doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2020.02.001

适用于 Ku 波段雷达高度计海冰干舷高度反演的 积雪校正方法

张 晰 1.2, 赵全芳 1.2, 孟俊敏 2, 刘眉洁 3

(1.山东科技大学 测绘科学与工程学院,山东 青岛 266590; 2.自然资源部第一海洋研究所,山东 青岛 266061;3.青岛大学 物理学院,山东 青岛 266071)

摘要:工作在Ku波段的CryoSat-2和Sentinel-3A合成孔径雷达高度计是当前最先进的高度计。 由于雷达回波信号的实际时间跟踪点较预设的时间跟踪点总发生偏移,而且Ku波段波长短,进 行海冰探测时易受雪层干扰,造成雷达信号主散射面由海冰表面上移至雪层内,这两个因素都影 响着海冰干舷高度的反演精度。针对这些问题,本文首先确定了CryoSat-2与Sentinel-3A 雷达高 度计反演北极海冰干舷高度的最优波形重跟踪阈值组合,然后分析了这两个Ku波段雷达信号的 雪层穿透系数,发现Ku波段高度计的主散射面受雪层的影响显著,会高估海冰干舷高度。基于 此,文中提出了一种改进的积雪校正方法,并以机载 Operation IceBridge(OIB)为验证数据,将本文 提出的方法与通用积雪校正法和欧洲空间局(European Space Agency,ESA)海冰干舷高度产品进 行了对比验证。实验结果表明,本文提出的方法能够有效估计Ku波段电磁波穿透海冰表面积雪 深度的比例系数,显著校正了通用积雪校正方法存在的高估海冰干舷高度的问题,提高了海冰干 舷高度的估算精度。

关键词:CryoSat-2;Sentinel-3A;波形重跟踪;海冰千舷高度;雷达穿透系数;积雪校正 中图分类号: P731.15 文献标志码:A 文章编号:1003-2029(2020)02-0001-09

海冰直接影响着全球的气候变化,并通过与大 气的相互作用反馈于全球环境系统。海冰厚度是重 要的气候环境变化表现因子。准确估算海冰厚度, 对于气候变化研究、极区航行保障具有重要意义。 利用遥感手段准确估算大范围海冰厚度始终是当 前的国际难题。相比于人工实测、电磁感应和仰视 声呐等手段,近年来发展的雷达高度计测高技术使 得获取连续大范围的海冰厚度成为可能^{III}。到目前 为止,ERS-1/2、ENVISAT、HY-2、AltiKa、CryoSat-2 和 Sentinel-3A 等雷达高度计相继发射,为海冰厚 度估算提供了多源的卫星观测手段。在众多雷达高 度计中,工作在 Ku 波段的 CryoSat-2 (CS-2)和 Sentinel-3A(S3)合成孔径雷达高度计相较于传统 雷达高度计,具有更高的空间分辨率(沿轨约0.3 km,CS-2/S3 交轨约1.5/1.64 km),能够提供较高分辨率的海冰厚度信息,是当前最先进的卫星雷达高度计。

雷达高度计并不直接计算海冰厚度,是通过计 算海冰的冰面出水高度(海冰干舷高度),并结合浮 体定律实现海冰厚度估算^[2-3]。因此,准确反演海冰 干舷高度对于估算海冰厚度至关重要。由于卫星高 度计信号回波的实际时间跟踪点与预设时间跟踪 点存在位置上的偏差,需要对回波波形进行重跟踪 处理,以计算实际时间跟踪点,进而校正得到卫星 高度计质心到地面点的真实距离。Ricker等^[4]使用 波形重跟踪方法指出重跟踪阈值的选择对海冰干

收稿日期:2019-10-15

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFC1407203);国家自然科学基金资助项目(41976173);中欧国际合作龙计划资助项目 (32292)

作者简介:张晰(1981-), 男, 副研究员,主要从事海洋微波遥感研究。E-mail: xi.zhang@fio.org.cn

舷和厚度的估计值有显著影响。在极区,海冰表面 普遍覆盖着积雪,当雷达高度计探测海冰表面高度 时,Ku波段电磁波须穿过覆盖于海冰之上的积雪 层,因此在计算海冰干舷高度时,需考虑电磁波在 积雪中穿透速度较慢的距离校正问题。在实际情况 下,积雪层受海冰析盐过程的影响,常会在积雪的 上下层形成强盐度梯度变化[5-7];另外,积雪层内粒 径也会与电磁波发生体散射¹⁸。这些因素使得微波 雷达高度计的电磁波很难完全穿透积雪层直达海 冰表面。对于短波长的 Ku 波段雷达,该现象更为明 显,这将导致雷达信号主散射面向上偏离雪-冰交 界面,从而影响海冰干舷高度的估计。但大多数研 究者在使用雷达高度计反演海冰干舷高度时,常假 设 Ku 波段电磁波可以完全穿透积雪层,直接将雪-冰交界面当作雷达信号的主散射面[2-4,9-12],利用海冰 上的整体积雪深度进行距离校正。Armitage 和 Ridout^[13]分析了 CS-2 雷达高度计电磁波在积雪中 的雷达穿透系数,发现 Ku 波段电磁波在垂直入射 时无法完全穿透积雪层,并指出若不考虑积雪层对 电磁波的影响,海冰干舷高度将被高估,从而大大 影响海冰厚度的估算。Ricker等¹⁴发现,未知雷达信 号穿透到积雪层中的不确定性可能导致大约 0.06~ 0.12 m 的海冰干舷高度偏差。

因此,选择合适的冰间水道与海冰的重跟踪阈 值以及确定雷达信号在积雪中的穿透深度,对精确 地反演海冰干舷高度起决定性作用。基于此,本文 分别针对 CS-2 与 S3 两种高度计卫星开展了确定 最优波形重跟踪阈值的分析,并详细分析了积雪层 对 Ku 波段 CS-2 和 S3 合成孔径雷达高度计主散射 面位置的影响,计算了 Ku 波段电磁波的积雪穿透 系数,针对海冰干舷高度精确反演的需求,改进了 积雪校正算法。

1 数据

1.1 CryoSat-2 雷达高度计数据

CryoSat-2 是欧洲空间局发射的合成孔径雷达 高度计,其工作在 Ku 波段,中心频率为 13.575 GHz,带宽约为 320 MHz,空间覆盖范围达到南北纬 88°,运行重复子周期为 30 d,其沿轨道分辨率可达 0.3 km,交轨道分辨率优于 1.5 km,相比于足迹为 10 km 的传统雷达高度计^[15],其测量精度显著提升。 该卫星有 LRM(低分辨率)、SAR 和 SARin 3 种工作 模式,本文采用的是 SAR 模式 L1b 级数据。在该模 式下,CS-2 的每一个波形采样窗口大小为 60 m,包 含有 256 个距离门^[16]。为了进行波形重跟踪校正,得 到海冰/水的表面高程,还需对 L1b 数据进行波形噪 声去除和地球物理校正(地球物理校正包含:干/湿 对流层、电离层、逆气压、海洋潮汐、长周期平衡潮、 海洋负荷潮、固体潮和地心极潮校正等处理)。本文 使用的是北极区域、时间为 2017 年 3 月-4 月和 2018 年 4 月的雷达数据。

1.2 Sentinel-3A 雷达高度计数据

Sentinel-3A 也是欧空局发射的合成孔径雷达 高度计,它是第一个 100%以 SAR 模式覆盖海洋、冰 区和内陆水域的雷达高度计。其工作的 Ku 波段中 心频率与 CS-2 相同,带宽约为 350 MHz,空间覆盖 范围为南北纬 81.35°,运行重复子周期为 4 d,沿轨 道分辨率约为 0.3 km,交轨道分辨率大约为 1.64 km ¹⁷⁷。本文采用的是 SAR 模式的 L2 WAT Enhanced (Water Enhanced)数据。在该模式下波形采样窗口 大小为 60 m,包含有 128 个距离门。与 CS-2 相同, 使用的也是北极区域 2017 年 3 月-4 月和 2018 年 4 月的数据,并对这些数据进行了与 CS-2 相同的地 球物理校正处理。

1.3 Operation IceBridge 数据

本文使用美国国家航空航天局(NASA)发布的 OIB 机载数据作为海冰干舷高度的验证数据,其每 年均会在北极、格陵兰岛和南极上空开展机载探测 飞行。该数据由机载地形扫描测绘仪(Airborne Topographic Mapper, ATM)、数字测绘相机(Digital Mapping System Camera, DMS)和雪雷达(Snow Radar)3种装备采集得到。ATM用于测量表面高度, 空间分辨率为0.4 m,垂直分辨率为0.03 m;DMS用于 识别海冰、海水和冰间水道等,空间分辨率为0.1 m; 雪雷达用于测量积雪厚度,空间分辨率为0.1 m; 雪雷达用于测量积雪厚度,空间分辨率为40 m,垂 直分辨率为0.06 m^[18]。综合上述3种传感器,机载 OIB可提供海冰的激光干舷高度和积雪厚度等数 据。图1展示了2017-2018年春季机载OIB 北极飞 行路线及激光干舷高度分布图。

对于 NASA 发布的机载 OIB 数据,其海冰激光 干舷高度、积雪厚度和产品空间分辨率都统一为 40 m^[18]。在此需要指出的是:机载 OIB 数据携带的 测高仪器为激光雷达,因此,得到的海冰激光干舷 高度并非海冰干舷高度,而是海冰干舷高度与积雪 厚度之和。为得到海冰干舷高度,需将 OIB 得到的



图 1 春季机载 OIB 北极飞行路线及激光干舷高度分布图 注:大、小虚线圆圈分别为 S3 与 CS-2 的北极最大覆盖范围

激光干舷高度减去雪雷达得到的积雪厚度,才能得 到真实的海冰干舷高度。根据文献记载,机载 OIB 的 海冰激光干舷高度探测精度为 0.015±0.06 m^[19],积雪厚 度的探测精度为 0.01±0.05 m^[20]。本文所用的 OIB 数 据均与 CS-2 和 S3 雷达高度计数据时间、地点范围 相同(北极,2017 年 3 月-4 月和 2018 年 4 月)。由 于 CS-2、S3 雷达高度计与 OIB 数据的空间分辨率 不同,为进行逐一比较,将雷达高度计数据与 OIB 数 据在 25 km 的网格中取平均,实现数据一一对应。

2 Ku 波段雷达高度计波形重跟踪阈 值确定

计算海冰干舷高度可通过反演海冰面到雷达 质心的高程和冰间水道面到雷达质心的高程,并计 算二者的差值得到。因此,首先需要区分雷达高度 计的回波波形,以识别海冰、开阔水域和冰间水道 等不同地物类型,然后再反演各种地物类型表面的 高程。

对于地物类型识别,主要是利用 Ocean and Sea Ice SAF (OSI-SAF) 发布的海冰密集度数据以及 CS-2或S3 的波形区分海冰、开阔水和冰间水道 3 种类型。常用后向散射系数 (Radar Backscatter Coefficient, Sigma0)、波形前缘宽度 (Leading Edge Width, LEW)和脉冲峰值(Pulse Peakiness, PP)3 种 回波波形特征进行类型识别^[21]。Sigma0 为雷达高度 计接收到的地物的表面后向反射系数;LEW 是最大 峰值功率 5%和 95%点位之间的波形前缘宽度;PP 是雷达波形最大峰值功率与同一采样波形里的所 有波形总功率的比率⁽⁴⁾,计算方法如下:

$$PP = \sum_{i=1}^{N_{WF}} \frac{\max(W_F)}{WF_i} \times N_{WF}$$
(1)

式中:N_{WF}代表一个波形内的距离门数;W_F为 雷达波形在第*i*个距离门处的功率。通常冰间水道 的表面较平缓,雷达信号多为镜面反射,PP值较高; 对于开阔水域和海冰则以发生漫反射为主,PP值相 对较低,LEW 较宽(开阔水域的LEW相比海冰更 大)。常用的分类参数值设置^[22-23]见表1。

表 1 CryoSat-2 和 Sentinel-3A 的雷达波形分类参数设置

卫星	类型	海冰密集度	SIG0	LEW	PP
	海冰	≥70%	[2.5, 26]	>0.9	<35
CS-2	开阔水域	<5%	/	/	<7
	冰间水道	≥70%	>23	< 0.78	>66
	海冰	≥70%	[2.5, 55]	>1.4	<18
S3	开阔水域	<5%	/	/	<5
	冰间水道	≥70%	>57	<1.22	>23

雷达高度计是通过计算信号发射与返回的时间差和光速来计算雷达到星下地物点之间的距离,因此常需要预先设置信号发射与返回时的时间跟踪点。但在实际情况中,雷达接收信号的实际时间跟踪点与预设时间跟踪点之间存在偏差,需要根据 实际情况进行波形重跟踪校正^[24]。本质上,波形重跟踪是将发生主散射的波形位置定为重跟踪点,然后 计算重跟踪点和预设跟踪点之间的偏移,以校正雷 达高度计质心到星下地物点之间的真实距离^[25]。

TFMRA 方法(Threshold First Maximum Retracker Algorithm)^[26] 是海冰干舷高度反演中常用的波形重 跟踪方法。该方法针对冰间水道和海冰等不同的地 物类型,经验性地设置重跟踪点阈值位置。表2总 结了当前最为主要的一些重跟踪阈值组合。为了更 全面地比较不同重跟踪阈值组合对干舷反演的影 响,并得到最优阈值组合,本文在表2的3种阈值 组合的基础上重新构建了8种阈值组合,分别对应 $\mathfrak{H}(40\%, 40\%), (50\%, 40\%), (50\%, 50\%), (60\%, 40\%),$ (60%,50%),(70%,40%),(70%,50%),(70%,60%)(括 号内第一个阈值对应于冰间水道, 第二个阈值对 应于海冰)。以S3数据为例,这些阈值在雷达回 波波形中的位置示意图见图 2。同时,需要指出的 是,冰间水道的阈值通常大于海冰的阈值,这是 因为对于雷达高度计冰间水道的后向散射常高于 海冰[27]。

表 2 文献中常用的重跟踪阈值组合

阈值组合(冰间水道,海冰)	文献
40%, 40%	[4][28][29]
50%, 50%	[2][3][4]
70%, 50%	[18][30]



注:灰色:70%,黄色:60%,蓝色:50%,绿色:40%

在完成重跟踪阈值设置后,利用波形重跟踪校 正后的海冰表面高程减去相应的平均海表面高度 与海表面高程异常值,得到海冰雷达干舷高度 F_R (Radar Freeboard)。由于电磁波在穿过积雪层时的 速度与真空中不同,所以还需要利用积雪厚度数据对 雷达海冰干舷高度 F_R 进行距离校正,以得到真正的 海冰干舷高度 F_0 因此,当雷达信号完全穿透积雪层 时,进行积雪校正的海冰干舷高度计算公式"如下:

$$F = F_R + h_s \left(1 - \frac{c_s}{c}\right) \approx F_R + 0.22h_s \tag{2}$$

式中:c,为积雪层中雷达信号的传播速度;c为 雷达信号在空气中的传播速度;h_s(1-c,/c)≈0.22h,为 积雪校正值。需要注意的是,公式(2)的使用条件 为:电磁波能够完全穿透雪层直达雪-冰交界面。若 电磁波无法穿透雪层,应用上式计算海冰干舷高度 将会不可避免地引入误差。

将 2017 年 3 月、4 月与 2018 年 4 月 CS-2 与 S3 在 8 种阈值组合方案下得到的海冰干舷高度分



图 3 2017 年 3 月、4 月与 2018 年 4 月北极地区不同阈值组 合下海冰干舷高度与 OIB 海冰干舷高度散点图

别与同期的 OIB 海冰干舷实测数据进行对比,从而 确定两种 Ku 波段合成孔径雷达高度计针对海冰干 舷高度反演的最优波形重跟踪阈值组合。为保证精 度,在本文的处理中,积雪厚度数据采用的机载 OIB 数据提供的积雪厚度测量值。图 3 和表 3 给出了不 同阈值组合得到的海冰干舷高度与机载 OIB 得到

表 3 CryoSat-2 卫星数据不同阈值组合计算的海冰干舷高度与 OIB 海冰干舷高度对比

阈值组合	40%	50%	50%	60%	60%	70%	70%	70%
冰间水道,海冰	40%	40%	50%	40%	50%	40%	50%	60%
相关系数	0.666 9	0.662 0	0.661 4	0.657 4	0.658 4	0.653 1	0.655 3	0.648 5
均方根误差	0.136 8	0.166 8	0.088 5	0.198 0	0.109 5	0.230 6	0.136 4	0.077 6
绝对值差值	0.114 5	0.146 1	0.070 0	0.179 3	0.090 7	0.213 6	0.118 5	0.060 7

注:绝对值差值: ICS-2-OIBI; 网格点数量: 1516; 单位: m

的海冰干舷高度对比结果。

从表 3 中可以看出,对于 CS-2 卫星数据,最优 的阈值组合为 70%(冰间水道)、60%(海冰)。在该组 合下得到的海冰干舷高度与机载 OIB 数据的海冰 干舷高度非常接近。观测表 3 可知,其平均绝对值 差值和均方根误差均为最小值,分别为 0.060 7 m 和 0.077 6 m。 对于 S3 卫星数据,由表 4 可知,最优的阈值组 合为 50%(冰间水道)、50%(海冰)。在该组合下的平 均绝对值差值和均方根误差分别为 0.075 0 m 和 0.098 2 m。

同时,由表 3、表 4 中的数据可以发现,CS-2 卫 星数据在最优阈值组合下得到的海冰干舷高度,无 论是反演精度还是相关性,均高于 S3 卫星数据。

				цц (1 ут н)/4«)				
阈值组合	40%	50%	50%	60%	60%	70%	70%	70%
冰间水道,海冰	40%	40%	50%	40%	50%	40%	50%	60%
相关系数	0.571 3	0.576 9	0.555 4	0.575 1	0.555 7	0.570 6	0.549 0	0.500 8
均方根误差	0.129 3	0.170 0	0.098 2	0.213 2	0.123 7	0.257 1	0.159 3	0.104 7
绝对值差值	0.105 0	0.148 7	0.075 0	0.194 4	0.101 0	0.240 3	0.139 5	0.077 9

表 4 Sentinel-3A 卫星数据不同阈值组合计算的海冰干舷高度与 OIB 海冰干舷高度对比

注:绝对值差值: |S3-OIB|; 网格点数量: 631; 单位: m

进一步分析图 3,可以发现,无论是哪种阈值组 合(即便采用本文得到的最优阈值组合),均普遍存 在雷达高度计探测的海冰干舷高度大于机载 OIB 探测的海冰干舷高度的情况。这说明对于 Ku 波段 雷达,积雪层不能视为透明,需要考虑其无法穿透 积雪层的情况。当积雪覆盖在一年冰上时,海冰在 析盐过程中形成的薄盐水层向上渗入到积雪层中, 从而改变了积雪的介电特性,降低了雷达信号的积 雪穿透能力^[31]。对于覆盖在多年冰上的积雪,不仅积 雪表面的粗糙度更高^[32],而且经过多年的消融冻结 循环过程,会形成包含多个不同密度层的积雪层^[33]。 这些因素综合在一起,一方面会增加积雪层的后向 散射强度,另一方面还会使雷达信号的主散射面由 雪-冰交界面上移至积雪层中。这将导致海冰干舷 高度被高估,从而引起海冰厚度的高估^[14]。

3 积雪层对海冰干舷高度反演的影响分析

为详细评估积雪层对雷达信号的影响,计算了 CS-2 与 S3 的雷达穿透系数 f^[13]:

$$f = \frac{d - (F_{R_sat} - F_{R_OIB})}{d} \tag{3}$$

式中:d 为积雪厚度 h_s 与式(2)中的积雪校正 值 0.22 h_s 之和; $F_{R,sat}$ 为雷达高度计测的雷达海冰干 舷高度; $F_{R,OB}$ 为 OIB 得到的雷达海冰干舷高度;OIB 雷达海冰干舷高度由 OIB 的海冰干舷高度减去积 雪校正值 0.22 h_s 得到。式(3)中,当雷达穿透系数 f=0时,表示雷达信号没有穿入雪层,雷达的主散射 面位于空气-雪交界面;f=1表示雷达信号完全穿透 雪层,雷达信号的主散射面位于雪-冰交界面。0<f<1 表示雷达信号未完全穿透雪层,雷达信号的主散射 面位于积雪层内部。

图 4 和表 5 给出了 2017 年 3 月-4 月和 2018 年 4 月北极区域 CS-2 与 S3 各自的雷达穿透系数 分布与统计结果。在图 4 中还利用高斯分布对雷达 穿透系数进行了拟合,并将雷达穿透系数的平均值 作为拟合曲线的中心值。



注:图中实线为直方图分布,虚线为高斯分布拟合

表 5 CryoSat-2 和 Sentinel-3A 的雷达穿透系数平均值

	一年冰	多年冰	全部海冰类型
CryoSat-2	0.950	0.889	0.912
Sentinel-3A	0.873	0.856	0.867

需要注意的是,图4存在雷达穿透系数f<0或 者f>1的情况,对于该问题 Armitage 和 Ridout^[13]已 给出过分析和评估。这主要是由于:(1)在计算海冰 干舷时,为了有足够的覆盖范围与机载 OIB 数据进 行比较,卫星数据的平均时间是远长于机载 OIB 数 据的;(2)卫星高度计和机载 OIB 系统的足印大小 存在较大差异。由于卫星海冰干舷与机载 OIB 海冰 干舷的两种测量差异,使得卫星高度计的海冰干舷 分布范围大于机载 OIB 的海冰干舷分布范围,从而 出现雷达穿透系数f不总在[0,1]范围区间的情况。

从图 4 和表 5 可知,Ku 波段雷达高度计对一年 冰上积雪的穿透能力普遍强于多年冰。例如:CS-2 对于一年冰上积雪的雷达穿透系数 f 为 0.950,对于 多年冰为 0.889;S3 对于一年冰上积雪的雷达穿透 系数 f 为 0.873,对于多年冰为 0.856;对于全部海冰 类型 CS-2 的雷达穿透系数 f 为 0.912,S3 的雷达穿 透系数 f 为 0.867。总体而言,CS-2 的雷达穿透系数 f 大于 S3。

所以普遍来说,对于 Ku 波段雷达高度计,其主散 射面均位于雪-冰交界面上方的积雪层中,不能再利 用公式(2)进行积雪校正,必须发展新的校正方法。

4 积雪校正新方法与海冰干舷高度 反演

由雷达穿透系数f的定义可知,当 0<f<1 时,雷达高度计测得的海冰干舷高度会比实际的海冰干舷高度高(1-fhs,所以需要补偿这一距离差。同时,还需对雷达信号穿透的那部分积雪厚度进行距离校正

0.22fh_s。因此,改正的积雪校正模型可表述如下^[13]:

$$F = F_{R_{sat}} - (1 - f)h_s + 0.22fh_s$$

= $F_{R_{sat}} + (1.22 - 1)fh_s$ (4)

式中:雷达穿透系数f可取为表 5 中的统计值, 所以式(4)可根据雷达高度计和海冰类型的不同, 分别针对 CS-2 与 S3,得到本文新改进的积雪校正 公式。

$$F_{CS2_FYI} = F_{R_sat} + 0.159h_s \tag{5}$$

对于 CS-2 多年冰:

$$F_{CS2_FYI} = F_{R_sat} + 0.0846h_s$$
 (6)

对于 S3 一年冰:

$$F_{S3_FYI} = F_{R_sat} + 0.0651h_s \tag{7}$$

对于 S3 多年冰:

$$F_{S3 MYI} = F_{R sat} + 0.0443h_s \tag{8}$$

为了评估新改进的积雪校正方法的海冰干舷 高度反演性能,本文以机载 OIB 实测海冰干舷高度 数据为基础,将其与改进的积雪校正法的海冰干舷 反演结果、通用积雪校正方法(公式(2))的反演结 果和 ESA 发布的海冰干舷高度产品进行了对比分 析。ESA 海冰干舷高度产品是欧空局利用 CS-2 和 S3 数据制作的海冰干舷高度产品(L2 级),该数据 可公开下载(ftp://science-pds.cryosat.esa.int)。

表 6 和图 5 给出的是 3 种海冰干舷反演方法 的结果与机载 OIB 海冰干舷高度的差异统计表和 分布图。根据图与表的统计结果可知,对于 ESA 发 布的海冰干舷高度产品,CS-2 发布的海冰干舷高度 产品值明显偏大,而 S3 发布的海冰干舷高度产品 值明显偏小,但总体上 S3 海冰干舷高度产品的误 差低于 CS-2。对于通用积雪校正方法,CS-2 和 S3 反演的海冰干舷高度均偏高。而本文改进的积雪校 正方法显著校正了通用积雪校正方法存在的高估

		ALL	$\mathbf{ALL}^{\mathcal{D}}$	ALL®	FYI	FYI	FYI®	MYI	MYI ²	MYI®
	网格点数量	1419			527			892		
CS2	均方根误差	0.080 5	0.074 2	0.137 1	0.066 5	0.065 9	0.110 8	0.087 7	0.078 7	0.150 5
	绝对值差值	0.063 0	0.055 2	0.118 0	0.052 0	0.050 6	0.095 5	0.069 5	0.057 9	0.131 2
	网格点数量	562			355			207		
S3	均方根误差	0.098 1	0.085 5	0.123 8	0.092 7	0.082 6	0.118 6	0.106 6	0.090 2	0.132 4
	绝对值差值	0.075 6	0.066 2	0.079 9	0.071 0	0.064 3	0.074 0	0.083 5	0.069 4	0.090 0

注:一年冰(FYI),多年冰(MYI),全部海冰类型(ALL);①通用积雪校正方法,②提出的积雪校正方法;③ESA海水干舷高度产品;单位:m



图 5 海冰干舷高度差异分布图

问题,CS-2和S3海冰干舷高度的反演精度无论是 平均绝对值差值还是均方根误差均小于前两种方 法。另外需要指出的是,本文所改进的积雪校正方 法对于一年冰和多年冰,其精度均有所提高,呈现 了良好的稳定性。

5 结论与讨论

工作在 Ku 波段的 CryoSat-2 和 Sentinel-3A 合成孔径雷达高度计是当前最先进的高度计。本文针对雷达回波重跟踪阈值的位置,以及积雪对雷达信号穿透能力的干扰影响,发展了改进的积雪校正算法,提高了海冰干舷高度反演精度。主要结论有:

(1) 对于 CS-2 雷达高度计最优的波形重跟踪 阈值组合为 70%(冰间水道)、60%(海冰); 对于 S3 雷达高度计,其最优的阈值组合为 50%(冰间水 道),50%(海冰)。

(2) Ku 波段雷达信号未完全穿透一年冰与多 年冰上的积雪层,并且 CS-2 的雷达穿透系数大于 S3。CS-2 对于一年冰上积雪层的雷达穿透系数为 0.95,对于多年冰为 0.889;S3 对于一年冰上积雪层 的雷达穿透系数为 0.873,对于多年冰为 0.856;对 于全部海冰类型而言,CS-2 的雷达穿透系数为 0.912,S3的雷达穿透系数为 0.867。

(3)相比于通用积雪校正法和 ESA 产品法,在 本文的改进积雪校正法中得到的海冰干舷高度与 OIB 数据之间的误差最小,精度最高。

本文的研究仅使用了北极春季的数据,为提高 算法的普适性,未来将会利用北极其他季节的数据 开展雷达穿透系数分析,从而进一步优化算法。在 下一步的研究工作中,准备利用本文改进的方法开 展南极地区的海冰干舷高度反演与校正。

致谢:感谢欧洲空间局提供的 CryoSat-2 和 Sentinel-3A 雷达高度计数据及海冰干舷高度数据; 感谢美国冰雪中心提供 Operation IceBridge 数据。

参考文献:

- [1] 季青,庞小平,许苏清,等.极地海冰厚度探测方法及其应用研究综述[J].极地研究, 2016, 28(4): 431-441.
- [2] Laxon S W, Giles K A, Ridout A L, et al. CryoSat-2 estimates of Arctic sea ice thickness and volume[J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40(4): 732-737.
- [3] Kurtz N, Galin N, Studinger M. An improved CryoSat-2 sea ice freeboard retrieval algorithm through the use of waveform fitting[J]. The Cryosphere, 2014, 8(4): 1217–1237.
- [4] Ricker R, Hendricks S, Helm V, et al. Sensitivity of CryoSat-2 Arctic sea-ice freeboard and thickness on radar-wave form interpretation[J]. The Cryosphere, 2014, 8(4): 1607–1622.
- [5] Crocker G. Observations of the snow cover on sea ice in the Gulf of Bothnia [J]. International Journal of Remote Sensing, 1992, 13(13): 2433–2445.

- [6] Drobot S D, Barber D G. Towards development of a snow water equivalence (SWE) algorithm using microwave radiometry over snow covered first-year sea ice[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1998, 64(5): 415–423.
- [7] Fuller M C, Geldsetzer T, Gill J P, et al. C-band backscatter from a complexly-layered snow cover on first-year sea ice[J]. Hydrological Processes, 2014, 28(16): 4614-4625.
- [8] Hendricks S, Ricker R, Helm V. AWI CryoSat-2 sea ice thickness data product, data product manual [M]. Bremerhaven, Germany: Alfred-Wegener-Institute, 2016.
- [9] Laxon S, Peacock N, Smith D. High interannual variability of sea ice thickness in the Arctic region[J]. Nature, 2003, 425:947-950.
- [10] Giles K A, Hvidegaard S M. Comparison of space borne radar altimetry and airborne laser altimetry over sea ice in the Fram Strait[J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27 (15): 3105–3113.
- [11] Giles K A, Laxon S W, Wingham D J. Combined airborne laser and radar altimeter measurements over the Fram Strait in May 2002[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 111(2–3): 182–194.
- [12] Giles K A, Laxon S W, Ridout A L. Circumpolar thinning of Arctic sea ice following the 2007 record ice extent minimum [J/OL]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(22). https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2008GL035710.
- [13] Armitage T W K, Ridout A L. Arctic sea ice freeboard from AltiKa and comparison with CryoSat-2 and Operation IceBridge[J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(16): 6724–6731.
- [14] Ricker R, Hendricks S, Perovich D K, et al. Impact of snow accumulation on CryoSat-2 range retrievals over Arctic sea ice: An observational approach with buoy data[J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(11): 4447-4455.
- [15] Connor L N, Laxon S W, Ridout A L, et al. Comparison of Envisat radar and airborne laser altimeter measurements over Arctic sea ice [J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 3(113): 563–570.
- [16] Bouzinac C. CryoSat Product Handbook [M]. London: ESRIN/ESA and Mullard Space Science Laboratory, University College London, 2010.
- [17] Sentinel-3 Team. Sentinel-3 User Handbook [M]. Susanne Mecklenburg, 2017.
- [18] Xia W T, Xie H J. Assessing three waveform retrackers on sea ice freeboard retrieval from Cryosat-2 using Operation IceBridge Airborne altimetry datasets[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 204: 456–471.
- [19] Kurtz N. IceBridge quick look sea ice freeboard, snow depth, and thickness product manual for 2018[R]. 2018.
- [20] Farrell S L, Kurtz N T, Connor L, et al. A first assessment of IceBridge snow and ice thickness data over Arctic sea ice [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 50(6): 2098–2111.
- [21] Paul S, Hendricks S, Ricker R, et al. Empirical parametrization of Envisat freeboard retrieval of Arctic and Antarctic sea ice based on CryoSat-2: progress in the ESA Climate Change Initiative[J]. The Cryosphere, 2018, 12: 2437–2460.
- [22] Hendricks S, Ricker R. AWI CryoSat2 Product User Guide v2p1[M]. Alfred Wegener Institute Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, 2019.
- [23] Labroue S. S3MPC_LandSeaIce-CyclicReport-039-020[R]. ESA, EUMETSAT, S3MPC Consortium, 2019.
- [24] Laxon S. Sea ice altimeter processing scheme at the EODC[J]. International Journal of Remote Sensing, 1994, 15(4): 915–924.
- [25] Wingham D, Francis C, Bake S. CryoSat: A mission to determine the fluctuations in Earth's land and marine ice fields[J]. Advances in Space Research, 2006, 37(4): 841–871.
- [26] Helm V, Humbert A, Miller H. Elevation and elevation change of Greenland and Antarctica derived from CryoSat-2 [J]. The Cryosphere, 2014, 8(4): 1539–1559.
- [27] Shen X Y, Similä M, Dierking W, et al. A new retracking algorithm for retrieving sea ice freeboard from CryoSat-2 radar altimeter data during winter spring transition[J]. Remote Sensing, 2019,11(10): 1194.
- [28] 王立伟,金涛勇,张胜军,等.CryoSat-2卫星海冰区域波形识别及海冰干舷高确定[J].大地测量与地球动力学,2015,35(4):722-725.
- [29] Price D, Beckers J, Ricker R, et al. Evaluation of CryoSat-2 derived sea-ice freeboard over fast ice in McMurdo Sound, Antarctica[J]. Journal of Glaciology, 2015, 61(226): 285.
- [30] 沈校熠.基于 CryoSat-2 的海冰厚度反演方法研究[D]. 南京:南京大学,2017.
- [31] Nandan V, Geldsetzer T, Yackel J, et al. Effect of snow salinity on CryoSat-2 Arctic first year sea ice freeboard measurements[J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(10): 419–426.
- [32] Kwok R. Simulated effects of a snow layer on retrieval of CryoSat-2 sea ice freeboard [J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41(14): 5014–5020.

[33] Willatt R, Laxon S, Giles K, et al. Ku-band radar penetration into snow cover on Arctic sea ice using airborne data [J]. Annals of Glaciology, 2011, 52(57): 197–205.

Snow Correction Method for Sea Ice Freeboard Retrieval Applied to Ku Band Radar Altimeters

ZHANG Xi^{1,2}, ZHAO Quan-fang^{1,2}, MENG Jun-min², LIU Mei-jie³

1. College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong Province, China;

2. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, Shandong Province, China;

3. College of Physics, Qingdao University, Qingdao 266071, Shandong Province, China

Abstract: The CryoSat-2 and Sentinel-3A synthetic aperture radar altimeters operating at the Ku-band are the most advanced altimeters so far. However, Ku-band electromagnetic wave is easily affected by snow layer, which leads to strong microwave attenuation within the snow volume. These factors may affect the location of main scattering horizon, especially at Ku-band frequencies, shifting toward the snow layer from sea-ice surface. Therefore, the snow layer brings an additional uncertainty for ice freeboard and thickness retrieval. In order to solve these problems, Threshold First Maximum Retracker Algorithm (TFMRA) is used to retrieve sea ice freeboard. To obtain the optimal waveform retracking threshold combination, the accuracy of sea ice freeboard retrieved from CryoSat-2 and Sentinel-3A radar altimeter under 8 threshold combinations is analyzed in comparison with OIB sea ice freeboard. Then the radar penetration factor for CryoSat-2 and Sentinel-3A is calculated, which expresses the radar dominant scattering horizon in relation to the snow and ice surfaces. The results show that the snow cover can significantly change the dominant scattering horizon of radar echo. This leads to an overestimation for sea ice freeboard retrieval. Furthermore, an improved sea-ice freeboard retrieval method is proposed, which accounts for the radar penetration of snow layer. Finally, a comparison of the freeboard supplied in the classic ice freeboard method and ESA ice freeboard product to our method is shown in the paper. The results show that the improved method can effectively improve the accuracy of ice freeboard retrieval under snow cover, and has a good potential to improve the accuracy of sea ice thickness retrieval detection.

Key words: CryosSat -2; Sentinel -3A; waveform retracking; sea ice freeboard; radar penetration factor; snow correction