

基于区域网平差的机载 InSAR 定标方法中控制点的选取策略及误差传递关系分析

胡继伟^{1,2,3}, 洪 峻^{1,2}, 明 峰^{1,2}, 张林涛^{1,2,3}

(1. 中国科学院空间信息处理与应用系统技术重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院电子学研究所, 北京 100190; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 高精度的高程测量需要通过干涉定标来对 InSAR 系统干涉参量误差进行校正, 为了降低系统随机误差对定标精度的影响, 一般选取 GCP 控制点时, 基于敏感度矩阵条件数最小原则要求 GCP 控制点尽量沿整个测绘带均匀分布, 但在复杂地形区域, 由于野外布放 GCP 控制点难度较大, 有时很难满足应用条件, 因而针对基于区域网平差理论的稀疏控制点下 InSAR 定标方法中控制点的选取策略及误差传递关系进行分析。结果表明: 选取 GCP 控制点时, 如果不能满足整个测绘带内沿距离向均匀分布的条件, 在满足尽量沿距离向分散的同时, GCP 控制点位置沿距离向靠近近距端分布是一种较好的 GCP 布设方法。另外, 基于区域网平差理论的多条带联合定标处理时, 传递顺序应该由远距端向近距端依次进行。最后, 对丘陵区域 3 条带仿真数据进行定标处理, 通过对不同选取策略下各条带的定标结果以及不同传递顺序下 3 条带联合定标结果进行比较, 验证了稀疏控制点下 InSAR 定标方法中控制点选取策略及误差传递关系分析的有效性及合理性。

关 键 词: 机载 InSAR; 干涉定标; 区域网平差; 稀疏控制点; 控制点选取策略

中图分类号: TN 958 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2011)03-0270-07

1 引 言

干涉合成孔径雷达 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 可以全天时、全天候获取大面积高精度的高程信息及地表形变信息, 因而广泛应用于地形三维测绘、环境监测及灾害评估等领域^[1-3]。由 InSAR 工作原理可知, 应用 InSAR 系统获取 DEM 时, DEM 精度对系统参量误差非常敏感, 系统参量误差 (基线误差、干涉相位偏置等) 的存在严重影响高程测量精度, 因而高精度的高程测量需通过干涉定标来对这些系统参量误差进行校正。

传统干涉定标相关研究着重于对单景图像对进行定标处理^[4-6], 而在机载 InSAR 系统实用化大范围制图中, 一方面敏感度方程的病态性要求增加 GCP 控制点来减小干涉相位随机误差对定标精度的影响, 而对于复杂地形区域, 野外布放 GCP 控制点难度很大; 另一方面, 传统定标方法将各条带数据

单独进行定标处理, 然后反演各条带 DEM, 由于干涉参量偏差导致高程误差沿距离向具有空变特性以及不同条带干涉参量解算精度不一致, 因而这种方法会造成条带间重叠区域高程不一致问题, 给后续图像拼接增加了困难; 为了解决这些问题, 近年来提出了一种基于区域网平差的稀疏控制点下 InSAR 定标方法^[7-8], 其基本思想是将摄影测量学中的区域网平差理论引入到 InSAR 系统定标处理中^[9], 充分利用相邻条带间同名加密点 (连接点, CP), 通过相邻条带间同名加密点高程传递实现少量控制点下 InSAR 系统参量定标。

一般选取 GCP 控制点时, 基于敏感度矩阵条件数最小原则要求 GCP 控制点尽量沿整个测绘带均匀分布^[7], 但在复杂地形区域, 由于野外布放 GCP 控制点难度很大, 有时很难满足应用条件, 因而需要对稀疏控制点下 GCP 控制点的选取策略进行研究, 本文针对基于区域网平差理论的稀疏控制点下

InSAR定标方法中控制点的选取策略及误差传递关系进行分析。首先阐述了基于区域网平差理论的稀疏控制点下 InSAR 定标方法的基本思想及实现方法,然后通过理论分析不同的 GCP 控制点选取策略对 InSAR 定标结果的影响,进而提出稀疏控制点下 GCP 控制点的选取策略,并对不同选取策略下多条带联合定标误差传递关系进行了分析。分析结果表明:选取 GCP 控制点时,如果不能满足整个测绘带内沿距离向均匀分布的条件,在满足尽量沿距离向分散的同时,GCP 控制点位置沿距离向靠近远距端分布是一种较好的 GCP 布设方法,另外,基于区域网平差理论的多条带联合定标处理时,传递顺序应该由远距端向近距端依次进行。最后,对丘陵区域 3 条带仿真数据进行定标处理,通过对不同选取策略下各条带的定标结果以及不同传递顺序下 3 条带联合定标结果进行比较,验证了本文提出的稀疏控制点下 InSAR 定标方法中控制点选取策略及误差传递关系分析的有效性及合理性。

2 基于区域网平差的 InSAR 定标方法

机载双天线 InSAR 系统干涉测量空间几何关系如图 1 所示。

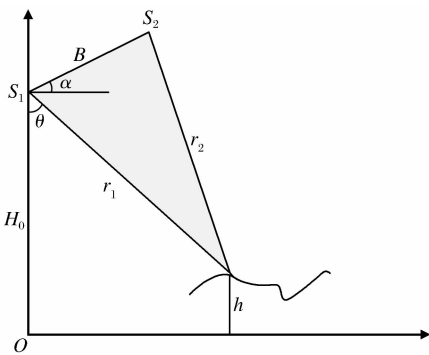


图 1 机载 InSAR 空间几何关系示意图

Fig. 1 Sketch map of imaging geometry for Airborne InSAR

其中, A_1 、 S_2 分别为两幅天线位置, B 为基线长度, α 为基线与水平方向的夹角, H_0 为平台高度, r_1 、 r_2 分别为天线 S_1 和 S_2 至目标点的距离, θ 为天线 S_1 视角, h 为目标点高程。由空间几何关系目标点高程可表示为:

$$h = H_0 - r_1 \cos \theta \quad (1)$$

$$r_2 = r_1 + \frac{\lambda \varphi}{2\pi P} \quad (2)$$

$$\theta = \alpha + \arcsin\left(\frac{r_1^2 + B^2 - r_2^2}{2Br_1}\right) \quad (3)$$

由此可得:

$$h = H_0 -$$

$$r_1 \cos\left(\alpha + \arcsin\left(\frac{B}{2r_1} - \frac{\lambda \varphi}{2\pi PB} - \frac{\lambda^2 \varphi^2}{8\pi^2 P^2 B r_1}\right)\right) \quad (4)$$

其中:标准模式下, $P = 1$,“乒乓模式”下, $P = 2$ 。

目标点高程可简化表示为:

$$h = H(\vec{x}) \quad (5)$$

其中: $\vec{x} = \vec{x}_0 + \Delta\vec{x}$, $\vec{x} = (B, \alpha, \varphi)$, \vec{x} 表示干涉参量的测量值, \vec{x}_0 表示干涉参量的真实值, $\Delta\vec{x}$ 为参量误差。

将式(5) 进行泰勒级数展开线性化可得:

$$h = H(\vec{x}_0) + \left.\frac{\partial H}{\partial \vec{x}}\right|_{\vec{x}_0} \Delta\vec{x} \quad (6)$$

即:

$$\Delta h = \left.\frac{\partial H}{\partial \vec{x}}\right|_{\vec{x}} \Delta\vec{x} \quad (7)$$

其中: $\Delta h = h - H(\vec{x}_0)$ 为目标点高程误差。

由此建立了目标点高程误差与干涉参量误差间的关系,即敏感度方程,从而可通过若干 GCP 控制点求解敏感度方程解算干涉参量误差。

以 3 条带为例分析,各条带内所有参考点(GCP 控制点和 CP 连接点)如图 2 所示。其中,同名 CP 连接点,即条带间重叠区域对应相同目标点,可通过

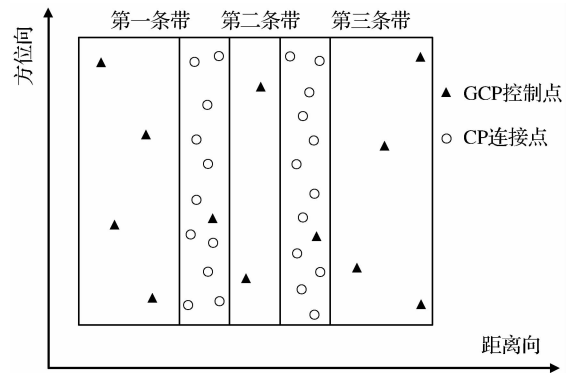


图 2 三条带参考点布设示意图

Fig. 2 Sketch map of distribution of reference points from three strips

特征点提取和最优相关匹配技术来实现高精度的同名点提取^[8]。传统定标方法对各自条带内 GCP 控制点根据式(7)列误差方程式,从而分别求出各自条带的干涉参量误差 \vec{x}_i 。但由于干涉相位随机误差以及控制点高程观测误差的存在,当 GCP 控制点个数较少时,敏感度矩阵的病态性将导致干涉参量解算误差较大。进而导致各条带目标点高程误差较大,为了提高各条带高程测量精度,需要增加 GCP 控制点数量来减小干涉相位随机误差以及控制点高程观测误差对定标精度的影响,而在机载 InSAR 系

统实用化大区域制图中,对于复杂地形区域,野外布放 GCP 控制点难度很大。另一方面,由于干涉参量偏差导致高程误差沿距离向具有空变特性以及由于 GCP 控制点选取个数及方式不同导致不同条带干涉参量解算精度不一致,因而这种方法会造成条带间重叠区域高程不一致问题。

基于区域网平差理论的定标方法首先提取相邻条带间的同名 CP 连接点,然后通过第一条带内 GCP 控制点解算并修正干涉参量误差进而获得第一、第二条带间 CP 连接点高程,然后第二条带定标时,充分利用第一、第二条带间 CP 连接点及本条带内的 GCP 控制点联合解算第二条带干涉参量误差并获得第二、第三条带间 CP 连接点高程,各条带依次进行处理。由于增加了较多 CP 连接点作为控制点,因而一方面可减少 GCP 控制点的需求,另一方面可降低干涉相位等随机误差对定标精度的影响;同时,由于条带间重叠区域高程由较多 CP 连接点进行约束,因而定标处理后条带间重叠区域高程误差会显著减小,便于后续条带间拼接处理。

3 控制点选取策略及误差传递关系

由干涉定标原理,控制点高程误差和干涉参量误差的关系构成了敏感度方程:

$$\mathbf{F} \cdot \Delta \vec{x} = \Delta h \tag{8}$$

其中: Δh 为控制点高程误差, \mathbf{F} 为敏感度矩阵, $\Delta \vec{x}$ 为待估计的干涉参量误差。由于各参量敏感度随着距离的变化而变化,从而导致干涉参量初始偏差引起的高程误差也随着距离的变化而变化,如图 3 所示。

干涉参量定标时,通过解算敏感度方程 $\mathbf{F} \cdot \Delta \vec{x} = \Delta h$ 求解参量偏差 $\Delta \vec{x}$,即 $\Delta \vec{x} = \Delta h / \mathbf{F}$,实际上是通过一种线性化的方式来求解参量偏差 $\Delta \vec{x}$ (如图 3 所示),但由于实际干涉参量偏差导致高程误差随着距离变化是一种非线性的关系,因而基于敏感度方程的参量定标方法本身存在一种模型误差。

一般选取控制点时,基于方程组求解时敏感度矩阵条件数最小原则要求 GCP 控制点沿距离向均匀分布^[7],这样可以提高敏感度方程求解的稳定性,降低干涉相位误差以及观测数据误差对干涉参量偏差估计的影响,但对于复杂地形区域,由于野外布放 GCP 控制点难度很大,因而有时很难做到所有控制点沿距离向均匀分布。基于敏感度矩阵条件数最小原则的控制点选取策略只是考虑了敏感度方程求解时随机误差对干涉参量误差解算结果的影响,实际上只要敏感度矩阵条件数在一定范围内,都可以较精确地求解

出结果。而另一方面,当选取的控制点沿距离向不同分布时,线性拟合导致模型误差不同,因此求解的干涉参量误差不同进而导致反演高程误差不同。

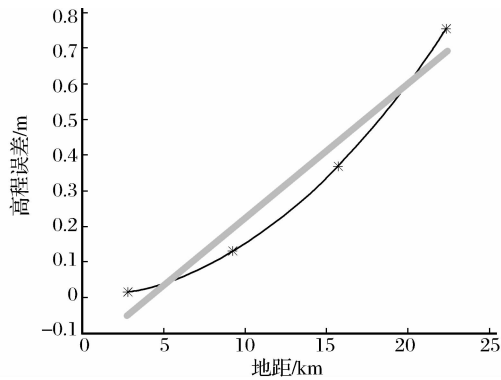


图 3 干涉参量误差导致高程误差沿距离向变化示意图
Fig. 3 Illustration of DEM error along the ground range caused by interferometric parameters errors

根据高程误差对各干涉参量误差敏感度可知,随着距离的增加,干涉参量偏差导致高程误差不断增大(如图 3 所示),因而选取控制点时,如果不能满足整个测绘带内沿距离向均匀分布的条件,在满足尽量沿距离向分散的同时,GCP 控制点位置沿距离向靠近远距端分布时,靠近远距端误差得到控制,即抑制了干涉参量偏差导致高程误差沿距离向扩大的趋势,因而是一种较好的 GCP 布设方法。

由上述分析可知,基于区域网平差理论的定标方法中 CP 连接点高程获取时,由于干涉参量误差导致远距端高程误差较大,因而多条带联合定标处理时,应先对第三条带进行定标处理获取第二、第三条带间 CP 连接点高程,进而联合第二条带内 GCP 控制点对第二条带进行定标处理,即传递顺序由远距端向近距端依次进行。

4 仿真实验结果与分析

为了验证基于区域网平差理论的稀疏控制点下 InSAR 定标方法中控制点的选取策略及误差传递关系的合理性,实验仿真了丘陵地区机载双天线 InSAR 系统 3 条航带的数据,InSAR 系统参数如表 1 所示。

表 1 InSAR 系统参数
Table 1 Systematic parameters of InSAR

参数	数值
雷达波长/m	0.03125
飞行高度/m	3 286.6
基线长度/m	2.177443
基线倾角/rad	0.013658
工作模式	乒乓模式

仿真场景距离向宽 5 km,方位向 6 km,条带间重叠度 1/3,场景设置如图 4 所示。其中,第一条带和第三条带仿真了 146 个点目标,第二条带仿真了 214 个点目标,第一、第二条带重叠区域以及第二、

第三条带重叠区域各 90 个点目标,考虑到实际参考点(GCP 控制点和 CP 连接点)相关性及干涉处理误差,设参考点干涉相位随机误差均值为 0,标准差为 5°。三条带图像及点目标分布如图 5 所示。

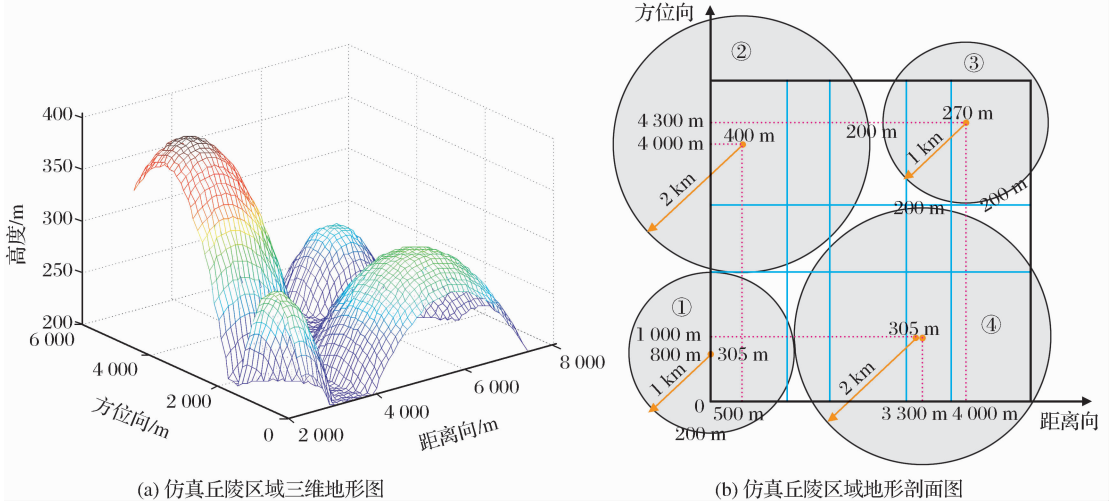


图 4 仿真丘陵区示意图
Fig. 4 Illustration of the simulative area of highland

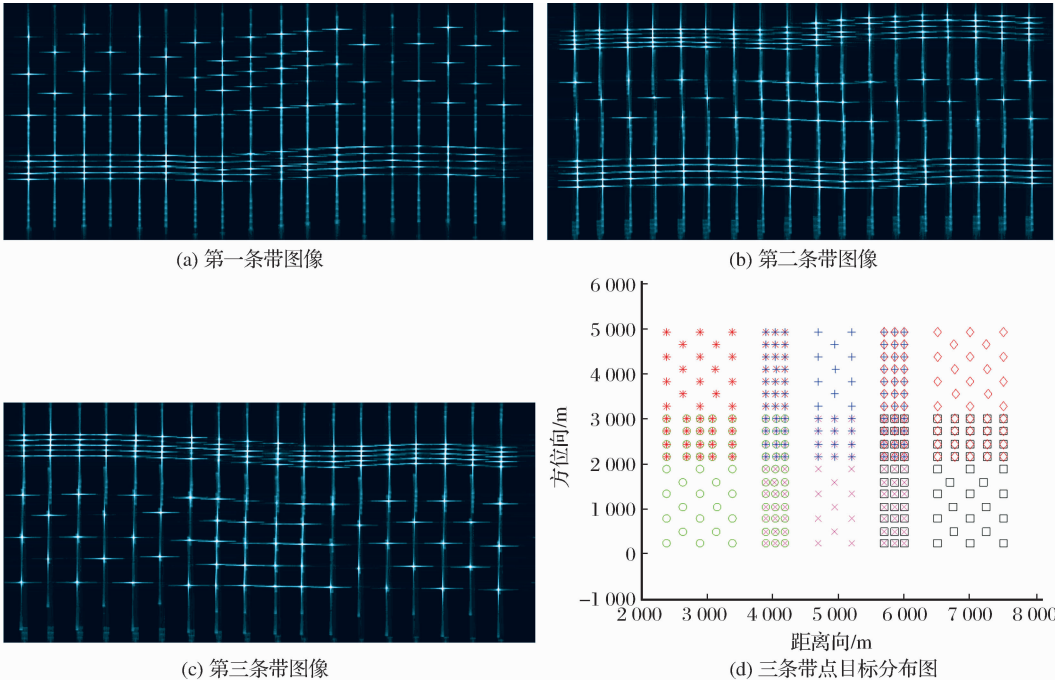


图 5 仿真三条带图像及点目标分布示意图
Fig. 5 Simulative images and distribution of reference points from three strips

4.1 不同 GCP 选取策略定标结果

首先采用传统干涉定标方法分别对第一、第二和第三条带进行定标处理,通过比较不同 GCP 控制点选取策略对定标结果的影响从而验证本文提出的稀疏控制点下 GCP 控制点选取策略的合理性。其中,第一条

带选取非重叠区域靠近近距端 5 个 GCP 控制点,第二条带选靠近场景中部 5 个 GCP 控制点,第三条带选取非重叠区域靠近远距端 5 个 GCP 控制点,其余目标点作为检查点。分别对三条带数据进行干涉定标处理并反演所有目标点高程,结果如图 6 及表 2 所示。

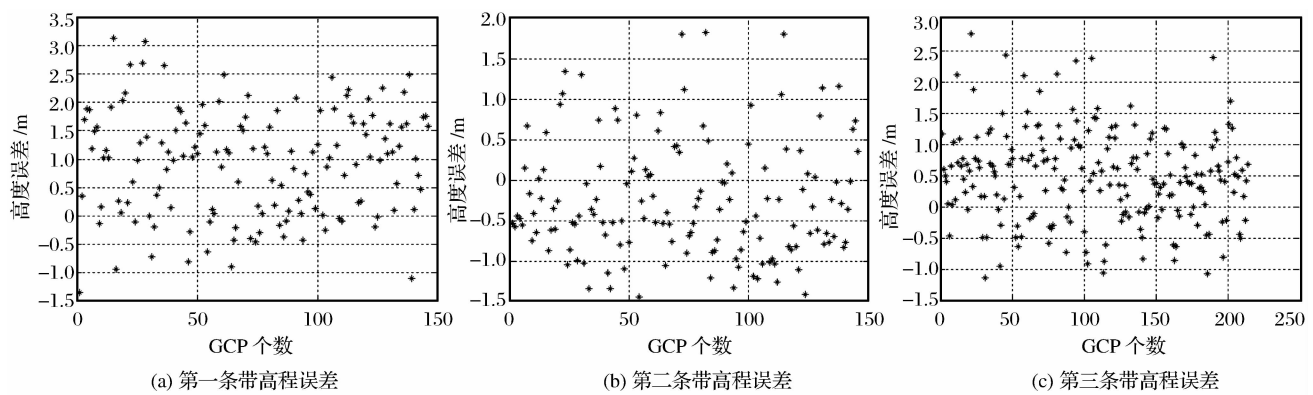


图 6 不同 GCP 选取策略定标结果示意图

Fig. 6 Illustrations of calibration results from different strategies of GCPs select

表 2 不同 GCP 选取策略定标结果		
Table 2 Calibration results from different strategies of GCPs select		
条带序号	敏感度矩阵条件数	高程误差/m
条带 1(GCP 靠近近距端)	426 595	$\sigma_{\text{DEM}}=1.310$
条带 2(GCP 靠近中间)	256 797	$\sigma_{\text{DEM}}=0.869$
条带 3(GCP 靠近远距端)	722 312	$\sigma_{\text{DEM}}=0.755$

由实验结果可知,尽管条带 3 敏感度矩阵条件数要大于条带 1 和条带 2,但定标处理后第三条带高程误差明显小于条带 1 和条带 2 高程误差,因而可以看出,条带 3 靠近远距端的 GCP 控制点选取策略要优于条带 1 靠近近距端和条带 2 靠近场景中部的 GCP 控制点选取策略。由此可知,GCP 控制点选取时,敏感度矩阵条件数只是一个约束条件,只要敏感度矩阵条件数在一定范围内,都可以较精确地求解出结果。而当 GCP 控制点靠近远距端分布时,由于靠近远距端模型误差得到控制,从而抑制了干涉参量偏差导致高程误差沿距离向扩大的趋势,因而定标精度较高,从而验证了本文提出的 GCP 控制点选取策略的合理性和有效性。

4.2 不同传递顺序定标结果

分别采用从近距端至远距端和从远距端至近距端的传递顺序对三条带进行联合定标处理,其中,第一条带选取非重叠区域 5 个 GCP 控制点,第二条带选取非重叠区域 3 个 GCP 控制点,第三条带选取非重叠区域 5 个 GCP 控制点,第一、二条带和第二、三条带重叠区域各 90 个同名点作为 CP 连接点,其余目标点作为检查点。对 3 条带数据进行联合定标处理并反演所有目标点高程,结果如表 3 所示。

对比上述不同传递顺序下各条带联合定标结果可以看出,由远距端向近距端传递的 3 条带联合定

表 3 不同传递顺序联合定标结果		
Table 3 Calibration results from different transfer manner		
传递顺序	条带序号	高程误差/m
近距端至远距端	条带 1	$\sigma_{\text{DEM}}=1.310$
	条带 2	$\sigma_{\text{DEM}}=4.764$
	条带 3	$\sigma_{\text{DEM}}=6.075$
	条带 1、2 重叠区域	$\sigma_{\text{DEM}}=0.741$
	条带 2、3 重叠区域	$\sigma_{\text{DEM}}=1.251$
远距端至近距端	条带 1	$\sigma_{\text{DEM}}=0.701$
	条带 2	$\sigma_{\text{DEM}}=0.727$
	条带 3	$\sigma_{\text{DEM}}=0.755$
	条带 1、2 重叠区域	$\sigma_{\text{DEM}}=0.743$
	条带 2、3 重叠区域	$\sigma_{\text{DEM}}=0.673$

标结果高程精度要明显优于由近距端向远距端传递的定标结果高程精度。由前述误差传递关系分析可知,干涉参量误差导致高程误差随着距离向增大而不断增大,当采取由近距端向远距端传递的顺序时,由于远距端高程误差较大,因而导致提取远距端同名 CP 连接点高程误差较大,进而导致引入 CP 连接点进行下一条带联合定标时误差不断累积,从上述定标结果可以看出条带 1、条带 2、条带 3 误差不断增大。当采取从远距端向近距端传递时,远距端误差得到控制,提取同名 CP 连接点位于近距端,高程误差较小,因而抑制了 CP 连接点传递时误差的累积效应,3 条带的高程精度很接近。上述分析结果进一步验证了稀疏控制点下 InSAR 定标方法中控制点的选取策略及误差传递关系的合理性。

5 结 语

InSAR 系统需要通过干涉定标来校正干涉参量误差以提高 DEM 获取精度,由于敏感度矩阵的

病态性,为了降低系统随机误差对定标精度的影响,一般干涉定标选取 GCP 控制点时,基于敏感度矩阵条件数最小原则通常要求 GCP 控制点尽量沿整个测绘带均匀分布,但在机载 InSAR 系统实用化大区域制图中,对于复杂地形区域,野外布放 GCP 控制点难度很大,因而有时很难满足应用条件。本文通过对基于区域网平差理论的稀疏控制点下 InSAR 定标方法中控制点的选取策略及误差传递关系进行分析,提出稀疏控制点下选取 GCP 控制点时,如果不能满足整个测绘带内沿距离向均匀分布的条件,在满足尽量沿距离向分散的同时,GCP 控制点位置沿距离向靠近远距端分布是一种较好的 GCP 布设方法。另外,基于区域网平差理论的多条带联合定标处理时,传递顺序应该由远距端向近距端依次进行。最后对通过仿真数据进行处理验证了稀疏控制点下 InSAR 定标方法中控制点选取策略及误差传递关系分析的有效性及合理性。

参考文献(References):

[1] Madsen S N,Zebker H A. Topographic Mapping Using Radar Interferometry:Processing Techniques[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing,1993,29(6):1125-1128.

[2] Rosen P A,Hensley S. Synthetic Aperture Radar Interferometry[J]. Proceedings of the IEEE, March 2000, 88(3): 333-381.

[3] Krieger G,Hajnsek I,et al. Interferometric Synthetic Aperture Radar (SAR) Missions Employing Formation Flying [J]. Proceedings of the IEEE,May 2010,98(5):689-696.

[4] Mallorqui J J,Bara M,Broquetas A. Calibration Requirement for

Airborne SAR Interferometry[C]//SAR Image Analysis,Modeling and Techniques III,Proceedings of SPIE,2000,4173(6):267-278.

[5] Li Pin,Wang Dongjin,Chen Weidong. Parameter Calibration based on Calibrators' Height Difference for InSAR System [J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences,2009,26(1):68-74. [李品,王东进,陈卫东. 基于定标器高程差的 InSAR 参数定标[J]. 中国科学院研究生院学报,2009,26(1):68-74.]

[6] Zhang Wei,Xiang Maosheng,Wu Yirong. Realization of Outside Calibration Method based on the Sensitivity Equation for Dual-antenna Airborne SAR[J]. Remote Sensing Technology and Application,2009,24(1):262-269. [张薇,向茂生,吴一戎. 基于三维重建模型的机载双天线 SAR 外定标方法及实现[J]. 遥感技术与应用,2009,24(1):262-269.]

[7] Zhang Wei. Airborne Dual-antenna InSAR's Interferometric Calibration Method Research [D]. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences,2009. [张薇. 机载双天线干涉 SAR 定标方法研究[D]. 中国科学院电子学研究所,2009.]

[8] Han Songtao,Xiang Maosheng. A Bundle Adjustment Calibration Method for Airborne Syetem based on Weighting of Feature Points[J]. Journal of Electronics & Information Technology,2010,32(5):364-370. [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):364-370.]

[9] Wang Zhizhuo. Photogrammetry Theory[M]. Beijing:Publishing House of Photogrammetry,1984. [王之卓. 摄影测量原理[M]. 北京:测绘出版社,1984.]

[10] Li Qingyang,Wang Nengchao,Yi Dayi. Numerical Analysis (Fourth Edition)[M]. Beijing:Publishing House of Tsinghua University,2006. [李庆扬,王能超,易大义. 数值分析(第四版)[M]. 北京:清华大学出版社,2006.]

The Strategy of GCPs Select and Error Transfer Manner among Calibration Method for Airborne InSAR based on Bundle Adjustment

HU Ji-wei^{1,2,3},HONG Jun^{1,2},MING Feng^{1,2},ZHANG Lin-tao^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Spatial Information Processing and Application System Technology, Chinese Academy of Sciences,Beijing 100190,China;2. Institute of Electronics,Chinese Academy of Sciences,Beijing 100190,China;3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences,Beijing 100049,China)

Abstract: High-precision height acquisition needs to correct the interferometric parameters errors by interferometric calibration for InSAR system. In order to reduce influence of the systematic random errors to the calibration precision,generally,while selecting GCPs,we follow the rule of minimum of conditional numbers of the sensitivity equations and choose GCPs along the whole strip of topography uniformly. but sometimes it's very difficult to satisfy this requirement as it's hard to dispose GCPs in the field with complicated

terrains,so this paper makes researches on the strategy of GCPs select and error transfer manner among calibration method for airborne InSAR with sparse GCPs based on bundle adjustment,and analyzed results show that if we can't fulfill the condition that all the GCPs uniformly distribute along the whole mapping strip while selecting GCPs,trying our best to make the GCPs disperse along the slant range direction and putting them near the far end of slant range direction is a better way. Meanwhile,when we make a joint calibration of several strips,the processing order should be from the far end to the near end in turn. Finally,in comparison with results from different strategy of GCPs select and processing order,we make a calibration to the simulative data of three strips from the highland and the results confirm the validity and rationality of the proposed strategy of GCPs select and error transfer manner among calibration method for airborne InSAR with sparse GCPs based on bundle adjustment.

Key words: Airborne InSAR; Interferometric calibration; Bundle adjustment; Sparse GCPs; Strategy of GCPs select

(上接第 327 页)the classification result. In this paper,the recently developed texture measure Local Binary Pattern (LBP) was extended to a multivariate version to characterize the multivariate spatial correlation among multiple bands of multispectral image. The derived single-band and multivariate texture features were then individually combined with the spectral data in image classification to evaluate the performance of the texture measure. Experiments demonstrate that compared with spectral classification,the classification accuracies can be significantly improved when the single-band or the multivariate LBP texture features were included. The results also show that the classifications by incorporating multivariate texture show high overall accuracies,which are better than or at least comparable with the best classification result by adding the existing LBP texture;the use of multivariate LBP texture in image classification avoids the band selection procedure which is required in the incorporation of traditional LBP texture into image classification.

Key words: Local Binary Pattern; Multivariate texture; Texture extraction; Support Vector Machine (SVM); Assessment of accuracy