

基于稳健波束形成的 InSAR 干涉相位估计方法

毛志杰^{①②} 廖桂生^①

^①(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

^②(西安通信学院 西安 710061)

摘要: 该文在联合像素估计干涉相位的基础上, 充分利用相邻像素的相干信息, 通过校正阵列导向矢量, 使得导向矢量与该地面分辨单元的协方差矩阵相对应, 通过稳健波束形成实现对地形干涉相位估计。实验结果证明了该方法有效性的同时, 能够在 SAR 图像配准误差较大(可以允许达到一个分辨单元)的情况下, 得到稳健的干涉相位估计结果。

关键词: InSAR; 干涉相位估计; 稳健波束形成; 数字高程图; 联合像素

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)07-1690-06

InSAR Interferometric Phase Estimation Based on Robust Beamforming

Mao Zhi-jie^{①②} Liao Gui-sheng^①

^①(National Lab of Radar Signal Processing, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

^②(Xi'an Communication Inst., Xi'an 710061, China)

Abstract: A method of interferometric phase estimation based on the robust beamforming is proposed. The method can provide the accurate interferometric phase estimation, by correcting the spatial steering vector and by taking advantage of the coherence information of the neighboring pixels. Theoretical analysis and experimental results show that the method can present the accurate estimation of the interferometric phase even if the coregistration error be close to one pixel. The effectiveness and robustness of the technique is verified by the simulated and real data.

Key words: Interferometric SAR; Interferometric phase estimation; Robust beamforming; Digital Elevation Model (DEM); Joint pixel

1 引言

干涉合成孔径雷达(InSAR)是一种重要的遥感技术, 能够实现对地面高空间分辨率、高精度三维测绘和地面动目标检测, 并且已经成功获取了几乎全球范围内的数字高程图(DEM)^[1,2]。传统的干涉相位估计算法^[3,4]要求图像配准的精度达到 1/10~1/100 个分辨单元, 否则会严重影响后续处理, 从而导致地形高程测量精度和可靠性降低。文献[5,6]提出了联合子空间投影方法, 可以精确获得对图像配准误差稳健的干涉相位估计, 但需要准确估计噪声子空间的维数。在基于联合像素模型的基础上, 文献[7]提出了一种利用由干涉相位和特征矢量共同构造的投影矢量来估计噪声子空间维数的方法, 提高了联合像素方法的实用性和稳健性。

本文从稳健的自适应波束形成^[8-11]角度来考虑

干涉相位估计问题, 从阵列导向矢量入手, 通过校正阵列导向矢量, 使得导向矢量与卫星接收数据的协方差矩阵相匹配, 利用稳健波束形成方法达到估计干涉相位的目的。本文把导向矢量误差的校正应用于卫星接收的 SAR 图像数据中, 当图像存在配准误差时, 仍然能够得到稳健的干涉相位估计。

本文内容安排如下: 首先简要介绍联合像素统计模型; 接着给出基于稳健波束形成的干涉相位估计方法; 其次是本文方法的处理步骤以及给出该方法处理性能的实验结果; 最后为结论。

2 信号模型与处理方法

2.1 联合像素模型

假定两幅 SAR 图像已精确配准, 且已去平地相位, 将已精确配准的 SAR 图像中同一像素对 i (对应同一地面单元)的复数据矢量 $\mathbf{x}(i)$ 可写为

$$\mathbf{x}(i) = \mathbf{a}(\varphi_i) \odot \mathbf{s}(i) + \mathbf{n}(i) \quad (1)$$

其中 $\mathbf{a}(\varphi_i) = [1, e^{j\varphi_i}]^T$ 表示像素 i 的空间导向矢量, φ_i 为所要估计像素 i 的干涉相位, \odot 为 Hadamard 积,

$\mathbf{n}(i)$ 为加性热噪声, $\mathbf{x}(i)$ 可以看作是一个联合复 Gauss 随机矢量。因此, 数据矢量 $\mathbf{x}(i)$ 的协方差矩阵 $\mathbf{Cov}_{\mathbf{x}}(i)$ 可表示为

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

其中 $\mathbf{R}_s(i)$ 称为像素 i 的相干系数矩阵, 相干系数矩阵中的 $r_{mn}(i)$ ($0 \leq r_{mn}(i) \leq 1, m, n = 1, 2$) 表示天线 m 和 n 接收的该像素回波之间的相干系数, $E[\cdot]$ 表示统计平均, \mathbf{I} 为单位矩阵, $\sigma_x^2(i)$ 表示像素 i 的回波功率, σ_n^2 表示噪声功率。

在 InSAR 干涉处理过程中, 联合像素模型的空间投影方法^[5]可以在存在图像配准误差时得到稳健的干涉相位估计。该方法构造的联合像素矢量如图 1 所示。虽然可以在存在配准误差时获得满意的干涉相位估计结果, 但是在进行相位估计前需要估计协方差矩阵的噪声子空间维数, 如果噪声子空间维数估计不准, 就会严重影响该方法的性能。

值得注意的是, 利用空间投影方法^[5]进行相位估计时, 需要假设局部区域是平面地形, 则该局部区域内的像素具有相同的导向矢量(具有相同的高度)而反射系数独立, 在利用样本进行统计平均时, 即可用所处理像素周围的像素作为估计样本。如果利用先验知识获得了局部地形坡度的先验信息, 例如利用一个粗数字高程图(DEM), 把局部区域内的像素利用估计的坡度信息对数据进行补偿后^[12], 再用所处理像素周围的像素作为估计样本。在图 1 中画出了两幅 SAR 图像数据, 非常容易可以推广到多基线的情况, 其计算量会明显增大, 然而使得人们在考虑干涉相位估计问题时多了一条思路。

在基于联合像素模型的基础上, 文献[7]提出了一种利用由干涉相位和特征矢量共同构造的投影矢量来估计噪声子空间维数的方法, 在图像间存在配准误差时, 仍然能够准确估计出噪声子空间维数, 提高了联合像素方法的实用性和稳健性。

虽然文献[7]给出了一种估计噪声子空间维数的方法, 但是噪声子空间的维数需要通过阈值来确定, 而且对于门限的选择要受到其他因素的制约。文献[13]提出一种基于数据优化模型的干涉相位估计方法。不论图像配准误差的大小与方向, 该方法都可以精确获得对图像配准误差稳健的干涉相位估计, 而且不用估计噪声子空间的维数。该方法通过构造最优加权观测矢量(OJWD), 使得 SAR 图像数据进行自适应配准处理, 因此能够在 SAR 图像配准误差较大(可以允许达到一个分辨单元)的情况下, 得到稳健的干涉相位估计结果。最优联合加权观测矢量由式(3)给出:

$$\mathbf{j}\mathbf{x}(i, \mathbf{w}) = [x_1(i), \hat{x}_2(i, \mathbf{w}^{(2)})]^T \quad (3)$$

其中 $\hat{x}_2(i, \mathbf{w}^{(2)}) = \mathbf{w}^{(2)T} \mathbf{x}_2(i)$, $\mathbf{x}_2(i) = [x_2(i-4), x_2(i-3), \dots, x_2(i+4)]^T$, $\mathbf{w}^{(2)} = [w_{i-4}^{(2)}, \dots, w_i^{(2)}, \dots, w_{i+4}^{(2)}]^T$, $w_k^{(2)} \geq 0, k = i-4, \dots, i+4$ 。那么, 最优加权联合观测矢量的协方差矩阵为

$$\begin{aligned}\mathbf{Cov}_{\mathbf{j}\mathbf{x}}(i, \mathbf{w}) &= E[\mathbf{j}\mathbf{x}(i, \mathbf{w})\mathbf{j}\mathbf{x}(i, \mathbf{w})^H] \\ &= \sigma_x^2(i)\mathbf{a}(\varphi_i)\mathbf{a}^H(\varphi_i) \odot \mathbf{R}_{js}(i, \mathbf{w}) + \sigma_n^2\mathbf{I}\end{aligned}\quad (4)$$

其中 $\mathbf{R}_{js}(i, \mathbf{w})$ 称为像素 i 的加权相关系数矩阵。可见, 对于待处理的像素 i (此时配准误差的方向和大小是固定的, 即式(4) $\mathbf{R}_{js}(i, \mathbf{w})$ 中的相干系数以及互相关系数为定值), 加权相关系数矩阵 $\mathbf{R}_{js}(i, \mathbf{w})$ 只受加权向量 \mathbf{w} 的影响。当采用最优权 $\mathbf{w} = \mathbf{w}_{\text{opt}}$ ^[13]时, 此时相关系数矩阵 $\mathbf{R}_{js}(i, \mathbf{w}_{\text{opt}})$ 的秩为 1。也就是说, 不论图像配准误差的大小与方向, 协方差矩阵 $\mathbf{Cov}_{\mathbf{j}\mathbf{x}}(i, \mathbf{w}_{\text{opt}})$ 有一个大特征值和小特征值, 即, $\mathbf{Cov}_{\mathbf{j}\mathbf{x}}(i, \mathbf{w}_{\text{opt}})$ 的大小特征值亦分离, 这就很容易得到协方差矩阵正交的信号子空间和噪声子空间, 而且不用估计噪声子空间的维数。

这样一来, 就解决了噪声子空间维数的估计问题。以上讨论都是基于协方差矩阵的统计特性以及子空间的正交性进行干涉相位估计的。

2.2 基于稳健波束形成的干涉相位估计

众所周知, 空间导向矢量与地面分辨单元(SAR

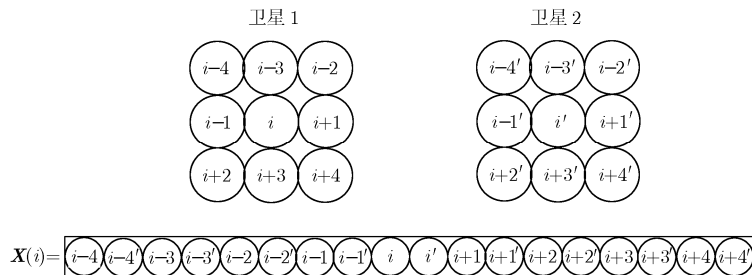


图 1 联合像素矢量的构造方法

图像中同一像素对)是一一对应关系。当存在图像配准误差时,以上方法是利用像素对的统计特性对 SAR 图像进行配准处理,从而使得样本协方差与空间导向矢量一一对应。下面从另一个角度来考虑这一相位估计问题,通过校正导向矢量使其与 SAR 图像中每一个像素对一一对应起来,从而得到干涉相位的稳健估计,即通过稳健的自适应波束形成来实现对干涉相位的估计,当图像存在配准误差时,能够得到稳健的干涉相位估计结果。

首先,从 Capon 方法入手,当 SAR 图像精确配准时,Capon 方法可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \min_w \mathbf{w}^H \cdot \hat{\mathbf{Cov}}_x(i) \cdot \mathbf{w} \\ \text{s.t. } \mathbf{w}^H \bar{\mathbf{a}}_s(\varphi_i) = 1 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中 $\bar{\mathbf{a}}_s(\varphi_i)$ 为期望信号的导向矢量,且与协方差矩阵 $\mathbf{Cov}_x(i)$ (式(2))一一对应。期望信号的功率 σ_0^2 是利用 $\mathbf{w}^H \cdot \hat{\mathbf{Cov}}_x(i) \cdot \mathbf{w}$ 来估计的,则式(5)的解很容易得到:

$$\mathbf{w}_0 = \frac{\hat{\mathbf{Cov}}_x(i)^{-1} \bar{\mathbf{a}}_s(\varphi_i)}{\bar{\mathbf{a}}_s^H(\varphi_i) \hat{\mathbf{Cov}}_x(i)^{-1} \bar{\mathbf{a}}_s(\varphi_i)} \quad (6)$$

则期望信号的功率可以表示为

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{1}{\bar{\mathbf{a}}_s^H(\varphi_i) \hat{\mathbf{Cov}}_x(i)^{-1} \bar{\mathbf{a}}_s(\varphi_i)} \quad (7)$$

那么,对应功率最大的位置就是我们要估计该像素的干涉相位。而式(5)等效于

$$\left. \begin{aligned} \max_{\sigma^2} \sigma^2 \\ \text{s.t. } \hat{\mathbf{Cov}}_x(i) - \sigma^2 \bar{\mathbf{a}}_s(\varphi_i) \bar{\mathbf{a}}_s^H(\varphi_i) \geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

当存在图像配准误差时,导致阵列的导向矢量与 SAR 图像中每一个像素对不匹配。下面利用稳健波束形成方法使得导向矢量与协方差矩阵相对应。假设导向矢量与存在误差时的导向矢量分别为 $\bar{\mathbf{a}}_s, \mathbf{a}_s$, 则导向矢量之间的误差可以表示为

$$\delta = \mathbf{a}_s - \bar{\mathbf{a}}_s \quad (9)$$

假设 $\|\bar{\mathbf{a}}_s\|^2 > c$ (c 为一常数,为了保证真实的导向矢量不为零),且, $\|\delta\|^2 \leq \varepsilon$ 。此时式(8)的优化问题就变成稳健的 Capon 波束形成(RCB)问题,即

$$\left. \begin{aligned} \max_{\sigma^2} \sigma^2 \\ \text{s.t. } \hat{\mathbf{Cov}}_x(i) - \sigma^2 \mathbf{a}_s \mathbf{a}_s^H \geq 0 \\ \|\mathbf{a}_s - \bar{\mathbf{a}}_s\|^2 \leq \varepsilon \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式(10)结合式(5),得

$$\left. \begin{aligned} \min_{\mathbf{a}_s} \mathbf{a}_s^H \hat{\mathbf{Cov}}_x(i)^{-1} \mathbf{a}_s \\ \text{s.t. } \|\mathbf{a}_s - \bar{\mathbf{a}}_s\|^2 \leq \varepsilon \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式(11)不等式约束优化等价于式(12)所示的等式约束优化问题;也就是说,只要满足式(11)的约束条件,则目标函数都可以得到最小值。那么,令 $\eta \triangleq \|\mathbf{a}_s - \bar{\mathbf{a}}_s\|^2 < \varepsilon$, 上述结论应该成立。用 $\mathbf{a}_s / \sqrt{\eta}$ 代替式(11)中目标函数的 \mathbf{a}_s , 则目标函数减小到 η 倍,这与初始条件相矛盾。所以,只有 $\eta = \varepsilon$ 。那么,上述不等式约束问题变为

$$\left. \begin{aligned} \min_{\mathbf{a}_s} \mathbf{a}_s^H \hat{\mathbf{Cov}}_x(i)^{-1} \mathbf{a}_s \\ \text{s.t. } \|\mathbf{a}_s - \bar{\mathbf{a}}_s\|^2 = \varepsilon \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

利用拉格朗日乘子方法,把式(12)写成拉格朗日函数,即

$$L(\mathbf{a}_s, \gamma) = \mathbf{a}_s^H \hat{\mathbf{Cov}}_x(i)^{-1} \mathbf{a}_s - \gamma (\|\mathbf{a}_s - \bar{\mathbf{a}}_s\|^2 - \varepsilon) \quad (13)$$

其中 $\gamma \geq 0$ 为拉格朗日乘子。则式(13)变成无约束最小化问题,那么,令式(13)对 \mathbf{a}_s 求导并使其等于零,即: $\hat{\mathbf{Cov}}_x(i)^{-1} \mathbf{a}_s + \gamma (\mathbf{a}_s - \bar{\mathbf{a}}_s) = 0$, 则

$$\hat{\mathbf{a}}_s = \bar{\mathbf{a}}_s - (I + \gamma \hat{\mathbf{Cov}}_x(i))^{-1} \bar{\mathbf{a}}_s \quad (14)$$

3 本文方法的处理步骤

第1步 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。本文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,因此大大减轻了图像配准的难度。

第2步 估计样本数据的协方差矩阵 按照图1所示的方法构造卫星2相对于参考星1的联合数据矢量 $\mathbf{X}(i)$ 并计算其协方差矩阵 $\mathbf{Cov}_X(i)$ 。在实际工作中,统计协方差矩阵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。样本协方差矩阵 $\hat{\mathbf{Cov}}_X(i)$ 由式(15)进行估计:

$$\hat{\mathbf{Cov}}_X(i) = \frac{1}{2K+1} \sum_{k=-K}^K \mathbf{X}(i+k) \mathbf{X}^H(i+k) \quad (15)$$

式中 $2K+1$ 为从相邻像素中获得的独立同分布样本数。为了改善 Capon 谱估计的性能,令式(15)中 $\hat{\mathbf{Cov}}_X(i)$ 记为 $\hat{\mathbf{Cov}}_{f,X}(i)$, 其中下标 f 表示前向求出协方差矩阵,那么平滑后的协方差矩阵为

$$\hat{\mathbf{Cov}}_X(i) = \frac{1}{2} (\hat{\mathbf{Cov}}_{f,X}(i) + \mathbf{G} \cdot \hat{\mathbf{Cov}}_{f,X}^T(i) \cdot \mathbf{G}) \quad (16)$$

其中 \mathbf{G} 为转换矩阵。对样本协方差矩阵 $\hat{\mathbf{Cov}}_X(i)$ 进行特征分解,即 $\hat{\mathbf{Cov}}_X(i) = \mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{U}^H$, 其中 \mathbf{S}, \mathbf{U} 分别为 $\hat{\mathbf{Cov}}_X(i)$ 的特征值和对应的特征矢量。

第3步 计算拉格朗日乘子 γ 并且估计阵列流行的导向矢量 $\hat{\mathbf{a}}_s$

利用 Newton 方法或者 LMS 方法求解拉格朗日

乘子 γ 且满足^[11]:

$$\frac{\|\bar{\mathbf{a}}_s\| - \sqrt{\varepsilon}}{\lambda_1 \sqrt{\varepsilon}} \leq \gamma \leq \min \left\{ \left(\sum_{m=1}^M \frac{|g_m|^2}{\varepsilon \lambda_m^2} \right)^{1/2}, \frac{\|\bar{\mathbf{a}}_s\| - \sqrt{\varepsilon}}{\lambda_M \sqrt{\varepsilon}} \right\} \quad (17)$$

其中 g_m 为 $\mathbf{g} = [g_1, \dots, g_M]^T \triangleq \mathbf{U}^H \bar{\mathbf{a}}_s$ 中的第 m ($m = 1, \dots, M$) 各元素 ($M \times M$ 为协方差矩阵 $\hat{\mathbf{Cov}}_X(i)$ 的维数)。导向矢量(式(14))可以进一步表示为

$$\hat{\mathbf{a}}_s = \bar{\mathbf{a}}_s - \mathbf{U}(\mathbf{I} + \gamma \mathbf{S})^{-1} \mathbf{U}^H \bar{\mathbf{a}}_s \quad (18)$$

第4步 估计干涉相位以及散射系数 本文用稳健 Capon 波束形成算法来估计干涉相位, 定义代价函数:

$$\hat{\varphi}_i = \max_{\phi_i} \{J_c\} \quad (19)$$

其中 $J_c = \frac{1}{\hat{\mathbf{a}}_s^H(\phi_i) \hat{\mathbf{Cov}}_X(i)^{-1} \hat{\mathbf{a}}_s(\phi_i)}$ 称之为代价函数。

代价函数达到最大值时所对应的就是干涉相位估计, 即 $\hat{\varphi}_i = \phi_i$, 代价函数的最大值即为所求该像素点的散射系数。

对 SAR 图像中的每一像素分别执行上述四步操作, 就可以精确地恢复出真实地形的干涉相位图以及该地面散射单元的后向散射系数。

4 数据处理结果

根据 Hill 方程, 本文以两颗卫星的 Cartwheel 卫星构形为例, 选取某一个轨道位置时刻的两颗卫星进行仿真。对应的有效垂直航向基线长度为 261.68 m, 雷达的下视角为 40° , 利用一幅实测 SAR 图像作为地面场景每一个 SAR 像素的回波功率, 仿

真一山区地形, 其最大高度为 340 m, 生成一对 SAR 图像。雷达工作在 X 波段。第 1 颗卫星发射信号, 两颗卫星接收的地面回波信号进行 SAR 成像处理, SAR 图像的信噪比为 20 dB。

首先讨论该方法对不同导向矢量误差的稳健性。对于不同的导向矢量误差 ε , 在配准误差(配准误差是卫星 2 相对于卫星 1 之间的像素偏差)为 $[0, 0.5, 1.0]$ 像素时, 利用该方法获得的干涉相位与真实地形相位之间的均方根误差 (即, $\sigma = \sqrt{\frac{1}{K \cdot L} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L (\hat{\varphi}(k, l) - \varphi(k, l))^2}$, 其中 $\hat{\varphi}(k, l)$, $\varphi(k, l)$ 分别为利用本方法获得的干涉相位和真实地形相位, K, L 分别为距离向与方位向的采样点数 (610×486)) 如图 2 所示(通过 50 次 Monte Carlo 实验获得)。从图 2 的仿真结果可知, 即使导向矢量误差较大时, 该方法仍然具有较强的稳健性。

在不同的配准误差情况下, 下面验证本方法对仿真数据与实测数据的有效性 & 稳健性。

如图 3 所示是存在不同图像配准误差情况下的

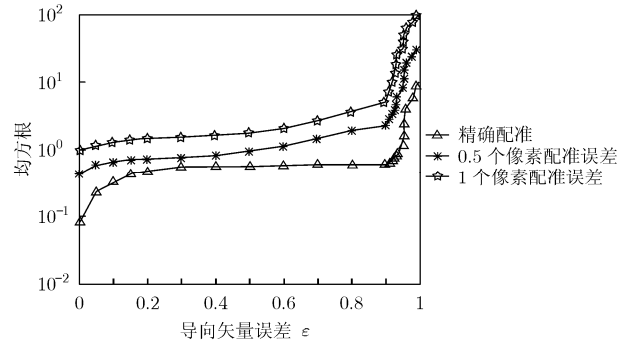


图2 导向矢量误差与干涉相位的关系图

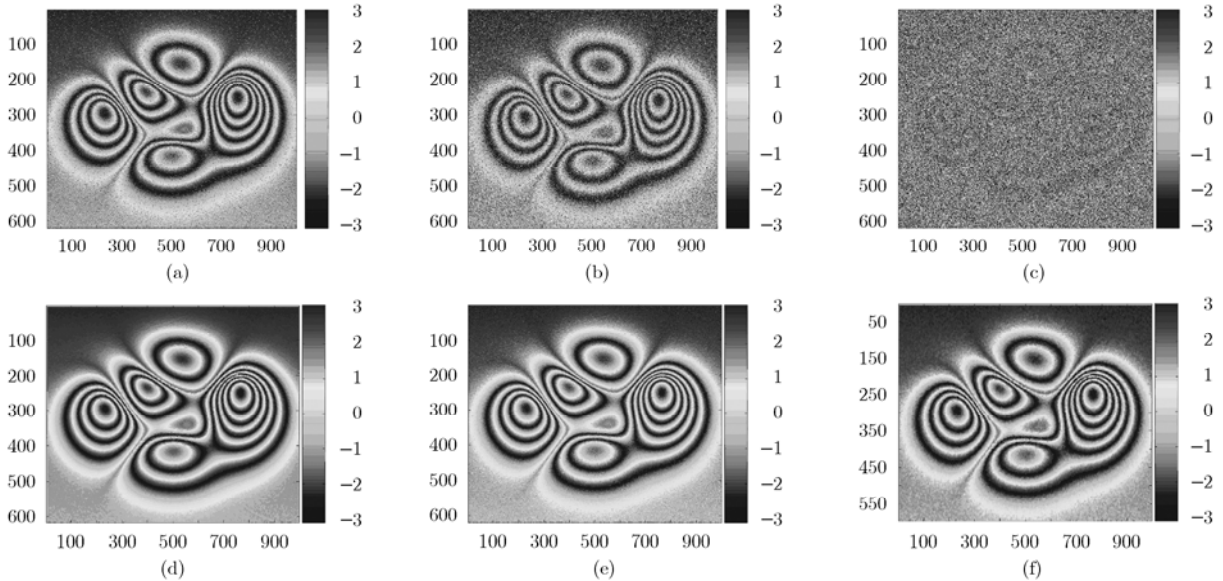


图3 不同图像配准误差时的干涉图

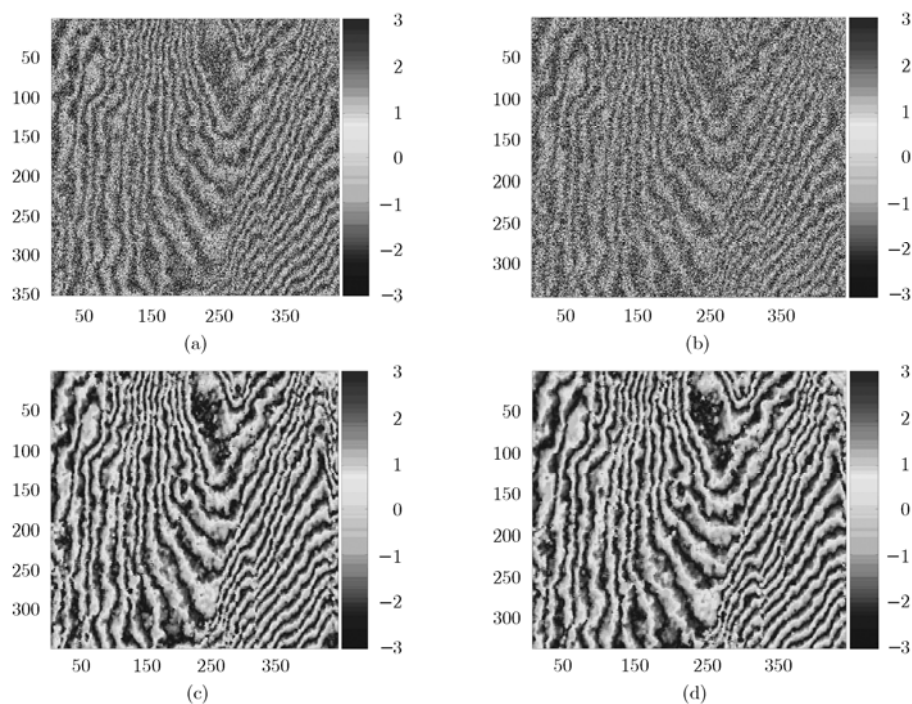


图 4 本方法对意大利 Etna 火山口数据的处理结果

干涉图($\varepsilon = 0.5$)。纵坐标、横坐标分别表示距离向与方位向, 3(a), 3(b)与 3(c)分别是在配准误差为[0, 0.5, 1.0]像素时利用传统方法得到的干涉图。利用该方法通过校正导向矢量, 在上述配准误差条件下的处理结果: 图 3(d)精确配准时利用本方法所得到的干涉相位图; 图 3(e)和图 3(f)分别是配准误差为 0.5, 1 个像素时所得到的干涉相位图。

图 4 所示是利用实测数据来验证本方法的处理性能。所用的实测数据是 SIR-C/X-SAR 航天飞机雷达中的 X-SAR 录取的一组部分数据(意大利的 Etna 火山口), 同样可以得到很好的处理结果, 如图 4 所示。配准误差为[0.5,0.8]时, 利用该方法得到的干涉相位如图 4(c)与 4(d)所示。图 4(a),4(b)分别是配准误差为[0.5,0.8]时利用传统方法得到的干涉图。

通过以上的处理结果可知, 在存在导向矢量误差时, 本方法针对不同的配准误差(即使配准误差为 1 个像素)都能够准确获得地形干涉相位估计结果。

5 结论

本方法是基于稳健波束形成的干涉相位估计方法, 即利用相邻像素的相干信息, 通过校正阵列导向矢量, 使其与 SAR 图像中每一个像素对一一对应起来, 在 SAR 图像之间存在配准误差时, 能够准确得到地形干涉相位估计结果。通过仿真数据和实测数据的处理结果验证了本方法的有效性。

参考文献

- [1] Rosen P A, Hensley S, and Joughin I R, *et al.* Synthetic aperture radar interferometry[J]. *Proceeding of IEEE*, 2000, 88(3): 333-382.
 - [2] Bamler R and Hartl P. Synthetic aperture radar interferometry[J]. *Inversion Problem*, 1998, 14(4): 1-54.
 - [3] Costantini M. A novel phase unwrapping method based on network programming[J]. *IEEE Transactions. on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(3): 813-821.
 - [4] Xu Wei and Cumming I. A region-growing algorithm for InSAR phase unwrapping[J]. *IEEE Transactions. on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(1): 124-134.
 - [5] Li Zheng-fang and Bao Zheng, *et al.* Image auto-coregistration and InSAR interferogram estimation using joint subspace projection[J]. *IEEE Transactions. on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(2): 251-260.
 - [6] Li Zheng-fang, Bao Zheng, and Suo Zhiyong. A joint Image coregistration, phase noise suppression, and phase unwrapping method based on subspace projection for multibaseline InSAR systems[J]. *IEEE Transactions. on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(3): 584-591.
 - [7] 毛志杰, 廖桂生. 基于联合像素模型的 InSAR 干涉相位稳健性估计[J]. *系统工程与电子技术*, 2008, 30(1): 6-9.
- Mao Zhi-jie and Liao Gui-sheng. A robustness of InSAR interferometric phase estimation based on joint pixel parts model[J]. *System Engineering and Electronics*, 2008, 30(1):

- 6-9.
- [8] Vorobyov S and Gershman A B, *et al.* Robust adaptive beamforming using worst-case performance optimization: A solution to the signal mismatch problem[J]. *IEEE Transactions. on Signal Processing*, 2003, 51(2): 313-324.
- [9] Zarifi K and Shahbazpanahi S, *et al.* Robust blind multiuser detection based on the worst-case performance optimization of the MMSE receiver[J]. *IEEE Transactions. on Signal Processing*, 2005, 53(1): 295-305.
- [10] Lorenz R and Boyd S P. Robust minimum variance beamforming[J]. *IEEE Transactions. on Signal Processing*, 2005, 53(4): 1684-1696.
- [11] Li Jian and Stoica P. Robust adaptive beamforming[M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., America, 2006: 126-196.
- [12] Li Hai, Li Zheng-fang, and Liao Guisheng, *et al.* An estimation method for InSAR interferometric phase combined with image auto-coregistration[J]. *Science in China: Series F Information Sciences*, 2006, 49(3): 386-396.
- [13] Mao Zhi-jie and Liao Gui-sheng. Optimum data vector approach to multibaseline SAR interferometry phase unwrapping[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009, 6(1): 42-46.
- 毛志杰: 男, 1972年生, 博士生, 研究方向为干涉合成孔径雷达信号处理.
- 廖桂生: 男, 1963年生, 教授, 博士生导师, 雷达信号处理国家重点实验室副主任, 主要研究方向为分布式小卫星系统、阵列信号处理、智能天线等.