还需要考虑公共有效像素最多、误差最小等。这就需要搜索闭合环的条件不再是狭义的边数或边长最小,而是耗费最少。此外,采用闭合环搜索算法能够确定环中是否存在相位解缠误差,但是至于误差存在于哪一个干涉图,目前仍然主要靠人眼识别。依据相邻闭合环闭合差之间的逻辑关系自动确定含有相位解缠误差的干涉图也是今后进一步改进的方向。

参 考 文 献

1 Simons M and Rosen P A. Interferometric synthetic aperture radar geodesy [A]. Schubert G. Treatise on Geophysics, Volume 3-Geodesy [C]. Elsevier Press, 2007.

2 Goldstein R M, Zebker H A and Werner C L. Satellite radar interferometry: Two dimensional phase unwrapping [J]. Radio Science, 1988, 23 (4): 713 - 720.

3 Pritt M D and Shipman J S. Least squares two dimensional phase unwrapping using FFT' S [J]. IEEE TransGeosciRe-

mote Sens. , 1994, 32 (3): 706 - 708.

4 Costantini M. A novel phase unwrapping method based on network programming [J]. IEEE TransGeosci Remote Sense. , 1998, 36 : 813 - 821.

5 Chen C W and Zebker H A. Network approaches to two-Dimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithms [J]. Journal of the Optical Society of America A. 2000, 17 : 401 - 414.

6 Wang H, Wright T and Biggs J. Interseismic slip rate of the northwestern Xianshuihe fault from InSAR data [J]. Geophys Res Lett. , 2009, 36, L03302, doi: 10. 1029/2008GL036560.

7 罗三明,等. 控制网最小独立闭合环自动搜索算法研究 [J]. 大地测量与地球动力学, 2009, (6): 93 - 100. (Luo Sanming, et al. Research on auto-searching least closed loops in control network [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2009, (6): 93 - 100)

8 赵一晗,伍吉仓. 控制网闭合环搜索算法的探讨 [J]. 铁道勘察, 2006, (3): 12 - 14. Zhao Yihan and Wu Jicang. Exploration for the methods of searching the closed loops in the control network [J]. Railway Investigation and Surveying, 2006, (3): 12 - 14)

9 Berardino P, et al. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens. , 2002, 40 (11): 2 375 - 2 383.

10 Rosen P A, et al. Updated repeat orbit interferometry package released [J]. Eos Trans. , 2004, 85 (5): 47.

11 Farr M and Kobrick M. Shuttle radar topography mission produces a wealth of data [J]. Eos Trans. , 2000, 81 : 583 - 585.