

TanDEM-X 双站 InSAR 地形提取及精度评估

孙亚飞^{1,2} 江利明¹ 柳林^{1,2} 孙永玲^{1,2} 汪汉胜¹

1 中国科学院测量与地球物理研究所大地测量与地球动力学国家重点实验室,湖北 武汉,430077

2 中国科学院大学,北京,100049

摘要:在介绍 TanDEM-X/TerraSAR-X SAR 数据获取模式和零秒时间基线等双站干涉测量优势的基础上,提出了一种基于 TanDEM-X 双站 SAR 数据的高精度地形提取方法,并利用 ICESat 激光测高数据进行了精度评估。该方法采用引入外部 DEM 进行相位差分的策略,减少相位残差,提高相位解缠精度与效率。另外,在双站模拟相位和地理编码过程中考虑到双站几何结构和零时间多谱勒时间参数,采用 ICESat 高程数据进行绝对相位偏移校正。以复杂地形环境下的普若岗日冰原为例,获取了空间分辨率 10 m、高程精度 0.8 m 的 DEM 结果,精度可满足国家 1:10 000 地形制图的要求。

关键词:TanDEM-X;双站 SAR 干涉测量;数字高程模型;普若岗日冰原

中图分类号:P237.4; P237.9 **文献标志码:**A

星载 SAR 干涉测量(SAR interferometry, InSAR)是最有效的全球大范围地形测绘对地观测技术之一。2000 年美国航天飞机雷达地形测绘计划(SRTM)展示了双站 InSAR 技术在地形测绘方面的卓越性能。另外,随着星载 SAR 串飞数据获取能力和多基线 InSAR 分析方法的发展,重复轨道 InSAR 技术在地形测绘方面亦日益完善^[1-3]。在利用重轨 InSAR 提取大区域、高精度冰川 DEM 方面,文献[4]利用时间基线为 1 d 的 ERS-1/2 串飞数据获取普若岗日地区冰川地形^[4],文献[5]采用高分辨率 COSMO-SkyMed 串飞数据进行祁连山 12 号冰川地形的提取^[5]。然而,由于冰川区域雷达回波信号弱、冰雪表面变化快以及受冰川移动等时间去相干的影响,重轨 InSAR 难以获取高分辨率和高精度的冰川地形数据。

作为 X-SAR/SRTM 计划的延续,德国宇航局(DLR)和 Astrium GmbH 公司共同实施了 TanDEM-X 科学计划,其首要目标是获取全球范围 HRTI-3 标准 DEM^[6]。TanDEM-X 双站 SAR 是由 TerraSAR-X(TSX)卫星和 TanDEM-X(TDX)卫星组成,构成了双站 SAR 干涉测量系统,首次实现星载双站 SAR 干涉测量。由于双站

观测模式能够有效消除大气扰动和时间去相干的影响^[7],该技术在全球尺度的高分辨率、高精度 DEM 测绘领域有着巨大优势和广阔应用前景。

本文提出了一种 TanDEM-X 双站 SAR 干涉测量地形提取方法,以地形复杂的普若岗日冰原为例,获取了该区域的高精度 DEM,初步验证了该方法在复杂区域地形制图的能力。

1 TDX/TSX 双站 SAR 干涉测量

1.1 数据获取模式

TDX/TSX 双站 SAR 干涉测量共有双站、单站追踪和双站交替三种数据获取模式^[8]。双站模式获取数据为一颗卫星发射雷达脉冲,两颗卫星同时接收回波信号,消除时间去相干源和大气去相干源。单站追踪模式获取数据不需要两颗卫星保持同步,该模式与重复轨道干涉模式相似,但在时间去相干方面远远优于重复轨道干涉模式。双站交替模式是两颗卫星轮流发射脉冲,两颗卫星同时接收回波信号,生成两种干涉图,以此来提高相位解缠质量和效率。此外,双站交替模式还能够区分回波信号的一次散射和二次散射。以上每

收稿日期:2013-10-28

项目资助:国家自然科学基金(41274024, 41431070, 41321063);国家 973 计划(2012CB957702);中国科学院“百人计划”人才项目(Y205771077);德国宇航局(DLR)数据计划(XTI_LAND0413);中国科技部与欧洲空间局“龙计划”第三期项目(10674)。

第一作者:孙亚飞,博士生,主要从事双站 InSAR 与冰川物质平衡研究。yfsun2013@126.com

通讯作者:江利明,博士,研究员。jlm@whigg.ac.cn

种模式都可以与条带、宽幅和聚焦三种成像模式自由组合。本文实验所采用的 TanDEM-X 双站 SAR 数据为双站条带模式,该模式是生成 DEM 常用的数据获取模式,而其他两种模式主要用于系统标定和验证,亦可用于备份手段制作 DEM、SAR 图像分辨率增强、交通动态监测、冰流估计等。

1.2 零秒的时间基线

以往重复轨道模式获取数据时间基线为十天至一个月,获取的干涉对数据相干性一般较差,严重影响了 DEM 结果。星座串飞模式获取数据的时间基线最长为 1 d,其中 COSMO-SkyMed 最短为 20 s,大幅提高了数据对的相干能力和 DEM 精度。但是,星座串飞模式仍具有一定的时间基线,对于地表变化较快区域的相干性不够理想,特别是冰川、植被和水体表面等地表易变化地类。

TanDEM-X 科学计划开创了双站 SAR 干涉测量模式时代。TDX/TSX 卫星采用双站 SAR 干涉测量模式,其几何关系见图 1,依靠零秒时间基线的独特优势,消除了时间去相干源和大气效应去相干源,同时降低了地表变化等去相干源^[9],在冰川、植被和静止水体等地物表面易变区域保持较高相干性,保证了高质量干涉数据和高精度 DEM 结果。

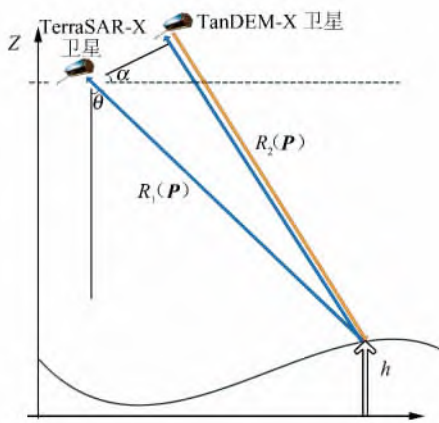


图 1 TanDEM-X 双站 SAR 几何示意图
Fig. 1 Diagram of TanDEM-X Bi-static SAR

2 数据与处理

2.1 实验区及实验数据

实验区位于青藏高原中部普若岗日冰原(见图 2),介于 33°44'~34°04'N、89°00'~89°20'E 的断块山地,面积约为 423 km²,冰川雪线海拔为 5 620~5 860 m。普若岗日冰原是青藏高原腹地

最大的现代冰川,由几个冰帽型冰川组合而成,是青藏高原最大的冰川群^[10]。在冰原周围分布一些依赖于冰川融水供给的湖泊,地形较为复杂^[11]。采用该地区 2012-01-26 获取的一对 TanDEM-X 双站 SAR 数据,数据格式为已配准单视斜距复数据(coregistered single look slant range complex, CoSSC),具体参数见表 1。

表 1 TanDEM-X 双站 SAR 数据参数

参数名称	具体参数
数据获取模式	双站模式
成像模式	条带模式
时间基线	0 s
数据获取日期	2012-01-26
主动卫星	TanDEM-X 卫星
垂直基线	79 m
高程模糊度	94 m
极化方式	VV
成像幅宽	30 km×50 km
中心入射角	44.5°
主从影像对多谱勒中心差值	-17.3 Hz
方位向/距离向中心带宽	2 758 Hz/98.9 MHz

采用 ICESat/GLA14 卫星测高数据对 TanDEM-X DEM 结果进行校正和精度评估。ICESat 测高数据垂直精度为±13.8 cm,其水平精度优于 20 cm,激光光束在地面形成直径约 70 m 的光斑,条带间点与点之间间隔约 170 m^[12]。为了统一高程基准,采用美国国家冰雪数据中心(NSIDC)提供的 IDL 测高信息提取工具 NGAT 将其从 Topex/Poseidon 椭球转换到 WGS84 椭球^[12]。

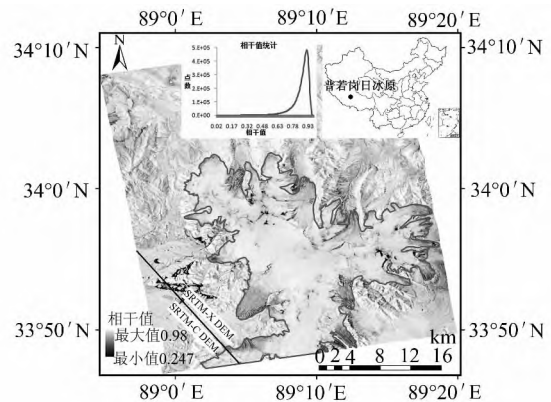


图 2 实验区位置及 SRTM-C/X DEM 覆盖范围
Fig. 2 Study Site Location and SRTM-C/X DEM Coverage

本文差分干涉处理中的外部 DEM 主要是 SRTM-X DEM 产品,该 DEM 产品采用 WGS84 椭球为高程基准,空间分辨率 30 m,相对垂直精度 6 m^[1]。由于 SRTM-X DEM 为条带间隔式获

取,本文中 SRTM-X DEM 覆盖了大部分实验区,仅在左下角小部分区域尚未覆盖,该区域为较稳定的非冰川区域,采用 SRTM-C DEM 镶嵌后替代该未覆盖区域。SRTM-X/C DEM 覆盖范围见图 2。

2.2 数据处理方法

本文提出的 TanDEM-X 双站 InSAR 地形提取方法中,其数据处理的主要流程与常规 InSAR 基本一致,包括 SAR 影像配准、干涉图生成、干涉图滤波、相位解缠和相位到高程转换等,详见文献[4]。不同之处在于,为了提高相位解缠效率和减少相位残差,采用了引入外部 DEM 进行相位差分的策略,即 TanDEM-X 双站 SAR 干涉相位与外部 DEM 双站模拟相位差分,从而有效解决了常规 InSAR 方法干涉条纹过密引起的解缠相位跳跃、不连续,以及轨道基线误差引起的长波趋势面等问题。另外,在双站模拟相位和地理编码过程中考虑了双站几何结构和零时间多普勒时间参数,并利用 ICESat 高程数据对 DEM 结果进行绝对相位偏移校正。在具体数据处理过程中,根据 TSX/TDX 卫星雷达成像特点和 DEM 分辨率要求,方位向和距离向视数均设置为 5,即干涉图的方位向与距离向分辨率分别为 16.5m 和 12.6m。滤波方法采用去噪效果较好且保持干涉条纹边缘完整的 Goldstein Filter 方法^[13],相位解缠则采用兼顾运算速度和准确性的最小费流量法(minimum cost flow, MCF)^[14]。

TanDEM-X 双站 InSAR 生成 DEM 的数据处理流程见图 3。下文重点阐述顾及双站几何结构和零时间多普勒参数的双站模拟相位和地理编码的处理算法。

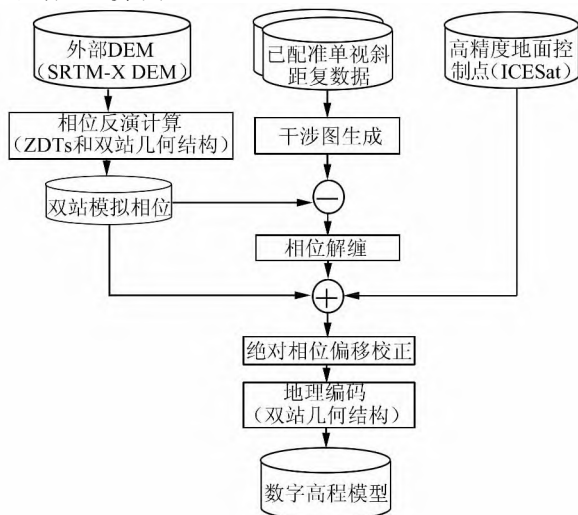


图3 TanDEM-X 双站 SAR 干涉数据处理流程
Fig. 3 Data Processing Flowchart of TanDEM-X Bistatic SAR Interferometry

根据图 1 的 TanDEM-X 双站几何关系,以及相位与距离的关系,TDX/TSX 两颗卫星天线接收到脉冲的相位分别为 φ_1 和 φ_2 :

$$\varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda}(R_1(\mathbf{P}) + R_2(\mathbf{P})) \quad (1)$$

$$\varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda}(R_1(\mathbf{P}) + R_2(\mathbf{P})) \quad (2)$$

式(1)和式(2)中, $R_1(\mathbf{P})$ 和 $R_2(\mathbf{P})$ 分别为 TSX 和 TDX 两颗卫星到地面点 \mathbf{P} 的距离; λ 为卫星 X 波段的波长。则两幅天线所接收到的信号相位差 $\Delta\varphi$ 为:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = -\frac{2\pi}{\lambda}\Delta R \quad (3)$$

即 TanDEM-X 双站 SAR 几何结构可表达为:

$$\| \mathbf{P}_M(t_{az,M}) - \mathbf{P} \| - \| \mathbf{P}_S(t_{az,S}) - \mathbf{P} \| = -\frac{\lambda}{2\pi} \cdot \Delta\psi_{\text{SRTM-X}} \quad (4)$$

式(4)中, $\mathbf{P}_M(t_{az,M})$ 和 $\mathbf{P}_S(t_{az,S})$ 分别为 TDX/TSX 空间位置; $\Delta\psi_{\text{SRTM-X}}$ 为双站模拟相位。

外部 DEM 相位模拟和地理编码需考虑双站几何结构、零多普勒时间(ZDT)等参数,ZDT 计算公式为:

$$\text{ZDT}_{\text{height}} = h_{\text{height}} \cdot \left[\frac{\hat{h}_{\text{increase}} \cdot \hat{\mathbf{V}}_M}{2|\mathbf{V}_M|} - \frac{\hat{h}_{\text{increase}} \cdot \hat{\mathbf{V}}_S}{2|\mathbf{V}_S|} \right] \quad (5)$$

式中, $\text{ZDT}_{\text{height}}$ 为每个像素在不同地面高程下的零多普勒时间; $\hat{\mathbf{V}}_M$ 和 $\hat{\mathbf{V}}_S$ 分别是 TDX/TSX 卫星数据获取时刻速度, $\hat{h}_{\text{increase}}$ 为高程升高方向的单位矢量,其矢量方向见图 1。

获取外部 DEM 距离多普勒模拟相位后,需与干涉图进行配准。通过互相关分析生成配准偏移值,根据偏移值利用最小二乘回归方法计算出距离向和方位向的偏移多项式系数,从而实现外部 DEM 模拟相位图与干涉图的配准。配准后的双站干涉相位与双站模拟相位进行差分处理:

$$\Delta\psi_{\text{Differences}} = \Delta\psi_{\text{TanDEM-X}} - \Delta\psi_{\text{SRTM-X}} \quad (6)$$

式中, $\Delta\psi_{\text{Differences}}$ 为差分相位; $\Delta\psi_{\text{TanDEM-X}}$ 是 TDX/TSX 双站 SAR 干涉相位。

3 结果分析

3.1 相干性分析

相干性是影响 InSAR 地形提取精度的重要因素^[5]。图 2 是本文实验得到的相干图及其统计分布,平均相干值为 0.86,并且大部分位于 0.75~0.95 之间,表明 TanDEM-X 双站 InSAR 在复杂的冰川地形提取中具有较突出的干涉成像能力。

具体来讲,在冰原顶部宽阔的粒雪原,由于雷达回波信号较强,该区域相干值高达 0.86;大部分冰舌区域的相干值大于 0.60,略低于整个区域平均相干水平,并呈现出不同灰度的纹理特征,其去相干源并不是冰川融化移动,而是 TanDEM-X 高频脉冲信号特性引起的漫反射;冰原西南部存在一块相干性较差的区域,根据实地考察,该区域为流动河流,主要是由于流动河流表面易变引起的回波信号后向散射信号强度差,另外,TDX/TSX 受脉冲带宽、雷达信号增益以及参考框架影响等引起两颗卫星内部纳秒级的延迟^[15-16]。

3.2 地形相位分析

图 4 是常规 InSAR 方法与本文方法得到的干涉相位的比较,其中,图 4(c)是直接对干涉相位(图 4(a))进行解缠后的结果,图 4(d)是对差分干涉相位(图 4(b))进行解缠后加入双站地形模拟相位的结果,图 4(e)为上述两种地形相位的差值。由图 4(a)和 4(b)可知,未作差分的干涉相位条纹十分密集,而差分后干涉条纹较为稀疏,这样有利于后续解缠处理。对比两种方法得到的地形相位结果(图 4(c)~4(e)),未作差分处理的干涉相位解缠结果中还存在长波长趋势性偏差^[15],而本文差分方法可有效解决常规 InSAR 方法干涉条纹过密引起的解缠相位跳跃、不连续以及轨道基线误差引起的长波趋势面等问题(图 4(e)),且解缠时间减少了一半,提高了相位解缠效率。

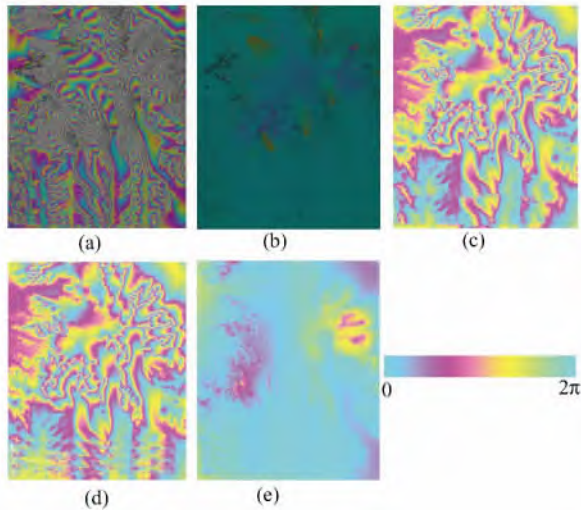


图 4 常规 InSAR 方法与本文方法干涉相位的比较

Fig. 4 Comparison of the Interferometric Phases Derived from Common InSAR Method and Our Method

3.3 DEM 结果与精度评估

采用 § 2.2 节的 TanDEM-X 双站 InSAR 地形提取方法,根据是否采用 ICESat 数据校正绝对相位偏移,获取了高程校正前后的实验区 TanDEM-X

DEM 结果。由于 SRTM-X DEM 和 ICESat 外部数据的高程基准均转换到 WGS84 参考椭球,所得的 TanDEM-X DEM 结果为大地高,见图 5。

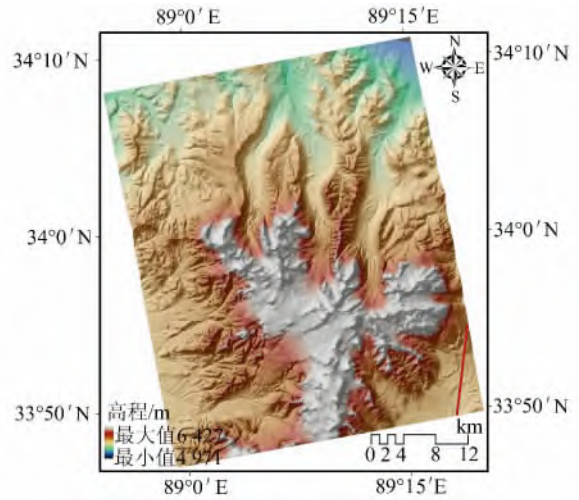


图 5 TanDEM-X DEM 结果

Fig. 5 Result of TanDEM-X DEM

为减少 ICESat 验证数据与 ICESat 校正数据的相关性,采用校正 GCP 以外的 367 个 ICESat 点进行 TanDEM-X DEM 精度评估,分布区域见图 5 右下角。其精度评估结果见表 2 和图 6。

表 2 ICESat 与 TanDEM-X DEM 差值统计结果/m

Tab. 2 Statistical Results of Difference Between ICESat Altimetry Data and TanDEM-X DEM/m

ICESat 与 DEM 差	未校正 DEM	已校正 DEM
最小值	-2.571	-1.6
最大值	15.745	4.334
平均值	4.79	1.906
中误差	2.571	0.757

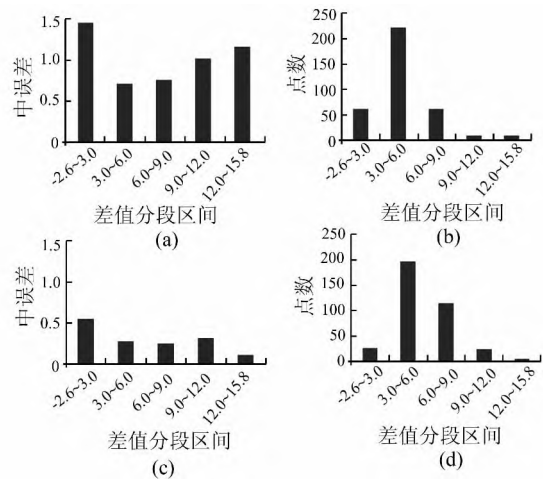


图 6 ICESat 测高与 TanDEM-X DEM 差值的分段中误差及其点数统计结果

Fig. 6 Comparison of RMSE and Point Numbers for Difference Sections Between ICESat Altimetry Data and TanDEM-X DEM

由表2可知,ICESat与校正前后DEM差值中误差分别为2.571 m和0.757 m,符合TanDEM-X科学计划的10 m绝对高程精度和2 m相对高程精度要求。该DEM精度结果与Eineder、Pandey、Deo等提取的其他区域的TanDEM-X DEM精度基本一致或略高^[17-19]。但是ICESat与已校正DEM差值的平均值仍有1.9 m,可能是由于TanDEM-X数据X波段和ICESat数据Ka波段穿透性不同引起,也可能是基线误差和仪器误差引起。由图6可知,ICESat与校正前后DEM差值区间分别为-2.6~15.6和-1.6~4.3,表明ICESat能够有效校正DEM结果,已校正DEM分段精度大部分都在0.5 m范围内(见图6(a)和图6(c)),ICESat与校正前后DEM差值的点数分别集中在区间3.0~6.0和区间1.0~2.0(见图6(b)和图6(d))。

4 结 语

TanDEM-X双站SAR首次实现了星载SAR双站模式干涉测量,其零秒时间基线的独特优势可最大程度上减少时间去相干的影响,确保了干涉质量。本文提出了一种TanDEM-X双站InSAR生成DEM的方法,主要包括引入外部DEM进行相位差分的策略,减少相位残差和提高相位解缠精度与效率。另外,在双站模拟相位和地理编码过程中考虑了双站几何结构和零时间多谱勒时间参数,并采用ICESat高程数据进行绝对相位偏移校正。本文以青藏高原中部地区的普若岗日冰原为例,获取了空间分辨率达10 m、高程精度0.8 m的DEM,利用高精度ICESat测高资料进行精度评估,精度达到了国家1:10 000 DEM地形制图要求,初步验证了该技术在复杂地形区域DEM制图的能力,以及全球地形提取价值和应用前景。

参 考 文 献

- [1] Farr T G, Rosen P A, Caro E, et al. The Shuttle Radar Topography Mission[J]. *Reviews of geophysics*, 2007, 45(2): 1-33
- [2] Liao M S, Jiang H J, Wang Y, et al. Improved Topographic Mapping Through High-Resolution SAR Interferometry with Atmospheric Effect Removal[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013, 80(1): 72-79
- [3] Mura J C, Pinheiro M, Rosa R, et al. A Phase-offset Estimation Method for InSAR DEM Generation Based on Phase-offset Functions[J]. *Remote Sensing*, 2012, 4(3): 745-761
- [4] Lin L, Jiang L M, Wang H S. Extraction of Glacier Surface Elevation and Velocity in High Asia with ERS-1/2 Tandem SAR Data: Application to Puruogangri Ice Field, Tibetan Plateau[C]. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Munich, Germany, 2012
- [5] Jiang Houjun, Liao Mingsheng, Zhang Lu. High Resolution SAR Interferometric DEM Reconstruction with COSMO-SkyMed Tandem Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(9): 1 055-1 058(蒋厚军, 廖明生, 张路. 高分辨率雷达卫星COSMO-SkyMed干涉测量生成DEM的实验研究[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2011, 36(9): 1 055-1 058)
- [6] Rossi C, Gonzalez F R, Fritz Thomas, et al. TanDEM-X Calibrated Raw DEM Generation[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, 73(1): 12-20
- [7] Sun Yafei, Jiang Liming. TanDEM-X Bistatic SAR Interferometry and Its Research Progress[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2015, 27(1): 16-22(孙亚飞, 江利明. TanDEM-X双站SAR干涉测量及应用展望[J]. *国土资源遥感*, 2015, 27(1): 16-22)
- [8] 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): 3 317-3 341
- [9] Martone M, Brautigam B, Rizzoli P, et al. Coherence Evaluation of TanDEM-X Interferometric Data[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, 73: 21-29
- [10] Yi Chaolu, Li Xiaoze, Qu Jianjun, et al. Quaternary Glaciations in Puruogangri: the Largest Modern Ice Filed in Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(5): 491-497(易朝路, 李孝泽, 屈建军, 等. 青藏高原现代最大冰原区第四纪冰川作用[J]. *冰川冻土*, 2003, 25(5): 491-497)
- [11] Yi C L, Li X Z, Qu J J. Quaternary Glaciation of Puruogangri: the Largest Modern Ice Field in Tibet[J]. *Quaternary International*, 2002, 97: 111-121
- [12] Shen Qiang, Chen Gang, E Dongchen, et al. Recent Elevation Changes on the Lambert-Amery System in East Antarctica from ICESat Crossover Analysis[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(8): 1 983-1 989(沈强, 陈刚, 鄂栋臣, 等. 基于ICESat轨道交叉点分析的东南极Lambert-Amery系统

- 当前高程变化特征分析[J]. 地球物理学报, 2011, 54(8): 1 983-1 989)
- [13] Goldstein R M, Werner C L. Radar Interferogram Filtering for Geophysical Applications [J]. *Geophysical Research Letter*, 1998, 25 (21): 4 035-4 038
- [14] Costantini M. A Novel Phase Unwrapping Method Based on Network Programming[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36 (3): 813-821
- [15] Gonzalez J H, Antony J M, Bachmann M, et al. Bi-static System and Baseline Calibration in TanDEM-X to Ensure the Global Digital Elevation Model Quality[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, 73(9): 4-11
- [16] Martone M, Brautigam B, Krieger G. Decorrelation Effects in Bistatic TanDEM-X Data[C]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Munich, Germany, 2012
- [17] Eineder M, Jaber W A, Floricioiu D, et al. Glacier Flow and Topography Measurements with TerraSAR-X and TanDEM-X[C]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vancouver, Canadian, 2011
- [18] Pandey P, Venkataraman G. Comparison of DEMs Derived from TanDEM-X and SRTM-C for Himalayan Terrain[C]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Melbourne, Australia, 2013
- [19] Deo P, Manickam S, Rao Y S, et al. Evaluation of Interferometric SAR DEMs Generated Using TanDEM-X Data[C]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Melbourne, Australia, 2013

Generating and Evaluating Digital Terrain Model with TanDEM-X Bistatic SAR Interferometry

SUN Yafei^{1,2} JIANG Liming¹ LIU Lin^{1,2} SUN Yongling^{1,2} WANG Hansheng¹

1 State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Institute of Geodesy and Geophysics, CAS, Wuhan 430077, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The paper introduces the bistatic SAR system of the TanDEM-X/TerraSAR-X, especially focusing on its flexible data acquisition model and the special advantages of a zero-time baseline. We present a bistatic InSAR processing method for DEM generation with TanDEM-X/TerraSAR-X data, highlighted by a phase difference strategy as a means of differencing bistatic interferograms and simulated phase from an external DEM, e. g. SRTM DEM. This strategy reduces the residual phase and improves the efficiency and the precision of phase unwrapping. We take account of the bistatic geometry and the corresponding zero Doppler time in SAR interferometric processing. The absolute phase offset was calibrated with some external ICESat points. A case study was carried out to generate the DEM product over the Puruogangri Ice Field in the Tibetan Plateau. Compared with the SRTM-X DEM and ICESat elevation, our preliminary results demonstrate the great potential of the TanDEM-X bistatic InSAR technology for mapping surface topography.

Key words: TanDEM-X; bistatic SAR interferometry; digital elevation model; the Puruogangri Ice Field

First author: SUN Yafei, PhD candidate, specializes in bistatic SAR interferometry for estimation of glacier mass balance. E-mail: yfsun2013@126.com

Corresponding author: JIANG Liming, PhD, professor. E-mail: jlm@whigg.ac.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41274024, 41431070, 41321063; the National Basic Research Program of China, No. 2012CB957702; the Hundred Talents Program of the Chinese Academy of Sciences, No. Y205771077; the DLR TanDEM-X AO Project, No. XTI_LAND0413; The ESA-MOST Dragon-3 Cooperation Program, No. 10674.