

基于加权最优化模型的机载 InSAR 联合定标算法

毛永飞^{*①②} 向茂生^①

^①(中国科学院电子学研究所微波成像技术国家级重点实验室 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 多个相邻场景同时进行干涉参数外定标的过程称为联合定标, 联合定标能够保证相邻场景的高程衔接性, 能够实现无控制点场景的干涉定标。该文提出了一种适用于机载 InSAR 系统的联合定标算法, 该算法利用控制点和同名点信息, 建立了关于待定标参数的约束方程组, 并通过最优化的方法对其进行求解。同时依据各控制点和同名点处的相干系数、位置分布的不同, 对各约束方程进行了加权, 从而顾及到了不同质量和分布的控制点、同名点在联合定标中的权重差异。实测数据处理结果表明, 该文算法优于传统的基于敏感度方程模型的联合定标算法。

关键词: 干涉合成孔径雷达; 干涉定标; 联合定标; 同名点; 加权最优化

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)12-2819-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00431

Joint Calibration of Airborne Interferometric SAR Data Using Weighted Optimization Method

Mao Yong-fei^{①②} Xiang Mao-sheng^①

^①(National Key Laboratory of Science and Technology on Microwave Imaging, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Joint calibration is a method to calibrate interferometric parameters of several adjacent scenes simultaneously, which needs less Ground Control Points (GCPs) and can realize the elevation continuity among the adjacent scenes. As the biases of the parameters can be acquired by solving the equations of GCPs and Corresponding Points (CPs), this paper presents one such joint calibration method by solving the equations using weighted optimization method. And the weightings depend on the correlation coefficient and location of the GCPs and CPs. This method can improve the Digital Elevation Model (DEM) accuracy, and this paper illustrates its successful application to interferometric SAR data.

Key words: Interferometric SAR; Interferometric calibration; Joint calibration; Corresponding points; Weighted optimization

1 引言

干涉合成孔径雷达(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)是利用回波复数据的相位信息来获取地形高程的技术^[1]。在由干涉相位反演地形高程时, 需要对 3 维重建模型中的干涉参数进行定标, 以提高精度。干涉定标的通常思路是利用已知高程信息的地面控制点(Ground Control Points, GCPs), 来校准各干涉参数。常规的单场景干涉定标方法是基于线性化误差近似的敏感度方程模型^[2-4]。

在机载 InSAR 系统作业过程中, 通常采取分若干条带获取数据, 每条带分若干场景(数据块)进行处理的方式^[5], 并且难以保证所有场景都布放有足够的控制点, 而制图要求所有场景必须拼接成一个大图, 因而要求必须在少量控制点的条件实现大区域所有场景的干涉定标^[6,7]。联合定标算法可以有效解决上述问题。联合定标是多个场景同时进行干涉参数修正, 联合定标的目的是既要保证高程精度, 又要保证相邻场景之间的高程衔接性。

传统的联合定标算法建立在单场景干涉定标算法的基础上, 利用同名点进行高程信息的传递, 进而实现所有场景的定标^[7]。事实上, 各控制点和同名点处存在着不同程度的相位误差, 其在联合定标中的权重应当不同, 但传统算法难以顾及此权重差异。

2011-05-05收到, 2011-08-29改回

国家 863 计划项目(2007AA120302)和国家 973 计划项目(2009CB724003)资助课题

*通信作者: 毛永飞 maoyongfei07@mails.gucas.ac.cn

鉴于此, 本文提出了基于加权最优化模型的联合定标算法, 该算法通过建立各控制点和同名点处的高程等式, 把联合定标转化为最优化问题, 同时对各控制点和同名点处的高程等式进行了加权, 加权的依据是因相位误差(可由相干系数体现)和位置分布不同而导致的各点处高程反演误差的差异。本文所提算法不但能顾及各控制点和同名点的权重差异, 而且避免了传统算法中设计同名点高程传递路径的麻烦。

在内容安排上, 本文首先给出精确的3维重建几何关系; 其次推导出了基于加权最优化模型的联合定标算法, 并以最速下降法为例给出了算法的实现步骤; 最后给出了应用于InSAR实测数据的实验结果。

2 3维重建模型

关于机载InSAR 3维重建几何关系, 有些文献中常用简化或近似的模型^[6-9], 例如正侧视的近似、顺轨基线为零的近似等, 而这与实际并不相符; 另有一些文献中的模型仅针对某种特定模式^[5,10,11], 例如仅考虑右视照射、左侧为主天线的情况, 而无法普遍适用于所有系统。鉴于此, 本文致力于建立一套精确而普遍适用的机载InSAR 3维定位几何关系。本文采用视向量正交分解^[4,5,10]的方法, 给出目标3维位置的闭式表达。

机载双天线InSAR系统的3维定位几何关系如图1所示。\$H\$为主天线相位中心\$A\$的高度, \$h\$为地物目标\$T\$的高程, \$r\$为目标\$T\$处的斜距, \$\hat{r}\$为单位视向量, \$\mathbf{b}\$为基线矢量(由主天线指向副天线), \$\mathbf{b}_n\$为交轨基线矢量, \$\mathbf{b}_v\$为顺轨基线矢量。\$XYZO\$为航迹坐标系, \$X\$指向载机理想航迹方向, \$Y\$指向理想航迹的左视方向, \$Z\$指向正上方向, \$O\$为\$A\$在零高程面上的星下点。正交单位矢量\$\hat{v}\$, \$\hat{n}\$, \$\hat{w}\$与原点\$A\$构成移动坐标系(Madsen Moving Coordinates,

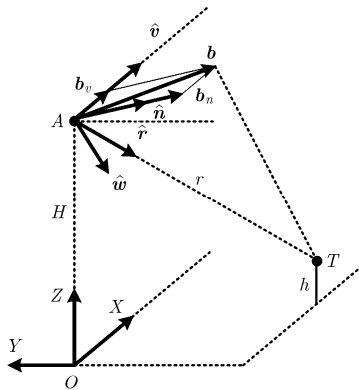


图1 机载InSAR系统3维重建几何关系

MMC)^[4,5], 其中\$\hat{v}\$指向平台航向, \$\hat{n}\$的指向与\$\mathbf{b}_n\$方向一致, \$\hat{w}\$由右手定则给出, 即\$\hat{w} = \hat{v} \otimes \hat{n}\$。

在图1中, 单位视向量\$\hat{r}\$在移动坐标系中可表示为

$$\hat{r} = \mu \hat{v} + \eta \hat{n} + \zeta \hat{w} \quad (1)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} \mu &= \langle \hat{r}, \hat{v} \rangle = \frac{\lambda f_{dc}}{2v} \\ \eta &= \langle \hat{r}, \hat{n} \rangle \\ &= \langle \hat{r}, \frac{\mathbf{b} - \mathbf{b}_v}{b_n} \rangle = \frac{1}{b_n} \langle \hat{r}, \mathbf{b} \rangle - \frac{b_v}{b_n} \langle \hat{r}, \hat{v} \rangle \\ &= \frac{b^2}{2rb_n} + s_1 s_2 \frac{\lambda \phi}{2Q\pi b_n} - \frac{\lambda^2 \phi^2}{8Q^2 \pi^2 r b_n} - \frac{\lambda f_{dc} b_v}{2v b_n} \\ \zeta &= -s_2 \sqrt{1 - \mu^2 - \eta^2} \\ &= -s_2 \left\{ 1 - \left(\frac{\lambda f_{dc}}{2v} \right)^2 - \left(\frac{b^2}{2rb_n} + s_1 s_2 \frac{\lambda \phi}{2Q\pi b_n} - \frac{\lambda^2 \phi^2}{8Q^2 \pi^2 r b_n} - \frac{\lambda f_{dc} b_v}{2v b_n} \right)^2 \right\}^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

在式(2)中, \$<, >\$表示矢量的内积运算, \$\lambda\$为雷达载波波长, \$v\$为平台速度, \$b\$为基线长度, \$b_n\$为交轨基线长度, \$b_v\$为顺轨基线长度, \$f_{dc}\$为目标处的多普勒中心, \$\phi\$为目标处的干涉相位。\$s_1, s_2, Q\$用于表征雷达的工作模式: 左侧视时 \$s_1 = -1\$, 右侧视时 \$s_1 = 1\$; 主天线位于左侧时 \$s_2 = -1\$, 位于右侧时 \$s_2 = 1\$; 标准收发模式时 \$Q = 1\$, 乒乓收发模式时 \$Q = 2\$。

由式(1), 式(2)可得单位视向量\$\hat{r}\$在移动坐标系中的3维坐标

$$\hat{r}_{vnm} = \begin{bmatrix} \mu \\ \eta \\ \zeta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\lambda f_{dc}}{2v} \\ \frac{b^2}{2rb_n} + s_1 s_2 \frac{\lambda \phi}{2Q\pi b_n} - \frac{\lambda^2 \phi^2}{8Q^2 \pi^2 r b_n} - \frac{\lambda f_{dc} b_v}{2v b_n} \\ -s_2 \left\{ 1 - \left(\frac{\lambda f_{dc}}{2v} \right)^2 - \left(\frac{b^2}{2rb_n} + s_1 s_2 \frac{\lambda \phi}{2Q\pi b_n} - \frac{\lambda^2 \phi^2}{8Q^2 \pi^2 r b_n} - \frac{\lambda f_{dc} b_v}{2v b_n} \right)^2 \right\}^{1/2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

由图1可知, 由移动坐标系向\$XYZO\$坐标系转变, 可以通过坐标的平移、旋转实现。于是目标\$T\$在\$XYZO\$坐标系中的位置矢量\$\mathbf{T}\$可表示为

$$\mathbf{T} = \mathbf{A} + r \hat{r} = \mathbf{A} + r \cdot \mathbf{\Gamma} \cdot \hat{r}_{vnm} \quad (4)$$

其中\$\mathbf{A}\$表示点\$A\$在\$XYZO\$坐标系中的位置矢量, \$\mathbf{\Gamma}\$表示旋转矩阵。\$\mathbf{\Gamma}\$可具体表达如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{\Gamma} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & s_2 \cos \theta_{b_n} & s_1 s_2 \sin \theta_{b_n} \\ 0 & -s_1 s_2 \sin \theta_{b_n} & s_2 \cos \theta_{b_n} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & s_2 \sqrt{1 - \frac{b^2}{b_n^2} \sin^2 \theta_b} & \frac{s_1 s_2 b}{b_n} \sin \theta_b \\ 0 & -\frac{s_1 s_2 b}{b_n} \sin \theta_b & s_2 \sqrt{1 - \frac{b^2}{b_n^2} \sin^2 \theta_b} \end{bmatrix} \quad (5) \end{aligned}$$

其中 θ_b 表示基线 \mathbf{b} 与 XOY 平面的夹角, θ_{b_n} 表示交轨基线 \mathbf{b}_n 与 XOY 平面的夹角。

式(4)给出了目标3维位置的闭式表达。将式(3), 式(5)代入式(4), 取其高度向分量, 可得目标高程的表达式

$$\begin{aligned} h &= H - \frac{s_1 s_2 b r}{b_n} \sin \theta_b \\ &\cdot \left(\frac{b^2}{2r b_n} + s_1 s_2 \frac{\lambda \phi}{2Q\pi b_n} - \frac{\lambda^2 \phi^2}{8Q^2 \pi^2 r b_n} - \frac{\lambda f_{dc} b_v}{2v b_n} \right) \\ &- r \left\{ \left[1 - \frac{b^2}{b_n^2} \sin^2 \theta_b \right] \left[1 - \left(\frac{\lambda f_{dc}}{2v} \right)^2 - \left(\frac{b^2}{2r b_n} \right. \right. \right. \\ &\left. \left. \left. + s_1 s_2 \frac{\lambda \phi}{2Q\pi b_n} - \frac{\lambda^2 \phi^2}{8Q^2 \pi^2 r b_n} - \frac{\lambda f_{dc} b_v}{2v b_n} \right)^2 \right] \right\}^{1/2} \quad (6) \end{aligned}$$

式(6)给出了精确而普遍适用的机载InSAR高程反演几何关系。当多普勒中心与顺轨基线取零时, 式(6)就退化为常见的正侧视模型表达式。

3 基于加权最优化模型的联合定标算法

3.1 联合定标的最优化模型

由式(6)可知, 地物目标的高程是关于参数 $\mathbf{X} = [b_n, b_v, \theta_b, \phi, f_{dc}, r, H, v, \lambda]^T$ 的函数(其中 b 可由 b_n, b_v 表示, 即 $b = \sqrt{b_n^2 + b_v^2}$), 即

$$h = g(\mathbf{X}) = g(b_n, b_v, \theta_b, \phi, f_{dc}, r, H, v, \lambda) \quad (7)$$

其中 $g(\cdot)$ 为高程变换关系, \mathbf{X} 为干涉参数。干涉定标要解决的问题, 就是利用控制点的已知高程 h , 求解干涉参数 \mathbf{X} 。同一场景中不同目标点处的 ϕ, f_{dc}, r 会有差别, 即干涉参数 \mathbf{X} 会有所差别, 但各目标点处的参数偏差可认为是一致的。设干涉参数偏差为 $\Delta \mathbf{X} = [\Delta b_n, \Delta b_v, \Delta \theta_b, \Delta \phi, \Delta f_{dc}, \Delta r, \Delta H, \Delta v, \Delta \lambda]^T$, 则干涉参数初值 $\widehat{\mathbf{X}}$ (已知量)可表示为 $\widehat{\mathbf{X}} = \mathbf{X} + \Delta \mathbf{X}$, 于是式(7)可转化为

$$h = g(\mathbf{X}) = g(\widehat{\mathbf{X}} - \Delta \mathbf{X}) \quad (8)$$

如式(8)所示, 干涉定标的实质即为: 利用控制点的先验高程, 求解各干涉参数偏差。在实际处理

中, 波长 λ 较稳定, 通常无需定标; 平台高度误差 ΔH 、速度误差 Δv 、斜距误差 Δr , 可以通过对惯导数据(例如 IMU/GPS 所记录的平台运动状态数据)的定标解算出来, 无需进入干涉定标阶段。于是, 待定标的干涉参数偏差可重写为 $\Delta \mathbf{X} = [\Delta b_n, \Delta b_v, \Delta \theta_b, \Delta \phi, \Delta f_{dc}]^T$ 。另外, 可以依据系统的实际状况和处理需求, 对参与定标的干涉参数进行增减。

对于单场景定标, 设第 n ($n = 1, 2, \dots, N$) 个控制点处的高程为 h_n 、干涉参数初值为 $\widehat{\mathbf{X}}_n$, 则干涉定标相当于求解式(9)所表征的方程组, 从而获得干涉参数偏差 $\Delta \mathbf{X}$ 。

$$h_n = g(\widehat{\mathbf{X}}_n - \Delta \mathbf{X}), \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

多场景联合定标相当于在单场景定标的基础上, 引入同名点处的约束条件。所谓同名点, 是指同一地物点在两个相邻场景中所对应的两个像素点。设共有 K 个场景参与联合定标, 其中有 J 对场景拥有同名点; 设第 k ($k = 1, 2, \dots, K$) 个场景对应的干涉参数偏差为 $\Delta \mathbf{X}_k$, 第 k 个场景中的第 n ($n = 1, 2, \dots, N_k$) 个控制点处的高程为 $h_{k,n}$ 、干涉参数初值为 $\widehat{\mathbf{X}}_{k,n}$; 设第 j ($j = 1, 2, \dots, J$) 对场景中共有 M_j 对同名点, 第 m ($m = 1, 2, \dots, M_j$) 对同名点处的干涉参数初值分别为 $\widehat{\mathbf{X}}_{j,m}, \widehat{\mathbf{X}}_{j',m}$, 第 j 对场景对应的干涉参数偏差分别为 $\Delta \mathbf{X}_j, \Delta \mathbf{X}_{j'}$ 。则联合定标相当于求解式(10)所表征的方程组, 从而获得各场景的干涉参数偏差 $\Delta \mathbf{X}_k$ ($k = 1, 2, \dots, K$)。

$$\left. \begin{aligned} g(\widehat{\mathbf{X}}_{k,n} - \Delta \mathbf{X}_k) &= h_{k,n} \\ g(\widehat{\mathbf{X}}_{j,m} - \Delta \mathbf{X}_j) &= g(\widehat{\mathbf{X}}_{j',m} - \Delta \mathbf{X}_{j'}) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式(10)通常为非线性超定方程组, 难以直接求解, 因此我们将其转化为最优化问题进行求解。构造函数 $f(\cdot)$ 如下:

$$\begin{aligned} f(\Delta \mathbf{X}_1, \Delta \mathbf{X}_2, \dots, \Delta \mathbf{X}_K) &= \left\{ \frac{1}{\sum_{k=1}^K N_k + \sum_{j=1}^J M_j} \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{N_k} \left[g(\widehat{\mathbf{X}}_{k,n} - \Delta \mathbf{X}_k) - h_{k,n} \right]^2 \right. \right. \\ &\left. \left. + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} \left[g(\widehat{\mathbf{X}}_{j,m} - \Delta \mathbf{X}_j) - g(\widehat{\mathbf{X}}_{j',m} - \Delta \mathbf{X}_{j'}) \right]^2 \right\} \right\}^{1/2} \quad (11) \end{aligned}$$

于是, 对式(10)的求解问题就转化为使函数 $f(\cdot)$ 取得最小值的问题。联合定标就是要解算出使得函数 $f(\cdot)$ 取值最小的干涉参数偏差 $\Delta \mathbf{X}_k$ ($k = 1, 2, \dots, K$), 同时要求 $\Delta \mathbf{X}_k$ 的取值落在有意义的物理区间

内。

3.2 最优化权值的设定

由于系统噪声的存在，各控制点和同名点处的相位误差并不相同，并且其位置分布也不同(不同位置处的高程关于相位的敏感度可能不同)，因此各点处的高程反演误差并不相同^[12]，故式(10)中各方程的可信度并不完全一致。因此，在将式(10)转化为最优化问题时，应当有差别地对待各方程，于是我们依据各点处高程误差的差异对各方程引入权值，进而将式(10)转化为加权最优化问题进行求解。

在参与联合定标的诸场景中，设第 k ($k = 1, 2, \dots, K$) 个场景中的第 n ($n = 1, 2, \dots, N_k$) 个控制点处的高程误差为 $\Delta h_{k,n}$ ，相应的最优化权值为 $w_{k,n}$ ；设第 j ($j = 1, 2, \dots, J$) 对场景中第 m ($m = 1, 2, \dots, M_j$) 对同名点处的高程衔接误差为 $\Delta h_{j,m}$ ，相应的最优化权值为 $w_{j,m}$ 。

最优化权值可依据高程误差进行设计，高程误差来源于相位误差，而相位误差可由相干系数按式(12)进行计算^[1,13](相干系数可在干涉处理阶段统计出来)

$$\phi_{\text{err}} = \frac{1}{\sqrt{L}} \sqrt{\frac{(1-\gamma^2)}{2\gamma^2}} \quad (12)$$

其中 γ 表示相干系数， L 表示多视数， ϕ_{err} 表示相位误差，则相应的高程误差可表示为

$$\Delta h = \frac{\partial h}{\partial \phi} \cdot \phi_{\text{err}} \quad (13)$$

其中 $\partial h / (\partial \phi)$ 表示高程对相位的敏感度，可由式(6)求得。于是，由式(12)，式(13)可得各控制点和同名点处的高程误差

$$\left. \begin{aligned} \Delta h_{k,n} &= \frac{\partial h}{\partial \phi} \cdot \frac{1}{\sqrt{L_k}} \sqrt{\frac{1-\gamma_{k,n}^2}{2\gamma_{k,n}^2}} \\ \Delta h_{j,m} &= \frac{\partial h}{\partial \phi} \cdot \frac{1}{2\sqrt{L_j}} \sqrt{\frac{1-\gamma_{j,m}^2}{2\gamma_{j,m}^2}} + \frac{\partial h}{\partial \phi} \cdot \frac{1}{2\sqrt{L_j'}} \sqrt{\frac{1-\gamma_{j',m}^2}{2\gamma_{j',m}^2}} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

其中 $\gamma_{k,n}$ ， $\gamma_{j,m}$ ， $\gamma_{j',m}$ 表示相应控制点或同名点处的相干系数， L_k ， L_j ， $L_{j'}$ 表示相应场景的多视数。

对于式(10)中的单个方程而言，高程误差对式(11)中 $f(\cdot)$ 取值的贡献为线性关系。为了消除高程误差的线性贡献，可以将权值设置为高程误差的反比例函数，即

$$w_{k,n} = \frac{p}{\Delta h_{k,n}}, w_{j,m} = \frac{p}{\Delta h_{j,m}} \quad (15)$$

其中，比例系数 p 可以通过归一化条件进行求解，即

$$\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{N_k} w_{k,n} + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} w_{j,m} = \sum_{k=1}^K N_k + \sum_{j=1}^J M_j \quad (16)$$

联合式(15)，式(16)可解得

$$p = \frac{\sum_{k=1}^K N_k + \sum_{j=1}^J M_j}{\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{N_k} \frac{1}{\Delta h_{k,n}} + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} \frac{1}{\Delta h_{j,m}}} \quad (17)$$

于是，各方程的权值可重写为

$$\left. \begin{aligned} w_{k,n} &= \frac{\sum_{k=1}^K N_k + \sum_{j=1}^J M_j}{\Delta h_{k,n} \left(\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{N_k} \frac{1}{\Delta h_{k,n}} + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} \frac{1}{\Delta h_{j,m}} \right)} \\ w_{j,m} &= \frac{\sum_{k=1}^K N_k + \sum_{j=1}^J M_j}{\Delta h_{j,m} \left(\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{N_k} \frac{1}{\Delta h_{k,n}} + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} \frac{1}{\Delta h_{j,m}} \right)} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

于是，在建立联合定标的最优化模型时，对式(10)中的各方程按照式(18)所示的权值进行加权后，加权最优化模型的目标函数可表示为 $f(\Delta \mathbf{X}_1, \Delta \mathbf{X}_2, \dots, \Delta \mathbf{X}_K)$

$$\begin{aligned} &= \left\{ \frac{1}{\sum_{k=1}^K N_k + \sum_{j=1}^J M_j} \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{N_k} \left[w_{k,n} \left(g(\widehat{\mathbf{X}}_{k,n} - \Delta \mathbf{X}_k) - h_{k,n} \right) \right]^2 + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} \left[w_{j,m} \left(g(\widehat{\mathbf{X}}_{j,m} - \Delta \mathbf{X}_j) - g(\widehat{\mathbf{X}}_{j',m} - \Delta \mathbf{X}_{j'}) \right) \right]^2 \right\} \right\}^{1/2} \\ &= \left\{ \frac{\sum_{k=1}^K N_k + \sum_{j=1}^J M_j}{\left(\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{N_k} \frac{1}{\Delta h_{k,n}} + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} \frac{1}{\Delta h_{j,m}} \right)^2} \cdot \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{N_k} \left[\frac{g(\widehat{\mathbf{X}}_{k,n} - \Delta \mathbf{X}_k) - h_{k,n}}{\Delta h_{k,n}} \right]^2 + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} \left[\frac{g(\widehat{\mathbf{X}}_{j,m} - \Delta \mathbf{X}_j) - g(\widehat{\mathbf{X}}_{j',m} - \Delta \mathbf{X}_{j'})}{\Delta h_{j,m}} \right]^2 \right\} \right\}^{1/2} \end{aligned} \quad (19)$$

式(19)即为联合定标的加权最优化模型, 在式(19)中使得 $f(\cdot)$ 取值最小的干涉参数偏差 $\Delta \mathbf{X}_k$ ($k = 1, 2, \dots, K$) 即为联合定标的结果。另外, 在某些特殊要求下, 在设定权值时可以添加一些人为因素, 例如把感兴趣区域内的控制点或同名点处的权值调高。

3.3 算法步骤

联合定标可以转化为加权最优化模型进行求解, 该最优化模型以式(19)为目标函数。换言之, 联合定标就是要找到一组 $(\Delta \mathbf{X}_1, \Delta \mathbf{X}_2, \dots, \Delta \mathbf{X}_K)$, 使得式(19)所示的函数取值最小。在求解此问题时, 可以借鉴经典的最优化算法, 例如最速下降法、牛顿法、共轭梯度法、遗传算法等。本文以最速下降法为例, 给出联合定标最优化模型的算法实现步骤。

第 1 步 给定迭代初值 $\Delta \mathbf{X}_1^{(i)}, \Delta \mathbf{X}_2^{(i)}, \dots, \Delta \mathbf{X}_K^{(i)}$ (其中 $i = 0$), 设定终止误差 $\varepsilon > 0$ 。通常将迭代初始全部设为零, 终止误差 ε 是依据精度要求而设定的一个足够小的正数。

第 2 步 求梯度向量模的值 $\|\nabla f(\Delta \mathbf{X}_1^{(i)}, \Delta \mathbf{X}_2^{(i)}, \dots, \Delta \mathbf{X}_K^{(i)})\|$, 若该值小于 ε , 则停止计算, 输出 $\Delta \mathbf{X}_1^{(i)}, \Delta \mathbf{X}_2^{(i)}, \dots, \Delta \mathbf{X}_K^{(i)}$ 作为联合定标结果, 否则转下一步。其中, ∇ 表示向量微分算子, $\nabla f(\cdot)$ 表示函数 $f(\cdot)$ 的梯度向量, 向量维数等于函数自变量的数目。

第 3 步 构造负梯度方向 $\mathbf{q}^{(i)} = -\nabla f(\Delta \mathbf{X}_1^{(i)}, \Delta \mathbf{X}_2^{(i)}, \dots, \Delta \mathbf{X}_K^{(i)})$ 作为搜索方向。

第 4 步 确定最优搜索步长 η_i 。使得函数 $f((\Delta \mathbf{X}_1^{(i)}, \Delta \mathbf{X}_2^{(i)}, \dots, \Delta \mathbf{X}_K^{(i)}) + \eta_i \mathbf{q}^{(i)})$ 取最小值时的 η_i 即为最优搜索步长, 此问题为一元函数的最值问题, 可通过一维搜索或解析法求解。确定出最优搜索步长 η_i 后, 令 $(\Delta \mathbf{X}_1^{(i+1)}, \Delta \mathbf{X}_2^{(i+1)}, \dots, \Delta \mathbf{X}_K^{(i+1)}) = (\Delta \mathbf{X}_1^{(i)}, \Delta \mathbf{X}_2^{(i)}, \dots, \Delta \mathbf{X}_K^{(i)}) + \eta_i \mathbf{q}^{(i)}$, 置 $i = i + 1$, 转第 2 步。

以上即为利用最速下降法进行联合定标的算法步骤, 最速下降法的关键在于确定搜索方向和搜索步长, 以实现以最快的速度逼近目标函数的最小值点。

4 实验结果与分析

本文选取了 InSAR 实测数据对算法进行验证。所选数据为中国科学院电子学研究所的 X 波段机载双天线 InSAR 数据, 其斜距域 SAR 图像如图 2 所示。该数据的基本参数为: 载频 9.6 GHz, 信号带宽 500 MHz, 基线长度 2.3 m, 平台高度 3 km, 平台速度 90 m/s。

所选数据分为 3 个场景, 共布放有 12 个地面控制点, 处理时选取其中 6 个用于联合定标, 另外 6 个用作检查点, 以检验高程精度。场景之间共选取了 45 对同名点, 其中 24 对用于联合定标, 21 对用作检查点, 以检验高程衔接性。分别用传统的基于

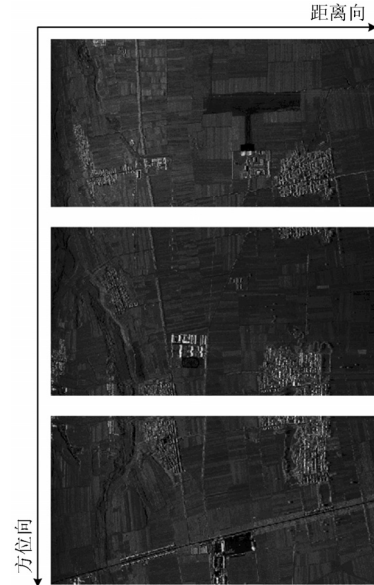


图 2 斜距域 SAR 图像

敏感度方程模型的联合定标算法和本文所提出的基于加权最优化模型的联合定标算法对所选数据进行了联合定标, 两种算法的定标结果如图 3 所示。其中, 传统算法对应的检查点的高程误差(RMS)为 0.3253 m(控制点用作检查点)、0.4365 m(同名点用作检查点), 本文算法对应的检查点的高程误差(RMS)为 0.2799 m(控制点用作检查点)、0.3807 m(同名点用作检查点)。

由实验结果可知, 本文所提出的基于加权最优化模型的联合定标算法优于传统的基于敏感度方程模型的联合定标算法。究其原因, 与传统算法相比, 本文算法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, 并且没有对误差做线性化近似。另外, 与传统算法相比, 本文算法避免了在众多场景中设计同名点高程传递路径的麻烦, 避免了求解矩阵广义逆的麻烦, 而且本文算法能够沿着最优方向和最优步长逼近真值, 有着更快的收敛速度。

5 结束语

本文所提出的基于加权最优化模型的联合定标算法仅是对目标点的高程做定标, 我们可以进一步考虑对地物目标点的 3 维位置(纬度、精度、高程)同时定标。3 维位置同时定标相当于在式(10)中增加控制点和同名点处的平面位置约束方程。另外, 控制点和同名点的分布对联合定标会有一些影响, 对其进行合理分布有望进一步提高 InSAR 3 维定位精度。

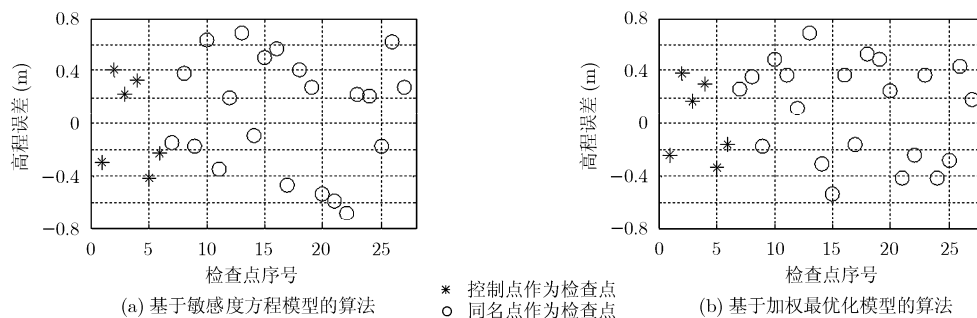


图3 检查点高程误差

参考文献

- [1] Rosen P A, Hensley S, Joughin I R, *et al.* Synthetic aperture radar interferometry[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2000, 88(3): 333-382.
 - [2] 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): 823-836.
 - [3] 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.
 - [4] 李品. InSAR 系统的定标方法研究[D]. [博士学位文], 中国科学技术大学, 2008.
Li Pin. Research on methods of calibration in InSAR system[D]. [Ph.D. dissertation], University of Science and Technology of China, 2008.
 - [5] 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.
 - [6] 韩松涛, 向茂生. 一种基于特征点权重的机载InSAR系统区域网干涉参数定标方法[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(5): 1244-1247.
Han Song-tao and Xiang Mao-sheng. A bundle adjustment calibration method for airborne InSAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(5): 1244-1247.
 - [7] 韩松涛. 机载双天线干涉SAR数据处理关键技术研究[D]. [博士学位文], 中国科学院电子学研究所, 2010.
Han Song-tao. Study on key technology of data processing for airborne dual-antenna InSAR system[D]. [Ph. D. dissertation], Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2010.
 - [8] 张薇. 机载双天线干涉SAR定标方法研究[D]. [博士学位文], 中国科学院电子学研究所, 2009.
 - [9] 马婧, 尤红建, 龙辉, 等. 一种新的稀少控制条件下机载SAR影像区域网平差方法的研究[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(12): 2842-2847.
Ma Jing, You Hong-jian, Long Hui, *et al.* A new method of block adjustment of airborne SAR images with few GCPs[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(12): 2842-2847.
 - [10] Goblirsch W. The exact solution of the imaging equations for cross-track interferometers[C]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Singapore, 1997: 437-441.
 - [11] 汪金华, 李品, 陈卫东, 等. 基于遗传算法的InSAR系统干涉定标方法[J]. *中国科学技术大学学报*, 2010, 40(2): 133-139.
Wang Jin-hua, Li Pin, Chen Wei-dong, *et al.* An interferometric calibration method based on genetic algorithm for InSAR system[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2010, 40(2): 133-139.
 - [12] 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, July 24-29, 2011: 2555-2557.
 - [13] 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.
- 毛永飞: 男, 1983年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达成像、干涉、定标、制图等处理流程的算法设计与技术实现。
向茂生: 男, 1964年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事干涉合成孔径雷达系统技术与数据处理技术的研究工作。