

基于相关系数加权观测矢量的 InSAR 干涉相位估计方法

李 海¹, 吴仁彪¹, 廖桂生²

(1. 中国民航大学智能信号与图像处理天津市重点实验室, 天津 300300;

2. 西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室, 陕西西安 710071)

摘 要: 提出了一种基于相关系数加权观测矢量的 InSAR 干涉相位估计方法. 该方法采用联合单像素模型, 构造相关系数加权观测矢量, 同时利用相邻像素的信息, 因此具有自适应图像配准和降低相位噪声功能, 因而可以在 SAR 图像配准精度很差(可以允许达到一个分辨单元)的条件下准确地估计相应像素间的干涉相位. 仿真数据的处理结果证明了此方法的有效性.

关键词: 干涉合成孔径雷达; 配准误差; 干涉相位; 联合单像素; 相关系数加权

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012) 03-0453-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.03.007

Estimation of Interferometric Phase for InSAR Based on Correlation Coefficient Weight Data Vector

LI Hai¹, WU Ren-biao¹, LIAO Gui-sheng²

(1. Tianjin Key Lab for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. National Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shanxi 710071, China)

Abstract: We propose a method to estimate the InSAR (synthetic aperture radar interferometry) interferometric phase based on the model of correlation coefficient weight data vector. In the method, the idea of correlation weight joint single pixel is introduced. Benefiting from the correlation coefficient weight data vector, the method can take advantage of the coherence information of neighboring pixel pairs to auto-coregister the SAR images and reduce the interferometric phase noise simultaneously. Theoretical analysis and computer simulation results show that the method can provide accurate estimate of the terrain interferometric phase (interferogram) even if the coregistration error reaches one pixel. The effectiveness of the method is verified via simulated data.

Key words: interferometric synthetic aperture radar (InSAR); coregistration error; interferometric phase; joint single pixel; correlation coefficient weight

1 引言

干涉合成孔径雷达(InSAR)是获取地面数字高程图(DEM)的重要遥感技术^[1]. 干涉相位估计(干涉相位噪声滤波)^[2~4]是 InSAR 技术中的关键处理步骤之一. 但传统的基于干涉图(Interferogram)的干涉相位估计方法: 如均值滤波^[2], 中值滤波^[3]和自适应 contoured 滤波算法^[4], 受图像配准的影响较大. 当由于图像配准误差而导致的干涉图质量较差时, 就难以再恢复出准确的真实干涉相位. 然而, 对于相干性较低和不同几何形变的两幅图像, 精确配准会存在困难. 因此, 研究对图像配准误

差具有强稳健的干涉相位估计方法, 具有重要的实用价值.

文献[1]中提出了一种基于联合子空间投影的干涉相位估计方法, 由于利用了相邻像素的相干信息和空间投影技术, 因而可以在存在配准误差时获得满意的干涉相位估计结果. 但该方法在估计干涉相位时首先要确定噪声子空间维数. 我们在文献[5]中首次提出了基于加权联合单像素模型的干涉相位估计方法, 虽然在估计干涉相位时不需要确定噪声子空间维数, 但该方法在估计干涉相位时需要首先确定配准误差方向, 并且确定最优权重值时需要搜索, 因此计算量较大. 本文对文献[5]中

的方法进行改进,提出一种基于相关系数加权观测矢量的干涉相位估计方法,该方法采用联合单像素模型,构造相关系数加权观测矢量,使得观测矢量中对应元素的相关系数几乎不受配准误差的影响(即在存在配准误差的情况下,能够大大提高观测矢量中对应元素的相关系数),因此可以在 SAR 图像配准精度较差的情况下得到准确的干涉相位估计结果.基本思想如下:首先,对 SAR 图像进行粗配准,构造相关系数加权观测矢量,用此观测矢量估计协方差矩阵,用包含干涉相位的导向矢量和估计的协方差矩阵进行波束扫描,波束形成的输出功率最大值所对应的干涉相位即为估计结果.对于一对未精确配准的 SAR 图像,通过本文方法的处理,相当于将这对图像自适应精确配准,从而得到精确的干涉相位图.

2 数学模型和问题描述

假定 SAR 图像对已精确配准,且已去平地相位,对同一像素 i (对应于同一地面单元),两颗卫星阵列接收的复数据矢量(即观测矢量) $\mathbf{s}(i)$ 可以写为下式^[6]:

$$\mathbf{s}(i) = [s_1(i), s_2(i)]^T = \mathbf{a}(\varphi_i) \odot [x_1(i), x_2(i)]^T + \mathbf{n}(i) = \mathbf{a}(\varphi_i) \odot \mathbf{x}(i) + \mathbf{n}(i) \quad (1)$$

式中 s_1 和 s_2 分别为卫星 1 和卫星 2 所对应的复图像数据, $\mathbf{a}(\varphi_i) = [1, e^{j\varphi_i}]^T$ 代表像素 i 到两卫星间的空间导向矢量(上标 T 表示转置), φ_i 为像素对 i 的干涉相位, \odot 为 Hadamard 积, $\mathbf{x}(i)$ 为两卫星接收的像素 i 的回波矢量(不包含两者的波程差,决定于它们的复后向散射系数), $\mathbf{n}(i)$ 为加性热噪声. $\mathbf{s}(i)$ 可看作一个联合复高斯随机矢量,其协方差矩阵 $\mathbf{C}_s(i)$ 由下式给出:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_s(i) &= E\{\mathbf{s}(i)\mathbf{s}^H(i)\} \\ &= \mathbf{a}(\varphi_i)\mathbf{a}^H(\varphi_i) \odot E\{\mathbf{x}(i)\mathbf{x}^H(i)\} + \sigma_n^2 \mathbf{I} \\ &= \sigma_s^2(i)\mathbf{a}(\varphi_i)\mathbf{a}^H(\varphi_i) \odot \mathbf{R}_s(i) + \sigma_n^2 \mathbf{I} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\mathbf{R}_s(i) = \begin{bmatrix} r_{11}(i), & r_{12}(i) \\ r_{21}(i), & r_{22}(i) \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中 $\mathbf{R}_s(i)$ 称为像素 i 的相关系数矩阵, $r_{mn}(i)$ ($0 \leq r_{mn}(i) \leq 1, n=1,2, m=1,2$) 表示两天线 m 和 n 接收的该像素回波之间的相关系数, $E\{\cdot\}$ 表示统计平均,上标 H 表示共轭转置, $\sigma_s^2(i)$ 表示像素 i 的回波功率, σ_n^2 表示噪声功率.

当两幅图像精确配准且相关系数足够高时(即式(1)的数据矢量中对应元素的相关系数足够高),我们可用波束形成的方法来估计干涉相位,代价函数如下式所示^[6]:

$$J_1 = \mathbf{a}^H(\phi_i)\mathbf{C}_s(i)\mathbf{a}(\phi_i) \quad (4)$$

式中 $\mathbf{a}(\phi_i) = [1, e^{j\phi_i}]^T$, 上面的代价函数达到最大值时对应的 $\hat{\phi}_i$ 即为干涉相位估计结果即 $\hat{\phi}_i = \varphi_i$.

但是,当两幅图像存在配准误差时,式(1)的观测矢量中对应元素的相关系数将随之降低,此时若采用式(4)进行干涉相位估计,将得不到准确的干涉相位估计结果^[7].

3 新方法的基本原理

由前面的分析可见,干涉相位估计结果受观测矢量中对应元素的相关系数影响较大,相关系数越高,估计结果越准确.本文提出一种基于相关系数加权观测矢量的干涉相位估计方法,该方法采用联合单像素模型^[5],构造相关系数加权观测矢量,在存在配准误差的情况下,能够大大提高观测矢量中对应元素的相关系数,因此可以精确获得对图像配准误差稳健的干涉相位估计.相关系数加权观测矢量构造方法如图 1 所示(一个圆环代表一个 SAR 像素).

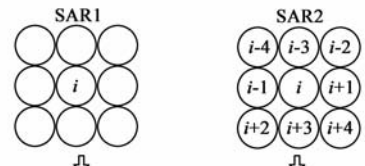


图1 相关系数加权观测矢量构造方法

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{s}_{2v}(i) &= [s_2(i-4), s_2(i-3), s_2(i-2), s_2(i-1), \\ & s_2(i), s_2(i+1), s_2(i+2), s_2(i+3), \\ & s_2(i+4)]^T \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{w}(i) &= [r_{21}(i-4, i), r_{21}(i-3, i), r_{21}(i-2, i), \\ & r_{21}(i-1, i), r_{21}(i, i), r_{21}(i+1, i), \\ & r_{21}(i+2, i), r_{21}(i+3, i), \\ & r_{21}(i+4, i)]^T \end{aligned} \quad (6)$$

$$r_{21}(m, i) = \frac{|E\{s_2(m)s_1^*(i)\}|}{\sqrt{E\{|s_2(m)|^2\}E\{|s_1(i)|^2\}}}, \quad (m = i-4, i-3, i-2, i-1, i, i+1, i+2, i+3, i+4) \quad (7)$$

相关系数加权观测矢量 $\mathbf{si}(i, \mathbf{w}(i))$ 的协方差矩阵可写为下式^[7]:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{\mathbf{si}}(i, \mathbf{w}(i)) &= E\{\mathbf{si}(i, \mathbf{w}(i))\mathbf{si}^H(i, \mathbf{w}(i))\} \\ &= \sigma_s^2(i)\mathbf{a}(\varphi_i)\mathbf{a}^H(\varphi_i) \odot \mathbf{R}_{\mathbf{si}}(i, \mathbf{w}(i)) \\ & \quad + \sigma_n^2 \mathbf{I} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\mathbf{R}_{\mathbf{si}}(i, \mathbf{w}(i)) =$$

$$\begin{bmatrix} r_{11}(i), & \sum_{m=i-4}^{i+4} r_{21}^*(m, i)r_{12}(i, m) \\ \sum_{m=i-4}^{i+4} r_{21}(m, i)r_{21}(m, i), & \sum_{m=i-4}^{i+4} |r_{21}(m, i)|^2 r_{22}(m, m) \end{bmatrix}_{2 \times 2} \quad (9)$$

其中 $\mathbf{R}_{\mathbf{si}}(i, \mathbf{w}(i))$ 称为像素 i 的加权相关系数矩阵.

图 2 所示为采用不同的观测矢量构造方法时(式(1)的观测矢量构造方法和本文的相关系数加权观测矢量)观测矢量中对应元素的相关系数随配准误差的变化,由仿真结果可见,本文的相关系数加权观测矢量可使得观测矢量中对应元素的相关系数几乎不受配准误差的影响,即在存在配准误差的情况下,大大提高观测矢量中对应元素的相关系数。

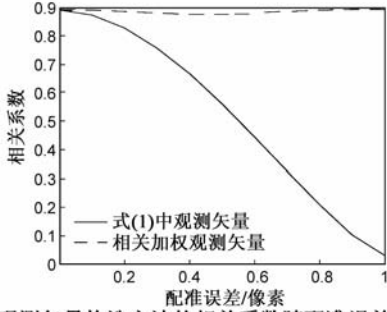


图 2 不同观测矢量构造方法的相关系数随配准误差的变化情况

此时我们可用基于相关系数加权观测矢量的波束形成算法来估计干涉相位时,代价函数如下式所示:

$$J_2 = \mathbf{a}^H(\phi_i) \mathbf{C}_{\text{si}}(i, \mathbf{w}(i)) \mathbf{a}(\phi_i) \quad (10)$$

式(10)的代价函数取得最大值时所对应的即为干涉相位估计结果即 $\hat{\phi}_i = \phi_i$ 。

从上面的推导结果可以看出,由于本文采用联合单像素模型,构造相关系数加权观测矢量,使得观测矢量中对应元素的相关系数几乎不受配准误差的影响(即在存在配准误差的情况下,能够大大提高观测矢量中对应元素的相关系数),因此能够在配准误差较大的

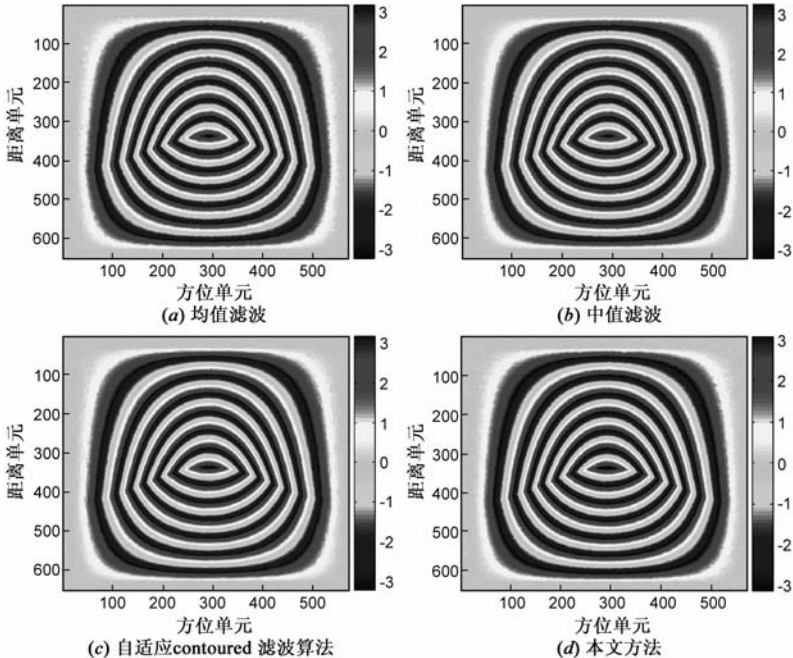


图 3 精确配准时的处理结果

情况下得到准确的干涉相位估计结果。

本文方法的步骤如下:

步骤 1 图像粗配准

所有卫星接收的回波数据分别经过 SAR 成像处理后,再利用传统的相关法进行图像配准处理^[1]。在此步骤中,我们不要求像传统的干涉相位估计方法^[2~4]那样要求图像配准的精度必须达到亚像素级(1/10 到 1/100 像素),我们只要求图像配准精度达到像素级(允许达到一个分辨单元)就够了,因此大大减轻图像配准的难度。

步骤 2 估计加权协方差矩阵

我们按图 1 所示相关系数加权观测矢量 $\mathbf{si}(i, \mathbf{w}(i))$ 估计相应的协方差矩阵 $\mathbf{C}_{\text{si}}(i, \mathbf{w}(i))$ 。式(8)的统计协方差矩阵在实际中一般用样本协方差矩阵进行估计,我们可以从相邻(包括距离向和方位向)的像素中获得独立同分布的样本^[1,7]。样本协方差矩阵 $\hat{\mathbf{C}}_{\text{si}}(i, \mathbf{w}(i))$ 由下式进行估计:

$$\hat{\mathbf{C}}_{\text{si}}(i, \mathbf{w}(i)) = \frac{1}{2K+1} \sum_{k=-K}^K \mathbf{si}(i+k, \mathbf{w}(i)) \mathbf{si}^H(i+k, \mathbf{w}(i)) \quad (11)$$

其中

$$\mathbf{w}(i) = [\hat{r}_{21}(i-4, i), \hat{r}_{21}(i-3, i), \hat{r}_{21}(i-2, i), \hat{r}_{21}(i-1, i), \hat{r}_{21}(i, i), \hat{r}_{21}(i+1, i), \hat{r}_{21}(i+2, i), \hat{r}_{21}(i+3, i), \hat{r}_{21}(i+4, i)]^T \quad (12)$$

$$\hat{r}_{21}(m, i) = \frac{\left| \sum_{k=-K}^K s_2(m+k) s_1^*(i+k) \right|}{\sqrt{\sum_{k=-K}^K |s_2(m+k)|^2 \sum_{k=-K}^K |s_1(i+k)|^2}} \quad (13)$$

$(m = i-4, i-3, i-2, i-1, i, i+1, i+2, i+3, i+4)$

式中 $2K+1$ 为从相邻像素中获得的独立同分布样本数。

步骤 3 估计干涉相位

我们可用如下的代价函数估计干涉相位:

$$J_{\text{BF}} = \mathbf{a}^H(\phi_i) \hat{\mathbf{C}}_{\text{si}}(i, \mathbf{w}(i)) \mathbf{a}(\phi_i) \quad (14)$$

上面的代价函数达到最大值时所对应的干涉相位 $\hat{\phi}_i$ 即为干涉相位估计结果,即 $\hat{\phi}_i = \phi_i$ 。

对 SAR 图像中的每一像素分别执行上述三步操作,就可以精确地恢复出真实地形的干涉相位图(Interferogram)。

4 实验结果

本节利用两段仿真数据来验证本文方法对图像配准误差的稳健性。

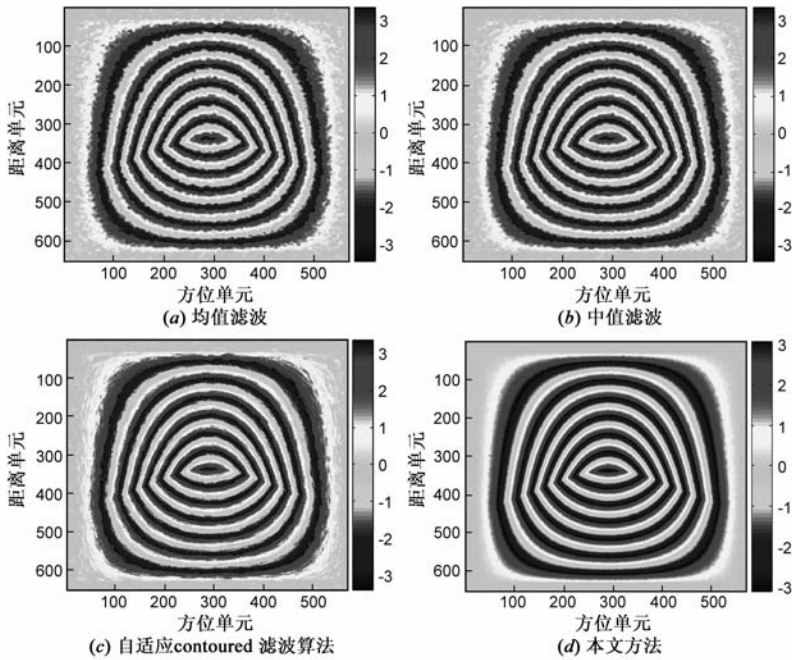


图4 配准误差为0.5像素时的处理结果

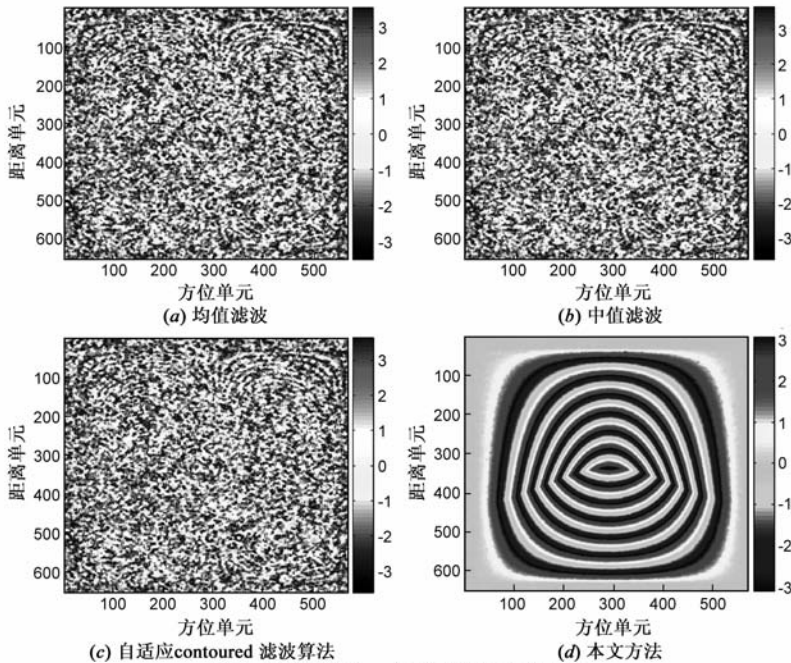


图5 配准误差为一个像素时的处理结果

第一段仿真数据描述:2颗卫星对应的有效垂直基线为562.93m,卫星高度750km,入射角 50° ,利用一幅实测SAR图像作为地面场景背景来产生每一个SAR像素的回波功率,并利用两维窗来模拟高程地形,生成一对InSAR图像.SAR图像中的信噪比(SNR)为16dB.相干系数由垂直基线长度、局部地形坡度和SNR决定^[1].2颗卫星接收的SAR图像数据按统计模型产生^[8].

图3~5为在不同配准误差的情况下采用不同干涉相位估计方法的处理结果.由图3~5的仿真结果可以

看出:均值滤波,中值滤波和自适应contoured滤波算法受图像配准误差的影响很大,配准误差越大,滤波效果越差,当配准误差达到1个像素时,已经无法得到干涉条纹.相反本文方法(基于相关系数加权观测矢量的波束形成方法)几乎不受配准误差的影响,在SAR图像配准精度较差的情况下仍能获得和精确配准一样的处理结果.

现在我们用上面的仿真数据验证本文方法对局部去相关^[9](局部去相关的意思是对于图像上的每个像

素配准误差都不同)的稳健性.

图 6 为在局部去相关的情况下采用不同干涉相位估计方法的处理结果.由仿真结果可以看出:均值滤波,中值滤波和自适应 contoured 滤波算法受局部去相关的影响很大.相反本文方法几乎不受局部去相关的影响,在局部去相关的情况下仍能获得和精确配准一样的处理结果.

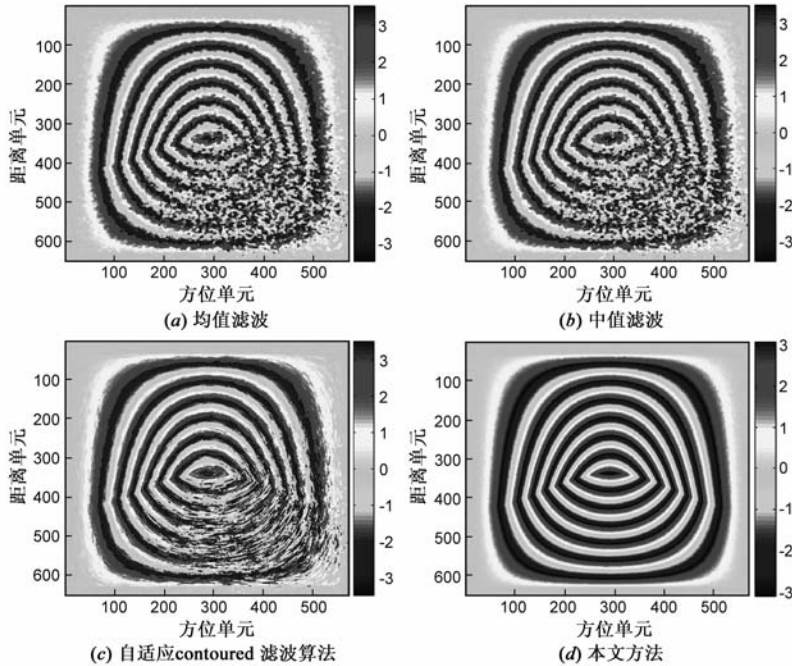


图6 局部去相关时的处理结果

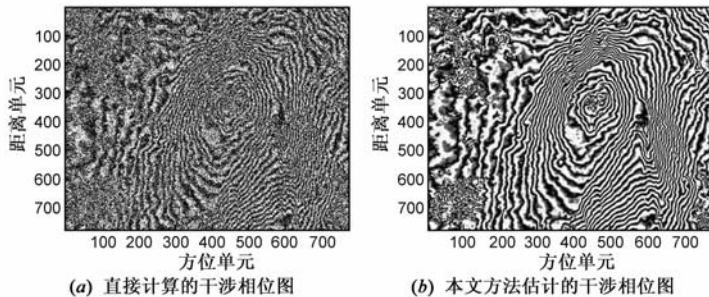


图7 意大利的Etna火山口数据处理结果

第二段为意大利 Etna 火山口的仿真数据(此段数据是用 SIR-C/X-SAR 航天飞机雷达中的 X-SAR 录取的一组数据生成的;Epsilon Nought, Radar Remote Sensing: <http://epsilon.nought.de/>).图 7 为意大利的 Etna 火山口数据处理结果;图 7(a)为图像经过粗配准后生成的干涉条纹,图 7(b)为利用本文方法估计的干涉条纹.可见,本文方法能够获得满意的干涉相位估计结果.

5 结论

本文提出一种基于相关系数加权观测矢量的干涉相位估计方法,该方法采用联合单像素模型,构造相关系数加权观测矢量,使得观测矢量中对应元素的相关系数几乎不受配准误差的影响(即在存在配准误差的情况下,能够大大提高观测矢量中对应元素的相关系数),同时利用了相邻像素的信息,因此能在配准误差较大的情况下准确的估计干涉相位,具有自适应图像配准和降噪滤波的功能,因而可以在 SAR 图像配准精度较差(可以允许达到一个分辨单元)的条件下得到准

确的干涉相位估计结果.我们利用仿真数据验证了本文方法的有效性.

参考文献

- [1] Zhenfang Li, Zheng Bao, Hai Li, Guisheng Liao. Image auto-coregistration and InSAR interferogram estimation using joint subspace projection[J]. IEEE Transactions on GRS, 2006, 44 (2): 288 - 297.
- [2] P H Eichel, D C Ghiglia, et al. Spotlight SAR Interferometry for Terrain Elevation Mapping and Interferometric Change Detection[R]. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories, 1996. 2539 - 2546.

- [3] R Lanari, G Fornaro, et al. Generation of digital elevation models by using SIR-C/X-SAR multifrequency two-pass interferometry: The etna case study[J]. IEEE Transactions on GRS, 1996, 34(5): 1097 - 1114.
- [4] Qifeng Yu, Xia Yang, Sihua Fu, Xiaolin Liu, Xiangyi Sun. An adaptive contoured window filter for interferometric synthetic aperture radar[J]. IEEE GRS Letters, 2007, 4(1): 23 - 26.
- [5] 李海, 廖桂生. InSAR 自适应图像配准的干涉相位估计方法[J]. 电子学报, 2007, 35(3): 420 - 425.
Li Hai, Liao Guisheng. An estimation method for InSAR interferometric phase with adaptive image coregistration[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(3): 420 - 425. (in Chinese)
- [6] F Lombardini, M Montanari, F Gini. Reflectivity estimation for multibaseline interferometric radar imaging of layover extended sources[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, 51(6): 1508 - 1519.
- [7] 李海, 廖桂生. 基于相关系数加权观测矢量的多基线相位解缠方法[J]. 自然科学进展, 2008, 18(3): 313 - 322.
Li Hai, Liao Guisheng. A phase unwrapping method for multibaseline InSAR systems based on correlation coefficient weight data vector[J]. Progress in Natural Science, 2008, 18(3): 313 - 322. (in Chinese)
- [8] F Lombardini. Absolute phase retrieval in a three-element synthetic aperture radar interferometer[A]. Proceedings of the CIE International Conference of Radar [C]. Beijing: IEEE Press, 1996. 309 - 312.
- [9] Li Hai, Liao Guisheng. An estimation method for InSAR interferometric phase based on MMSE criterion[J]. IEEE Transactions on GRS, 2010, 48(3): 1457 - 1469.

作者简介



李海 男, 1976年8月出生于天津市. 现为中国人民航空大学智能信号与图像处理天津市重点实验室副教授. 主要研究方向: 干涉合成孔径雷达信号处理和空时自适应信号处理. 在国内外重要学术期刊和会议上共发表和录用学术论文30余篇(其中包括 IEEE Trans. On GRS、IEEE Trans. On AES 和中国科学等), 其中 SCI 收录4篇、EI 收录12篇. E-mail: haili@cauc.edu.cn



吴仁彪 男, 1966年生于湖北. 现为信号与信息处理学科博士生导师, 中国人民航空大学智能信号与图像处理天津市重点实验室主任, 博士后, 教授, 院长, 研究方向为自适应阵列信号处理, 空时自适应处理, 探地雷达信号处理等. 共发表学术论文250余篇, 其中在国际刊物和重要国际会议发表论文120余篇, 被国际著名的检索工具SCI和EI收录120余篇, 10多次荣获全国性学术会议优秀论文奖. 教育部科技论文在线在“优秀学者”栏目中为其建立了个人学术专栏. E-mail: rbwu@vip.163.com



廖桂生 男, 1963年生于广西. 现为信号与信息处理学科博士生导师, 雷达信号处理国家重点实验室副主任. 曾获省部级科技进步奖一等奖1项、二等奖2项、三等奖1项, 在国内外主要学术刊物上发表论文120余篇, 其中有30余篇已被SCI收录. 目前主要研究方向为分布式小卫星雷达系统、阵列信号处理、智能天线、空时二维信号处理以及地面运动目标检测等.
E-mail: gsliao@xidian.edu.cn