

# 利用 Envisat 数据探测中山站至 Dome A 条带区域冰盖高程变化

杨元德<sup>1</sup> 鄂栋臣<sup>1</sup> 王泽民<sup>1</sup> 袁乐先<sup>1</sup>

(1 武汉大学中国南极测绘研究中心,武汉市珞喻路 129 号,430079)

**摘要:**在中山站至 Dome A 条带区域,利用 2002-10~2007-09 的 Envisat RA2 数据,对交叉点分析中的单一法、静态法与动态法进行了比较,结果表明:① 动态参考算法优于其他两种算法;② 反射能量是影响卫星测高确定冰盖高程变化的重要因素;③ 研究区域冰盖高程长期变化整体处于平衡,但其分布不均匀,恩德比地区存在明显正增长,与 ICESat 一致。

**关键词:**Envisat;南极冰盖;交叉点分析;Dome A

**中图分类号:**P228.3

南极冰盖冰储量约占全球冰川的 90%,南极冰盖物质平衡的微小变化都会对全球海平面变化造成巨大影响,而全球人口和工业主要集中在沿海地区,海平面上升会带来严重的环境问题和社会问题。利用卫星测高确定冰盖高程变化已成为定量监测冰盖物质平衡的手段之一<sup>[1-4]</sup>。ERS-1/2、Envisat 至今已对南极冰盖进行了 20 余年观测。中山站至 Dome A 是我国南极重点科学考察区,近年来,有学者利用重复 GPS 观测获得了该区域冰盖的冰流速信息<sup>[5]</sup>。本文利用 Envisat 数据探测了该条带区域的冰盖高程变化。

## 1 数据分析

2002 年发射的 Envisat 测高卫星,搭载了新一代测高仪 RA2 及 DORIS 等科学仪器,重复周期为 35 d。本文采用最新 2.1 版 SGDR 产品 Envisat 数据,该数据对 USO 钟周期改正进行了修正。在实际计算过程中,直接利用数据产品提供的对流层、电离层、固体潮等各项地球物理改正,波形重定算法为 ICE-2;选用的研究区为 60°~80°E,60°~81.5°S;根据 Davis 等数据处理经验,选取时间分辨率为月,2002-10~2007-09 共 60 mon,空间分辨率为 2°×1°。

交叉点分析能减少坡度及天线极化的影响<sup>[6]</sup>,常用于获取冰盖高程时间序列,本文利用其监测冰盖高程变化。交叉点参见文献<sup>[7]</sup>,该点高程变化  $dH$  利用该点升轨道高程  $H_A$  与降轨道高程  $H_D$  求差得到:

$$dH = \begin{cases} H_A(t_A) - H_D(t_D) + B_A - B_D + \Delta H_S(t), & t_A > t_D \\ H_D(t_D) - H_A(t_A) + B_D - B_A + \Delta H_S(t), & t_D > t_A \end{cases} \quad (1)$$

其中, $dH$  表示  $|t_A - t_D|$  时段高程变化; $t_A$  与  $t_D$  表示升轨与降轨时刻; $B_A$  与  $B_D$  表示与方向相关、与时间无关的测高轨道误差; $\Delta H_S(t)$  表示由反射能量变化导致的虚假高程变化。

对于月份  $i$  与  $j$ ,当格网存在多个交叉点时,采用  $2\sigma$  迭代剔除粗差点。高程变化值  $d\bar{H}_{i \times j}$  及对应的标准差  $SD_{i \times j}$  为:

$$d\bar{H}_{i \times j} = \omega_{AD} \cdot d\bar{H}_{AD} + (1 - \omega_{AD}) \cdot d\bar{H}_{DA} \quad (2)$$

$$SD_{i \times j} = \sqrt{\omega_{AD}^2 \cdot SD_{AD}^2 + (1 - \omega_{AD})^2 \cdot SD_{DA}^2} \quad (3)$$

式中, $n_{AD}$ 、 $SD_{AD}$  与  $n_{DA}$ 、 $SD_{DA}$  分别为升降及降升

收稿日期:2013-03-04。

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41106163,41176172);国家海洋局极地科学重点实验室开发研究基金资助项目(KP201102);南北极环境综合考察与评估专项资助项目(CHINARE2012-03-03,CHINARE2012-01-03)。

交叉点的点数及相应的标准差; $\omega_{AD} = n_{AD} / (n_{AD} + n_{DA})$ 。当  $n_{AD}$ 、 $n_{DA}$  较大时,  $B_A$ 、 $B_D$  的影响被消除。

矩阵可表示研究时间段的高程变化  $d\bar{H}$ <sup>[3]</sup>:

$$d\bar{H} = \begin{bmatrix} d\bar{H}_{1 \times 1} & d\bar{H}_{1 \times 2} & \cdots & d\bar{H}_{1 \times N} \\ & d\bar{H}_{2 \times 2} & d\bar{H}_{2 \times 3} & \vdots \\ & & \cdots & \\ & & & \cdots & d\bar{H}_{(N-1) \times N} \\ & & & & d\bar{H}_{N \times N} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中,  $N=60$ 。每行表示以同一参考期得到的高程变化,如 2002-10、2002-11 分别为第一、二行的参考期,依次累加。需要注意的是不同行数据的参考期不同,这也导致了静态和动态算法的提出。

早期通常只利用  $d\bar{H}$  第一行数据(简称为单一法)。利用整个上三角数据  $d\bar{H}$ ,需要将不同行数据  $d\bar{H}$  转换成具有相同参考期高程变化矩阵  $d\bar{H}'$ :

$$d\bar{H}' = \begin{bmatrix} d\bar{H}'_{1 \times 1} & d\bar{H}'_{1 \times 2} & \cdots & d\bar{H}'_{1 \times N} \\ & d\bar{H}'_{2 \times 2} & d\bar{H}'_{2 \times 3} & \vdots \\ & & \cdots & \\ & & & \cdots & d\bar{H}'_{(N-1) \times N} \\ & & & & -d\bar{H}'_{N \times N} \end{bmatrix} \quad (5)$$

原则上,将  $d\bar{H}$  转换成  $d\bar{H}'$ ,可以选取任意时间作为参考期,不同的研究者提出了不同的原则。例如, Freguson and Davis 以第一行对应的时间作为参考期(简称为静态法),本文对应于 2002-10; Li and Davis<sup>[8]</sup> 研究发现,当第一行元素不存在时,静态法使得格网出现空白,由此提出了动态选取参考期(简称为动态法),本文仍以采样点数最多<sup>[8]</sup>为选取标准。格网数据的编辑标准参见文献<sup>[8]</sup>。

## 2 结果分析

### 2.1 不同算法比较

根据交叉点数最多的标准,得到了各格网动态法的参考期。126 个格网中,共出现了 35 个参考期,其中,2006-01 为 13 次,2006-03 次之。结果表明,没有哪个参考期占多数,需选取格网的参考期。

单一法共 124 个格网,格网平均交叉点数为 2 526,平均标准差为 12.9 cm;静态法增加至 126 个格网,平均交叉点数达到 148 230,对应的平均

标准差减小至 5.2 cm;动态法平均交叉点数进一步增加至 163 410,平均标准差减小到 4.7 cm。这表明动态法优于其他两种算法。

### 2.2 反射能量变化与高程变化的关系

研究表明,反射能量变化导致冰盖高程变化<sup>[1-3]</sup>,利用卫星测高需进行反射能量改正。采用高程变化相同的计算过程获得反射能量时间序列,与高程变化分析得到两者的相关系数,结果见图 1(a)。结果表明,除近岸和 Amery 冰架部分数据空白区,大部分区域的相关系数均高于 0.7,内陆甚至超过 0.9。进行梯度 CG 改正,改正后的高程变化时间序列  $dH_{cor(j)}$  为:

$$dH_{cor(j)} = dH_j - d\sigma_j \cdot CG \quad (6)$$

式中,  $d\sigma$  为反射能量。图 1(b)给出了 CG 的空间分布,近岸较小,内陆较大,最大值约  $0.5 \text{ m} \cdot \text{dB}^{-1}$ 。比较图 1(a)与图 1(b),CG 具有与相关系数类似的空间分布,相关系数越大,CG 越大。

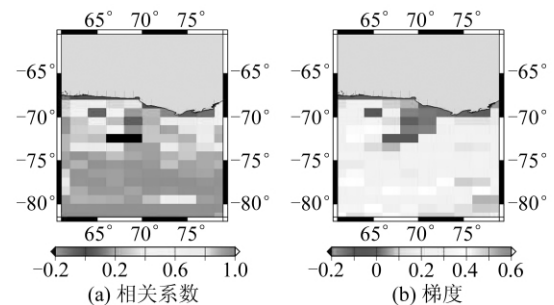


图 1 高程变化与反射能量的空间分布

Fig. 1 Spatial Distribution Between Elevation Change and Backscattered Power Change

### 2.3 高程长期变化项

冰盖高程变化包括长期项与年周期变化,对梯度改正的高程变化时间序列进行长期变化项与年周期变化项拟合,得到长期变化项,见图 2(a)。结果表明,研究区域高程变化主要在  $[-2 \ 2] \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$  之间,处于平衡状态。然而,靠近恩德比地地区的区域 ( $60^\circ \sim 70^\circ \text{E}$ ,  $68^\circ \sim 73^\circ \text{S}$ ) 则出现明显的正增长,最大值约为  $6 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。图 2(b)给出了 2003~2005 年 ICESat 的长期变化项<sup>[9]</sup>,结果表明两者表现出一致的变化趋势,但参考文献<sup>[9]</sup>结果整体高于本文结果,达  $2.3 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ ,但是它没有考虑 ICESat 不同工作期的高程变化趋势  $2.3 \pm 0.9 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[10]</sup>。

## 3 结语

1) 在交叉点数和标准偏差方面,动态参考算法优于单一与静态算法,其中,动态算法的交叉点

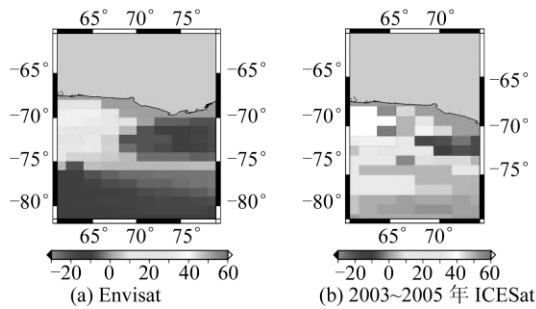


图 2 高程长期变化项的空间分布

Fig. 2 Spatial Distribution of Long-Time Linear Trend

数约为单一算法的 64 倍,对应的标准偏差仅为单一算法的  $1/2.7$ 。

2) 反射能量变化导致高程变化,利用 Envisat 获得冰盖高程的实际变化量必须考虑此因素的影响。

3) 研究区域的高程长期变化项的空间分布不均匀,整体平衡,但靠近恩德比地地区的部分区域增长结果与 ICESat 总体一致,也反映出了算法、观测及时间段的不同。

### 参 考 文 献

- [1] Zwally H J, Brenner A C, Major J A, et al. Growth of Greenland Ice Sheet: Measurement [J]. Science, 1989, 246: 1 587-1 589
- [2] Wingham D J, Shepherd A, Muir A, et al. Mass Balance of the Antarctic Ice Sheet [J]. Phil Trans R Soc A, 2006, 364: 1 627-1 635
- [3] Davis C H, Ferguson A C. Elevation Change of the Antarctic Ice Sheet, 1995-2000, from ERS-2 Satel-

lite Radar Altimetry[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2004(1): 2 437-2 445

- [4] 史红岭, 陆洋, 鲍李峰, 等. 利用 ICESat 交叉点分析探测恩德比地冰盖近年高程变化[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(4): 440-443
- [5] Zhang S E D, Wang Z. Ice Velocity from Static GPS Observations Along the Transect from Zhongshan Station to Dome A, East Antarctica[J]. Annals of Glaciology, 2008, 48: 113-118
- [6] Rémy F, Parouty S. Antarctic Ice Sheet and Radar Altimetry: A Review [J]. Remote Sensing, 2009 (1): 1 212-1 239
- [7] Ferguson A C, Davis C H, Cavanaugh J E. An Autoregressive Model for Analysis of Ice Sheet Elevation Change Time Series [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2004, 42: 2 426-2 436
- [8] Li Yand, Davis C H. Improved Methods for Analysis of Decadal Elevation-Change Time Series over Antarctica [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2006(1): 2 687-2 697
- [9] Yamamoto K, Fukuda Y, Doi K, et al. Interpretation of the GRACE-Derived Mass Trend in Enderby Land, Antarctica[J]. Polar Science, 2008(2): 267-276
- [10] Gunter B C. A Comparison of Coincident GRACE and ICESat Data over Antarctica[J]. J Geodesy, 2009, 83: 1 051-1 060

第一作者简介:杨元德,博士,讲师,从事卫星测高与 GRACE 应用研究。

E-mail:yuande\_yang@yahoo.com.cn

## Elevation Change from Zhongshan Station to Dome A Using Envisat Data

YANG Yuande<sup>1</sup> E Dongchen<sup>1</sup> WANG Zemin<sup>1</sup> YUAN Lexian<sup>1</sup>

(1 Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** Single, fixed and dynamic methods of crossover analysis are compared, and dynamic outperforms the others. The spatial distribution of elevation change from Zhongshan Station to Dome A is estimated during October 2002 to September 2007. Backscattered power is an important factor to derive elevation change. The adjusted height change over the study area is in whole balance but unevenly distributed. The positive increase is shown in Enderby Land, which agrees with ICESat.

**Key words:** Envisat; Antarctica; crossover analysis; Dome A

**About the first author:** YANG Yuande, Ph. D, lecturer, majors in applications of satellite altimetry and GRACE.

E-mail: yuande\_yang@yahoo.com.cn