

利用 GLAS 激光测高仪计算格陵兰冰盖高程变化

马 跃¹, 阳凡林¹, 王明伟¹, 李 松², 翁寅侃²

(1. 山东科技大学 测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590;
2. 武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430079)

摘 要: 星载激光测高系统亚毫弧量级的发散角和冰层表面几乎没有穿透效应的优势使其非常适于监测南北极冰盖变化。利用 GLAS 激光测高卫星的高程数据, 通过交叉和重复点方法分析 2003~2009 年 3 月格陵兰 2 000 m 以上区域冰盖高程变化, 并改进了交叉点计算方法, 使其适合纬度跨度较大的格陵兰地区。经过粗差剔除和时序解算, 研究结果表明, 该区域 7 年间冰盖高程年均变化+3.80 cm/年, 中误差 0.91 cm, 呈缓慢增长趋势; 交叉点和重复点方法所得结果趋势一致, 重复点数量为交叉点数量的 4~15 倍, 但位置分布不均匀, 使用星载激光测高数据分析极地冰盖变化时, 较大区域适合使用交叉点方法, 较小区域适合使用重复点方法。

关键词: 激光遥感; 激光测高; 格陵兰冰盖; 高程变化

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)12-3565-05

Calculation of elevation changing of Greenland's ice sheet using GLAS laser altimeter

Ma Yue¹, Yang Fanlin¹, Wang Mingwei¹, Li Song², Weng Yinkan²

(1. College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;
2. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: The spaceborne laser altimeter has the advantages of divergence angle of milli arc magnitude and no penetration effect on ice surface, which are suitable for monitoring the icesheet changing of polar region. Using elevation data of GLAS laser altimeter, the ice sheet changing of the region above 2 000 m of Greenland was obtained and analyzed through the crossing and repeat pairs over the time span of March 2003 to March 2009. The novel method was developed and applied to calculate crossing pairs in the entire Greenland where the latitudinal span was very large. After coarse error elimination and time series analysis, a positive elevation change rate of 3.80 cm/year, and a standard deviation of 0.91 cm were obtained, and change trends from the crossing and repeat pairs were agreed. The number of repeat pairs was much larger than that of cross pairs, approximately 4-15 times, while its spatial distribution was very non-uniform. The conclusion is that on elevation change monitoring in Greenland's ice sheet,

收稿日期: 2015-04-17; 修订日期: 2015-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(41376108, 41506210); 国家科技支撑计划(2012BAB16B01); 测绘公益性行业科研专项经费资助(201512034); 海洋公益性行业科研专项经费资助(201305034); 中国博士后科学基金面上资助(2015M572064); 山东省高等学校科技计划(J13LH04); 卫星测绘技术与应用国家测绘地理信息局重点实验室经费资助(KLAMTA201408); 青岛市博士后研究人员应用研究项目

作者简介: 马跃(1986-), 男, 讲师, 博士, 主要从事激光遥感和光电检测方面的研究。Email: mayue19860103@163.com

the crossing pairs is more fit for large zone, while the repeat ones suitable for small area.

Key words: laser remote sensing; laser altimeter; Greenland's ice sheet; elevation changing

0 引言

星载激光测高系统通过接收卫星平台激光器发出的激光脉冲经地表反射的微弱回波,并精确计算激光脉冲在卫星和地面之间的渡越时间,得到卫星和地表的距离;结合卫星精密轨道和姿态数据,生成激光脚点精确地理位置和高程结果。ICESat 卫星搭载的 GLAS 系统于 2003 年发射升空,在轨运行 7 年,是目前为止唯一一颗用于全球地表观测的星载激光测高系统^[1-3]。其激光发散角在亚毫弧量级,水平分辨率高于微波雷达方式;位于大气透过窗口的 1 064 nm 波长激光可以直接被冰盖和海洋表面反射,几乎没有穿透效应,设计高程精度 15 cm^[4]。这些优点使其有利于监测南北极冰盖变化、极区附近海冰变化和植被年际变化^[5-6]。

覆盖北极格陵兰岛的冰盖是北半球最大冰体,约占陆地冰量 10%,其冰盖南北长 2 530 km,最宽(北缘附近)1 094 km,如果完全融化,将使得海平面上升约 7 m。格陵兰岛冰盖规模虽然小于南极大陆,但却更加脆弱。国外已有学者使用 GLAS 测高数据监测格陵兰冰盖变化,Howat 和 Bolch 对格陵兰沿岸地区冰盖变化进行了估算,Slobe 对格陵兰全岛 2007 年之前冰盖高程变化进行了估算^[7-9],估算结果显示格陵兰靠近海边区域存在明显的消融,而内陆区域存在少量的增长;国内史红岭、沈强等使用 GLAS 数据主要用于监测南极区域,对北极格陵兰内陆冰盖研究较少^[10-11]。

在这些研究基础上,文中使用 GLAS 系统 2003~2009 年 3 月高程数据对格陵兰海拔 2 000 m 以上区域进行冰盖高程变化监测,提出了适用于格陵兰纬度跨度较大时改进的交叉点计算方法,结合 GLAS 交叉和重复脚点结果分析了 7 年间的冰盖高程变化,并分析比较了交叉和重复点监测方法的优缺点。

1 ICESat 交叉和重复点计算方法

GLAS 系统冰盖高程 GLA12 数据包持续时间为

1 天,通常包含 14 个子轨道,在使用数据时,需要利用每个轨道对应的编号和各个轨道对应的起止时间,将子轨道分离。ICESat 卫星在轨运行 7 年间,3 月是唯一一个每年都有超过 20 天测量记录的月份,分别为 2003 1A 29 天,2004 2B 21 天,2005 3B 24 天,2006 3E 27 天,2007 3H 20 天,2008 3J 21 天,2009 2E 23 天。

交叉点通过升降轨轨迹线二次多项式拟合解方程组得出粗略位置,再经过迭代计算解出精确位置的方法。然而由于格陵兰纬度跨度较大[60N,85N],如果对整条轨迹进行二次多项式拟合,由于高纬地区(纬度大于 80°)其同等距离经度变化极其剧烈,导致拟合曲线可能在高纬区域产生弯转,如图 1 所示,使得多项式方程组无解,漏掉交叉点。因此,对跨越格陵兰轨迹线采用分两次拟合的改进方法,第一次和原方法相同;如果拟合后两个曲线方程没有解,则对轨迹线首末测量点纬度进行判断,对有高于 80° 以上的轨迹线,去除其纬度小于 77° 以下的所有测量点,重新进行拟合求解。图 1 中实线是 ICESat 星下点轨迹线,虚线是原方法拟合曲线,点线是改进方法拟合曲线,通过改进的两次拟合方法准确确定粗略交叉位置,而原方法则漏掉该交叉点。最后得出的精确交叉位置使用平面线性内插、高程 3 次 B 样条内插方法计算交叉点高程差。

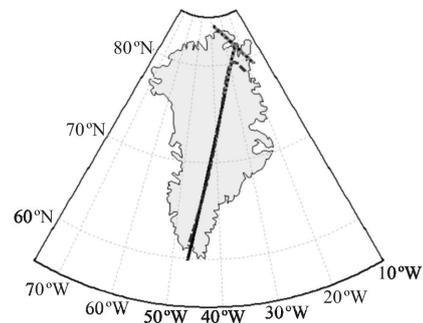


图 1 改进的确定交叉点位置方法示意图

Fig.1 Improved method for calculating crossing pairs

ICESat 卫星运行于 8 天或 91 天周期的严格重复轨道,其分别为器件标定轨道和正常测量轨道,所用 7 段数据中仅 03 年 1A 时段为 8 天轨道,其余都是

91 天轨道。然而星下点轨迹由于地球重力场的非球形对称、大气阻力、日月引力作用及太阳光压等诸多因素影响而不能形成精确重叠。ICESat 脚点光斑直径约 70 m,文中采用基于 Bessel 方法反算大地线长,两次重轨中激光脚点距离小于 65 m 视为重复点。

2 数据筛选和粗差剔除

对 GLA12 高程数据进行筛选以减小器件误差影响,其中包括 $i_AttFlg1$ 激光指向质量, $i_sigmaatt$ 卫星姿态质量, $i_satCorrFlg$ 饱和改正质量, $i_ElvuseFlg$ 高程结果质量等标识数据,以上标识为警告或者被区分为坏的数据都予以剔除。

在交叉点内插计算高程变化时,如果测量脚点不连续,将导致用于计算交叉点的内插候选点间距过远,不能真实反映交叉位置内插高程,这种交叉点予以剔除。此时得到的交叉点高程差仍存在较明显粗差,原因包括云层和气溶胶的前向散射或者反射地表斜率、粗糙度影响,采用 3-sigma 原则进一步消除粗差数据,如公式(1)所示, σ 为高程差的标准差,下标 AD 和 DA 分别表示 i 年升轨轨迹与 j 年降轨迹交叉点和 i 年降轨轨迹与 j 年升轨迹交叉点, n 表示交叉点数量。

$$\sigma = \sqrt{\frac{n_{AD}\sigma_{AD}^2 + n_{DA}\sigma_{DA}^2}{n_{AD} + n_{DA}}} \quad (1)$$

重复点高程差也通过 3-sigma 原则进行粗差剔除。最后,由于整个格陵兰 2 000 m 海拔以上区域并不平坦,从 2 000 m 直至 3 500 m,相比于南极的 Dome A 和 Vostok 湖地区较为崎岖。为了防止所得 σ 较大,无法剔除超过 1 m 以上高程差的交叉和重复点,直接剔除高程差超过 1 m 以上的点。

3 交叉点结果分析

对剔除粗差后剩余 30 000 多对各个年份 3 月份交叉点高程差数据计算均值,得出表示平均高程变化集合的上三角矩阵,如表 1 所示,表中每一行基于不同初始参考年份所得结果,对角线数值表示同一年 3 月份升降轨之间自相关的高程变化。除 2003 年之外,其余年份自相关数值都在 ± 1 cm 以内,由于 2003 年 3 月 ICESat 处于 8 天为周期的标定轨道,其交叉点集中在几个小区域,空间分布非常不均匀,导致结果较差。

表 1 2003~2009 年 3 月格陵兰 2 000 m 以上冰盖交点平均高程变化

Tab.1 Average elevation changes of Greenland from 2003 to March 2009 with crossing pairs

Change/cm	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
2003	7.17	19.70	8.48	32.71	31.25	29.88	34.41
2004	-	0.96	-11.52	13.42	12.42	8.55	12.80
2005	-	-	0.68	26.22	23.67	23.05	25.84
2006	-	-	-	0.30	-1.08	-3.20	1.27
2007	-	-	-	-	-0.96	-1.91	1.26
2008	-	-	-	-	-	-0.69	2.82
2009	-	-	-	-	-	-	-0.04

图 2 显示了将第一行基于 2003 年起始参考年的平均高程变化加到其余各行方法得出的累积高程变化,即将第 1 行第 i 列直接加到第 i 行除对角线外所有列;得到从 2003 年起的累积冰盖高程变化。

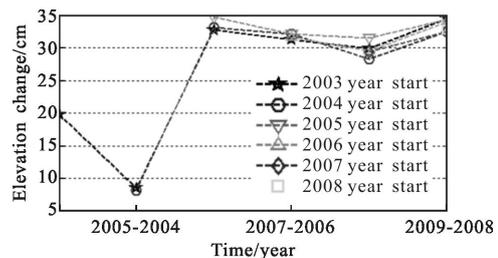


图 2 2003 年 3 月起算的冰盖累积高程变化

Fig.2 Cumulative elevation changes of Greenland's ice sheet since March 2003

然而,上述方法缺点在于忽略了除第一行即初始参考年 2003 年之外各行数据的相关性;因此,对表 1 中结果进行进一步优化,采用除对角线外(即只使用不同年份间高程变化数值)相邻两列数据由后列减去前列的方法,如果前列没有数值则直接使用当前数值。这种方法可以极大提高表 1 中冰盖 7 年间平均变化结果的使用率和相邻年份变化与累积变化的准确性。表 2 中重新计算的相邻年份高程变化具有非常好的一致性,表中最后 4 行分别展示了基于此种方法的相邻年份平均高程变化、相邻年份标准差、累积高程变化和整体标准差;其中累积高程变化通过前行向后行累加,整体标准差通过相邻年份标准差的加权平均计算得出。

图 3 根据表 2 中结果绘制了累积高程变化曲线,并使用一次多项式对 7 年间累积变化进行拟合,得到高程变化趋势为 +3.80 cm/year,标准差均值为 0.91cm,这与 Slobbe 得出的 2003~2007 年间冰盖高

程整体增长趋势结论一致。

通过表 2 和图 3 变化趋势可以看出, 该地区冰盖在 2004~2003 年和 2006~2005 年间呈快速增长趋势, 2005~2004 年间则有迅速减少, 其余年间变化较为缓和。

表 2 2003~2009 年 3 月格陵兰 2 000 m 以上冰盖相邻和累积高程变化

Tab.2 Adjacent and cumulative elevation changes of Greenland's ice sheet from 2003 to March 2009

Initial reference year	Elevation change/cm					
	2004-2003	2005-2004	2006-2005	2007-2006	2008-2007	2009-2008
Mar. 2003	19.70	-11.22	24.23	-1.46	-4.05	4.53
Mar. 2004	-	-11.52	24.94	-1.00	-1.37	4.25
Mar. 2005	-	-	26.22	-2.55	-3.87	2.79
Mar. 2006	-	-	-	-1.08	-0.62	4.47
Mar. 2007	-	-	-	-	-1.91	3.17
Mar. 2008	-	-	-	-	-	2.82
Mean of adjacent year	19.70	-11.37	25.13	-1.53	-1.98	3.67
Std of adjacent year	-	0.21	1.01	0.71	1.21	0.83
Cumulative elevation change	19.70	8.33	33.46	31.93	29.95	33.62

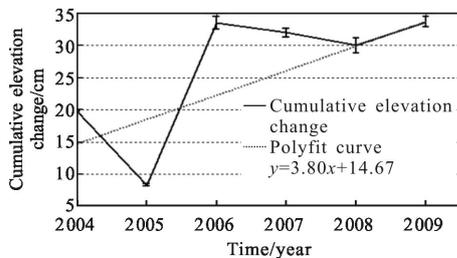


图 3 修正拟合后格陵兰冰盖累积高程变化

Fig.3 Corrected and fitted elevation changes of Greenland's ice sheet

图 4 中显示的部分年份交叉和重复点结果进一步表明, 格陵兰西部 2 000 m 以上冰盖高程呈减小趋势, 而中东部则呈增加趋势, 这两块小区域的不同变化趋势导致了整体标准差接近 1 cm。

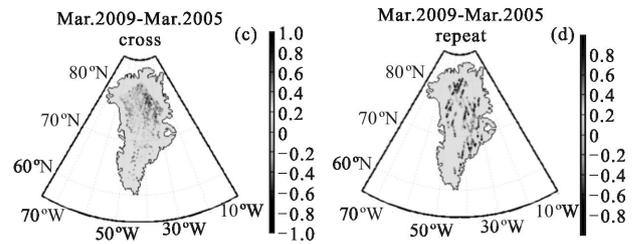
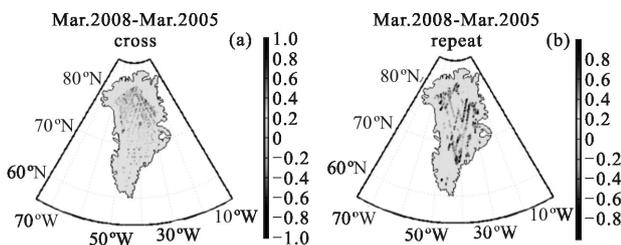


图 4 交叉和重复点高程差对比

Fig.4 Comparison of crossing and repeat pairs for elevation changes

4 重复点结果分析

图 4 中交叉和重复点所得不同小区域高程变化趋势相同, 然而重复点覆盖密度差别非常明显, 部分区域没有结果, 部分区域集中大量结果, ICESat 卫星在格陵兰北部地区轨迹间隔约 10 km, 南部则达约 30 km。表 3 展示了其中 2005~2009 年交叉和重复点数量以及平均高程变化对比, 结果显示交叉和重复点计算的变化趋势一致, 重复点数量远多于交叉点(约 4~15 倍)。虽然重复点结果更多, 但其分布的不均匀导致高程变化标准差远大于交叉点结果, 这与导致交叉点 2003 年自相关结果较差原因相同。

表 3 2005~2009 年间冰盖交叉和重复点高程变化对比

Tab.3 Number and changing trend comparison of crossing and repeat pairs in 2005-2009

Adjacent years	2006-2005	2007-2006	2008-2007	2009-2008
Cross track pairs				
Pairs num.	4 492	3 916	5 521	6 492
Elev change/cm	25.13	-1.53	-1.98	3.67
Repeat track pairs				
Pairs num.	65 194	26 107	37 774	26 449
Elev change/cm	20.48	-5.64	-4.05	8.62

5 结论

利用 ICESat 高程数据通过交叉点和重复点的方法分析了 2003~2009 年 3 月格陵兰 2 000 m 以上地区高程变化, 并改进了交叉点计算方法和数据结果分析方法; 分析结果表明, 冰盖高程年均增长 3.80 cm,

中误差 0.91 cm,交叉点和重复点方法所得高程变化趋势一致,重复点数量远大于交叉点,约 4~15 倍,但其所得高程变化标准差较大;使用 ICESat 卫星数据分析格陵兰地区冰盖时,直径数百千米的较大区域适合使用交叉点方法,直径几千米的较小区域适合使用重复点方法。

参考文献:

- [1] Chen Shuhang, Li Zile, Chen Mengzhu, et al. Influence of atmospheric multiple scattering effects on the range bias for satellite laser altimeter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2522–2526. (in Chinese)
陈舒航, 李子乐, 陈梦竹, 等. 大气多次散射效应对星载激光测高仪测距偏差值的影响 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(9): 2522–2526.
- [2] Shuman C A, Zwally H J, Schutz B E. ICESat antarctic elevation data: preliminary precision and accuracy assessment [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33: L07501.
- [3] Ma Yue, Li Song, Zhou Hui, et al. Noise suppression method for received waveform of satellite laser altimeter based on adaptive filter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3263–3268. (in Chinese)
马跃, 李松, 周辉, 等. 基于自适应滤波星载激光测高仪回波噪声抑制方法 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(12): 3263–3268.
- [4] Schutz B E. Overview of ICESat mission [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32: L21S01.
- [5] Hilbert C, Schmullius C. Influence of surface topography on ICESat/GLAS forest height estimation and waveform shape [J]. *Remote Sensing*, 2012, 4(8): 2210–2235.
- [6] Zwally H J, Giovinetto M B, Jun L, et al. Mass changes of the Greenland and antarctic ice sheets and shelves and contributions to sea-level rise: 1992–2002 [J]. *Journal of Glaciology*, 2005, 51(175): 509–527.
- [7] Slobbe D C, Lindenbergh R C, Ditmar P. Estimation of volume change rates of greenland's ice sheet from ICESat data using overlapping footprints [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(7): 4204–4213.
- [8] Howat I M, Smith B E, Joughin I, et al. Rates of southeast greenland ice volume loss from combined ICESat and ASTER observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35: L17505.
- [9] Bloch T, Sorensen L S, Simonsen S B, et al. Mass loss of greenland's glaciers and ice caps 2003–2008 revealed from ICESat laser altimetry data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40: 875–881.
- [10] Shi Hongling, Lu Yang, Du Zongliang, et al. Mass change detection in antarctic ice sheet using ICESat block analysis techniques from 2003 –2008 [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(4): 958–965. (in Chinese)
史红岭, 陆洋, 杜宗亮, 等. 基于 ICESat 块域分析法探测 2003~2008 年南极冰盖质量变化[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(4): 958–965.
- [11] Shen Qiang, Chen Gang, E Dongchen, et al. Recent elevation changes on the lambert-amery system east antarctica from ICESat crossover analysis [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(8): 1983–1989. (in Chinese)
沈强, 陈刚, 鄂栋臣, 等. 基于 ICESat 轨道交叉点分析的东南极 Lambert-Amery 系统当前高程变化特征分析[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(8): 1983–1989.