

DOI:10.13203/j.whugis20180171



文章编号:1671-8860(2018)12-2012-11

基于 Sentinel-1 SAR 的埃默里冰架前端位置 自动检测研究

李 斐¹ 王振领¹ 张 宇¹ 张胜凯¹ 朱婷婷²

1 武汉大学中国南极测绘研究中心,湖北 武汉,430079

2 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

摘 要:埃默里冰架(Amery ice Shelf, AIS)是南极洲第三大冰架,冰架状态影响着南极洲物质平衡和海平面变化,但目前对于 AIS 与海水交界的冰架前端位置确定研究甚少。基于哨兵一号(Sentinel-1)合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)影像提出了一种高效且精确的冰架前端自动检测方法,利用冰架和海水之间的过渡带的 SAR 后向散射系数分布特点,利用 Sentinel-1 SAR 影像并结合单元最小恒虚警率(smallest of constant false alarm rate, SO-CFAR)和形态学滤波得到冰水二值图,采用滑动窗口和累积和的方法自动提取每条剖面线对应的冰架前端点位置,自动绘制 AIS 前端轮廓线。考虑 SAR 影像空间分辨率和剖面分辨率等因素对前端检测的影响,进行冰架前端参数优化,并分析有无浮冰对冰架前端提取精度的影响。为了验证影像空间分辨率对各种方法检测结果的影响,将 AIS 前端无碎冰的影像进行双线性内插法重采样处理,并与基于标准差与五大值法的冰架前端提取算法进行精度对比分析。实验证明提出的剖面法具有一定的适用性。此外,通过分析 AIS 前端有无碎冰发现,基于 SO-CFAR 和形态学滤波算法相结合的剖面法对冰架前端提取精度最佳,最优检测精度小于 1 个像素,且受表面融水、冰架破碎等较小,具有较强的场景适应性。

关键词:合成孔径雷达;冰架前端;Sentinel-1;埃默里冰架

中图分类号:P228

文献标志码:A

南极冰架是冰川与南大洋物质交换的主要通道,冰架动态过程显著影响着全球气候变化,加剧的冰川崩解使南极陆缘冰与冰架的不稳定性不断增加,原先受其保护的冰河等往往会加速融化^[1-2]。近 20 年来,南极冰架面积减少约 1.25 万 km²,冰架变薄加速冰架融化,其融溶期延长约 2~3 周,加速向海洋的物质输出引起海平面上升(sea level rise, SLR)^[3-4]。自 20 世纪 90 年代,南极冰川的物质亏损对 SLR 贡献加速,统计约占总速率的 10%^[5]。南极冰盖的大部分物质损失主要形式是冰流和冰山崩解^[6],而冰架动态平衡过程主要包括冰川冰流输入、冰架表面积累与消融、冰架前缘崩裂和冰架底部的冻融等^[7]。冰架前缘与海洋直接接触,是冰盖与南大洋互动的活跃界面,埃默里冰架(Amery ice shelf, AIS)是东南极最大的冰架,物质输出约占东南极冰盖总质量的

16%^[8-9]。研究发现, AIS 的前缘不断变化,崩解周期为 60~70 a^[10-12]。张辛等^[13]利用中分辨率成像光谱仪(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)和 Envisat ASAR(Advanced Synthetic Aperture Radar)数据,对南极主要冰架系统进行持续性动态监测,提出冰架存在扩展变化为主、崩解变化为主及扩展和崩解变化都明显等 3 种变化类型,并预测 AIS 将在 10 a 间发生较大崩解,崩解面积在 1 000 km² 以上。文献^[14-15]利用现场观测资料和卫星遥感资料估算得出 AIS 年平均融化量约 62.5±9.3 Gt,而由于冰架—海洋相互作用生成的海冰约为 16.2±2.4 Gt,由此估算冰架底部每年净消融约 46.4±6.9 Gt,占冰架物质质量损失的 50%。精确的 AIS 前端位置是估计冰架物质损失通量的重要参数,不仅可准确掌握冰架物质平衡过程,还可定量

收稿日期:2018-05-14

项目资助:国家重点研发计划(2017YFA0603104);国家自然科学基金(41801266, 41531069);中央高校基本科研业务费专项(2042018kf0050);博士后面项目(2017M612512)。

第一作者:李斐,博士,教授,主要从事物理大地测量和地球物理的科研与教学工作。fli@whu.edu.cn

通讯作者:张宇,博士,助理研究员。yuzhang_spl@whu.edu.cn

计算南极冰盖的动态变化及其对全球变化的贡献。

遥感技术以其高时间分辨率和高空间分辨率等优势,给极地研究带来革命性变化。多源遥感数据目视解译可实现冰架前端的数字化工作,但是长时间序列前端位置动态变化依赖于自动提取算法^[16]。数字图像冰架前端位置的自动提取属于图像处理领域的边界检测问题^[17],通常使用两个属性来检测图像的边界^[18-19]:①不连续性,即影像图上的强度值或灰度值在两种不同的底物交界处变化剧烈;②相似性,即边界位于两个相对均匀的区域之间,每个区域都有不同的平均强度值。在冰冻圈遥感领域, Sohn 等^[20]采用自适应阈值的边缘检测方法,利用 ERS-1 合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 和 SPOT 影像实现了格陵兰岛海岸线的自动提取^[21-22],但是该算法在处理边界像素时步骤繁琐且可靠阈值选择困难; Liu 等^[23]利用局部自适应阈值方法和边缘追踪技术,开发了一种自动的海岸线提取算法,可从 SAR 图像中提取完整的南极洲海岸线^[24],但其使用的 SAR 仅限于 1997 年获得的一组 Radarsat-1 图像; Seale 等^[25]采用 Sobel 边缘检测方法和亮度分析方法,利用 2000—2009 年 MODIS 数据从格陵兰岛东部的 32 个冰川中提取了 2 802 个正面位置,但受限于光照条件, MODIS 图像海岸线位置存在一定的缺失; Kachouie 等^[26]提出了一种自动冰川前端检测方法,在冰川路径上的平滑强度剖面中确定拐点,该方法被用于几个陆地卫星的多光谱的冰川图像,其热红外数据几乎不受光照的影响,但受云层遮挡的影响,导致数据利用率低。Rosenau^[27]开发了两种方法从格陵兰岛所有可用的陆地卫星数据中自动推导出冰川前端的位置,方法一是在峡湾和冰川区的过渡区产生了许多平行的纵向剖面,而前端位置是根据这些剖面上的灰色值分布确定的;方法二是一种监督分类方法,它分析图像的统计结构特征,成功地利用 1972 年的 Landsat 数据监测到格陵兰岛的 100 多个出口。与应用于 Radarsat-1 图像局部自适应阈值法和其他应用于光学图像的方法相比, Rosenau 提出的冰川纵剖面检测方法可以很好地将复杂的二维灰度图像检测问题转换到一维的穿越冰和水的纵向灰度剖面问题,有效检测出冰川前端的位置,但由于光学影像受天气和环境影响,可用性受到极大的限制。Han 等^[28]采用基于五大值的剖面检测方法实现了高分辨率 SAR 影像的冰川前端自动提取,弥补了光学数据受天气等

因素的制约,但对冰川前端表面有溶解的水和冰川前端有浮冰的情况检测效果较差。

针对极地的地理位置和复杂的冰雪环境,考虑到光学影像的成像受环境限制较严重,冰架前端的变化属于动态过程,人工现场采集数据代价昂贵^[29-30],本文采用星载 SAR 哨兵一号 (Sentinel-1) 数据作为实验数据,不受光照和气候条件等限制,实现全天时、全天候对地观测,并将剖面法应用到 Sentinel-1 SAR 图像,研究 AIS 冰川前端提取方法,通过实验分析本文算法的有效性,并与最小恒虚警率 (smallest of constant false alarm rate, SO-CFAR) 的剖面法和 SO-CFAR 与形态学相结合的剖面法以及文献^[28]基于五大值的剖面法进行对比分析。

1 研究区域和实验数据

1.1 研究区域

本文研究的 AIS 前端位于 $68.5^{\circ}\text{S}\sim 69.5^{\circ}\text{S}$, $70.5^{\circ}\text{E}\sim 74.5^{\circ}\text{E}$, 如图 1 所示。AIS 为东南极最大的冰架,面积约为 $63\ 000\ \text{km}^2$,是东南极最大的兰伯特冰川向南大洋输出的主要入海口,约占东南极海岸线总长的 2%^[31-32],其上游的费希尔、梅勒和兰伯特冰川是冰架补给的主要来源。AIS 北缘与普里兹湾紧密相连,西侧与达恩利角毗连,东侧紧挨中国南极中山站。AIS 的前端接近 69°S ,比罗斯和龙尼-菲尔希那冰架更靠北,快速升温导致减退的可能性更大^[33]。冰架的厚度在前缘达到最薄约 $200\ \text{m}$ ^[34],冰架前缘海域较浅,为 $400\sim 600\ \text{m}$,冰架前端向前推进的速度是 $1\ 300\sim 1\ 400\ \text{m/a}$ ^[35]。上述因素都会造成 AIS 前端的不稳定和最终的崩裂,由此可见, AIS 前端位置至关重要。

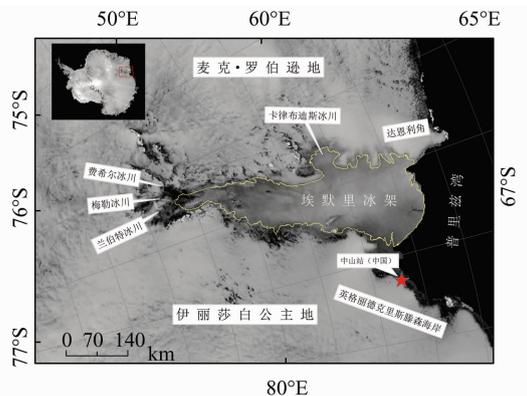


图 1 实验区域

Fig. 1 Experimental Region

1.2 实验数据

Sentinel-1 卫星是欧空局全球环境与安全监测计划(哥白尼计划)中的极轨对地观测双星系统,载有 C 波段 SAR 对陆地和海洋进行监测,可提供连续图像(白天、夜晚和各种天气)。为了满足用户对多分辨率的要求,Sentinel-1 提供 4 种成像模式,即干涉宽(interferometric wide, IW)条带、超宽(extra wide, EW)条带、条带模式(strip-map, SM)和波模式(wave mode, WV)。其中 IW 提供 5 m(距离向) \times 20 m(方位向)空间分辨率,250 km 幅宽;EW 条带提供 25 m \times 100 m 空间分辨率,400 km 幅宽;SM 和 WV 提供的空间分辨率均为 5 m \times 5 m,幅宽均为 80 km。与其他在轨雷达卫星相比,Sentinel-1 卫星具有两大特点,一是超高的辐射分辨率(1 dB/ 3σ),二是大范围覆盖和高重访周期。因为本文实验区域大,考虑到 Sentinel-1 SAR 的 L1b SLC 数据在实验区域空缺和幅宽受限的情况,且文中实验只需用到对 SAR 影像图振幅强度的处理,所以选用超宽幅地距校正产品。在研究空间分辨率对冰架前端位置检测影响时,对数据重采样为 36 m \times 36 m 和 100 m \times 100 m,本实验数据集传感器为 C 波段 SAR,分辨率为 25 m \times 100 m,成像模式为 EW,数据模式为地距多视产品(ground range detected, GRD),极化方式为 HH。

2 基于 SO-CFAR 的剖面分析方法提取 AIS 冰架前端

冰架前端是冰架边缘和海水的交界线。本文利用 Sentinel-1 数据,首先采用 SO-CFAR 方法^[36-37]将 SAR 影像转化为二值图,针对 SAR 相干成像导致的边缘模糊问题,引入形态学处理过程,消除碎冰等因素造成的二值化偏差,通过剖面分析方法提取冰架前 endpoint,确定冰架和海水的边缘位置,从而获取 AIS 冰架前端位置。算法实现流程如图 2 所示。

由图 2 可知,本文提出的冰架前端提取方法包含 SO-CFAR 二值化和剖面分析两个关键步骤。

2.1 基于 SO-CFAR 算法的 SAR 影像二值化

将 SAR 影像转化为二值图是进行前 endpoint 提取的前提。本文基于雷达信号处理中的恒虚警算法,考虑冰架前端区域细小的碎冰等因素的影响,采用单元选小策略,实现基于 SO-CFAR 的 SAR 影像二值化。

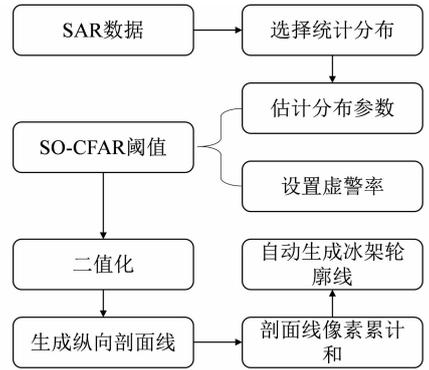


图 2 基于 SO-CFAR 剖面分析方法冰架前端提取流程图

Fig. 2 Flowchart of Glacier Frontal Position Detection Based on SO-CFAR Profile Analysis

该方法首先在 SAR 影像上选取 $(2n+1)$ 个单元构成延迟线,采用序贯排列的方法逐一处理,其中 D 是被检测单元, D 两侧的 n 个单元为参考单元,其中 $x_1 \cdots x_{2n}$ 为各单元的参考信号振幅强度, n 为参考滑动窗口的长度。SO-CFAR 检测的自适应门限 U_0 可表示为背景噪声与杂波强度估计量 X 与一个加权量 K 的乘积,即 $U_0 = KX$,其中加权量 K 是一个仅与恒虚警水平及背景的分布特性有关的参数,而 X 与具体的检测方式有关。当调制 K 的大小时,可以改变门限 U_0 的大小,以保证不同工作方式下的检测性能最优,从而控制恒虚警的大小;当检测单元 D 的值大于门限 U_0 时,则判决该信号为目标信号。为便于后续采用剖面法进行分析,二值化过程中将冰架区域取值设置为 1,而海水的取值设置为 -1。

2.2 基于剖面分析方法的冰架前端提取

由于 SO-CFAR 采用像素级的处理策略,导致二值化过程中存在大量离散点,特别是冰架边缘区域存在较大不确定性。在剖面分析中,首先采用形态学 5×5 滑动窗口处理,滤除边缘区域大量的离散点,提高边缘连续性。考虑冰架边界向无冰区变化几乎恒定,确定冰川主干区域,采用手动标注方法确定冰架两侧边缘线,从而将二维问题转换为一维的边缘提取问题。此时,将冰架沿着边缘线平行的方向进行等间距分割,生成多等剖面,通过提取每个剖面上的冰架前 endpoint,最终确定冰架前端线。对于每一条剖面线,采用累积和的方法获取前 endpoint 的位置。其中 $a_1, a_2, a_3 \cdots a_n$ 为分布在一维剖面线上的二值化数值,对于每一条剖面线采用逐像素处理方法,计算数值累积和,用 $s_1, s_2, s_3 \cdots s_n$ 表示。考虑到 AIS 西侧边缘梯度变化较大,有些剖面线多次穿越冰水交界处,设置

冰架像素值和开阔水域的像素值分别为 1 和 -1。由于剖面线在穿越冰水交界处时,像素值发生变化,相应累积也会增大或减小,将最大累积和对应的位置作为冰架前端的点的位置。

3 AIS 前端位置自动检测实验与分析

实验利用 EW 模式的 Sentinel-1 数据,其幅宽为 400 km,可覆盖 AIS 整个前端轮廓。采用 SO-CFAR 算法和形态学方法结合的剖面方法,实现 AIS 前端位置自动检测。实验中充分考虑 3 个参数影响,即影像空间分辨率大小、形态学滤波及纵向剖面分辨率,并详细分析上述参数对提取精度的影响。同时,实验分别选取 AIS 前端有无浮冰的 SAR 影像做分析,并与基于标准差与五大值法的剖面法检测出的 AIS 前端位置点进行对比分析,通过比较单点提取精度和平均精度验证本文算法的有效性。图 3(a)为 2015-06-18 冰架前端无浮冰的 SAR 影像实验数据,图 3(b)为 SAR 影像在实验过程中只用 SO-CFAR 处理后的二值图,图 3(c)为 SAR 影像在实验过程中利用 SO-CFAR 与形态学方法结合处理后的二值

图,图 3(d)为空间分辨率为 36 m、时间为 2015-04-07 冰架前端有较明显浮冰的 SAR 影像实验数据,黄色圈内为浮冰,图 3(e)为图 3(d)利用 SO-CFAR 与形态学方法结合处理后的二值图,图 3(f)为二值图的纵向剖面分割,红色为冰架两边轮廓线,绿色为生成的纵向剖面线,黄色为冰架前端检测点。

为简化冰架前端提取与海量数据的高效处理,首先在 ArcGIS 软件中手动数字化保持恒定的边界线,确定冰架的两侧边界大致位置。如图 4 红色轮廓线所示,确定冰架边界线后,在边界线内自动生成插入剖面曲线。采用等距分割方法把边缘线包含区域进行均分,并提取相应剖面线上的像素值。为了检验不同分割参数对冰架前端整体位置精度的影响,本文实现从 10 到 100、间隔数为 5 进行切割,如图 4(c)中荧光色曲线为 50 等分割面线。当冰架区域无浮冰或者剖面跨越浮冰的像素点数小于浮冰相隔冰架前端的像素点数时,采用滑动窗口为 1×1 的累加和对分布在剖面线的二值数值进行处理。因为在生成二值图像时,赋值冰架像素值为 1,开阔水域为 -1,选取累加和最大的数值可作为冰架前端位置。在剖面线处理分析时发现存在两种异常点情况:①充分考

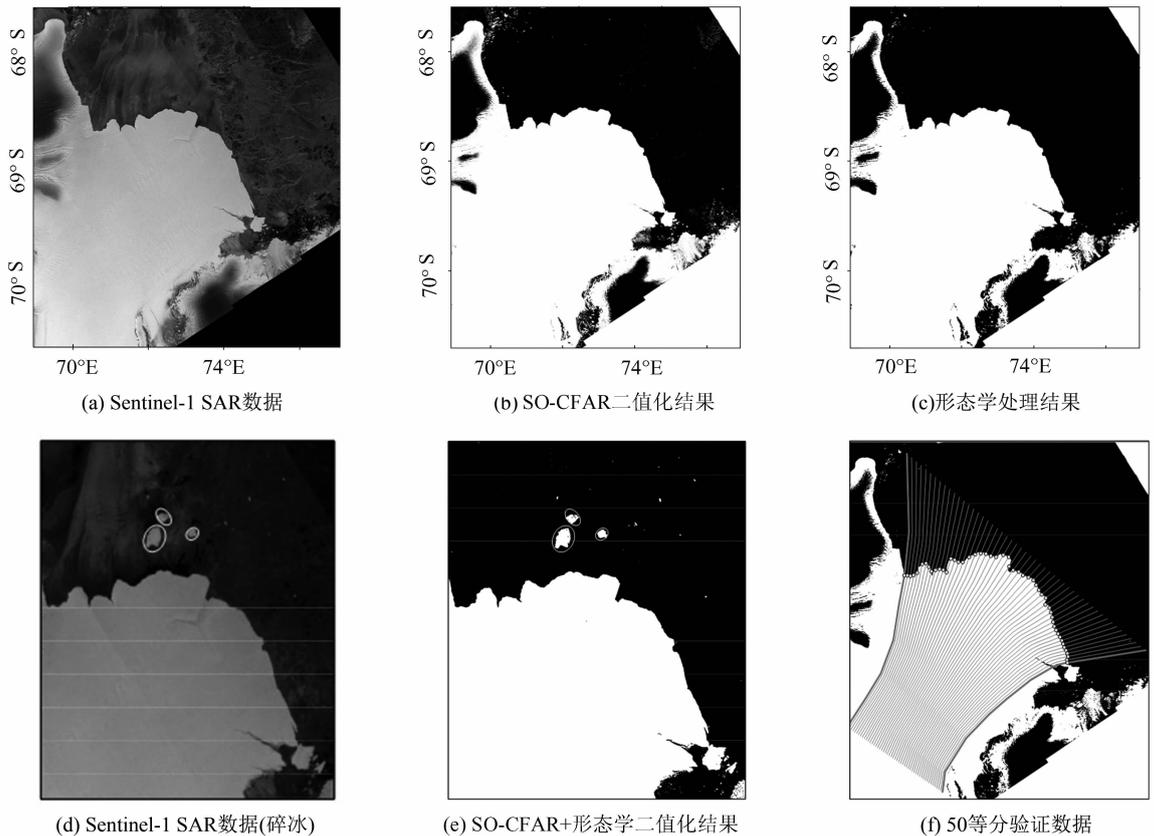


图 3 AIS 冰架前端检测实验数据

Fig. 3 Experimental Data Sets of AIS Frontal Line Detection

考虑到 AIS 边缘的形状,在 AIS 西侧冰架边缘线梯度变化较大,在利用剖面法等分 AIS 时,有些剖面线跨越两次或者多次穿越冰架前端与开阔水域的交界处,如图 4(a)、4(d)所示。因此采用 1×5 的滑动窗口,并采用首尾相减法对 1×1 滑动窗口得到的像素值累积和分布进行处理判断。如果滑动窗口中首尾相减法得到的数值大于等于 -4 ,判定为冰水临界,滑动窗口的选择过大,造成前端点漏检现象,滑动窗口的选择过小时,效率低下,考虑精度和计算效率两种因素,本文采用 5×5 的滑动窗口。

② AIS 东侧冰架前端边缘线梯度变化较小,但是有冰架裂隙,这会对滑动窗口首尾相减法检测冰架前端位置造成一定的误差,如图 4(b)、4(e)所示。从整个 AIS 的 SAR 数据时间域来考虑冰架裂隙影响,给定研究区两侧的边界线,可为研究冰架前端排除干扰对象,提高计算效率。如图 4(c)、4(f)所示,红色线为给定研究区域两侧的边界线,同时考虑到实验中利用形态学滤波可对冰架前端碎冰等干扰对象进行处理,可在该区域利用沿剖面线分布的像素值累加和方法进行冰架前端位置检测。

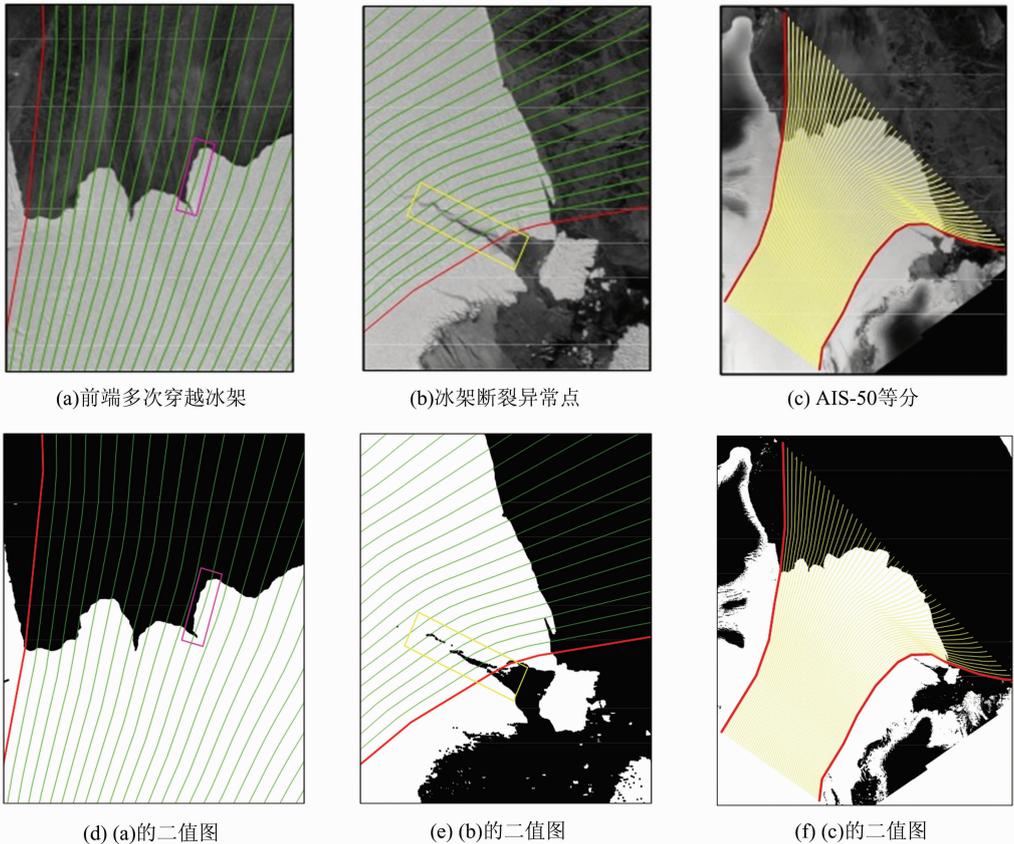


图 4 冰架前端异常点

Fig. 4 Ice Shelf Frontal Outlier

3.1 参数适应性分析

为了分析 SAR 影像分辨率、形态学滤波和剖面分辨率对 AIS 前端提取精度的影响,本文针对 $36 \text{ m} \times 36 \text{ m}$ 和 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 两种分辨率的 SAR 影像,考虑 $10 \sim 100$ 不同剖面分割数,分析形态学滤波对前端提取精度的影响,实验结果如图 5 所示,精度结果见表 1。

由图 5 和表 1 分析可知,在 SO-CFAR 二值化处理基础上,若不采用形态学处理,采用 35 等分割面数,即剖面分辨率为 5.7 km 时前端的提取精度最高,其中,空间分辨率为 100 m 时,平均精度为 522.41 m ,略大于 5 个像素;空间分辨

率为 36 m 时,平均精度为 158.37 m ,优于 5 个像素;当采用形态学处理后,对于采用 36 等分的剖面分割, 100 m 空间分辨率和 36 m 空间分辨率的 SAR 影像的冰架前端提取精度分别为 142.85 m 和 55.52 m ,均优于 2 个像素,此时最佳提取精度分别在 50 等分和 15 等分的剖面分割时获得,分别为 89.62 m 和 29.77 m ,均优于 1 个像素。由此可知,相比于 100 m 空间分辨率的 SAR 数据而言, 36 m 空间分辨率的 SAR 数据平均提取精度更高,其原因是高分辨率 SAR 影像提供的细节信息提高了前端的二值化处理精度;同时当采用形态学处理后,前端的提取精度显著改善,其最

表 1 3 个参数对前端提取平均精度的影响

Tab. 1 Comparison of the Average Accuracy of Different Algorithms Using Different Parameters

纵向等分割数	剖面距离 /km	SO-CFAR/m		SO-CFAR+形态学/m	
		100 m×	36 m×	100 m×	36 m×
		100 m	36 m	100 m	36 m
10	20.0	751.25	209.55	140.97	34.89
15	13.3	642.62	166.45	93.70	29.77
20	10.0	585.62	163.79	142.23	44.72
25	8.0	622.32	184.56	90.42	37.55
30	6.7	723.67	177.57	170.17	45.67
35	5.7	522.41	158.37	142.85	55.52
40	5.0	597.18	178.83	120.64	45.86
45	4.4	596.69	164.31	115.48	42.30
50	4.0	615.40	196.62	89.62	35.33
55	3.6	588.43	198.90	131.52	36.78
60	3.3	620.52	209.29	151.83	39.75
65	3.1	776.11	196.41	116.42	41.41
70	2.9	523.131	168.88	121.52	43.47
75	2.7	641.97	167.65	108.34	35.68
80	2.5	570.60	202.68	146.36	50.06
85	2.4	569.74	180.31	134.89	45.71
90	2.2	634.42	189.66	138.34	46.76
95	2.1	591.65	200.20	137.99	54.97
100	2.0	618.57	188.88	126.84	43.56

的选择。

3.2 精度验证

由于海冰冻融、漂移和冰架崩解、破碎等因素影响,导致冰架前端出现断裂、表面融水、碎冰等现象,引起前端点提取的偏差,根据 § 3.1 的分析,选用 36 m×36 m 空间分辨率 SAR 数据。其中冰架前端无浮冰数据获取时间为 2015-06-18,有浮冰数据获取时间为 2015-04-07。通过比较不同剖面分割时的冰川提取精度,分析本文算法对于表面融水、冰架破碎等因素的场景适应性。此外,选择基于五大值的剖面提取方法作为对比实验,验证本文算法的有效性。

3.2.1 冰架前端无浮冰情况

无浮冰时冰架前端提取精度结果见表 2,可以看出,在冰架前端无浮冰情况下,不采用形态学处理时,本文方法的最高平均精度为 158.37 m,误差在 5 个像素内,平均精度没有出现较大波动,说明没有出现异常值;当采用形态学滤波后,最高精度为 29.77 m,误差在 1 个像素内,最低精度为 55.52 m,误差在 2 个像素内;基于标准差与五大值的剖面法,最高平均精度为 93.41 m,误差在 3 个像素内,而最低平均精度为 1 140.13 m,约为 30 个像素。从表 2 检测点数对比中可以看出,利用本文提出的剖面检测法可以很好地解决剖面线多次穿越冰水交界带来的检测问题。

图 6 中 AIS Sentinel-1 SAR 影像的获取时间为 2015-06-08,分辨率为 36 m×36 m。结合图 6 可以看出,冰架前端无浮冰情况下,本文算法在二值化基础上,采用剖面分析方法,并结合形态学处理方法,在不同纵向等分割时冰架前端位置检测的平均精度相比基于标准差与五大值的剖面法,具有更佳的平均提取精度。虽然不采用形态学处理时平均提取精度较基于标准差与五大值方法的差,但是基于标准差与五大值方法在等分割数为 35、50、85 时,冰架前端位置的平均精度值较其他等分割时误差大。

从图 7 中可以看出,基于标准差与五大值剖面法检测的 3 个异常值点是由冰架裂隙、冰架表面融水和较小浮冰带来的影响造成区域的 SAR 后向散射突变现象,进而影响其前端提取精度。

从图 8 可以看出,35、50、85 等分时,本文提出的算法在冰架前端提取时并没有出现异常点,说明该检测方法能较好地解决冰架裂隙、冰架表面融水和较小浮冰带来的影响。在计算冰架前端位置点时,实验中采用累积比较法和滑动窗口结合的方法能较好地解决由于冰架西侧前端边缘

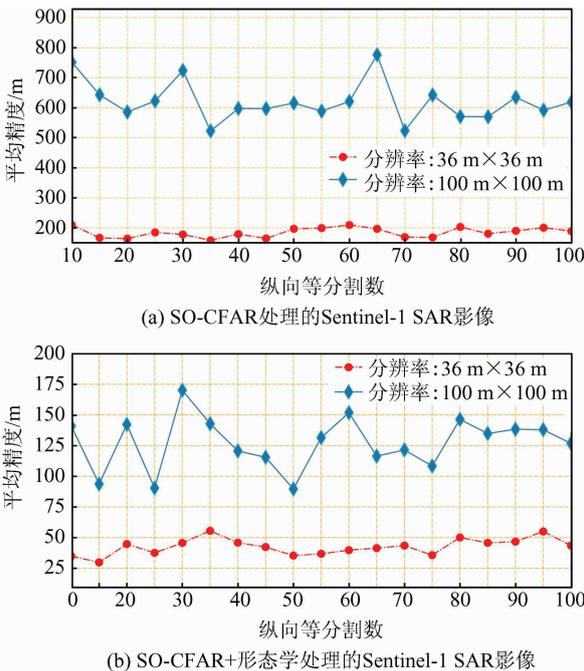


图 5 纵向剖面分辨率的敏感性分析

Fig. 5 Sensitivity Analysis with Different Profile Numbers

优精度在两种空间分辨率下均优于 1 个像素。此外,随着剖面数的增加,剖面间的距离减小,使得前端纵向的分辨率提升,但是前端提取精度并非位于最大剖面分割时的位置。考虑到剖面分辨率和前端提取精度的需求,采用 15~50 之间的剖面数,即 4.4~13 km 的剖面距离,是一个比较合理

表 2 无浮冰时冰架前端提取精度分析

Tab. 2 Accuracies of AIS Frontal Line Detection Without Floating Ice

纵向等分割数	剖面距离/km	本文 SO-CFAR		本文 SO-CFAR+形态学		基于标准差与五大值剖面法	
		平均精度/m	检测点数	平均精度/m	检测点数	平均精度/m	检测点数
10	20.0	209.55	11	34.89	11	118.53	11
15	13.3	166.45	16	29.77	16	94.88	16
20	10.0	163.79	21	44.72	21	109.46	21
25	8.0	184.56	27	37.55	27	98.44	26
30	6.7	177.57	32	45.67	32	93.41	31
35	5.7	158.37	36	55.52	36	886.70	36
40	5.0	178.83	41	45.86	41	104.59	41
45	4.4	164.31	47	42.30	47	101.23	46
50	4.0	196.62	52	35.33	52	808.27	51
55	3.6	198.90	57	36.78	57	104.78	56
60	3.3	209.29	63	39.75	63	100.64	61
65	3.1	196.41	66	41.41	66	125.59	66
70	2.9	168.88	72	43.47	72	115.39	71
75	2.7	167.65	77	35.68	77	108.45	76
80	2.5	202.68	82	50.06	82	102.95	81
85	2.4	180.31	88	45.71	88	1 140.13	86
90	2.2	189.66	93	46.76	93	104.92	91
95	2.1	200.20	99	54.97	99	117.02	96
100	2.0	188.88	102	43.56	102	117.17	101

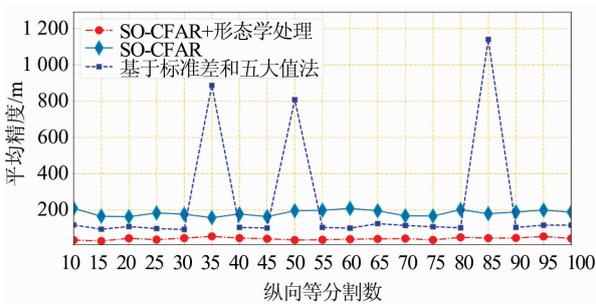


图 6 冰架前端无浮冰情况的多种剖面检测精度
Fig. 6 Accuracies on Different Profile Resolutions of Ice Shelf Without Floating Ice

造成的冰架前端漏检现象,从而描述冰架破碎和断裂的过程,具体细节如图 9 所示。

3.2.2 冰架前端有浮冰情况

从图 10、图 11 和表 3 中可以看出,在冰架前端有浮冰的情况下,本文提出的基于 SO-CFAR 与形态学滤波相结合的剖面法表现出一定的优越性。图 10 中 AIS Sentinel-1SAR 影像获取时间为 2015-04-07,分辨率为 $36\text{ m} \times 36\text{ m}$ 。可以看出:①即使不采用形态学处理,冰架前端的提取精度亦没有出现大幅度波动,可见并未受异常点的影响,且平均精度小于 2 个像素,均优于基于标准差与五大值的剖面法,说明本文方法具有较强的场景适用性;②相比冰架无浮冰情况下,基于标准差与五大值的剖面法的冰架前端提取精度,出现大幅度波动,说明在冰架前端有浮冰的情况下该方法检测时异常点出现次数较多,导致冰架前端检测点偏离真实冰架前端位置点,使得平均精度较低,检测误差较大。

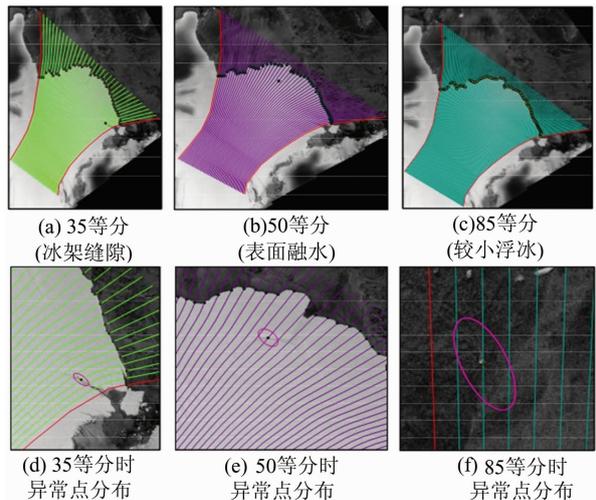


图 7 本文提出的剖面法异常值点分析
Fig. 7 Outlier Analysis of the Proposed Algorithm

由上述实验分析可知,随着对冰架不同的纵向等分,其平均精度也会随着变化。为了探究符合该区域的最优剖面分割,该部分同样选取上述具有代表性和普遍性的冰架前端开阔水域和冰架前端有浮冰的两幅 SAR 影像进行统计分析。并且考虑到冰架前端位置对检测精度的影响,选取空间分辨率为 $36\text{ m} \times 36\text{ m}$,实验结果如图 12 和表 4 所示。

梯度变化较大带来的剖面线多次穿越冰水交界时

从图 12 和表 4 中可以看出,虽然受冰架前端

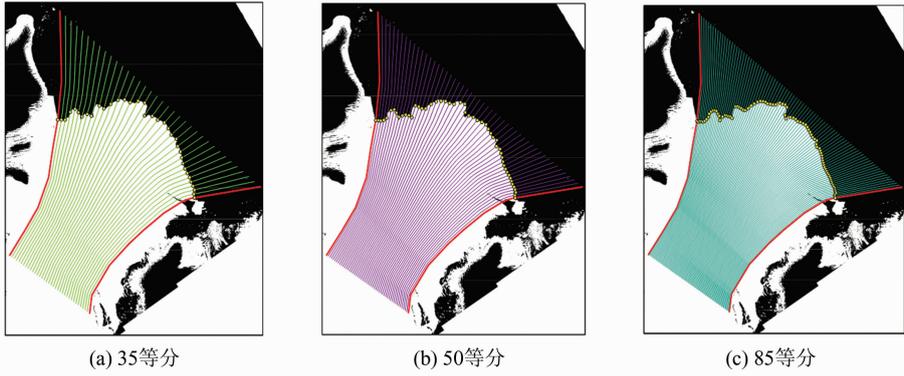


图 8 SO-CFAR+形态学滤波检测结果

Fig. 8 Results of the Proposed Algorithm Based on SO-CFAR and Morphological Filter

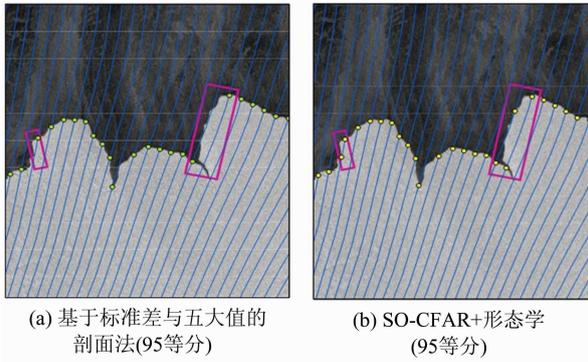


图 9 冰架破碎区域前端提取结果

Fig. 9 Results of Ice Shelf Calving

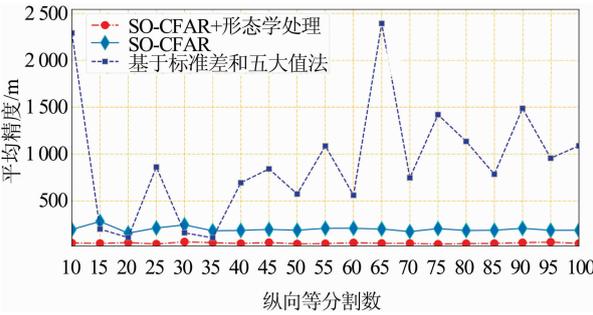


图 10 冰架前端有浮冰情况的多种剖面检测精度

Fig. 10 Accuracies on Different Profile Resolutions of Ice Shelf with Floating Ice

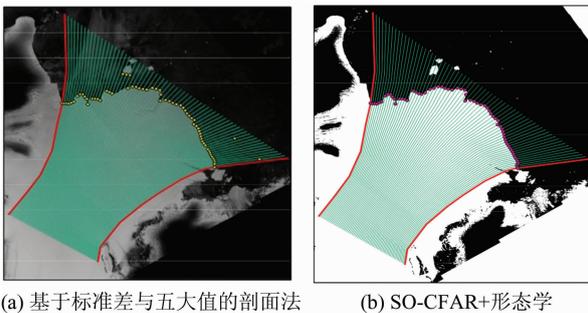


图 11 对比实验

Fig. 11 Comparison Between Standard Deviation and 5-maximum Algorithm with SO-CFAR+ Morphological Filter

浮冰的影响,前端平均提取精度由 29.77 m(低于 1 个像素)降低为 38.61 m(略高于 1 个像素),但前端提取精度并未出现较大的波动,可见本文算法具有较强的场景适应性。同时,考虑到冰架前端边缘的分辨率与不同等分时的精度,选择 15~50 等分为最优冰架前端分割参数。

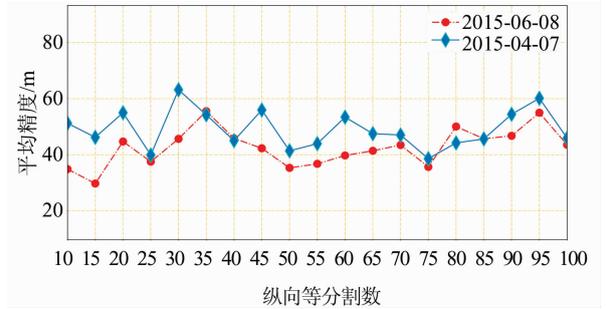


图 12 浮冰对不同剖面分割参数的精度敏感性分析

Fig. 12 Floating Ice Affection in Different Profile Numbers

4 结 语

为了更好地理解冰架质量平衡过程,揭示大气、海洋、海水之间的交互规律,监测冰架动态变化具有重要的研究意义。本文利用 Sentinel-1 SAR 数据,在 SO-CFAR 算法基础上,采用剖面分析方法,并结合形态学滤波优化策略,自动化提取 AIS 前端位置。实验结果证明,SO-CFAR 和形态学相结合的方法检测出的冰架前端位置精度达到 1 个像素,对研究 AIS 长时间序列动态变化以及大冰山崩解的模式化研究具有重要的意义。通过分析并与最新的基于标准差和五大值的剖面法进行对比实验,结论如下。

1) 本文提出在 SO-CFAR 二值化的基础上,利用基于形态学滤波的剖面分析方法进行 AIS 前端提取,相比于基于标准差与五大值的剖面法

表3 前端有浮冰时 AIS 前端提取精度分析

Tab. 3 AIS Frontal Line Detection with Floating Ice

纵向等分割数	剖面距离/km	本文 SO-CFAR 方法		本文 SO-CFAR+形态学方法		基于标准差与五大值剖面法	
		平均精度/m	检测点数	平均精度/m	检测点数	平均精度/m	检测点数
10	20.0	194.69	11	51.23	11	2 290.74	11
15	13.3	280.32	16	46.22	16	199.28	16
20	10.0	156.36	21	54.96	21	108.60	21
25	8.0	210.75	27	39.92	27	860.93	26
30	6.7	244.00	32	63.14	32	159.52	31
35	5.7	180.78	36	54.23	36	104.89	36
40	5.0	184.86	41	45.03	41	693.42	41
45	4.4	195.32	46	55.94	46	840.82	46
50	4.0	186.86	52	41.39	52	573.44	51
55	3.6	207.34	57	43.95	57	1 086.01	56
60	3.3	207.41	63	53.39	63	560.18	61
65	3.1	199.50	66	47.52	66	2 393.13	66
70	2.9	172.62	72	47.04	72	746.25	71
75	2.7	204.01	77	38.61	77	1 419.82	76
80	2.5	183.89	82	44.22	82	1 134.43	81
85	2.4	186.64	88	45.64	88	784.37	86
90	2.2	207.04	92	54.42	92	1 487.08	91
95	2.1	185.90	99	60.12	99	955.46	96
100	2.0	186.96	102	45.92	102	1 087.34	101

表4 参数优化分析

Tab. 4 Parameters Optimization Analysis

纵向等分割数	剖面距离/km	平均精度/m	
		2015-06-18	2015-04-07
10	20.0	34.89	51.23
15	13.3	29.77	46.22
20	10.0	44.72	54.96
25	8.0	37.55	39.92
30	6.7	45.67	63.14
35	5.7	55.52	54.22
40	5.0	45.86	45.03
45	4.4	42.30	55.93
50	4.0	35.33	41.39
55	3.6	36.78	43.95
60	3.3	39.75	53.39
65	3.1	41.41	47.52
70	2.9	43.47	47.04
75	2.7	35.68	38.61
80	2.5	50.06	44.23
85	2.4	45.71	45.64
90	2.2	46.76	54.42
95	2.1	54.97	60.12
100	2.0	43.56	45.92

的精度更佳,平均精度优于1个像素,且该方法的检测结果不受冰架表面裂隙、融水与冰架前端浮冰的影响;同时采用累积和与滑动窗口结合的方法,有效地解决了冰架前端边缘梯度变化较大区域剖面线多次穿越冰水交界造成的前端位置不确定性的问题。

2)实验采用的形态学滤波的方法能有效地改善 SO-CFAR 算法中局部滑动窗口采用的均值滤波器对提取出的冰架前端位置精度带来的影响,

并改善二值化时漏检现象与前端碎小浮冰对实验结果的干扰。

3)冰架前端提取精度一方面受数据空间分辨率的影响,且空间分辨率越高,检测精度越高;另一方面,冰架前端位置检测精度随纵向等分割数不同而发生变化,考虑到冰架前端提取精度与剖面精度的影响,AIS 的最优剖面分辨率为 4.4~13 km。

参 考 文 献

- [1] Liu Y, Moore J C, Cheng X, et al. Ocean-Driven Thinning Enhances Iceberg Calving and Retreat of Antarctic Ice Shelves[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(11):3 263-3 268
- [2] Joughin I, Smith B E, Medley B. Marine Ice Sheet Collapse Potentially Under Way for the Thwaites Glacier Basin, West Antarctica[J]. *Science*, 2014, 344(6 185):735-738
- [3] Bassis J N, Coleman R, Fricker H A, et al. Episodic Propagation of a Rift on the Amery Ice Shelf, East Antarctica[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(6):347-354
- [4] Fricker H A, Young N W, Allison I, et al. Iceberg Calving from the Amery Ice Shelf, East Antarctica [J]. *Annals of Glaciology*, 2002, 34(1): 241-246
- [5] Bamber J L, Aspinall W P. An Expert Judgement Assessment of Future Sea Level Rise from the Ice Sheets[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(4): 424-427

- [6] Church J A, Ding Y, Chen D, et al. Sea Level Change, in *Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth [M]*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013
- [7] Williams M J M, Warner R C, Budd W F. Sensitivity of the Amery Ice Shelf Antarctica to Changes in the Climate of the Southern Ocean [J]. *J Climate*, 2002, 15(19): 2 740-2 757
- [8] Deng Fanghui, Zhou Chunxia, Wang Zemin, et al. Ice-Flow Velocity Derivation of the Confluence Zone of the Amery Ice Shelf Using Offset-Tracking Method[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(7):901-906(邓方慧, 周春霞, 王泽民, 等. 利用偏移量跟踪测定 Amery 冰架冰流汇合区的冰流速[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2015, 40(7):901-906)
- [9] Herraiz-Borreguero L, Church J A, Allison I, et al. Basal Melt, Seasonal Water Mass Transformation, Ocean Current Variability and Deep Convection Processes Along the Amery Ice Shelf Calving Front, East Antarctica[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(7):4 946-4 965
- [10] Fricker H A, Hyland G, Coleman R, et al. Digital Elevation Models for the Lambert Glacier-Amery Ice Shelf System, East Antarctica, from ERS-1 Satellite Radar Altimetry[J]. *Journal of Glaciology*, 2002, 46: 553-560
- [11] Yu J, Liu H X, Jezek K C, et al. Analysis of Velocity Field, Mass Balance, and Basal Melt of the Lambert Glacier-Amery Ice Shelf System by Incorporating Radarsat SAR Interferometry and ICESat Laser Altimetry Measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, 115 (B11):1-16
- [12] Fricker H A, Young N W, Allison I, et al. Iceberg Calving from the Amery Ice Shelf, East Antarctica [J]. *Annals of Glaciology*, 2002, 34(1):241-246
- [13] Zhang Xin, Zhou Chunxia, E Dongchen, et al. Monitoring the Change of Antarctic Ice Shelves and Coastline Based on Multiple-source Remote Sensing Data[J]. *Chinese J Geophys*, 2013, 56(10):3 302-3 312(张辛, 周春霞, 鄂栋臣, 等. 基于多源遥感数据的南极冰架与海岸线变化监测[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(10): 3 302-3 312)
- [14] Zhao C, Cheng X, Hui F M, et al. Monitoring the Amery Ice Shelf Front During 2004—2012 Using Envisat ASAR Data[J]. *Advance in Polar Science*, 2013, 24(2):133-137
- [15] Budd W. The Dynamics of the Amery Ice Shelf[J]. *Journal of Glaciology*, 1996, 6(45):335-358
- [16] Wen J, Wang Y, Wang W, et al. Basal Melting and Freezing Under the Amery Ice Shelf, East Antarctica [J]. *Journal of Glaciology*, 2010, 56(195):81-90
- [17] Wang Qinghua, Ning Jinsheng, Ren Jiawen. Re-definition and Validation of the Grounding Line of Amery Ice Shelf, East Antarctica[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2002, 27(6):591-597(王清华, 宁津生, 任贾文, 等. 东南极 Amery 冰架与陆地冰分界线的重新划定及验证 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2002, 27(6): 591-597)
- [18] Joughin I R, Smith B E, Abdalati W. Glaciological Advances Made with Interferometric Synthetic Aperture Radar[J]. *Journal of Glaciology*, 2010, 56:1 026-1 042
- [19] Chow C K, Kaneko T. Automatic Boundary Detection of the Left Ventricle from Cineangiograms[J]. *Computer and Biomedical Research*, 1972, 5(4): 388-410
- [20] Sohn H G, Jezek K C. Mapping Ice Sheet Margins from ERS-1 SAR and SPOT Imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, 20:3 201-3 216
- [21] Gonzalez R C, Woods R E. *Digital Image Processing [M]*. MA: Addison-Wesley, 2004
- [22] Pitas I. *Digital Image Processing Algorithms and Applications[M]*. New York: John Wiley & Sons, 2002
- [23] Liu H, Jezek K C. A Complete High-Resolution Coastline of Antarctica Extracted from Orthorectified Radarsat SAR Imagery[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2004, 70(5):605-616
- [24] Haverkamp D, Soh L K, Tsatoulis C. A Comprehensive, Automated Approach to Determining Sea Ice Thickness from SAR Data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33:46-57
- [25] Seale A, Christoffersen P, Mugford R I, et al. Ocean Forcing of the Greenland Ice Sheet: Calving Fronts and Patterns of Retreat Identified by Automatic Satellite Monitoring of Eastern Outlet Glaciers [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2011, 116(F3):1-16
- [26] Kachouie N N, Huybers P, Schwartzman A. Localization of Mountain Glacier Termini in Landsat Multi-spectral Images[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2012, 34(1):94-106
- [27] Rosenau R. Investigation of Flow Velocity and Frontal Position of the Large Outflow Glaciers of Greenland by Means of Multitemporal Landsat Surveys [D]. Dresden: Technical University of Dresden, 2013
- [28] Han L, Floricioiu D, Baessler M, et al. An Algorithm for the Detection of Calving Glaciers Frontal

- Position from TerraSAR-X Imagery[C]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium IEEE, Beijing, China, 2016
- [29] Jackson C R, Apel J R. Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual[OL]. <http://www.sarusermanual.com>, 2004
- [30] Moreira A. Digital Beamforming: A Paradigm Shift for Spaceborne SAR[C]. 14th International Radar Symposium (IRS), Dresden, Germany, 2013
- [31] Williams M J M, Warner R C, Budd W F. Sensitivity of the Amery Ice shelf, Antarctica, to Changes in the Climate of the Southern Ocean[J]. *J Climate*, 2002, 15(19): 2 740-2 757
- [32] Scambos T, Hulbe C, Fahnestock M, et al. The Link Between Climate Warming and Break-up of Ice Shelves in the Antarctic Peninsula[J]. *Journal of Glaciology*, 2000, 46:516-530
- [33] Lemke P, Ren J, Alley R B, et al. Climate Change 2007: The Physical Science Basis[OL]. <http://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1>, 2007
- [34] Zheng Shaojun, Shi Jiuxin, Jiao Yutian, et al. Spatial Distribution of Ice Shelf Water in Front of the Amery Ice Shelf, Antarctica in Summer[J]. *Chinese Journal of Oceanology & Limnology*, 2011, 29(6):1 325-1 338
- [35] Geudtner D, Torres R, Snoeij P, et al. Sentinel-1 System Capabilities and Applications[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Milan, Italy, 2014
- [36] He Chu, Zhang Yu, Liao Ziqian, et al. Compressing Sensing Based CFAR Target Detection Algorithm for SAR Image[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(7): 878-882(何楚, 张宇, 廖紫纤, 等. 基于压缩感知的 SAR 图像 CFAR 目标检测算法[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2014, 39(7): 878-882)
- [37] Qin X, Zou H, Zhou S, et al. A Generalized Gamma Distributed CFAR Algorithm for Layover and Shadow Detection in InSAR Images[J]. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2013, 256: 173-180

Amery Ice Shelf Frontal Position Automatic Detection from Sentinel-1 SAR Imagery

LI Fei¹ WANG Zhenling¹ ZHANG Yu¹ ZHANG Shengkai¹ ZHU Tingting²

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

² State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: The Amery ice shelf (AIS) is the third largest in Antarctica. Its behavior controls the mass balance of Antarctica and affects sea level rise while studies focusing on the calving at the boundary of AIS are few. In this paper, an efficient and automatic algorithm for AIS frontal line detection using Sentinel-1 SAR imagery is proposed. Based on characteristics of SAR (synthetic aperture radar) backscatters distribution, smallest of constant false alarm rate (SO-CFAR) algorithm and morphological filter is combined to obtain the binary map of the Sentinel-1 SAR imagery. Then, sliding windows and cumulative sum strategies are applied to automatically detect frontal positions and map the ice frontal lines. The sensitivity of spatial resolution and profile resolution is analyzed by bilinear interpolation for image resolution resampling, and affection of floating ice is considered in the experimental analysis section. Experimental results are compared with state-of-the-art algorithms, and accuracies reported that the proposed algorithm can provide an accurate frontal line under one pixel and prove it is suitable for ice surface melting water and calving conditions.

Key words: synthetic aperture radar; ice shelf frontal line; Sentinel-1; Amery ice shelf

First author: LI Fei, PhD, professor, majors in research and teaching work on physical geodesy and geophysics. E-mail: fli@whu.edu.cn

Corresponding author: ZHANG Yu, PhD, assistant researcher. E-mail: yuzhang_spl@whu.edu.cn

Foundation support: The National Key Research and Development Program of China, No. 2017YFA0603104; the National Natural Science Foundation of China, Nos. 41801266, 41531069; the Fundamental Research Funds for the Central University, No. 2042018kf0050; the China Postdoctoral Science Foundation, No. 2017M612512.