

基于激光测高卫星的东南极表面高变化分析

刘俊^{1,2}, 谢欢^{1,2}, Scaioni Marco^{1,2}, 童小华^{1,2}

(1. 同济大学空间信息科学与可持续发展应用中心, 上海 200092; 2. 同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092)

摘要: 利用美国国家冰雪数据中心(NSIDC)最新发布的ICESat(云和地面高度卫星)R633版本的GLA12激光测高数据,使用重复轨最小二乘平面拟合的方法,计算得到东南极兰伯特冰川流域(Lambert)2003年~2009年的高程变化率。使用高度计重复观测数据确定表面高变化的时候,要考虑地形坡度的影响。假定在沿ICESat重复轨道小段范围内,可以用平面来拟合坡度和高程变化,并依此来计算高程变化。结果表明,Lambert冰川流域2003年~2009年平均高程变化率为 $(1 \pm 0.5) \text{ cm} \cdot \text{yr}^{-1}$ 。与已有研究成果以及交叉点获取的高程变化比较,提出的重复轨平面拟合方法有效可行。

关键词: 激光测高卫星(ICESat); 重复轨; 兰伯特冰川流域; 平面拟合

中图分类号: P228.3; P343.6

文献标志码: A

Elevation Changes of East Antarctica Derived from ICESat Laser Altimetry

LIU Jun^{1,2}, XIE Huan^{1,2}, Scaioni Marco^{1,2}, TONG Xiaohua^{1,2}

(1. Center for Spatial Information Science and Sustainable Development, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A least-squares plane fitting of repeat-tracks method was proposed to estimate the elevation changes of the Lambert Glacier Basin, East Antarctica. Using the latest ICESat (ice, cloud, and land elevation satellite) R633 version GLA12 altimetry products released by the National Snow and Ice Data Center (NSIDC), the elevation changes from 2003 to 2009 were estimated. The terrain slope should be considered when using altimeter repeat observation data determine surface elevation change. We assume that least-squares plane fitting along track can separate both the slope of plane and elevation change rate, and consequently the elevation changes can be calculated. The results show that the average elevation

rate of Lambert glacier basin is $(1 \pm 0.5) \text{ cm} \cdot \text{yr}^{-1}$ from 2003 to 2009, which is consistent with previous research results. The crossover point method was also used to verify the results, which proved that the repeat-tracks plane fitting is an effective and feasible method.

Key words: ice, cloud, and land elevation satellite(ICESat); repeat-tracks; Lambert Glacier Basin; plane fitting method

南极冰盖是气候变化的重要指标,冰盖融化对海平面上升具有重大影响,威胁着人类在沿海附近的生活。为预防灾害的发生需要准确了解南极冰盖对海平面影响,然而目前南极冰盖对海平面影响的估算存在较大不确定性。目前国内外学者通常结合卫星遥感观测数据和实地考察数据,研究南极表面物质变化迁移、海洋冰川和陆地冰川变化,其中陆地冰川的变化是气候引起的海平面变化的直接反映。

自1970年以来,卫星高度计就被用于估算南北两极的高程变化。然而,早期的雷达测高卫星地面光斑直径仅达千米级,很难精确测量冰盖和冰帽。2003年发射的冰、云和陆地高程卫星(ICESat)卫星激光高度计,能提供的高精度高程数据集,可以融合已有的地图、数字高程模型(DEM)和机载测高数据,以延长监测时间序列,并提高空间分辨率。继ICESat之后,欧洲太空局于2010年4月发射了CryoSat-2卫星,其搭载的新型干涉雷达高度计对冰盖边缘的监测更为精确^[1]。

关于监测南极表面高程变化的方法中,基于高度计的轨道交叉点和激光脚点重叠点方法目前被认为是精度较高的方法。ICESat的轨道间距随着纬度增高而减小,赤道处较大约为15 km,在80°S约为2.5 km,能够获取的交叉点和重叠点数量随着纬度的升高而增加,所以重叠点法在高纬度地区更为有

收稿日期: 2014-01-05

基金项目: 国家自然科学基金(41201426); 国家重大科学研究计划(2012CB957701); 国家“八六三”高科技研究发展计划(2012AA12A305); 上海市晨光计划(11CG21); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20110072120066)

第一作者: 刘俊(1982—),女,博士生,主要研究方向为极地遥感和卫星测高数据处理方法。E-mail: 10junliurs@tongji.edu.cn

通讯作者: 谢欢(1983—),女,副教授,工学博士,主要研究方向为极地遥感和高光谱遥感处理方法。E-mail: huanxie@tongji.edu.cn

效,而冰流失往往发生在南极低纬度沿海区域,因此重叠点法可能无法探测获取冰雪消融的信号^[2].为了提高数据的利用率,很多学者使用重复轨方法进行分析,如 Yi 等^[3]使用重复轨法测量格陵兰岛表面坡度,谢欢等^[4]使用基于 DEM 坡度改正的重复轨法分析东南极 Amery 冰架附近区域的表面高程变化,Fricker 等^[5]用其判断冰下湖,Howat 等^[6]则用此方法估算冰盖体积变化.由于重复轨道数据包含高程变化和地形信息,一般需要引入地形数据(DEM 等)进行坡度改正,这会引入额外的误差.因此目前还有研究尝试仅利用 ICESat 数据将高程变化从地形特征中分离出来,如 Fricker 等^[7]用重复轨数据定义冰架接地区域,计算了相对于平均参考轨道的高程异常,Pritchard 等^[8]用重复轨法确定南北极冰盖高程变化速率,将高程点和 2 年时间内获取的 3 次观测值组成的三角形相比较.

本文使用重复轨道分段最小二乘拟合方法得到表面高程变化以及相应的地形特征,估算 2003 年~2009 年东南极 Lambert 冰川流域变化.一系列重复轨迹包含将当地地形和观察时期内的高程变化混合在一起的高程信号,其可以分割成许多规则平面,每个面可以用最小二乘来回归拟合^[6].结果与交叉点方法基本一致,并与已发表成果结论相近.

1 研究区域与数据

研究区域为东南极 Lambert 冰川流域,如图 1 所示,右上角插图为本研究区域在南极所处的位置.Lambert 冰川流域是南极洲最大冰流系统之一,发源于东南极冰盖最高点 DomeA.其经纬度范围是 $66.5^{\circ}\text{S}\sim 81^{\circ}\text{S}$ 、 $40^{\circ}\text{E}\sim 95^{\circ}\text{E}$,总面积达 $1.55\times 10^6\text{ km}^2$.该冰流系统活动性强,在整个南极冰盖物质平

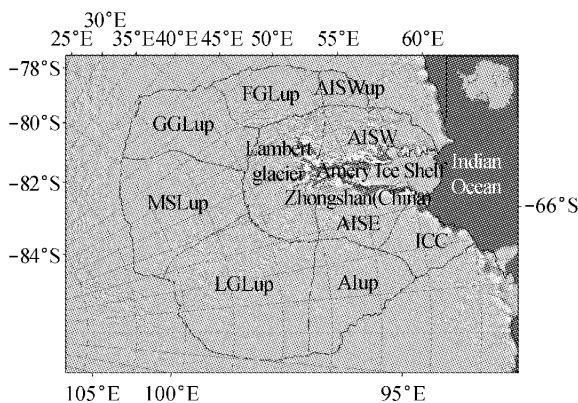


图 1 研究区域:Lambert 冰川流域

Fig.1 Study area: Lambert Glacier Basin

衡中占有重要地位,对全球气候和海平面变化极为敏感.本文使用的研究数据由美国国家冰雪数据中心(NSIDC)提供,为 2011 年 8 月发布最新版本的 ICESat(R633 版本).采用其中的 GLA 12 南极和格陵兰冰盖测高 level 2 级数据产品,时间为 2003 年~2009 年.ICESat 激光地面光斑直径约 70 m,光斑中心相隔约 170 m.

2 重复轨平面拟合方法

2.1 预处理

ICESat R33 版本相比以前版本已有数据产品质量的提高,然而由于激光测高系统(geoscience laser altimeter system, GLAS)的观测过程会受到多种因素的影响,导致其观测结果包含多种误差,因此必须对其进行滤波、改正等预处理.预处理主要包括 ICESat 任务间偏差的改正和观测误差改正.

由于测距误差的影响,ICESat 测高数据存在任务间偏差.激光雷达距离测定时,发射脉冲参考选择(centroid vs. Gaussian, G-C)会引起的获取的表面高程误差,这项误差在南极达到 $\pm 6\text{ cm}$.计算表面高程年变化率的时候,将导致高程变化趋势增加 $0.92\sim 1.90\text{ cm}\cdot\text{yr}^{-1}$ ^[9].本文通过 NSIDC 发布的校正程序对 ICESat 的每个点进行了 G-C 矫正.另外,对于仪器、大气、地表反射等因素引起的观测误差,按照文献^[10]的准则对数据做筛选和矫正,并对经过预处理误差改正的 ICESAT 测高数据进行 TOPEX 到 WGS84 椭球转换和投影变换,大部分任务滤波后数据占原始数据 82% 以上,百分比范围为 $0.37\%\sim 0.94\%$;2009 年两期数据质量相对较差,所占百分比分别为 0.37% 和 0.62% .

2.2 重复轨平面拟合分析

在卫星测高中,根据测高卫星轨道的设计要求,地面轨迹经过一段时间后,会形成一种首尾相咬的情况.这段时间称为重复周期,沿着同一条地面轨迹的所有弧段称为重复轨迹.图 2 表示沿着同一地面轨迹的重复弧段观测值,不同颜色的圆点表示不同时间的激光地面光斑,黑线 A~F 表示拟合的地面轨迹.本文对 2003 年~2009 年所有数据进行升降轨迹分离.根据轨迹间的距离判断重复轨.将每组重复轨沿轨迹方向分割成 700 m 长的很多段,最后使用最小二乘的方法将每一段拟合成一个平面,从而计算其高程变化率和地形特征.

首先根据时间和经纬度,分离出上升轨迹和下

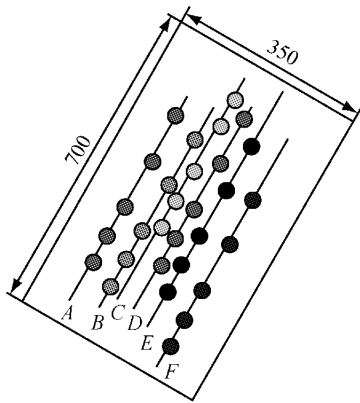


图 2 重复轨迹平面拟合方法示意图(单位:m)^[11]

Fig.2 Repeat-tracks plane fitting method(units: m)^[11]

降轨迹. 对每条轨迹进行二次项拟合, 得到表示弧段轨迹的二次方程. 如图 3 所示, 其中黑点表示激光高度计数据, 实线表示拟合的卫星轨迹. 进而, 根据距离判断 2 条轨迹是否是一组重复弧段. 如图 2 所示, 弧段 A~F 同是上升轨迹, Lambert 冰川流域重复弧段平均穿轨距离约 350 m. 从 2003 年~2009 年 17 期数据中, 共分离出 1 578 条升轨、1 559 条降轨、127 组升轨重复轨和 120 组降轨重复轨.

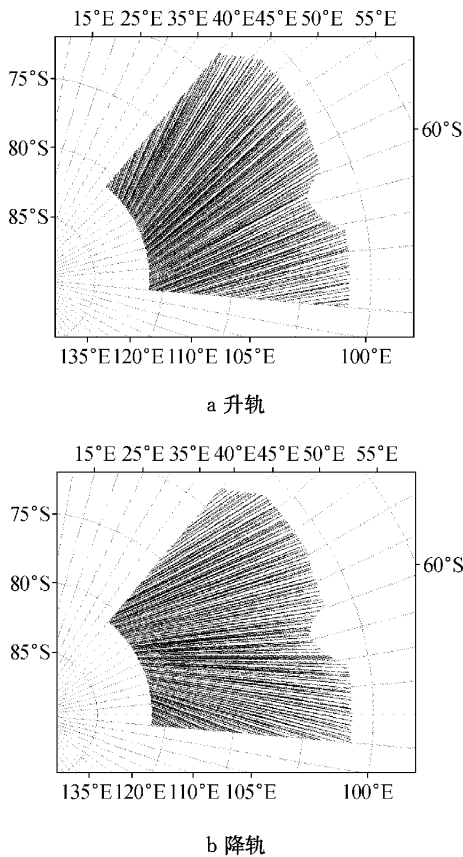


图 3 ICESat 2003 年~2009 年分离出的升轨和降轨

Fig.3 Separating the ascending tracks and descending tracks of ICESat from 2003 to 2009

沿轨迹方向将重复轨分成 700 m 的很多段, 为了充分利用数据, 使相邻两个面有 350 m 的重叠, 这表明有很多 ICESat 点同时属于两个平面. 通过最小二乘回归的方法估计东西方向坡度 α_E 、南北方向坡度 α_N 和高程变化率 dh/dt (垂直移动速度), 以及残差 r .

$$\begin{bmatrix} dH_1 \\ \vdots \\ dH_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dE_1 & dN_1 & dt_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ dE_n & dN_n & dt_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_E \\ \alpha_N \\ dh/dt \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: dH , dE , dN , dt 分别为面内所有点的高程、经度、纬度、时间分别与其平均值的差值; 平面回归残差 r 包括剩下的高程变化信号, 不能被归于假设的平面斜率和不变的高程变化率^[11].

$$\text{令 } y = \begin{bmatrix} dH_1 \\ \vdots \\ dH_n \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} dE_1 & dN_1 & dt_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ dE_n & dN_n & dt_n \end{bmatrix}, \hat{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} \alpha_E \\ \alpha_N \\ dh/dt \end{bmatrix},$$

y 为误差方程式常数项列矩阵, \mathbf{B} 为误差方程式的系数矩阵, $\hat{\mathbf{X}}$ 为未知数列矩阵, 则基于式(1)的误差方程和最小二乘估计为

$$\mathbf{V} = \mathbf{B}\hat{\mathbf{X}} - y \quad (2)$$

$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} y \quad (3)$$

式(2)一式(3)中: \mathbf{V} 为观测值的改正值列矩阵; \mathbf{P} 为高差的权阵, 本文假定为 1. 在得到参数的估值后, 所求参数的精度求得如下:

$$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{X}}\hat{\mathbf{X}}} = (\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B})^{-1} = \begin{bmatrix} Q_{\alpha_E}^2 & Q_{\alpha_E \alpha_N} & Q_{\alpha_E, dh/dt} \\ & Q_{\alpha_N}^2 & Q_{\alpha_N, dh/dt} \\ \text{对称} & & Q_{dh/dt}^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\sigma_0 = \sqrt{\mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V} / (n - t)} \quad (5)$$

式(4)一式(5)中: $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{X}}\hat{\mathbf{X}}}$ 为参数估值的协因数阵; Q_{α_E} 、 Q_{α_N} 、 $Q_{dh/dt}$ 分别为 α_E 、 α_N 、 dh/dt 的自协因数阵; σ_0 为单位权标准差; n 为面内的观测点数; t 为待求参数个数; 这里 $t=3$. 故而, 高程变化率的误差为

$$\sigma_{dh/dt} = \sigma_0 Q_{dh/dt} \quad (6)$$

由此, 可计算得到这个面的坡度和高程变化率.

本文还剔除了几种粗差, 包括由于云层、小尺度地表粗糙度以及未探测出的前向散射带来的粗差. 将模型计算出的残差 $r > 5$ m 的点移除, 迭代计算直到残差低于这一阈值. 另外, 因为最短观测期为 2 年, 平均每年有 3 个观测期, 即 3 条轨道, 2 年即为 6 条重复轨道. 所以, 只计算包含 6 条以上轨道、10 个点以上的面. 另外, 如果平面内开始和结束是不同的季节, 那么预测的高程变化率结果就会存在偏差, 因

此要保证参与计算的平面内的观测值具有相同的开始和结束的时间^[11].

3 实验分析与验证

3.1 研究结果

经过重复轨平面拟合方法,计算得到了 226 520 个面的结果. Lambert 冰川流域 2003 年~2009 年总体平均高程变化率为 $(1 \pm 0.5) \text{ cm} \cdot \text{yr}^{-1}$. 图 4 所示为 2003 年~2009 年每个拟合面的高程变化率. 其中左下角插图为本研究区域在南极所处的位置.

3.2 实验分析

由于 Lambert 冰川流域地形复杂,区域内气候特征差异较大,需对该冰流区域进行划分^[12]. 研究中将整个区域划分成 11 个区域,分别进行统计分析. 表 1 所示为 2003 年~2009 年每个区域的高程变化率. Lambert 冰川流域 2003 年~2009 年高程变化率总体为正增长, Amery 冰架东部的 3 个区域表现为负增长, 分别如下: Amery 冰架东部 (AISE) 为 $-2.89 \text{ cm} \cdot \text{yr}^{-1}$ 、英格里特-克里斯泰森海岸 (ICC) 为 $-3.41 \text{ cm} \cdot \text{yr}^{-1}$, Amery 冰架东部和英格里特上游 (AIup) 为 $-0.94 \text{ cm} \cdot \text{yr}^{-1}$. 艾默里冰架西部的

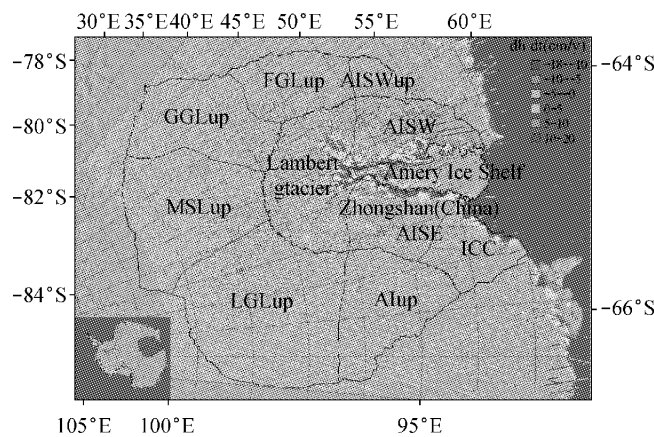


图 4 Lambert 冰川流域 2003 年~2009 年高程变化率($\text{cm} \cdot \text{yr}^{-1}$)

Fig. 4 Lambert Glacier Basin elevation change rate from 2003 to 2009 ($\text{cm} \cdot \text{yr}^{-1}$)

表 1 区域高程变化率统计

Tab.1 Regions elevation rate statistics

区域	简称	面积/ km^2	拟合平面个数/个	平均变化速率/ $(\text{cm} \cdot \text{yr}^{-1})$	精度/ $(\text{cm} \cdot \text{yr}^{-1})$
Amery 冰架东部和 Ingrid 上海 (Amery ice shelf East And Ingrid upstream)	AIup	153 045. 897	23 363	-0. 944	0. 886
Lambert 冰川上游 (Lambert GL upstream)	LGLup	319 259. 804	64 852	1. 137	0. 826
Ingrid Christensen 海岸 (Ingrid Christensen Coast)	ICC	79 123. 676	6 520	-3. 414	1. 907
Amery 冰架东部 (Amery Ice Shelf East)	AISE	97 672. 100	7 576	-2. 891	2. 143
Mellor 冰川上游 (Mellor GL upstream)	MSLup	217 171. 879	45 799	1. 539	0. 662
Amery 冰架 (Amery Ice Shelf)	AIS	62 983. 489	2 798	0. 204	3. 252
Lambert 冰川 (Lambert glacier)	LG	168 103. 635	23 526	1. 429	1. 665
Amery 冰架西部 (Amery Ice Shelf West)	AISW	105 108. 649	10 089	5. 568	2. 293
Geysen 冰川上游 (Geysen GL upstream)	GGLup	153 257. 141	27 237	1. 398	0. 655
Amery 冰架西部上游 (Amery Ice Shelf West upstream)	AISWup	27 511. 555	2 708	3. 458	0. 754
Fisher 冰架上游 (Fisher GL upstream)	FGLup	99 008. 317	12 052	2. 441	0. 864

3 个区域呈现较快增长趋势,分别为:Amery 冰架西部(AISW)为 $5.57 \text{ cm} \cdot \text{yr}^{-1}$,速度最快,Amery 冰架西上游(AISWup)为 $3.46 \text{ cm} \cdot \text{yr}^{-1}$,Lambert 冰川上游 Fisher 冰川(FGLup)为 $2.44 \text{ cm} \cdot \text{yr}^{-1}$,Amery 冰架及内陆高原的 5 个区域高程变化率接近平衡。

3.3 结果验证

为了验证重复轨分析的结果,使用交叉点分析的结果^[13]来进行比较验证。交叉点方法利用上升轨道和下降轨道的交叉点进行高差分析,减小了不同方向坡度所带来的误差,地理精度较高。

(1) 交叉点方法:以交叉点方法得到的高程变化点($dt > 3\text{yr}$)为圆心,200 m 为半径的圆内搜索平面拟合方法得到的高程变化点,找到了 338 对点。把交叉点结果作为真值计算得到平面拟合高程变化率均方根误差(RMSE)为 $0.05 \text{ cm} \cdot \text{yr}^{-1}$,结果表明这

两种方法估计表面高程变化结果有较好的一致性。

(2) 和已有研究成果比较(表 2):文献[12]使用了 ICESat 数据评价 Lambert 冰川-Amery 冰架流域冰盖高程及物质平衡的年际变化,得出的研究结论为该区域处于正物质平衡状态,Amery 冰架为负平衡,西侧高程增长快于东侧。虽然文献[12]的研究时间段和范围与本文略有不同,但都使用 ICESat 数据,结果分别是 $(1.3 \pm 0.4) \text{ cm} \cdot \text{yr}^{-1}$ 和 $(1 \pm 0.5) \text{ cm} \cdot \text{yr}^{-1}$,结果基本一致。文献[14]使用 ICESat 200302~200703 期间数据得到整个南极高程变化率,其 Lambert 冰川流域与本文的结果比较,有明显的空间相似性。此外,对于 Amery 冰架(AIS)这一区域,文献[15]使用 ICESat,时间段为 2003 年~2007 年,而本文是 2003 年~2009 年,其得到的结果为高程变化率在减少,本文结果也是减少。

表 2 与已有研究成果比较

Tab.2 Statistics for hard and soft data of coal floor elevation

来源	时间段	范围	数据	高程变化率/($\text{cm} \cdot \text{yr}^{-1}$)
本文	2003 年 2 月~2009 年 10 月	Lambert 冰川	ICESat R33	1.0 ± 0.5
文献[12]	2003 年 10 月~2007 年 3 月	Lambert 冰川	ICESat R28	1.3 ± 0.4
本文	2003 年 2 月~2009 年 10 月	Amery 冰架	ICESat R33	-0.20
文献[15]	2003 年 10 月~2007 年 4 月	Amery 冰架	ICESat R28	-0.19

4 结论

使用最新发布的 ICESat 测高数据,使用重复轨最小二乘平面拟合方法,获取了研究区域(1 ± 0.5) $\text{cm} \cdot \text{yr}^{-1}$ 的平均高程变化率。本文使用的重复轨道平面拟合方法,用回归方法计算每个小平面对应位置处的高程变化率及坡度。高程变化率的误差主要来自数据本身的误差和模型算出的测量值残差。另外,本文暂时没有考虑冰后回弹对表面高程的影响。得出的结论为:Lambert 冰川流域 2003 年~2009 年平均高程变化率为 $(1 \pm 0.5) \text{ cm} \cdot \text{yr}^{-1}$,为动态平衡,如图 4 所示,冰川运动、风漂移以及测量误差会导致某些地方的变化率较高,如 Amery 冰架西部冰盖边缘区域。Amery 冰架内部的变化更大,点的分布较稀疏。平坦的内陆高原高程变化率呈现增长趋势。结果与已有的研究成果基本一致。实验结果表明,重复轨道平面拟合方法得到的结果精度在可信范围内,而采样点远远大于交叉重叠点,这可以更加有效地利用极地恶劣环境下得到的宝贵数据。另外,从重复轨道数据中提取出地形信息,对于没有高精度 DEM 的区域无法进行坡度改正的情况下,可以使用重复轨

最小二乘平面拟合方法。

此外,雪的密实化过程和粒雪密度对表面高程也具有一定的影响;冰盖变化较大的注出冰川和冰盖边缘,是变化较为剧烈的地方。数据所限,本文在这些地方采样点稀疏,因此并未考虑。已经发射的雷达干涉测高卫星 CryoSat-2 及其后续卫星,将对预测冰川近年趋势以及气候变化至关重要,后续将采用 CryoSat-2 及其后续卫星数据进行深入研究。

参考文献:

- [1] Wingham D J, Francis C R, Baker S, et al. CryoSat: a mission to determine the fluctuations in Earth's land and marine ice fields[J]. *Advances in Space Research*, 2006, 37(4): 841.
- [2] 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(12): 4204.
- [3] Yi D, Zwally H J, Sun X. ICESat measurement of Greenland ice sheet surface slope and roughness[J]. *Annals of Glaciology*, 2005, 42(1): 83.
- [4] 谢欢, 顾振雄, 刘俊, 等. Amery 冰架附近区域年际表面高程变化分析[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2013, 41(8): 1269.