

# InSAR 自适应图像配准的干涉相位估计方法

李 海, 廖桂生

(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:** 提出了一种基于联合单像素模型的 InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) 干涉相位估计方法。能够根据配准误差的大小和方向来构造最优加权观测矢量, 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。

**关键词:** 干涉合成孔径雷达; 干涉相位; 图像配准; 加权; 观测矢量

**中图分类号:** TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 03-0420-06

## An Estimation Method for InSAR Interferometric Phase with Adaptive Image Coregistration

LI Hai, LIAO Gui-sheng

(National Key Lab for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract:** We propose a method to estimate the InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) interferometric phase based on the model of joint single pixel. In the method we construct the optimal weighted data vector by different coregistration error size and direction. The method takes advantage of the coherence information of neighboring pixel pairs. Therefore it can 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.

**Key words:** interferometric synthetic aperture radar (InSAR); interferometric phase; image coregistration; weighted; data vector

### 1 引言

干涉合成孔径雷达 (InSAR) 是利用两幅相干复 SAR 图像对应像素之间的相位信息来提取地面高度信息的一项技术。InSAR 技术中的两大关键处理步骤是 SAR 图像配准和干涉相位展开。若图像配准的精度较差时, 将使传统的相位展开方法例如, 枝切法<sup>[1]</sup>、区域增长法<sup>[2]</sup>和 LS 算法<sup>[3]</sup>难以获得令人满意的结果。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。

基于干涉图 (Interferogram)<sup>[4,5]</sup>和采用单像素模型在复图像域<sup>[6]</sup>的干涉相位估计方法, 都受配准误差的影响较大, 当图像配准误差较大时, 就难以再恢复出准确的真实干涉相位。

我们在文献[7,8]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。本文提出一种基于联合单像素模型的空间投影方法, 可以精确获得对图像配准误差稳健的干涉相位估计。基本思想如下: 用粗配准的一对 SAR 图像数据进行处理, 得到最优的加权观测矢量, 用此观测矢量估计协方差矩阵和相关函数矩阵; 对协方差矩阵进行特征分解, 获得噪声子空间; 再利用干涉相位构造的信号子空间 (由导向矢量和相关函数矩阵的大特征向量的 Hadamard 积所构成) 向噪声子空间投影, 其投影的最小值所对应的干涉相位即为估计结果。

本文内容安排如下: 第2节首先分析 InSAR 像素数据的统计模型以引出本文方法; 第3节具体介绍本文方法的处理步骤; 第4节利用仿真数据来验证本文方法的性能; 最后为结论。

### 2 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  $s(i)$  可以写为下式<sup>[9]</sup>:

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

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,  $a(i) = [1, e^{j\phi}]^T$  代表像素  $i$  到两卫星间的空间导向矢量(上标 T 表示转置),  $\phi$  为像素对  $i$  的干涉相位,

为 Hadamard 积,  $x(i)$  为两卫星接收的像素  $i$  的复后向散射系数矢量(不包含两者的波程差),  $n(i)$  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  $C_s(i)$  由下式给出:

$$C_s(i) = E\{s(i) s^H(i)\} = a(i) a^H(i) E\{x(i) x^H(i)\} + \frac{2}{n} I = \frac{2}{s}(i) a(i) a^H(i) R_s(i) + \frac{2}{n} I \quad (2)$$

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

其中  $R_s(i)$  称为像素  $i$  的相干系数矩阵,  $r_{mn}(i)$  ( $0 < r_{mn}(i) < 1, n = 1, 2, m = 1, 2$ ) 表示两天线  $m$  和  $n$  接收的该像素回波之间的相干系数,  $E\{\}$  表示统计平均,上标 H 表示共轭转置,  $\frac{2}{s}(i)$  表示像素  $i$  的回波功率,  $\frac{2}{n}$  表示噪声功率. 为了简化公式表达,将下文所有公式右边标识像素的符号  $i$  省略.

当两幅图像精确配准且相干系数足够高时,式(3)中矩阵  $R_s(i)$  的秩为 1<sup>[7]</sup>,其所对应的大、小两个特征值相差很大,  $C_s(i)$  的特征值亦分离,此时  $C_s(i)$  的特征分解如下:

$$C_s(i) = \lambda_1 \lambda_1^H + \frac{2}{n} \lambda_2 \lambda_2^H \quad (4)$$

其中  $\lambda_1$  为  $C_s(i)$  的大特征值 所对应的特征矢量,  $\lambda_2$  为  $C_s(i)$  的噪声特征值  $\frac{2}{n}$  所对应的特征矢量. 可见,  $\lambda_1$  张成信号子空间,  $\lambda_2$  张成噪声子空间. 随着配准误差的增加,会使  $C_s(i)$

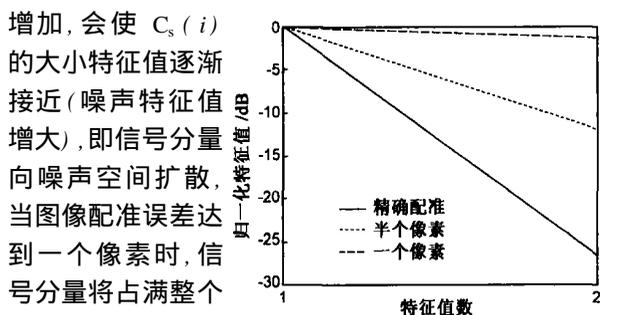


图 1 协方差矩阵的特征值分布随图像配准误差的变化

的大小特征值逐渐接近(噪声特征值增大),即信号分量向噪声空间扩散,当图像配准误差达到一个像素时,信号分量将占满整个二维空间(此时噪声特征值与大特征值接近),由图 1 的仿真结果也可证明这一点. 因此,可用协方差矩阵的条件数(矩阵的条件数定义为矩阵的

最大特征值与最小特征值之比)来表征信号分量向噪声空间的扩散程度,协方差矩阵的条件数越小,信号分量向噪声空间的扩散程度越大,此时的干涉相位估计结果越差(采用空间投影的方法估计干涉相位),协方差矩阵的条件数越大,信号分量向噪声空间的扩散程度越小,干涉相位估计结果越好.

本文采用最优加权观测矢量(即根据配准误差的大小和方向构造观测矢量,使得协方差矩阵的条件数最大),并且利用相邻像素的信息,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. 当配准误差方向已知,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,图 2 中水平方向为距离向,垂直方向为方位向)时的加权观测矢量构造方法如图 2(c) 所示,图中(a)、(b)给出另外两种观测矢量构造方法(一个圆环代表一个 SAR 像素,以  $i=5$  为例).

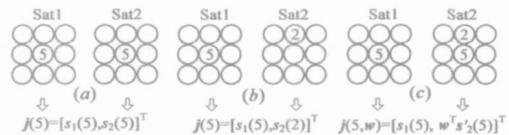


图 2 几种不同观测矢量构造方法

其中  $s_2(5) = [s_2(2), s_2(5)]^T$ ,  $w = [w_1, w_2]^T$  s. t.  $w_1 + w_2 = 1, w_j \geq 0 (j = 1, 2)$ .

下面讨论采用图 2 中的不同方法构造观测矢量时,协方差矩阵的条件数随配准误差的变化.

(1) 采用图 2(a) 的方法构造观测矢量

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,因此我们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). 所构造的观测矢量如图 3 所示(以  $i=5$  为例),其中  $s_b$  和  $s_a$  分别表示像素和像素进入像素 A 中的部分, ( $0 < \eta < 1$ ) 为配准误差,则  $\eta = 1 - \eta$  (严格来讲,此式并不相等,但若定性说明问题的话,还是可用此式来进行近似的,并不影响后面的结论),此时  $j_{(a)}(5)$  的协方差矩阵如式(5)所示(为了讨论方便,此处我们假定像素 5 和像素 A 的功率相等).

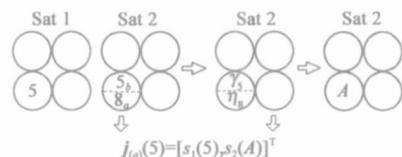


图 3 图像配准误差为  $\eta$  个像素时采用图 2(a)方法构造的观测矢量

$$C_{j(a)}(5) = E\{j_{(a)}(5) j_{(a)}(5)^H\} = a(i) a^H(i) \begin{bmatrix} \frac{2}{s}(5) r_{11}(5), & s_b(5) s_a(A) r_{12}(5A) \\ s_a(A) s_b(5) r_{21}(5A), & \frac{2}{s}(A) r_{22}(A) \end{bmatrix} + \frac{2}{n} I = a(i) a^H(i) R_{j(a)}(5) + \frac{2}{n} I$$

$$= a(s) a^H(s) \begin{matrix} 2 \\ s \end{matrix} (5) \begin{bmatrix} r_{11}(5), r_{12}(5A) \\ r_{21}(A5), r_{22}(A) \end{bmatrix} + \frac{2}{n} I \quad (5)$$

当精确配准时 ( $\eta = 0$ ), 此时  $r_{12}(5A) = r_{12}(55) = r_{21}(A5) = r_{21}(55) = 1$ ; 当配准误差为 1 像素时 ( $\eta = 1$ ), 此时  $r_{12}(5A) = r_{12}(58) = r_{21}(A5) = r_{21}(85) = 0$ ; 当配准误差为  $(0 < \eta < 1)$  像素时, 此时  $r_{12}(5A) = r_{21}(A5) = \dots$ . 又因为  $r_{11}(5) = r_{22}(A) = 1$ , 此时相关函数矩阵  $R_{j(a)}(5)$  可表示为:

$$R_{j(a)}(5) = \begin{matrix} 2 \\ s \end{matrix} (5) \begin{bmatrix} r_{11}(5), r_{12}(5A) \\ r_{21}(A5), r_{22}(A) \end{bmatrix} = \begin{matrix} 2 \\ s \end{matrix} (5) \begin{bmatrix} 1, \\ 1 \end{bmatrix} \\ = \begin{matrix} 2 \\ s \end{matrix} (5) \begin{bmatrix} 1, 1 - \\ 1 - , 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

可见, 矩阵  $C_{j(a)}(5)$  的条件数与配准误差  $\eta$  成反比, 即随着配准误差的增加, 矩阵  $C_{j(a)}(5)$  的条件数减小.

(2) 采用图 2(b) 的方法构造观测矢量.

当采用图 2(b) 的方法构造观测矢量时 (以  $i = 5$  为例), 所构造的观测矢量如图 4 所示. 其中  $2_b$  和  $5_a$  分别表示像素和像素进入像素 A 中的部分, ( $0 < \eta < 1$ ) 为配准误差. 此时  $j_{(b)}(5)$  的协方差矩阵如式(7)所示.

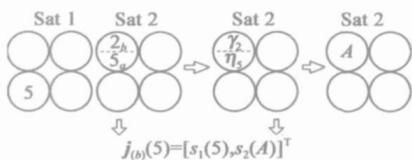


图 4 图像配准误差为  $\eta$  个像素时采用图 2(b) 方法构造的观测矢量

$$C_{j(b)}(5) = E\{j_{(b)}(5) j_{(b)}(5)^H\} \\ = a(s) a^H(s) R_{j(b)}(5) + \frac{2}{n} I \\ = a(s) a^H(s) \begin{matrix} 2 \\ s \end{matrix} (5) \begin{bmatrix} r_{11}(5), r_{12}(5A) \\ r_{21}(A5), r_{22}(A) \end{bmatrix} + \frac{2}{n} I \\ = a(s) a^H(s) \begin{matrix} 2 \\ s \end{matrix} (5) \begin{bmatrix} 1, \\ 1 \end{bmatrix} + \frac{2}{n} I \quad (7)$$

可见, 矩阵  $C_{j(b)}(5)$  的条件数与配准误差  $\eta$  成正比, 即随着配准误差的增加, 矩阵  $C_{j(b)}(5)$  的条件数增大.

(3) 采用图 2(c) 的方法构造观测矢量

当采用图 2(c) 的方法构造观测矢量时 (以  $i = 5$  为例), 所构造的加权观测矢量如图 5 所示.

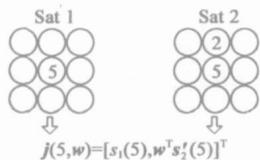


图 5 图像配准误差为  $\eta$  个像素时采用图 2(c) 方法构造的加权观测矢量

其中  $s_2'(5) = [s_2(2), s_2(5)]^T$ ,  $w = [w_1, w_2]^T$  s. t.  $w_1 + w_2 = 1, w_j \geq 0 (j = 1, 2)$ .

加权观测矢量  $j(5, w)$  的协方差矩阵可写为下式:  
 $C_j(5, w) = E\{j(5, w) j^H(5, w)\}$

$$= a(s) a^H(s) R_j(5, w) + \frac{2}{n} I \quad (8) \\ R_j(5, w) = \begin{bmatrix} \begin{matrix} 2 \\ s \end{matrix} (5) r_{11}(5), w_1 \begin{matrix} 2 \\ s \end{matrix} (5) r_{12}(5) + w_2 \begin{matrix} 2 \\ s \end{matrix} (5) \begin{matrix} 2 \\ s \end{matrix} (2) r_{12}(5, 2) \\ w_1 \begin{matrix} 2 \\ s \end{matrix} (5) r_{21}(5) + w_2 \begin{matrix} 2 \\ s \end{matrix} (2) \begin{matrix} 2 \\ s \end{matrix} (5) r_{21}(2, 5), w_1^2 \begin{matrix} 2 \\ s \end{matrix} (5) r_{22} \\ + w_2^2 \begin{matrix} 2 \\ s \end{matrix} (2) r_{22}(2) \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中  $R_j(5, w)$  称为像素 5 的加权相关函数矩阵. 可见, 对于待处理的像素 5 (此时配准误差的方向和大小是固定的, 即式(9)中的  $r_{11}(5)$ 、 $r_{12}(5)$ 、 $r_{12}(5, 2)$ 、 $r_{21}(5)$ 、 $r_{21}(2, 5)$ 、 $r_{22}(5)$  和  $r_{22}(2)$  为定值), 此时加权相关函数矩阵  $R_j(5, w)$  的条件数只受所加权值  $w$  的影响, 因此, 当我们采用最优权  $w = w_{\text{optimal}}$  (后面将介绍最优权  $w_{\text{optimal}}$  的确定方法) 时, 可使得此时加权相关函数矩阵  $R_j(5, w_{\text{optimal}})$  的条件数最大, 易知此时协方差矩阵  $C_j(5, w_{\text{optimal}})$  的条件数也最大. 可见, 矩阵  $C_j(5, w_{\text{optimal}})$  的条件数受配准误差的影响不大. 此时的加权观测矢量  $j(5, w_{\text{optimal}})$  称为最优加权观测矢量.

由前面分析可见, 图 2(a)、图 2(b) 中观测矢量构造方法的协方差矩阵的条件数受配准误差的影响较大, 而图 2(c) 的方法 (加权观测矢量) 的协方差矩阵的条件数受配准误差的影响较小. 由图 6 的仿真结果中也可证明这一点. 因此, 当采用最优加权观测矢量  $j(i, w_{\text{optimal}})$  时, 可使其协方差矩阵所对应的条件数最大, 即大小特征值明显分离. 此时, 相应的协方差矩阵可写成下式:

$$C_j(i, w_{\text{optimal}}) = E\{j(i, w_{\text{optimal}}) j^H(i, w_{\text{optimal}})\} \\ = a(i) a^H(i) R_j(i, w_{\text{optimal}}) \\ + \frac{2}{n} I \xrightarrow{\text{EVD}} c c^H + \frac{2}{n} c c^H \\ = (r + \frac{2}{n}) (a(i) \quad r) (a(i) \quad r)^H \\ + \frac{2}{n} n n^H \quad (10)$$

其中  $c$  为  $C_j(i, w_{\text{optimal}})$  的大特征值  $c$  所对应的特征向量,  $r$  为  $R_j(i, w_{\text{optimal}})$  的大特征值  $r$  所对应的特征向量,  $n$  为  $C_j(i, w_{\text{optimal}})$  的噪声特征值  $\frac{2}{n}$  所对应的噪声特征向量. 由上式可知,  $a(i) \quad r$  位于  $C_j(i, w_{\text{optimal}})$  的信号子空间,  $n$  位于  $C_j(i, w_{\text{optimal}})$  的噪声子空间, 且信号子空间正交于噪声子空间.

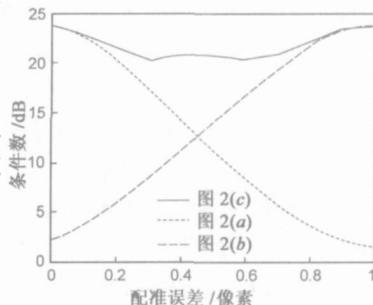


图 6 不同观测矢量协方差矩阵的条件数随配准误差的变化

对于待处理的像素  $i$ , 我们可用协方差矩阵的条件数最大为准则来确定最优的权值  $w_{\text{optimal}}$ , 进而确定最优的加权观测矢量, 即用图 2(c) 的加权观测矢量(其中  $w$  为变量)来估计相应的协方差矩阵并且计算其条件数, 条件数最大的协方差矩阵所对应的权值为最优权  $w_{\text{optimal}}$ , 相应的观测矢量为最优的加权观测矢量。

下面讨论如何确定误差方向。

在粗配准条件下, 我们利用求条件数的方法来确定误差方向。

(1) 确定方位向配准误差

如图 7 所示, 我们分别计算由卫星 1 中像素  $i$  和卫星 2 中像素  $m(m = i - 3, i + 3)$  所构造的观测矢量

$$j(i, m) = [s_1(i), s_2(m)]^T$$

( $m = i - 3, i + 3$ ) 的协方差矩阵  $C_j(i, m)$  (维数为  $2 \times 2$ ) 的条件数, 条件数最大的像素所对应的方向即为方位向配准误差方向。

(2) 确定距离向配准误差

用类似方法, 我们可确定距离向配准误差方向。

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, 利用相邻像素的信息, 并采用最优的加权观测矢量, 可使其所对应的协方差矩阵的条件数最

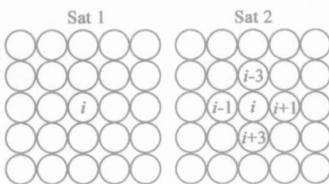


图 7 计算条件数示意图

大, 解决了采用单像素模型在配准误差较大的情况下, 由于信号分量向噪声空间扩散而导致不能得到准确的干涉相位估计结果的问题。因此能在配准误差较大的情况下得到准确的干涉相位估计结果。

为了得到协方差矩阵  $C_j(i, w)$ , 也要用样本平均。即将图 2(c) 中的像素 5 作左、右和上、下移动, 以得到估计  $C_j(i, w)$  所需的一组观测矢量样本。应当指出, 由于所处理的区域已去平地相位, 则不同位置处的空间导向矢量是相同的(当地形比较陡峭时, 我们可用文献 [8] 的方法对所处理的区域进行补偿, 使得不同位置处的空间导向矢量相同), 而且各像素的复反射系数相互独立, 因此这些样本可以看作是独立同分布的。

3 处理步骤

第一步, 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。在此步骤中, 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, 因此大大减轻了图像配准的难度。

第二步, 确定误差方向

我们利用求条件数的方法来确定误差方向(本文主要讨论在一个方向上, 距离向或方位向存在配准误差的情况, 当在两个方向上, 距离向和方位向都存在配准误差时, 本文方法经过适当扩充后, 照样能获得精确的干涉相位估计结果)。

(1) 确定方位向配准误差方向

如图 7 所示, 我们分别计算由卫星 1 中像素  $i$  和卫星 2 中像素  $m(m = i - 3, i + 3)$  所构造的观测矢量

$$j(i, m) = [s_1(i), s_2(m)]^T$$

( $m = i - 3, i + 3$ ) 的协方差矩阵  $C_j(i, m)$  的条件数, 条件数最大的像素所对应的方向即为方位向配准误差方向。

条件数最大的像素用下式进行计算:

$$h = \max_{m=i-3, i+3} \{ \text{cond}(C_j(i, m)) \} \\ \max_{m=i-3, i+3} \left\{ \text{cond} \left[ \frac{1}{2K+1} \sum_{k=-K}^K j(i+k, m) j^H(i+k, m) \right] \right\} \quad (11)$$

其中  $h$  为条件数最大的像素所对应的标号, 式中  $2K+1$  为估计协方差矩阵所用的相邻像素(包括距离向和方位向)的数目。

(2) 确定距离向配准误差

用类似方法, 我们可确定距离向配准误差方向。

第三步, 计算最优加权协方差矩阵和最优加权相关函数矩阵

在确定误差方向的基础上, 我们按类似于图 2(c) 所示方法构造加权观测矢量  $j(i, w_{\text{all}}(a)) (a = 1, \dots, N)$  (其中  $w_{\text{all}} = [w_{\text{all}}(1), w_{\text{all}}(2), \dots, w_{\text{all}}(N)]_{2 \times N} = \begin{bmatrix} 1, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 0 \\ 0, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2, 0.1, 1 \end{bmatrix}$ ) 并估计相应的协方差矩阵  $C_j(i, w_{\text{all}}(a)) (a = 1, \dots, N)$ 。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。样本协方差矩阵  $C_j(i, w_{\text{all}}(a)) (a = 1, \dots, N)$  由下式进行估计:

$$C_j(i, w_{\text{all}}(a)) = \frac{1}{2K+1} \sum_{k=-K}^K j(i+k, w_{\text{all}}(a)) j^H(i+k, w_{\text{all}}(a)) \quad (a = 1, \dots, N) \quad (12)$$

式中  $2K+1$  为从相邻像素中获得的独立同分布样本数。加权协方差矩阵  $C_j(i, w_{\text{all}}(a)) (a = 1, \dots, N)$  的特征分解有如下特点: 特征值  $\lambda_{1(a)} > \lambda_{s(a)}, (a = 1, \dots, N)$ ,  $\lambda_{n(a)} (a = 1, \dots, N)$  为小特征值  $\lambda_{s(a)} (a = 1, \dots, N)$  所对应的特征矢量。则最优的加权观测矢量  $j(i, w_{\text{optimal}})$  所对应的协方差矩阵(即最优加权协方差矩阵)为  $C_j(i, w_{\text{optimal}})$  其中  $w_{\text{optimal}} = w_{\text{all}}(\hat{a}) (\hat{a} = \max_{a=1,2,\dots,N} \{ \text{cond}(C_j(i, w_{\text{all}}(a))) \})$ , 相应的噪声子空间为  $N_c = [n(\hat{a})]$ 。

最优加权相关函数矩阵可用下式进行估计:

$$\begin{aligned} R_j(i, w_{\text{optimal}}) &= |C_j(i, w_{\text{optimal}}) - \hat{\lambda}_i^2 I| \\ &= |C_j(i, w_{\text{optimal}}) - s^{(b)} I| \quad (13) \end{aligned}$$

对  $R_j(i, w_{\text{optimal}})$  进行特征值分解来获得大特征值矢量  $r$ , 由前面的分析可知,  $a(i)$  位于  $C_j(i, w_{\text{optimal}})$  的信号子空间.

#### 第四步, 噪声子空间投影

前面提到,  $C_j(i, w_{\text{optimal}})$  的信号子空间  $a(i)$  正交于其噪声子空间  $n^{(b)}$ , 据此可以来估计干涉相位  $i$ , 称为正交投影方法.

$$\hat{\lambda}_i = \min\{ (a(i))^H n^{(b)} n^{(b)H} a(i) \} \quad (14)$$

上式中的  $\hat{\lambda}_i$  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四步操作, 就可以精确地恢复出真实地形的干涉相位图 (Interferogram).

## 4 处理性能的实验验证

本节利用仿真数据来验证本文方法.

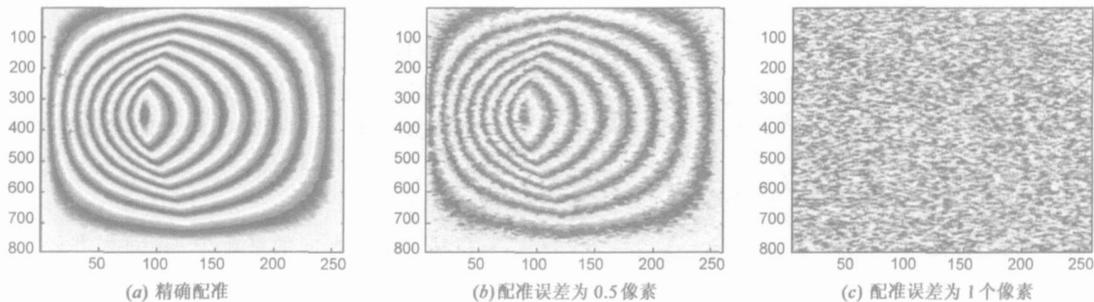


图 8 不同配准误差采用中值滤波的处理结果

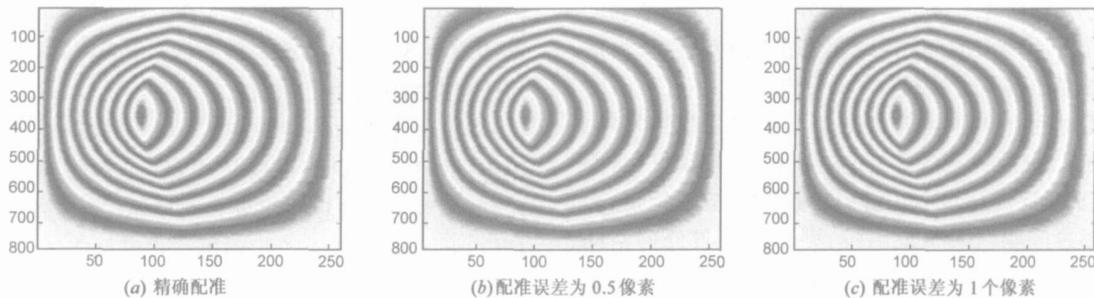


图 9 不同配准误差采用本文方法的处理结果

图 9 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 9 (a)、(b)、(c) 分别对应精确配准、配准误差为 0.5、1 像素时采用本文方法的处理结果. 由图中可见本文方法对配准误差的稳健性, 即使配准误差达到 1 个像素, 仍能获得几乎和精确配准一样的处理结果.

## 5 结论

本文提出一种基于联合单像素模型的子空间投影的干涉相位估计方法, 该方法根据配准误差的大小和方向构造最优加权观测矢量, 使其所对应的协方差矩

仿真数据描述: 本文仿真假定 3 颗卫星按 Cartwheel 构形进行编队飞行<sup>[10]</sup>, 我们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 281.46m, 卫星高度 750km, 下视角 45°, 利用一幅实测 SAR 图像 (图像分辨率为 3m × 3m) 作为地面场景背景来产生每一个 SAR 像素的回波功率, 并利用二维 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 23dB. 相干系数由垂直基线长度、局部地形坡度和 SNR 决定. 2 颗卫星接收的 SAR 图像数据按统计模型产生<sup>[11]</sup>.

图 8 为在不同配准误差的情况下采用中值滤波的处理结果: 其中图 8 (a)、(b)、(c) 分别对应精确配准、配准误差为 0.5、1 像素时采用中值滤波的处理结果. 由图中可见, 中值滤波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 个像素时, 已经无法得到干涉条纹.

阵的条件数几乎不受配准误差的影响, 同时利用了相邻像素的信息, 并且利用由干涉相位所构造的信号子空间向噪声子空间投影, 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.

## 参考文献:

- [1] Goldstein R M, Zebker H A, Werner C L. Satellite radar interferometry: two dimensional phase unwrapping [J]. Radio Sci,

- 1988, 23(4) : 713 - 720.
- [2] W Xu, I Cumming. A region-growing algorithm for InSAR phase unwrapping [J]. IEEE Transactions on GRS, 1999, 37(1) : 124 - 134.
- [3] M D Pritt, J S Shipman. Least-squares two-dimensional phase unwrapping using FFT's [J]. IEEE Transactions on GRS, 1994, 32(3) : 706 - 708.
- [4] 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.
- [5] Jong-Sen Lee, Konstantinos P Papathanassiou, et al. A new technique for noise filtering of SAR interferometric phase images [J]. IEEE Transactions on GRS, 1998, 36(5) : 1456 - 1465.
- [6] F Gini, F Lombardini, M Montanari. Layover solution in multi-baseline SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(4) : 1344 - 1356.
- [7] Zhenfang Li, Zheng Bao, Hai Li, Guisheng Liao. Image autocoregistration and InSAR interferogram estimation using joint subspace projection [J]. IEEE Transactions on GRS, 2006, 44(2) : 288 - 297.
- [8] Hai Li, Zhenfang Li, Guisheng Liao, Zheng Bao. An estimation method for InSAR interferometric phase combined with image autocoregistration [J]. Science in China, Series F, 2006, 49(3) : 386 - 396.
- [9] 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.
- [10] Zhenfang Li, Zheng Bao, Fengfeng Yang. Ground moving target detection and location based on SAR images for distributed spaceborne SAR [J]. Science in China, Series F, 2005, 48(5) : 632 - 646.
- [11] 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.

#### 作者简介:



李海男, 1976年8月出生于天津市, 现为西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室博士研究生。主要研究方向: 干涉合成孔径雷达信号处理。E-mail: elisha1976@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70余篇, 其中有10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、智能天线等。E-mail: gsliao@xidian.edu.cn