

对配准误差稳健的多基线相位展开方法

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: 提出了一种对配准误差稳健的多基线相位展开方法. 该方法首先根据配准误差的方向来确定最优联合观测矢量, 进而确定存在配准误差时的真实导向矢量, 并且用此导向矢量进行波束形成来进行相位展开, 能够同时完成图像配准、干涉相位噪声滤波和相位展开, 因此可以在 SAR 图像配准精度很差(可以允许达到一个分辨单元)的条件下得到稳健的相位展开性能, 仿真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; 多基线; 相位展开; 最优联合观测矢量; 真实导向矢量

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2008) 09-1672-06

A Robust Phase Unwrapping Method to Coregistration Error for Multibaseline InSAR Systems

LI Hai, LIAO Guosheng

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

Abstract: We propose a robust phase unwrapping method to coregistration error for multibaseline InSAR systems. In the method, the optimal joint data vector is determined by the direction of the coregistration, the true steering vector with large coregistration error is computed according to the data vector, and then the beamforming technique with the steering vector is used to unwrap the InSAR interferometric phase. The method can carry out image coregistration, interferometric phase noise filtering and phase unwrapping simultaneously. Computer simulation results show that the method can provide accurate estimate of the absolutely interferometric phase even when the coregistration error reaches one pixel.

Key words: interferometry synthetic aperture radar (InSAR); coregistration error; multibaseline; phase unwrapping; optimal joint data vector; true steering vector

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^[1,2]. 为了准确、高精度获取任意地形信息, 研究多基线 InSAR 技术已经成为一个热点, 也是未来发展的趋势^[3]. InSAR 技术中的三大关键处理步骤是 SAR 图像配准、干涉相位噪声滤波和相位展开(即估计绝对干涉相位).

针对多基线 InSAR 系统, Thompson 和 Robertson 提出利用级联迭代方法进行相位展开^[4], 即先利用较短基线展开干涉相位以减少相位展开误差, 然后再利用较长基线来进一步展开相位以提高高程测量精度, 既利用了短基线较好的相位展开性能, 又保持了长基线高程测量的高精度性. Kim 和 Griffiths 利用 Kalman 滤波技术来展开多基线干涉相位^[5]. 由于干涉相位是一个随机过程^[2], 其概率分布与相干系数有关. 因此应该利用统计估计技术来研究相位展开问题. 现在更多的研究趋向于用联合

统计方法来估计绝对干涉相位(或地形高度), 利用的统计准则包括最大似然方法^[6]和最大后验(贝叶斯)方法^[7,8]. 但是上述方法都要求图像配准的精度达到 $1/10 \sim 1/100$ 个分辨单元, 否则会严重影响相位展开性能^[9], 从而影响地形高程测量精度. 然而, 对于没有明显地貌特征的 SAR 图像, 精确配准会存在困难. 研究对图像配准稳健的相位展开方法, 具有非常重要的实用价值.

文献[10]中提出一种基于联合子空间投影的处理方法, 虽然能够在存在配准误差时获得满意的相位展开结果, 但在估计绝对干涉相位(即进行相位展开)时首先要确定噪声子空间维数^[9,10,15]. 本文提出一种对配准误差稳健的多基线相位展开方法. 该方法首先根据配准误差方向构造最优联合观测矢量, 进而确定存在配准误差时的真实导向矢量, 用此导向矢量进行波束形成来估计绝对干涉相位(即进行相位展开), 能够同时完成图像配准、干涉相位噪声滤波和相位展开, 因此能在 SAR 图像

配准精度较差的情况下得到准确的相位展开结果.

2 统计模型

假定所有 SAR 图像已精确配准, 且已去平地相位, 对同一像素 i (对应于同一地面单元) 的复数据排成矢量 $s(i)$ 可以写为下式^[11]:

$$s(i) = [s_1(i), s_2(i), \dots, s_M(i)]^T$$

$$= a(U) P [x_1(i), x_2(i), \dots, x_M(i)]^T + n(i) = a(U) P x(i) + n(i) \quad (1)$$

其中 $a(U) = [1, e^{j(B_{12}/B_2)U}, e^{j(B_3/B_2)U}, \dots, e^{j(B_{1M}/B_2)U}]^T$

称为像素 i 的阵列导向矢量, B_{1m} ($m = 2, 3, \dots, M$, M 为 SAR 图像数, 即卫星数) 为第 m ($m = 2, 3, \dots, M$) 颗卫星与卫星 1 (参考卫星) 之间的垂直基线(perpendicular base line), U 为第二颗卫星和参考卫星之间的绝对干涉相位 (非模糊相位), s_m ($m = 1, 2, \dots, M$) 为卫星 m ($m = 1, 2, \dots, M$) 所对应的复图像数据, $x(i)$ 为卫星阵列接收的像素 i 的复后向散射系数矢量 (不包含两者的波程差), T 表示转置操作, P 为 Hadamard 积, $n(i)$ 为加性热噪声. 其协方差矩阵 $C_s(i)$ 由下式给出:

$$C_s(i) = E \{s(i)s^H(i)\}$$

$$= a(U) a^H(U) P E \{x(i)x^H(i)\} + R_n^2 I$$

$$= a(U) a^H(U) P R_s(i) + R_n^2 I \quad (3)$$

$$R_s(i) = R_s^2(i) \begin{bmatrix} r_{11}(i, i), r_{12}(i, i), \dots, r_{1M}(i, i) \\ r_{21}(i, i), r_{22}(i, i), \dots, r_{2M}(i, i) \\ \vdots \\ r_{M1}(i, i), r_{M2}(i, i), \dots, r_{MM}(i, i) \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中 $R_s(i)$ 称为像素 i 的相关函数矩阵, $r_{mm}(i, i)$ ($0 \leq r_{mm}(i, i) \leq 1$, $n = 1, 2, \dots, M$, $m = 1, 2, \dots, M$) 表示像素 i 在 SAR 图像 m 和 n 之间的相关系数 (对角线元素为自相关系数且等于 1, 而非对角线元素为互相关系数), I 是一个 $M \times M$ 单位矩阵, $E \{ \}$ 表示统计平均, 上标 H 表示共轭转置, $R_s^2(i)$ 表示像素 i 的回波功率 (对同一像素, 各卫星的统计平均功率相同), R_n^2 表示噪声功率. 为了简化公式表达, 将下文的所有公式右边标识像素的符号 i 省略.

当 SAR 图像精确配准且相干系数足够高时, 我们可用波束形成的方法来估计绝对干涉相位 (即进行相位展开), 代价函数如下式所示^[12]:

$$J_1 = a^H(\hat{\zeta}_1) C_s(i) a(\hat{\zeta}_1) \quad (5)$$

式中 $a(\hat{\zeta}_1) = [1, e^{j(B_{12}/B_2)\hat{\zeta}_1}, e^{j(B_3/B_2)\hat{\zeta}_1}, \dots, e^{j(B_{1M}/B_2)\hat{\zeta}_1}]^T$, 上面的代价函数达到最大值时所对应的 $\hat{\zeta}_1$ 即为绝对干涉相位估计结果即 $\hat{\zeta}_1 = U$.

但是, 当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)进行绝对干涉相位估计,

将得不到准确的估计结果. 由前面的分析可见, 为了能在存在配准误差时, 得到准确的绝对干涉相位估计结果, 需要知道存在配准误差时的真实导向矢量. 下面给出真实导向矢量的推导过程.

以 3 幅干涉 SAR 图像为例, 为了讨论方便, 我们先讨论比较简单情况, 即只在一个方向上 (距离向或方位向, 图 1 中水平方向为距离向, 垂直方向为方位向) 存在配准误差. 当 SAR 图像 2 和 SAR 图像 1 之间的配准误差为 u_1 ($0 < u_1 < 1$) 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), SAR 图像 3 和 SAR 图像 1 之间的配准误差为 u_2 ($0 < u_2 < 1$) 像素, 且方向为垂直向下 (即卫星 3 中的像素相对于卫星 1 中的像素向下偏移) 时的联合观测矢量 $si(i)$ 的构造方法如图 1 所示 (一个圆环代表一个 SAR 像素). 我们称此时的观测矢量 $si(i)$ 为最优联合观测矢量^[13], 可表示为:

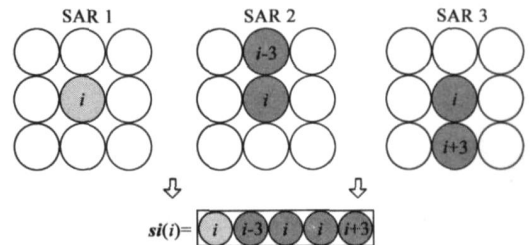


图 1 距离向或方位向存在配准误差时联合观测矢量构造方法

$$si(i) = [s_1(i), s_2(i-3), s_2(i), s_3(i), s_3(i+3)]^T \quad (6)$$

相应的统计协方差矩阵 $C_{si}(i)$ 可表示为 (证明过程见附录):

$$C_{si}(i) = E \{si(i) si^H(i)\}$$

$$= E \{[s_1(i), s_2(i-3), s_2(i), s_3(i), s_3(i+3)]^T [s_1(i), s_2(i-3), s_2(i), s_3(i), s_3(i+3)]^* \}$$

$$= R_s^2(i) ai(U) ai^H(U) + R_{ss}(i) + R_n^2 I \quad (7)$$

$$ai(U) = [1, r_{21}(i-3, i) e^{jU}, r_{21}(i, i) e^{jU}, r_{31}(i, i) e^{j(B_3/B_2)U}, r_{31}(i+3, i) e^{j(B_3/B_2)U}]^T \quad (8)$$

$$\begin{cases} r_{21}(m, i) = \frac{E \{s_2(m) s_1^*(i)\}}{\sqrt{E \{|s_2(m)|^2\} E \{|s_1(i)|^2\}}} \\ \quad (m = i-3, i) \\ r_{31}(n, i) = \frac{E \{s_3(n) s_1^*(i)\}}{\sqrt{E \{|s_3(n)|^2\} E \{|s_1(i)|^2\}}} \\ \quad (n = i, i+3) \end{cases} \quad (9)$$

其中 $*$ 表示共轭操作, $ai(U)$ 称为像素 i 的存在配准误差时的真实导向矢量, $R_{ss}(i)$ 称为干扰信号矩阵.

下面讨论更一般的情况, 即在距离向和方位向都存在配准误差的情况. 当 SAR 图像 2 和 SAR 图像 1 之间的方位向配准误差为 L_1 ($0 < L_1 < 1$) 像素, 且方向为垂直向上, 距离向配准误差为 G ($0 < G < 1$) 像素, 且方向为

水平向右, SAR 图像 3 和 SAR 图像 1 之间的方位向配准误差为 L_2 ($0 < L_2 < 1$) 像素, 且方向为垂直向下, 距离向配准误差为 G_2 ($0 < G_2 < 1$) 像素, 且方向为水平向左时的联合观测矢量构造方法如图 2 所示(一个圆环代表一个 SAR 像素). 此时的观测矢量 $j_s(i)$ 可表示为:

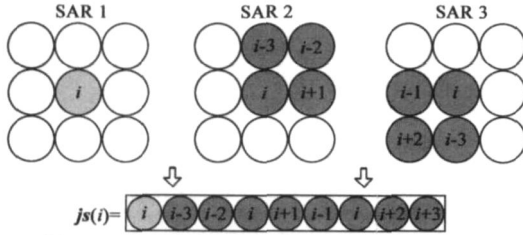


图 2 距离向和方位向都存在配准误差时的联合观测矢量构造方法

$$j_s(i) = [s_1(i), s_2(i-3), s_2(i-2), s_2(i), s_2(i+1), s_3(i-1), s_3(i), s_3(i+2), s_3(i+3))]^T \quad (10)$$

相应的统计协方差矩阵 $C_{j_s}(i)$ 可表示为:

$$C_{j_s}(i) = E\{j_s(i)j_s^H(i)\} \\ = E\{[s_1(i), s_2(i-3), s_2(i-2), s_2(i), s_2(i+1), s_3(i-1), s_3(i), s_3(i+2), s_3(i+3)]^T [s_1(i), s_2(i-3), s_2(i-2), s_2(i), s_2(i+1), s_3(i-1), s_3(i), s_3(i+2), s_3(i+3)]^* \} \\ = R_s^2(i) B(U) B^H(U) + R_{j_1}(i) + R_{j_2}^2(i) \quad (11)$$

$$B(U) = [1, r_{21}(i-3, i)e^{jU}, r_{21}(i-2, i)e^{jU}, r_{21}(i, i)e^{jU}, r_{21}(i+1, i)e^{jU}, r_{31}(i-1, i)e^{j(B_B/B_{12})U}, r_{31}(i, i)e^{j(B_B/B_{12})U}, r_{31}(i+2, i)e^{j(B_B/B_{12})U}, r_{31}(i+3, i)e^{j(B_B/B_{12})U}]^T \quad (12)$$

$$\begin{cases} r_{21}(m, i) = \frac{E\{s_2(m)s_1^*(i)\}}{\sqrt{E\{|s_2(m)|^2\}E\{|s_1(i)|^2\}}} \\ \quad (m = i-3, i-2, i, i+1) \\ r_{31}(n, i) = \frac{E\{s_3(n)s_1^*(i)\}}{\sqrt{E\{|s_3(n)|^2\}E\{|s_1(i)|^2\}}} \\ \quad (n = i-1, i, i+2, i+3) \end{cases} \quad (13)$$

其中 $B(U)$ 称为像素 i 存在配准误差时的真实导向矢量, $R_{j_1}(i)$ 称为干扰信号矩阵.

为了能在存在配准误差时, 得到准确的绝对干涉相位估计结果, 我们用基于真实导向矢量模型的波束形成算法来估计绝对干涉相位, 代价函数如下式所示:

$$J_2 = B^H(\hat{\zeta}) C_{j_s}(i) B(\hat{\zeta}) \quad (14)$$

$$B(\hat{\zeta}) = [1, r_{21}(i-3, i)e^{j\hat{\zeta}}, r_{21}(i-2, i)e^{j\hat{\zeta}}, r_{21}(i, i)e^{j\hat{\zeta}}, r_{21}(i+1, i)e^{j\hat{\zeta}}, r_{31}(i-1, i)e^{j(B_B/B_{12})\hat{\zeta}}, r_{31}(i, i)e^{j(B_B/B_{12})\hat{\zeta}}, r_{31}(i+2, i)e^{j(B_B/B_{12})\hat{\zeta}}, r_{31}(i+3, i)e^{j(B_B/B_{12})\hat{\zeta}}]^T \quad (15)$$

式(14)的代价函数取得最大值时所对应的即为绝对干涉相位估计结果即 $\hat{\zeta} = U$.

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^[1,2]. 在此步骤中, 我们不要求像传统的 InSAR 处理方法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, 因此大大减轻了图像配准的难度.

第二步, 确定误差方向

在粗配准条件下, 可用我们在文献[14]中的方法即利用求条件数的方法来确定误差方向(为了方便, 此处只讨论 SAR 图像 2 和 SAR 图像 1 之间的配准误差方向的确定方法, SAR 图像 3 和 SAR 图像 1 之间配准误差方向可用类似的方法求得).

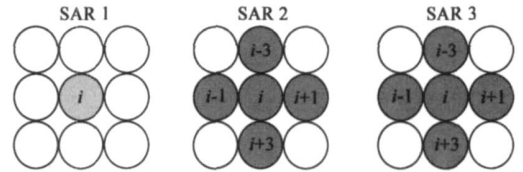


图 3 计算条件数示意图

(1) 确定方位向配准误差

如图 3 所示, 我们分别计算由 SAR 图像 1 中像素 i 和 SAR 图像 2 中像素 m ($m = i-3, i+3$) 所构造的观测矢量 $s_{dir}(i, m) = [s_1(i), s_2(m)]^T$ ($m = i-3, i+3$) 的协方差矩阵 $C_{dir}(i, m)$ ($m = i-3, i+3$) (维数为 2×2) 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.

条件数最大的像素用下式进行计算:

$$\hat{m} = \max_{m=i-3, i+3} \{\text{cond}(C_{dir}(i, m))\} \\ = \max_{m=i-3, i+3} \left\{ \text{cond} \left(\frac{1}{2K+1} \sum_{k=-K}^K s_{dir}(i+k, m) s_{dir}^H(i+k, m) \right) \right\} \quad (16)$$

其中 \hat{m} 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, 估计最优联合协方差矩阵

在确定误差方向的基础上, 我们按照类似于图 2 的方法构造最优联合观测矢量, 记为:

$$j_{s_{opt}}(i) = [s_1(i), s_2(m_1), s_2(m_2), s_2(m_3), s_2(m_4), s_3(n_1), s_3(n_2), s_3(n_3), s_3(n_4)]^T \quad (17)$$

用上面确定的最优联合观测矢量来估计最优联合协方差矩阵, 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, 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 $\hat{C}_{j_s_{opt}}(i)$ (维数 $9@9$) 由下式进行估计:

$$\hat{C}_{j_s_{opt}}(i) = \frac{1}{2K+1} \sum_{k=-K}^K j_{s_{opt}}(i+k) j_{s_{opt}}^H(i+k) \quad (18)$$

式中 $2K+1$ 为从相邻像素中获得的独立同分布样本数.

第四步, 估计真实导向矢量

我们用下式估计真实导向矢量:

$$\mathbf{B}_{true}(\zeta) = [1, r_{21}(m_1, i) e^{j\zeta}, r_{21}(m_2, i) e^{j\zeta}, r_{21}(m_3, i) e^{j\zeta}, r_{21}(m_4, i) e^{j\zeta}, r_{31}(n_1, i) e^{j(B_B/B_{12})\zeta}, r_{31}(n_2, i) e^{j(B_{13}/B_{12})\zeta}, r_{31}(n_3, i) e^{j(B_B/B_{12})\zeta}, r_{31}(n_4, i) e^{j(B_{13}/B_{12})\zeta}]^T \quad (19)$$

$$\left\{ \begin{aligned} r_{21}(m, i) &= \frac{\left| \sum_{k=-K}^K E s_2(m+k) s_1^*(i+k) \right|}{\sqrt{\sum_{k=-K}^K |s_2(m+k)|^2 \sum_{k=-K}^K |s_1(i+k)|^2}} \quad (m = m_1, m_2, m_3, m_4) \\ r_{31}(n, i) &= \frac{\left| \sum_{k=-K}^K E s_3(m+k) s_1^*(i+k) \right|}{\sqrt{\sum_{k=-K}^K |s_3(m+k)|^2 \sum_{k=-K}^K |s_1(i+k)|^2}} \quad (n = n_1, n_2, n_3, n_4) \end{aligned} \right. \quad (20)$$

第五步, 估计绝对干涉相位 (即进行相位展开)

我们可用如下的代价函数估计绝对干涉相位:

$$J_{IF} = \mathbf{B}_{true}^H(\zeta) \hat{C}_{j_s_{opt}}(i) \mathbf{B}_{true}(\zeta) \quad (21)$$

上面的代价函数达到最大值时所对应的干涉相位 $\hat{\zeta}$ 即为绝对干涉相位估计结果即 $\hat{\zeta} = \hat{\zeta}$.

对 SAR 图像中的每一像素分别执行上述五步操作, 就可以精确地恢复出整幅 SAR 图像的绝对干涉相位图 (即相位展开结果).

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.

仿真数据描述: 假定 3 颗卫星, 对应的垂直基线 (双程) 分别为: 6318 米 (卫星 1 和 2 之间的基线), 281146 米 (卫星 1 和 3 之间的基线), 34513 米 (卫星 2 和 3 之间的基线). 其他主要仿真参数如表 1 所示. 我们利用一幅实测 SAR 图像 (图像分辨率为 3 米 @3 米) 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, 按照统计模型^[16] 生成分布式卫星接收的干涉 SAR 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].

表 1 分布式卫星 SAR 仿真参数

| 卫星高度 | 下视角 | 重复频率 | 波长 | 卫星速度 |
|-------|-----|--------|-----|-----------|
| 750Km | 45° | 2594Hz | 3cm | 7481.5m/s |

当三幅 SAR 图像精确互配准时, 图 4(c) 为本文方

法的相位展开结果 (图中单位为弧度), 图 4(a) 和图 4(b) 分别为卫星 1 和 2 及卫星 1 和 3 之间的干涉相位图.

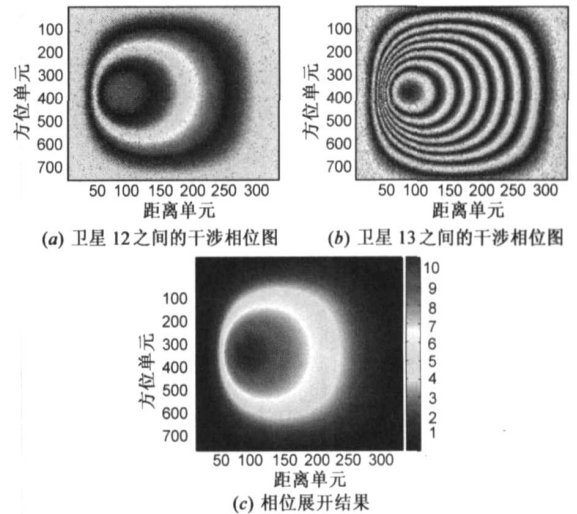


图 4 三幅 SAR 图像精确配准时的处理结果

当三幅 SAR 图像的配准误差分别为 $[0, 0.13, 0.15]$ 像素时 (即 SAR 图像 1、2 和 3 分别相对于 SAR 图像 1 的配准误差), 图 5(c) 为本文方法的相位展开结果, 图 5(a) 和图 5(b) 分别为卫星 1 和 2 及卫星 1 和 3 之间的干涉相位图. 图 5(d) 为此时的相位展开结果和精确配准时的相位展开结果之间的误差图 (图中单位为弧度) (即图 5(c) 和图 4(c) 之间的误差图).

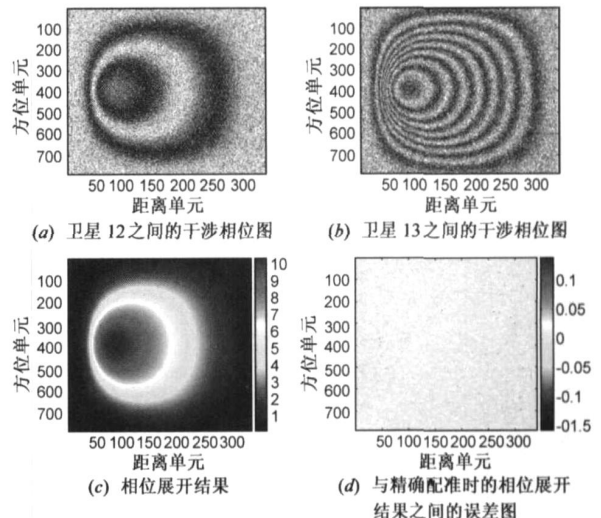


图 5 三幅 SAR 图像的配准误差分别为 $[0, 0.3, 0.5]$ 像素时的处理结果

当三幅 SAR 图像的配准误差分别为 $[0, 0.18, 1.10]$ 像素时, 图 6(c) 为本文方法的相位展开结果, 图 6(a) 和图 6(b) 分别为卫星 1 和 2 及卫星 1 和 3 之间的干涉相位图. 图 6(d) 为此时的相位展开结果和精确配准时的相位展开结果之间的误差图.

图 4、图 5 和图 6 的处理结果证明了本文方法能够

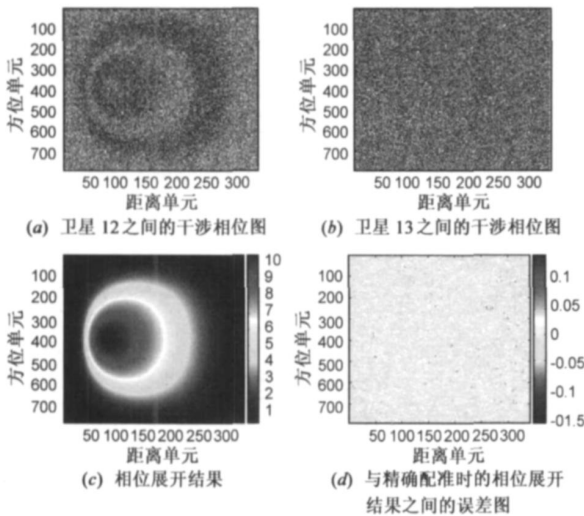


图 6 三幅 SAR 图像的配准误差分别为 [0,0.8,1.0] 像素时的处理结果

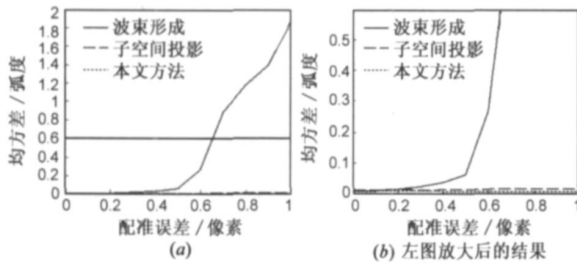


图 7 绝对干涉相位 (相位展开) 结果的均方差随配准误差的变化

同时完成图像精确配准(可以允许达到一个分辨单元)、干涉相位噪声滤波和相位展开。

图 7 为不同估计方法的干涉相位估计结果的均方差随配准误差的变化情况。由图中可见波束形成方法(即不采用真实导向矢量的波束形成)的绝对干涉相位估计结果的均方差随配准误差的增加而增大,而本文方

$$\begin{aligned}
 &= R_s^2(i) \begin{bmatrix} 1, & r_{12}(i, i-3)e^{-jU}, & r_{12}(i, i) e^{-jU} \\ r_{21}(i-3, i) e^{jU}, & 1, & r_{22}(i-3, i) \\ r_{21}(i, i) e^{jU}, & r_{22}(i, i-3), & 1 \end{bmatrix} + R_n^2 I = R_s^2(i) \begin{bmatrix} 1, & r_{21}^*(i-3, i) e^{jU}, & r_{21}^*(i, i) e^{jU} \\ r_{21}(i-3, i) e^{jU}, & 1, & r_{22}(i-3, i) \\ r_{21}(i, i) e^{jU}, & r_{22}(i, i-3), & 1 \end{bmatrix} + R_n^2 I \\
 &= R_s^2(i) \begin{bmatrix} 1, & r_{21}^*(i-3, i) e^{jU}, & r_{21}^*(i, i) e^{jU} \\ r_{21}(i-3, i) e^{jU}, & 1, & r_{22}(i-3, i) \\ r_{21}(i, i) e^{jU}, & r_{22}(i, i-3), & 1 \end{bmatrix} + R_n^2 I = R_s^2(i) C(U) C^H(U) + R_s^2(i) \\
 &\quad + \begin{bmatrix} 0, & 0, & 0 \\ 0, & 1 - |r_{21}(i-3, i)|^2, & r_{22}(i-3, i) - r_{21}(i-3, i) r_{21}^*(i, i) \\ 0, & r_{22}(i, i-3) - r_{21}(i, i) r_{21}^*(i-3, i), & 1 - |r_{21}(i, i)|^2 \end{bmatrix} + R_n^2 I = R_s^2(i) C(U) C^H(U) + R_i(i) + R_n^2 I \quad (A2)
 \end{aligned}$$

$$C(U) = [1, r_{21}(i-3, i) e^{jU}, r_{21}(i, i) e^{jU}]^T \quad (A3)$$

$$r_{21}(m, i) = \frac{E\{s_2(m) s_1^*(i)\}}{\sqrt{E\{|s_2(m)|^2\} E\{|s_1(i)|^2\}}}, (m = i-3, i) \quad (A4)$$

法可获得和联合子空间投影方法一样好的处理结果。

5 结论

本文研究了多基线 InSAR 相位展开问题,提出了一种新的多基线相位展开方法。本文方法基于真实导向矢量模型并采用波束形成技术,能够同时利用相邻像素的相干信息,因此具有自动图像配准、干涉相位噪声滤波和相位展开功能。仿真结果表明本文不但可以获得很好的相位展开结果,而且还可以大大降低对 SAR 图像配准精度的要求(可以允许达到一个分辨单元)。

附录: 证明式(7)成立

为了方便,我们先讨论比较简单情况,以 2 幅干涉 SAR 图像为例, SAR 图像 2 和 SAR 图像 1 之间的配准误差为 u_1 ($0 < u_1 < 1$) 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),此时的联合观测矢量 $ss(i)$ 的构造方法如图 A1 所示(一个圆环代表一个 SAR 像素),可表示为:

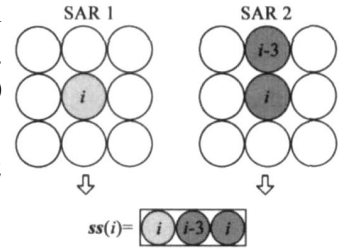


图 A1 联合观测矢量的构造方法

$$ss(i) = [s_1(i), s_2(i-3), s_2(i)]^T \quad (A1)$$

其协方差矩阵 $C_{ss}(i)$ 可表示为:

$$\begin{aligned}
 C_{ss}(i) &= E\{ss(i) ss^H(i)\} \\
 &= E\{[s_1(i), s_2(i-3), s_2(i)]^T [s_1(i), s_2(i-3), s_2(i)]^*\} \\
 &= \begin{bmatrix} E\{s_1(i) s_1^*(i)\}, & E\{s_1(i) s_2^*(i-3)\}, & E\{s_1(i) s_2^*(i)\} \\ E\{s_2(i-3) s_1^*(i)\}, & E\{s_2(i-3) s_2^*(i-3)\}, & E\{s_2(i-3) s_2^*(i)\} \\ E\{s_2(i) s_1^*(i)\}, & E\{s_2(i) s_2^*(i-3)\}, & E\{s_2(i) s_2^*(i)\} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$R_{ii}(i) = R_{\xi}^2(i) \begin{bmatrix} 0, & 0, & 0 \\ 0, & 1 - |r_{21}(i-3, i)|^2, & r_{22}(i-3, i) - r_{21}(i-3, i)r_{21}^*(i, i) \\ 0 & r_{22}(i, i-3) - r_{21}(i, i)r_{21}^*(i-3, i), & 1 - |r_{21}(i, i)|^2 \end{bmatrix} \quad (A5)$$

其中*表示共轭操作, $C(U)$ 称为像素*i*的存在配准误差时的真实导向矢量, $R_{\xi}(i)$ 称为干扰信号矩阵。

用和前面类似的方法可证明式(7)成立。

参考文献:

- [1] Rosen P A, Hensley S, Joughin I R, et al. Synthetic Aperture Radar Interferometry[J]. Proceeding of the IEEE, 2000, 88(3): 333- 382.
- [2] Li F, Goldstein. Studies of multibaseline spaceborne interferometric synthetic aperture radars [J]. IEEE Transactions on GRS, 1990, 28(1): 88- 97.
- [3] G Krieder, H Fiedler, J Mittermayer, et al. Analysis of multistatic configurations for spaceborne SAR interferometry[J]. IEEE Proc.2 Radar Sonar Navig, 2003, 150(3): 87- 96.
- [4] D G Thompson, A E Robertson, et al. Multibaseline interferometric SAR for iterative height estimation[A]. Proceeding of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symp. 99[C]. USA: IEEE, 1999. 251- 253.
- [5] MG Kim and H D Griffiths. Phase unwrapping of multibaseline interferometry using Kalman filtering[A]. Seventh IEEE International Conference on Image Processing and Its Appli. [C]. London, UK: IEE, 1999. 813- 817.
- [6] V Pascazio and G Schirinzi. Multifrequency InSAR height reconstruction through maximum likelihood estimation of local planes parameters[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(12): 1478- 1489.
- [7] G Poggi, A P R Ragozini, D Servadei. A Bayesian approach for SAR interferometric phase restoration[A]. Proceeding of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symp. 2000 [C]. Naples Univ., Italy: IEEE, 2000. 3202- 3205.
- [8] L Ying, D C Munson, R Koetter, et al. Multibaseline InSAR terrain elevation estimation: A dynamic programming approach [A]. Proceeding of the IEEE International Conference on Image Processing[C]. Univ of Illinois, USA: IEEE, 2003. 1522- 4880.
- [9] Zhenfang Li, Zheng Bao, Hai Li, et al. Image autocoregistration and InSAR interferogram estimation using joint subspace projection[J]. IEEE Transactions on GRS, 2006, 44(2): 288- 297.
- [10] Zhenfang Li, Zheng Bao, Zhiyong Suo. A joint image coregistration, phase noise suppression and phase unwrapping method based on subspace projection for multibaseline InSAR Systems [J]. IEEE Transactions on GRS, 2007, 45(3): 584- 591.
- [11] Hai Li, Guisheng Liao. 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.

- [12] Lombardini F, Montanari M, Gini Fulvio. Reflectivity Estimation for multibaseline interferometric radar imaging of layover extended sources[J]. IEEE Transactions on SP, 2003, 51(6): 1508- 1519.
- [13] Hai Li, Guisheng Liao. An estimation method for InSAR interferometric phase based on generalized steering vector [J]. Progress in Natural Science, 2007, 17(11): 1555- 1564.
- [14] Hai Li, Guisheng Liao. An estimation method for InSAR interferometric phase with adaptive image coregistration[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(3): 420- 425.
- [15] Hai Li, Zhenfang Li, Guisheng Liao, et al. An estimation method for InSAR interferometric phase combined with image autocoregistration[J]. Science in China, Series F, 2006, 49(3): 386- 396.
- [16] 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。

Email: elisha1976@163.com



廖桂生 男, 1963年生于广西。现为西安电子科技大学信号与信息处理学科博士生导师, 先后主持和承担了国防973项目课题、国家/8630高新技术项目、国防科技预研、国家自然科学基金等十余项科研任务, 其中获省部级科技进步奖一等奖1项、二等奖3项、三等奖1项, 1996年获光华科技三等奖, 1998年获陕西省青年科技奖, 2004年4月入选国家人事部颁发的首批/新世纪百千万人才工程国家级人选。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。

Email: gsliao@xidian.edu.cn