

## 机载干涉 SAR 区域网三维定位算法

毛永飞<sup>\*①</sup> 汪小洁<sup>②</sup> 向茂生<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(北京空间飞行器总体设计部 北京 100094)

<sup>②</sup>(北京系统工程研究所 北京 100101)

<sup>③</sup>(中国科学院电子学研究所微波成像技术国家重点实验室 北京 100190)

**摘要:** 区域网 3 维定位是指同时获取多个干涉合成孔径雷达(InSAR)场景中各像素点的北向、东向和高程向的地理坐标。联合定标是区域网 3 维定位的关键环节,能够保证 3 维位置精度和相邻场景间的位置衔接性,并且能够在稀少控制点的条件下实现大区域多场景的 3 维定位。该文提出一种适用于机载 InSAR 系统的联合定标算法,该算法对多个场景的 3 维位置同时定标。该算法利用最优化模型实现联合定标,并且在最优化模型中引入了权值,从而顾及到了不同质量、不同分布的控制点、同名点在联合定标中的权重差异。机载 InSAR 实测数据的实验结果表明,该算法在 3 维定位精度和实现过程的简洁度方面均优于传统的联合定标算法。

**关键词:** 合成孔径雷达; 干涉; 联合定标; 3 维定位; 加权最优化

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2013)01-0060-08

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2013.20107

## Joint Three-dimensional Location Algorithm for Airborne Interferometric SAR System

Mao Yong-fei<sup>①</sup> Wang Xiao-jie<sup>②</sup> Xiang Mao-sheng<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

<sup>②</sup>(Beijing Institute of System Engineering, Beijing 100101, China)

<sup>③</sup>(National Key Laboratory of Science and Technology on Microwave Imaging, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Joint three-dimensional location algorithms aim to simultaneously obtain the north, east, and height coordinates of each pixel in several adjacent Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) scenes. Joint calibration is a key procedure used to achieve an accurate three-dimensional location. It can ensure the continuity of three-dimensional locations among adjacent scenes, and achieve the location of large areas with few Ground Control Points (GCPs) using Tie Points (TPs). In this paper, a new joint calibration algorithm for airborne interferometric SAR that simultaneously calibrates north, east, and height coordinates is proposed. It employs a weighted optimization method to carry out calibration, and introduces weights to calibration to discriminate GCPs and TPs with different coherences and locations. The experimental results for airborne InSAR data show that the three-dimensional location accuracy obtained using the proposed calibration algorithm is better than that obtained using the traditional method.

**Key words:** Synthetic Aperture Radar (SAR); Interferometric; Joint calibration; Three-dimensional location; Weighted optimization

### 1 引言

干涉合成孔径雷达(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)在地形测绘、灾害监测等

领域有着广泛的应用,InSAR 能够获得观测场景的图像信息和 3 维位置信息。机载 InSAR 数据处理流程主要包括:运动补偿、成像、复图像对配准、干涉条纹生成、相干系数计算、干涉条纹滤波、相位解缠、干涉定标、3 维定位。精确的 3 维地理定位和几何校正是 InSAR 图像走向应用的前提和关键<sup>[1-3]</sup>,系统参数误差、航迹参数误差以及系统非理想特性的存在,使得 3 维定位几何模型中的参数取

2012-12-31 收到, 2013-01-21 改回; 2013-01-28 网络优先出版  
国家863计划(2007AA120302)和国家973计划(2009CB724003)资助  
课题

\*通信作者: 毛永飞 maoyongfei@gmail.com

值并不准确, 需要通过干涉定标来校准各参数, 以提高 3 维定位的精度<sup>[7-13]</sup>。传统的干涉定标算法是利用 3 维位置信息已知的地面控制点 (Ground Control Points, GCPs), 来闭环修正各干涉参数, 其具体实现方法是基于线性化误差近似的敏感度方程迭代算法<sup>[14-17]</sup>。

传统的 InSAR 定位算法通常分两步: 首先进行高程定位, 其次进行平面位置定位。其不足在于平面定位是建立在高程反演的基础之上, 数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 的误差会在一定程度上影响平面定位精度。鉴于此, 本文提出 3 维联合定位算法, 即由干涉相位出发, 同时获取目标的高程和平面位置 (平面位置包括北向位置和东向位置, 即纬度和经度)。

在机载 InSAR 系统测绘作业过程中, 通常难以保证所有场景都布放有足够的控制点, 因而必须采用联合定标算法来实现少量控制点条件下大区域多场景的干涉定标。传统的联合定标算法以单场景干涉定标为基础, 利用同名点 (Tie Points, TPs) 进行 3 维位置信息的传递, 进而实现所有场景的定标, 但其不足在于: 设计同名点位置信息的传递路径较为繁琐; 难以顾及不同质量和分布的控制点和同名点在定标中的权重差异。鉴于此, 本文提出了基于加权最优化模型的区域网 3 维联合定标算法, 该算法能够同时对多个场景的高程和平面位置进行定标, 并且能够方便地引入定标权值以顾及各控制点和同名点在定标中的权重差异, 最后文中给出了定标权值的计算方法。

## 2 3 维重建模型

在 InSAR 系统中, 目标位于距离球、多普勒锥、干涉相位双曲面的交点处<sup>[4]</sup>。距离球是以主天线相位中心为球心, 以斜距为半径的球面; 多普勒锥是以航迹方向为轴的圆锥, 圆锥顶角的大小取决于多普勒频率的大小; 干涉相位双曲面是以两天线相位中心为焦点的双曲面。对目标进行 3 维定位即是对距离方程、多普勒方程、干涉相位方程进行联立求解。但是, 为了分析处理的方便, 通常需要获得目标 3 维位置的闭式表达形式。

机载双天线 InSAR 系统的 3 维定位几何关系如图 1 所示。XYZO 为地理坐标系, X 指向正北方向, Y 指向正东方向, Z 指向正上方向, O 点为制图坐标系原点, 即投影带中央经线、赤道与零高程面三者的交点。X'Y'Z'A' 为航迹坐标系, X' 指向载机理想航迹方向 (即运动补偿中的参考航迹方向), Y' 指向理想航迹的右视方向 (以右侧视 SAR 为例), Z' 指向正上方向, A' 为主天线相位中心 A 在零高程面上

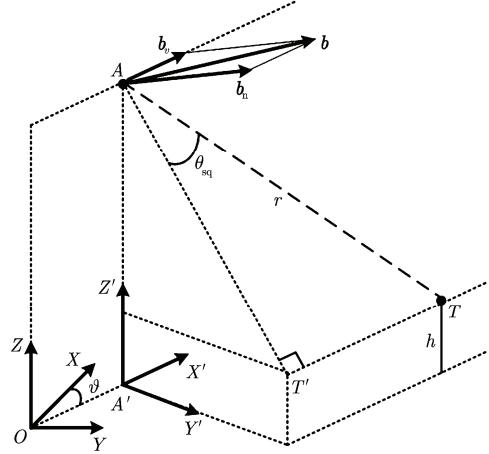


图 1 机载 InSAR 3 维定位几何关系

Fig. 1 Three-dimensional location geometry of airborne InSAR

的星下点。T 为场景目标, T' 为 T 在零多普勒面上的投影,  $\theta_{sq}$  为斜视角, h 为目标 T 的高程, r 为目标 T 处的斜距。b 为基线矢量 (由主天线指向副天线),  $b_n$  为交轨基线矢量,  $b_v$  为顺轨基线矢量。

3 维定位的目的是要获知目标 T 在地理坐标系 XYZO 中的位置。文献 [18] 首先采用视向量正交分解的方法, 详细推导了目标 T 在 X'Y'Z'A' 坐标系中的位置, 其次通过坐标平移和旋转得到目标 T 在坐标系 XYZO 中的位置, 即

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{\lambda f_{dc} r}{2v} \cos \vartheta - \left\{ \frac{s_1 b r}{b_n} \sin \theta_b \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda f_{dc}}{2v} \right)^2 - \beta^2} \right. \\ &\quad \left. - s_2 r \beta \sqrt{1 - \frac{b^2}{b_n^2} \sin^2 \theta_b} \right\} \sin \vartheta + x_0 \\ y &= \frac{\lambda f_{dc} r}{2v} \sin \vartheta + \left\{ \frac{s_1 b r}{b_n} \sin \theta_b \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda f_{dc}}{2v} \right)^2 - \beta^2} \right. \\ &\quad \left. - s_2 r \beta \sqrt{1 - \frac{b^2}{b_n^2} \sin^2 \theta_b} \right\} \cos \vartheta + y_0 \\ h &= H - \frac{s_1 s_2 b r}{b_n} \beta \sin \theta_b \\ &\quad - r \sqrt{\left( 1 - \frac{b^2}{b_n^2} \sin^2 \theta_b \right) \left( 1 - \left( \frac{\lambda f_{dc}}{2v} \right)^2 - \beta^2 \right)} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中,  $\lambda$  为雷达载波波长, b 为基线长度,  $b_n$  为交轨基线长度,  $b_v$  为顺轨基线长度, H 为天线 A 的高程, v 为平台速度,  $f_{dc}$  为目标处的多普勒中心,  $\theta_b$  表示基线 b 与 X'OY' 平面的夹角,  $\vartheta$  为目标处的干涉相位。s<sub>1</sub>, s<sub>2</sub>, Q 用于表征雷达的工作模式: 右侧视时 s<sub>1</sub> = 1, 左侧视时 s<sub>1</sub> = -1; 位于右侧时 s<sub>2</sub> = 1, 主天线位于左侧时 s<sub>2</sub> = -1; 一发双收模式时 Q = 1, 各自收发模式时 Q = 2; (x<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>, 0) 表示点 A 在坐标系

$XYZO$  中的位置坐标, 即天线在零高程面投影点的地理坐标;  $\vartheta$  表示由  $X'$  轴至  $X$  轴的夹角(逆时针方向为正), 即载机的真航向角;  $(x_0, y_0, 0)$  与  $\vartheta$  均可由机上的捷联惯导设备测量得到。式(1)在推导过程中未做任何近似, 并且考虑到了各种斜视关系、基线构型、天线侧视方向和雷达收发模式, 是一种精确而普遍适用的几何关系。

3 维定位即为求解目标  $T$  在地理坐标系  $XYZO$  中的坐标  $(x, y, h)$ 。诸多系统误差和测量误差的存在, 会导致式(1)中的参数存在偏差, 进而引入 3 维定位误差。因此, 为了提高 3 维定位精度, 有必要利用地面控制点信息对式(1)中的参数进行修正, 此过程称为干涉定标。干涉定标的实质即是利用控制点的真实位置, 修正 3 维定位模型中的参数, 进而提高定位精度。

### 3 区域网 3 维定标算法

令  $\widehat{\mathbf{X}} - \Delta \mathbf{X} = [b_n \ b_v \ \theta_b \ \phi \ f_{dc} \ r \ v \ H \ x_0 \ y_0 \ \vartheta \ \lambda]^T$  ( $b$  可由  $b_n, b_v$  表示, 即  $b = \sqrt{b_n^2 + b_v^2}$ ), 则式(1)可简写为

$$\begin{bmatrix} x & y & h \end{bmatrix}^T = \mathbf{T}(\widehat{\mathbf{X}} - \Delta \mathbf{X}) \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{T}(\cdot) = [x(\cdot) \ y(\cdot) \ h(\cdot)]^T$  表示式(1)所示的函数关系,  $\widehat{\mathbf{X}}$  为干涉参数的初值,  $\Delta \mathbf{X}$  为干涉参数的修正量, 不同位置处的干涉参数初值可能不同, 但干涉参数修正可认为是一致的。在式(2)中,  $\widehat{\mathbf{X}}$  为已知量,  $\Delta \mathbf{X}$  为待求量。

在多场景区域网联合定标中, 设第  $i(i=1, 2, \dots, I)$

块场景的待求解的干涉参数修正量为  $\Delta \mathbf{X}_i$ , GCP 点的数目为  $M_i$ , 该场景中第  $m(m=1, 2, \dots, M_i)$  个 GCP 处的 3 维位置为  $(x_{i,m}, y_{i,m}, h_{i,m})$ 、干涉参数初值为  $\widehat{\mathbf{X}}_{i,m}$ , 则 GCP 点处的约束条件为

$$\begin{bmatrix} x_{i,m} & y_{i,m} & h_{i,m} \end{bmatrix}^T = \mathbf{T}(\widehat{\mathbf{X}}_{i,m} - \Delta \mathbf{X}_i) \quad (3)$$

在联合定标中, 同名点是指同一地物在两个邻接场景中所对应的两个像素点, 因此两个场景中关于同名点 3 维位置的计算结果应当一致。设第  $j$  块与第  $j'$  ( $j, j' \in \{1, 2, \dots, I\}, j' \neq j$ ) 块场景相邻, 并且该两场景之间有  $N_{j,j'}$  对同名点, 则第  $n(n=1, 2, \dots, N_{j,j'})$  对同名点处的约束方程可写为

$$\mathbf{T}(\widehat{\mathbf{X}}_{j,n} - \Delta \mathbf{X}_j) = \mathbf{T}(\widehat{\mathbf{X}}_{j',n} - \Delta \mathbf{X}_{j'}) \quad (4)$$

联合定标相当于求解式(3)、式(4)所表征的方程组, 从而获得各场景的干涉参数偏差  $\Delta \mathbf{X}_i$  ( $i=1, 2, \dots, I$ ), 但其通常为非线性超定方程组, 难以直接求解。传统的定标算法采用基于线性化误差近似的敏感度迭代算法<sup>[14-17]</sup>, 该算法在处理联合定标时首先将式(3)进行线性化近似, 通过敏感度方程迭代求解参数修正量, 其次通过同名点 3 维位置信息的传递实现式(4)所表征的同名点约束条件, 其不足在于: 线性化的近似会造成精度损失, 并且联合定标的处理流程较为繁琐。

鉴于传统算法的不足, 考虑采用最优化的方法求解式(3)、式(4)联立的方程组, 即构造函数  $f(\cdot)$  如下:

$$f(\Delta \mathbf{X}_1, \Delta \mathbf{X}_2, \dots, \Delta \mathbf{X}_I) = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^I M_i + \sum_{j,j'} N_{j,j'}} \left\{ \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^{M_i} \left\| \mathbf{T}(\widehat{\mathbf{X}}_{i,m} - \Delta \mathbf{X}_i) - \begin{bmatrix} x_{i,m} & y_{i,m} & h_{i,m} \end{bmatrix}^T \right\|^2 + \sum_{j,j'} N_{j,j'} \left\| \mathbf{T}(\widehat{\mathbf{X}}_{j,n} - \Delta \mathbf{X}_j) - \mathbf{T}(\widehat{\mathbf{X}}_{j',n} - \Delta \mathbf{X}_{j'}) \right\|^2 \right\}} \quad (5)$$

此时, 联合定标问题转化为使得函数  $f(\cdot)$  取值最小的问题,  $f(\cdot)$  的定义域为使得干涉参数偏差  $\Delta \mathbf{X}_i$  的取值有物理意义的区间,  $f(\cdot)$  最小值点对应的  $\Delta \mathbf{X}_i$  ( $i=1, 2, \dots, I$ ) 取值即为联合定标的结果。在求解此问题时, 可以借鉴经典的最优化算法, 文献[18]给出了利用最速下降法实现最优化干涉定标的算法步骤。

$$f(\Delta \mathbf{X}_1, \Delta \mathbf{X}_2, \dots, \Delta \mathbf{X}_I)$$

$$= \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^I M_i + \sum_{j,j'} N_{j,j'}} \left\{ \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^{M_i} \left\| \begin{bmatrix} p_{x,i,m} & p_{y,i,m} & p_{h,i,m} \end{bmatrix}^T \cdot \left( \mathbf{T}(\widehat{\mathbf{X}}_{i,m} - \Delta \mathbf{X}_i) - \begin{bmatrix} x_{i,m} & y_{i,m} & h_{i,m} \end{bmatrix}^T \right) \right\|^2 + \sum_{j,j'} N_{j,j'} \left\| \begin{bmatrix} q_{x,j,j',n} & q_{y,j,j',n} & q_{h,j,j',n} \end{bmatrix}^T \cdot \left( \mathbf{T}(\widehat{\mathbf{X}}_{j,n} - \Delta \mathbf{X}_j) - \mathbf{T}(\widehat{\mathbf{X}}_{j',n} - \Delta \mathbf{X}_{j'}) \right) \right\|^2 \right\}} \quad (6)$$

### 4 加权定标算法

鉴于随机误差等因素的存在, 式(3)、式(4)中各方程的可信度并不完全一致<sup>[18]</sup>, 有必要区别对待各方程。于是考虑对各方程引入权值, 将其转化为加权最优化模型进行求解。

在式(6)中,  $p_{x,i,m}, p_{y,i,m}, p_{h,i,m}$  分别表示第  $i$  块场景中第  $m$  个 GCP 处的北向、东向和高程向位置约束方程的权值,  $q_{x,j,j',n}, q_{y,j,j',n}, q_{h,j,j',n}$  分别表示第  $j$  块和第  $j'$  块场景之间第  $n$  对 TP 点处的北向、东向和高程向位置约束方程的权值。可依据相位噪声、各维精度指标等因素对权值进行具体计算, 下文将对权值计算方法展开详述。

#### 4.1 依据相干系数加权

3 维位置误差可由相位误差表征, 相位误差可由相干系数表征<sup>[4,14,18,19]</sup>, 则相位噪声在各 GCP 点处引入的 3 维位置误差可表述如下:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} x_{i,m}^{\text{err}} & y_{i,m}^{\text{err}} & h_{i,m}^{\text{err}} \end{bmatrix}^T \\ &= \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \phi} \Big|_{i,m} \cdot \phi_{i,m}^{\text{err}} = \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \phi} \Big|_{i,m} \cdot \frac{1}{\sqrt{L_i}} \sqrt{\frac{1-\gamma_{i,m}^2}{2\gamma_{i,m}^2}} \end{aligned} \quad (7)$$

其中,  $\gamma_{i,m}$  表示相干系数(可在干涉处理阶段统计出来),  $L_i$  表示多视数,  $\phi_{i,m}^{\text{err}}$  表示相位误差,  $\partial \mathbf{T} / \partial \phi$  表示 3 维位置关于干涉相位的敏感度。

相位噪声在各 TP 点处引入的 3 维位置误差可表述如下:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} x_{j,j',n}^{\text{err}} & y_{j,j',n}^{\text{err}} & h_{j,j',n}^{\text{err}} \end{bmatrix}^T \\ &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \phi} \Big|_{j,n} \cdot \phi_{j,n}^{\text{err}} + \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \phi} \Big|_{j',n} \cdot \phi_{j',n}^{\text{err}} \right) \\ &= \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \phi} \Big|_{j,n} \cdot \sqrt{\frac{1-\gamma_{j,n}^2}{8\gamma_{j,n}^2 L_j}} + \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \phi} \Big|_{j',n} \cdot \sqrt{\frac{1-\gamma_{j',n}^2}{8\gamma_{j',n}^2 L_j}} \end{aligned} \quad (8)$$

鉴于式(7)、式(8)所示的位置误差对式(3)、式(4)的贡献为线性关系, 可以将权值设置为位置误差的反比例函数, 以减弱误差的影响, 即

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} p_{x,i,m} & p_{y,i,m} & p_{h,i,m} \end{bmatrix}^T = \frac{\sqrt{2L_i\gamma_{i,m}^2}}{\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \phi} \Big|_{i,m} \cdot \sqrt{1-\gamma_{i,m}^2}} \\ & \begin{bmatrix} q_{x,j,j',n} & q_{y,j,j',n} & q_{h,j,j',n} \end{bmatrix}^T \\ &= 2 \left( \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \phi} \Big|_{j,n} \cdot \sqrt{\frac{1-\gamma_{j,n}^2}{2\gamma_{j,n}^2 L_j}} + \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \phi} \Big|_{j',n} \cdot \sqrt{\frac{1-\gamma_{j',n}^2}{2\gamma_{j',n}^2 L_j}} \right)^{-1} \end{aligned} \quad (9)$$

#### 4.2 依据精度指标加权

在应用机载 InSAR 进行测绘作业时, 某些制图产品关于高程精度与平面位置精度的指标要求不同, 关于位置绝对精度与位置衔接性精度的指标要求也不同, 因此在定标处理过程中有必要通过加权的方式来体现出对各种精度指标的不同要求。举例

来说, 基于 InSAR 的比例尺为 1:50000 的制图产品对高程精度的要求为 5 m, 对平面位置精度的要求为 25 m。通常, 为了保证拼接效果, 制图产品对位置衔接性的精度要求会更高。所谓位置衔接性精度, 是指相邻场景在拼接时的衔接误差, 在定标时主要依赖 TP 点的约束方程进行衔接性保证。

假设某 InSAR 制图产品关于 3 维位置精度的要求为  $[\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_h]^T$ , 关于 3 维位置衔接性的要求为  $[\eta_x \ \eta_y \ \eta_h]^T$ , 则其权值分配应当满足如下条件:

$$\frac{p_{x,i,m}}{\varepsilon_x} = \frac{p_{y,i,m}}{\varepsilon_y} = \frac{p_{h,i,m}}{\varepsilon_h} = \frac{q_{x,j,j',n}}{\eta_x} = \frac{q_{y,j,j',n}}{\eta_y} = \frac{q_{h,j,j',n}}{\eta_h} \quad (10)$$

依据式(10)的要求, 可将各权值设置如下:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} p_{x,i,m} & p_{y,i,m} & p_{h,i,m} \end{bmatrix}^T = [\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_h]^T \\ \begin{bmatrix} q_{x,j,j',n} & q_{y,j,j',n} & q_{h,j,j',n} \end{bmatrix}^T = [\eta_x \ \eta_y \ \eta_h]^T \end{cases} \quad (11)$$

#### 4.3 综合加权

加权的实质就是分配式(3)、式(4)中关于 GCP 和 TP 点 3 维位置的 6 组方程的比例系数。因此, 当存在多种加权依据时, 可将每一种依据对应的权值串联相乘, 以获取最终权值, 即

$$\begin{cases} p_{x,i,m} = \prod_k p_{x,j,m}^k, \quad p_{y,i,m} = \prod_k p_{y,j,m}^k \\ p_{h,i,m} = \prod_k p_{h,j,m}^k \\ q_{x,j,j',n} = \prod_k q_{x,j,j',n}^k, \quad q_{y,j,j',n} = \prod_k q_{y,j,j',n}^k \\ q_{h,j,j',n} = \prod_k q_{h,j,j',n}^k \end{cases} \quad (12)$$

其中,  $p_{x,i,m}, p_{y,i,m}, p_{h,i,m}, q_{x,j,j',n}, q_{y,j,j',n}, q_{h,j,j',n}$  表示最终权值,  $p_{x,j,m}^k, p_{y,j,m}^k, p_{h,j,m}^k, q_{x,j,j',n}^k, q_{y,j,j',n}^k, q_{h,j,j',n}^k$  表示第  $k$  种加权依据对应的权值。

综上所述, 鉴于随机相位误差的存在、各维精度指标的差异等因素, 各 GCP 和 TP 点处的约束方程在定标中的地位 and 影响不同, 因此有必要在定标过程中引入权值, 下文的实验结果也显示加权后的定标精度能够得到提高。

## 5 区域网 3 维定位流程

在机载 InSAR 测图作业中, 在获得已展开的干涉相位后, 首先进行联合定标, 以修正定位模型中的干涉参数; 其次进行 3 维位置反演, 即利用 3 维定位几何模型和定标后的参数, 由干涉相位反演出 3 维位置(如图 2 所示); 最后进行各场景幅度图和 DEM 的拼接(如图 3 所示), 即在平面位置坐标网格下对各场景幅度图和 DEM 进行规则化重采样和拼接, 以形成制图产品。在整个流程中, 联合定标是关键的一步, 其关系到制图产品的 3 维位置精度。

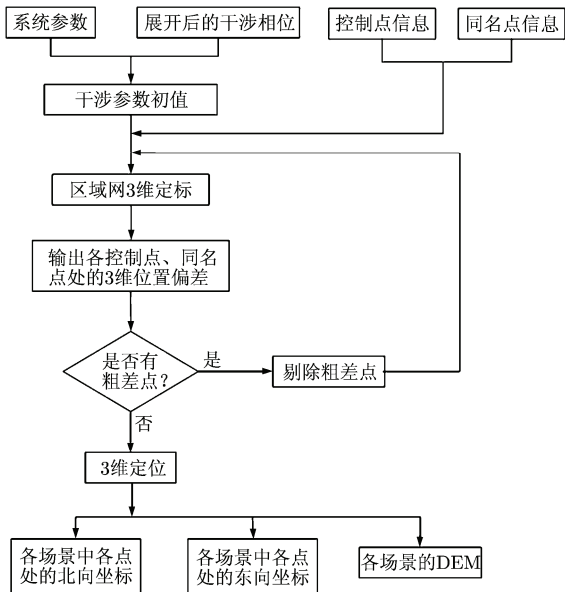


图2 机载InSAR区域网3维定位流程

Fig. 2 Three-dimensional location processor block diagram of airborne InSAR

## 6 实验结果与分析

本文选取了机载双天线 InSAR 实测数据对所提算法进行了验证, 所选数据的斜距域 SAR 图像如图 4 所示, 其基本参数为: 载频 9.6 GHz, 信号带宽 400 MHz, 采样频率 600 MHz, 脉冲重复频率 2000 Hz, 基线长度 2.3 m, 基线倾角  $0^\circ$ , 平台高度 3.3 km, 平台速度 100 m/s。对该数据按图 2、图 3 所示的流程进行处理, 所得正射 DEM 与正射幅度图的结果如图 5 所示。

图 4 所示的场景中, 共布放有 8 个已知 3 维位置的角反射器, 在联合定标中用作 GCP 点; 另有 80 个在后期的野外控制测量中获知 3 维位置信息的点, 用作检验点, 以检验定标后的 3 维位置精度;

各相邻场景之间共选取 282 对同名点, 其中 180 对用于联合定标; 另外 102 对同名点用作检查点, 以检验联合定标后相邻场景之间的 3 维位置衔接性。在相邻场景之间选取同名点时, 采用 SIFT(Scale Invariant Feature Transformation)的方法进行匹配<sup>[20]</sup>, 并通过人机交互的方式进行检验筛选。

图 4 中的 InSAR 数据在经过联合定标后的 3 维位置精度如表 1 所示(高程、北向位置、东向位置的误差量级各不相同, 主要是因为载机的真航向角  $\theta$  的误差对高程反演无影响, 对北向和东向定位的影响不相同)。其中, 传统定标算法是指基于线性化误差近似的敏感度迭代算法<sup>[14-17]</sup>, 其首先对高程进行定标, 其次在获取的 DEM 的基础上, 再对平面位置进行定标; 最优化 3 维联合定标是指按照式(5)所示的目标函数进行最优化处理的定标算法, 其同时对目标的 3 维位置进行定标处理; 加权最优化 3 维联合定标是指按照式(6)所示的目标函数和式(9)所示的权值进行加权最优化处理的定标算法, 其同时对目标的 3 维位置进行定标处理。

表 1 各种定标算法精度的比较

Tab. 1 RMS of the residuals after calibration using different methods

联合定标算法	检查点 3 维位置中误差(m)			检查点 3 维衔接性中误差(m)		
	高程	北向	东向	高程	北向	东向
传统定标算法	0.678	0.714	1.665	0.488	0.568	1.264
最优化 3 维联合定标	0.672	0.683	1.454	0.481	0.533	1.063
加权最优化 3 维联合定标	0.580	0.635	1.185	0.412	0.490	0.871

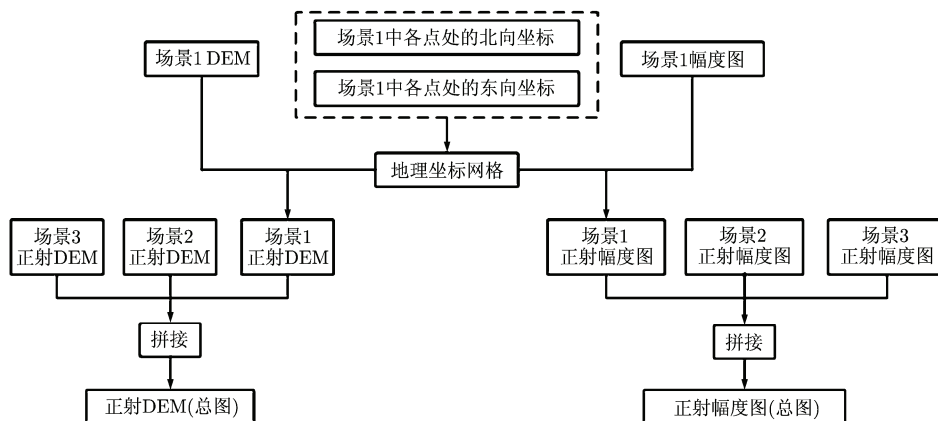


图3 机载InSAR多场景数据拼接流程

Fig. 3 Mosaic processor block diagram of airborne InSAR

表 1 所示的实验结果显示：在高程精度方面，最优化 3 维联合定标算法与传统定标算法相当，而在平面位置精度方面则优于传统定标算法，究其原因，最优化 3 维联合定标算法将对高程和对平面位置的定标

同时进行，不会造成高程误差在平面位置定位中的累积；合理加权能够进一步提高定标的 3 维位置精度和衔接性精度，究其原因，加权最优化定标顾及到了不同相干性、不同位置分布的控制点和同名点的权重差异。

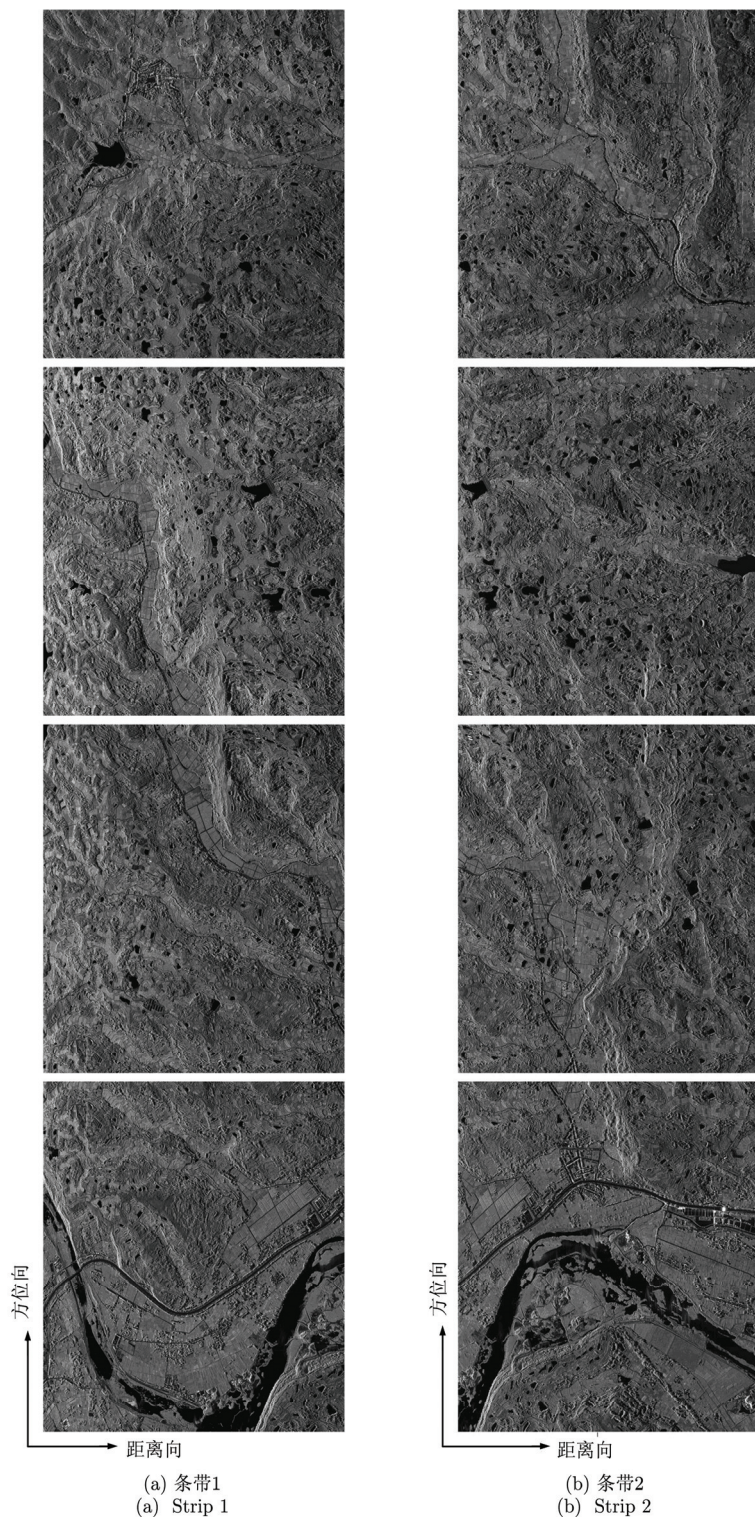


图 4 斜距域 SAR 图像

Fig. 4 SAR images in slant range domain

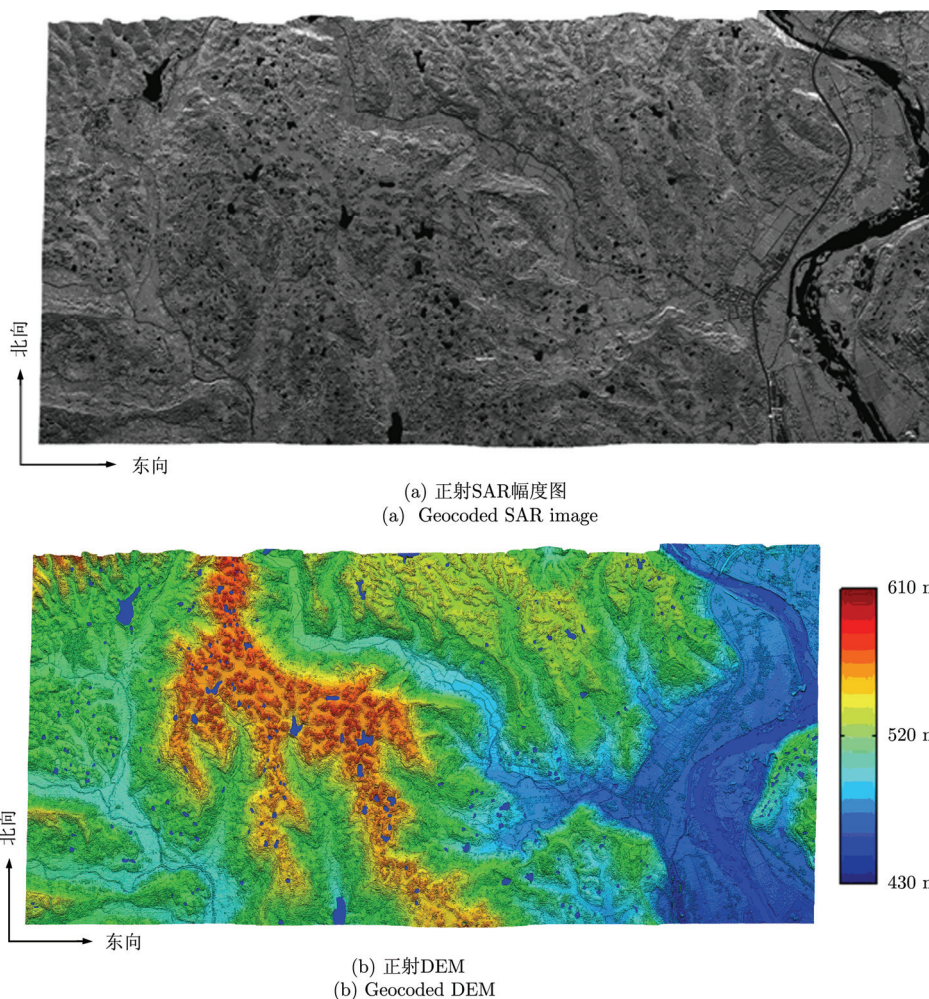


图5 区域网3 维定位后的InSAR 正射图(其中 DEM 中的水域被特殊处理为蓝色)

Fig. 5 Geocoded SAR image and DEM (The water body in DEMs has been coloured blue)

## 7 结束语

本文所提出的基于加权最优化模型的3维联合定标算法能够对目标的3维位置同时定标,且在稀少控制点条件下实现大区域多场景的3维定位。另外,本文算法为联合定标引入了权值,并且给出了权值的计算方法。相比于传统算法,本文所提算法在一定程度上改善了定标精度,并且在处理流程上更为简洁。

### 参考文献

- [1] Blacknell D, Freeman A, Quegan S, *et al.* Geometric accuracy in airborne SAR images[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1989, 25(2): 241-258.
- [2] Mohr J J and Madsen S N. Geometric calibration of ERS satellite SAR images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(4): 842-850.
- [3] Paul Siqueira, Bruce Chapman, and Greg McGarragh. The coregistration, calibration, and interpretation of multiseason JERS-1 SAR data over South America[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90(4): 536-550.
- [4] Rosen P A, Hensley S, Joughin I R, *et al.* Synthetic aperture radar interferometry[J]. *Proceedings of IEEE*, 2000, 88(3): 333-382.
- [5] Crosetto M. Calibration and validation of SAR interferometry for DEM generation[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2002, 57(3): 213-227.
- [6] Madsen S N, Zebker H A, and Martin J. Topographic mapping using radar interferometry: processing techniques[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, 31(1): 246-256.
- [7] Dall J. Cross-calibration of interferometric SAR Data[J]. *IEEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2003, 150(3): 177-183.
- [8] Dall J, Gringer-Pesolution J, and Madsen S N. Calibration of a high resolution airborne 3-D SAR[C]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Singapore, August 1997: 1018-1021.

- [9] Mao Yong-fei, Xiang Mao-sheng, Wei Li-deng, *et al.*. The mathematic model of multipath error in airborne interferometric SAR system[C]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Honolulu, USA, July 2010: 2904-2907.
- [10] Kobayash Y, Sarabandi K, Pierce L, *et al.*. An evaluation of the JPL TOPSAR for extracting tree heights[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(6): 2446-2454.
- [11] D'Aria D, Ferretti A, Guarnieri A M, *et al.*. SAR calibration aided by permanent scatterers[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(4): 2076-2083.
- [12] Bräutigam B, González J H, Schwerdt M, *et al.*. TerraSAR-X instrument calibration results and extension for TanDEM-X[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(2): 702-715.
- [13] Freeman A. SAR calibration: an overview[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(6): 1107-1121.
- [14] Mao Yong-fei, Xiang Mao-sheng, Wei Li-deng, *et al.*. A weighted calibration method of interferometric SAR data[C]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vancouver, Canada, July 2011: 2555-2557.
- [15] 毛永飞, 向茂生, 韦立登. 一种机载干涉SAR区域网平面定位算法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(1): 166-171.
- Mao Yong-fei, Xiang Mao-sheng, and Wei Li-deng. A block positioning method for airborne InSAR system[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(1): 166-171.
- [16] Zebker H A, Werner C L, Rosen P A, *et al.*. Accuracy of topographic maps derived from ERS-1 interferometric radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(4): 822-836.
- [17] Moreira J, Schwabisch M, and Fomaro G. X-SAR interferometry: first results[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(4): 950-956.
- [18] 毛永飞, 向茂生. 基于加权最优化模型的机载InSAR 联合定标算法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(12): 2819-2824.
- Mao Yong-fei and Xiang Mao-sheng. Joint calibration of airborne interferometric SAR data using weighted optimization method[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(12): 2819-2824.
- [19] Touzi R and Lopes A. Statistics of the Stokes parameters and the complex coherence parameters in one-look and multilook speckle fields[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(2): 519-531.
- [20] Lourenco M, Barreto J P, and Malti A. Feature detection and matching in images with radial distortion[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Anchorage, Alaska, USA, 2010: 1028-1034.

### 作者简介

毛永飞(1983-), 男, 毕业于中国科学院电子学研究所, 博士, 现任职于北京空间飞行器总体设计部, 研究方向为合成孔径雷达(SAR)系统设计、成像、运动补偿、干涉、定标与制图处理; 雷达的系统设计、系统校准与数据处理。