

由新质量图引导的 InSAR 快速解缠方法

杨夏 于起峰 伏思华

(国防科技大学航天与材料工程学院 108 教研室 长沙 410073)

摘要: 相位解缠是 SAR 干涉测量数据处理中的一个关键步骤之一, 解缠结果的好坏直接影响最终数字高程模型的精度。该文介绍了一种新的质量图求取方法。该方法考虑到条纹宽度对传统的灰度方差质量图的影响, 提出利用平面拟合来消除坡度效应后再求取灰度方差作为质量, 取得良好的效果。该文还对质量图的解缠算法进行了改进, 利用查找表来降低路径搜索的计算量, 大大减少了解缠所需要的时间。由于 InSAR 图像的数据量往往很大, 解缠时间的大大缩短对于这样大量数据的处理是非常有利的。对真实 InSAR 干涉纹图的处理结果表明, 该解缠方法高效而实用。

关键词: InSAR; 干涉条纹图; 相位解缠; 质量图

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)10-2367-04

A Fast Phase Unwrapping Method Guided by New Quality Map for InSAR

Yang Xia Yu Qi-feng Fu Si-hua

(College of Aerospace and Material Technology, NUDT, Changsha 410073, China)

Abstract: Phase unwrapping is one of the key steps for the processing of InSAR data. The quality of the unwrapping results affects the final DEM (Digital Elevation Model) directly. In this paper, a new quality map is proposed. This new quality map reduces the influence of the slope effect by plane-fitting and is denoted by the variance between the fitted plane and the original data. Also, an improved phase unwrapping method with a quality map is introduced in this paper. This new technique simplifies the route-searching processes by setting up a look-up table, which reduces the total processing time greatly. The experiment results with real InSAR data show that the proposed method is correct and effective.

Key words: InSAR; Interferogram; Phase unwrapping; Quality map

1 引言

干涉 SAR(InSAR)测量技术是利用从雷达复图像数据中衍生出的相位信息来提取地表三维信息。它的基本原理是通过两部天线同时观测, 或者两次平行的观测, 获取地面上同一地物的两幅复雷达图像, 利用这两幅复图像相干运算得到的相位差反演地物的相对高程。但是实际上这样得到的干涉相位差是真实相位差的卷叠, 即 InSAR 干涉图中与地面位置直接相关的相位是以 2π 为模的, 所以为了计算每一点的高程必须给每一个相位测量值加上整数倍的相位周期, 这种求解 2π 模糊性问题的技术称为相位解缠^[1-3]。解缠得到的相位(差)值的准确与否, 直接关系到提取出的目标高程信息精度的有效性。二维相位解缠要兼顾两个方面: 一致性和精确性。一致性是指在解缠后的相位数据矩阵中任意两个点之间的相位差与这两个点之间的路径是无关的; 精确性是指解缠后的相位数据要能忠实地恢复原始相位信息。

自 Goldstein 等人在 1988 年提出所谓的枝切法(branch

cut)以来^[4]。各种基于 InSAR 数据的相位解缠算法不断涌现。近 20 年来, 国外学者提出了大量的相位解缠算法, 归纳起来, 可以分为 3 类: 基于残差点确定积分路径的路径跟踪法^[3-6], 依据最小二乘等准则确定的全局最优算法^[7,8]; 以及基于网络流理论的网络流相位解缠算法^[9,10]。另外, 遗传算法、神经网络法、蒙特卡罗法、贝叶斯法等算法, 也有过一些尝试。第一类是一种局部算法, 它们都是基于逐像素的, 利用相位数据的局部信息, 通过一定的方法得到全局的解。而且均是采用不同的策略选择积分路径, 避开数据中的残差或不连续点, 以满足相位梯度闭合路径积分为零的条件。如枝切法依据最临近原则, 根据残差的分布自动生成中性的“枝切”, 以使积分路径不穿过这些“枝切”。由于枝切法仅仅考虑了“残差”点的分布而没有利用其它的信息, 因此常常会出现“枝切”将大片区域孤立开的问题; Ferrett 等人利用多基线干涉数据^[5], 并采用最大似然法, 自动地选择合理的积分路径进行解缠; Flynn 等人提出的基于最小不连续测度的相位解缠算法^[6], 则是利用网络图的方法自动选择合适的积分路径, 以使解缠相位数据中不连续的长度最小; 这

类算法的优点是计算速度较快,在相干性较好的区域可以获得精确的解缠相位。第二类解缠算法则是一种全局算法,它通过寻求一个全局的解缠相位解来拟合观测的缠绕相位。如基于FFT和DCT的等权最小二乘算法,基于多分辨率网格或共轭梯度的变权最小二乘算法和基于最小化 L_p 范数的算法等等。这类算法的优点是可以获得一个全局的相位解缠结果,但如果权值选择不当或离散相位梯度估计不能反映真实的相位梯度,则会引入较大的误差(等权最小二乘算法则由于未考虑相位数据中的残差和不连续,基本上不能用于实际处理),另外计算速度也较慢。第三类实际上也可以归属到第一类算法,网络规划算法是利用成熟的网络规划算法来求取合理的解缠路径,并保证全局最优。该算法的精度很容易受到质量图的影响。

2 质量图的确

对于InSAR干涉条纹图,一般所使用的质量图^[11-13]为相干系数图。相干系数越大,则两幅图像的相关性就越好,表明所得到的相位信息也越可靠;相干系数越小,则两幅图像的相关性就越差,表明所得到的相位信息不够真实。对于复干涉影像对 s_1 和 s_2 ,其相干系数定义为

$$\gamma = \frac{|E[s_1 \cdot s_2^*]|}{\sqrt{E[|s_1|^2] E[|s_2|^2]}} \quad (1)$$

在实际估算干涉相干的过程中,假设在估算窗口内,可用空间平均代替总体平均,同时考虑图像之间的相位差异,则相干系数表示为

$$\gamma = \frac{\left| \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N s_1(m,n) \cdot s_2^*(m,n) \cdot e^{-j\phi(m,n)} \right|}{\sqrt{\sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N |s_1(m,n)|^2 \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N |s_2(m,n)|^2}} \quad (2)$$

图1(a)中是对某个地区的InSAR干涉条纹进行滤波后的图像,图1(b)是该InSAR图像所对应的质量图,也就是由公式(2)得到的相干系数图。但是在实际的干涉相位图中,由于欠采样或者噪声影响等因素,相位的不一致(残差点)并不只会出现在低相关区域。所以相干系数并没有完全反映条纹图的相位好坏,以这样的相干系数图作为质量图来引导解缠过程,必然会产生一些不连续或者不一致的数据,如后面的结果图4中(a)所示。

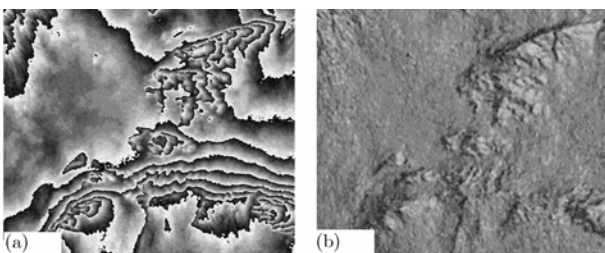


图1 某地区InSar干涉条纹滤波后图像(a)和其对应的质量图

除了相干系数,常用的质量图还有方差和灰度梯度。灰度方差可以直接从干涉条纹图得到,不需要复数对图像数据,并且也能够比较准确地反映相位场的连续一致性,灰度梯度与方差类似。但是这样的质量图容易受到条纹宽度的影响。如图2所示,图2(a)中左右两部分的条纹质量可以认为是同样好,但是由于左边条纹较宽,其均方差或者梯度则会比右边小,使得左右两边的图像质量不一样,如图2(b)所示。

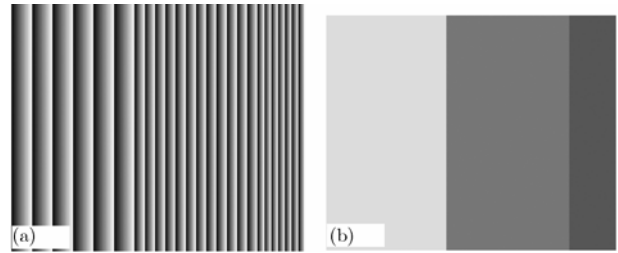


图2 仿真的InSAR干涉相位条纹图(a)以及其对应的方差质量图(b)

为了去除这种因为条纹宽度(斜坡效应)给质量图带来的影响,本文提出先对干涉相位图进行局部解缠,以去掉 2π 跳跃的影响。然后对局部解缠后的数据进行平面拟合,去掉坡度的影响。最后计算局部解缠后的数据和拟合平面的数据方差,作为当前点的图像质量。方差越大,说明图像当前点的质量越差。对仿真图2(a)所求的新质量图如图3(a)所示,对图1(a)所求的新质量图如图3(b)所示。从图3(a)以及后面的解缠结果可以看到,本文提出的质量图由于去除了斜坡效应,不再受到条纹宽度的影响,比传统的方法更为可靠。

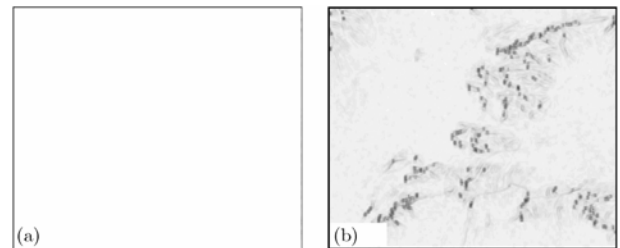


图3 以本文方法求得图2(a)的质量图(a)和图1(a)的质量图(b)

局部解缠在一定的矩形窗口内进行,窗口大小一般取 5×5 到 11×11 (本文都使用 9×9)。进行局部解缠时,以窗口的中心点为基准点先对水平(或者垂直)中心线进行解缠,再以中心线上的点作为基准点向两边扩散对整个窗口内的点进行解缠。这样可以将解缠过程中的累积误差降到最低。由于增加了局部解缠的步骤,新质量图的求解过程的耗时会相应增加。但是对于整个解缠过程,这种时间的增加并没有太大影响。表1给出了新质量图求解方法与传统方法的耗时对比,其计算窗口为 9×9 。

表1 新质量图求法与传统质量图求法耗时对比

图像大小	512×512	1024×1024	2048×2048
传统均方差质量图法(s)	1.08	2.63	10.33
本文新质量图法(s)	0.70	4.13	16.41

3 快速质量图解缠方法

InSAR 干涉纹图解缠方法:先选择图像质量最高的点作为起始点,然后从与该点相邻的点中选择质量最高的点进行解缠,然后查找与已经解缠的点相邻的点,从中选择质量最高的点进行解缠,直至整幅图像解缠完毕。由于该方法每次解缠时都需要查找与已解缠点相邻的点,从中选取质量最高的点进行解缠,查找过程相当费时。为此我们建立了一个查找表,在每解缠一个点之后,便将该点的相邻点按照其质量高低放入查找表,需要解缠的下一个点便直接从查找表的表头提取,省去了费时的查找比较过程,使整个解缠的计算速度大大提高。数据链表的各单元结构如表2所示,整个解缠过程的流程图如图4所示。

表2 数据单元的结构

序号	前向指针	X坐标	Y坐标	后向指针
----	------	-----	-----	------

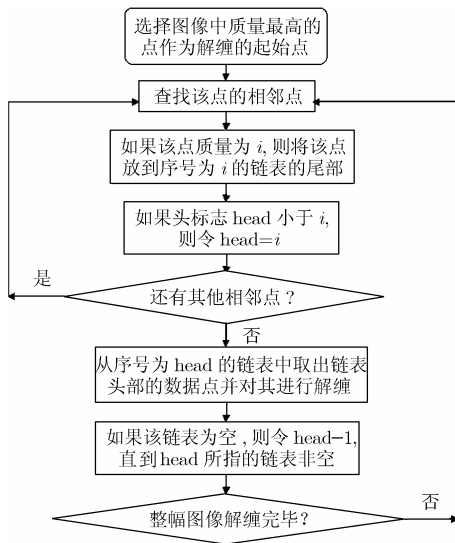


图4 快速解缠过程的流程图

表3是用本文方法和用传统质量图解缠方法对不同大小图像进行解缠所消耗时间的对比。两种方法使用同一台计算机(P4 2.4G, 256M 内存)。通过对比可以看到,本文提出的算法在计算速度上明显优于传统的方法。

表3 同台计算机算法所需要的时间对比

图像大小	512×512	1024×1024	2048×2048
传统方法运行时间(s)	14	28	634
本文方法的运行时间(s)	3	8	25

4 试验结果

图5(a)是用传统的质量图解缠方法对图1(a)进行解缠得到的结果。从图上可以看到由于传统的质量图不能完全真实地反映 InSAR 相位图的质量,解缠结果出现了明显的不一致区域。图5(b)是用本文介绍的新质量图方法进行解缠得到的结果。从该结果看以看到,其解缠结果优于由传统方法得到的结果。

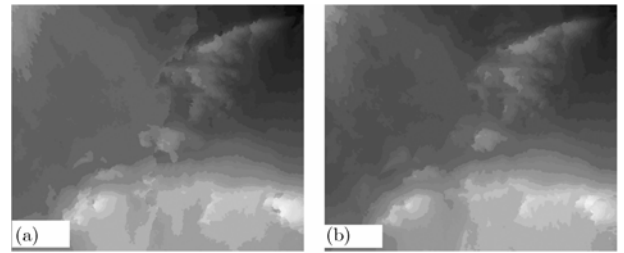


图5 (a)是以图1(b)为质量图对图1(a)进行解缠所得结果 (b)是用本文质量图解缠所得结果

图6(a)是滤波后的 SIR-C/X-SAR X波段的 Etna 火山干涉相位,图6(b)是用最小二乘方法进行解缠得到的结果。从图6(b)可以看到,最小二乘方法虽然能得到一个全局优化的结果,但是误差被扩散,解缠精度很低。图7(a)是对图6(a)用传统质量图解缠方法得到的结果,图7(b)是用本文的方法得到的解缠结果。可以看到,图7(b)中的不一致区域明显少于图7(a)。

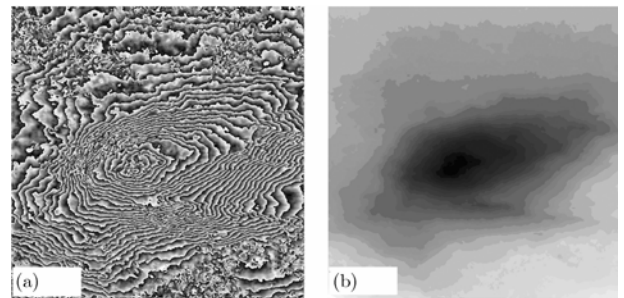


图6 滤波后的 Etna 火山干涉相位图(a)和对其进行最小二乘解缠的结果(b)

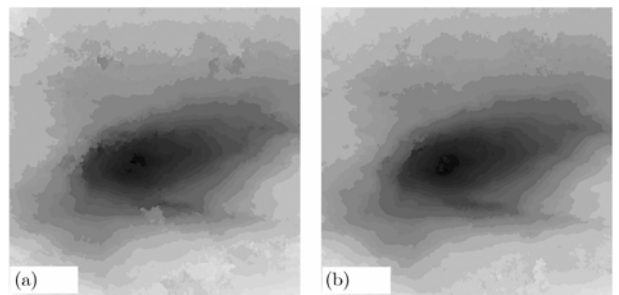


图7 (a)是对图6(a)用传统质量图解缠方法得到的结果 (b)是用本文新质量图解缠方法得到的结果

5 结论

本文介绍了一种新的质量图求取方法。该方法考虑到条纹宽度,即坡度效应对传统方差质量图的影响,提出利用平面拟合来消除坡度效应,然后计算原始数据与拟合平面的灰度方差作为新的质量标准,实际应用表明本文提出的新质量图比传统的相关系数、灰度方差等质量图都更为可靠。本文还对质量图解缠算法进行改进,使用查找表来降低路径搜索的计算量,大大减少了解缠所需的时间。实际 InSAR 的解缠结果表明,本文的解缠方法不仅优于最小二乘解缠法和传统的质量图解缠法,而且在计算速度上有了大大的提高。

参 考 文 献

- [1] Klees R and Hanssen R. Basics of Synthetic Aperture Radar Interferometry and Applications. In Nordic Geodetic Commission (NKG) Autumn School, August 2000: 169-211.
- [2] Ghiglia D C and Pritt M D. Two Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software. New York: Wiley, 1998: 122-135.
- [3] Zebker H A and Lu Y P. Phase unwrapping algorithms for radar interferometry: Residue cut, least squares, and synthesis algorithms. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1998, 15(3): 586-598.
- [4] Goldstein R M, Zebker H A, and Werner C L. Satellite radar interferometry: Two dimensional phase unwrapping. *Radio Science*, 1988, 23(4): 713-720.
- [5] Ferretti A, Prati C, Rocca F, and Monti Guarnieri A. Multibaseline SAR Interferometry for automatic DEM reconstruction, Proc. 3rd ERS Symposium - Florence 1997 - <http://florence97.ers-symposium.org/>
- [6] Flynn T J. Phase unwrapping using discontinuity optimization, Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings. IGARSS '98, 1998, vol.1: 80-82.
- [7] Pritt M D and Shipman J S. Least squares two dimensional phase unwrapping using FFT. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens.*, 1994, 32(3): 706-708.
- [8] Ghiglia D C and Romero L A. Minimum Lp2 norm two dimensional phase unwrapping. *J. Opt. Soc. Am.*, 1996, 13(10): 1999-2013.
- [9] Costantini M. A phase unwrapping method based on network programming. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens.*, 1998, 36(3): 813-821.
- [10] Chen C W and Zebker H A. Network approaches to two-dimensional phase unwrapping : Intractability and two new algorithms. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2000, 17(3): 401-414.
- [11] Bone D J. Fourier fringe analysis: The two-dimensional phase unwrapping problem. *Applied Optics*, 1991, 30(25): 3627-3632.
- [12] Flynn T J. Consistent 2-D phase unwrapping guided by a quality map. Proceeding of the 1996 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Lincoln. Nebraska. IEEE. Piscataway, 1996: 2057-2059.
- [13] Xu W and Cumming I. A region growing algorithm for InSAR phase unwrapping. Processing of the 1996 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Lincoln. NE. May 27-31. 1996. IEEE, Piscataway. NJ, 1996: 2044-2046.

杨 夏: 男, 1977 年生, 博士, 从事条纹图处理的研究。

于起峰: 男, 1958 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事光学测量领域的研究。