

一种基于连接点的机载 InSAR 区域网 DEM 重建方法

姜丽敏^{*①②} 陈曙暄^{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 100190)

摘要: 基于干涉合成孔径雷达(Interferometric SAR, InSAR)技术生成高精度数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM), 需要进行干涉定标。繁重的地面控制点(Ground Control Points, GCPs)布放不利于 InSAR 大区域地形测绘的自动化。该文介绍一种稀疏 GCPs 下, 基于自动提取的连接点(Tie Points, TPs), 利用最小二乘平差原理, 实现 InSAR 区域网内多景相互重叠 DEM 的同时重建方法。通过改变参与重建的 TPs 数目, 用 X 波段 InSAR 实测数据的实验验证了该文方法的有效性。

关键词: InSAR 区域网; 地形测绘; 连接点; 最小二乘; 数字高程模型

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)11-2694-08

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00148

A Method for Airborne InSAR Block DEM Generation Based on Tie Points

Jiang Li-min^{①②} Chen Shu-xuan^{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 100190, China)

Abstract: The high accurate Digital Elevation Model (DEM) generated by InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) relies on the interferometric calibration. However, the requirement of sufficient Ground Control Points (GCPs) is time consuming and impractical for the cartographic surveying by InSAR over large areas. This paper describes how to implement the interferometric calibration when few GCPs are available. First, the tie points are automatically detected between the adjacent scenes, and then the mathematical model of combined block adjustment among multi-strips and multi-scenes is deduced. Then based on this model, experimental results on the X-band InSAR data validate effectiveness of the presented method.

Key words: Interferometric SAR (InSAR) block; Cartographic surveying; Tie Points (TPs); Least squares; Digital Elevation Model (DEM)

1 引言

基于地面控制点(Ground Control Points, GCPs)实现干涉定标, 是目前干涉合成孔径雷达(Interferometric SAR, InSAR)获取高精度 DEM(Digital Elevation Model)的有效方案^[1,2]。然而, 干涉 SAR 系统, 一方面受其自身适应性限制, 整条航带的一致处理会使运动误差沿航向积累, 造成运动误差的空变效应增强, 最终导致成像质量下降, 两通道相干性降低, 不利于后续干涉处理, 实际操作中往往采用航带间重叠分景方式。另一方面, SAR 天线尺寸造成其在交轨方向上的有限测绘带宽

(5-7 km), 进而使得测绘覆盖区域通常由多个航带构成。故基于 InSAR 的大区域地形测绘通常是由多条航带多景数据构成的一个区域网。在区域网的每一景数据中布放足量的 GCPs 需要耗费大量的人力物力和时间, 极大地增加了 InSAR 地形测绘成本, 而且, 存在某些难以布放 GCPs 的测区(如荒山、沼泽、沙漠等)无法实现 DEM 定标。因此, 高程定标方式是 InSAR 大区域地形测绘所面临的一大挑战。

现有的如 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)利用海洋表面作为定标场^[3,4], 但该方案有两个缺陷: (1)海洋表面的时间去相关不仅使该方案难以适应多航过的 SAR 干涉测量^[5], 同时对某些单航过数据^[6]也不适用; (2)难以保证高程误差源在定标场数据和目标测绘区数据获取时的稳定性。文献[7]从理论上着重分析了干涉成像参数(如轨道、距离

2011-02-24 收到, 2011-06-03 改回

国家 863 计划项目(2007AA120302)资助课题

*通信作者: 姜丽敏 liminjiang1985@126.com

和时间参数等)的同时标定,但没有给出实验结果。尽管利用交叉航带重叠域高程的差值^[8],不需要任何 GCPs 和定标场即能实现 DEM 定标,但该方法会增加 InSAR 的额外空中作业量,而且需要事先将交叉航带的重叠域进行精确配准。

尽管区域网平差原理在摄影测量和遥感影像的几何校正^[9,10]方面得到广泛应用,但其在 InSAR 领域的研究刚刚开始。借鉴区域网平差思想,本文利用相邻景重叠域间自动提取的连接点(Tie Points, TP_s)和测绘区域少量的 GCPs,实现 InSAR 区域网高程同时重建。该方法包括两个主要步骤:首先,在相邻景提取 TP_s,并采用 3 维二次函数拟合方法^[11]获得 GCPs 在干涉图中的亚像素级定位;其次,采用迭代最小二乘平差原理,分别利用 GCPs 相对 WGS84 的绝对高程差和 TP_s 具有相等高程这一约束条件作为平差数据源,实现 InSAR 区域网各景 DEM 的同时重建。

2 高程误差模型

2.1 高程重建模型

为推导任意斜视成像几何下的 InSAR 高程重建方程,定义两个坐标系:平台坐标系和大地坐标系,分别记为 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})_p$, $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})_g$,如图 1 所示,其中 \hat{x}_p 与机身方向平行。天线安装位置由测量精度达 0.1 mm 的全站仪测量得到,因此,在高程重建模型中可以忽略天线安装误差,此时,天线 1 和天线 2 形成的基线严格位于 $\hat{y}_p \hat{z}_p$ 平面内。

根据图 1 所示几何关系,目标位置 T , 天线 1 的位置矢量 A_1 和天线 1 到目标 T 的距离矢量 R_1 满足

$$T = A_1 + R_1 \quad (1)$$

R_1 可分解为

$$R_1 = R_1 \cdot (\hat{R}_1)^T = R_1 \begin{bmatrix} \sin \beta & \sqrt{\sin^2 \theta - \sin^2 \beta} & -\cos \theta \end{bmatrix}^T$$

其中 \hat{R}_1, R_1 分别为

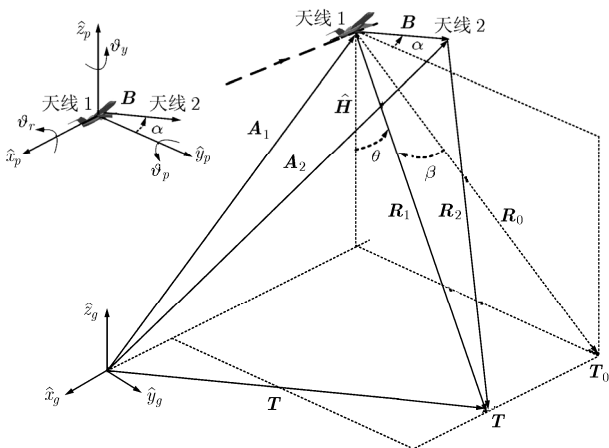


图 1 高程重建几何关系

天线 1 到 T 的单位矢量和距离, θ 为视角, β 为斜视角, 上标 T 表示转置运算。式(1)等价于

$$T = A_1 + R_1 \cdot \begin{bmatrix} \sin \beta \\ \sqrt{\sin^2 \theta - \sin^2 \beta} \\ -\cos \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

由 InSAR 测高原理^[12]知,若对天线 1 获取的单视复数据取共轭,干涉相位为

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{2\pi \cdot Q}{\lambda} \cdot (\langle R_1, R_1 \rangle^{1/2} - \langle R_2, R_2 \rangle^{1/2}) \\ &= \frac{2\pi \cdot Q}{\lambda} \cdot (|R_1| - \sqrt{\langle R_1, R_1 \rangle + \langle B, B \rangle - 2 \cdot \langle R_1, B \rangle}) \end{aligned} \quad (3)$$

其中单幅天线发信号两幅天线同时接收时 $Q=1$, 自发自收时 $Q=2$; R_2 为天线 2 到 T 的距离矢量; B 为基线矢量, 符号 $\langle \cdot \rangle$ 表示点乘运算。

将两坐标系一致时的视角记为 θ_0 , 此时 $\beta = 0$ 且天线 1 到目标的单位矢量 \hat{R}_0 与航向垂直。 \hat{R}_0, θ_0 可分别由几何关系和式(3)计算。

$$\hat{R}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ \sin \theta_0 \\ -\cos \theta_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\theta_0 = \alpha + \arcsin \left[\frac{B^2 + 2R_1 \cdot \Delta R - \Delta R^2}{2 \cdot B \cdot R_1} \right] \quad (5)$$

其中 $\Delta R = \lambda \phi / (2\pi Q)$, $B = \langle B, B \rangle^{1/2}$ 为基线长度, α 为 B 与轴 \hat{y}_p 的夹角, 称为“基线角”。

实际上, 机载平台的不稳定会导致两坐标系不一致。平台姿态运动可由 3 个角度描述, 即横滚角 ϑ_r , 俯仰角 ϑ_p 和偏航角 ϑ_y ; 分别定义为绕 \hat{x}_p, \hat{y}_p 和 \hat{z}_p 轴的逆时针旋转角。各旋转角矩阵为

$$\begin{aligned} M_r &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \vartheta_r & -\sin \vartheta_r \\ 0 & \sin \vartheta_r & \cos \vartheta_r \end{bmatrix} \\ M_p &= \begin{bmatrix} \cos \vartheta_p & 0 & -\sin \vartheta_p \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \vartheta_p & 0 & \cos \vartheta_p \end{bmatrix} \\ M_y &= \begin{bmatrix} \cos \vartheta_y & -\sin \vartheta_y & 0 \\ \sin \vartheta_y & \cos \vartheta_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

经平台姿态运动后, 单位矢量 \hat{R}_1 和 \hat{R}_0 满足:

$$\begin{aligned} \hat{R}_1 &= M_y M_p M_r \hat{R}_0 \\ &= \begin{bmatrix} \cos \vartheta_y \sin \vartheta_p \cos(\theta_0 + \vartheta_r) - \sin \vartheta_y \sin(\theta_0 + \vartheta_r) \\ \sin \vartheta_y \sin \vartheta_p \cos(\theta_0 + \vartheta_r) + \cos \vartheta_y \sin(\theta_0 + \vartheta_r) \\ -\cos \vartheta_p \cos(\theta_0 + \vartheta_r) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

由 θ 定义 $\cos \theta = -\langle \widehat{\mathbf{R}}_1, \widehat{\mathbf{H}} \rangle$ ($\widehat{\mathbf{H}}$ 为平台高度的单位矢量), 结合式(7), 可得 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})_p$ 相对 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})_g$ 存在旋转变换时的 θ 。

$$\theta = \arccos(\cos \vartheta_p \cos(\theta_0 + \vartheta_r)) \quad (8)$$

由式(2), 式(5), 式(8)可得, 目标 T 高程为

$$h_T = H - R_1 \cdot \cos \left[\cos \vartheta_p \cos \left(\alpha + \arcsin \left(\frac{B^2 + 2R_1 \cdot \Delta R - \Delta R^2}{2 \cdot B \cdot R_1} \right) + \vartheta_r \right) \right] \quad (9)$$

其中 H 为平台飞行高度。式(9)适用于正侧视和任意斜视成像几何。

2.2 高程灵敏度

由式(9)知, 目标高程 h_T 为斜距 R_1 , 基线长度 B , 基线角 α , 干涉相位 ϕ , 以及俯仰角 ϑ_p 和横滚角 ϑ_r 的函数。式(9)对各参数求偏导, 可得高程对各参数的灵敏度 $\frac{\partial h_T}{\partial(\cdot)}$ 。 $\frac{\partial h_T}{\partial(\cdot)}$ 的一般表达式 (R_1 除外) 为

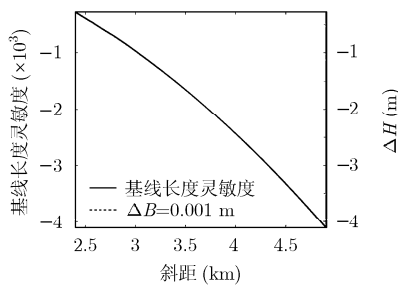
$$\frac{\partial h_T}{\partial(\cdot)} = \frac{\partial h_T}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial(\cdot)} \quad (10)$$

其中 $\frac{\partial \theta}{\partial(\cdot)}$ 为视角对任意参数的偏导数。首先, 由式(8)

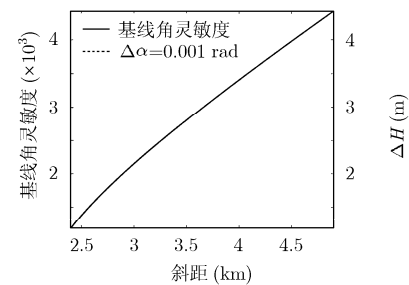
分别求视角对各参数(即 $B, \alpha, \phi, \vartheta_r, \vartheta_p$) 的灵敏度; 其次, 根据机载双天线干涉系统实际参数(表 1), 分析各参数的高程灵敏度。

(1) θ 对基线长度的偏导数:

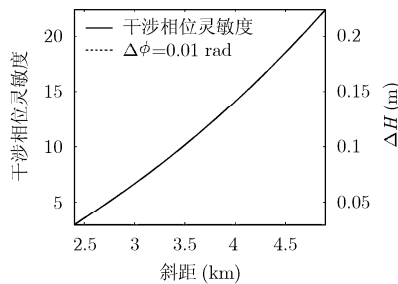
$$\frac{\partial \theta}{\partial B} = \frac{\sqrt{\cos^2 \vartheta_p - \cos^2 \theta}}{\sin \theta} \cdot \frac{1}{2R_1} - \frac{\Delta R}{B^2} + \frac{\Delta R^2}{2B^2 R_1} \quad (11)$$



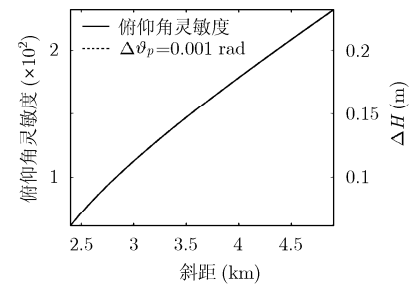
(a) 高程对基线长度灵敏度



(b) 高程对基线角灵敏度



(c) 高程对干涉相位灵敏度



(d) 高程对俯仰角灵敏度

图 2 高程灵敏度函数

表 1 机载双天线干涉系统参数

波长 λ	0.0312 m
基线长度 B	2.3019 m
基线角 α	-4.3442×10^{-5} rad
平台高度 H	3007.3951 m
飞行速度 V	87.1815 m/s
干涉模式 Q	1

图 2(a)左边纵轴为高程对基线长度的灵敏度; 右边纵轴为基线长度误差 $\Delta B = 0.001$ m 时引入的高程误差 ΔH 。显然, 当 B 存在误差时反演的地形高程误差呈现由近距到远距的斜坡面。

(2) θ 对基线角的偏导数:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \alpha} = \frac{\sqrt{\cos^2 \vartheta_p - \cos^2 \theta}}{\sin \theta} \quad (12)$$

图 2(b)左边纵轴为高程对基线角的灵敏度; 右边纵轴为基线角误差 $\Delta \alpha = 0.001$ rad 时引入的高程误差 ΔH 。 $\Delta \alpha$ 引入的高程误差沿距离向空变, 且远距高程误差大于近距。

(3) θ 对干涉相位的偏导数:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \phi} = \frac{\sqrt{\cos^2 \vartheta_p - \cos^2 \theta}}{\sin \theta} \cdot \frac{\lambda}{2\pi Q B} \left(1 - \frac{\lambda \phi}{2\pi Q R_1} \right) \quad (13)$$

图 2(c)左边纵轴为高程对干涉相位的灵敏度; 右边纵轴为干涉相位误差 $\Delta \phi = 0.01$ rad 时引入的高程误差 ΔH 。当 $\Delta \phi$ 为正时, 引入的高程误差呈现由近距到远距逐渐增加的斜坡面。

(4) θ 对横滚角的偏导数:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \vartheta_r} = \frac{\sqrt{\cos^2 \vartheta_p - \cos^2 \theta}}{\sin \theta} \quad (14)$$

式(14)等于式(12)，即 $\frac{\partial h}{\partial \alpha} = \frac{\partial h}{\partial \vartheta_r}$ 。实际上，由 2.1

节高程重建模型知，当平台发生横滚运动时， ϑ_r 将叠加到基线角 α 上，因此高程对 ϑ_r 的灵敏度可统一为高程对 α 的灵敏度。

(5) θ 对俯仰角的偏导数：

$$\frac{\partial \theta}{\partial \theta_p} = \frac{\tan \vartheta_p \sqrt{\cos^2 \vartheta_p - \cos^2 \theta}}{\sin \theta} \quad (15)$$

图 2(d)左边纵轴为高程对俯仰角的灵敏度；右边纵轴为俯仰角误差 $\Delta \vartheta_p = 0.001 \text{ rad}$ 时引入的高程误差 ΔH 。尽管俯仰角引入的 ΔH 随斜距增大而增大，但干涉数据获取时 ϑ_p 由测量精度达 $4.3633 \times 10^{-5} \text{ rad}$ 的 INS(Initial Measurement Unit + Differential Global Positioning Systems, IMU + DGPS) 记录，因此可忽略 ϑ_p 引入的高程误差。

(6) 高程对斜距 R_1 的灵敏度

文献[13]基于原始回波数据，使得斜距误差在成像阶段得以精确校正，因此高程重建时无须考虑。

由上述分析知，基线长度、基线角和干涉相位偏置(以某点为基准进行的干涉相位解缠，会在展开相位中引入一个偏移常量，称为干涉相位偏置)是影响高程重建精度的主要误差源。因此，第 3 节针对此 3 类高程误差源，建立 InSAR 区域网 DEM 同时重建的数学模型。

3 InSAR 区域网 DEM 同时重建的数学模型

为简化推导，本文以两条航带四景数据(图 3)构成的小区域为例，推导区域网 DEM 重建的数学模型。重建过程包含两类点：GCPs(本文指高程控制点)和 TPs。位于相邻景重叠域的 GCPs 可以作为 TPs 加以利用。各景数据按平行于航向的顺序排列。

GCPs 按式(16)列出其对应的高程误差方程：

$$\frac{\partial h_{G_i}^k}{\partial B_{G_i}^k} \cdot \Delta B_{G_i}^k + \frac{\partial h_{G_i}^k}{\partial \alpha_{G_i}^k} \cdot \Delta \alpha_{G_i}^k + \frac{\partial h_{G_i}^k}{\partial \phi_{G_i}^k} \cdot \Delta \phi_{G_i}^k = \Delta H_{G_i}^k \quad (16)$$

其中 G 表示 GCPs, i 表示点序号；上标 k 表示数据景序号； $\frac{\partial h}{\partial B}, \frac{\partial h}{\partial \alpha}, \frac{\partial h}{\partial \phi}$ 分别为高程对基线长度 B ，基

线角 α 以及干涉相位 ϕ 的灵敏度函数(解析表达式见 2.2 节)； $\Delta B_k, \Delta \alpha_k, \Delta \phi_k$ 分别为 B, α 和干涉相位的偏差； $\Delta H_{G_i}^k$ 表示真实高程与反演高程的差值，称为“GCPs 平差数据源”。

$$\mathbf{F}' = \begin{bmatrix} F_{G1}^I & F_{T1}^I & F_{T2}^I & F_{T3}^I & F_{T4}^{II} & F_{T5}^{II} & F_{T6}^{II} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -F_{T1}^{II} & -F_{T2}^{II} & -F_{T3}^{II} & 0 & 0 & 0 & F_{G2}^{II} & F_{T7}^{II} & F_{T8}^{II} & F_{T9}^{II} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -F_{T4}^{III} & -F_{T5}^{III} & -F_{T6}^{III} & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{G3}^{III} & F_{T10}^{III} & F_{T11}^{III} & F_{T12}^{III} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -F_{T7}^{IV} & -F_{T8}^{IV} & -F_{T9}^{IV} & 0 & -F_{T10}^{IV} & -F_{T11}^{IV} & -F_{T12}^{IV} & F_{G4}^{IV} \end{bmatrix}_{4 \times 16} \quad (21)$$

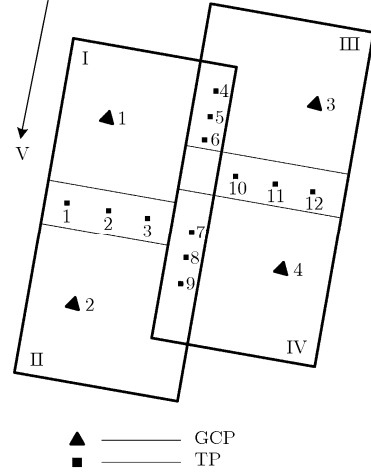


图 3 四景 DEM 同时重建的数学模型

TPs 误差方程为式(17)，单个 TP 的误差方程个数与其所在的数据景数目相等。

$$\frac{\partial h_{T_j}^k}{\partial B_{T_j}^k} \cdot \Delta B_{T_j}^k + \frac{\partial h_{T_j}^k}{\partial \alpha_{T_j}^k} \cdot \Delta \alpha_{T_j}^k + \frac{\partial h_{T_j}^k}{\partial \phi_{T_j}^k} \cdot \Delta \phi_{T_j}^k = \Delta H_{T_j}^k \quad (17)$$

其中 T 表示 TPs, j 为点序号。

式(16)，式(17)可分别写为矩阵形式：

$$\mathbf{F}_{G_i}^k \cdot \Delta_k = \Delta H_{G_i}^k \quad (18)$$

$$\mathbf{F}_{T_j}^k \cdot \Delta_k = \Delta H_{T_j}^k \quad (19)$$

其中 $\mathbf{F}_{K_j}^k = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_{K_j}^k}{\partial B_{K_j}^k} & \frac{\partial h_{K_j}^k}{\partial \alpha_{K_j}^k} & \frac{\partial h_{K_j}^k}{\partial \phi_{K_j}^k} \end{bmatrix}$, $K = G$ 或 T , $\Delta_k =$

$[\Delta B_k \ \Delta \alpha_k \ \Delta \phi_k]$ 。上述误差方程包括两类未知参数：各高程误差源修正值和 TPs 真实高程。其中，第 1 类未知数数目等于高程误差源数目 $N_{\text{pars}} = 3$ 乘以 InSAR 区域网内数据景数；而第 2 类未知数数目随区域网内 TPs 数目变化而变化，难以准确掌握。例如，对于 7 条航带 49 景数据构成的区域网，相邻景 TPs 数目按理论最小个数 3 计算，则需要求解的未知数总个数为 $49 \times N_{\text{pars}} + (6 \times 7 + 7 \times 6) \times 3 = 399$ 。其中 TPs 真实高程占 252 个，而这 252 个未知数并非求解的目标参数，因此消除此类未知数是可取的。以图 3 中 1 号 TP 为例，消除未知真实高程后，其对应的两个误差方程退化为一个，即各 TP 的等效误差方程包含两组高程误差源：

$$\mathbf{F}_{T1}^I \cdot \Delta_1 - \mathbf{F}_{T1}^{II} \cdot \Delta_{II} = H_{T1}^I - H_{T1}^{II} \quad (20)$$

其中 H_{T1}^I, H_{T1}^{II} 分别为其在第 I, II 景的反演高程，称 $\Delta H_{T1} = H_{T1}^I - H_{T1}^{II}$ 为“TPs 平差数据源”。至此，得到图 3 区域网简化误差方程的矩阵表达式。

$$\Delta H = \begin{bmatrix} \Delta H_{G1}^I & \Delta H_{T1} & \Delta H_{T2} & \Delta H_{T3} & \Delta H_{T4} & \Delta H_{T5} & \Delta H_{T6} & \Delta H_{G2}^{II} & \Delta H_{T7} \\ \Delta H_{T8} & \Delta H_{T9} & \Delta H_{G3}^{III} & \Delta H_{T10} & \Delta H_{T11} & \Delta H_{T12} & \Delta H_{G4}^{IV} \end{bmatrix}_{16 \times 1} \quad (22)$$

$$\Delta_{4 \times 1} = [\Delta_I \quad \Delta_{II} \quad \Delta_{III} \quad \Delta_{IV}] \quad (23)$$

即

$$F \cdot \Delta = \Delta H \quad (24)$$

根据最小二乘平差原理对式(24)进行迭代求解,直至TPs高程差和GCPs绝对高程差的平方和满足精度要求。

4 TPs检测与GCPs识别

由第2,3节知,GCPs和TPs在本文方法中起重要作用,因此,TPs检测和GCPs识别必须仔细考虑。

4.1 TPs检测

TPs是相邻干涉像对间的同一地物,其检测方法可参考文献[14]。

4.2 GCPs识别

GCPs是事先在测绘区布放的三面角反射器(图4),其精确的经纬度和高程由静态DGPS经长达4小时连续观测得到,测量精度达毫米级。尽管GCPs有精确的经纬度和高程,但干涉定标除利用其精确的测量高程外,还必须得到其在相应干涉图的精确行列坐标。



图4 北向拍摄编号为S03的三面角反射器

首先,由GCPs经纬度和航线经纬度,根据成像几何,确定干涉图中GCPs的大致范围 G ;其次,在 G 内找幅度极大值 $A_{\max}(\mathbf{x}_0)$, $\mathbf{x}_0 \in G$ 作为GCP的初始位置,其中 \mathbf{x} 为行列坐标向量, $A(\mathbf{x})$ 为幅度;然后,模拟文献[11]的方法,将 $A(\mathbf{x})$ 在 \mathbf{x}_0 进行泰勒展开:

$$A(\mathbf{x}) = A + \frac{\partial A^T}{\partial \mathbf{x}} \cdot \mathbf{x} + \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \cdot \frac{\partial^2 A}{\partial \mathbf{x}^2} \cdot \mathbf{x} \quad (25)$$

其中 $\mathbf{x} = (x, y)^T$ 是相对 \mathbf{x}_0 的偏移量,上标T表示转置。GCP位置由式(26)确定。

$$\hat{\mathbf{x}} = -\frac{\partial^2 A^{-1}}{\partial \mathbf{x}^2} \cdot \frac{\partial A}{\partial \mathbf{x}} \quad (26)$$

若偏移量 $\hat{\mathbf{x}}$ 的任一维大于0.5,迭代求解,直至

$\hat{\mathbf{x}} < 0.5$,从而得到GCPs在干涉图中的亚像素级定位。

5 实验

本文采用中国科学院电子学研究所自主研发的机载InSAR系统在中国山西省某地获取的两景X波段数据,验证本文方法的有效性和稳健性。实验区覆盖面积为 $2.5 \text{ km} \times 4 \text{ km}$,以平地为主,高程起伏为[905 m, 935 m],南边地势稍低于北边,地面覆盖物包括小麦田、无耕种的玉米杆地、刚犁过的农田等,航向重叠10%,如图5所示(受篇幅所限,仅给出含重叠域的部分SAR图像)。实验验证含4类点:GCPs,TPs,独立检查点(Independent Check Points, ICPs)和独立检查TPs(Independent Check Tie Points, ICTPs)。图5(a)为124对TPs;图5(b)为第1景重叠域,与图5(a)中白色长方形区域对应,三角形为实验区布放的6个GCPs。验证方案分4部分,各部分均采用5组实验,即参与重建的TPs数目 N 分别为[17,30,47,64,88](仅第1景有GCPs参与)。

5.1 高程误差模型验证

由于缺少实验区的真实高程,因此本实验假定由6个GCPs进行单景重建的高程 h_0 是真实的,即其对应的干涉参数 B_0, α_0, ϕ_0 是准确无误的。首先计算 N 个TPs参与重建后的 B_N, α_N, ϕ_N 与 B_0, α_0, ϕ_0 的偏差,即 $\Delta B_N = B_N - B_0$, $\Delta \alpha_N = \alpha_N - \alpha_0$, $\Delta \phi_N = \phi_N - \phi_0$;其次,由2.2节高程误差方程 $\Delta h_N = \frac{\partial h}{\partial B_N}$

$$\cdot \Delta B_N + \frac{\partial h}{\partial \alpha_N} \cdot \Delta \alpha_N + \frac{\partial h}{\partial \phi_N} \cdot \Delta \phi_N$$

引入的高程偏差 Δh_N ;最后,将 N 个TPs参与重建后高程 h_N 减去 Δh_N 与 h_0 作比较。定义残余高程差:

$$h_{\text{res}} = (h_N - \Delta h_N) - h_0 \quad (27)$$

根据 h_{res} 的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)和均值,验证第2节建立的InSAR高程误差模型。

图6为 N 取不同值时, h_{res} 的RMSE和均值。厘米级的RMSE和均值源于:(1)由干涉参数截断误差引起(由2.2节知,高程对干涉参数非常敏感,尤其是对基线长度和基线角,其灵敏度可达 10^3 量级);(2)由配准误差引入的干涉相位偏差^[15]等造成。厘米级误差验证了本文所建高程误差模型的合理性和准确性。

5.2 本文方法性能

算法性能由两景同时重建后高程 h_N 和单景重建后高程 h_0 之差 $\Delta h_{N,0}$ 的 RMSE 和均值评价, 其中单景重建时两景数据均使用仅有的 6 个 GCPs。比较 5 组实验中 $\Delta h_{N,0}$ 的 RMSE 和均值(表 2), 可以看出: (1)算法性能并非随 N 增加而改善, 说明除 N 外 TPs 分布也是影响本文算法性能的重要因素; (2)第 1 景的均值和 RMSE 在 $N = 30$ 时同时取得最小值, 而第 2 景的均值和 RMSE 分别在 $N = 47$ 和 $N = 88$ 时取得最小值, 即 RMSE 和均值在两景中的变化趋势不完全一致, 表明本文方法能够将大的粗差在相邻景中进行分配, 从而降低大的粗差对单景区域的影响, 进而保证相邻景的相对高程精度; (3)各组实验的 $\Delta h_{N,0}$ 在两景数据中均近似呈现沿距离向的抛物曲线且顶点均位于斜距 3.53 km 左右, 但第 2 景数据中 GCPs 布放区即斜距范围 [3.53 km, 4.37 km] 及其附近的 $\Delta h_{N,0}$ 较大(5 组实验中最大值的均值为 -1.2664 m)而第 1 景数据恰好相反, 这是因为单独重建时各高程误差源的估计值对该区域为最优, 而同时重建时第 2 景未利用 GCPs, 从而造成第 2 景的均值和 RMSE 比第 1 景高出 1 个数量级。

表 2 $\Delta h_{N,0}$ 的 RMSE 和均值

TPs 数目 N	第 1 景		第 2 景	
	RMSE	均值	RMSE	均值
17	0.0697	0.0590	0.5605	0.9575
30	0.0032	-10^3	0.5153	0.7500
47	0.0618	0.0534	0.6220	0.6728
64	0.0460	0.0396	0.5640	0.6940
88	0.1851	0.1338	0.3669	0.8077

以表 2 中 $N = 64$ 的重建结果为例, 将单独重建和同时重建后的高程剖面图(图 5(b)沿航向的均值)以及两者的差值示于图 7。系统设计时的有效视角范围 $[37^\circ, 63^\circ]$ 对应的斜距为 [2.61 km, 4.59 km], 显

然 $\Delta h_{N,0}$ 在该范围内几乎为厘米级, 尤其是在 GCPs 布放区及其附近可达毫米级, 然而对于缺少 GCPs 且地形高程起伏达 20 m 的近距离端, $\Delta h_{N,0}$ 略大于 0.1 m, 由 2.2 节高程灵敏度沿距离向的空变特性知, GCPs 沿距离向的均匀布放方案能够减缓该现象即重建结果局部最优。图 7 中两堵围墙(见图 4)恰好与自东向西的飞行航向平行, 墙壁与地面构成的二面角反射器使得围墙外侧的雷达散射信号能有效到达接收机, 从而使外侧对应的干涉相位能够部分反映围墙高度; 然而围墙内侧易出现遮挡, 造成内侧的散射信号难以到达接收机, 进而使该区域的回波信号中热噪声占优, 导致围墙内侧严重去相干因此干涉相位噪声大, 其高程呈现图 7 所示尖峰。

5.3 高程精度

ICPs 高程由静态 DGPS 经长时间观测得到, 第 i 个 ICP 的绝对高程偏差定义为反演高程与测量高程差。

$$\Delta H_{ICP}^i = H_{derived}^i - H_{measured}^i \quad (28)$$

根据 ΔH_{ICP}^i 的统计值, 包括最大值、最小值、中值、RMSE 和均值, 衡量采用本文方法重建后 DEM 的高程精度。本实验采用第 2 景未参与重建的 6 个 ICPs 实现高程精度验证。

表 3 为各组实验中 ΔH_{ICP}^i 的统计值。由 5 组实验对应的均值范围 $[-1.2740$ m, -0.9711 m] 知, 经本文方法重建后地形高程似乎比真实高程低 1 m 左右, 这主要由高程误差源的不准确估计引起: (1)5 组实验中参与重建的 GCPs 集中在第 1 景, 意味着第 2 景缺少有效边界约束; (2)钢架结构建筑物(图 5(a)椭圆区域)的后向散射系数远大于其周围农田, 造成该建筑物以北区域干涉相位标准差增加, 最终致使基于积分过程的相位缠绕将噪声引入到本景数据的其它区域, 进而使该景数据的展开相位一定程度上偏离地形真实相位; (3)成像处理时多普勒几何不准确和斜视几何使散射点相位存在方位向和距离

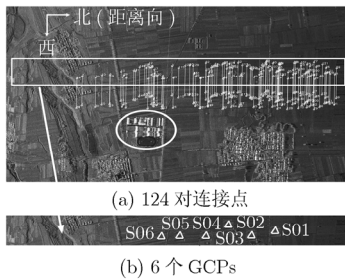


图 5 连接点和地面控制点的分布

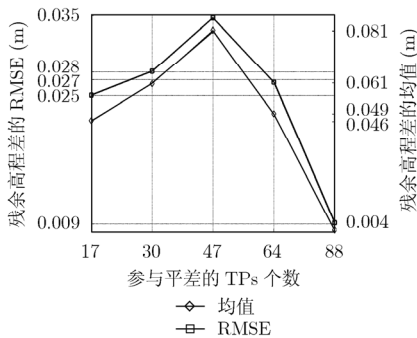


图 6 残余高程差的 RMSE 和均值

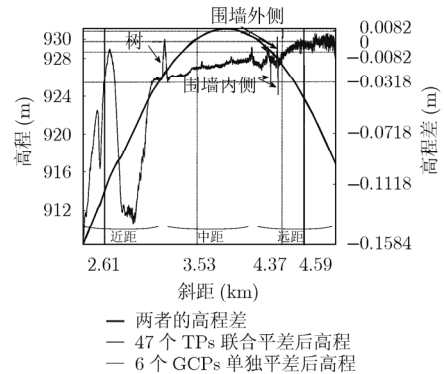


图 7 第 1 景重叠域沿航向平均的高程剖面图

表3 ICTPs 绝对高程偏差统计值

TPs 数 目 N	ICTPs 绝对高程偏差统计值(m)				
	最小值	最大值	中值	RMSE	均值
17	-2.098	-0.2367	-1.2740	0.6564	-1.2740
30	-1.891	-0.2172	-1.0500	0.6248	-1.1370
47	-1.903	0.0097	-1.0300	0.6698	-1.0650
64	-1.812	0.0779	-0.9427	0.6614	-0.9764
88	-1.716	-0.1018	-0.8852	0.6053	-0.9711

向斜坡进而增大配准误差对最终干涉相位的影响^[5]。由 ΔH_{ICP}^i 的均值变化趋势知, 经本文方法重建后地形高程相对真实高程的偏差随着参与重建的 TPs 数目 N 增加而减小, 尽管 $N = 47$ 时 ΔH_{ICP}^i 的 RMSE 较之 $N = 30$ 增大 0.045 m, 但 N 继续增加时 RMSE 也随之减小, 这表明除 N 外 TPs 信杂比 (Signal-to-Clutter Ratio, SCR; 定义为独立散射点相对于周围杂波干扰的能量之比; 当 SCR 大时, 可视各 TP 具有独立的散射中心, 其干涉相位能够进行独立提取, 这也正是需要实地布放角反射的主要原因。)也是影响高程精度的重要因素之一, 同时表明本文方法能够将大的粗差在区域内进行分配, 降低大的粗差对局部区域的影响, 避免局部最优解。

图 8 为 $N = 64$ 时第 2 景的 DEM。a 区域中道路宽约 2 m, 高出两边沟壑约 1 m; b 包含孤立坟墓且某些上面长有树(部分见图 4), X 波段 SAR 不具有穿透能力, 因此不发生多路径反射时它能够部分反映树冠高度; c 含道路、树苗和孤立树; d 包括高压

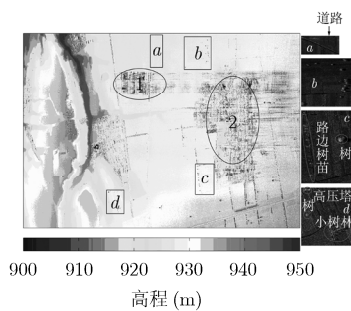


图8 本文方法重建后, 第2景 DEM

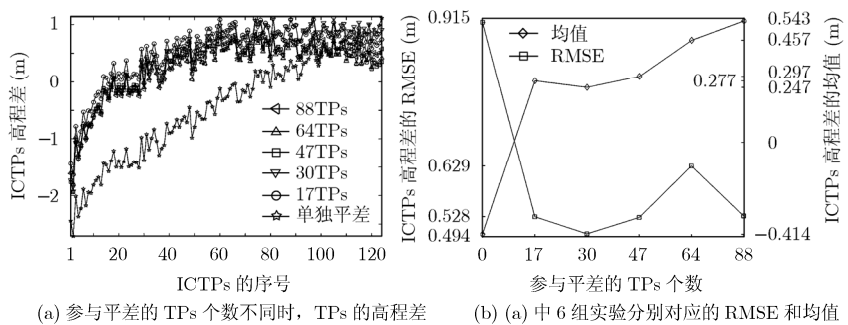


图9 重叠域高程一致性

塔、孤立树和小树林; 上述 4 个区域中的特征地物在 DEM 中清晰可见。图 8 中建筑物 1(图 5 椭圆区域)和建筑物 2 相互作用使得建筑物 2 右边噪声极大程度上掩盖了地形起伏相位, 最终使其反演高程中含有噪声; 实际上建筑物 1 左边区域也受其影响, 但近距回波强于远距进而降低了其对近距的影响。

5.4 重叠域高程一致性

ICTPs 是位于相邻景重叠域且未参与重建的 TPs, 每个 ICTP 对应两个反演高程, 两者之差 $\Delta h_{\text{ICTP},i}$ 用于衡量重叠域相对高程精度。本文方法和单独重建各自对应的相对高程差 $\Delta h_{\text{ICTP},i}^r$ 见图 9。显然, 两景单独重建后 $\Delta h_{\text{ICTP},i}^r$ 从近距到远距呈近乎线性增长, 而本文方法的 $\Delta h_{\text{ICTP},i}^r$ 从第 30 个 ICTP 开始基本保持恒定, 并且 5 组实验的 $\Delta h_{\text{ICTP},i}^r$ 曲线非常接近。各组实验中 $\Delta h_{\text{ICTP},i}^r$ 的 RMSE 和均值分别示于图 9(b)中左右纵轴, 横坐标 0 对应单独重建。

6 结束语

本文提出一种基于相邻景自动提取的连接点, 利用最小二乘原理, 实现 InSAR 区域内多景干涉图到高精度 DEM 的同时反演方法。对中国科学院电子学研究所研制的 InSAR 系统在山西某地获取的 X 波段数据进行的实验, 表明本文方法不仅能够实现无控制点区域的高精度 DEM(RMSE 小于 0.7 m)生成同时还能提高重叠域的高程一致性, 为后续大范围 DEM 拼接提供方便。

参考文献

- [1] Mallorqui J J, Bara M, and Broquetas A. Calibration requirements for airborne SAR interferometry [C]. SAR Image Analysis, Modeling, and Techniques III, Proceedings of SPIE, 2000, Vol. 4173: 267-278.
- [2] Gonzalez J H, Bachmann M, Scheiber R, et al. Definition of ICESat selection criteria for their use as height reference for TanDEM-X[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(6): 2750-2757.
- [3] Rabus B, Eineder M, Roth A, et al. The Shuttle Radar Topography Mission — a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2003, 57(4): 241-262.
- [4] Brown C G, Sarabandi K, and Pierce L E. Validation of the Shuttle Radar Topography Mission height data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(8): 1707-1715.

- [5] Krieger G, Moreira A, Fiedler H, *et al.* TanDEM-X: a satellite formation for high-resolution SAR interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(11): 3317–3341.
- [6] Chapin E, Hensley S, and Michel T R. Calibration of an across track interferometric P-band SAR [C]. Proceedings of IGARSS, Sydney, Australia, July 2001: 502–504.
- [7] Raggam H and Gutjahr K H. INSAR block parameter adjustment [C]. 3rd European Conference on Synthetic Aperture Radar, Munich, Germany, May 23–25, 2000: 493–496.
- [8] Dall J. Cross-calibration of interferometric SAR data [J]. *IEE Proceedings Radar, Sonar & Navigation*, 2003, 150(3): 177–183.
- [9] Toutin T. Path processing and block adjustment with RADARSAT-1 SAR images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(10): 2320–2328.
- [10] Tee-Ann T, Liang-Chien C, Chien-Liang L, *et al.* DEM-aided block adjustment for satellite images with weak convergence geometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(4): 1907–1918.
- [11] Brown M and Lowe D G. Invariant features from interest point groups [C]. In British Machine Vision Conference, Cardiff, Wales, 2002: 656–665.
- [12] Zebker H A, Hensley S, Shanker P, *et al.* Geodetically accurate InSAR data processor [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(12): 4309–4321.
- [13] Chen Shu-xuan, Jiang Li-min, and Xiang Mao-sheng. Channel delay estimation for interferometric synthetic aperture radar[C]. The 34th International Symposium for Remote Sensing of Environment, Sydney, Australia, April 2011: TS-73-1.
- [14] 姜丽敏, 陈曙暄, 向茂生. 面向 InSAR 稀疏控制点测图的同名点提取方法[J]. 电子与信息学报, 待发表.
Jiang Li-min, Chen Shu-xuan, and Xiang Mao-sheng. A method of homologue points extraction for InSAR mapping with sparse control points[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*.
- [15] Prats P and Mallorqui J J. Estimation of azimuth phase undulations with multiquint processing in airborne interferometric SAR images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(6): 1530–1533.
- 姜丽敏：女，1985 年生，博士生，研究方向为干涉 SAR 定标处理、SAR 图像解译。
- 陈曙暄：男，1981 年生，博士，研究方向为干涉 SAR 数据处理、地面慢速动目标检测。
- 向茂生：男，1964 年生，研究员，博士生导师，长期从事干涉合成孔径雷达技术及方法的研究工作。