

基于半解析模型的激光测高回波海水海冰波形分类方法

马 跃, 张文豪, 张智宇, 马 昕, 李 松*

(武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430079)

摘 要: 现有利用激光测高波形的地物分类方法绝大多数基于机器学习的分类原理, 是一种基于经验的分类方法。从激光回波的理论模型出发, 通过推导纯海水表面回波和含有海冰的表面回波的解析模型, 对纯海水回波和含有海冰回波逐个采样点按时域距离加权计算总振幅差异值, 以该差异值作为依据建立一种半解析型的海水、海冰分类方法; 通过机载 LiDAR 将在格陵兰北部海冰区的实测点云数据判断 GLAS 激光脚点对应的地面类型, 对 GLAS 在该区域实测波形进行基于论文方法的分类准确性验证; 结果显示, 在剔除饱和波形影响后, 分类总体精度 OA 大于 95%, Kappa 系数接近 0.89, 具有非常好的分类效果。论文将使得激光测高仪地物类型分类方法由基于机器学习为依据向半理论解析模型为依据的分类方向延伸, 为后续基于激光回波数据的地物分类方法提供重要的参考思路。

关键词: 激光测高仪; 激光雷达; 海冰; 回波模型; 分类

中图分类号: TP79 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0506005

Sea and sea-ice waveform classification for the laser altimeter based on semi-analytic model

Ma Yue, Zhang Wenhao, Zhang Zhiyu, Ma Xin, Li Song*

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Current terrain classification methods using waveforms of a laser altimeter are mainly based on machine learning, which is an empirical model. Starting from the theoretical model of the laser waveform, by deriving the analytic model of laser waveforms of sea surface and sea-ice surface, the sum of the amplitude differences between the sea waveform and sea-ice waveform was calculated according to one by one sampling point based on the temporal-distance weighting; and the sea or sea-ice waveform was classified by the calculated difference value. The terrain types corresponding to GLAS laser footprints in the north sea-ice area of Greenland were obtained by analyzing the point clouds captured by an airborne LiDAR, and in this area, the GLAS measurement waveforms were used to validate based on the classification method proposed in the paper. The results indicate that after eliminating the effect of saturated waveforms, the overall accuracy OA is better than 95% and the Kappa coefficient is approximately 0.89, which achieves a high classification accuracy. The new method extends

收稿日期: 2017-12-05; 修订日期: 2018-01-03

基金项目: 国家自然科学基金(41506210, 11574240); 对地高分辨率观测系统国家科技重大专项(AH1601-8);

测绘公益性行业科研专项经费(201512016); 中国博士后科学基金(2016M600612, 2016M602362);

中央高校基本科研业务费专项资金(2042017kf0016, 2015212020201)

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

通讯作者: 李松(1965-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事激光遥感与光电检测方面的研究。Email: ls@whu.edu.cn

the terrain type classification from taking the machine learning as basis to taking the semi-theory analytic model as basis for a laser altimeter, which can be an important reference to the terrain type classification based on laser waveform successively.

Key words: laser altimeter; LiDAR; sea-ice; waveform model; classification

0 引言

准确监测极地平均海面与海冰变化,是开展极地海洋科学研究的重要基础,而正确分类极地海水与海冰数据,又是监测工作的前提。与传统的微波高度计相比,ICESat 卫星搭载的地球科学激光测高系统(Geoscience Laser Altimeter System, GLAS)约 70 m 的激光脚点,可以监测更小规模的海冰特征和开阔水域^[1];由于极地的气候特征,仅有约 2% 的激光测高数据受到云层遮挡的影响,使得其非常适合用于极地各种参数的反演^[2]。

为获取用于海冰干舷计算的参考海面高度, Kwok、Yi、Kurtz、Zwally、Price 等科学家,利用 GLAS 数据通过多种方法对海水、海冰等地物类型进行分类,总结可以分为两类:(1) 使用辅助数据源,如 RADARSAT^[3]、MODIS^[4]和 Envisat ASAR^[5]等影像数据与 ICESat 星下点位置进行匹配,该方式虽然分类结果较准确,但其计算效率较低,由于必须有相近时刻和区域的辅助数据,应用区域范围受限^[6];(2) 直接使用 GLAS 顶层数据产品中的 GLA13、GLA15 等部分参数(如反射率和高程等)通过机器学习设定阈值判断海水、海冰等地物类型^[7-10]。

此外,国内外诸多学者对激光测高仪回波在不同地域的地物类型分类方法进行了研究,例如, Molijn 在南极 Dry Valleys 地区以 GLAS 数据产品中的波形峰度和偏度参数,和自行提取的波形上升时间、均值等参数为判别特征,以 LIMA 图像为地物类型先验信息,使用最大似然的监督分类方法将该地区地形分为积雪、岩石、冰面和水面^[11];Zhou 使用支持向量机的监督分类方法将地物分为森林、农田、水体和灌木类型^[12];Wang 通过波形参数的统计信息,设定分类阈值的方法区分湖面和非湖面的回波波型^[13];上述分类算法以波形参数、地表高程和斜率的统计信息作为分类依据,例如水面反射率较低,山地

回波宽度较大等统计结果,采取监督分类的算法,当所分地物类型超过 3 种时,分类准确率低于 80%。

文中从激光回波的理论模型出发,通过推导纯海水表面回波和含有海冰的表面回波的解析模型,对波形采用逐点时间差距离加权计算纯海水回波和含有海冰回波的总振幅差异值,建立一种半解析型的海水、海冰分类方法;与目前绝大部分基于机器学习的分类方法不同,新方法的理论解释性更好。通过机载 LiDAR 在格陵兰北部海冰区的实测点云作为地面类型先验真值,对 GLAS 在该区域实测波形进行基于该方法的分类准确性验证。论文将使得星载激光测高仪回波的地物类型分类方法由目前的基于数值分析为依据向理论解析模型为依据的分类方向延伸,形成一种新的思路和方法。

1 分类理论模型建立

当激光入射至完全由海水构成的海洋表面时,回波波形可以用单高斯函数表示,其中 A_0 为回波振幅, t_0 为时间重心偏移, σ_0 为回波宽度^[14]。此时,由于激光测高仪参数已知,回波振幅 A_0 和宽度 σ_0 由目标参数海面风速主导,回波振幅与能量相关,易受环境参数大气通道散射和吸收的影响,稳定性较差;而回波宽度 σ_0 几乎不受大气通道影响,稳定性较好,更适宜作为给定条件下的标准参数使用。

$$f(t)=A_0 e^{-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma_0^2}} \quad (1)$$

当激光入射至由海水和表面较平坦海冰组合构成的海洋表面时,回波波形可以表示为多个高斯函数的叠加,其中 A_0' 为海水对应的回波振幅, t_0' 为海水对应的时间中心偏移, σ_0' 为海水对应的回波宽度, A_i 为各块海冰对应的回波振幅, t_i 为各块海冰对应的时间中心偏移, σ_i 为各块海冰对应的回波宽度。

$$f(t)=A_0' e^{-\frac{(t-t_0')^2}{2\sigma_0'^2}} + \sum_{i=1}^n A_i e^{-\frac{(t-t_i)^2}{2\sigma_i^2}} \quad (2)$$

文中选取回波宽度 σ_0 作为给定海面风速条件下的标准参数, 通过对比未知地物对应的回波波形与标准海水反射回波波形的振幅差异, 进行海水、海冰地物的分类。对于受大气影响较大的回波振幅 A_0 采取未知地物回波和标准海水回波都进行最大振幅归一化, $A_0=1$, 即, 分类过程中不考虑回波振幅绝对大小的影响, 因绝对振幅大小易受环境因素中大气通道的吸收和散射影响, 仅考虑同一组回波内各个采样点振幅的相对大小; 并且使得时间重心偏移归零(振幅最大值对应的时间赋 0), 即 $t_0=0$; 实际上, 即使海洋表面覆盖部分海冰, 海水的反射波形宽度不变, 只是反射能量相对减小, 因此 $\sigma_0'=\sigma_0$; 假设海冰表面粗糙度和平均斜率与海水表面接近, 则 $\sigma_0=\sigma_i$ 。若光斑照射区域只有一块海冰, 则 $n=1$; 海冰高度为 $H(\text{m})$, 则 $t_1=2H/c$, 其中 c 为光速; 若海冰占整个光斑能量区域百分比为 P , 则 $A_0'=A_0 \times (1-P)$, 由表面粗糙的海冰反射率约为 10%^[15], 海水反射率约为 2%^[14], $A_1=A_0 \times 10\%/2\% \times P=5P$; 其中, 回波振幅 $A_0=1$, 进行最大振幅归一化。则上式可以简化为:

$$f(t)=(1-P)e^{-\frac{t^2}{2\sigma_0^2}}+5Pe^{-\frac{(t-H/0.15)^2}{2\sigma_0^2}} \quad (3)$$

对比完全海水回波与含有一块海冰的海洋表面回波波形, 由公式(4)给出了两组波形按照时间采样点逐点对比之间振幅差异的表达式。

$$D=[e^{-\frac{t^2}{2\sigma_0^2}}-(1-P)e^{-\frac{t^2}{2\sigma_0^2}}-5Pe^{-\frac{(t-H/0.15)^2}{2\sigma_0^2}}] = [Pe^{-\frac{t^2}{2\sigma_0^2}}-5Pe^{-\frac{(t-H/0.15)^2}{2\sigma_0^2}}] \quad (4)$$

但公式(4)的缺陷在于:(1) 两组波形的振幅差异应该有一个差异总参数, 而非一系列离散点的振幅差异;(2) 当激光光斑照射区域内出现小块海冰时, 因海冰高度高于海水, 对应的回波波形在主高斯分量之前会有部分回波能量(参见图 4(c)); 当激光光斑内存在大块海冰, 回波波形将完全偏离单模高斯型回波(参见图 4(d)); 为了凸显海冰因素对回波能量的影响, 对公式(4)得出的波形振幅差异 D , 采用按时间差距离加权逐点计算振幅差异, 得到总振幅差异值 Dis , 由公式(5)所示。

$$\text{Dis} = \int_{-\infty}^{\infty} D^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} [Pe^{-\frac{t^2}{2\sigma_0^2}}-5Pe^{-\frac{(t-H/0.15)^2}{2\sigma_0^2}}]^2 dt \quad (5)$$

通常, 距离加权概念为离中心越远, 权重随距离

增加, 但波形形状是以时间采样点为先后顺序的一系列振幅值表达, 因此这里使用的是时间差距离, 即加权系数为 t^2 。总振幅差异值 Dis 单位应为振幅与采样间隔的平方, 因此文使用其作为分类差异阈值, 该差异值省略了单位信息。

根据已有的海洋表面模型理论, 纯海水表面的回波宽度 σ_0 可由激光发射宽度 σ_f 和海面上方风速 w 计算得出; 而激光测高系统的激光发射宽度在工作期间基本趋于稳定, 通过公式(5), 可以计算在给定风速条件下, 纯海水表面回波与占光斑面积一定比例、具有一定高度的海冰回波的理论加权总振幅差异 Dis , 超过 Dis 的波形认为光斑内出现海冰。

例如, GLAS 系统发射宽度 σ_f 约为 2.7 ns (半波宽 4 ns), 在 $w=2.4 \text{ m/s}$ 风速条件下, 可以根据参考文献[17]的公式(53)计算回波宽度, 当前情况 $\sigma_0 \approx 3 \text{ ns}$, 如果 5%($P=5\%$)的光斑面积内有一块海冰覆盖, 且高度为 $H=0.3 \text{ m}$, 则通过公式(5)计算的加权总振幅差异值为 21.055 7, 该差异值将随着海冰块数 n 、覆盖面积 P 和海冰冰舷高度 H 的增加而增大, 因此设定分类阈值为 21.06, 认为超过此阈值的回波有海冰出现。

2 实测样本的分类验证

地面海水、海冰类型的先验信息由机载激光雷达所采集点云数据获得, 该数据由丹麦技术大学(Danmarks Tekniske Universitet, DTU)在 2004 年 5 月 25 日与 GLAS 系统 0031 号数据包升轨段几乎同时刻获取, 其对应 UTC 时间 138763759~138763766s, 地理位置(83.20~83.54 N, 310.46, 312.71 E), 如图 1 所示的左边航带, 重叠区域长度约 55 km。

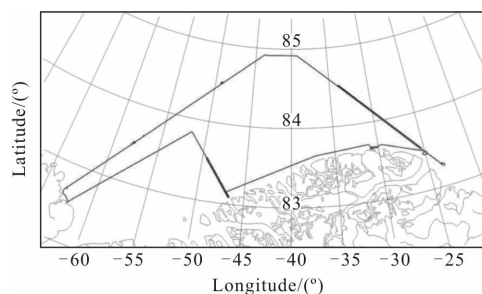


图 1 机载 LiDAR 与 GLAS 系统 0031 升轨在格陵兰北部海域的交叠区域

Fig.1 Overlap region of the airborne LiDAR and GLAS 0031 ascending track in the north waters of north Greenland

以 GLA13 读取的 GLAS 光斑中心经纬度坐标为圆心, 检索 70 m 光斑范围内所有激光雷达点云数据, 并生成 GLAS 激光光斑区域的数字地表模型 (Digital Surface Model, DSM), 用于识别 GLAS 激光

光斑对应是纯海水地形还是含有海冰地形; 在剔除对应 GLA01 数据包中的无效回波数据后, 机载激光雷达点云及 DSM 共计覆盖 GLAS 完整光斑 267 组。如图 2 所示。

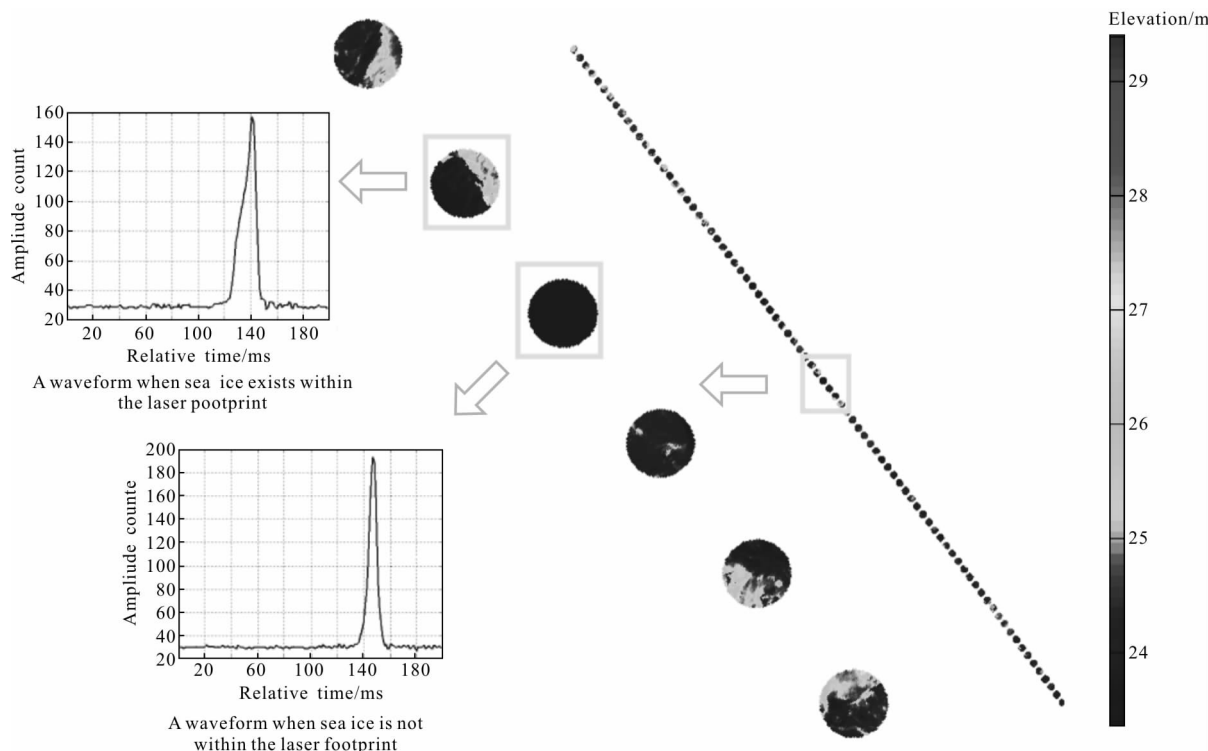


图 2 0031 升轨时, GLAS 连续测量的激光回波、激光脚印及其脚印对应的由机载激光雷达数据生成的地表轮廓

Fig.2 On the 0031 ascending track, laser waveforms measured by GLAS successively, laser footprints and its corresponding surface profiles created by airborne LiDAR data

海面上方风速数据由美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 数据包内插计算获得。提供覆盖全球的 $1^\circ \times 1^\circ$ 空间网格、6h 采样间隔的海面上方风速和风向数据 (如图 3 所示)。根据所处地理位置和测量时刻, 获取

NCEP 于 2004 年 5 月 25 日 12:00AM 和 18:00AM 的数据包, 进行时间线性内插, 空间双线性内插计算对应激光脚点处的海面风速, 所得结果风速在 2.3~2.6m/s 之间。根据参考文献[16], 仿真已知风速条件下的海水标准回波, 并对标准波形进行最大振幅的归一化, 在图 4 中使用深色虚线显示。

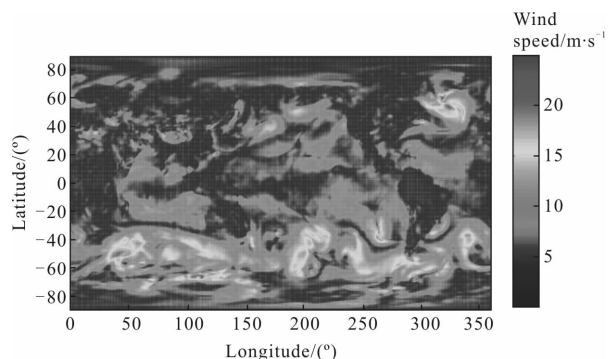


图 3 2004 年 5 月 25 日 NCEP 格林尼治时间 12 点全球表面风速

Fig.3 Global surface wind distribution of NCEP data at

GWT 12AM, 25/05/2004

图 4(a)~(d) 依次展示了典型海水、轻微海冰覆盖 (约 5% 面积被海冰覆盖)、3m 冰舷高覆盖、5m 冰舷高覆盖的海冰 DSM 与波形匹配的对比图。其中, 所有 DSM 都采用相同的高度量化尺度, DSM 高度从 23.5~28.5m, 波形曲线实线代表 GLA01 读取的 GLAS 原始回波波形; 深色虚线代表通过计算对应时刻和地理位置的海面风速, 代入海洋表面回波模型, 仿真得到的 GLAS 系统参数下的模拟波形; 浅色虚线代表使用波形处理算法, 通过噪声估计、噪声抑制、回波参数预估和最小二乘拟合得到的 GLAS 回波高斯拟合波形

(在图 4 中使用浅色虚线显示),用于对 GLAS 回波重心位置提取,进而与模拟波形进行中心平移,以保证两个波形中心完全对称,确保准确计算加权差异值。

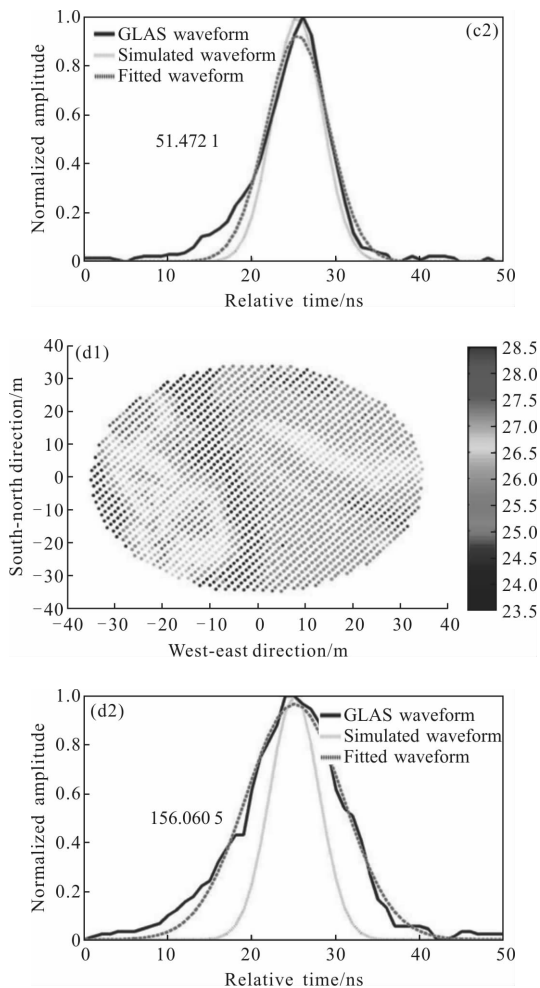
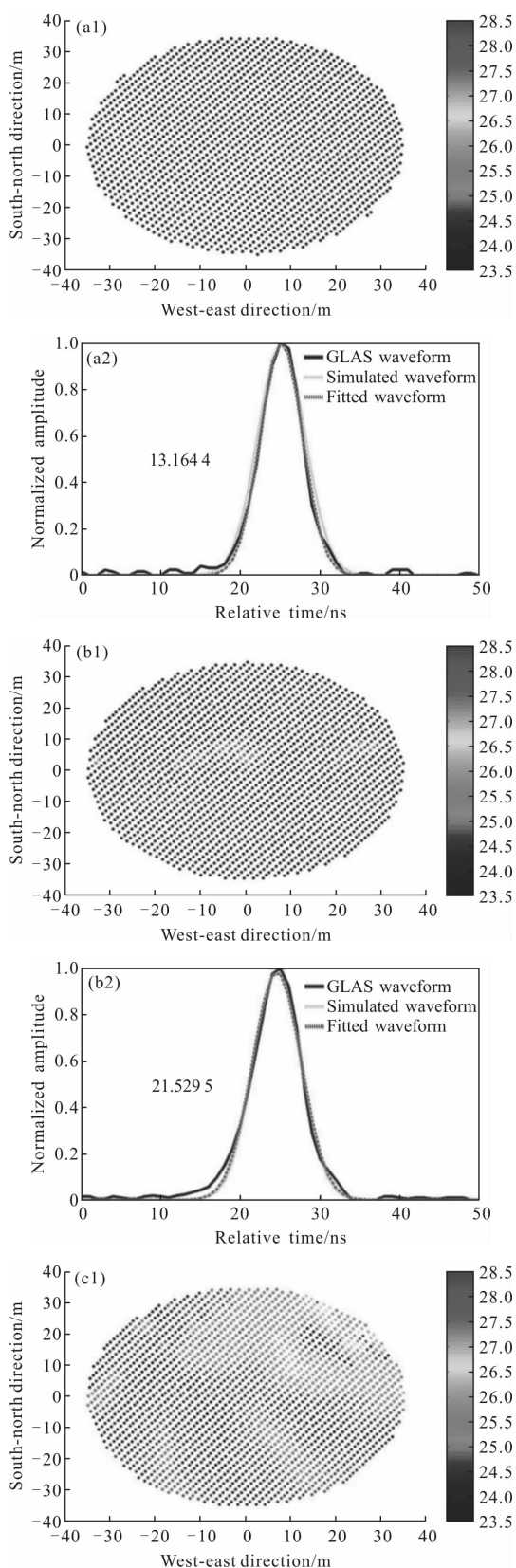


图 4 典型海水((a1)、(a2))、轻微海冰覆盖((b1)、(b2))、3 m 冰舷高覆盖((c1)、(c2))、5 m 冰舷高覆盖海冰((d1)、(d2))DSM 与波形匹配

Fig.4 DSMs and waveforms corresponding to typical waters ((a1),(a2)), slight sea-ice((b1),(b2)), 3 m freeboard sea-ice((c1),(c2)), and 5 m freeboard sea-ice((d1),(d2))

在风速为 2.4 m/s 时,前一节计算 $Dis=21.06$ 为纯海水回波和含有海冰回波的分类阈值,该区域对应的风速在 2.3~2.6 m/s 之间,可以使用 21.06 作为激光回波对应光斑范围内是否含有海冰的分类阈值。图 4(a)中显示,即使海面没有海冰覆盖,通过公式(5)解算的差异值也不为 0,其原因为真实回波波形必定含有混入的随机噪声;图 4(b)中显示,在 GLAS 激光脚点光斑中心有小块海冰存在,对应波形在上升沿与模拟波形有一定的差距,这是由于海冰高度高于海水表面,因此在上升沿波形会略有抬升,该波形对应的差异值为 21.53,恰好超过公式(4)中理论计算的当 5%光斑面积内有一小块海冰覆盖,且高度

为 0.3 m, 则加权振幅差异值为 21.06 的理论阈值; 图 4(d)和(d)中显示当激光脚点内被大块海冰覆盖时, 回波上升沿不但出现抬升, 甚至出现多峰值回波, 这与理论值也相符合。

利用公式(4)的计算标准, 设置差异值 $Dis=21.06$ 为海水和海冰波形的分界阈值, 对 0031 号升轨样本数据的分类结果进行统计, 得到分类总体精度 (Overall Accuracy, OA) 为 $OA=93.63%$, Kappa 系数 $K=0.8481$ 。

对表 1 中分类错误的样本作进一步分析, 部分样本分类错误的原因因为探测器饱和导致, 如图 5 中所示, 波形饱和后, 回波中央区域趋于平顶, 且有塌陷特征, 读取 NASA 官方饱和参数 (GLA05 i_SatNdx), 剔除饱和参数大于等于 3 的样本数, 重新统计分类结果精度如表 2 所示。

表 1 GLAS 0031 号升轨波形数据的地形分类结果

Tab.1 Terrain classification results using waveforms on GLAS 0031 ascending track

Prior terrain type		Classification results (Number, ratio)	
Valid sample number	Sample type	Valid sample number	Sample type
74	Water	71(95.95%)	3(4.05%)
193	Sea-ice	14(7.25%)	179(92.75%)
Overall accuracy		93.63%	
Kappa coefficient		0.8481	

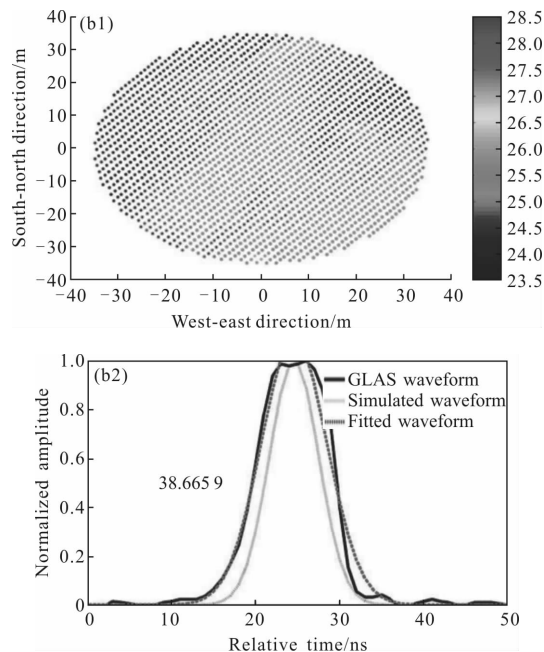
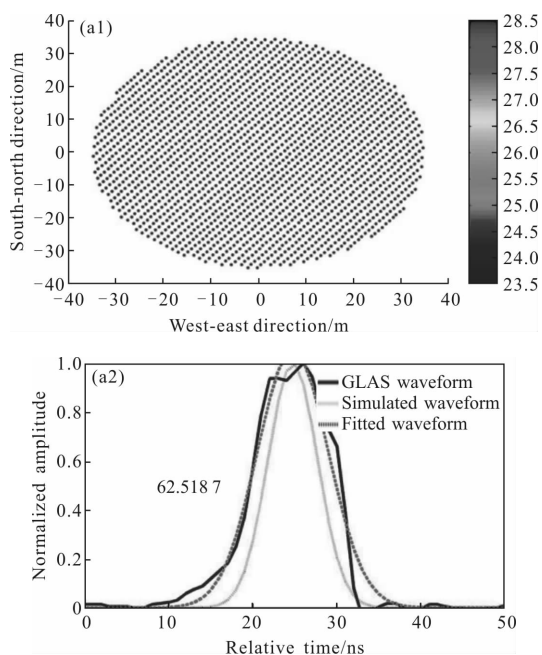


图 5 GLAS 典型的饱和波形及其激光脚点对应的 DSM
Fig.5 Typical saturated waveform of GLAS system and its corresponding DSM of the laser footprint

表 2 GLAS 0031 号升轨波形数据的地形分类结果 (剔除饱和波形)

Tab.2 Terrain classification results using waveforms on GLAS 0031 ascending track after eliminating the saturated waveforms

Prior terrain type		Classification results (Number, ratio)	
Valid sample number	Sample type	Water	Sea-ice
73	Water	70(95.89%)	3(4.11%)
178	Sea-ice	9(5.06%)	169(94.94%)
Overall accuracy		95.22%	
Kappa coefficient		0.8868	

表 2 结果显示, 剔除饱和波形影响后, 对 0031 号升轨样本数据分类, 总体精度为 $OA=95.22%$, Kappa 系数 $K=0.8868$ 。分类结果显示, 单纯依靠实测波形与模拟波形加权差异值计算的方法, 分类总体精度可以达到 95% 以上; 并且, 按照 Landis 和 Koch 的理论, 当 $K>0.8$ 时, 分类精度达到非常好量级。

3 结论

文中建立了一种半解析型的激光测高数据波形

海水、海冰分类方法,在给定激光脉冲发射宽度和海面风速条件下,可以计算理论的海水、海冰分类阈值。激光发射宽度在测高系统器件参数中都会给定,海面风速可以使用气象数据内插获取,这使得该方法具有在极区对海水、海冰地物类型分类的现实可行性。通过机载 LiDAR 在格陵兰北部海冰区的实测点云作为地面类型先验真值,对 GLAS 在该区域实测波形进行基于新方法的分类准确性验证;结果显示,在剔除饱和和波形影响后,分类总体精度 OA 大于 95%,Kappa 系数接近 0.89,具有非常好的分类效果。受制于大足印和电磁波冰雪穿透效应影响,传统微波高度计在极区海域的高程测量受到海冰影响,极区海域平均海平面精度比中低纬度海平面精度低一个量级以上,对建立全球范围的高精度大地水准面有重要影响。获取开阔水域的高精度海面高程数据是提高极区平均海平面精度的瓶颈问题。激光测高仪能够通过波形数据分析识别几十米范围的小规模海冰,获取几乎没有海冰污染的开阔水域高程数据,为提高极区平均海平面获取精度提供高精度基础观测数据。论文将使得星载激光测高仪地物类型分类方法由目前的基于数值分析为依据向理论解析模型为依据的分类方向延伸,与传统通过机器学习的方法不同,具有较好的理论解释性,可以为设计用于极地海冰观测的激光测高仪系统的总体参数设计提供理论支撑。

参考文献:

- [1] Kwok R, Zwally H J, Yi D. ICESat observations of Arctic sea ice: A first look[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(16): L16401.
- [2] Kwok R, Cunningham G F, Manizade S S, et al. Arctic sea ice freeboard from IceBridge acquisitions in 2009: Estimates and comparisons with ICESat [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(C02): C02018.
- [3] Kwok R, Cunningham G F, Zwally H J. Ice, cloud, and land elevation satellite (ICESat) over arctic sea ice: Retrieval of freeboard[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(C12): C12013.
- [4] Farrell S L, Laxon S W, McAdoo D C. Five years of Arctic sea ice freeboard measurements from the Ice, Cloud and land Elevation Satellite [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(C04): C04008.
- [5] Price D, Rack W, Haas C, et al. Sea ice freeboard in McMurdo Sound, Antarctica, derived by surface-validated ICESat laser altimeter data [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118: 3634–3650.
- [6] Renganathan V. Arctic sea ice freeboard heights from satellite altimetry[D]. Calgary: University of Calgary, 2010.
- [7] Kurtz N T, Markus T. Satellite observations of Antarctic sea ice thickness and volume [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(C08): C08025.
- [8] Kwok R, Cunningham G F, Wensnahan M. Thinning and volume loss of the Arctic Ocean sea ice cover: 2003–2008 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114 (C07): C07005.
- [9] Kurtz N T, Markus T, Cavalieri D J, et al. Comparison of ICESat data with airborne laser altimeter measurement over Arctic sea ice [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46: 1913–1924.
- [10] Forsberg R, Skourup H. Arctic Ocean gravity, geoid and sea-ice freeboard heights from ICESat and GRACE [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(21): L21502.
- [11] Molijn R A, Lindenbergh R C, Gunter B C. ICESat laser full waveform analysis for the classification of land cover types over the cryosphere [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(23): 8799–8822.
- [12] Wang X, Cheng X, Li Z, et al. Lake water footprint identification from time-series ICESat/GLAS data [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(3): 333–337.
- [13] Zhou Y, Qiu F, Al-Dosari A, et al. ICESat waveform-based land-cover classification using a curve matching approach [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2015, 36(1): 36–60.
- [14] Ma Yue, Li Song, Zhou Hui, et al. Received waveform model for satellite laser altimeter measuring ocean surface [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(12): 1214005. (in Chinese)
马跃, 李松, 周辉, 等, 星载激光测高仪海洋表面回波计算的理论模型[J]. *中国激光*, 2012, 39(12): 1214005.
- [15] Kattsov V M, Ryabinin V E, Overland J E, et al. Arctic sea-ice change: a grand challenge of climate science [J]. *Journal of Glaciology*, 2011, 56(200): 1115–1121.
- [16] Tsai B M, Gardner C S. Remote sensing of sea state using laser altimeters[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(21): 3932–3940.