

# 利用 ICESat 交叉点分析探测 恩德比地冰盖近年高程变化

史红岭<sup>1,2</sup> 陆 洋<sup>1</sup> 鲍李峰<sup>1</sup> 王正亮<sup>3</sup>

(1 中国科学院测量与地球物理研究所,武汉市徐东路 340 号,430077)  
(2 中国科学院研究生院,北京市玉泉路丁 19 号,100049)  
(3 江苏省水文地质工程地质勘察院,淮安市海口路 1 号,223005)

**摘 要:**通过改进卫星激光测高地面轨迹交叉点高差时间序列算法,利用各期 ICESat 观测值的交叉点和不同期间交叉点的高差组成高程变化的时间序列,探测东南极恩德比地地区近年来冰盖表面高程变化趋势,得到恩德比地 2003~2007 年冰盖高程变化趋势为  $4.79\pm0.13$  cm/a。  
**关键词:**卫星激光测高;交叉点分析;恩德比地;冰盖  
**中图法分类号:**P228.42

南极冰盖约占世界陆地冰量的 90%,极地冰雪的微小变化将会显著地改变全球海平面高程,如果南极和格陵兰冰盖全部融化,将使全球海平面上升约 80 m<sup>[1]</sup>。20 世纪海平面上升了 10~20 cm<sup>[2]</sup>,严重地影响了沿海岸地区人类的生存环境和社会经济生活,已引起越来越多的科学家的关注,尤其是南极冰盖高程的变化趋势和变化机理过程,已成为极地环境监测研究中的热点。

过去 20 多年中,卫星测高在极地冰盖监测中得到了广泛的应用。Wingham 利用 ERS1/2 测高数据得到了 1992~1996 年 5 a 的南极内陆冰盖高程平均年变化率为  $0.9\pm0.5$  cm/a<sup>[3]</sup>。Ferguson 利用 ERS/2 交叉点分析得到 1995~2000 年间南极恩德比地附近冰盖高程平均年变化率为  $3.09\pm1.05$  cm/a<sup>[4]</sup>。李建成等利用 ICESat 卫星对南极冰盖高程模型进行了研究<sup>[5]</sup>;鄂栋臣等分析了 ICESat 在南极 Dome A 地区的应用<sup>[6]</sup>;Nguyen 等利用 ICESat 数据分析了东南极地区 2003-02~2004-12 的高程变化<sup>[7]</sup>;Csatho 等利用 ICESat 数据揭示了 Siple 海岸冰流高程变化的复杂类型<sup>[8]</sup>。Chen 等利用 GRACE 数据分析得到南极地区 2002~2005 年 3.5 a 的质量变化趋势<sup>[9]</sup>。

## 1 ICESat 数据

本文主要利用 GLA12 极地冰盖数据产品最新版本 R28 获得极地冰盖表面相对于参考椭球的大地高及其表面特征参数等。其中,冰盖表面高程已通过预先计算的冰盖高程最优算法得到,该算法包括激光点脚印位置、反射率、仪器及大气改正等相关的改正,且考虑了固体潮和海潮的瞬时影响。

2003 年至 2007 年,GLA 12 极地冰盖数据版本、工作期以及起始截止时间如表 1 所示。

表 1 GLA 12 激光工作期、起始日期、结束日期、数据版本  
Tab. 1 GLA12 Versions, Start Date and End Date for Laser Operations Periods

序号	工作期	起始日期	结束日期	数据版本
1	L1A	2003-02-20	2003-03-21	R28
2	L2A	2003-09-25	2003-11-28	R28
3	L2B	2004-02-17	2004-03-21	R28
4	L3A	2004-10-03	2004-11-08	R28
5	L3B	2005-02-17	2005-03-24	R28
6	L3C	2005-05-20	2005-06-23	R28
7	L3D	2005-10-21	2005-11-24	R28
8	L3E	2006-02-22	2006-03-28	R28
9	L3F	2006-05-24	2006-06-26	R28
10	L3G	2006-10-25	2006-11-27	R28
11	L3H	2007-03-12	2007-04-4	R28

收稿日期:2009-01-20。

项目来源:国家自然科学基金资助项目(40704005);国家 863 计划资助项目(2006AA12Z128);中国科学院创新基金资助项目(kzcx2-yw-125)。

## 2 高程变化时间序列

本文选用恩德比地地区 ( $35^{\circ} \sim 65^{\circ}$ ,  $-75^{\circ} \sim -65^{\circ}$ ) GLA12 极地冰盖数据产品从 2003 年 2-3 月份第一个工作期到 2007 年 4 月的第 11 个工作期, 每一个工作期均有覆盖整个恩德比地地区冰盖激光测高数据。

首先对从 NSIDC 获得的 GLA12 数据进行了 9 点 (约 1.5 km) 移动平均平滑, 以消除明显的异常数据, 利用线性内插得到每条地面轨迹交叉点的高程, 进而得到地面轨迹交叉点的高差。为了降低云、地面粗糙度以及前向散射等的影响, 在交叉点线性内插时, 利用了  $3\sigma$  迭代分析进一步消除剩余的异常数据。

冰盖地表点高程变化 ( $dH$ ) 可以通过卫星地面轨迹交叉点在时间间隔  $dt = t_2 - t_1$  升轨迹 ( $H_A$ )、降轨迹 ( $H_D$ ) 的高程之差计算得到。升-降 ( $AD$ ) 和降-升 ( $DA$ ) 高程变化估计值分别为:

$$dH_{AD} = H_A(t_2) - H_D(t_1) + B_A - B_D \quad (1)$$

或者

$$dH_{DA} = H_D(t_2) - H_A(t_1) + B_D - B_A \quad (2)$$

式中,  $t_A$  代表升轨迹的测量时间;  $t_D$  代表降轨迹的测量时间, 当  $t_A > t_D$  时,  $t_A = t_2$ ,  $t_D = t_1$ , 使用式 (1) 计算交叉点高差, 当  $t_A < t_D$  时,  $t_A = t_1$ ,  $t_D = t_2$ , 使用式 (2) 计算交叉点高差, 这时,  $dt$  总是保持大于零。  $B_A$  和  $B_D$  代表卫星测高中升降轨道径向测量误差可能引起的不随时间变化的偏差<sup>[4,11]</sup>。

ICESat 卫星激光测高数据按照工作期分为不同的时间间隔, 在每个工作期内以及与其他的工作期之间求地面轨迹交叉点的高差来构造一个完整的交叉点时间序列数据集, 可用一个上三角矩阵 ( $N \times N$   $dH$ ) 表示得到的所有的交叉点高差集合<sup>[4,11]</sup>, 每一行表示基于不同的参考工作期所得到的交叉点平均高差。

$$\overline{dH} = \begin{bmatrix} \overline{dH}_{1 \times 1} & \overline{dH}_{1 \times 2} & & \overline{dH}_{1 \times N} \\ & \overline{dH}_{2 \times 2} & \overline{dH}_{2 \times 3} & \cdots & \overline{dH}_{2 \times N} \\ & & & & \vdots \\ & & & & \overline{dH}_{N \times N} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$N = 1, 11$

其中,

$$\overline{dH}_{i \times j} = \frac{1}{n_T} [n_{AD} \cdot \overline{dH}_{AD} + n_{DA} \cdot \overline{dH}_{DA}] \quad (4)$$

$i, j = 1, N$

每个矩阵元素  $\overline{dH}_{i \times j}$  表示通过无偏加权平均计算得到的第  $j$  个工作期和第  $i$  个工作期之间的平均

高差。对角线元素表示同一个工作期所得到的交叉点平均高差, 其他元素表示不同的工作期间的平均高差。矩阵中的每个元素相应的标准差 ( $SD$ ) 为:

$$SD_{i \times j} = \frac{1}{n_T} \sqrt{n_{AD} \cdot SD_{AD}^2 + n_{DA} \cdot SD_{DA}^2} \quad (5)$$

式中,  $n_{AD}$  和  $n_{DA}$  分别为  $AD$  和  $DA$  的交叉点个数;  $n_T = n_{AD} + n_{DA}$ ;  $SD_{AD}$  和  $SD_{DA}$  为  $dH_{AD}$  和  $dH_{DA}$  标准差。

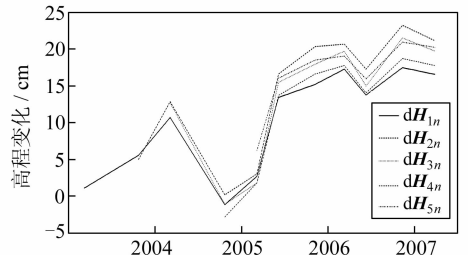


图 1 矩阵 (3) 前五行高程变化时间序列

Fig. 1 Elevation Change Time Series of the ICESat Dataset for the First Five Rows of the  $dH$  Matrix

图 1 给出了式 (3) 前五行的高程变化时间序列, 注意每行的高程变化是相对于不同的初始参考时间工作期, 如第一行的高程变化是相对于第一个参考工作期 2004 年 2 月份 (即 ICESat 的第一个工作期 L1A), 第二行是相对于第二个参考工作期, 也就是 ICESat 的第二个工作期 L2A, 其他行依次类推。从图 1 中可以看到, 式 (3) 中每行的高程变化具有相同的趋势, 因而有可能通过平均来减少相对于一个固定的参考工作期的高程变化中较大的估计误差, 但是简单的平均是不恰当的, 因为矩阵中的每列是相对于不同的参考工作期的高程变化, 为了利用更多的交叉点来减小单独的工作期高程变化估计误差, 可以利用下面的方法进行改进。

对所有的  $j \geq i$ , 将矩阵第一行的元素 (基准行) 从  $j=2$  到  $N$  加到第  $i=j$  行所有的矩阵元素, 组成一个新的矩阵:

$$\overline{dH}'_{i \times j} = \overline{dH}_{i \times j} + \overline{dH}_{1 \times i}, i > 1; j = i, N \quad (6)$$

$j$  的取值不同于 Ferguson 所给出的相应公式<sup>[4]</sup>, Ferguson 采用的方法是把  $\overline{dH}_{i \times j}$  加到第  $i=j$  行除了对角线之外的元素, 即在式 (6) 中  $j = i+1, N$ , 这样第二行起对角线所有的  $\overline{dH}'_{i \times j}$  并未归化到相同的初始参考工作期。Ferguson 在后面的列加权平均时分配给对角元素很小的权重, 对最终的列加权平均值影响很小, 无形中减少了参与加权平均的交叉点个数。在所得到的新的矩阵中列元素尚有对角元素不是相对于初始参考工作期, 此

时的加权平均理论上不是很严谨,用改进的式(6),这样可以保证矩阵(3)中所有的元素相对于同一个初始的参考周期(也就是第一个工作期 L1A)的高差值,相应的标准差为:

$$SD'_{ixj} = \sqrt{SD^2_{ixi} + SD^2_{ixj}}, i > 1; j = 1, N (7)$$

对于基准行,SD 和式(5)不变,为了保持符号的一致性,SD'\_{ixj} 将用来表示修正后的矩阵所有元素的标准差。现在式(6)的每一个元素都基于相同的初始参考时间,那么通过平均每列数据就可以得到每个工作期高程变化均值。在式(4)中,通过无偏加权平均得到  $\overline{dH}$ ,权重与每个矩阵元素的样本量成比例,当 dH 都基于相同的参考时间期间时,交叉点的点数将利用式(8)得到修正:

$$n'_{ixj} = n_{ixi} + n_{ixj}, i > 1; j = i, N (8)$$

Ferguson 文中将式(7)和式(8)右边的第一项下标误写为  $1 \times j^{[10]}$ 。则  $\overline{dH}$  中每列交叉点的点数总和为:

$$n_j = \sum_{i=1}^j n'_{ixj}, j = 1, N (9)$$

通过加权平均可以得到高差变化的时间序列:

$$dH_j = \sum_{i=1}^j (\omega_{ixj} \cdot \overline{dH'}_{ixj}), j = 1, N (10)$$

$$\omega_{ixj} = n'_{ixj} / n_j$$

相应每列均值的标准差为:

$$SD_j = \sqrt{\sum_{i=1}^j (\omega_{ixj} \cdot SD'_{ixj})^2}, j = 1, N (11)$$

在式(10)中所得到的最终结果是一个改善的、利用所有的交叉点的 N 点 dH 时间序列,传统的方法从测高数据得到冰盖高程变化时间序列一般是仅仅基于单个参考时间进行分析<sup>[3]</sup>,即仅仅利用了 dH 式(3)中交叉点数据的某一行,仅利用了所获得交叉点一小部分。在式(6)中的每一行都以一个共同的时间期间为参考时间,便可以利用所有的交叉点得到加权的列均值。这种方法增加了在形成时间序列时高程变化估计的点数,并对大部分单个 dH 估计大大地降低了误差估计。

3 结果和讨论

图 2 给出了利用传统方法和改善方法在恩德比地地区所得到的 ICESat 的 11 个工作期间的冰盖高程变化时间序列对比。图 2(a)中冰盖高程变化趋势为  $3.97 \pm 0.21$  cm/a(虚线所示),11 个工作期的误差均值为  $\pm 0.88$  cm。图 2(b)中冰盖高程变化趋势为  $4.79 \pm 0.13$  cm/a(虚线所示),

11 个工作期的误差均值为  $\pm 0.54$  cm,是图 2(a)的 0.6 倍。图中高程变化时间序列点上的误差为  $\pm 1$  倍标准差。图 2(a)为仅仅利用了 6 983 个交叉点的传统方法得到的高程变化时间序列,由于可利用的交叉点个数较少,季节性和年际周期信号相对于参考工作期会产生较大的估计误差,从图 2(a)可以看到高程变化时间序列点的标准差相对较大。图 2(b)为改进的交叉点高程变化时间序列,它利用了所有的 97 961 个交叉点,为传统方法点数的 14 倍之多,从图上可以看到多数误差降低了一半,并且长期趋势的误差比传统方法小了近一半。

从图 2 可以看到前两个工作期的高程变化误差较大,是由于 ICESat 升空后的前两个工作期为校定期间,卫星处于不断调整和修订运行状态,测量结果误差相对较大。2004 年恩德比地地区出现明显的消融,2005 年后冰盖高程又有剧烈的增长趋势,2004~2005 年恩德比地冰盖高程变化的剧烈现象是否与厄尔尼诺现象有关,有待进一步的研究。2006 和 2007 年上半年又有微弱的消融,但是从 2003 年 2 月份到 2007 年 4 月份 4 a 多期间恩德比地冰盖表面高程具有整体增长趋势,冰盖表面高程平均变化率为  $4.79 \pm 0.13$  cm/a,在此期间恩德比地地区冰盖质量有所增加。

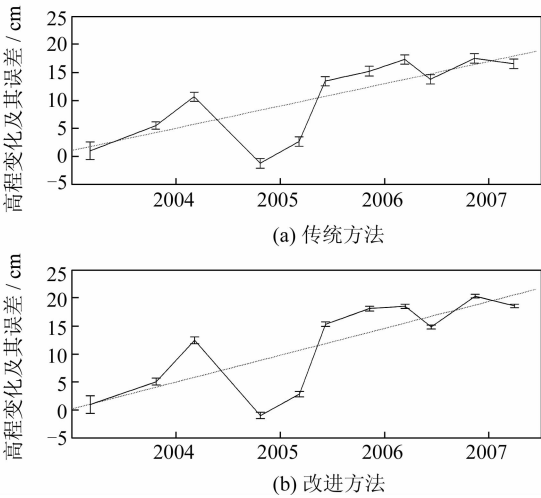


图 2 2003~2007 年相对于第一个工作期(L1A)的高程变化时间序列比较图  
Fig. 2 Referenced to the First Laser Operation Period (L1A) from 2003 to 2007

通过改进激光测高地面轨迹交叉点高差时间序列来探测恩德比地地区冰盖高程变化趋势的方法,基于目前 ICESat 运行状态,该方法利用它的 11 个激光工作期测高数据的所有的交叉点高差

时间序列数据集,得到了恩德比地地区 2003~2007 年冰盖高程平均变化率为  $4.79 \pm 0.13 \text{ cm/a}$ 。若是同时结合其他数据的辅助,如降雪、冰后回弹的影响以及时间序列算法的改进,将会进一步提高 ICESat 激光测高探测冰盖高程变化的精度,为监测极地冰盖质量变化提供一个有利的研究手段。

致谢:感谢美国 NASA ICESat 科学项目和美国冰雪数据中心分发的 ICESat 数据产品。

参 考 文 献

[1] Zwally H J, Schutz B, Abdalat W, et al. ICESat's Laser Measurements of Polar Ice, Atmosphere, Ocean, and Land[J]. Journal of Geodynamics, 2002, 34: 405-445

[2] Douglas B C. Global Sea Level Change: Determination and Interpretation[J]. Rev Geophys, 1995, 33 (Suppl): 1 425-1 432

[3] Wingham D J, Ridout A J, Scharroo R, et al. Antarctic Elevation Change from 1992 to 1996[J]. Science, 1998, 282(16): 456-458

[4] Ferguson A C. An Autogressive Model for Analysis of Ice Sheet Elevation Change Time Series [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2004, 42(10): 581-593

[5] 李建成, 范春波, 褚永海, 等. ICESAT 卫星确定南极冰盖高程模型研究[J]. 武汉大学学报·信息科

学版, 2008, 33(3): 226-228

[6] 鄂栋臣, 徐莹, 张小红. ICESat 卫星及其在南极 Dome A 地区的应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(12): 1 139-1 142

[7] Nguyen A T, Herring T A. Analysis of ICESat Data Using Kalman Filter and Kriging to Study Height Changes in East Antarctica [J]. GRL, 2005, 32 (L23S03): 23-32

[8] Csatho B, Ahn Y, Yoon T, et al. ICESat Measurements Reveal Complex Pattern of Elevation Changes on Siple Coast ice Streams [J]. Antarctica GRL, 2005, 32(L23S04): 629-632

[9] Chen J L, Wilson C R, Blankenship D D, et al. Antarctic Mass Rates from GRACE [J]. GRL, 2006, 33(L11502): 760-763

[10] Jester P L, Lee J. GLAS Standard Data Product Specification-Level 2. Version 5. 0, ICESat (GLAS) Science Processing Software Document Series [R]. Schutz BE Spaceborne Laster Altimetry, 2001

[11] Davis C H, Segura D M. An Algorithm for Time-series Analysis of Ice Sheet Surface Elevations from Satellite Altimetry [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2001, 39: 202-206

第一作者简介: 史红岭, 博士生, 现从事激光卫星测高数据处理及极地冰盖质量平衡等方面研究。  
E-mail: hlshi2006@gmail.com

Recent Elevation Change Detection of Enderby Land Ice Sheet Using ICESat Crossover Analysis

SHI Hongling<sup>1,2</sup> LU Yang<sup>1</sup> BAO Lifeng<sup>1</sup> WANG Zhengliang<sup>3</sup>

(1 Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Science, 340 Xudong Road, Wuhan 430077, China)

(2 Graduate School of the Chinese Academy of Science, D 19 Yuquan Road, Beijing 100049, China)

(3 Jiangsu Province Institute of Hydrogeological and Engineering Geological Investigation, 1 Haikou Road, Huaian 223005, China)

**Abstract:** In this paper, several techniques were used to improve the arithmetic of satellite laser altimetry ground track crossover elevation change time series, and to construct the elevation change time series using the satellite laser altimeter crossover elevation difference in the single and different laser operation periods of ICESat to detection the trend of ice sheet elevation change in the Enderby Land region of the east Antarctica, the elevation change rate we got is  $4.79 \pm 0.13 \text{ cm per year}$  from 2003 to 2007 in this region.

**Key words:** satellite laser altimetry; crossover analysis; Enderby land; ice sheet

About the first author: SHI Hongling, Ph.D candidate, majors in satellite laser altimetry data processing and the polar ice sheet mass balance.  
E-mail: hlshi2006@gmail.com