

利用 SAR 数据研究南极 Grove 山地区冰流运动特征

周春霞^{1,2} 邓方慧^{1,2} 陈一鸣^{1,2} 王泽民^{1,2}

1 武汉大学中国南极测绘研究中心,湖北 武汉,430079

2 武汉大学极地测绘科学国家测绘地理信息局重点实验室,湖北 武汉,430079

摘要: Grove 山地区是我国南极 PANDA 断面考察的重点研究区域之一。本文利用 35 d 时间间隔的 Envisat ASAR 数据,分别采用 DInSAR、偏移量跟踪以及两者相结合的方法提取了该区域冰面流速信息,描述了该区域复杂的冰流运动特征,并对 Grove 山核心区的冰流运动特征进行分析。利用 GPS 实测数据和 MEaSURES 流速进行精度分析,说明了结果的可靠性,并利用 2006、2007 和 2009 年三期南极冬季 SAR 数据提取了 Grove 山地区冰流速,发现该区域冰流速无明显年际变化。

关键词: Grove 山;冰流速;DInSAR;偏移量跟踪

中图法分类号: P228.41; TP751 **文献标志码:** A

近年来,我国开展的中山站至 Dome A 内陆冰盖考察是国际横穿南极科学考察计划的重要组成部分。Grove 山地区距离中山站约 400 km,是 PANDA 断面考察理想的内陆站点和内陆综合科学考察补给基地之一^[1]。该区域地形复杂,分布冰原岛峰 60 余座,冰裂隙纵横密布,同时是陨石富集区,因此,Grove 山在我国南极内陆冰盖考察中意义重大^[2]。冰流速是冰川动力学模型的重要参考,冰流速及其变化研究为南极冰盖物质平衡和全球气候变化研究提供重要线索。Grove 山地区冰流速结果可以为该区域考察路线选取、站点选址、冰裂隙分布和陨石富集机制等研究提供参考信息。

我国南极科学考察队员曾多次赴 Grove 山地区考察,并利用 GPS 观测了局部地区的冰面流速,获取了宝贵的实测资料,但这并不能满足大范围的研究与应用。1993 年 Massonnet 等率先将合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术引入地震形变测量中,开创了干涉技术应用于地表形变场监测的先河^[3],随后 InSAR 技术被广泛用于冰川流速研究。2006 年程晓等利用 ERS-1/2 和 JERS-1 雷达影像,采用三轨和四轨差分干涉测量(DIn-

SAR)的方法,结合冰流向获取了 Grove 山地区冰流速图^[4]。2011 年,Rignot 等利用多源 SAR 数据采用 DInSAR 和偏移量跟踪(offset tracking)方法获取了全南极冰流速图^[5],并通过美国国家冰雪数据中心发布了 900 m 和 450 m 两种分辨率的结果(下文简称 MEaSURES 流速),但其结果不能很好地反映 Grove 山地区局部复杂的冰流运动特征。近年来,不少学者利用 DInSAR、偏移量跟踪和实地观测等方法,在南极半岛、南极三大冰架以及典型溢出冰川等区域开展了冰流速及其年际和季节变化研究^[6-11],但研究区域主要集中在南极冰盖边缘地区,对内陆冰盖冰流速变化研究相对较少。

本文利用 Envisat ASAR 数据,采用 DInSAR 和偏移量跟踪方法,提取南极内陆冰盖 Grove 山地区高分辨率、高精度的冰流速图,分析该区域冰流运动特征,并利用相关资料证明结果的可靠性。利用多期 SAR 数据,初步探测 Grove 山地区冰流速年际变化特征。

1 研究方法

目前,DInSAR 和偏移量跟踪是南极地区开

收稿日期:2015-05-03

项目来源:南北极环境综合考察与评估专项资助项目(CHINARE2015-02-04);国家 973 计划资助项目(2013CBA01804);测绘地理信息公益性行业科研专项资助项目(201412009);国家自然科学基金资助项目(41376187, 41206177)。

第一作者:周春霞,博士,教授,主要从事雷达干涉测量、极地环境遥感研究。E-mail:zhoucx@whu.edu.cn

展大范围冰流速测量最常用的方法。DInSAR 提取的结果分辨率和精度高,但通常只能获取距离向的形变量,且在低相干性区域受到限制^[12]。偏移量跟踪方法分辨率和精度均不如前者,但对影像相干性要求低,不涉及相位解缠,且能同时获取距离向和方位向的绝对位移值^[13]。如有合适的数

据,可以将 DInSAR 距离向与偏移量跟踪方位向结果进行融合,得到二维平面冰流速场。已有研究表明,Grove 山地区 35 d 时间间隔的短基线 ASAR 数据能保证较好相干性,且 Grove 山地区分布广泛的岩石和角峰等稳定区域可以为偏移量跟踪方法提取冰流速提供足够数量的控制点。本文利用 DInSAR 和偏移量跟踪方法提取 Grove 山地区二维平面流速场,其流程图如图 1 所示。

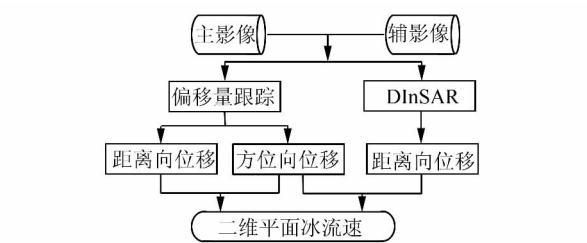


图 1 冰流速提取流程图
Fig. 1 Flowchart of Ice Velocity Derivation

2 数据处理

2.1 实验数据

本文采用的 ASAR 数据对信息如表 1 所示,三组数据为南极不同年份的冬季数据,用于不同年份冰流速获取。影像覆盖范围如图 2 所示,从 SAR 强度影像上可目视判读出一些裸露角峰以及穿行于角峰间的冰流,图 2 中用箭头标示。本文以 2006-06-21~07-26 为例对数据处理进行说明。

2.2 DInSAR 提取冰流速

本文采用两轨差分方法提取冰流速。图 3 为相干性图,颜色越亮表示相干性越高,可见本文所用数据相干性较高,保证了解缠的可靠性。外部 DEM 精度是影响 DInSAR 结果精度的一个重要因素。表 1 中,高程模糊度与形变模糊度比值最小约为 2 321,即要测得 1 cm 的地表形变量,则要求外部 DEM 精度约为 23.2 m。本文采用的外部 DEM 为 Bamber 等 2009 年发布的全南极 1 km 分辨率的 DEM,精度可达 10 cm,在起伏较大的地区精度也可达几米^[14-15],满足本文差分干涉处理对外部 DEM 的精度要求。

表 1 Envisat ASAR 数据对信息

Tab. 1 Parameters of Envisat ASAR Data

ID	影像获取时间	平行基线/m	垂直基线/m	高程模糊度/m	形变模糊度/cm	高程模糊度/形变模糊度
1	2006-06-21~07-26	18	41	237		8 464
2	2007-06-06~07-11	101	52	187	2. 8	6 679
3	2009-07-12~08-16	48	150	65		2 321

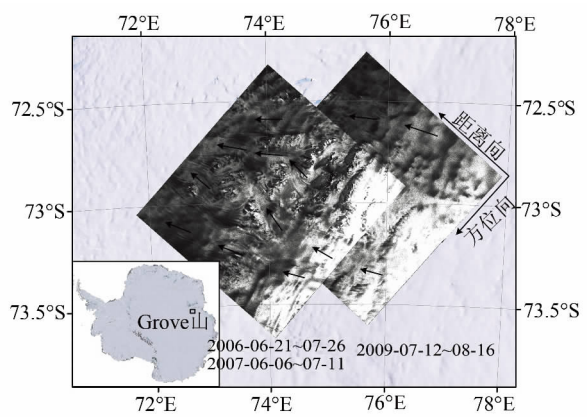


图 2 研究区域示意图
Fig. 2 Image of Study Area

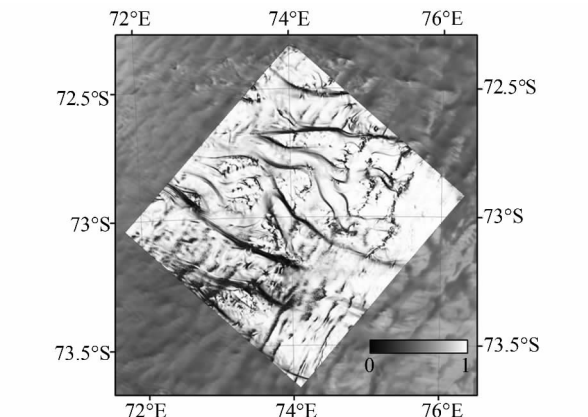


图 3 相干性图
Fig. 3 Coherence Map

DInSAR 数据处理时采用 1(距离向)×5(方位向)的多视处理,结果分辨率为 20 m。在差分干涉条纹图中(图 4),可以明显地看到由冰流引起的密集条纹,根据条纹特征也可判读冰流走向。

解缠起算点选取在哈丁山西侧相干性较高的西堤碎石带,如图 4 中红点所示,得到距离向绝对冰流速结果如图 5(a)所示。尽管 DInSAR 只能获取距离向的冰流速,但 Grove 山地区冰流方向与距

离向夹角较小,因此 DInSAR 结果能较好地反映该区域冰流的整体分布和趋势。

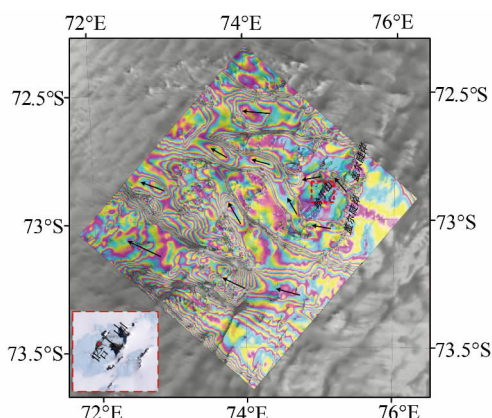


图 4 解缠后的差分干涉条纹图

Fig. 4 Unwrapped Differential Interferogram

2.3 二维冰流速提取

偏移量跟踪方法提取冰流速的采样间距为 10(距离向)×50(方位向),结果分辨率为 200 m。

数据处理中以稳定的角峰等作为控制点,采用双线性模型拟合轨道偏移量^[16-17],轨道平面拟合误差小于 0.04 个像素。图 5(b)和 5(c)分别为偏移量跟踪提取的距离向和方位向冰流速结果。偏移量跟踪距离向结果与 DInSAR 结果很接近,但存在明显噪声,且分辨率低。方位向采样间距是距离向的 5 倍,因此,噪声少于距离向结果。

结合两种方法的优势,将 DInSAR 距离向与偏移量跟踪方位向结果进行融合,得到分辨率和精度均较高的二维平面冰流速结果,并计算得到冰流运动方向(图 6)。Grove 山地区冰流运动特征复杂,受山体影响明显,在无角峰阻挡的地区冰流速度大且覆盖面积广,在两侧形成了两条大冰流,局部地区最大流速可达 40 m/a。图 6(b)为 Grove 山核心区冰流速图,东面的盖尔陡岸像屏障一样阻挡了冰流的运动,冰流避开盖尔陡岸、萨哈罗夫岭、哈丁山和戴维冰原岛峰群等的阻挡,而后汇聚为一条冰流,流速约 10 m/a,威尔逊岭北面的冰流也有向其汇集的趋势。

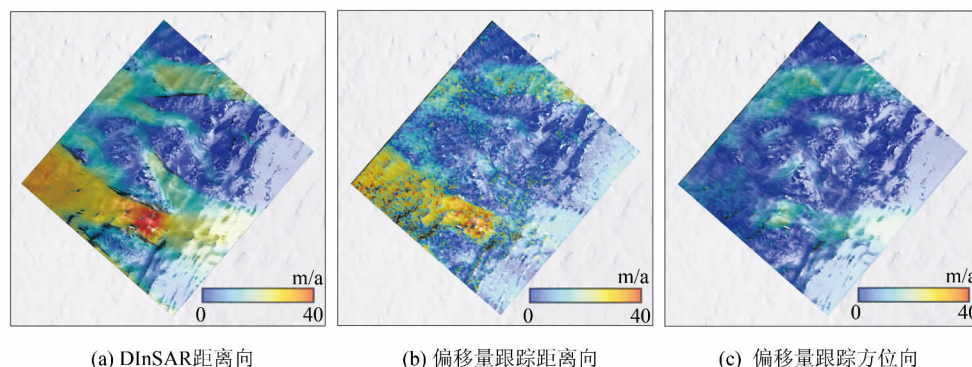


图 5 单一方向上冰流速结果

Fig. 5 Ice Velocity in Single Direction

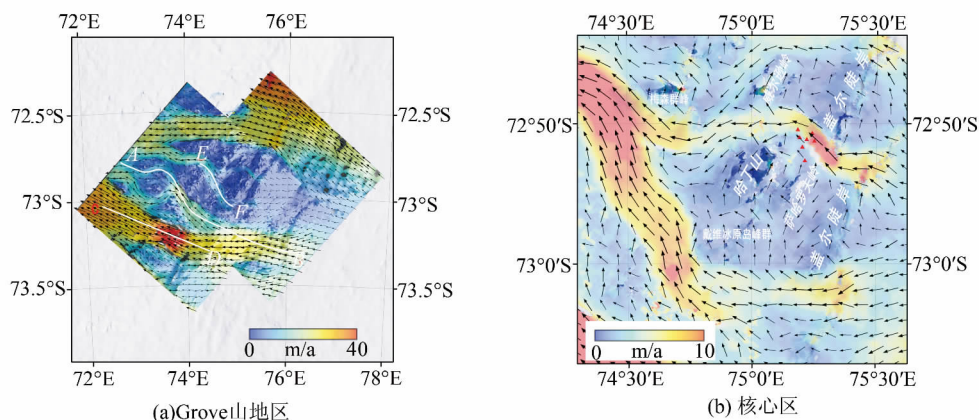


图 6 Grove 山地区二维平面冰流速图

Fig. 6 Two-dimensional Ice Velocity Map of Grove Mountains

3 精度分析

2006 年 1 月 17 日和 31 日,第 22 次(2005/2006)中国南极科学考察队员对哈丁山东北角的标杆(图 6(b)中红色三角)进行了 GPS 观测,获取了该地区实测冰流速。本文将 DInSAR 和偏移量跟踪融合得到的二维平面流速结果与 GPS

实测冰流速、MEaSURES 流速进行比较(表 2)。本文冰流速与实测值之差的均值和均方根分别为 0.29 m/a 和 1.05 m/a,而 MEaSURES 流速与实测值之差的均值和均方根分别为-1.50 m/a 和 2.41 m/a。MEaSURES 流速分辨率为 450 m,低于本文方法 200 m 的分辨率,且 SAR 数据获取时间与 GPS 观测时间不同也可能是造成结果差异的原因。

表 2 本文结果与实测流速、MEaSURES 流速的比较

Tab. 2 Comparison Between GPS Measurements, MEaSURES Ice Velocity and Our Results

点名	纬度(S)	经度(E)	冰流速/(m·a ⁻¹)			冰流速差值/(m·a ⁻¹)	
			GPS	本文方法	MEaSURES	本文方法-GPS	MEaSURES-GPS
PLE1	72°51'02"	75°11'29"	3.54	2.82	2.63	-0.72	-0.91
PLE2	72°52'41"	75°12'45"	1.11	1.39	2.18	0.28	1.07
PLE3	72°51'42"	75°12'08"	0.62	1.43	1.32	0.81	0.70
PLE4	72°51'10"	75°13'14"	5.98	7.09	3.83	1.11	-2.15
PLE5	72°50'43"	75°14'31"	7.32	9.19	6.42	1.87	-0.9
PLE6	72°50'28"	75°11'05"	5.40	5.60	3.91	0.20	-1.49
PLE7	72°51'16"	75°15'02"	12.34	10.84	5.54	-1.50	-6.80

将本文结果与 MEaSURES 流速进行进一步对比分析,如图 7。计算得到沿剖面线 AB(剖面线位置见图 6(a))冰流速差值的均值和均方根分别为 0.82 m/a 和 1.35 m/a,两者整体求差的均值和均方根分别为 0.59 m/a 和 1.44 m/a,说明本文方法结果与 MEaSURES 流速整体上吻合较好。

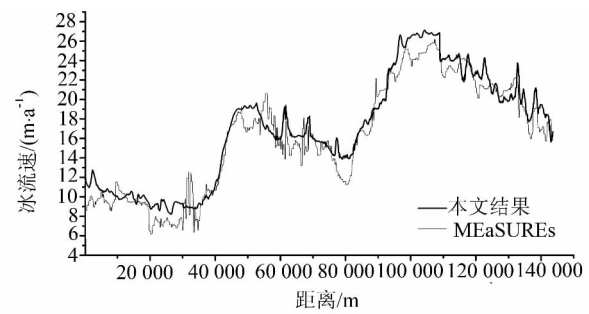


图 7 沿剖面线 AB 的冰流速对比

Fig. 7 Comparison of Ice Velocities Along Profile AB

4 冰流速年际特征分析

本文利用 2006、2007 和 2009 年冬季数据探测 Grove 山地区是否存在明显的冰流速年际变化。考虑到偏移量跟踪方法精度明显低于 DInSAR 方法,且 Grove 山地区冰流运动方向与距离向夹角较小,进行冰流速变化分析时,仅采用 DInSAR 距离向冰流速结果。对重叠区域冰流速结果进行剖面线分析,剖面线 CD 和 EF 位置见图 6(a),结果显示 Grove 山地区 2006、2007 和 2009 年冬季冰流速无明显差异(图 8)。可能有以

下两个方面的原因:(1) Grove 山地区位于南极内陆冰盖,与冰架、溢出冰川相比,所处环境相对稳定,受海洋潮汐、底部融水等影响较小,而本文所用数据时间间隔最长为 3 a,在此期间冰流速可能未发生明显变化;(2) 若冰流速变化量未能明显超过 DInSAR 的形变探测精度,该变化量将难以从误差中区分,沿剖面线 CD,2007 与 2006 年冰流速差值的均值和均方根分别是 0.05 m/a 和 0.12 m/a;沿剖面线 EF,2007、2009 与 2006 年差

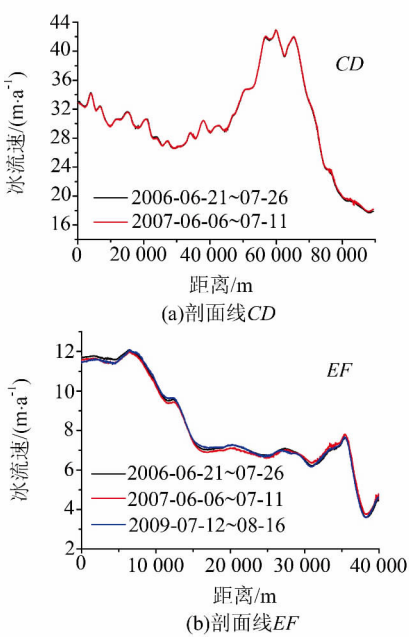


图 8 Grove 山地区冰流速年际比较

Fig. 8 Comparisons of Annual Ice Velocities in Grove Mountains

值的均值分别是一0.04 m/a 和 0.13 m/a,均方根分别是 0.13 m/a 和 0.1 m/a。因此,难以判断该差异是否由冰流速变化引起。

5 结 语

本文利用 35 d 时间间隔的 Envisat ASAR 数据对,采用 DInSAR 和偏移量跟踪方法提取了 Grove 山地区冰流运动信息。受角峰群的影响,该地区冰流分布复杂,在冰流速图中可以清晰地发现位于外侧的两个大冰流,主冰流流速最大达到了 40 m/a,部分小冰流在角峰间穿行。通过与 GPS 实测值和 MEaSURES 流速的比较分析,验证了本文方法的准确性。此外对比多年的距离向冰流速,发现 2006、2007 和 2009 年 Grove 山地区冬季冰流速未发生明显年际变化。

本文冰流速结果直观体现了 Grove 山地区冰流分布和运动特征,但只分析了 3 a 的冬季流速,且未考虑冰盖高程变化、大气噪声等因素对结果精度的影响。后期将扩展数据的时间覆盖范围,进一步监测该地区冰流速的年际和季节变化特征,并结合高精度、高分辨率的冰流速和 DEM 等数据,开展冰裂隙和陨石分布等研究。

致谢:感谢中国南极科学考察队员,感谢欧洲空间局(ESA)提供的 Envisat ASAR 数据,美国国家冰雪数据中心(NSIDC)提供的 MEaSURES 全南极冰流速数据,BAMBER DEM,全南极 Landsat 和 Radarsat 镶嵌影像。

参 考 文 献

- [1] Ding Shijun, Peng Wenjun. Topographic Mapping of Grove Mountains in Antarctica[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2001(3): 17-18(丁士俊, 彭文钧. 南极格罗夫山地形图测绘[J]. 测绘通报, 2001(3): 17-18)
- [2] Zhou Chunxia, Ai Songtao, Chen Nengcheng, et al. Grove Mountains Meteorite Recovery and Relevant Data Distribution Service[J]. *Computers & Geosciences*, 2011, 37(11): 1 727-1 734
- [3] Massonnet D, Rossi M, Carmona C, et al. The Displacement Field of the Landers Earthquake Mapped by Radar Interferometry[J]. *Nature*, 1993, 364(6 433): 138-142
- [4] Cheng Xiao, Li Xiaowen, Shao Yun, et al. DInSAR Measurement of Glacier Motion in Antarctic Grove Mountain[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(3): 358-366
- [5] Rignot E, Mouginot J, Scheuchl B. Ice Flow of the Antarctic Ice Sheet[J]. *Science*, 2011, 333(6 048): 1 427-1 430
- [6] Zhou Chunxia, Deng Fanghui, Ai Songtao, et al. Determination of Ice-flow Velocity at the Polar Record Glacier and Dalk Glacier Using DInSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(8): 940-944(周春霞, 邓方慧, 艾松涛, 等. 利用 DInSAR 的东南极记录冰川和达尔克冰川冰流速提取与分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(8): 940-944)
- [7] Rignot E, Casassa G, Gogineni P, et al. Accelerated Ice Discharge from the Antarctic Peninsula Following the Collapse of Larsen B Ice Shelf[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(18): 10.1029/2004GL020697
- [8] Rignot E. Changes in Ice Dynamics and Mass Balance of the Antarctic Ice Sheet[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2006, 364(1 844): 1 637-1 655
- [9] King M A, Coleman R, Morgan P J, et al. Velocity Change of the Amery Ice Shelf, East Antarctica, During the Period 1968-1999[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* (2003-2012), 2007, 112(F1), 10.1029/2006JF00060
- [10] Scheuchl B, Mouginot J, Rignot E. Ice Velocity Changes in the Ross and Ronne Sectors Observed Using Satellite Radar Data from 1997 and 2009[J]. *The Cryosphere*, 2012, 6(5): 1 019-1 030
- [11] Zhou Chunxia, Zhou Yu, Deng Fanghui, et al. Seasonal and Interannual Ice Velocity Changes of Polar Record Glacier, East Antarctica[J]. *Annals of Glaciology*, 2014, 55(66): 45-61
- [12] Zebker H A, Villasenor J. Decorrelation in Interferometric Radar Echoes[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(5): 950-959
- [13] Strozzi T, Luckman A, Murray T, et al. Glacier Motion Estimation Using SAR Offset-tracking Procedures[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(11): 2 384-2 391
- [14] Bamber J L, Gomez-Dans J L, Griggs J A. A New 1 km Digital Elevation Model of the Antarctic Derived from Combined Satellite Radar and Laser Data (Part 1): Data and Methods[J]. *The Cryosphere*, 2009, 3(1): 101-111
- [15] Griggs J A, Bamber J L. A New 1 km Digital Elevation Model of Antarctica Derived from Combined Radar and Laser Data (Part 2): Validation and Error Estimates[J]. *The Cryosphere*, 2009, 3(1):

- 113-123
- [16] GAMMA. Documentation Interferometric SAR Processor-ISP[R]. User's Guide, Version 1. 0, GAMMA Remote Sensing and Consulting AG, Switzerland, 2007
- [17] Deng Fanghui, Zhou Chunxia, Wang Zemin, et al. Ice-flow Velocity Derivation of the Confluence Zone of the Amery Ice Shelf Using Offset-tracking Method[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(7): 901-906(邓方慧, 周春霞, 王泽民, 等. 利用偏移量跟踪测定 Amery 冰流汇合区的冰流速[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(7): 901-906)

Ice-flow Features in the Grove Mountains Area Using SAR Data

ZHOU Chunxia^{1,2} DENG Fanghui^{1,2} CHEN Yiming^{1,2} WANG Zemin^{1,2}

1 Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Key Laboratory of Polar Surveying and Mapping, National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: The Grove Mountains area is a key study area in Chinese PANDA section of East Antarctica. Envisat ASAR images of 35 days interval were utilized to map the ice velocity in the Grove Mountains with DInSAR and offset-tracking methods. An ice velocity map of Grove Mountains displays complex motion features influenced by the widespread distribution of rocks and nunataks. We found two large ice streams bounding the Grove Mountains area, with a maximum velocity of 40 m/a. Some small ice streams flow between the nunataks in the area. GPS measurements and ice velocity MEASUREs were applied to evaluate the accuracy, confirming the reliability of our results. Comparing winter ice velocities for the years 2006, 2007 and 2009, we detected no obvious interannual ice velocity changes in the Grove Mountains.

Key words: Grove Mountains; ice-flow velocity; DInSAR; offset tracking

First author: ZHOU Chunxia, PhD, professor, specializes in InSAR and polar environmental remote sensing. E-mail: zhouc@whu.edu.cn

Foundation support: The Chinese Polar Environment Comprehensive Investigation & Assessment Programme, No. CHINARE2015-02-04; the National Basic Research Program of China (973 Program), No. 2013CBA01804; the Public Science and Technology Research Fund Project of Surveying, Mapping and Geoinformation, No. 201412009; the National Natural Science Foundation of China, Nos. 41376187, 41206177.