

文章编号:1004-9037(2012)02-0131-07

基于加权联合导向矢量模型的InSAR干涉相位估计

李 海 吴仁彪

(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)

摘要:基于干涉图的传统干涉相位估计方法,当由于图像配准误差而导致的干涉图质量较差时,就难以恢复出准确的真实干涉相位。本文提出了一种基于加权联合导向矢量模型的InSAR干涉相位估计方法。该方法构造最优联合观测矢量和加权联合导向矢量,同时利用相邻像素的相干信息,并采用波束形成技术,因此具有自适应图像配准和降低相位噪声的功能,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。仿真及实测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;干涉相位;配准误差;联合导向矢量

中图分类号:TN957

文献标识码:A

Estimation Method for InSAR Interferometric Phase Based on Weight Joint Steering Vector

Li Hai, Wu Renbiao

(Tianjin Key Lab for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin, 300300, China)

Abstract: The conventional interferometric synthetic aperture radar (InSAR) interferometric phase estimation methods are mostly based on interferogram filtering. When the quality of an interferogram is extremely poor due to a large coregistration error, it is difficult for these methods to retrieve the true terrain interferometric phases. Therefore, a method is presented to estimate the InSAR interferometric phase based on the model of weight joint steering vector. In the method, the optimal joint data vector and the weight joint steering vector are constructed. Then, the beamforming technique with the steering vector is used to estimate the InSAR interferometric phase. The method takes advantage of the coherence information of neighboring pixel pairs for auto-coregistering SAR images. 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 by simulation data and real data.

Key words: interferometric SAR (InSAR); interferometric phase; coregistration error; joint steering vector

引 言

干涉合成孔径雷达(Interferometric synthetic aperture radar, InSAR)是获取地面数字高程图(DEM)的重要遥感技术^[1-2]。InSAR技术中的三大

关键处理步骤是SAR图像配准、干涉相位估计(干涉相位噪声滤波)和相位展开。在传统的InSAR处理流程中,这三大关键步骤是级联进行的。但是,当前一级的处理导致信息损失,后面的处理就无法再把损失掉的信息恢复回来。例如,若图像配准的精度较差时,将使后面的干涉相位估计和相位展开

基金项目:国家自然科学基金(61071194,60736009)资助项目;中国民航大学基金(2011kyE06,ZXH2009D018)资助项目。

收稿日期:2011-06-01;修订日期:2011-12-01

难以获得令人满意的结果。因为传统的相位展开方法例如,枝切法^[3]、区域增长法^[4]和LS算法^[5]的性能受图像配准精度的影响很大,都要求图像配准的精度达到1/10~1/100个分辨单元,否则将会严重影响相位展开的性能。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。基于干涉图的干涉相位估计方法:如均值滤波^[6]、中值滤波^[7]、根据条纹走向的Lee自适应滤波算法^[8]和自适应Contoured滤波算法^[9],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。

文献[10,11]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。但此方法在估计干涉相位时首先要确定噪声子空间维数,若噪声子空间维数估计不准,必定影响干涉相位的估计结果。可是,当协方差矩阵的大小特征值区分不太明显时,确定噪声子空间的维数存在困难。本文提出一种基于加权联合导向矢量模型的干涉相位估计方法,可以精确获得对图像配准误差稳健的干涉相位估计。基本思想如下:首先,对SAR图像进行粗配准,进而确定最优联合观测矢量和加权联合导向矢量,用包含干涉相位的加权联合导向矢量和估计的联合协方差矩阵进行波束扫描,波束形成输出功率最大值所对应的干涉相位即为干涉相位估计结果。

1 联合观测矢量的统计模型

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) $s(i)$ 可以写为^[12]

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

$$\mathbf{a}(\varphi) = [1, e^{j\varphi}]^T \quad (2)$$

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; $\mathbf{a}(\varphi)$ 为像素*i*到两卫星间的空间导向矢量(上标T表示转置); φ 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; $s(i)$ 可看作一个联合复高斯随机矢量,其协方差矩阵 $\mathbf{C}_s(i)$ 为

$$\mathbf{C}_s(i) = E\{s(i)s^H(i)\} = \mathbf{a}(\varphi)\mathbf{a}^H(\varphi) \odot E\{\mathbf{x}(i)\mathbf{x}^H(i)\} + \sigma_n^2 \mathbf{I} = \sigma_s^2(i)\mathbf{a}(\varphi)\mathbf{a}^H(\varphi) \odot \mathbf{R}_s(i) + \sigma_n^2 \mathbf{I} \quad (3)$$

$$\mathbf{R}_s(i) = \begin{bmatrix} r_{11}(i), & r_{12}(i) \\ r_{21}(i), & r_{22}(i) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{R}_s(i)$ 为像素*i*的相关系数矩阵; $r_{mn}(i)$ ($0 \leq r_{mn}(i) \leq 1; n=1,2; m=1,2$)为两天线*m*和*n*接收的该像素回波之间的相关系数; $E\{\cdot\}$ 为统计平均; $\sigma_s^2(i)$ 为像素*i*的回波功率; σ_n^2 为噪声功率。

当两幅图像精确配准且相干系数足够高时,可用波束形成的方法来估计干涉相位,代价函数如下所示

$$J_1 = \mathbf{a}^H(\hat{\varphi}_i)\mathbf{C}_s(i)\mathbf{a}(\hat{\varphi}_i) \quad (5)$$

式中 $\mathbf{a}(\hat{\varphi}_i) = [1, e^{j\hat{\varphi}_i}]^T$ 。式(5)达到最大值时所对应的 $\hat{\varphi}_i$ 即为干涉相位估计结果。

但是,当两幅图像存在配准误差时,导向矢量将不再如式(2)所示,此时若采用式(5)作为代价函数进行干涉相位估计,将得不到准确的干涉相位估计结果。

为了能在存在配准误差时,得到准确的干涉相位估计结果,本文提出一种基于加权联合导向矢量模型的干涉相位估计方法。为了讨论方便,先讨论比较简单情况,即只在一个方向上(距离向或方位向)存在配准误差。当配准误差为 μ ($0 < \mu < 1$)个像素,且方向为垂直向上(即卫星2中的像素相对于卫星1中的像素向上偏移)时的联合观测矢量构造方法如图1所示(一个圆环代表一个SAR像素),则称此观测矢量为最优联合观测矢量^[13]。

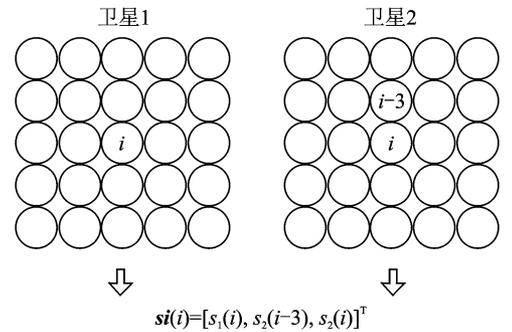


图1 联合观测矢量构造方法

最优联合观测矢量 $\mathbf{si}(i)$ 的协方差矩阵 $\mathbf{C}_{si}(i)$,可写为

$$\mathbf{C}_{si}(i) = E\{\mathbf{si}(i)\mathbf{si}^H(i)\} \quad (6)$$

为了能在存在配准误差时,得到准确的干涉相位估计结果,用基于加权联合导向矢量模型的波束形成算法来估计干涉相位,代价函数如下所示

$$J_2 = \beta^H(\hat{\varphi}_i, \mathbf{w})\mathbf{C}_{si}(i)\beta(\hat{\varphi}_i, \mathbf{w}) = (\beta(\hat{\varphi}_i) \odot \mathbf{w})^H \mathbf{C}_{si}(i) (\beta(\hat{\varphi}_i) \odot \mathbf{w})$$

$$\text{s. t. } \mathbf{w} = [1, \omega_1, \omega_2]^T, \omega_1^2 + \omega_2^2 = 1$$

$$\omega_j \geq 0 \quad (j = 1, 2) \quad (7)$$

式中 $\beta(\phi_i)=[1, e^{j\phi_i}, e^{j2\phi_i}]^T$, 并且 $\beta(\phi_i)$ 和 $\beta(\phi_i, \mathbf{w})$ 分别称为像素 i 的联合导向矢量和加权联合导向矢量。式(7)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 $\hat{\phi}_i = \varphi_i$, 并且此时 $\omega_1 = \sqrt{\mu}$, $\omega_2 = \sqrt{1-\mu}$ 。

上述结论证明如下。因为一个分辨单元的回波数据实际上是很多散射点回波数据的叠加, 因此可将一个分辨单元内的散射点分成两部分(分别用下标 a, b 来表示)^[10]。所构造的观测矢量 $\mathbf{si}(5)$ (以 $i=5$ 为例)如图2所示。

$$\mathbf{C}_{si}(5) = E\{\mathbf{si}(5)\mathbf{si}^H(5)\} = E\{[s_1(5), s_2(5_a) + s_2(2_b), s_2(5_b) + s_2(8_a)]^T [s_1(5), s_2(5_a) + s_2(2_b), s_2(5_b) + s_2(8_a)]^* \} =$$

$$\begin{bmatrix} E\{s_1(5)s_1^*(5)\}, & E\{s_1(5)[s_2(5_a) + s_2(2_b)]^*\}, & E\{s_1(5)[s_2(5_b) + s_2(8_a)]^*\} \\ E\{[s_2(5_a) + s_2(2_b)]s_1^*(5)\}, & E\{[s_2(5_a) + s_2(2_b)][s_2(5_a) + s_2(2_b)]^*\}, & E\{[s_2(5_a) + s_2(2_b)][s_2(5_b) + s_2(8_a)]^*\} \\ E\{[s_2(5_b) + s_2(8_a)]s_1^*(5)\}, & E\{[s_2(5_b) + s_2(8_a)][s_2(5_a) + s_2(2_b)]^*\}, & E\{[s_2(5_b) + s_2(8_a)][s_2(5_b) + s_2(8_a)]^*\} \end{bmatrix} +$$

$$\sigma_n^2 \mathbf{I} = \begin{bmatrix} E\{s_1(5)s_1^*(5)\}, & E\{s_1(5)s_2^*(5_a)\}, & E\{s_1(5)s_2^*(5_b)\} \\ E\{s_2(5_a)s_1^*(5)\}, & E\{s_2(5_a)s_2^*(5_a)\} + E\{s_2(2_b)s_2^*(2_b)\}, & 0 \\ E\{s_2(5_b)s_1^*(5)\}, & 0, & E\{s_2(5_b)s_2^*(5_b)\} + E\{s_2(8_a)s_2^*(8_a)\} \end{bmatrix} +$$

$$\sigma_n^2 \mathbf{I} = \begin{bmatrix} \sigma_s^2(5), & \sqrt{\mu}\sigma_s^2(5)e^{-j\varphi_5}, & \sqrt{1-\mu}\sigma_s^2(5)e^{-j\varphi_5} \\ \sqrt{\mu}\sigma_s^2(5)e^{j\varphi_5}, & \mu\sigma_s^2(5) + (1-\mu)\sigma_s^2(2), & 0 \\ \sqrt{1-\mu}\sigma_s^2(5)e^{j\varphi_5}, & 0, & (1-\mu)\sigma_s^2(5) + \mu\sigma_s^2(8) \end{bmatrix} + \sigma_n^2 \mathbf{I} \quad (8)$$

式中 $*$ 表示共轭操作。将式(8)代入式(7)中的代价函数, 可得

$$J_2 = \beta^H(\phi_5, \mathbf{w}) \mathbf{C}_{si}(5) \beta(\phi_5, \mathbf{w}) = \begin{bmatrix} 1 \\ w_1 e^{j\phi_5} \\ w_2 e^{j2\phi_5} \end{bmatrix}^H \cdot$$

$$\left\{ \begin{bmatrix} \sigma_s^2(5), & \sqrt{\mu}\sigma_s^2(5)e^{-j\varphi_5}, & \sqrt{1-\mu}\sigma_s^2(5)e^{-j\varphi_5} \\ \sqrt{\mu}\sigma_s^2(5)e^{j\varphi_5}, & \mu\sigma_s^2(5) + (1-\mu)\sigma_s^2(2), & 0 \\ \sqrt{1-\mu}\sigma_s^2(5)e^{j\varphi_5}, & 0, & (1-\mu)\sigma_s^2(5) + \mu\sigma_s^2(8) \end{bmatrix} + \right.$$

$$\left. \sigma_n^2 \mathbf{I} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ w_1 e^{j\phi_5} \\ w_2 e^{j2\phi_5} \end{bmatrix}$$

$$\text{s.t. } \mathbf{w} = [1, w_1, w_2]^T \quad w_1^2 + w_2^2 = 1 \quad w_j \geq 0 \quad (j=1, 2) \quad (9)$$

为了讨论方便, 假定像素2, 5, 8的功率相等, 即 $\sigma_s^2(2) = \sigma_s^2(5) = \sigma_s^2(8)$ 。对式(9)进行整理后可得

$$J_2 = \beta^H(\phi_5, \mathbf{w}) \mathbf{C}_{si}(5) \beta(\phi_5, \mathbf{w}) = [w_1 \sqrt{\mu}\sigma_s^2(5) + w_2 \sqrt{1-\mu}\sigma_s^2(5)] [e^{j(\varphi_5 - \phi_5)} + e^{j(\phi_5 - \varphi_5)}] + 2\sigma_s^2(5) + 2\sigma_n^2 = [2w_1 \sqrt{\mu} + 2w_2 \sqrt{1-\mu}] \sigma_s^2(5) \cos(\varphi_5 - \phi_5) + 2\sigma_s^2(5) + 2\sigma_n^2$$

$$\text{s.t. } \mathbf{w} = [1, w_1, w_2]^T \quad w_1^2 + w_2^2 = 1 \quad w_j \geq 0 \quad (j=1, 2) \quad (10)$$

易知, 式(10)取得最大值时 $\hat{\phi}_5 = \varphi_5$, $\omega_1 = \sqrt{\mu}$, $\omega_2 = \sqrt{1-\mu}$ 。

下面讨论在距离向和方位向都存在配准误差

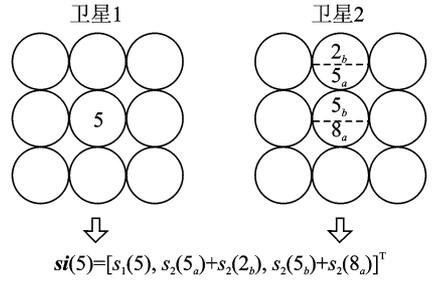


图2 图像配准误差为 μ 个像素时的联合观测矢量

此时 $\mathbf{si}(5)$ 的协方差矩阵可写为

的情况。当方位向配准误差为 μ ($0 < \mu < 1$) 像素, 且方向为垂直向上(即卫星2中的像素相对于卫星1中的像素向上偏移), 距离向配准误差为 η ($0 < \eta < 1$) 像素, 且方向为水平向右(即卫星2中的像素相对于卫星1中的像素向右偏移)时的最优联合观测矢量构造方法如图3所示。

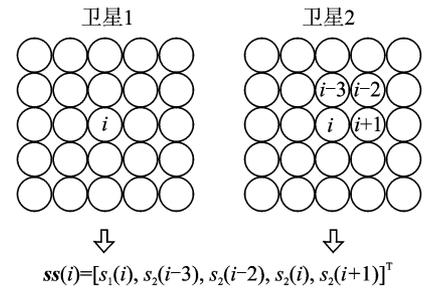


图3 联合观测矢量构造方法

其协方差矩阵可写为

$$\mathbf{C}_{ss}(i) = E\{\mathbf{ss}(i)\mathbf{ss}^H(i)\} \quad (11)$$

则此时估计干涉相位所用的代价函数如下

$$J_3 = \gamma^H(\phi_i, \mathbf{w}_j) \mathbf{C}_{ss}(i) \gamma(\phi_i, \mathbf{w}_j) = (\gamma(\phi_i) \odot \mathbf{w}_j)^H \mathbf{C}_{ss}(i) (\gamma(\phi_i) \odot \mathbf{w}_j) \quad (12)$$

式中

$$\mathbf{w}_j = [1, w_{j1}, w_{j2}, w_{j3}, w_{j4}]^T = [1, \sqrt{w_1(1-w_2)}, \sqrt{w_1 w_2}, \sqrt{(1-w_1)(1-w_2)}, \sqrt{(1-w_1)w_2}]^T \quad (13)$$

$$\text{s. t. } 1 \geq \omega_j \geq 0 \quad (j=1,2)$$

式中 $\gamma(\phi_i) = [1, e^{j\phi_i}, e^{2j\phi_i}, e^{3j\phi_i}, e^{4j\phi_i}]^T$, 并且 $\gamma(\phi_i)$ 和 $\gamma(\phi_j)$ 分别称为像素 i 的联合导向向量和加权联合导向向量。式(12)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 $\hat{\phi}_i = \phi_i$, 并且此时 $\omega_{j1} = \sqrt{\mu(1-\eta)}$, $\omega_{j2} = \sqrt{\mu\eta}$, $\omega_{j3} = \sqrt{(1-\mu)(1-\eta)}$, $\omega_{j4} = \sqrt{(1-\mu)\eta}$ (用和前面相类似的方法可证明此结论)。

从上面的推导结果可以看出, 由于本文采用加权联合导向向量模型, 充分利用相邻像素信息, 并且采用波束形成算法, 因此能在存在配准误差的情况下得到准确的干涉相位估计结果。

2 处理步骤

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^[1-2]。在此步骤中, 不要求像传统的干涉相位估计方法^[6-9]那样要求图像配准的精度必须达到亚像素级(1/10~1/100 像素), 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。

步骤 2 确定最优联合观测矢量。最优联合观测矢量的确定方法在文献[13]中进行了比较详细的讨论, 此处不再赘述。

步骤 3 计算联合协方差矩阵。式(11)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, 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 $\hat{C}_{ss}(i)$ 为

$$\hat{C}_{ss}(i) = \frac{1}{2K+1} \sum_{k=-K}^K \mathbf{ss}(i+k)\mathbf{ss}^H(i+k) \quad (14)$$

式中 $2K+1$ 为从相邻像素中获得的独立同分布样本数。

步骤 4 估计干涉相位。用加权联合导向向量模型的波束形成算法来估计干涉相位, 定义代价函数

$$J_c = \gamma^H(\phi_i, \omega_1, \omega_2) \hat{C}_{ss}(i) \gamma(\phi_i, \omega_1, \omega_2) \quad (15)$$

式中

$$\gamma(\phi_i, \omega_1, \omega_2) = [1, \sqrt{\omega_1(1-\omega_2)} e^{j\phi_i}, \sqrt{\omega_1\omega_2} e^{j2\phi_i}, \sqrt{(1-\omega_1)(1-\omega_2)} e^{j3\phi_i}, \sqrt{(1-\omega_1)\omega_2} e^{j4\phi_i}]^T$$

$$\text{s. t. } 1 \geq \omega_j \geq 0 \quad (j=1,2) \quad (16)$$

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。

对 SAR 图像中的每一像素分别执行上述 4 步

操作, 就可以精确地恢复出真实地形的干涉相位图。

3 处理性能的实验验证

本节利用仿真数据和一段实测数据来验证本文方法对图像配准误差的稳健性。

仿真数据描述: 假定 3 颗卫星按 Cartwheel 构形进行编队飞行^[14], 选择其中某一轨道时刻的两颗卫星位置进行仿真, 对应的有效垂直基线为 281.46 m, 卫星高度 750 km, 下视角 45°, 利用一幅实测 SAR 图像(图像分辨率为 3 m×3 m)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 Hanning 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 23 dB。相干系数由垂直基线长度、局部地形坡度和 SNR 决定^[2]。两颗卫星接收的 SAR 图像数据按统计模型产生^[15]。

图 4 为在不同配准误差的情况下采用中值滤波

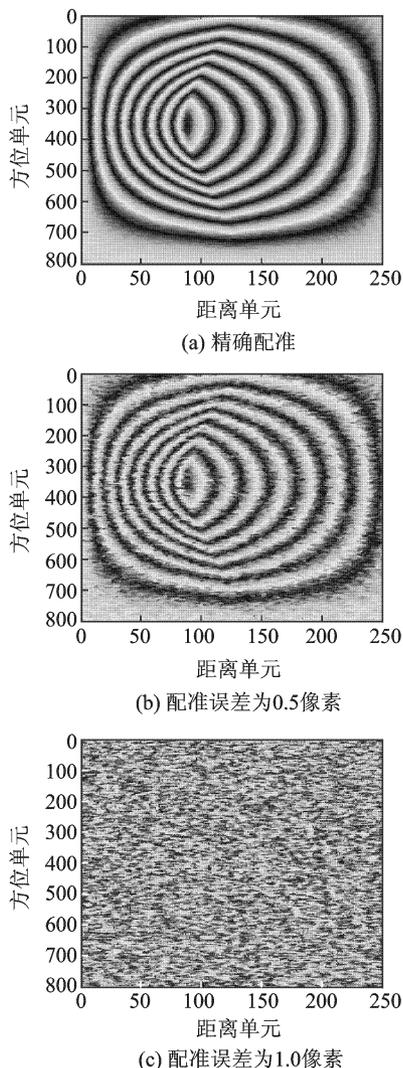


图 4 不同配准误差采用中值滤波的处理结果

的处理结果,其中图4(a-c)分别对应精确配准、配准误差为0.5,1.0像素时采用中值滤波的处理结果。由图4可见,中值滤波的方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1.0个像素时,已经无法得到干涉条纹。

图5为在不同配准误差的情况下采用均值滤波的处理结果,其中图5(a-c)分别对应精确配准、配准误差为0.5,1.0像素时采用均值滤波的处理结果。由图5可见,均值滤波的方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1.0个像素时,已经无法得到干涉条纹。

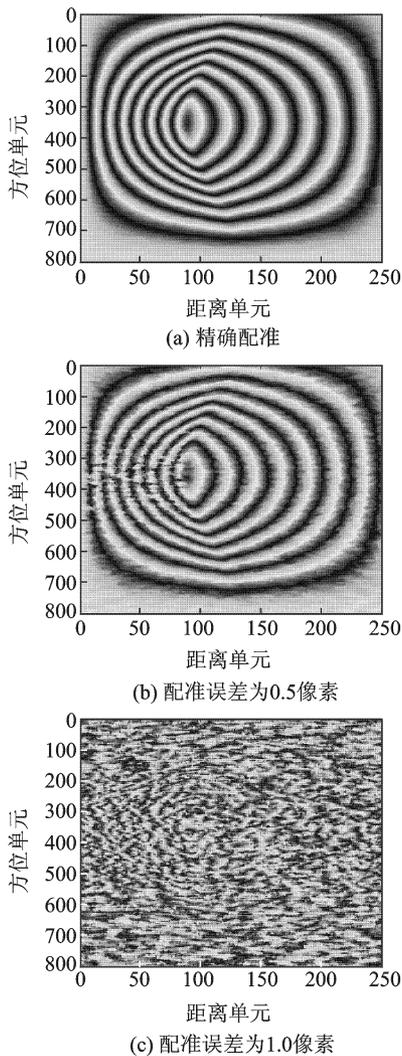


图5 不同配准误差采用均值滤波的处理结果

图6为在不同配准误差的情况下采用本文方法的处理结果,其中图6(a-c)分别对应精确配准、配准误差为0.5,1.0像素时采用本文方法的处理结果。由图6可见本文方法对配准误差的稳健性,即使配准误差达到1.0个像素,仍能获得几乎和精确配准一样的处理结果。

图7为只在在一个方向上(距离向或方位向)存在

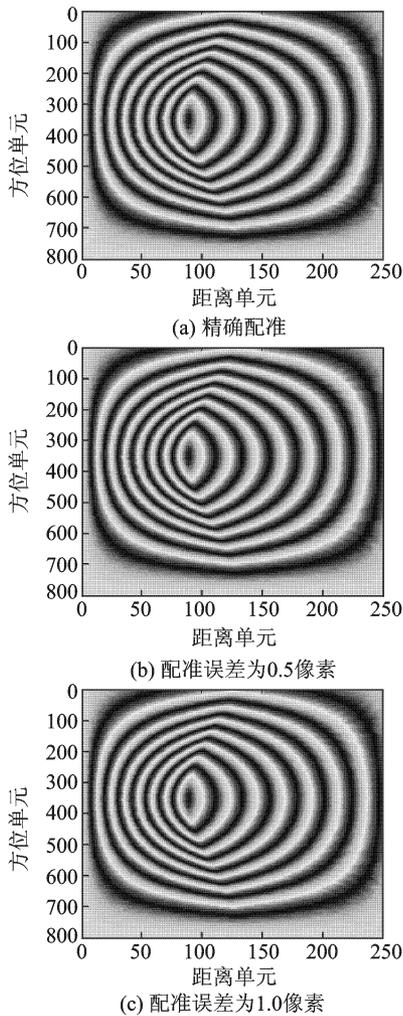


图6 不同配准误差采用本文方法的处理结果

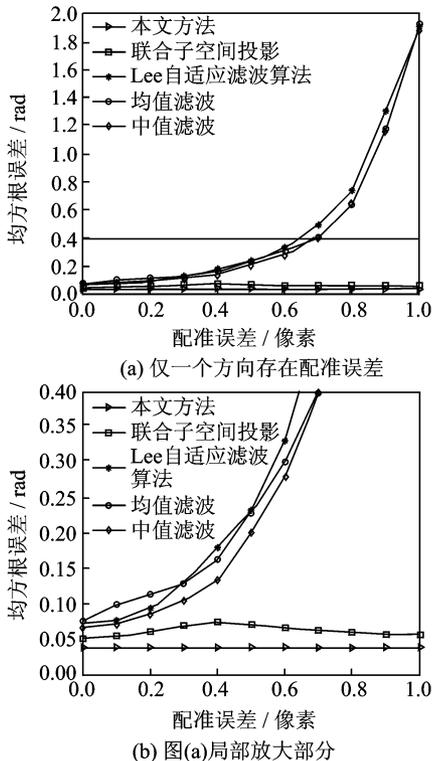
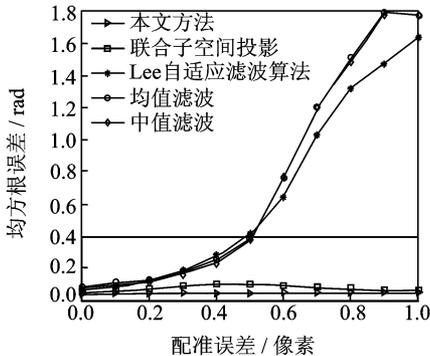


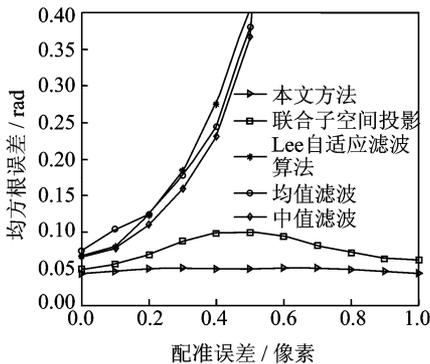
图7 干涉相位估计结果的均方根误差随配准误差的变化(一个方向)

配准误差时,不同估计方法的干涉相位估计结果的均方根误差随配准误差的变化情况(其中图7(b)为图7(a)中纵坐标0.0~0.4区域的放大后的结果)。

图8为在两个方向上(距离向和方位向)存在配准误差时,不同估计方法的干涉相位估计结果的均方根误差随配准误差的变化情况,其中图8(b)为图8(a)中纵坐标0.0~0.4区域的放大后的结果。



(a) 两个方向存在配准误差



(b) 图(a)局部放大部分

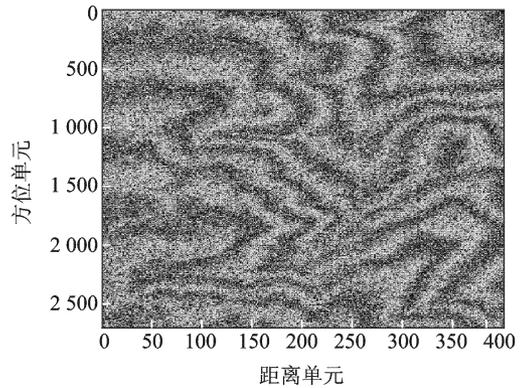
图8 干涉相位估计结果的均方根误差随配准误差的变化(两个方向)

下面利用实测数据来验证本文方法的处理性能。实测数据为ERS1/2录取的数据(河北张义地区)。图9为ERS1/2数据的处理结果:图9(a)为图像经过粗配准后生成的干涉条纹,图9(b)为利用本文方法估计的干涉条纹。

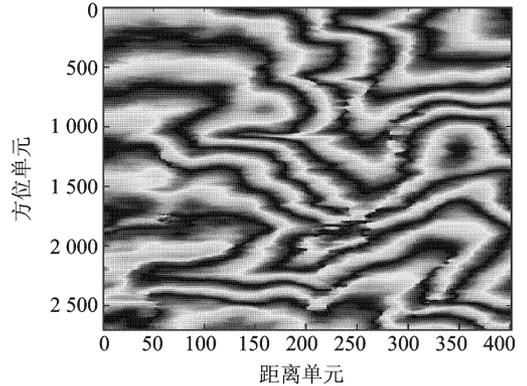
由实测数据的处理结果可以看出,SAR干涉图像对在没有经过精确配准处理时,本文方法有自适应配准作用,能够获得满意的干涉相位估计结果。

4 结束语

本文提出了一种基于加权联合导向矢量模型的干涉相位估计方法。该方法首先确定最优联合观



(a) 直接计算的干涉相位图



(b) 本文方法估计的干涉相位图

图9 ERS1/2 实测数据的处理结果

测矢量,进而根据该观测矢量构造加权联合导向矢量,并且利用由干涉相位所构造的加权联合导向矢量和估计的联合协方差矩阵进行波束形成,因此能在配准误差较差的情况下准确地估计相应像素间的干涉相位,具有自适应图像配准和降噪滤波的功能。理论分析及仿真和实测数据的处理结果验证了本文方法的有效性。

参考文献:

- [1] Rosen P A, Hensley S, Joughin I R, et al. Goldstein. synthetic aperture radar interferometry[C]// Proceeding of the IEEE. [S. l.]: IEEE, 2000, 88 (3):333-382.
- [2] Liao Guisheng, Li Hai. Estimation method for InSAR interferometric phase based on generalized correlation steering vector[J]. IEEE Trans on AES, 2010,46(3):1389-1403.
- [3] Goldstein R M, Zebker H A, Werner C L. Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping[J]. Radio Sci, 1988,23(4):713-720.
- [4] Xu W, Cumming I. A region-growing algorithm for InSAR phase unwrapping[J]. IEEE Trans on GRS, 1999,37(1):124-134.

- [5] Pritt M D, Shipman J S. Least-squares two-dimensional phase unwrapping using FFT's [J]. IEEE Trans on GRS, 1994, 32(3):706-708.
- [6] Eichel P H, Ghiglia D C, Jakowatz C V, et al. Spotlight SAR interferometry for terrain elevation mapping and interferometric change detection[R]. Sandia National Labs Tech Report, SAND93, 1993:2539-2546.
- [7] Lanari R, Fornaro G, Riccio D, et al. Generation of digital elevation models by using SIR-C/X-SAR multifrequency two-pass interferometry: the ETNA case study[J]. IEEE Trans on GRS, 1996, 34(5):1097-1114.
- [8] Lee Jong-Sen, Papathanassiou K P, Ainsworth T L, et al. A new technique for noise filtering of SAR interferometric phase images [J]. IEEE Trans on GRS, 1998, 36(5):1456-1465.
- [9] Yu Qifeng, Yang Xia, Fu Sihua, et al. An adaptive contoured window filter for interferometric synthetic aperture radar [J]. IEEE GRS Letters, 2007, 4(1): 23-26.
- [10] Li Zhenfang, Bao Zheng, Li Hai, et al. Image auto-coregistration and InSAR interferogram estimation using joint subspace projection [J]. IEEE Trans on GRS, 2006, 44(2):288-297.
- [11] Li Hai, Li Zhenfang, Liao Guisheng, et al. An estimation method for InSAR interferometric phase combined with image auto-coregistration [J]. Science in China: Series F, 2006, 49(3):386-396.
- [12] Lombardini F, Montanari M, Gini F. Reflectivity estimation for multibaseline interferometric radar imaging of layover extended sources [J]. IEEE Trans Signal Processing, 2003, 51(6):1508-1519.
- [13] Li Hai, Wu Renbiao, Han Ping, et al. A robust estimation method to coregistration error for InSAR interferometric phase [C]// 2010 IEEE International Radar Conference. Washington DC, USA: [s. n.], 2010:283-286.
- [14] Li Hai, Liao Guisheng. An estimation method for InSAR interferometric phase based on MMSE criterion [J]. IEEE Trans on GRS, 2010, 48(3):1457-1469.
- [15] Lombardini F. Absolute phase retrieval in a three-element synthetic aperture radar interferometer [C]//Proceeding of the 1996 CIE Int Conf of Radar. Beijing, China:[s. n.], 1996:309-312.

作者简介:李海(1976-),男,博士,研究方向:干涉合成孔径雷达信号处理、空时自适应信号处理、动目标检测,E-mail: haili@cauc.edu.cn;吴仁彪(1966-),男,教授,博士生导师,研究方向: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。