

基于 PALSAR 数据的青藏高原冻土形变 检测方法研究

谢 酬^{1,2}, 李 震^{2,3}, 李新武^{2,3}

(1. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 2. 遥感信息科学国家重点实验室, 中国科学院遥感
应用研究所, 北京 100101; 3. 中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 北京 100039)

摘要: 季节性冻胀和融沉导致的地面形变是青藏高原冻土区建设施工与维护的主要问题。对冻融造成的形变进行有效监测是青藏铁路建设与维护的前提。差分干涉测量技术是地表形变监测的重要手段之一, PALSAR(L 波段的合成孔径雷达)数据在非城市区域具有较高的相关性, 适合青藏高原冻土区的地表形变监测。本文选用 4 景覆盖研究区域的 PALSAR 数据, 研究利用该数据进行冻土形变检测的方法, 并对其检测结果进行了分析。结果表明, 该方法与水准测量方法有较好的一致性。

关键词: 干涉测量; 形变; 多年冻土; 青藏高原; PALSAR

中图分类号: TP 79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-070X(2008)03-0015-05

0 引言

永久冻土和季节性冻土分别覆盖了青藏高原 1 272 709 km² 和 1 146 399 km² 的面积, 而青藏铁路穿越冻土区域的长度约为 550 km^[1]。冻土活动层的年变化过程划分为夏季融化过程、秋季冻结过程、冬季降温过程和春季升温过程^[2] 4 个阶段。显然, 冻土融化和温度升高对铁路稳定性会产生重大影响。由季节性的冻胀和融沉导致的地表变形是在永久冻土区域进行工程施工的最主要危害^[3-7]。青藏铁路建设和维护中的一个主要问题就是如何监测冻土的形变。

传统方法通过埋设沉降仪(水平测斜仪和磁环沉降仪)^[8,9], 或者通过长期的 GPS 观测或水准观测来进行高原冻土的形变监测。这些方法获取的高原冻土沉降数据精度高, 时间连续性好, 但由于条件限制, 这些监测点只能是若干有限的点, 在青藏高原地区开展工作十分困难, 无法获取整个区域的冻土变形数据。

近年来, 雷达干涉测量技术, 已广泛应用于提取 DEM、地震、火山和沉降引起的地表形变监测^[10-11]。合成孔径雷达差分干涉方法也被应用于冻土形变监测。李震等人利用时间序列重复轨道 ERS 1/2 数据, 开展了定量探测冻土冻胀和融沉导致的冻土地

表形变大小的方法研究^[13]。PALSAR(L 波段的合成孔径雷达)数据在植被覆盖区域仍然保持较高的相干性, 适合于青藏高原冻土区的地表形变监测。本文选用 4 景覆盖研究区域的 PALSAR 数据, 研究利用 PALSAR 数据进行冻土形变检测的方法, 并对研究区域冻土形变的结果进行了分析。

1 研究区概况和数据源

1.1 研究区概况

以青藏高原东北部的北麓河区域为研究区, 其中心经纬度为(34°48'N, 92°56'E)。北麓河实验区位于可可西里高原的可可西里山与风火山之间的谷地上, 如插图彩片 2 中蓝色矩形框所示。研究区域大小约为 16 km × 20 km, 区内以高原草甸为主要地物, 青藏铁路和青藏公路从该区穿过。研究区域水流丰富, 北麓河和秀水河流经该区。区域内地形平缓略有起伏, 海拔高程为 4 600 ~ 4 700 m, 地表植被发育较好。在冻土区划上, 北麓河研究区属于多年冻土区, 是在羌塘高原大片连续多年冻土区的边缘附近, 主要不良地质为多年冻土及沿线分布的半固定沙丘。多年冻土上限一般为 2.0 ~ 3.0 m, 不良冻现象主要为高温不稳定多年冻土。

北麓河区域冻土活动层的年变化过程划分成夏季融化过程、秋季冻结过程、冬季降温过程和春季升

收稿日期: 2008-02-28; 修订日期: 2008-04-15

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(批准号: KZCX2-YW-301)、国家自然科学基金(批准号: 40671140)、国家自然科学基金青年基金(批准号: 40501050)资助项目。

温过程4个阶段^[2]。冻土是指含有冰的各种岩土和土壤。当冻土融化,其中的水分从液态转化为固态时,发生冻土的冻胀现象;当水从固态转化成液态时,冻土发生融沉^[14]。

1.2 PALSAR 数据

PALSAR 传感器搭载于 ALOS 平台上,于 2006 年 1 月 24 日发射升空。作为 JERS - SAR 的后继者,PALSAR 传感器能够进行全极化、多视角的对地观测,相对于 JERS 在辐射和几何方面的性能上都有较大改进^[14]。PALSAR 中心频率为 1 270 MHz,波长为 23.6 cm,带宽为 14 MHz 和 28 MHz。PALSAR 能够在精细波束单极化模式(FBS)、精细波束双极化模式(FBD)、全极化模式(POL)、扫描模式(ScanSAR)及直接传输模式(DT)5 种不同的观测模式下开展工作。本文采用 FBS 模式 1.1 级产品进行干涉处理。在 FBS 模式下,PALSAR 以 HH 或 VV 极化方式、28 MHz 带宽运行。在该模式下,PALSAR 能够从 9.9°~50.8°的 18 种不同视角对地进行观

测。在视角为 33.4°的情况下幅宽为 70 km,方位分辨率为 3.148 m,距离向斜距分辨率为 4.684 m。经过 1×3 的多视处理,方位向的地面分辨率为 9.55 m,距离向的地面分辨率为 7.9 m^[15]。

本文选用的 4 景 PALSAR 数据构成了 2 个干涉对,获取于 6~9 月间。在这个时间段内,高原冻土处于夏季融化阶段,活动层吸收热量,温度升高,自上而下开始融化。为了对比分析,本文数据同时还选取了覆盖北麓河研究区 3 景 ASAR 数据,构成了 2 个干涉对,这 3 景 ASAR 数据同样获取于夏季。4 景干涉对基本情况列于表 1。用于对比的 ASAR 干涉对都具有较小的空间基线,同时时间间隔也不大,其中构成干涉对 C 与干涉对 A 的 SAR 数据在获取时间上比较一致,而构成干涉对 D 和干涉对 B 的 SAR 数据在获取时间上比较一致。相对于 ASAR 数据构成的干涉对 C、D,PALSAR 干涉对 A、B 具有较大的空间基线。

表 1 研究区干涉对的相应参数

干涉对	传感器	获取时间	成像视角/(°)	垂直基线/m	平行基线/m	时间间隔/d
A	PALSAR	20060606/20060906	41.5	1 086	2 598	92
B	PALSAR	20060623/20060808	41.5	1 486	2 706	46
C	ASAR	20070621/20060830	23	149	115	70
D	ASAR	20070621/20070726	23	67	16	35

2 PALSAR 数据处理

合成孔径雷达差分干涉测量利用同一传感器重复观测同一区域,获取不同时相的雷达成像数据,通过对不同时相的雷达数据进行干涉处理,移除地形相位,获取地面形变信息^[11]。本文采用两通法,利用美国航天飞机测地计划获取的 SRTM 数据作为外部 DEM,消除地形因素引起的相位。在两通法差分干涉测量数据处理中,包括了影像数据读取、主辅影像配准、干涉图生成、平地相位去除、地形相位去除、相位解缠和地理编码等若干步骤。由于 PALSAR 没有精确轨道数据,提供的轨道参数为以分为单位的采样点,所以在处理过程中需要对空间基线进行重新估计,同时在平地相位去除和地形相位去除方面进行人工干预,以消除轨道不精确造成的影响。

2.1 平地相位去除和空间基线重估计

对于 ALOS - PALSAR,没有精确卫星轨道数据,其卫星轨道数据误差较大,不仅无法精确地补偿平地干涉相位,而且在生成数字高程模型产品时会由于基线误差引起产品精度下降,在这种情况下进

行雷达干涉处理,需要重新估计轨道之间的干涉基线大小,此时只能利用平地干涉相位的特性对空间基线进行重新估计。

干涉处理中,通过计算 2 次成像时卫星与参考面上点的距离 R_1 和 R_2 之差来计算平地相位,如图 1 所示。

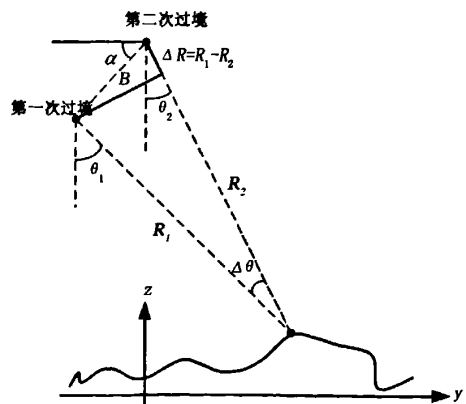


图 1 干涉测量几何示意图

同时根据平行近似有

$$\phi_{\text{flat earth}} = \frac{4\pi}{\lambda} (R_2 - R_1) \approx -\frac{4\pi}{\lambda} R_1 \cdot B \quad (1)$$

式中, $\mathbf{B}$ 为干涉基线空间矢量; $\mathbf{R}_1$ 表示 SAR 视向单位矢量; $\mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{B}$ 为 SAR 视向单位矢量与干涉基线矢量的点积。

$$\Delta\theta_{\text{flat earth}} \approx -\frac{4\pi}{\lambda} \Delta(\mathbf{R}_1 \cdot \delta\mathbf{B}) = -\frac{4\pi}{\lambda} (\Delta\mathbf{R}_1 \cdot \delta\mathbf{B} + \mathbf{R}_1 \cdot \Delta\delta\mathbf{B}) \quad (2)$$

由于 SAR 视向从近距到远距变化时,基线误差变化不大,故

$$\Delta\theta_{\text{flat earth}} \approx -\frac{4\pi}{\lambda} \Delta\mathbf{R}_1 \cdot \delta\mathbf{B} \quad (3)$$

$$\Delta\theta_{\text{flat earth}} \approx -\frac{4\pi}{\lambda} \Delta\mathbf{R}_1 \cdot (\delta\mathbf{B}_{\perp} + \delta\mathbf{B}_{\parallel}) = -\frac{4\pi}{\lambda} \Delta\mathbf{R}_1 \cdot \delta\mathbf{B}_{\perp} = -\frac{4\pi}{\lambda} \Delta\theta \cdot \delta\mathbf{B}_{\perp} \quad (4)$$

式中, $\Delta\theta$ 表示 SAR 视向从近距到远距时视向角度变化的大小, $\delta\mathbf{B}_{\perp}$ 表示垂直基线误差大小。

式(4)表明,由轨道参数误差造成的残余平地相位仅与垂直基线误差大小 $\delta\mathbf{B}_{\perp}$ 相关,与平行基线误差大小 $\delta\mathbf{B}_{\parallel}$ 无关,在统计出残余平地相位 $\Delta\theta_{\text{flat earth}}$ 之后,利用式(4)估计垂直基线误差大小 $\delta\mathbf{B}_{\perp}$ 。

利用二维傅立叶变换可以计算去平地后干涉相位图上条纹出现的频率,根据残余平地相位与空间基线之间的关系(式(4)),对空间基线中垂直基线进行重估计,利用重估计的结果修正空间基线。

插页彩片 3(a) 为 PALSAR 干涉对 A 利用不精确 PALSAR 轨道数据计算的去除平地相位后的条纹图,由于轨道不准确,在干涉条纹图上还残留有 11 个平地相位产生的条纹,可以计算出其垂直基线的误差大小为

$$\delta\mathbf{B}_{\perp} = -\frac{\lambda \Delta\theta_{\text{flat earth}}}{4\pi \Delta\theta} = 27.155 \quad (5)$$

式中, $\Delta\theta_{\text{flat earth}} = 22\pi$ 对应于残余平地相位图中的 11 个条纹;波长 $\lambda = 23.6$ cm。SAR 视向在近距和远距之间的夹角 $\Delta\theta = 0.0478$ rad。利用计算出来的垂直基线误差修正空间基线,干涉对 A 修正后的垂直基线为 1 113.155 m,同时利用二维傅立叶变换,构造在距离向上有 11 个条纹的干涉条纹图,与干涉对 A 的干涉条纹图进行共轭计算,消除残余的平地相位,得到的条纹图如插页彩片 3(b) 所示。同样,利用式(5)可以计算出干涉对 B 的垂直基线误差为 -12.739 m,干涉对 B 修正后的垂直基线为 1 473.261 m,采用同样的方法可以去除干涉对 B 上残余的平地相位。

2.2 地形相位去除

在两通法差分干涉测量数据处理中,一般根据轨道信息将带有地理编码的外部 DEM 投影到雷达空间坐标系统中,计算地形相位。由于轨道信息不准确,会造成投影后的 DEM 不能准确配准干涉相位图,使得到的差分干涉图存在明显的残余地形相位。为了有效去除地形相位,需要将外部 DEM 手工配准到主图像上,通过在干涉相位图和外部 DEM 上选取

假设 PALSAR 轨道数据不精确引起的基线误差矢量为 $\delta\mathbf{B}$,由不精确轨道引起的平地相位计算误差为

将基线误差矢量分解为垂直基线误差矢量 $\delta\mathbf{B}_{\perp}$ 和平行基线误差矢量 $\delta\mathbf{B}_{\parallel}$,则有式(4)的形式,即

一定数量具有特殊地形特征点作为控制点,利用多项式拟合的方法进行配准,即

$$\begin{cases} \Delta p = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 \\ \Delta l = b_0 + b_1 y + b_2 y^2 \end{cases} \quad (6)$$

式中, Δp 和 Δl 分别为距离向和方位向上外部 DEM 与干涉图的配准偏差; x 和 y 分别为干涉图空间坐标系下距离向和方位向坐标; $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$ 为转换参数。构造方程组(6),求解转换参数,使外部 DEM 与干涉图配准后的精度在一个像素范围内,确保地形相位比较干净地去除。本文用于干涉计算的区域较小,距离向和方位向上外部 DEM 与干涉图配准的偏差为常数。PALSAR 干涉对 A 距离向和方位向的偏差分别为 -6 和 2,而 PALSAR 干涉对 A 距离向和方位向的偏差分别为 5 和 3。

3 结果与分析

3.1 相干性分析

通过将构成干涉对的 SAR 复数据进行配准,计算 2 个配准后 SAR 复数据的复相关系数,获取各干涉对归一化的相干图。为了使干涉图具有一致地面分辨率,对 PALSAR 干涉对的相干性计算作了 2/6 的多视处理,而 ASAR 干涉对的相干性计算中作了 1/5 的多视处理,处理后相干图的地面分辨率在方位向和距离向都约为 20 m。图 2 给出了 4 个干涉对所对应的相干图,图例中给出了相干性的标示,黑色代表相干性为 0,即完全不相干,白色表示相干性为 1。

对归一化相干图进行统计,计算平均相干系数, PALSAR 干涉对 A 对应相干图的平均相干系数为 0.28,干涉对 B 对应的为 0.43; ASAR 干涉对 C 对应的平均相干系数为 0.16,干涉对 D 对应的为 0.14。在 ASAR 构成的干涉对中,除山体保持了较高的相干性以外,在高原草甸区域相干性非常低,其中青藏铁路的相干性也比较低;在 PALSAR 构成的干涉对上,青藏铁路以及沿线输电塔都具有非常高

的相干性,在 2 个干涉对上的相干系数都达到了 0.6 以上,在相干图中清晰可见,呈现为一条东偏南 45°

方向的亮线,且周围的高原草甸也具有比较高的相干性。

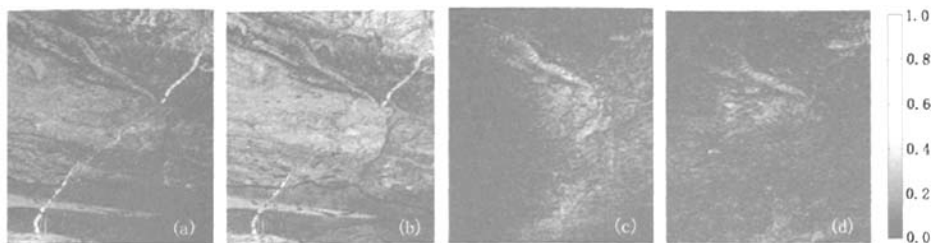


图 2 归一化的相干图

(a,b 分别为 PALSAR 干涉对 A 和 B 对应的相干图; c,d 分别为 ASAR 干涉对 C 和 D 对应的干涉图)

总体上,ASAR 干涉对的相干性要低于 PALSAR 干涉对的,其原因是 ASAR 使用 C 波段雷达成像,一方面比较容易受到大气的影 响,另一方面,地表目标对 C 波段的去相干作用要大于 L 波段,导致 C 波段干涉对的相干性低于 L 波段的。

3.2 形变结果分析

根据两通法差分干涉测量数据处理流程,通过平地相位去除和轨道重估计的迭代计算,估算出较为精确的空间基线,同时精确配准外部 DEM 与干涉图,比较干净地去除地形相位,对所得到的差分干涉相位图进行数据解缠,利用形变和差分干涉相位之间的关系计算出地表形变信息。由于 ASAR 干涉对相干性太低,处理的干涉图中噪声较多,解缠相位质量非常差,本文没有列出利用 ASAR 干涉对提取的地表形变信息。插页彩片 4 给出了利用 PALSAR 干涉对计算出来的研究区地表形变结果。

在没有出现人工建设活动的草甸区域,由于热量平衡未被破坏,形变量相对较小,故可将草甸上的形变量设定为 0,其它区域的形变相对于零形变区域来确定。利用干涉对 A 上计算出来的青藏铁路、青藏公路和输电塔上的形变以沉降为主,沉降量为 3~7 mm,这一结果与马小杰^[17]给出的 2004 年同期利用水准测量的结果比较一致,在 2004 年 6~9 月,青藏铁路 DK 1 136+750 的沉降量为 5 mm。总体来说,青藏铁路、青藏公路和输电塔上相对周围的草甸出现明显的沉降,这是因为人类的工程活动改变了多年冻土的热量平衡,使得季节融化深度加深和次年回冻深度减薄。在青藏高原多年冻土区,铁路路基、公路路基和输电塔的建设改变了地表的热交换过程,使得多年冻土层内能量积蓄增加,地温升高,冻土上限逐年下降,地表出现沉降。

为了反映地表形变随时间变化关系,本文对 PALSAR 干涉对 B 提取的地表形变信息进行了线性拉伸,将计算出来的形变量增加一倍,得到插页彩片

4(b)所示的结果。对比插页彩片 4(c)和插页彩片 4(b)可以发现,2 张形变图基本一致,即干涉对 A 上的形变量大致是干涉对 B 上的形变量的 2 倍;干涉对 A 上的时间基线是干涉对 B 上的 2 倍。也就是说,在这个阶段,人类工程区的地表沉降与时间成线性关系。

4 结论

(1)通过与 ASAR 数据的对比,发现地表目标对 PALSAR 数据去相干作用相对较小,说明 PALSAR 数据更适合于植被覆盖区域的雷达干涉处理和分析。

(2)利用 PALSAR 干涉对,通过两通法差分干涉测量数据处理,比较准确地计算出了青藏铁路、公路和输电塔上的形变,这些形变以沉降为主。

(3)形变结果与水准观测的一致性说明了利用 PALSAR 数据能够有效进行多年冻土区的形变分析,这为青藏铁路的监测提供一种较为便捷的手段。

今后将进一步收集北麓河区域的 PALSAR 数据,以便对研究区域的冻土形变规律有一个更清晰的描述。同时,进一步收集该区冻土形变的实测数据,并结合角反射器实验,对所计算的冻土形变准确性进行定量检测。

参考文献:

- [1] 吴青柏,马 巍,赖远明.合力攻坚冻土工程技术难关让列车早日驶上世界屋脊——关于青藏铁路建设中的若干重大问题[J].科技新闻,2001,14:2-4.
- [2] 赵 林,程国栋,李述训,等.青藏高原五道梁附近多年冻土活动层冻结和融化过程[J].科学通报,2000,45(11):1205-1211.
- [3] 吴青柏,施 斌.论青藏铁路修筑中的冻土环境保护问题[J].水文地质工程地质,2002,29(4):14-16.
- [4] 吴青柏,刘永智,童长江,等.寒区冻土环境与工程环境间的相

- 互作用[J]. 工程地质学报, 2000, 8(3):281-287.
- [5] 俞祁浩,刘永智,童长江. 青藏公路路基变形分析[J]. 冰川冻土,2002, 5(4):623-627.
- [6] 程国栋,赵 林. 青藏高原开发中的冻土问题[J]. 第四纪研究,2000,20(6):521-531.
- [7] 王志坚. 青藏铁路建设中的冻土工程问题[J]. 中国铁路, 2002,12:31-37.
- [8] 刘尧军,岳祖润,李 忠. 青藏铁路高原冻土区段路基沉降变形和地温监测[J]. 铁道标准设计, 2003, (4):26-27.
- [9] 王晓放. 路基变形观测方法的选用[J]. 铁道建筑, 2004, (4):41-43.
- [10] Massonnet D, Marc Rossal, Carmona C, et al. The Displacement Field of the Landers Earthquake Mapped by Radar Interferometry [J]. Nature, 1993,364:138-142.
- [11] Bamler R, Hartl P. Synthetic Aperture Radar Interferometry [J]. Inverse Problems, 1998, 14(4): R1-54.
- [12] 刘 广. InSAR 技术在矿区沉降监测中的应用研究[J]. 国土资源遥感,2008, (2):51-55.
- [13] 李 震,李新武,刘永智,等. 差分干涉 SAR 冻土形变检测方法研究[J]. 冰川冻土, 2004, 26(4): 389-396.
- [14] 周幼吾,郭东信,邱国庆,等. 中国冻土[M]. 北京:科学出版社, 2000.
- [15] Rosenqvist A, Shimada M, Ito N, et al. ALOS PALSAR: A Pathfinder Mission for Global - Scale Monitoring of the Environment[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007,45(11): 3307-3316.
- [16] Atsushi Iwashita, Marina Kudo, Hisatoshi Baba, et al. Study of Ground Surface Displacement Estimation Using ALOS/PALSAR D - InSAR Interferometry[A]. IGARSS 07, 1616-1617[C]. Barcelona, Spain, 2007.
- [17] 马小杰,张建明,张明义. 青藏铁路路基沉降变形的灰色预测模型研究[J]. 路基工程, 2006, (5):1-3.

A STUDY OF DEFORMATION IN PERMAFROST REGIONS OF QINGHAI - TIBET PLATEAU BASED ON ALOS/PALSAR D - InSAR INTERFEROMETRY

XIE Chou^{1,2}, LI Zhen^{2,3}, LI Xin - wu^{2,3}

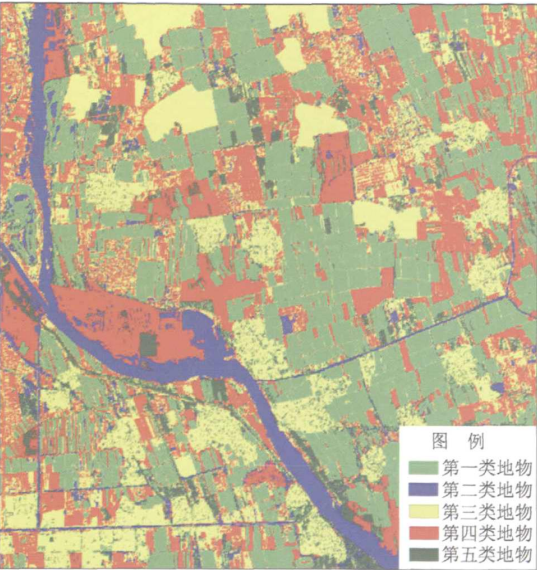
(1. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University, Beijing 100101, China; 3. Center for Earth Observation and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Surface displacement resulting from seasonal freezing bulge and thawing subsidence constitutes a main hazard to engineering construction of permafrost regions, especially to the Qinghai - Tibet railway. One of the main problems that the Qinghai - Tibet railway encounters is the effective detection of the displacement field. The interferometric SAR technique has the capability for measuring ground deformation in a wide range of application. PALSAR can keep high coherence in interferometry over non - urban areas, thus very suitable for analyzing deformation over permafrost regions of Qinghai - Tibet Plateau. This paper presents the method of PALSAR interferometry for analyzing ground surface displacement. The proposed technique was implemented by using ENVISAT ASAR images to detect the deformation over permafrost regions of Qinghai - Tibet Plateau, and the results are in accordance with the results obtained by a traditional ground leveling method. Such an achievement encourages future utilization of PALSAR interferometry to analyze deformation of the frozen earth in Qinghai - Tibet Plateau.

Key words: Interferometry; Deformation; Permafrost; Qinghai - Tibet Plateau; ALOS/PALSAR

第一作者简介: 谢酬(1979 -),男,博士生,研究方向为微波遥感。

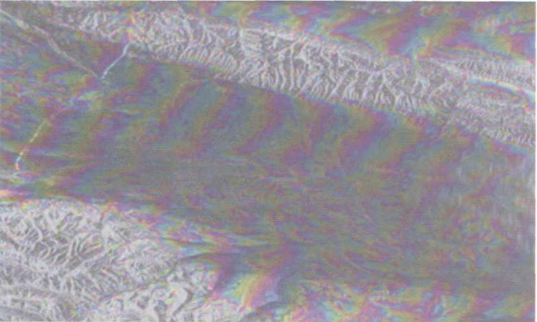
(责任编辑:刁淑娟)



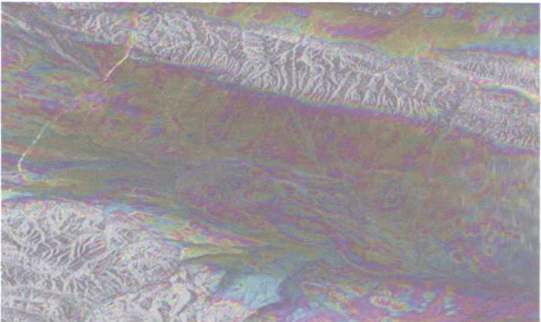
彩片1 分类模拟图像示意图



彩片2 研究区2004年12月8日CBERS 4.3.2波段合成图像

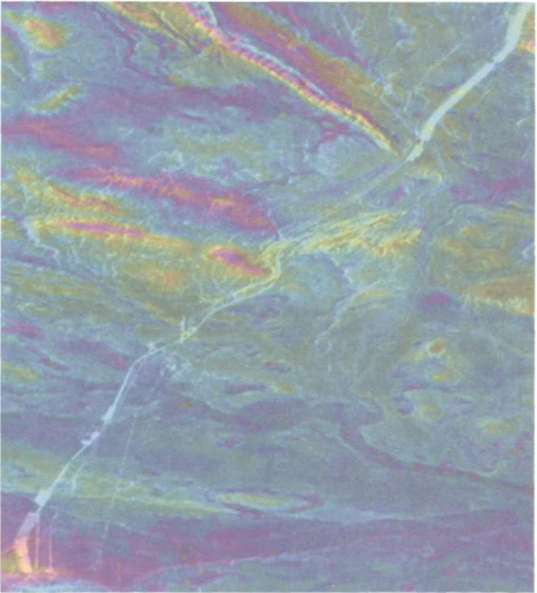


(a) 利用不精确PALSAR轨道数据计算去除平地相位后的条纹图

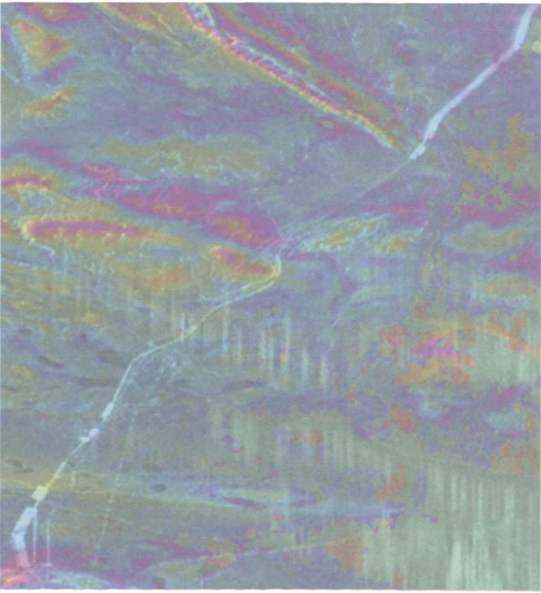


(b) 修正轨道后计算去除平地相位后的条纹图

彩片3 残余平地相位去除



(a) 干涉对2006-06-06/2006-09-06形变信息



(b) 干涉对2006-06-23/2006-08-08形变信息线性变化结果

彩片4 利用PALSAR干涉对计算出来的研究区形变结果

(彩片2-4见谢酬一文)