

文章编号: 1007-4619(2006)01-0118-05

ENVISAT ASAR 重轨 INSAR 用于东南极冰盖 格罗夫山角峰地区冰流探测的初步结果

程 晓¹, 张艳梅²

(1. 中国科学院 遥感应用研究所, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101; 2. 中国地震局 地震预测研究所, 北京 100036)

摘 要: 由于可以探测到视线向的微小形变量, 重复轨道雷达干涉测量 (INSAR) 成为探测极地冰流的有效手段。基于 ERS-1/2 SAR 影像的 INSAR 已经成功获取了南北极许多地区的冰流信息。采用最新的 ENVISAT ASAR 影像, 利用干涉方法获得了东南极内陆格罗夫山地区的首幅 ASAR 干涉条纹图 (其中包括地形信息和冰流信息)。其与利用该地区 1996 年 ERS-1 和 JERS-1 数据所获得的干涉条纹进行对比表明, 在格罗夫山角峰群内分布有两个冰流子系统, 且状态较为稳定, ENVISAT ASAR 数据在冰盖干涉测量方面具有良好的性能和应用潜力。

关键词: ASAR; 干涉; 冰流; 冰盖; 南极

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A

Detecting Ice Motion with Repeat-pass ENVISAT ASAR Interferometry over Nunataks Region in Grove Mountain, East Antarctic—The Preliminary Result

CHENG Xiao¹, ZHANG Yanmei²(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications,
CAS and Beijing Normal University, Beijing 100101, China;

2. Institute of Earthquake Prediction, China Seismological Bureau, Beijing 100036, China)

Abstract: The ability of detecting small look-of-sight deformation remotely and precisely makes repeat-pass SAR interferometry an effective means for detecting ice flow over polar ice sheet. INSAR measurements based on ERS-1/2 SAR images have revealed various ice motions on ice sheet in Arctic and Antarctica. The latest and advanced SAR sensor is the ASAR sensor carried on-board the ENVISAT satellite launched in early 2002. Few interferometric applications of ASAR are reported till present, even fewer on glacier motion study in Antarctica. Grove Mountain is the newly found meteorites trap in East Antarctica. The wide-spread nunataks makes the ice flow quite complex in this region, which makes the ice motion measurement challenging.

In this paper, a 35-day-apart ENVISAT ASAR image pair acquired at the end of 2004 is selected for interferometry to calculate the interferogram in Grove Mountain. The resulting interferogram consists of both topography and ice flow information.

For evaluation, the interferograms of the same region calculated from sequential ERS-1 and JERS-1 image pairs acquired in 1996 were introduced for analysis. As for the difference of L and C band radar in sensitivity to displacement, the fringe densities of JERS and ASAR interferogram are different while the patterns are similar. The shape and distribution of ERS and ASAR interferometric fringes are slightly different for the difference in

收稿日期: 2004-12-14; 修订日期: 2005-05-10

基金项目: 中国科学院知识创新工程前沿领域项目 (CX020006) 资助。

作者简介: 程 晓 (1976—), 男, 助理研究员。2004 年于中国科学院遥感应用研究所毕业, 获地图学与地理信息系统专业博士学位。主要从事极地遥感研究, 已发表论文 10 余篇。

sensitivity to displacement in near and far range of SAR imagery

The qualitative comparisons indicate that ENVISAT ASAR data is of fine quality in such application on INSAR over ice sheet. The quantitative analysis shows that the motion state of revealed two ice flow subsystems among nunataks in Grove Mountain are relatively stable.

Further research will focus on the topography removal, noise reduction and quantitative analysis of the composite interferogram.

Key words ASAR; ice flow; SAR interferometry (INSAR); glacier; Antarctica

1 引言

南极冰盖的物质平衡是全球变化研究的重要内容,而冰盖表面运动速度是计算冰盖物质平衡的重要输入参数。传统的测量方法是在冰盖表面设置花杆,通过重复测量花杆的顶部位移而确定冰面的运动速度,然而在南极的恶劣环境下,传统测量的空间和时间分辨率都极为有限。

利用多时相的光学图像序列使用特征匹配法可以测量大面积的冰流速^[1,2],但是南极大部分地区由于受到极夜和云层的影响而限制了光学传感器的应用。SAR 具有全天候和全天时的观测能力,而 INSAR 探测视线向位移的精度可达毫米级。1993 年 Goldstein^[3]等首次利用 ERS-1 DINSAR 获取了南极 Rutford 冰流的流速,开辟了冰流测量的新天地。ERS-2 的成功发射提供了 ERS-1/2 仅相隔 1 天的追逐飞行模式,这就使探测极地快速冰流成为可能。利用 ERS-1/2 INSAR 已经定性或定量的测量了南北极许多地区的冰流,取得不少研究成果^[4-7]。

目前 ERS-1 卫星已经停止工作,而 ERS-2 卫星处于“超期服役”状态,其性能和可靠性已不如从前。2002 年 2 月欧空局 ENVISAT 的成功发射为星载干涉雷达研究带来了新的机遇,其所携带的 ASAR (高级合成孔径雷达)传感器在各方面较 ERS-SAR 更加先进,具有多极化方式和多种观测模式。ENVISAT-ASAR 数据自 2002 年 9 月开始正式向用户发放,由于其在雷达系统参数、工作频率、成像方式和处理等方面与 ERS 系统有所差别,现有的多数干涉软件尚不能对其进行处理,故目前相关成果还很少。国外已有个别研究小组处理得到了基于 ASAR 像对的干涉条纹图^[8],Prati^[9]等还利用时间间隔为 30 天的 ERS-2/ENVISAT 干涉像对处理得到了条纹。国内目前尚无 ASAR 干涉的成果报道,而国际上仍无关于 ASAR 干涉在极地冰流测量方面的研究报道。

基于以上情况,笔者从欧空局申请 2003 年底连续 3 景间隔 35d 的 VV 极化成像模式 ASAR 数据(成像区域位于南极格罗夫山地区),开展利用 ASAR 干涉提取冰流的研究。

2 技术方法

关于 SAR 和 INSAR 的基本原理本文不再赘述,仅就干涉相位与地形和形变之间的关系简叙如下。不考虑噪声和大气等的影响,冰盖地区重复轨道雷达干涉测量的干涉相位 ϕ 通常包含地形和形变两种相位信息^[10]:

$$\phi = \phi_{\text{topography}} + \phi_{\text{displacement}} \quad (1)$$

地形相位 $\phi_{\text{topography}}$ 体现了由于冰面地形高度引起的相位变化。引起 2π 相位变化所对应的相对高程值,即高度模糊度 H_a 表示为:

$$H_a = \lambda \cdot R \cdot \sin\theta / (2 \cdot B_n) \quad (2)$$

其中 λ 为雷达波长, R 为天线相位中心至地面点斜距, θ 为本地入射角, B_n 为垂直基线分量, B_n 越大则 H_a 越小。

形变相位 $\phi_{\text{displacement}}$ 由雷达视线向的位移或形变引起,其可表示为:

$$\phi_{\text{displacement}} = -\frac{4\pi}{\lambda} \delta R = -\frac{4\pi}{\lambda} v_s \Delta T \sin\theta \quad (3)$$

其中 δR 为雷达视线向位移, v_s 为冰流速在雷达视线方向分量, ΔT 为两次观测时间间隔。 $\phi_{\text{displacement}}$ 不随空间基线的长度而变,其灵敏度(引起 2π 相位变化所需的视线向位移,即形变敏感度)为 $\lambda/2$ 。由式(2)和(3)可知,INSAR 对于地表形变较地形起伏要敏感的多。通过两个干涉像对进行差分组合或使用外部 DEM 模拟地形相位即可从总的相位中消除地形相位,得到仅包含形变相位的干涉图。

3 实验区与研究数据

本研究对得到的 2003 年底连续 3 幅间隔 35d 的 VV 极化成像模式 ASAR 数据(2003 年 10 月 12

日、11月16日和12月21日)进行干涉像对组合,发现11月16日与12月21日组成的干涉像对的各种参数较好,故最终采取该像对进行干涉处理。该干涉像对的获取时间间隔为35d,图像中心处的基线垂直分量约为221m,对应的高度模糊度约为40m。

格罗夫山(Grove Mountain)位于东南极Lambert冰川的东面,距中国南极中山站以南约400km,属南极内陆冰盖的冰原角峰区,境内分布着大小角峰十余座。中国已经在南极格罗夫山地区开展了3次综

合考察,找到陨石近4500块,是最新发现的陨石富集区。图1(a)所示为本文选用的2003-11-16 ASAR影像的强度图,该图覆盖了格罗夫山及其冰流上游的大片区域。

在图1(a)中,冰流的总体方向是自左上向右下的,在右中部的白框内是格罗夫山的角峰群地区,其对冰流形成了有力的阻挡。而在角峰群的上部和下部由于没有出露的山脉、角峰等障碍物,冰流速很快,SAR图像中表现出了大面积冰流的明显纹理特征。白框所对应的角峰群区域放大显示于图1(b)。

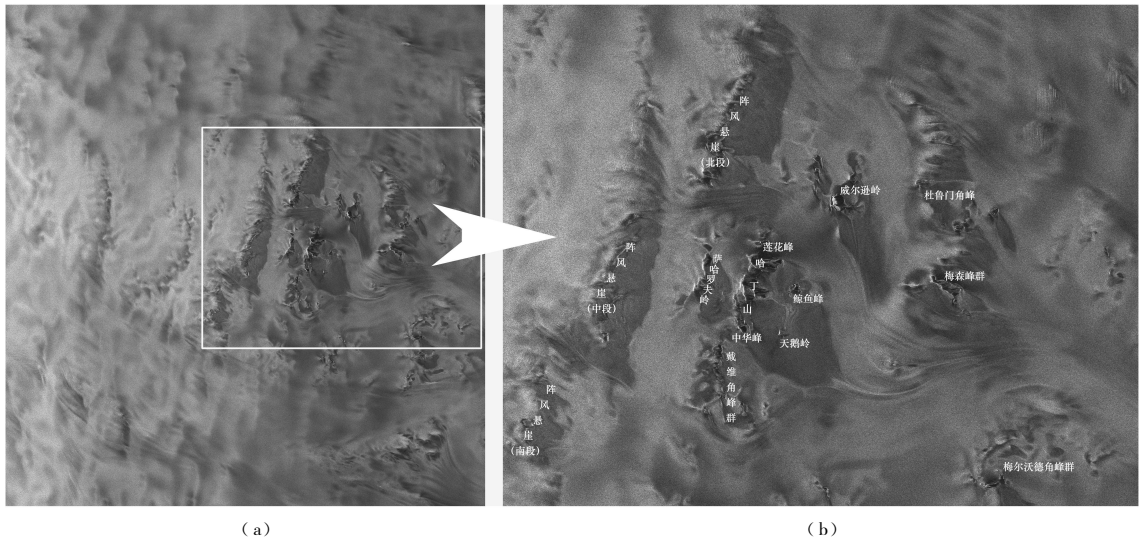


图1 格罗夫山 ENVISAT ASAR 影像功率图

Fig 1 The ENVISAT ASAR imagery of Grove Mountains

图1(b)中标示了主要的地貌,阵风悬崖分为南、中和北3段,在中段和北段、南段之间的低洼处可见冰流纹理;另外,在威尔逊岭和梅森峰群的下面也有非常清晰的冰流纹理。综合分析这些纹理特征和角峰的位置分布,本文推断在角峰群内部应该存在着两支冰流。

4 数据处理与分析

4.1 ASAR 干涉条纹生成

ASAR干涉像对经过配准(基于轨道数据的粗配准、基于相关系数的配准和精配准)、共轭相乘得到干涉图、平地效应消除和干涉图滤波的数据处理过程,得到了滤波后的干涉条纹图,包含了地形与变形的双重相位信息,如图2。

该图左部分干涉条纹的质量非常好,但在右侧由于角峰密布且冰流情况十分复杂而导致了干涉条纹非

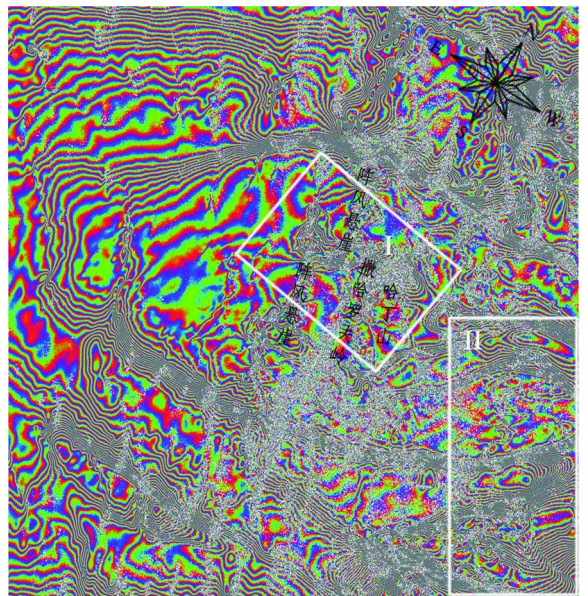


图2 格罗夫山 ASAR干涉条纹图

Fig 2 ASAR interferogram of Grove Mountain

常密集、干涉图相位梯度过大,故此条纹跳跃之处较多。为尽可能多的保持细微的高频相位信息,在干涉图滤波时未采用大窗口平均,故图像中存在部分高频的白色噪声点,在一定程度上影响了图像的显示效果。

由于未进行差分处理,图 2 的干涉图中包含地形相位和残余的平地相位,故无法精确定量的获得绝对的冰流速信息。已知该 ASAR 像对的高度模糊度约为 40m,且冰面高度总体上是自左上至右下降,对应的地形相位条纹也应沿着该方向拓展。从复合条纹的总模式来看,由冰流引起的冰面位移效应占优,故此图可用于冰流分布和变化模式的定性分析。

4.2 与 JERS-1 干涉图的对比

为定性分析和评价本文得到的 ASAR 干涉条纹图,引入该地区 1996 年 JERS-1 干涉像对 (L 波段,降轨,重复观测间隔 44d) 和 ERS-1 干涉像对 (C 波

段,降轨,重复观测间隔 35d) 所分别获得的干涉条纹图进行对比。

选择用于对比的子区分别标示于图 2 中的白色框 I (JERS-1, 1996) 和 II (ERS-1, 1996)。为加强对于干涉条纹图的理解,将各干涉条纹叠加在分段增强的 TM 伪彩色影像上进行比较 (在 TM 影像中,角峰表现为亮红色)。对比的效果见图 3 和图 4,其中图 3 已做了地理编码处理。

图 3 所示的蜿蜒于角峰间的同心条纹带表征了冰流的走向以及冰流表面的速度分布。红绿-蓝的条纹色彩渐变趋势对应着视线向位移量的递增。每级条纹变化表示两点之间雷达视线向相对位移量为 $\lambda/2$ 。同心条纹带的中心即为位移的峰值区,而从中心向两侧,条纹收敛的速度逐渐加快,表明冰流速急剧降低,这主要源于冰流两侧受到的剪切作用。

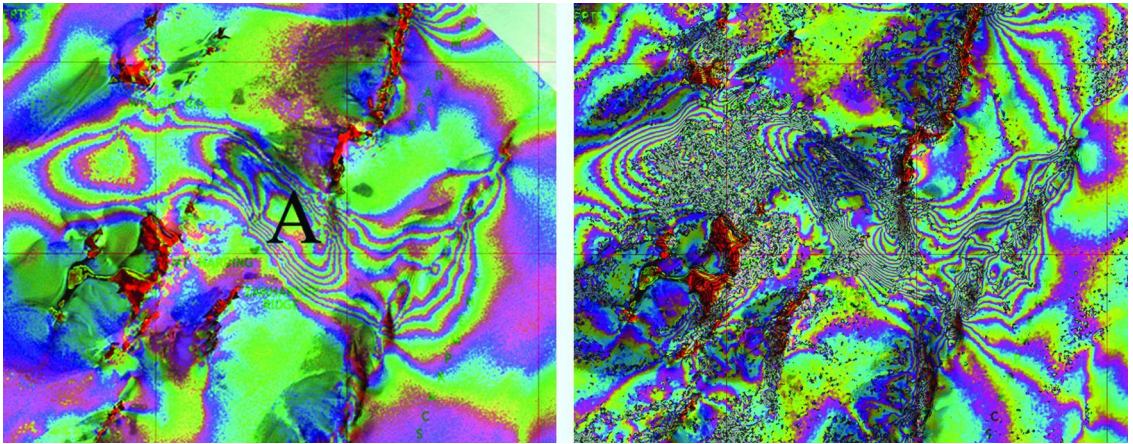


图 3 JERS-1(1996)与 ASAR(2003)干涉图中的冰流条纹对比
Fig 3 Ice flow in interferograms of JERS-1(1996) and ASAR(2003)

在图 3 中, ASAR 干涉条纹的密度较 JERS 条纹要大得多,且 ASAR 条纹的质量稍差,中断、黏连等不可辨处多于 JERS 条纹,然而两种条纹的总体模式非常相似,这主要源于两者在入射角和波长 (ASAR: 5.7 cm; JERS-1: 23.5 cm) 方面的差异。

由公式 (3), 取平均入射角 (ASAR: 23° ; JERS-1: 38°), 相同视线向位移在 ASAR 和 JERS-1 SAR 系统下引起的相位变化比值为:

$$\frac{\sin\theta_{\text{ASAR}} \cdot \lambda_{\text{JERS}}}{\lambda_{\text{ASAR}} \cdot \sin\theta_{\text{JERS}}} = \frac{\sin 23^\circ \cdot 23.5}{5.7 \cdot \sin 38^\circ} \approx 2.6 \quad (4)$$

即 ENVISAT ASAR 干涉系统对于冰面位移的理论敏感度约为 JERS-1 SAR 的 2.62 倍。

以撒哈罗夫岭和阵风悬崖之间的相位峰值 A 处的累积条纹数量为例,在 ASAR 结果中累计了约

17 级条纹,而在 JERS 结果中条纹约为 7 级,两者的比值约为 2.428,与上述的理论值 2.6 较为接近。

4.3 与 ERS-1 干涉图的对比

由图 4 可知,两个条纹的模式几乎完全相同,只是条纹密度略有不同,表现为后者较前者稍大。在 ASAR 结果中,相位梯度大的区域条纹仍能保持清晰可辨,这体现了 ASAR 结果的优点所在。

至于 ASAR 条纹密度较大,分析认为可能源于以下两方面原因:

- (1) ASAR 干涉条纹中有残留的地形相位;
- (2) 近远距入射角差异导致了干涉敏感度的差异,在 ERS SAR 图像中,该区域位于近距区,而在 ENVISAT ASAR 图像中则位于远距区,即两者入射

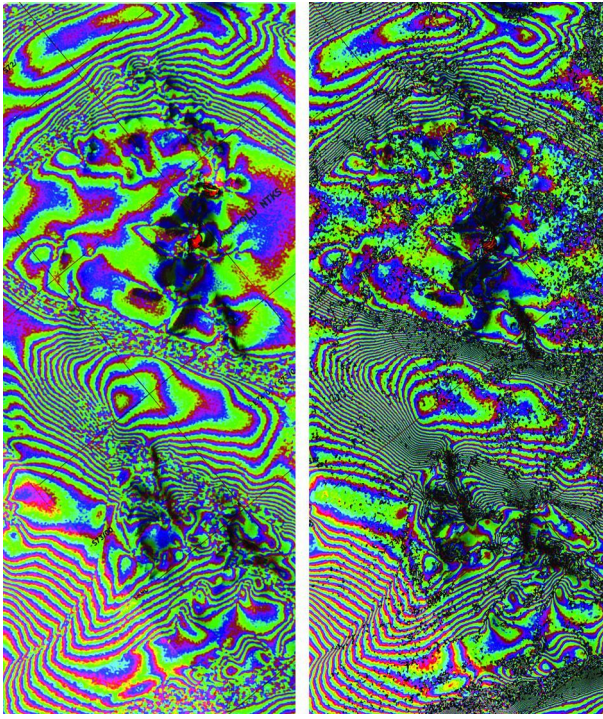


图 4 ERS与 ASAR 相邻轨道重叠区冰流条纹比较

Fig 4 Fringes of the overlap area on two adjacent tracks of ERS SAR and ENVISAT ASAR

角 θ 不同, 且 $\theta_{ERS} < \theta_{ASAR}$, 由于两者波长接近相等, 由式 (3) 则有: 在冰面位移相同的条件下, 远距点的视线向位移测量值较大。

5 结 论

以上的对比分析结果表明, 基于 ENVISAT ASAR 数据的干涉冰流测量正确揭示了南极格罗夫山地区的复杂冰流模式, 冰流引起的冰面位移相位在干涉条纹图中占据了主导地位。这是东南极格罗夫山地区的首幅 ASAR 干涉图。

上述 ERS 和 JERS 的冰流条纹均是基于 1996 年的 SAR 数据, 其中 ERS-1/2 是二、三月的, 而 JERS-1 是六、八月的, ASAR 数据是十一、十二月的。经过计算发现, 各结果所测得的相同区域的冰面日

位移量非常接近。这表明该地区的冰流状态较为稳定, 至少在这 3 个时间段内冰流速未发生大幅跃动。

接下来可以在消除地形相位、降低干涉图噪声方面开展进一步的工作。借助 ASAR 的多角度和多极化观测能力, 我们也将能够更好的认识极地冰盖的运动特征。

参 考 文 献 (References)

- [1] Scambos T A, Bindschadler R A. Complex Ice Stream Flow Revealed by Sequential Satellite Imagery [J]. *Annals of Glaciology*, 1993, **17**: 177-182.
- [2] Scambos T A, Dukiewicz M J, Wilson J C, et al. Application of Image Cross-correlation to the Measurement of Glacier Velocity Using Satellite Image Data [J]. *Remote Sensing of Environment* 1992, **42**: 177-186.
- [3] Goldstein R M, Engelhardt H, Kamb B, et al. Satellite Radar Interferometry for Monitoring Ice Sheet Motion: Application to an Antarctic Ice Stream [J]. *Science* 1993, **262**: 1525-1530.
- [4] Bindschadler R A. Monitoring Ice Sheet Behavior from Space [J]. *Reviews in Geophysics* 1998, **36**(1): 79-104.
- [5] Joughin I, Winebrenner D P, Fahnestock M A. Estimation of Ice Sheet Motion Using Satellite Radar Interferometry: Method and Error Analysis with Application to Humboldt Glacier, Greenland [J]. *Journal of Glaciology*, 1996, **42**: 564-575.
- [6] Joughin I, Winebrenner D P, Fahnestock M A. Observations of Ice-sheet Motion in Greenland Using Satellite Radar Interferometry [J]. *Geophysical Research Letters* 1995, **22**: 571-574.
- [7] Kwok R, Fahnestock M A. Ice Sheet Motion and Topography from Radar Interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, **34**(1): 189-200.
- [8] Froger J L, Fukushima Y, Briole P, et al. ASAR Interferometry at Piton de la Fournaise: Preliminary Results [A]. *Proceedings of the 'Fringe 2003' Workshop* [C]. Italy, Dec. 2003.
- [9] Prati C, Colesanti C, Ferretti A, et al. Generation of DEM with Submetric Vertical Accuracy from 30' ERS-ENVISAT Pairs [A]. *Proceedings of the 'Fringe 2003' Workshop* [C]. Italy, Dec. 2003.
- [10] Hanssen R F. *Radar Interferometry—Data Interpretation and Error Analysis* [M]. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 2001.