

利用 DInSAR 的东南极极记录 and 达尔克冰川冰流速提取与分析

周春霞^{1,2} 邓方慧^{1,2} 艾松涛^{1,2} 王泽民^{1,2} 鄂栋臣^{1,2}

1 武汉大学中国南极测绘研究中心,湖北 武汉,430079

2 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:利用 1996 年 ERS-1/2 tandem SAR 数据,采用 DInSAR 方法提取了极记录 and 达尔克冰川的冰流速,并利用冰流速转换模型和该地区的实测值进行了对比。结果表明,DInSAR 结果很好地体现了整个区域的冰流速。对于内陆地区,DInSAR 提取的监测点冰流速和实测值非常吻合;对于达尔克冰川的前缘,受时间差异和潮汐等因素的影响,DInSAR 推求的冰流速结果略小于实测值。

关键词:差分干涉测量;冰流速;极记录冰川;达尔克冰川

中图分类号:P237.9;P343.62;P728.2 **文献标志码:**A

冰流速是冰川动力学的重要参数,用于衡量冰盖物质从内陆流向海洋的速率以及冰盖的流动方式,同时能反映冰盖物质随时间的演变过程。从南极冰盖流出的冰体大多数是通过冰流和溢出冰川完成的。认识冰流和溢出冰川冰体流动的物理机制,可为估计冰流流域物质平衡,建立冰盖动力学模型提供依据^[1]。同时,冰流速监测对预报冰崩及其对科学考察站区和考察船航行的影响也具有重要意义^[2]。极记录冰川(Polar Record Glacier)和达尔克冰川(Dalk Glacier)位于我国南极考察重点区域普里兹湾—埃默里冰架—冰穹 A(PANDA)断面内,属于溢出型冰川,其动态变化特征在一定程度上能反映冰盖和冰川的物质平衡状况。

差分干涉测量(DInSAR)技术已成功应用于绘制冰川流速图等领域,是目前测量斜距向位移最精确的方法之一^[3]。欧空局发射的 ERS-1/2 tandem(双星串联)数据时间基线仅为 1 d,对于南极地区年流速达百 m 的溢出型冰川,可以保持较高的相干性。本文利用 ERS-1/2 tandem 数据,采用两轨差分的方法,提取了东南极极记录冰川和达尔克冰川的冰流速,并分析了两条冰川冰流运动特征。另外,结合雷达视线向和冰面位移的单方向转换模型,与实测冰流速进行比较分析。

1 理论方法

1.1 DInSAR 测定冰流速

当不考虑大气、电离层影响和系统噪声时,重复轨道雷达干涉测量的干涉相位 φ 可表示为^[4]:

$$\varphi = \varphi_{\text{ref}} + \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{def}} \quad (1)$$

式中, φ_{ref} 、 φ_{topo} 和 φ_{def} 分别为参考相位、地形相位和形变相位。若冰流主要沿着冰面流动,且在相隔 1 d 时间内,垂直方向没有产生明显的高程变化,则可认为形变相位 φ_{def} 主要由冰川流动引起。其与雷达视线向上的冰流速分量 v_{los} 的关系为:

$$\varphi_{\text{def}} = -\frac{4\pi}{\lambda} \Delta r = -\frac{4\pi}{\lambda} v_{\text{los}} \Delta t \quad (2)$$

式中, λ 为雷达波长; Δr 为视线向位移量; Δt 为两次观测时间间隔。

1.2 单方向冰流速转换模型

DInSAR 获得的是雷达视线方向的位移值。为了获取实际冰面冰流速,假设冰流沿冰面最大坡度方向流动,通过冰面地形或冰流物理特征计算冰流方向,以确定雷达视线方向的冰流速与实际冰面冰流速的转换关系。此处单方向是指单组升轨或降轨的数据。

如图 1(修改自文献^[5])所示,XY 为水平面,

收稿日期:2013-05-10

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41076126,41376187);国家 863 计划资助项目(2009AA12Z133);国家海洋局极地科学重点实验室开放基金资助项目(KP201001);极地专项资助项目(CHINARE2014-02-04)。

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

X 、 Y 分别为雷达系统距离向(地距)和方位向, Z 为垂直于水平面的天顶方向。雷达视线向位于 XZ 平面内,与 Z 轴的夹角为 θ ,即雷达入射角。 d 为冰面位移,坡度角为 β 。将 d 投影到 XY 平面和 Z 轴分别得到 d_h 和 d_z , d_h 与 Y 轴夹角为 φ 。进一步将 d_h 分解到 X 、 Y 轴,得到距离向和方位向的位移分量 d_{hx} 和 d_{hy} 。因此, d 在雷达视线向的投影 d_{los} 可表示为分量 d_z 、 d_{hx} 和 d_{hy} 在雷达视线向的投影矢量和,则有:

$$d_{los} = d_{hx} \sin\theta + d_z \cos\theta = d \cos\beta \sin\varphi \sin\theta + d \sin\beta \cos\theta \quad (3)$$

当地表坡度 β 很小时,平面位移 d_h 近似于冰面位移 d ,式(3)可写为:

$$d_{los} = d \sin\varphi \sin\theta = d_h \sin\varphi \sin\theta \quad (4)$$

式中, φ 通常为未知量。

本文利用实测得到的冰流向作为先验值,将 DInSAR 得到的视线向冰流速转换为平面冰流速,与实测结果进行比较分析。文中平面冰流速均指水平面上的冰流速。

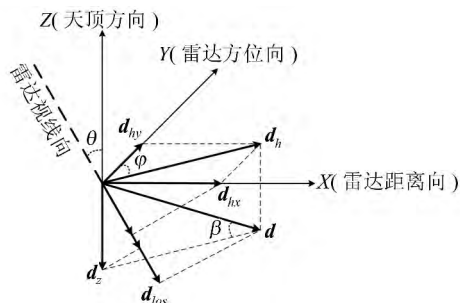


图 1 单方向冰流速转换模型几何示意图
Fig. 1 Geometric Diagram of Ice Velocity Conversion Model

2 数据处理与结果分析

2.1 实验区概况

极记录冰川是东南极英格丽德·克里斯泰森海岸最大的冰川^[2],运动速度较快,冰流从东南方向流向西北方向的海域,在卫星影像上能看到清晰的冰流痕,如图 2 所示。

达尔克冰川是距中山站最近的冰川^[6]。在中国第 21、24 次南极科学考察度夏期间,科研人员利用直升机向冰川表面投放了监测标志,并利用前方交会进行实地测量。但是随着冰川的流动,出现监测标志倾倒,落入冰裂隙和海洋以及视线受地形遮挡等现象,导致了观测值的不连续性。

2.2 DInSAR 数据处理

为保证影像相干性,采用 ERS-1/2 tandem

数据,并选择短基线数据对,以减少 DEM 误差对 DInSAR 提取冰流速的影响。表 1 中,高程模糊度(460 m)表示一个整周的干涉条纹对应的地表高程差,与之对应的形变模糊度(2.8 cm)表示一个整周的形变条纹对应的 $\lambda/2$ 的形变量。可见,相位对地表形变的敏感度比对高程起伏的敏感度要高。该数据组合中,此比值约为 16 400,即要测得 1 cm 的地表形变量,要求地形高程数据的精度约为 164 m。数据处理中采用的外部 DEM 为 Bamber 等 2009 年发布的全南极 1 km 分辨率的 DEM^[7],精度可达 10 cm,在起伏较大的地区精度也可达几 m^[8],满足本文中差分干涉像对对外部 DEM 的精度要求。

表 1 差分干涉影像对参数

Tab. 1 Parameters of DInSAR Image Pairs

卫星数据	获取时间	垂直基线	高程模糊度	形变模糊度
ERS-1	1996-05-24	21 m	460 m	2.8 cm
ERS-2	1996-05-25			

图 3 为相干性图,大部分区域保持高相干性,部分快速冰流、未完全冻结海域及回波信号太弱区域,失相关比较严重。在差分干涉条纹图中(图 4),可以明显地看到冰流引起的密集条纹。经地理编码后的距离向冰流速如图 5 所示,从中可清晰地看到若干冰流。观察冰流痕迹的走势发现,极记录冰川的冰流方向主要集中在距离向,因此 DInSAR 距离向结果能直接反映该冰川整体的冰流速。极记录冰川冰流速明显大于其他区域,最大冰流速约为 800 m/a。孙家柄等利用多时相遥感影像中冰川边缘信息估算出极地记录冰川 1990~1997 年的平均流速为 834.1 m/a^[2],与本文实验结果大致吻合。冰流快速运动也促使极记录冰川产生大冰舌,冰崩后产生巨大的冰山。另外,极记录冰川西侧冰流速大于东侧,且崩解后的大冰山并未完全漂离冰川,在前方阻碍了冰川的流动。达尔克冰川的冰流特征如图 6 所示,其东南侧存在距离向流速分量更大的区域,而且在该区域可以看到明显的冰裂隙。

2.3 平面冰流速获取及与实测值对比

位于达尔克冰川的监测点 D04、D11 和 D12(图 7),在 2009~2011 年观测比较完整。因此,利用 2009-12-19 和 2010-12-25,2010-01-19 和 2011-01-25 的观测数据分别组合计算得到日均冰流速。如表 2 所示,两组实测数据计算的冰流速大小和方位非常一致。

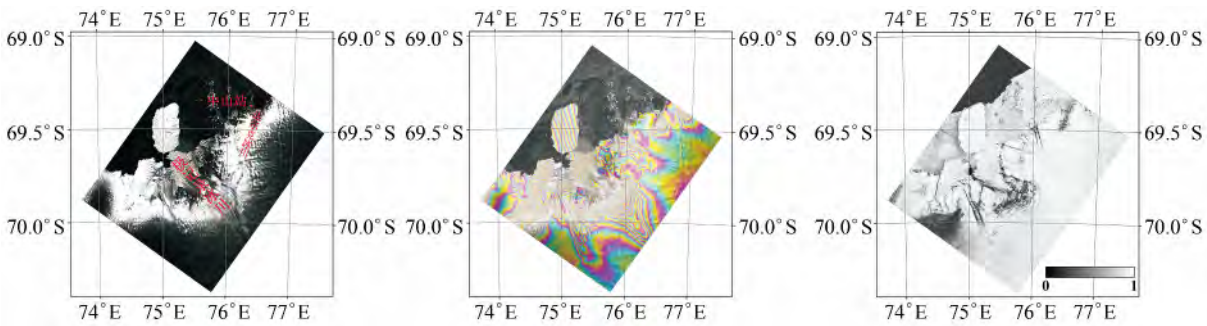


图 2 实验区 SAR 卫星影像图
Fig. 2 SAR Images of Study Area

图 3 相干性图
Fig. 3 Coherence Map

图 4 差分干涉条纹图
Fig. 4 Differential Interferogram

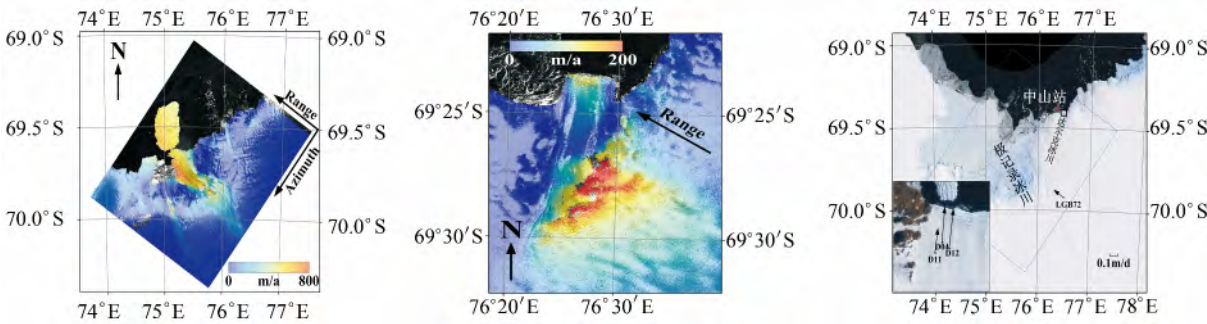


图 5 DInSAR 提取的距离向冰流速图
Fig. 5 Ice-flow Velocity Map
Derived from DInSAR

图 6 达尔克冰川区域距离向冰流速图
Fig. 6 Ice-flow Velocity
Map of Dalk Glacier

图 7 研究区域实测冰流速示意图
Fig. 7 Ice Velocity from
Field Measurements

表 2 达尔克冰川监测点实测流速值

Tab. 2 Ice Velocity Field Measurements of Dalk Glacier

ID	2009-12-19~2010-12-25		2010-01-19~2011-01-25	
	V/(m·d ⁻¹)	A	V/(m·d ⁻¹)	A
D04	0.398	5.5°	0.402	5.3°
D11	0.285	7.7°	0.288	8.0°
D12	0.450	7.0°	0.453	6.9°

基于 BAMBER DEM 计算出该区域坡度小于 1°,可近似认为冰流位于水平面上。已知轨道方位角为 35°,结合实测冰流方向,利用单方向冰流速转换模型,将 DInSAR 提取的视线向冰流速转换为平面冰流速。如表 3 所示,DInSAR 推算的平面冰流速小于实测值,对此进行分析,首先,实测结果为 2009~2010 年的年平均流速,而 DInSAR 推算结果为 1996 年 5 月即冬季流速。对于南极冰盖边缘的溢出型冰川,其冰流速存在季节变化,夏季流速一般大于冬季流速^[9-10];而年际间变化因受多种因素的影响,有的增大^[11-15],有的减小^[16-17]。已有研究表明,达尔克冰川的夏季流速大于冬季^[18],但其流速是否在 13 a 后加快,也有待利用更多数据进一步确认。其次,对于脱离冰盖浮于海水的冰川前缘,受海洋潮汐的影响会产生垂直方向的位移。根据距此地区最近的澳大利亚戴维斯考察站验潮资料^[19],1996-05-25

03:15(UTC)的潮位高于 24 日同时刻潮位。因未考虑此垂直位移,也会导致 DInSAR 推算的冰流速结果较实际值偏小。为进一步提高精度,可利用验潮数据或潮位预报模型准确去除海洋潮汐引起的位移,包括对冰山流速的影响等。

澳大利亚考察队分别于 1993~1994 年和 1994~1995 年的南极夏季,对兰伯特冰川流域(Lambert Glacier Drainage Basin, LGB)的冰流速进行了实地测量,其中实测点 LGB72 位于极记录冰川东南方向的内陆地区,落在 SAR 数据的覆盖范围内,其实测平均冰流速为 0.145 m/d^[20-21]。同上,将距离向冰流速转换为平面冰流速,与实测值非常接近,说明了 DInSAR 流速结果的准确性,如表 3 所示。内陆地区冰流速随年际变化不

表 3 实测冰流速与 DInSAR 提取冰流速的比较

Tab. 3 Comparison of Field Measurements and DInSAR Results

ID	冰流向	实测流速值/ (m·d ⁻¹)	距离向流速值/ (m·d ⁻¹)	模型转换值/ (m·d ⁻¹)	模型转换与实测差值/ (m·d ⁻¹)
D04	5.5°	0.398	0.163	0.330	-0.068
D11	7.7°	0.285	0.087	0.190	-0.095
D12	7.0°	0.450	0.153	0.326	-0.124
LGB72	306°	0.145	0.148	0.148	0.003

是非常明显^[22],如本文中 SAR 数据获取时间为 1996 年南极冬季,而实测结果是 1993~1995 年的南极夏季,均未发现该点冰流速随季节的显著变化。

3 结 语

本文利用 ERS-1/2 tandem 数据,高精度地提取了整个实验区的冰流速,探讨了极记录冰川和达尔克冰川冰流的运动规律。通过转换模型将雷达视线向冰流速转换为平面流速,和实测冰流速进行对比。结果表明,内陆地区冰流速随季节和年际变化不是非常明显,DInSAR 提取监测点冰流速和实测值非常吻合;对于溢出冰川脱离冰盖而浮于海水的冰川前缘,受数据时间差异和潮汐等因素的影响,DInSAR 推求的冰流速结果略小于实测值,冰流速的年际变化特征有待进一步确定。

DInSAR 技术能高精度获取距离向的冰流速,结合偏移量跟踪方法^[23-25]或多孔径 SAR 干涉技术^[26],可获取大范围的二维冰流速信息。另外,由于该区域合适的 ERS-1/2 tandem 数据组合非常有限,后续也将利用多源卫星影像数据,结合特征跟踪等方法,研究极记录和达尔克冰川冰流速的季节和年际变化特征。

致谢:感谢国家海洋局极地考察办公室对现场考察的资助;感谢达尔克冰川野外观测队员;感谢欧洲空间局(ESA)提供的 ERS 数据,以及美国国家冰雪数据中心(NSIDC)提供的 BAMBER DEM 数据。

参 考 文 献

- [1] Wen Jiahong, Kang Jiancheng, Sun Bo. Recent Progress in the Study on Antarctic Glaciology and Global Change[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 1997, 9(3): 232-237(温家洪, 康建成, 孙波. 南极冰川学与全球变化研究新进展[J]. 极地研究, 1997, 9(3): 232-237)
- [2] Sun Jiabing, Huo Dongmin, Sun Zhaohui. The Study of Remote Sensing on Monitoring Ice Velocity of the Polar Record Glacier and the Dalk Glacier[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2001, 13(2): 117-128(孙家炳, 霍东民, 孙朝辉. 极地记录冰川和达尔克冰川流速的遥感监测研究[J]. 极地研究, 2001, 13(2): 117-128)
- [3] 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
- [4] Wang Chao, Zhang Hong, Liu Zhi. Spaceborne SAR Interferometry[M]. Beijing: Science Press, 2002(王超, 张红, 刘智. 星载合成孔径雷达干涉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2002)
- [5] Cheng Xiao, Li Xiaowen, Shao Yun, et al. DInSAR Measurement of Glacier Motion in Antarctic Grove Mountain[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(17): 2 060-2 067(程晓, 李小文, 邵芸, 等. 南极格罗夫山地区冰川运动规律 DInSAR 遥感研究[J]. 科学通报, 2006, 51(17): 2 060-2 067)
- [6] Li Shuanke. On the Glaciation of the Larsemann Hills, East Antarctic[J]. *Antarctic Research (Chinese Edition)*, 1995, 7(4): 7-16(李桂科. 东南极拉斯曼丘陵区的冰川作用[J]. 南极研究(中文版), 1995, 7(4): 7-16)
- [7] 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: 101-111
- [8] 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: 113-123
- [9] Scambos T A, Bohlander J A, Shuman C A, et al. Glacier Acceleration and Thinning After Ice Shelf Collapse in the Larsen B Embayment, Antarctica [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31: 18 402
- [10] Nakamura K, Doi K, Shibuya K. Estimation of Seasonal Changes in the Flow of Shirase Glacier Using JERS-1/SAR Image Correlation[J]. *Polar Science*, 2007, 1(2): 73-83
- [11] Rott H, Rack W, Nagler T, et al. Climatically Induced Retreat and Collapse of Northern Larsen Ice Shelf, Antarctic Peninsula[J]. *Annals of Glaciology*, 1998, 27: 86-92
- [12] Rignot E, Vaughan D G, Schmeltz M, et al. Acceleration of Pine Island and Thwaites Glaciers, West Antarctica[J]. *Annals of Glaciology*, 2002, 34(1): 189-194
- [13] 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: 18 401
- [14] Rignot E. Changes in West Antarctic Ice Stream Dynamics Observed with ALOS PALSAR Data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35: 12 505
- [15] Khazendar A, Rignot E, Larour E. Acceleration

- and Spatial Rheology of Larsen C Ice Shelf, Antarctic Peninsula[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38: 9 502
- [16] 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*, 2007, 112: 1 013
- [17] Pittard M L, Roberts J L, Warner R C, et al. Flow of the Amery Ice Shelf and Its Tributary Glaciers [C]. The 18th Australasian Fluid Mechanics Conference, Australia, 2012
- [18] Zhou Chunxia, Zhou Yu, E Dongchen, et al. Seasonal and Inter-annual Changes Detection in Ice Velocity of Antarctic Inland and Outlet Glaciers[C]. International Symposium on Glaciers and Ice Sheets in a Warming Climate, Alaska, USA, 2012
- [19] International Sea Level Indian Ocean Data[OL]. https://www.bodc.ac.uk/data/online_delivery/international_sea_level/indian_ocean/, 2012
- [20] Wang Qinghua. GPS-derived Horizontal Ice Flow Velocities Along the Traverse Route from Zhongshan Station to Dome-A, East Antarctica[J]. *Chinese Journal of Polar Science*, 2003, 14(1): 35-40
- [21] Manson R, Coleman R, Morgan P, et al. Ice Velocities of the Lambert Glacier from Static GPS Observations[J]. *Earth Planets Space*, 2000, 52: 1 031-1 036
- [22] Zhang Shengkai, E Dongchen, Wang Zemin, et al. Ice Velocity from Static GPS Observations Along the Transect from Zhongshan Station to Dome A, East Antarctica[J]. *Annals of Glaciology*, 2008, 48(1): 113-118
- [23] Michel R, Rignot E. Flow of Glacier Moreno, Argentina, from Repeat-pass Shuttle Imaging Radar Images: Comparison of the Phase Correlation Method with Radar Interferometry[J]. *Journal of Glaciology*, 1999, 45(149): 93-100
- [24] Joughin I. Ice-sheet Velocity Mapping: A Combined Interferometric and Speckle-tracking Approach[J]. *Annals of Glaciology*, 2002, 34(1): 195-201
- [25] Dong Xiaoyan, Ding Xiaoli, Li Zhiwei, et al. A New Chain for SAR Pixel Offset Estimation and Its Application in Co-seismic Deformation Measurement [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(7): 789-792 (董晓燕, 丁晓利, 李志伟, 等. 一种新的 SAR 像素偏移量估计流程及其在同震形变监测中的应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(7): 789-792)
- [26] Bechor N B D, Zebker H A. Measuring Two-dimensional Movements Using a Single InSAR Pair [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33: 16 311

Determination of Ice-flow Velocity at the Polar Record Glacier and Dalk Glacier Using DInSAR

ZHOU Chunxia^{1,2} DENG Fanghui^{1,2} AI Songtao^{1,2} WANG Zemin^{1,2} E Dongchen^{1,2}

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

2 Key Laboratory of Polar Surveying and Mapping, SBSM, Wuhan 430079, China

Abstract: ERS-1/2 tandem SAR images acquired in 1996 were utilized to map the ice-flow velocity of the Polar Record and Dalk Glaciers using DInSAR. The horizontal component was derived from line-of-sight velocity estimates, and compared with the field measurements. The DInSAR results revealed an ice velocity map of the whole area. For the inland areas, the DInSAR results were in good agreement with field measurements. As for the front of the Dalk Glacier, the ice velocity derived from DInSAR was smaller than the field measurements because of the differences between data acquisition times, tidal motion, etc.

Key words: DInSAR; ice-flow velocity; Polar Record Glacier; Dalk Glacier

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

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41076126, 41376187; the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program), No. 2009AA12Z133; the Open Research Foundation of SOA Key Laboratory for Polar Sciences, No. KP201001; the Chinese Polar Environment Comprehensive Investigation & Assessment Programme, No. CHIN-ARE2014-02-04.