

文章编号: 1671-8860(2010)03-0328-06

文献标志码: A

利用 CSSM 进行多频 InSAR 相位融合及 DEM 重构

张 森¹ 唐劲松¹ 杨海亮¹ 陈 鸣¹

(1 海军工程大学电子工程学院, 武汉市解放大道 717 号, 4301033)

摘要: 提出了一种基于相关信号子空间处理方法(coherent signal subspace method, CSSM)的多频带 InSAR 自适应 DEM 重构方法, 采用广义像素模型对各频带 InSAR 信号建模, 再用 CSSM 中构造聚焦矩阵的思想将多频带相关矩阵变换到参考频率上, 然后采用子空间投影方法来估计高程信息。该方法可以在图像配准精度很差(可以允许达到一个分辨单元)的条件下得到稳健的估计性能, 仿真数据和 SIR-C 实际雷达数据验证了此方法的有效性。

关键词: InSAR; 配准误差; 多频; 广义像素模型; DEM 重构

中图法分类号: P237.3

多频带雷达系统具有诸多优点, 但多频带也给干涉信号处理带来了新的问题, 不同频带得到不同的干涉相位图, 必须对这些干涉相位图进行综合, 以得到比单个频带更加精确更加稳健的地形重构性能。针对多频带系统, Lanari 等提出采用级联迭代与 Kalman 滤波相结合的方法进行相位展开^[1]。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和最大后验(贝叶斯)方法。上述方法都要求图像配准的精度达到 1/10~1/100 个分辨单元, 否则会严重影响相位展开的性能, 从而影响地形高程测量的精度。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自适应相位融合及 DEM 重构方法, 具有非常重要的实用价值。广义像素模型的提出为干涉图像的处理开辟了一条新的途径^[2-9]。

本文根据广义像素模型, 提出了一种基于 CSSM 的多频带自适应 DEM 重构方法, 其基本思想是将多个频带的干涉相位信息映射至一个参考频点上, 直接估计出该参考频点上的解卷后干涉相位图, 再由此参考频率上的干涉相位来重构 DEM。多频 InSAS 与多频 InSAR 信号处理过程相似, 本文方法可以直接应用于 InSAS 中。本文方法也可以应用于多基线 InSAR 的 DEM 重构。

1 信号模型

假定所有频带的 SAR 图像已经精确配准, 且已去平地相位。设系统具有 K 个频带, 第 k 个频带图像的同一像素 (n, m) (对应于同一地面单元) 的复数据排成矢量 $s(f_k; n, m)$ 可以写为:

$$s(f_k; n, m) = a(\varphi_k; n, m)x(f_k; n, m) + n(\varphi_k; n, m) \quad (k = 0, 1, \dots, K-1) \quad (1)$$

式中, $a(\varphi_k; n, m) = \text{diag}[1 \ e^{j\varphi_k(n, m)}] = \text{diag}[1 \ e^{j2\pi f_k d_{nm}/c}]$ 为第 k 个频带第 (n, m) 个像素对的空间导向矩阵(或叫阵列导向矩阵), $\varphi_k(n, m)$ 为第 k 个频带上 (n, m) 的绝对干涉相位(非模糊相位), 也即为所求, c 为光速, d_{nm} 为两个接收器对所求像素所对应的地面区域的波程差; $x(f_k; n, m)$ 为第 k 个频带上 (n, m) 像素对的复反射系数矢量; $n(f_k; n, m)$ 是背景加性噪声。

在式(1)中, 复数据 $s(f_k; n, m)$ 和噪声矩阵 $n(f_k; n, m)$ 均假设为独立零均值复随机过程, 并具有有限的二阶和四阶矩。背景噪声 $n(f_k; n, m)$ 为时间白和空间白噪声, 此外, 在频率上为独立同分布, 方差为 σ_n^2 。此时, 对应的协方差矩阵可表示为:

$$C_s(f_k; n, m) = E\{s(f_k; n, m)s(f_k; n, m)^H\} = a(\varphi_k; n, m)E\{x(f_k; n, m)x^H(f_k; n, m)\} \cdot$$

$$\begin{aligned} & \mathbf{a}^H(\varphi_k; n, m) + \sigma_n^2 \mathbf{I} = \\ & \mathbf{a}(\varphi_k; n, m) \mathbf{R}_s(f_k; n, m) \mathbf{a}^H(\varphi_k; n, m) + \sigma_n^2 \mathbf{I} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $\mathbf{R}_s(f_k; n, m)$ 为像素对 (n, m) 在 f_k 上的相关函数矩阵; \mathbf{I} 为 2×2 的单位矩阵; $E\{\cdot\}$ 和上标 H 表示统计平均和矢量共轭转置; σ_n^2 为像素 (n, m) 的回波能量。

如果要得到式(1), SAR 图像必须精确配准,但在实际处理中,配准精度在低相干的区域往往大于 $1/10$ 个像素。考虑到精确配准的困难,本文采用文献[2]中提出的广义像素模型,即利用所估计像素对和相邻像素对来联合估计绝对干涉相位。

若平地假设不成立,可以采取文献[3]中的补偿方法进行平地补偿。在平地补偿过程中,利用一个频带的数据进行距离和方位向的坡度估计,然后可以用估计结果直接在其他各个频带中补偿。为了简化公式表达,将下文所有公式标识像素的符号 (n, m) 和下标 nm 省略。

2 基于 CSSM 的多频相位融合及 DEM 重构方法

CSSM 算法由 H. Wang 和 M. Kaveh 提出,用来估计宽带信号的波达方向^[10]。它将宽带信号分解成若干子带,然后采用聚焦矩阵技术将多

$$\mathbf{T}(f_k) = \begin{bmatrix} a_1^{(d)}(\varphi_0)/a_1^{(d)}(\varphi_k) & & & \\ & a_2^{(d)}(\varphi_0)/a_2^{(d)}(\varphi_k) & & \\ & & \ddots & \\ & & & a_{18}^{(d)}(\varphi_0)/a_{18}^{(d)}(\varphi_k) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, $a_z^{(d)}(\varphi_k)$ ($z=1, 2, \dots, 18$) 为 $\mathbf{A}(\varphi_k)$ 对角线上的第 z 个元素。上标 (d) 表示假定波程差已知且等于 d ,因此,式(4)可以写成:

$$\mathbf{C}_{\text{gen}} = \mathbf{A}(\varphi_0) \left(\sum_{k=0}^{K-1} \mathbf{R}_{js}(f_k) \right) \mathbf{A}^H(\varphi_0) + K\sigma_n^2 \mathbf{I} \quad (6)$$

令 $\mathbf{R}_{\text{gen}} = \sum_{k=0}^{K-1} \mathbf{R}_{js}(f_k)$ 。由于在各个频带上, $\mathbf{R}_{js}(f_k)$ 在精确配准时、存在 0.5 个像素的配准误差时以及存在 1 个像素的配准误差时都为实数^[2],因此, \mathbf{R}_{gen} 在上述情况下也为实数。经过聚焦处理后,多个频点的信息被无损失地融合在一个频段内,此时就可以采用单频的估计方法来估计干涉相位。

由于 \mathbf{R}_{gen} 不包含噪声成分,因此 \mathbf{R}_{gen} 可以进行特征值分解得:

各个子带的信息进行融合,再采用窄带处理的方法估计波达方向。本文将 CSSM 的融合思想应用于多频图像融合。

构造聚焦矩阵 $\mathbf{T}(f_k)$ ($k=1, 2, \dots, K-1$),将阵列导向矩阵变换到 f_0, f_1 即参考频率,因此,可以得到:

$$\mathbf{A}(\varphi_0) = \mathbf{T}(f_k) \mathbf{A}(\varphi_k) \quad (k=1, 2, \dots, K-1) \quad (3)$$

此时, $\mathbf{T}(f_0) = \mathbf{I}$ 。可以计算全局协方差矩阵 \mathbf{C}_{gen} :

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{\text{gen}} = & \sum_{k=0}^{K-1} \alpha_k \mathbf{T}(f_k) \mathbf{C}_{js}(f_k) \mathbf{T}^H(f_k) = \\ & \mathbf{A}(\varphi_0) \left(\sum_{k=0}^{K-1} \alpha_k \mathbf{R}_{js}(f_k) \right) \mathbf{A}^H(\varphi_0) + \\ & \sigma_n^2 \sum_{k=0}^{K-1} \alpha_k \mathbf{T}(f_k) \mathbf{T}^H(f_k) \end{aligned} \quad (4)$$

式中, α_k 为各频带信噪比的归一化加权系数,不失一般性,假设 $\alpha_k = 1$ 。理想情况下,聚焦矩阵必须在干涉相位的整个取值范围内满足式(3),且为酉矩阵。否则,聚焦矩阵将改变各频点的特征值分布,进而改变信号子空间的结构。本文中,假设能够预先得到一个较粗略的波程差,也就是已经获得所估计区域地形的先验知识,如精度较低的 DEM 图等。因此,可以采用一种简单实用的方法来构造近似的聚焦矩阵^[10],具体形式如式(5)所示:

$$\mathbf{R}_{\text{gen}} = \sum_{l=1}^L \lambda_{\text{sgr}}^{(l)} \boldsymbol{\beta}_{\text{sgr}}^{(l)} \boldsymbol{\beta}_{\text{sgr}}^{(l)H} \quad (7)$$

式中, L 为 \mathbf{R}_{gen} 主特征值 $\lambda_{\text{sgr}}^{(l)}$ ($l=1, 2, \dots, L$) 的个数; $\boldsymbol{\beta}_{\text{sgr}}^{(l)}$ ($l=1, 2, \dots, L$) 为对应的特征矢量。将式(7)代入式(6),可得:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{\text{gen}} = & \mathbf{A}(f_0) \left(\sum_{l=1}^L \lambda_{\text{sgr}}^{(l)} \boldsymbol{\beta}_{\text{sgr}}^{(l)} \boldsymbol{\beta}_{\text{sgr}}^{(l)H} \right) \mathbf{A}^H(f_0) + \\ & K\sigma_n^2 \mathbf{I} = \sum_{l=1}^L \lambda_{\text{sgr}}^{(l)} [\mathbf{A}(f_0) \boldsymbol{\beta}_{\text{sgr}}^{(l)}] [\mathbf{A}(f_0) \boldsymbol{\beta}_{\text{sgr}}^{(l)}]^H + \\ & K\sigma_n^2 \mathbf{I} \end{aligned} \quad (8)$$

显然, $\mathbf{A}(f_0) \boldsymbol{\beta}_{\text{sgr}}^{(l)}$ ($l=1, 2, \dots, L$) 相互正交,也意味着 \mathbf{C}_{gen} 的联合信号子空间由 $\mathbf{A}(f_0) \boldsymbol{\beta}_{\text{sgr}}^{(l)}$ ($l=1, 2, \dots, L$) 张成。由于 $\mathbf{A}(f_0) \boldsymbol{\beta}_{\text{sgr}}^{(l)}$ ($l=1, 2, \dots, L$) 的模为 1,式(8)中 \mathbf{C}_{gen} 可特征分解为:

$$\mathbf{C}_{\text{gen}} = \sum_{l=1}^L \lambda_{\text{sgr}}^{(l)} [\mathbf{A}(f_0) \boldsymbol{\beta}_{\text{sgr}}^{(l)}] [\mathbf{A}(f_0) \boldsymbol{\beta}_{\text{sgr}}^{(l)}]^H +$$

$$\sigma_n^2 I = \sum_{l=1}^L (\lambda_{\text{sgr}}^{(l)} + \sigma_n^2) \boldsymbol{\beta}_{\text{sgr}}^{(l)} \boldsymbol{\beta}_{\text{sgr}}^{(l)H} + \sum_{p=1}^{18-L} \sigma_p^2 \boldsymbol{\beta}_{\text{ngc}}^{(p)} \boldsymbol{\beta}_{\text{ngc}}^{(p)H} \quad (9)$$

式中, $\boldsymbol{\beta}_{\text{sgr}}^{(l)}$ ($l=1, 2, \dots, L$) 为 \mathbf{C}_{gen} 的主特征矢量, 它们张成与 $\mathbf{A}(f_0) \boldsymbol{\beta}_{\text{sgr}}^{(l)}$ ($l=1, 2, \dots, L$) 相同的联合信号子空间:

$$\begin{aligned} U_s = \text{span}\{\boldsymbol{\beta}_{\text{sgr}}^{(1)}, \boldsymbol{\beta}_{\text{sgr}}^{(2)}, \dots, \boldsymbol{\beta}_{\text{sgr}}^{(L)}\} = \\ \text{span}\{\mathbf{A}(f_0) \boldsymbol{\beta}_{\text{sgr}}^{(1)}, \mathbf{A}(f_0) \boldsymbol{\beta}_{\text{sgr}}^{(2)}, \dots, \mathbf{A}(f_0) \boldsymbol{\beta}_{\text{sgr}}^{(L)}\} \end{aligned} \quad (10)$$

同时, $\boldsymbol{\beta}_{\text{ngc}}^{(p)}$ ($p=1, 2, \dots, 18-L$) 为 \mathbf{C}_{gen} 对应的噪声特征向量, 张成联合噪声子空间:

$$U_n = \text{span}\{\boldsymbol{\beta}_{\text{ngc}}^{(1)}, \boldsymbol{\beta}_{\text{ngc}}^{(2)}, \dots, \boldsymbol{\beta}_{\text{ngc}}^{(18-L)}\} \quad (11)$$

将联合信号子空间向联合噪声子空间进行投影, 搜索合适的参考频率干涉相位使投影值最小时, 所得的干涉相位即为所求。利用此绝对干涉相位用传统方法即可实现 DEM 重构。

3 处理过程

3.1 图像粗配准

各频段接收器接收的回波数据分别经过成像处理后, 再利用传统的相关法进行图像粗配准处理。在此步骤中, 不要求像传统的处理方法那样要

$$\hat{\mathbf{T}}(f_k; m, n) = \begin{bmatrix} 1 \\ \exp(j\tilde{\varphi}_{mn}(f_0 - f_k)/f_0) \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

此时, $\hat{\mathbf{C}}_{\text{gen}}(m, n)$ 如式(15)所示:

$$\hat{\mathbf{C}}_{\text{gen}}(m, n) = \sum_{k=0}^{K-1} \hat{\mathbf{T}}(f_k; m, n) \hat{\mathbf{C}}_{js}(f_k; m, n) \cdot \hat{\mathbf{T}}^H(f_k; m, n) \quad (15)$$

3.3 估计相干函数矩阵

对样本协方差矩阵进行特征值分解, 把特征值按从大到小的顺序排列, 估计相干函数矩阵, 详见文献[2,3,5]。

3.4 估计绝对干涉相位

将样本联合信号子空间向联合噪声子空间投影, 定义代价函数:

$$J_c = \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^{G-L} (\mathbf{A}(f_0) \hat{\boldsymbol{\beta}}_{\text{sgr}}^{(l)})^H \hat{\boldsymbol{\beta}}_{\text{ngc}}^{(p)} \hat{\boldsymbol{\beta}}_{\text{ngc}}^{(p)H} (\mathbf{A}(f_0) \hat{\boldsymbol{\beta}}_{\text{sgr}}^{(l)}) \quad (16)$$

式中, $\hat{\boldsymbol{\beta}}_{\text{sgr}}^{(l)}$ ($l=1, 2, \dots, L$) 为样本主特征矢量; $\hat{\boldsymbol{\beta}}_{\text{ngc}}^{(p)}$ ($p=1, 2, \dots, G-L$) 为样本噪声特征矢量。采

求图像配准的精度达到亚像素级, 只需要图像配准精度达到像素级(配准误差小于一个分辨单元)就够了, 因此大大减轻了图像配准的难度。

3.2 构造全局协方差矩阵

首先, 需要估计每个频段的像素(n, m)的协方差矩阵 $\mathbf{C}_{js}(f_k; n, m)$ 。在实际中, 一般用样本协方差矩阵 $\hat{\mathbf{C}}_{js}(f_k; n, m)$ 估计, 设它的维数为 $G \times G$ 。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 $\hat{\mathbf{C}}_{js}(f_k; n, m)$ 可由式(12)进行估计:

$$\hat{\mathbf{C}}_{js}(f_k; n, m) = \frac{1}{MN} \sum_{p=-N/2}^{N/2-1} \sum_{q=-M/2}^{M/2-1} \mathbf{j}\mathbf{s}(f_k; n + p, m + q) \mathbf{j}\mathbf{s}(f_k; n + p, m + q)^H \quad (12)$$

式中, M 和 N 分别为距离向和方位向的样本个数, 样本总数为 MN 。

在构造聚焦矩阵时需要预先得到当前像素的波程差, 见式(5)。本文根据已有的 DEM 模型换算出当前像素的波程差^[11], 只需预知的 DEM 精度小于参考频率的模糊高度即可。设 \tilde{d}_{mn} 为预先 DEM 模型估计得出的波程差, $\tilde{\varphi}_{mn}$ 为对应的绝对干涉相位(不去平地), 即

$$\tilde{d}_{mn} = \frac{\tilde{\varphi}_{mn}}{2\pi f_0} \quad (13)$$

将式(13)代入式(5), 可以得到聚焦矩阵为:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \exp(j\tilde{\varphi}_{mn}(f_0 - f_k)/f_0) \end{bmatrix} \quad (14)$$

用式(16), 当 J_c 取最小值时可以得到融合后的干涉相位 $\hat{\varphi}_{\text{CSSM}}$ 。此时, 得到的是干涉相位的主值(即 $\varphi \in [-\pi, \pi]$), 而不是所需的绝对相位。

与 CSSM 在 DOA 估计中的处理不同, 在干涉处理中, 相位往往都是经过绕卷后的。式(14)中的聚焦矩阵是将其他频点的绝对干涉相位映射到参考频率上。但在式(14)处理之后, 所有的处理都只是针对相位的主值。在选择参考频率时, 一般选择高频作为参考频率, 此时通过聚焦处理可以提高干涉相位估计的精度。由于参考频率上的预先估计可以得到测绘地形的整体轮廓, 融合处理主要是增加地形的细节, 因此, 融合后的绝对干涉相位必然在预先估计的绝对干涉相位附近, 也就是说, 两者的相差不超过 2π , 其主值处于一个相位周期之内, 即

$$\hat{\varphi}_{\text{gen}} = \begin{cases} \hat{\varphi}_{\text{CSSM}} + [\text{floor}(\tilde{\varphi}_{mn}/2\pi) - 1] \times 2\pi, \\ \hat{\varphi}_{\text{CSSM}} - \text{mod}(\tilde{\varphi}_{mn}, 2\pi) > \pi \\ \hat{\varphi}_{\text{CSSM}} + [\text{floor}(\tilde{\varphi}_{mn}/2\pi) + 1] \times 2\pi, \\ \hat{\varphi}_{\text{CSSM}} - \text{mod}(\tilde{\varphi}_{mn}, 2\pi) < -\pi \\ \hat{\varphi}_{\text{CSSM}} + \text{floor}(\tilde{\varphi}_{mn}/2\pi) \times 2\pi, \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

式中, $\text{floor}(\cdot)$ 为向负无穷大的取整函数, $\text{mod}(x, y)$ 为以 y 为底的取模函数。由式(17)就可以得到融合多个频点的绝对干涉相位。

4 性能验证

本文不是通过粗精度的 DEM 来预先估计,而是通过频率较高的图像估计绝对干涉相位。利用文献[2]中的方法估计干涉相位,再用网络流方

法^[12]进行相位解缠,得到单幅图像的绝对干涉相位,再由此干涉相位来指导精度更高的绝对干涉相位估计,从而实现 DEM 重构。此外,由于 DEM 主要由绝对干涉相位决定,因此,实验主要考察本文方法在绝对干涉相位估计方面的性能。

仿真数据采用文献[13]中的方法,利用小面单元模型进行地面场景建模,然后根据系统几何模型和信号模型仿真回波信号,成像处理后,对两幅单视复图像进行相干处理得到干涉相位图。仿真参数如表 1 所示。

与多基线系统不同的是,不同频点的图像配准误差是一致的,只需对一对图像进行粗配准,其他图像按相同的偏移进行变换即可。图 1~3 分别为精确配准、配准误差为 0.5 个分辨单元、配准误差为 1 个分辨单元时的干涉相位图。

表 1 InSAS 仿真参数

Tab. 1 Simulation Parameters of InSAS System

对底深度	重复周期	测绘速度	频率 1	频率 2	带宽	仿真地形
30 m	0.1 s	0.4 m/s	100 KHz	160 KHz	20 KHz	圆锥

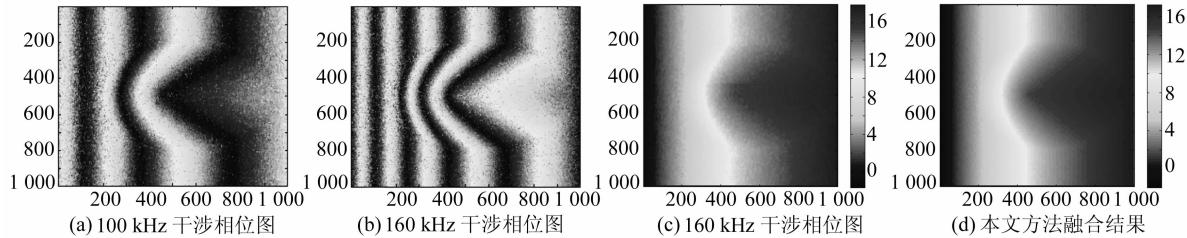


图 1 精确配准时的处理结果

Fig. 1 Processing Results of Precise Coregistration

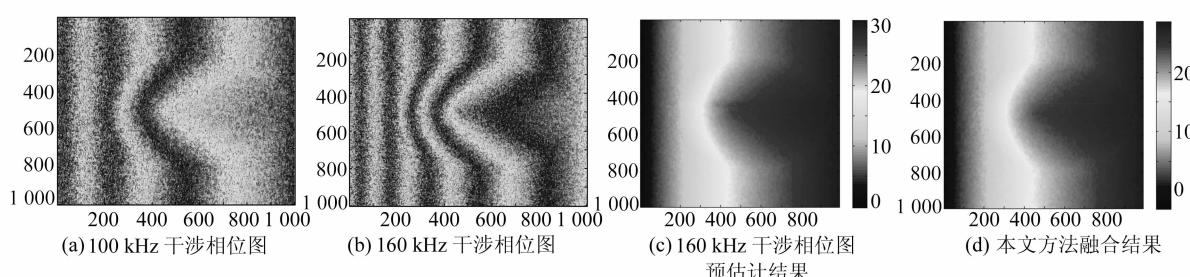


图 2 配准为 0.5 个分辨单元时的处理结果

Fig. 2 Processing Results with Coregistration Error of 0.5 Pixel

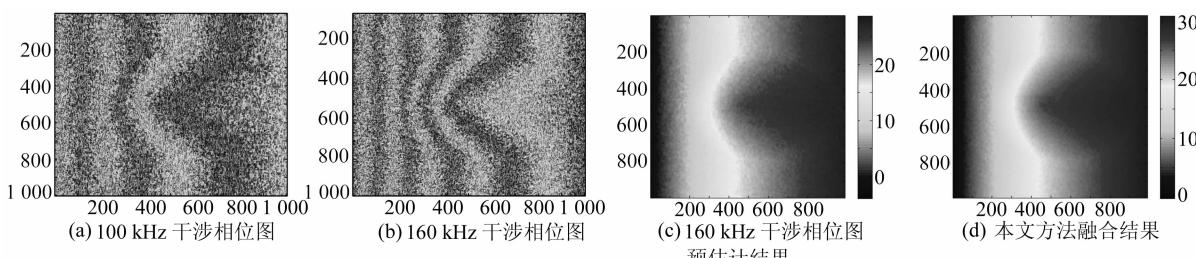


图 3 配准为 1 个分辨单元时的处理结果

Fig. 3 Processing Results with Coregistration Error of 1 Pixel

由图1~3可以看出,本文方法在主辅图像配准误差达1个像素时仍能估计出精确的干涉相位。而且,因为模拟地形是一个圆锥体,所以干涉相位越平滑则精度越高。从图上比较难看出差别,表2为不同配准误差时解缠相位与精确相位的均方根误差RMSE(φ)。从表2可以看出,多个频段图像融合得到的干涉图更加接近实际地形所形成的干涉相位。

图4为SIR-C对意大利Etna火山的测绘数据,图4(a)、4(b)分别是L波段和C波段粗配准后的干涉相位图;图4(c)为传统处理得到的L波段的解缠后干涉相位;图4(d)为传统处理得到的

表2 不同配准误差情况下单频相位和多频

融合相位的均方根误差

Tab. 2 RMSE of Single Frequency and Multi-frequency Fusion Situations with Different Coregistration Errors

	精确配准	配准误差为	配准误差为
		0.5像素	1像素
160 KHz 单频结果	0.084	0.097	0.094
双频融合	0.068	0.078	0.084

C波段的解缠后干涉相位,并作为预估计的结果;图4(e)为融合后的绝对干涉相位图;图4(f)为从图4(e)重构的DEM;图4(g)、4(h)分别为图4(d)、4(e)再次绕卷的结果;图4(i)为文献[6]方法所估

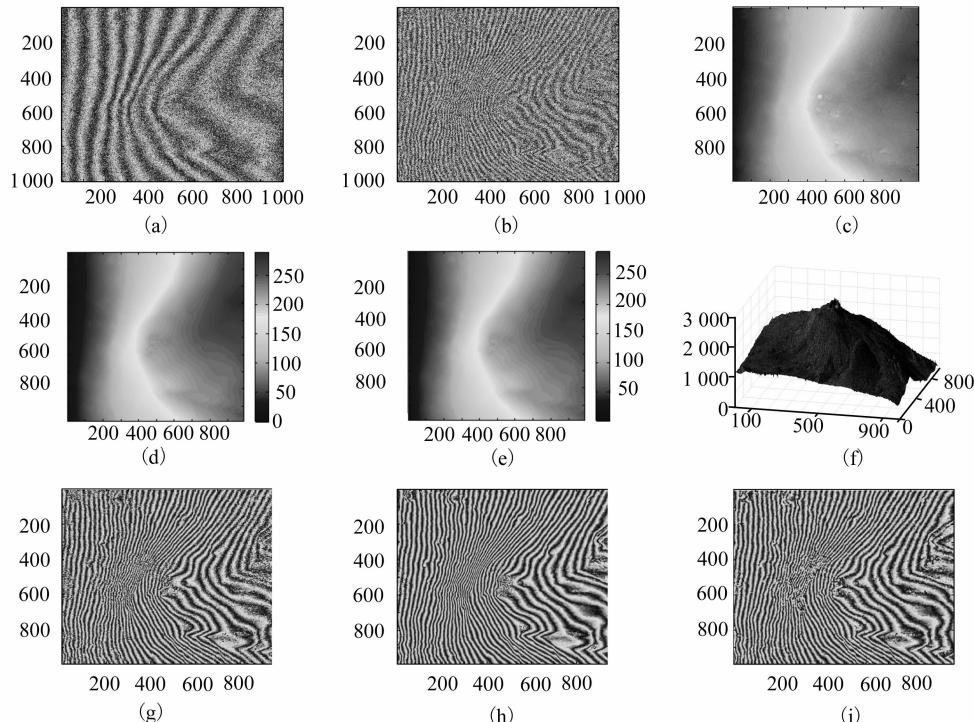


图4 SIR-C的实际数据处理结果

Fig. 4 Processing Results of SIR-C Real Dataset

计得到的绝对干涉相位再次绕卷的结果。

从图4可以看出,图4(c)明显比图4(d)和4(e)粗糙,而从图4(d)和图4(e)中比较难看出差别,通过再次绕卷的结果即图4(g)、4(h)可以明显地看出融合后的干涉相位比单频得到的相位有较大的改善,特别是在右侧地形变化较剧烈、C波段相干性较差的区域,通过多频信息融合可以有较大的改善。图4(h)和图4(i)相比,可以发现在条纹比较密集的区域和相干性较差的区域,本文方法具有更好的保持细节的能力。

5 结语

本文研究了多频InSAR的DEM重构问题,提出了一种基于CSSM算法的重构方法。本文方法基于广义像素模型,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、干涉相位噪声滤波等功能。仿真数据和SIR-C雷达实际数据处理结果表明,本文方法具有稳健的融合效果,并且可以大大降低对SAR图像配准精度的要求。

参考文献

- [1] 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 Transactions on GRS, 1996, 34(5): 1 097-1 114
- [2] Li Zhenfang, Bao Zheng, Li Hai, et al. Image Auto-coregistration and InSAR Interferogram Estimation Using Joint Subspace Projection [J]. IEEE Transactions on GRS, 2006, 44(2):288-297
- [3] 李海,李真芳,廖桂生,等. InSAR 干涉相位图生成的图像配准自补偿方法[J]. 中国科学(E辑), 2006, 36(2):191-210
- [4] 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
- [5] 李海,廖桂生. 基于广义导向矢量模型的 InSAR 干涉相位估计方法[J]. 自然科学进展, 2007,17(11): 1 555-1 564
- [6] 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
- [7] Li Zhenfang, Bao Zheng, 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 GRS, 2007, 45(3):584-591
- [8] 李海,廖桂生. 基于相关系数加权联合单像素模型的多基线相位展开方法[J]. 自然科学进展, 2008, 18(3): 313-322
- [9] 李海,廖桂生. 对配准误差稳健的多基线相位展开方法[J]. 电子学报, 2008,36(9):1 670-1 675
- [10] Wang H, Kaveh M. Coherent Signal-Subspace Processing for the Detection and Estimation of Angles of Arrival of Multiple Wideband Sources[J]. IEEE Transactions on Acoust, Speech, Signal Processing, 1985, 33(4): 823-831
- [11] Eineder M. Efficient Simulation of SAR Interferograms of Large Areas and of Rugged Terrain[J]. IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing, 2003,41(6): 1 415-1 427
- [12] When C W. Statistical-Cost Network-Flow Approaches to Two-Dimensional Phase Unwrapping for Radar Interferometry[D]. Stanford: Stanford University, 2001
- [13] 孙造宇,梁甸农,董臻. 星载分布式 InSAR 系统仿真研究[J]. 系统仿真学报. 2006, 18(6):1 538-1 541

第一作者简介:张森,博士生,主要研究方向为干涉合成孔径雷达和干涉合成孔径声纳信号处理。

E-mail:Johnson_xh@sina.com

Interferometric Phase Fusion and DEM Reconstruction Method with CSSM for Multi-frequency InSAR Systems

ZHANG Sen¹ TANG Jinsong¹ YANG Hailiang¹ CHEN Ming¹

(1 Electronic College of Engineering, Naval University of Engineering, 717 Jiefang Road, Wuhan 430033, China)

Abstract: A DEM reconstruction method based on CSSM (coherent signal subspace method) is proposed for multi-frequency InSAR systems. This method transforms the correlation matrices at many frequency bins into one general correlation matrix at one focusing frequency using a transformation matrix (focusing matrix), then estimates the elevation using subspace projecting method. The method can provide more accurate estimation of the height even when the coregistration error reaches one pixel than previous methods. The effectiveness and robustness of the method is verified by simulated data and SIR-C real data.

Key words: InSAR; coregistration error; multifrequency; general pixel model; DEM reconstruction