

一种 InSAR 相关系数精估计方法

韦海军^①, 黄海风^①, 朱炬波^②, 梁向农^①

(^① 海军装备技术研究所, 北京 102442; ^②国防科学技术大学理学院, 长沙 410073)

摘要: InSAR 的相关系数是对 SAR 干涉图像对相似度的度量, 是 InSAR 技术应用分析的一项基本参数。相关系数的估计是通过比较两幅 SAR 图像中对应位置的相邻像素值得到的, 由于采样点数目的限制及存在由于地形起伏引起的干涉相位, 估计结果往往与真实值相差较大。本文提出了一种能够大幅减小相关系数估计误差的方法, 首先利用粗精度 DEM 仿真地形相位以消除地形起伏对相关系数估计的影响, 随后采用第二类统计方法进一步提高了相关系数的估计精度。我们用 SIR-C/XSAR 的 Etna 火山干涉数据对本文方法进行了验证。

关键词: InSAR; 相关系数; DEM; 第二类统计

doi: 10.3969/j.issn.1000-3177.2011.02.006

中图分类号: TP751 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3177(2011)114-0032-04

An Accurate Correlation Estimation Method of InSAR

WEI Hai jun^①, HUANG Hai feng^①, ZHU Ju bo^②, LIANG Dian nong^①

(^① *Inst. of Naval Equipment Technology, Beijing 102442;*

^② *College of Science, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073*)

Abstract: The InSAR correlation, a measure of the similarity of interferometric SAR image pairs, provides an elemental parameter for InSAR applications. In practice, correlation is observed by comparing the radar return across several nearby radar images pixels. The estimation is biased by underlying topographic interferometer fringe and finite pixel samples. We present here a method for correcting bias in InSAR estimation, which is resulting in significantly more accurate correlation. Firstly, we correct the underlying topographic fringe patterns by phases simulated by existing rough DEMs. A second kind statistics method is then applied to bias removal. We demonstrate the value of our method using data collected over the Etna volcano by the SIR-C/XSAR sensors.

Key words: InSAR; correlation; DEM; second kind statistic

1 引言

合成孔径雷达干涉测量(InSAR)是目前获取大场景高精度数字高程模型(DEM)最具潜力的技术手段之一。通过对同一区域的多次观测, InSAR 还可对地表升降、火山活动和冰层移动等进行大范围精确监测^[1]。在 SAR 干涉测量中, 相关系数是一个非常关键的量值, 它是不同 SAR 图像中的对应位置 SAR 回波相关性大小的度量, 不仅能够反映 InSAR 局部干涉相位的质量好坏, 而且能够提供散射体的

重要信息, 从而被广泛地应用于地物分类、植被、积雪厚度估算^[2-3]等领域。但是上述应用有赖于高精度的相关系数估计。

SAR 信号和成像系统的性质使得 SAR 相关系数的估计只能通过对两幅 SAR 图像中对应位置的相邻像素采用多视处理的方法得到, 这就带来了两个方面的问题: 首先, 相邻像素间存在地形相位的差异, 地形相位对信号的调制使得估计结果低于真实值; 其次, 相邻像素采用多视方法估计相关系数, 过程本身是一个有偏估计, 有限的采样点数使得估计

收稿日期: 2010-03-18 修订日期: 2010-04-12

作者简介: 韦海军(1979~), 男, 博士生, 研究方向: InSAR 数据处理。

E-mail: navy_wei@126.com

结果高于实际值。

对地形相位进行补偿, 传统的相关系数估计方法会在计算相关系数之前进行整体平地相位消除, 该方法仅适用于地形比较平坦的区域; 利用干涉相位去除地形相位^[4] 需要得到高质量的干涉相位, 而干涉相位的质量又由相关系数决定, 为得到较好的效果, 只能通过反复迭代的方法来实现, 系统开销较大; Zebker^[5] 等人提出将整块场景进行区域划分, 估计局部平地相位进行消除。该方法能够适用于地形比较复杂的区域, 但是存在以下不足: 首先, 对于复杂地形, 分块的大小难以确定; 其次, 相邻块的相关系数估计值之间存在明显的断裂。

对于多视处理的有偏性问题, 学术界也进行了深入的探讨。Touzi^[6] 等首先揭示了该问题, 即相关系数越小或者视数越小, 相关系数的估计值就越高高于实际相关系数。文献[7]中给出了相关系数估计值随视数及真实相关系数变化的函数关系, 但是该函数形式过于复杂, 无法应用于对估计误差的补偿; Zebker^[5] 等用数值方法得到了其四阶多项式近似, 该方法计算简单, 能够得到较好的补偿效果; Abdefattah^[8] 将第二类统计方法(Second Kind Statistics)应用于误差补偿问题, 取得了比通常统计方法中一阶矩方法更好的补偿效果。

本文主要工作集中于对地形相位进行补偿方面, 利用粗精度 DEM 消除地形相位, 随后采用第二类统计方法^[8] 进一步提高相关系数的估计精度。我们用 SIR-C/ X SAR 获取的 Etna 火山地区干涉数据将本文方法与传统方法及 Zebker 方法进行了比较, 实验结果表明, 本文的方法能够取得更好的估计精度。

2 相关系数估计

对于两幅 SAR 复图像, 其相关系数定义如下

$$\rho = \frac{| \int z_1 \cdot z_2^* |}{\sqrt{ \int z_1 \cdot z_1^* } \sqrt{ \int z_2 \cdot z_2^* }} \quad (1)$$

其中, z_1, z_2 为复图像中包含噪声的对应位置信号。我们对其进行如下假设:

$$z_1 = x_1 + n_1 \quad z_2 = x_2 + n_2 \quad (2)$$

其中, x_1, x_2 为图像中信号部分, n_1, n_2 为噪声分量。

当采用邻域多视的方法估计相关系数时, 公式(1)就变成如下的形式:

$$\rho = \frac{ \left| \sum_{i=1}^k z_{1,i} z_{2,i}^* \right|}{\sqrt{ \sum_{i=1}^k z_{1,i} z_{1,i}^* } \sqrt{ \sum_{i=1}^k z_{2,i} z_{2,i}^* }} \quad (3)$$

其中 k 为邻域中信号的个数。当该邻域中包含地形相位时, 有

$$x_{2,i} = x_{1,i} e^{-j\phi} \quad (4)$$

将(4)式代入(3)式中, 有

$$\rho = \frac{ \left| \sum_{i=1}^k (x_{1,i} x_{1,i}^* e^{j\phi_i} + x_{1,i} n_{2,i}^* + x_{1,i} e^{j\phi_i} n_{1,i} + n_{1,i} n_{2,i}^*) \right|}{\sqrt{ \sum_{i=1}^k |x_{1,i} + n_{1,i}|^2 } \sqrt{ \sum_{i=1}^k |x_{1,i} e^{-j\phi_i} + n_{2,i}|^2 }} \quad (5)$$

分母为含噪信号的能量项, 因而下面只需考虑分子部分。

我们的目标是求 $\sum_{i=1}^k (x_{1,i} x_{1,i}^*)$, 而地形相位 $e^{-j\phi_i}$ 使得估计结果低于我们的目标。对于地形较平坦的地区, 去除平地相位后, 地形相位残余分量接近常数, 其影响可以忽略, 但是当地形较复杂的时候, 地形相位就会严重影响最终的估计结果。后面三项在 k 趋于无穷大的情况下, 趋于 0, 但是实际计算中, k 不可能取太大, 计算结果往往大于 0, 使得我们的估计结果偏高^[5]。

以上主要分析了地形相位对相关系数估计的影响, 下面分析多视处理本身所带来的问题, 多视处理相关系数估计值期望 $E(\hat{\rho})$ 与真实相关系数 ρ 及视数 k 之间的关系如下^[7]:

$$E(\hat{\rho}) = (1 - \rho)^k \frac{\Gamma(k) \Gamma\left(\frac{3}{2}\right)}{\Gamma\left(k + \frac{1}{2}\right)} \cdot {}_3F_2\left[\frac{3}{2}, k, k; k + \frac{1}{2}, 1; \rho^2\right] \quad (6)$$

其中 ${}_3F_2(\cdot)$ 为广义超几何函数, $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数。图 1 显示了 $E(\hat{\rho})$ 随着真实相关系数及视数变化的曲线。

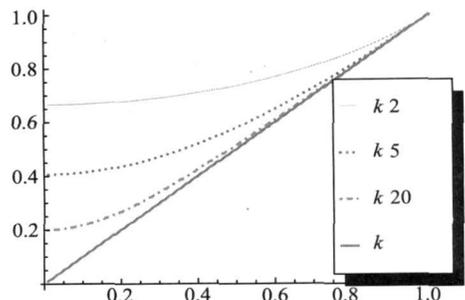


图 1 估计值随着真实值及视数变化曲线图 (横坐标为真实值, 纵坐标为估计值, k 为视数)

从曲线中, 我们可以看出, 估计值期望总是高于真实值, 即多视处理估计过程是一个有偏估计, 而且, 随着视数的降低或真实相关系数的减小, 估计值的期望与实际想干系数之差会越来越大。

因而, 要得到精确的相关系数估计需要做两步工作, 首先是对地形相位进行补偿, 然后是对估计偏差进行校正。

3 本文方法

针对多视相关系数估计的有偏性问题存在很多修正方法, 其中 Abdelfattah^[8]的第二类统计方法计算简单, 修正效果较好, 我们将注意力集中于地形相位补偿方面。通常的平地相位消除方法只能消除由平地所引起的相位成份, 该相位可以近似看作是一个单频信号, 而实际干涉相位, 特别是复杂地形的干涉相位具有相当大的带宽, 并不能用简单的单频信号来描述, 因而无法获得较好的干涉相位补偿效果。Zebker 方法从一定程度上克服了上述方法的缺陷, 但从本质上讲, Zebker 方法只是将场景进行了划分, 用来描述地形相位的仍旧是单频信号。在分块地形相位非线性变化时, 该方法也将不再适用。

地形相位的有效消除需要地形信息, 而目前有很多粗精度的全球 DEM 数据, 如 SRTM DEM, ASTER DEM 等, 这些数据都可通过互联网免费获取, 因此可用这些粗精度 DEM 消除地形相位, 以提高相关系数的估计精度。

我们采用的粗精度 DEM 数据是 2000 年进行的 SRTM^[9] 数据, 该数据提供了全球北纬 60° 至北纬 57° 范围内所有陆地(约占 80% 全球陆地总面积)的高度信息。尽管该数据网格大小为 90m 左右, 且存在一些空白点, 但对于本文的应用已经足够。具体算法流程如图 2 所示, 首先利用主图像轨道信息

及外部粗 DEM 仿真幅度图像, 通过仿真幅度图与主图像幅度图的配准得到了场景粗 DEM; 然后用基线参数及场景粗 DEM 仿真理想相位图, 在主图像复数据中减去理想相位得到主图像校正图; 再用辅图像与主图像校正图求得初始相关系数; 最后, 采用第二类统计方法进一步提高相关系数的估计精度。

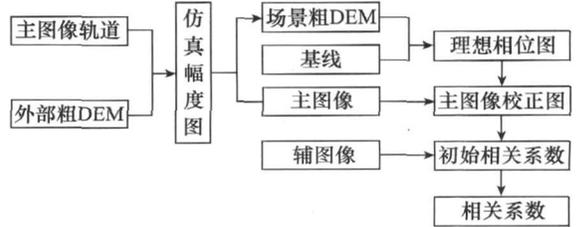


图 2 本文算法流程图

4 结果与分析

本文采用的实验数据是 SIR-C/XSAR 于 1994 年 10 月 9、10 号两次通过意大利 Etna 火山时所获取的, 我们选取了其中 1024×1024 大小的区域进行研究。由于 SIR-C 数据的轨道误差较大, 在相关系数估计处理前, 需要对基线参数进行校正^[10], 场景中心初始垂直基线为 51.62m, 经过校正后为 56.64m。原始 SAR 图像幅度图及干涉相位如图 3、4 所示, 图 5、6 分别为采用去平地相位法和 Zebker 方法得到的相关系数图, 图 7 是采用 Zebker 方法估计得出的局部平地相位, 图 8 为配准后转换到雷达坐标系下的粗精度 DEM(为了便于比较, 我们将原始主图像与 DEM 等高图放在一起, 一个色彩周期代表 200m 高度差)。图 9 是用 DEM 仿真的理想相位图(为了与图 4 作比较, 这里将绝对相位进行了缠绕)。图 10 是本文方法得到的估计结果。

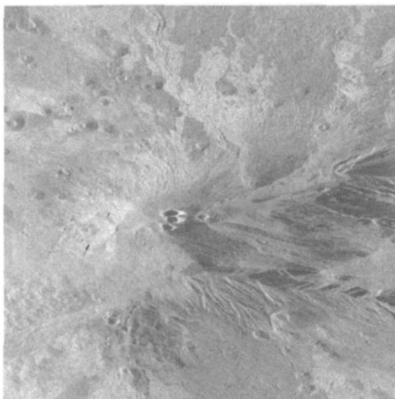


图 3 原始 SAR 图像

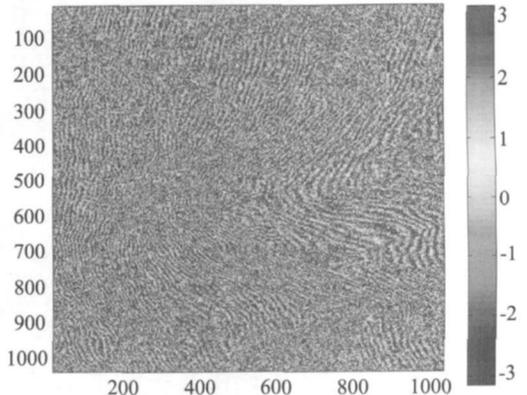


图 4 原始干涉图

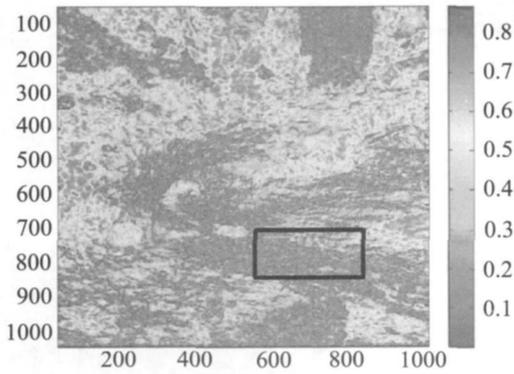


图5 经典方法结果

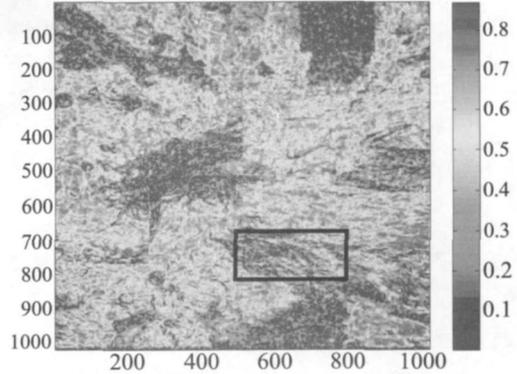


图6 Zebker方法结果

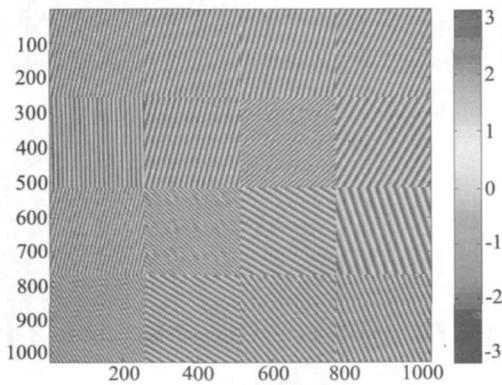


图7 Zebker方法局部相位

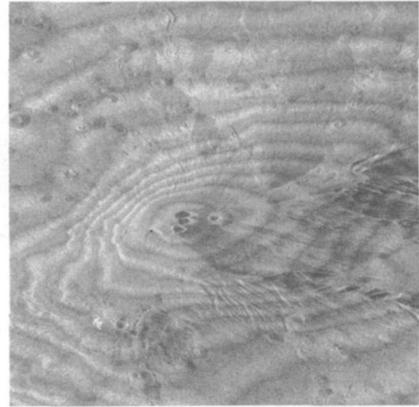


图8 DEM与SAR配准

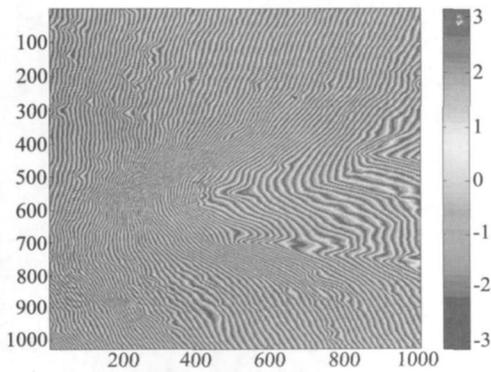


图9 仿真干涉图

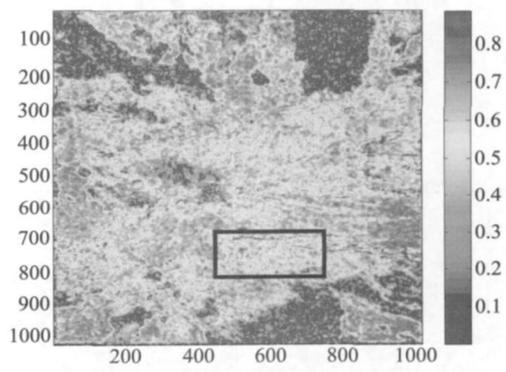


图10 本文方法结果

三种相关系数估计方法得到的相关系数均值如表1所示:

表1 三种方法相关系数均值

估计方法	去平方法	Zebker方法	本文方法
相关系数均值	0.3294	0.3972	0.4621

根据第二节的分析,多视处理偏差校正函数是一个单调函数,即初始相关系数较大的点在偏差校正后会得到较大的修正值,因此,最终相关系数的大小反映了地形相位补偿效果的好坏。由表1可知本文方法对地形相位补偿效果最好,Zebker方法对传统方法的改进为相关系数均值提高0.0678,而本文

方法在Zebker方法的基础上再提高了0.0649。

由图4与图7可看到,Zebker方法只能估计出分块中地形相位的整体走势,而本文方法(图9)却能描述地形相位内部的细微结构。得益于此,由图5、图6与图10可以看到,本文方法对相关系数的提高主要体现在地形条纹细密地区(如黑框选中区域),其相关系数值会接近甚至达到邻近条纹稀疏区域,且不存在Zebker方法中的块状边界效应。

综上所述,本文方法能够有效解决复杂地形条件下的InSAR相关系数估计问题,从而为后续基于相关系数精确估值的应用提供了保障。

(下转第78页)

- [7] Witten, I. H., Frank, E. . Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques with Java Implementations(second edition)[M] . China Machine Press. 2006.
- [8] Freund, Y. , Schapire, R. E. . Experiments with a new boosting algorithm[C] // Proc the Thirteenth International Conference on Machine Learning, Morgan Kaufmann, 1996: 148– 156.
- [9] 刘纯平, 戴锦芳, 钟文, 等. 基于模糊证据理论分类的多源遥感信息融合[J] . 模式识别与人工智能, 2003, 16(2): 213– 218.
- [10] 孙全, 叶秀清, 顾伟康. 一种新的基于证据理论的合成公式[J] . 电子学报, 2000(8): 117– 119.
- [11] Nemmour, H., Chibani, Y. . Multiple support vector machines for land cover change detection: An application for mapping urban extensions[J] . ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2006, 61(2) : 125– 133.
- [12] 林剑, 鲍光淑, 王润生, 等. 基于模糊密度分解的遥感图像光谱和纹理信息的融合[J] . 电子学报, 2004(12) : 2028– 2030.
- [13] Kang, H. J., Doermann, D. . Selection of classifiers for the construction of multiple classifier systems[C] // Proceedings of the Eight International Conference on Document Analysis and Recognition. 2005: 1194– 1198.
- [14] Petrakos, M., Benediktsson, J. A. . The effect of classifier agreement on the accuracy of the combined classifier in decision level fusion[J] . IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(11) : 2539– 2545.
- [15] Giacinto, G., Roli, F. . Design of effective neural network ensembles for image classification purposes[J] . Image and Vision Computing, 2001, 19(9): 699– 707.
- [16] Aksela, M., Laaksonen, J. . Using diversity of errors for selecting members of a committee classifier[J] . Pattern Recognition. 2006, 39(4): 608– 623.
- [17] 赵文吉, 段福州, 刘晓萌, 徐智勇. ENVI 遥感影像处理 专题与实践[M] . 中国环境科学出版社, 2007.

(上接第 35 页)

参考文献

- [1] R. Bamler, P. Hartl. Synthetic aperture radar interferometry[J] . Inverse Problem, 1998: 1– 54.
- [2] R. N. Treuhaft, P. R. Siqueira, . The calculated performance of forest structure and biomass estimates from interferometric radar[J] . Waves in Random Media, 2004(14) : S345– S358.
- [3] S. Oveisgharan, H. A. Zebker. Estimating snow accumulation from InSAR correlation observations[J] . IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007(45) : 10– 20.
- [4] R. F. Hanssen. Radar Interferometry, Data Interpretation and Error Analysis[M] . The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [5] H. A. Zebker, K. Chen. Accurate estimation of correlation in InSAR observations[J] . IEEE Geoscience and Remote Sensing Letter, 2005(2) : 124– 127.
- [6] R. Touzi, A. Lopes. Statistics of the Stokes parameters and of the complex coherence parameters in one look and multi look speckle fields[J] . IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996(34) : 519– 531.
- [7] R. Touzi, et al. . Coherence estimation for SAR imagery[J] . IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999(37) : 135– 149.
- [8] R. Abdelfattah. Interferometric SAR coherence magnitude estimation using second kind statistics[J] . IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006(44) .
- [9] A. Jarvis, H. I. Reuter, A. Nelson, E. Guevara. Hole filled seamless SRTM data V4, International Centre for Tropical Agriculture(CIAT)[EB/OL]. <http://srtm.csi.cgiar.org>. 2008.
- [10] 韦海军, 等. 基于粗精度 DEM 的复杂地形 InSAR 基线估计方法[J] . 国防科技大学学报, 2010(32) : 74– 78.