

基于机载红外激光海陆混合波形的潮滩水边线提取方法

赵兴磊¹, 高剑飞¹, 周丰年²

1. 山东农业大学 信息科学与工程学院, 泰安 271018;

2. 长江水利委员会水文局长江口水文水资源勘测局, 上海 200136

摘要: 在海陆交接区域, 激光光斑中可能同时存在海洋和陆地, 从而产生海陆混合波形。如果能准确识别出海陆混合波形, 则可以利用这些混合波形来提取水边线的精确位置。本文顾及海陆混合波形的存在, 提出一种基于机载海洋激光雷达 AOL (Airborne oceanic LiDAR) 红外激光的海陆混合波形识别方法, 并进一步提出利用海陆混合波形的潮滩水边线提取方法。首先, 综合提取 AOL 红外激光全波形特征并进行特征降维; 其次, 对 AOL 波形进行模糊分类, 得到隶属度矩阵, 根据 Otsu 最大类间方差法确定海陆混合波形; 再次, 利用 DBSCAN 密度聚类算法对误分类的海陆混合波形进行识别和剔除; 然后, 结合海陆混合波形对应激光点的位置信息, 利用 PAEK 平滑算法得到水边线位置信息。最后, 对激光雷达方程进行扩展, 给出红外激光海陆混合雷达方程的表达形式, 并采用雷达方程理论分析和实测波形数据验证相结合的方式对海洋、陆地、海陆混合波形进行差异分析, 为红外激光光斑内海陆并存引起的海陆混合波形研究提供理论基础。利用 Optech CZMIL 系统采集的实测 AOL 数据集验证了本文红外激光海陆混合波形法以及海陆混合雷达方程的正确性和有效性。与传统的 AOL 高程阈值法相比, 本文提出的 AOL 混合波形法将水边线提取偏差的均值和标准差分别降低了 24.07% 和 9.76%, SSIM 指数提高了 0.031, 为 AOL 潮滩水边线提取提供了一种全新方式。

关键词: 机载海洋激光雷达, 红外激光, 海陆波形分类, 海陆混合波形, 潮滩水边线

中图分类号: P229/P2

引用格式: 赵兴磊, 高剑飞, 周丰年. 2025. 基于机载红外激光海陆混合波形的潮滩水边线提取方法. 遥感学报, 29(11): 3217-3228

Zhao X L, Gao J F and Zhou F N. 2025. Ocean-land interface detection based on the mixed infrared laser waveforms of airborne LiDAR. National Remote Sensing Bulletin, 29(11): 3217-3228 [DOI: 10.11834/jrs.20254299]

1 引言

水边线 OLI (Ocean-Land Interface) 是波动的海面与陆地的瞬时交接线, 是海洋水文、海陆管理资源以及海平面上升等科学研究所需要的基础数据 (Boak 和 Turner, 2005)。然而, 如何以自动化的方式高精度、高分辨率地探测水边线却是一项极富挑战性的任务。潮滩水边线只有高/低平潮时短时稳定, 其他时间不断变化。一个潮汐周期内高/低平潮时水边线分别对应海水到达陆地的最远和最近位置, 其他时刻水边线则在两者之间, 因此高/低平潮时水边线对于水边线动态变化具有代表性。目前, 主要的水边线探测方法包括实地

测量法和图像解译法。由于海岸带、海岛礁周边浅水海域地形变化大、环境复杂, 采用实地测量法效率低、成本高、难度大、风险高 (宿殿鹏等, 2022)。图像解译法经济实用, 覆盖范围广, 但在表面粗糙, 有沉积物悬浮的淤泥质潮滩难以准确确定 (Sekovski 等, 2014)。因此, 如何实现水边线的高精度、高时空分辨率、高效提取仍然是一项亟待解决的难题。

机载海洋激光雷达 AOL (Airborne oceanic LiDAR) 是一种高分辨率、高效、灵活的浅水测量系统 (Guenther 等, 2000; Hildale 和 Raff, 2008; Kinzel 等, 2013; Mandlbürger 等, 2013; Zhao 等, 2017)。由于蓝绿波段激光在海水中的衰减系数

收稿日期: 2024-07-17; 预印本: 2025-02-26

基金项目: 国家自然科学基金(编号:41906166); 山东省自然科学基金(编号:ZR2023MD016)

第一作者简介: 赵兴磊, 研究方向为海岸带地理信息获取理论和应用。E-mail: xingleizhao@sda.edu.cn

较小,具有良好的穿透性,AOL通常发射波长为532 nm的绿激光探测水面和水底。但绿激光存在水面不确定性问题,无法准确探测水面,为此通常利用波长为1064 nm的红外激光精确探测水面(Guenther等,2000; Mandlbürger等,2013)。利用AOL提取水边线方法主要分为基于AOL点云数据的高程阈值法和基于AOL波形特征的海陆波形分类法。由于海面 and 陆地激光点高程存在显著差异,AOL高程阈值法利用点云高程特征区分海洋和陆地,从而提取水边线。利用AOL三维点云能实现高效的海陆分类和水边线提取,然而由于点云的特征数量较少,该方法精度较低(Zhao等,2019)。

AOL可以实现水陆一体化测量,接收水体和陆地反射回波。传统的AOL海陆波形分类将激光波形分为海洋波形和陆地波形,从而实现海陆区分和水边线提取。迄今,红激光波形特征(Guenther等,1994; Sosebee, 2001; Yang等, 2007; Pe'eri和Philpot, 2007; Allouis等, 2010; Pe'eri等, 2011), 红外激光波形特征(Guenther, 1985; Collin和Archambault, 2012), 红外激光和绿激光波形的组合特征(黄田程等, 2017; 邱振戈和曹彬才, 2017; 曹彬才等, 2018)和绿激光波形特征(Liang等, 2023)被用于海陆波形分类。少数AOL系统,如Optech SHOALS系列,有红激光通道来接收红激光波形。其他主流的AOL系统,包括Optech CZMIL、AHAB HawkEye III、RIEGL VQ-880-G和Fugro LADS-MK3,则没有红激光通道,因此基于红激光波形特征的海陆波形分类普适性较差。海洋和陆地的红外激光波形特征存在显著差异,利用红外激光波形特征可以实现高精度海陆波形分类(贺岩等, 2024)。Liang等(2021)提出了一种结合K-means算法和密度聚类DBSCAN(Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise)算法的双聚类方法,利用红外激光波形实现海陆波形分类(Liang等, 2021)。胡善江等(2019)提出了基于深度学习的海陆波形高精度分类方法。王丹菡等(2022)利用原始波形提取的波形特征,采用支持向量机等方法建立分类模型,将波形分为海洋和陆地波形。李莹莹等(2023)评估并分析了24维波形特征的分类效果,并用随机森林分类器进行了波形分类。Liang等(2023)采用多通道投票方法确定波形类别,以综合利用绿激光多

通道波形,基于深度学习方法有效提高了单频AOL系统海陆波形分类精度。赵兴磊等(2024)考虑每个通道的权重信息,基于深度学习提出了一种利用多通道加权投票的卷积神经网络海陆波形分类方法,进一步提高了单频AOL系统海陆波形分类总体精度。

上述方法有效实现了AOL海洋和陆地波形分类。然而,如图1所示,在海陆交接区域,激光光斑中可能同时存在海洋和陆地,从而产生海陆混合波形,但已有海陆波形分类研究没有考虑混合波形的存在。如果能准确识别出海陆混合波形,则可以利用这些混合波形来提取水边线的精确位置。相比绿激光海陆波形分类,红外激光在海陆区分上表现出更好性能。为此,本文从AOL红外激光海陆混合波形的角度提出了一种全新的水边线提取方法,为水边线高精度、高分辨率、自动化获取提供支持。

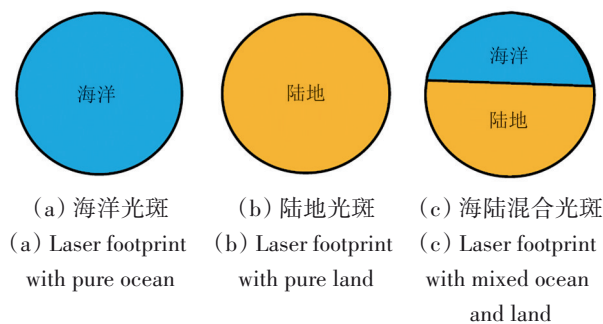


图1 AOL红外激光足迹中海洋和陆地分布示意图
Fig. 1 Illustrations of ocean and land distributions in AOL infrared laser footprints

2 研究方法

监督分类方法能获得较好的分类精度,但需要标记样本数据来训练分类模型。由于海陆混合波形很难直接获取用于模型训练,为此,本文提出了一种考虑激光海陆混合波形的模糊分类-最大类间方差(Otsu)方法,在不借助样本数据的情况下,实现海陆混合波形的识别,并进一步利用海陆混合波形实现水边线位置确定。具体流程如下:首先,综合提取红外激光全波形特征,并进行主成分分析,减少冗余特征;其次,利用降维后的波形特征对AOL波形进行模糊分类,得到模糊隶属度矩阵并根据Otsu方法确定海陆混合波形;然后,利用DBSCAN密度聚类算法对误识别的海陆

混合波形进行识别和剔除。最后, 利用提取的海陆混合波形对应激光点位置信息实现水边线位置确定。

2.1 全波形特征提取和降维

对 AOL 红外激光原始全波形的代表性特征进行综合提取, 用于波形模糊分类。图 2 展示了用于分类的红外激光全波形的 6 个特征, 分别是振幅 M_{IR} , 宽度 W_{IR} , 面积 A_{IR} , 偏度 S_{IR} , 峰度 K_{IR} 和左右面积之比 R_{IR} 。将红外激光全波形前沿起始时刻和后沿结束时刻分别记为 t_1 和 t_2 。为了确定 t_1 和 t_2 的值, 设置以下规则: 从全波形第一个采样点到峰值采样点搜索红外激光全波形, 如果第 i 个采样点及其后续 5 个采样点的振幅连续增加 (即 $y_i < y_{i+1} < y_{i+2} < y_{i+3} < y_{i+4} < y_{i+5}$), 且增加幅度超过一定阈值, 则第 i 个采样点时刻记为 t_1 。从全波形最后一个采样点反向搜索红外波形, 如果第 i 个采样点及其前面 5 个采样点的振幅连续增加 (即 $y_{i-5} > y_{i-4} > y_{i-3} > y_{i-2} > y_{i-1} > y_i$), 且增加幅度超过一定阈值, 则第 i 个采样点时刻记为 t_2 。 t_1 和 t_2 确定后, 可以获得红外激光全波形有效回波区间, 根据有效回波区间的波形特点提取波形特征。表 1 列出了红外激光全波形有效回波区间波形特征及其对应计算算法。

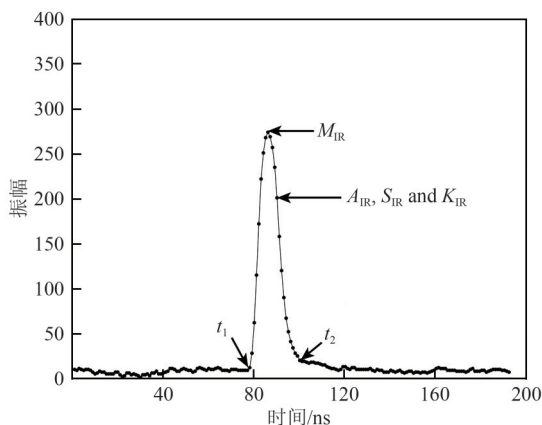


图 2 红外激光全波形特征图

Fig. 2 Characteristics of infrared laser full-waveform

AOL 红外激光波形面积 A_{IR} , 偏度 S_{IR} , 峰度 K_{IR} 和左右面积之比 R_{IR} 的计算公式分别如下:

$$A_{\text{IR}} = \int_{t_1}^{t_2} f_{\text{IR}}(t) dt \quad (1)$$

$$S_{\text{IR}} = \sum_{t_1}^{t_2} \left(\frac{f_{\text{IR}}(t) - \mu_{\text{IR}}}{\sigma_{\text{IR}}} \right)^3 / (t_2 - t_1) \quad (2)$$

式中, μ_{IR} 和 σ_{IR} 分别是 AOL 红外激光原始波形从 t_1 到 t_2 采样值的均值和标准差。

$$K_{\text{IR}} = \sum_{t_1}^{t_2} \left(\frac{f_{\text{IR}}(t) - \mu_{\text{IR}}}{\sigma_{\text{IR}}} \right)^4 / (t_2 - t_1) \quad (3)$$

$$R_{\text{IR}} = \int_{t_1}^{t_p} f_{\text{IR}}(t) dt / \int_{t_p}^{t_2} f_{\text{IR}}(t) dt \quad (4)$$

式中, t_p 是 AOL 红外激光原始波形波峰对应的采样点时刻。

表 1 用于波形分类的红外激光全波形特征

Table 1 Features for waveform classification

特征	介绍
M_{IR}	AOL 红外激光波形振幅
W_{IR}	AOL 红外激光波形宽度, 即 $t_2 - t_1$
A_{IR}	AOL 红外激光波形面积, 即 t_1 到 t_2 构成曲线的面积
S_{IR}	AOL 红外激光波形偏度, 即 t_1 到 t_2 构成曲线的偏度
K_{IR}	AOL 红外激光波形峰度, 即 t_1 到 t_2 构成曲线的峰度
R_{IR}	AOL 红外激光波形的左右面积之比

考虑到 AOL 波形数量大, 所构成的波形特征矩阵在特征方向列数较小, 但波形数方向行数很大, 有必要在波形分类之前进行特征降维, 以减少冗余信息, 减小特征矩阵阶数。主成分分析 PCA (Principal Components Analysis) 是常用的特征降维策略 (Narayanan 等, 2011)。应用 PCA 对原始特征数据集 $F_{n \times p}$ 进行降维, 得到一个新的特征数据集 $R_{n \times q}$, 其中 $q < p$, n 为波形总数, p 和 q 分别为原始特征和降维后特征数量。计算原始特征的主成分系数 $C_{p \times p}$ 和对应的主成分方差 V_p , 提取 q 个方差较大的不相关特征, 形成新的主成分系数 $C_{p \times q}$ 。 q 的选择取决于原始数据集的累计贡献率。降维后特征数据集 $R_{n \times q}$ 为

$$R_{n \times q} = F_{n \times p} C_{p \times q} \quad (5)$$

2.2 基于波形模糊分类-OTSU 方法的海陆混合波形识别

考虑到激光光斑中可能存在的海陆混合情况, 需要进行波形模糊分类。在模糊分类中, 一个样本可以属于多个类别, 这有利于对具有模糊性或中间特性的样本分类。模糊 C 均值 FCM (Fuzzy c-Means) 是一种经典的非监督模糊分类算法, 旨在识别多元特征空间中具有模糊特征的样本组 (Lucieer 和 Lucieer, 2009)。该方法基于以下目标函数 J_m 的最小化:

$$J_m = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k u_{ij}^m \|R_i - c_j\|^2 \quad (6)$$

式中, k 为聚类数, m 为模糊指数, n 为分类波形数, i 为波形编号, u_{ij} 为聚类 j 中波形 i 的隶属度值,

R_i 为第*i*个激光波形的降维特征矩阵, c_j 为聚类*j*的中心, $\|*\|$ 为欧氏距离。

FCM的关键输出是最终的模糊隶属度矩阵, 该矩阵包含了每个激光波形属于海洋和陆地波形类的隶属度。如果某些波形的海洋隶属度与陆地隶属度非常接近, 说明这些波形兼有海洋和陆地波形特性, 则将这些波形定义为海陆混合波形。基于模糊分类的激光波形 ϕ 定义如下:

$$\phi = \begin{cases} \text{陆地波形} & \text{若}(u_{\text{land}} > \varphi) \\ \text{海洋波形} & \text{若}(u_{\text{land}} < 1 - \varphi) \\ \text{海陆混合波形} & \text{若}(1 - \varphi \leq u_{\text{land}} \leq \varphi) \end{cases} \quad (7)$$

式中, u_{land} 表示该波形属于陆地波形类的隶属度, φ 表示海陆混合波形隶属度阈值。 φ 根据隶属度概率密度分布结合最大类间方差法(Otsu算法)确定。Otsu算法(Otsu, 1979)的核心思想是使类别间的差异最大化, 使用最大类间方差来度量这种差异。受海陆环境和隶属度阈值选取的影响, 上述波形分类器存在误分类波形。根据误识别波形对应激光点空间密度低特点, 采用DBSCAN方法(Cui等, 2021)识别误分类的海陆混合波形并剔除, 提高海陆混合波形提取精度。

2.3 基于海陆混合波形的潮滩水边线提取

如图1所示, 水边线上的激光光斑中同时存在海洋和陆地, 导致产生海陆混合波形。反之, 利用识别的海陆混合波形及其对应激光点的位置信息可实现水边线位置确定。由于激光波束存在发散性, AOL实际光斑直径可达2—3 m, 大的光斑直径更容易产生海陆混合波形。AOL点云密度对水边线提取的空间分辨率有影响, 由于AOL点云密度普遍较高, 相邻点间距能达到分米级, 能实现水边线的高空间分辨率提取。基于上述思路, 本文提出基于海陆混合波形的潮滩水边线提取方法。图3为基于海陆混合波形的潮滩水边线提取方法原理图。首先, 利用波形模糊分类-Otsu方法识别海陆混合波形。其次, 结合激光传输距离、位置和姿态、激光扫描角等信息计算海陆混合波形对应激光点的3D点云, 计算后的点云兼有空间位置和海陆属性信息。最后, 采用指数核多项式近似PAEK(Polynomial approximation with exponential kernel)算法(Bodansky等, 2002)作为回归方法, 对海陆混合波形对应激光点进行空间非线性平滑。经过PAEK平滑后, 形成代表水边线的连续曲线。

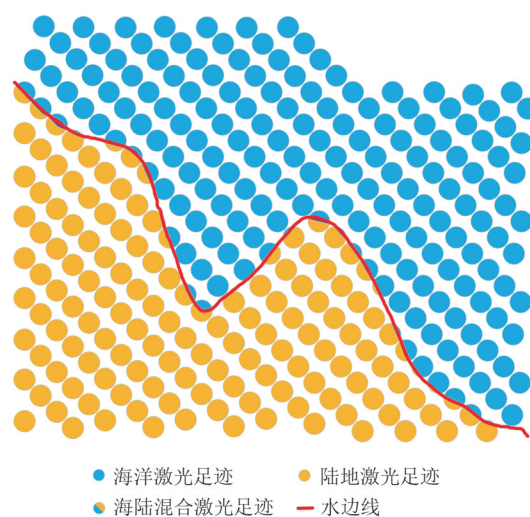


图3 AOL混合波形法提取水边线原理图

Fig. 3 Principle diagram of the AOL mixed waveform method for OLI determination

3 实验与分析

3.1 研究区域与数据采集

采用Optech CZMIL系统采集的实测数据验证本文方法的正确性和有效性。实验区域位于中国江苏省连云港市秦山岛附近水域, 如图4所示。CZMIL系统采用共线同步方式发射红外激光(1064 nm)和绿激光(532 nm), 分别探测海面 and 海底, 波束扫描天底角为20°, 波束扫描模式为圆形扫描, 扫描频率为27 Hz, 脉冲重复频率为10 kHz。CZMIL发射激光脉冲, 探测从海洋和陆地返回的激光回波并数字化保存为完整的激光全波形(Feygels等, 2013)。实验区域内由CZMIL采集了3个条带的的数据, 航迹线及飞行方向如图4红色虚线所示。

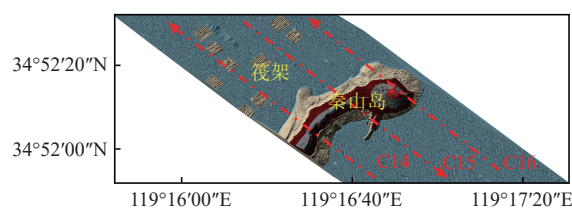


图4 AOL实验区域位置图

Fig. 4 Location of the AOL experimental area

3.2 海陆混合波形提取

3.2.1 全波形特征提取和降维

对图4所示实验区域内CZMIL系统采集获得的原始数据进行解码和处理, 提取了885304个红外

激光全波形,并经过波形检测和点云融合计算获得测区3D点云。按照表1所列特征对每个全波形进行特征提取,并将其放入特征矩阵 $F_{885304,6}$ 。采用PCA法对原始特征矩阵进行降维,削弱特征中的冗余信息。计算原始特征矩阵的相关系数矩阵、主成分贡献率。特征分量的贡献率如图5所示。其中,前3个特征分量的贡献率接近95%,因此选取前三个贡献率大的分量作为降维后的特征分量,形成降维后的特征矩阵 $R_{885304,3}$ 。

在相同计算机运行配置和环境下,相比原始波形特征矩阵,PCA降维的特征矩阵在特征方向列数减小了一半,所需的计算机运行内存和运算时间分别减少了33%和44%(表2)。

3.2.2 波形模糊分类与海陆混合波形确定

为获得各脉冲波形对海洋波形和陆地波形类的隶属度,将 k 设置为2。模糊指数 m 值最优选取区间为 $[1.5, 2]$,其中2最为常用(Pal和Bezdek, 1995)。将 R 作为FCM的输入数据,由此得到各脉

冲波形隶属于海洋和陆地波形类别的隶属度,分别如图6(a)和图6(b)所示。

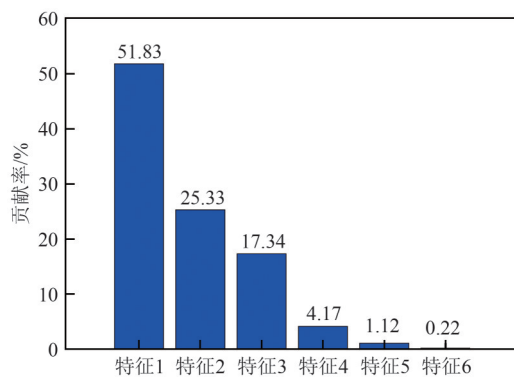


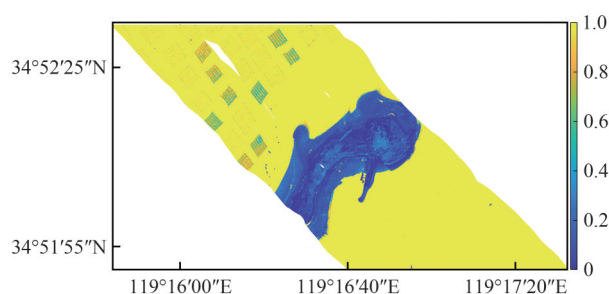
图5 特征分量贡献率

Fig. 5 Contributing rates of feature components

表2 波形特征降维前后对比

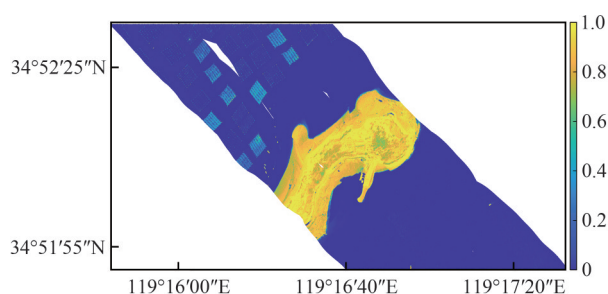
Table 2 Comparisons of raw and reduced waveform features

波形特征	运行内存/MB	运行时间/s
原始全波形特征	60.81	3.448
PCA降维后特征	40.51	1.925



(a) 海洋类别隶属度值

(a) Predicted probability scores for ocean class



(b) 陆地类别隶属度值

(b) Predicted probability scores for land class

图6 每个激光足迹点隶属于海洋和陆地类别的隶属度值空间分布

Fig. 6 Distributions of predicted probability scores of each laser footprint for ocean and land classes

隶属度值位于0—1,表示该波形属于海洋波形或陆地波形的程度。隶属度值越高,说明该波形属于该类波形的程度越高。如果波形对海洋波形类和陆地波形类的隶属度接近,说明这些波形处于中间状态,具有模糊性,则将这些波形标记为海陆混合波形。C14条带中各波形隶属于陆地波形类的隶属度值的概率密度分布如图7所示。陆地波形属于陆地波形类的隶属度值约在0.7—1,而海洋波形属于陆地波形类的隶属度值约在0—0.3,海陆混合波形的隶属度值约在0.4—0.6。根据Otsu算法,分类陆地波形的最佳隶属度阈值为0.55,分类海洋波形的最佳隶属度阈值为0.45,

由此定义海陆混合波形的最佳隶属度阈值区间为0.45—0.55。

3.2.3 误分类的海陆混合波形识别与剔除

采用上述过程对实验区域每个激光波形的类别进行标记,波形对应激光点位置如图8(a)—(c)所示,其中蓝色点、黄色点和紫色点分别代表海洋、陆地和海陆混合波形对应激光点。图8(c)表示波形模糊分类—Otsu确定的海陆混合波形对应激光点的空间分布,大部分点位于海洋和陆地的交接线上,证明了波形模糊分类—Otsu方法能有效提取海陆混合波形。但受复杂环境和隶属度阈值选取影响,上述结果中不可避免地存在误分类波

形。其中,海陆混合波形的误分类波形包括海面筏架和海面气泡回波波形,前者是海面筏体对激光脉冲强反射造成的,后者是海面气泡对激光脉冲强反射造成,导致筏架波形和气泡反射波形被错误地标记为海陆混合波形。根据误分类波形对应激光点空间密度低特点,采用DBSCAN方法对上述结果中的误分类波形点进行识别,如图8(d)–(f)所示。其中,图8(f)中的红色点为采用DBSCAN方法对海陆混合波形点中的误分类点识别结果。将识别的误分类点剔除,得到最终海洋波形,陆地波形,海陆混合波形对应激光点的空间分布分别如图8(g)–(i)所示。其中,如图8(i)所示,采用波形模糊分类–Otsu和DBSCAN修正成功识别出877个位于水边线上的海陆混合波形。

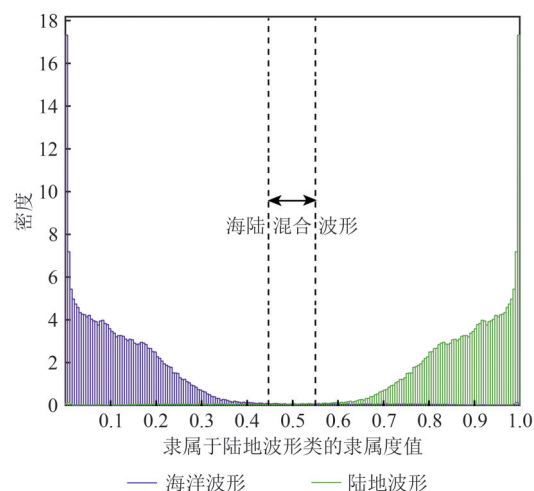


图7 属于陆地波形类的隶属度概率密度分布图

Fig. 7 Probability density distribution of waveform membership

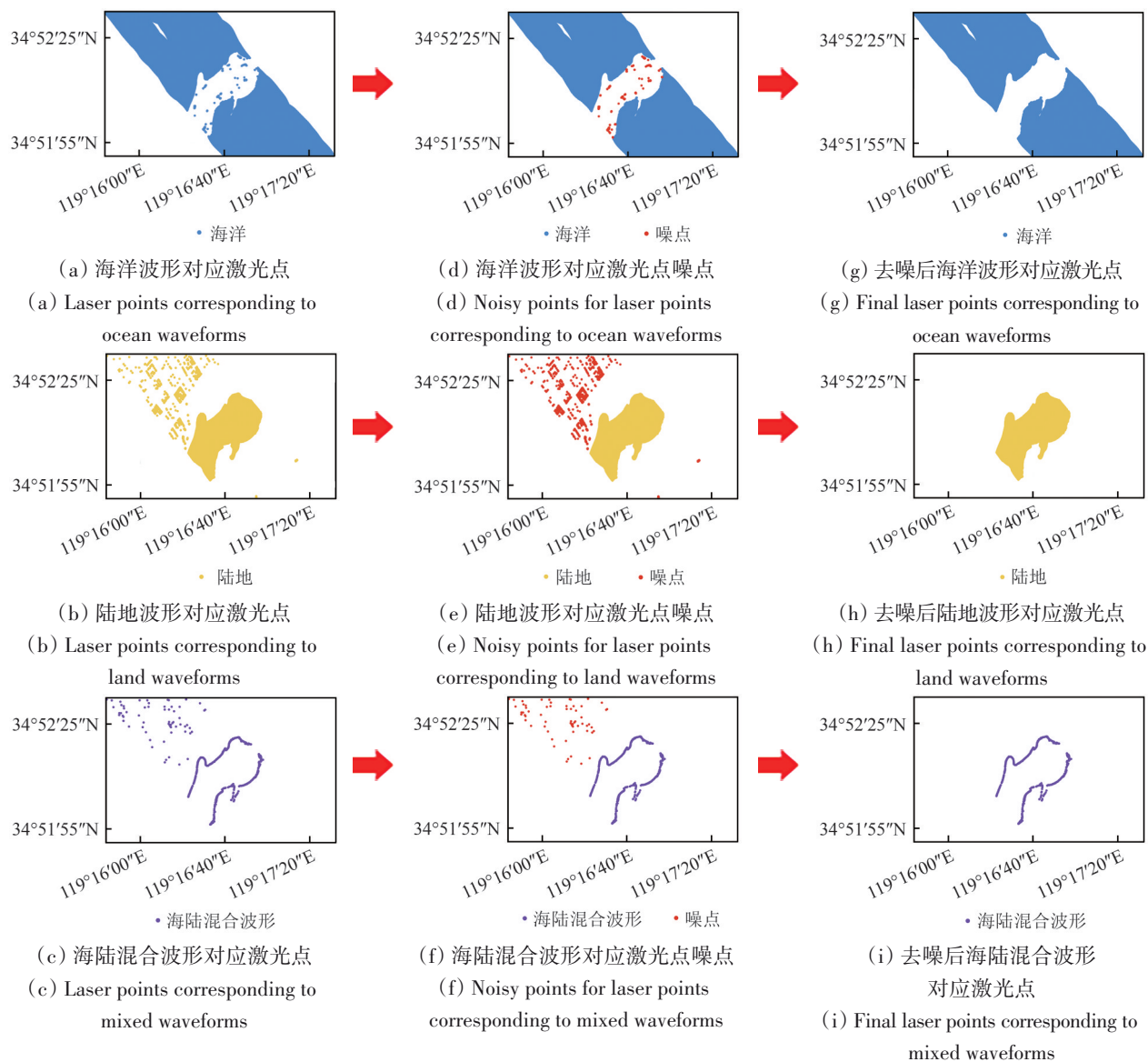


图8 海陆混合波形误分类点的识别与剔除

Fig. 8 Recognition and elimination of misclassified points of corresponding mixed waveforms

3.3 利用海陆混合波形的潮滩水边线位置提取

使用PAEK算法对DBSCAN校正后的海陆混合波形对应激光点进行平滑处理, 形成代表水边线的连续曲线, 如图9所示, 紫色点表示海陆混合波形对应激光足迹的中心位置, 红色曲线表示对紫色海陆混合激光点进行PAEK平滑后确定的水边线。由于研究区域内3条AOL测量条带没有完全覆盖岛屿, 因此提取的水边线并不是一条闭合曲线。

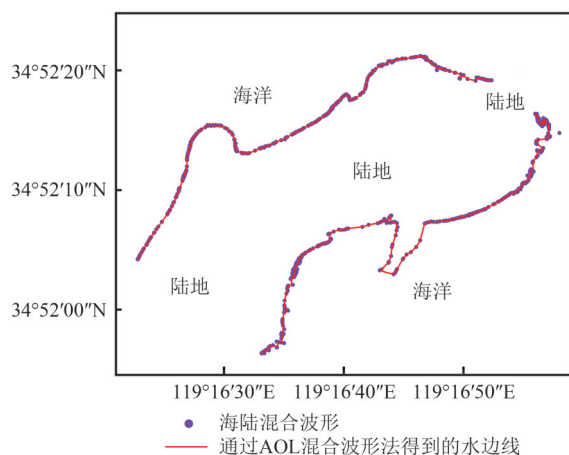


图9 海陆混合波形对应的激光点以及混合波形法确定的水边线

Fig. 9 Laser points corresponding to mixed infrared ocean-land waveforms and the OLI derived by the mixed waveform method

3.4 AOL水边线提取精度比较

图像目视解译方法是一种常用的、可靠的水边线提取方法 (Boak 和 Turner, 2005), 其结果可作为参考值用于本文 AOL 海陆混合波形法和传统 AOL 点云高程阈值法的比较。如图10所示, 利用 CZMIL 3D 点云数据构建具有亚米级空间分辨率的山体阴影图像, 采用传统图像目视解译方法确定的水边线作为参考水边线。将 AOL 高程阈值法 (浅蓝色), 本文提出的 AOL 混合波形法 (黄色) 提取的水边线与参考水边线 (红色) 叠加。使用半正矢 (Haversine) 公式 (Chopde 和 Nichat, 2013) 分别计算上述两种方法提取水边线与参考水边线之间的距离偏差 Δd :

$$\Delta d = 2R \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{B_2 - B_1}{2} \right) + \cos(B_1) \cos(B_2) \sin^2 \left(\frac{L_2 - L_1}{2} \right)} \right) \quad (8)$$

式中, R 为地球半径, B_1 和 B_2 分别为提取点和参考点的纬度, L_1 和 L_2 分别为提取点和参考点的经度。使用距离偏差标准差 STD 比较不同水边线提取方法的精度如下:

$$\text{STD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^s \Delta d_i^2}{s}} \quad (9)$$

式中, s 是比较点对的数量。

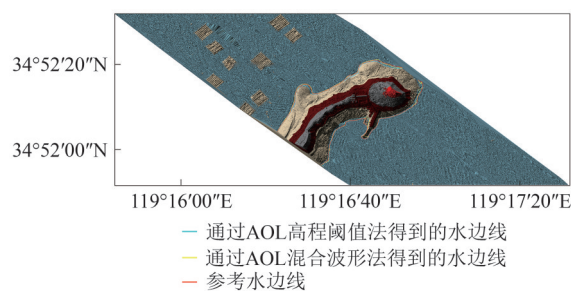


图10 AOL混合波形法, 高程阈值法水边线和参考水边线的叠加

Fig. 10 Superposition of the OLIs obtained by mixed waveform, point elevation methods and reference OLI

结构相似性 SSIM (Structural similarity) 指数 τ (Wang 等, 2004) 可用于衡量两幅 OLI 图像之间的相似性, 其计算方法如下:

$$\tau(x, y) = \frac{(2\mu_x \mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (10)$$

式中, x 和 y 分别代表参考水边线图像和基于 AOL 的水边线图像。 μ_x 和 μ_y 分别表示 x 和 y 平均强度, σ_x 和 σ_y 分别为 x 和 y 标准差, σ_{xy} 是 x 和 y 的协方差, C_1 和 C_2 是用来稳定公式和防止被零除的小常数。SSIM 指数越大, 基于 AOL 的水边线提取方法效果越好。

利用式 (8) 分别计算传统 AOL 高程阈值法和本文海陆混合波形法水边线的提取偏差。提取偏差统计值如表3所示, 与 AOL 高程阈值法得到的水边线相比, 本文 AOL 混合波形法将水边线提取偏差的均值和标准差分别降低了 24.07% 和 9.76%, SSIM 指数提高了 0.031, 证明 AOL 混合波形法优于传统的 AOL 高程阈值法。

如图10所示, 在秦山岛南侧凸起的港口位置, 由于港口附近水边线特征较复杂和密集, 且在港口附近识别的混合波形较少, 导致本文方法在港口位置确定的水边线与参考水边线偏差较大。而在水边线特征比较简单且容易区分的大部分区域, 本文方法 SSIM 系数高于传统的 AOL 高程阈值法。

表3 两种 AOL 水边线提取方法精度对比
Table 3 Comparisons of two AOL-based ocean-land interface detection methods

水边线 提取方法	最大 偏差/m	最小 偏差/m	平均 偏差/m	标准 偏差/m	SSIM
AOL 高程 阈值法	21.1	0	5.4	4.1	0.923
AOL 混合 波形法	25.9	0	4.1	3.7	0.954

4 讨论

4.1 海陆混合激光雷达方程

激光雷达方程表示激光从发射器发射脉冲到接收器接收回波期间与环境相互作用产生的能量辐射传输。对于红外激光对地观测雷达方程和对海观测雷达方程，现有研究均有较为深入的理论研究（Abdallah 等，2012；Wagner 等，2006），但对于海陆混合激光雷达方程的研究还处于空白。为了从理论层面阐明红外激光海陆混合波形受海洋和陆地的影响因子和驱动机制，有必要探索红外激光海陆混合雷达方程的表达形式。

红外激光对地观测雷达方程可表示为

$$P_{\text{land}}^r = \frac{P_0 A_r^2}{4\pi R^4 \beta^2} \sigma_{\text{land}} \eta_{\text{sys}} \eta_{\text{atm}} \quad (11)$$

式中， P_{land}^r 为陆地返回的激光回波功率， P_0 为激光发射功率， A_r 为接收机孔径， β 为激光脉冲发散角， η_{sys} 和 η_{atm} 分别为系统衰减系数和大气传输因子， R 为激光脉冲的传播距离， σ_{land} 为地面目标后向散射截面。

红外激光对海观测雷达方程可表示为

$$P_{\text{ocean}}^r = \frac{P_0 A_r^2}{4\pi R^4 \beta^2} \sigma_{\text{ocean}} \eta_{\text{sys}} \eta_{\text{atm}} \quad (12)$$

式中， σ_{ocean} 为海面后向散射截面。通常情况下，由于海水对于红外波段激光的强吸收作用， σ_{ocean} 显著小于 σ_{land} 。从回波波形振幅角度来看，在仪器测量参数一致且海面无物体情况下，红外激光海面回波振幅显著小于陆地回波振幅。

由于海陆混合波形为光斑内海洋回波波形和

陆地回波波形的线性叠加，红外激光海陆混合雷达方程可表达为

$$P_{\text{mix}}^r = (1 - k) P_{\text{ocean}}^r + k P_{\text{land}}^r \quad (13)$$

式中， k 为比例系数，即光斑内陆地回波功率占总回波功率之比，数值介于 0 和 1。与单纯的对地观测雷达方程和对海观测雷达方程相比，海陆混合雷达方程不仅受仪器测量参数的影响，还同时受陆地和海洋环境参数影响，影响因素和表达形式更为复杂。对于比例系数 k 的确定，可以考虑将 k 值作为待估参数，利用每个原始波形内的多个采样值构建误差方程，通过最小二乘方法确定。

4.2 海洋、陆地和海陆混合波形差异分析

本节从激光雷达方程和原始观测数据两方面入手，进一步揭示不同回波波形表现形式及其差异化。从激光雷达方程角度来看，在仪器测量参数一致且海面无物体等通常情况下，红外激光陆地回波波形振幅显著大于海洋回波波形振幅，即 $P_{\text{land}}^r > P_{\text{ocean}}^r$ 。由此可得：

$$P_{\text{mix}}^r = (1 - k) P_{\text{ocean}}^r + k P_{\text{land}}^r < ((1 - k) P_{\text{land}}^r + k P_{\text{land}}^r = P_{\text{land}}^r) \quad (14)$$

$$P_{\text{mix}}^r = (1 - k) P_{\text{ocean}}^r + k P_{\text{land}}^r > ((1 - k) P_{\text{ocean}}^r + k P_{\text{ocean}}^r = P_{\text{ocean}}^r) \quad (15)$$

即，通常情况下：

$$P_{\text{ocean}}^r < P_{\text{mix}}^r < P_{\text{land}}^r \quad (16)$$

采用本文方法分类提取的海洋、陆地和海陆混合波形对上述理论推导结果进行可视化分析和验证，由于篇幅限制，仅展示部分波形数据，如图 11 所示。其中，陆地波形振幅值均较大，位于 800 采样器计数值左右；海洋波形振幅指均较小，位于 300 采样器计数值左右；而海陆混合波形振幅值介于海洋波形振幅和陆地波形振幅之间，位于 600 采样器计数值左右。实测数据可视化分析结果进一步验证了本文海陆混合激光雷达方程的正确性和实用性。同时如图 11 所示，通过实测波形数据发现，在海面有筏架等物体情况下，红外激光海面回波振幅会接近陆地回波振幅，展现了环境因素对回波波形影响的复杂性。

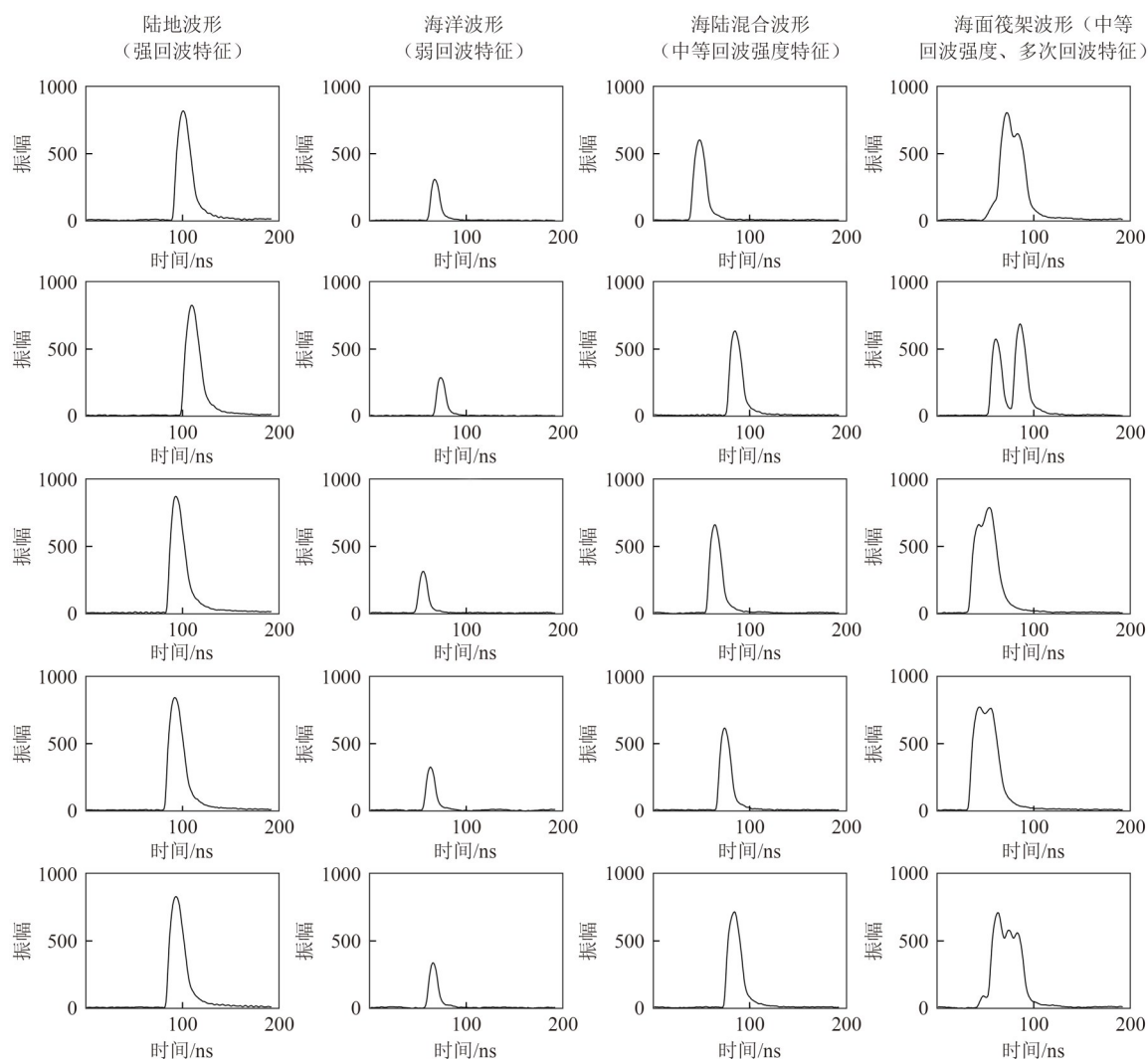


图 11 陆地、海洋、海陆混合、海面筏架的典型红外激光全波形

Fig. 11 Typical infrared laser full-waveforms of pure land, pure ocean, mixed ocean-land, and rafts

5 结 论

AOL 光斑内海陆并存产生海陆混合波形, 对海陆混合波形进行识别具有重要的理论和应用价值。本文针对 AOL 红外激光光斑内海陆并存引起的海陆混合波形进行了识别并应用于水边线提取。主要创新和结论如下:

(1) 本文顾及海陆混合波形的存在, 提出了一种基于波形模糊分类-Otsu 的 AOL 红外激光海陆混合波形识别方法, 并基于识别的海陆混合波形进一步提出了利用海陆混合波形的潮滩水边线提取方法。

采用 Optech CZMIL 系统实测数据集验证了本文混合波形法的正确性和有效性。实验区域内, 本文方法成功识别了 877 个位于水边线上的海陆混合波形。相比传统的 AOL 高程阈值法, 本文提出

的 AOL 混合波形法将水边线提取偏差的均值和标准差分别降低了 24.07% 和 9.76%, SSIM 指数提高了 0.031, 有效提高了水边线提取精度, 从 AOL 海陆混合波形角度为水边线提取提供了一种全新技术和方法。

(2) 本文对红外激光雷达方程进行了扩展, 提出了红外激光海陆混合雷达方程, 为海陆混合波形研究提供了理论基础。基于该方程对红外激光海洋、陆地、海陆混合波形进行了差异分析, 利用实测波形数据可视化分析结果验证了红外激光海陆混合雷达方程的正确性和实用性。

本文混合波形法提取水边线依赖识别的混合波形数量, 在水边线特征较为简单的区域, 即使识别的混合波形数量较少, 也能取得较好的水边线提取精度, 但在水边线特征复杂区域, 混合波形的识别数量将会严重影响水边线提取精度。因

此, 需要进一步挖掘红外激光全波形有效特征以提高海陆混合波形的识别数量和准确度, 进而更好地提取特征复杂和密集区域的水边线。

本文方法实现了红外激光海陆混合波形提取和水边线探测, 适用于采用红外激光和绿激光的双频 AOL 系统或者采用单一红外激光的传统 LiDAR 系统。对于采用单一绿激光的单频 AOL 系统, 绿激光海陆波形分类受绿激光波形叠加和复杂环境等因素影响精度较低, 实现绿激光海陆混合波形提取以及水边线提取是一项亟待解决的难题。为此, 需结合绿激光波形特征及 AOL 多通道特点提高绿激光的波形分类精度, 在此基础上借助本文思路实现绿激光海陆混合波形识别, 进而实现基于绿激光海陆混合波形的潮滩水边线提取。

志 谢 本文实验数据获取得到了长江水利委员会水文局长江口水文水资源勘测局支持, 在此表示衷心的感谢!

参考文献 (References)

- Abdallah H, Baghdadi N, Bailly J S, Pastol Y and Fabre F. 2012. WaLiD: A new LiDAR simulator for waters. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9(4): 744-748 [DOI: 10.1109/LGRS.2011.2180506]
- Allouis T, Bailly J S, Pastol Y and Roux C L. 2010. Comparison of LiDAR waveform processing methods for very shallow water bathymetry using Raman, near-infrared and green signals. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(6): 640-650 [DOI: 10.1002/esp.1959]
- Boak E H and Turner I L. 2005. Shoreline definition and detection: a review. *Journal of Coastal Research*, 21(4): 688-703 [DOI: 10.2112/03-0071.1]
- Bodansky E, Gribov A and Pilouk M. 2002. Smoothing and compression of lines obtained by raster-to-vector conversion//4th International Workshop on Graphics Recognition. Algorithms and Applications. Kingston: Springer: 256-265 [DOI: 10.1007/3-540-45868-9_22]
- Cao B C, Zhu S L, Qiu Z G and Cao B. 2018. Water - land classification for LiDAR bathymetric data based on echo waveform characteristics. *Hydrographic Surveying and Charting*, 38(3): 12-16 (曹彬才, 朱述龙, 邱振戈, 曹斌. 2018. 利用回波波形特征实现激光雷达的水陆分离. *海洋测绘*, 38(3): 12-16) [DOI: 10.3969/j.issn.1671-3044.2018.03.004]
- Chopde N R and Nichat M K. 2013. Landmark based shortest path detection by using A^* and Haversine formula. *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, 1(2): 298-302
- Collin A, Long B and Archambault P. 2012. Merging land-marine realms: spatial patterns of seamless coastal habitats using a multi-spectral LiDAR. *Remote Sensing of Environment*, 123: 390-399 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.03.015]
- Cui H W, Wu W F, Zhang Z J, Han F and Liu Z. 2021. Clustering and application of grain temperature statistical parameters based on the DBSCAN algorithm. *Journal of Stored Products Research*, 93: 101819 [DOI: 10.1016/j.jspr.2021.101819]
- Feygels V I, Park J Y, Wozencraft J, Aitken J, Macon C, Mathur A, Payment A, and Ramnath V. 2013. CZMIL (coastal zone mapping and imaging lidar): from first flights to first mission through system validation//Proceedings of SPIE 8724, Ocean Sensing and Monitoring V. Baltimore: SPIE: 87240A [DOI: 10.1117/12.2017935]
- Guenther G C. 1985. Airborne laser hydrography: system design and performance factors. [2024-07-17]<https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/2811>
- Guenther G C, Cunningham A G, LaRocque P E and Reid D J. 2000. Meeting the accuracy challenge in airborne LiDAR bathymetry//Proceedings of EARSeL-SIG-Workshop LIDAR. Dresden: LiDAR: 1-27
- Guenther G C, LaRocque P E and Lillycrop W J. 1994. Multiple surface channels in Scanning Hydrographic Operational Airborne Lidar SURVEY (SHOALS) airborne lidar//Proceedings of SPIE 2258, Ocean Optics XII. Bergen: SPIE: 422-430 [DOI: 10.1117/12.190084]
- He Y, Tao B Y, Yu J Y, Xu G X and Huang Y F. 2024. Development of airborne LiDAR bathymetric technology and application. *Chinese Journal of Lasers*, 51(11): 1101016 (贺岩, 陶邦一, 俞家勇, 徐广袖, 黄宜帆. 2024. 机载激光测深技术及应用. *中国激光*, 51(11): 1101016) [DOI: 10.3788/CJL240437]
- Hilldale R C and Raff D. 2008. Assessing the ability of airborne LiDAR to map river bathymetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33(5): 773-783 [DOI: 10.1002/esp.1575]
- Hu S J, He Y, Tao B Y, Yu J Y and Chen W B. 2019. Classification of sea and land waveforms based on deep learning for airborne laser bathymetry. *Infrared and Laser Engineering*, 48(11): 1113004 (胡善江, 贺岩, 陶邦一, 俞家勇, 陈卫标. 2019. 基于深度学习的机载激光海洋测深海陆波形分类. *红外与激光工程*, 48(11): 1113004) [DOI: 10.3788/IRLA201948.1113004]
- Huang T C, Tao B Y, Mao Z H, He Y, Hu S J, Wang C C, Yu J Y and Chen P. 2017. Classification of sea and land waveform based on multi-channel ocean lidar. *Chinese Journal of Lasers*, 44(6): 0610002 (黄田程, 陶邦一, 毛志华, 贺岩, 胡善江, 王聪聪, 俞家勇, 陈鹏. 2017. 基于多通道海洋激光雷达的海陆波形分类. *中国激光*, 44(6): 0610002) [DOI: 10.3788/CJL201744.0610002]
- Kinzel P J, Legleiter C J and Nelson J M. 2013. Mapping river bathymetry with a small footprint green LiDAR: applications and challenges. *Journal of the American Water Resources Association*, 49(1): 183-204 [DOI: 10.1111/jawr.12008]
- Li Y Y, Liu Z W, Zhang J K, Wu L L, Ji X and Wang M C. 2023. Classification of full waveform data for monochromatic airborne LiDAR bathymetry based on waveform morphological features. In-

- frared and Laser Engineering, 52(9): 20230096 (李莹莹, 刘子维, 张静坤, 吴琳琳, 纪雪, 王明常. 2023. 基于波形形态特征的单频机载激光雷达测深全波形数据分类. 红外与激光工程, 2023, 52(9): 20230096) [DOI: 10.3788/IRLA20230096]
- Liang G, Zhao X L, Zhao J H and Zhou F N. 2021. Feature selection and mislabeled waveform correction for water-land discrimination using airborne infrared laser. Remote Sensing, 13(18): 3628 [DOI: 10.3390/rs13183628]
- Liang G, Zhao X L, Zhao J H and Zhou F N. 2023. MVCNN: a deep learning-based ocean-land waveform classification network for single-wavelength LiDAR bathymetry. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 16: 656-674 [DOI: 10.1109/JSTARS.2022.3229062]
- Lucieer V and Lucieer A. 2009. Fuzzy clustering for seafloor classification. Marine Geology, 264(3/4): 230-241 [DOI: 10.1016/j.margeo.2009.06.006]
- Mandlbauer G, Pfennigbauer M and Pfeifer N. 2013. Analyzing near water surface penetration in laser bathymetry-A case study at the River Pielach//ISPRS Annals of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Antalya: [s. n.]: 175-180 [DOI: 10.5194/isprsannals-II-5-W2-175-2013]
- Narayanan R, Sohn G, Kim H B and Miller J R. 2011. Soft classification of mixed seabed objects based on fuzzy clustering analysis using airborne LIDAR bathymetry data. Journal of Applied Remote Sensing, 5(1): 053534 [DOI: 10.1117/1.3595267]
- Otsu N. 1979. A threshold selection method from gray-level histograms. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 9(1): 62-66 [DOI: 10.1109/TSMC.1979.4310076]
- Pal N R and Bezdek J C. 1995. On cluster validity for the fuzzy c-means model. IEEE Transactions on Fuzzy systems, 3(3): 370-379 [DOI: 10.1109/91.413225]
- Pe'eri S, Morgan L V, Philpot W D and Armstrong A A. 2011. Land-water interface resolved from airborne LIDAR bathymetry (ALB) waveforms. Journal of Coastal Research, 62: 75-85 [DOI: 10.2112/SI_62_8]
- Pe'eri S and Philpot W. 2007. Increasing the existence of very shallow-water LIDAR measurements using the red-channel waveforms. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 45(5): 1217-1223 [DOI: 10.1109/TGRS.2007.894584]
- Qiu Z G and Cao B C. 2017. Water-land classification method for airborne LiDAR bathymetric data//Proceedings of China Inertial Technology Society. Beijing: 325-335 (邱振戈, 曹彬才. 2017. 机载双频激光雷达水陆回波分类方法//中国惯性技术学会高端前沿专题学术会议—钱学森讲坛: 天空海一体化水下组合导航会议论文集. 北京: 钱学森空间技术实验室, 中国惯性技术学会天空海一体化导航与探测专业委员会: 328-338)
- Sekovski I, Stecchi F, Mancini F and Del Rio L. 2014. Image classification methods applied to shoreline extraction on very high-resolution multispectral imagery. International Journal of Remote Sensing, 35(10): 3556-3578 [DOI: 10.1080/01431161.2014.907939]
- Sosebee C R. 2001. Improvement of the Land/Water Discrimination Algorithm for the US Army Corps of Engineers Scanning Hydrographic Operational Airborne Lidar System. Ithaca: Cornell University
- Su D P, Yang F L, Chen L, Wang S Q, Chen Y and Chen T. 2022. Feasibility analysis of UAV-airborne LiDAR bathymetry system for coastal zone mapping. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 41(5): 11-20 (宿殿鹏, 阳凡林, 陈亮, 王仕强, 陈雨, 陈涛. 2022. 无人机载 LiDAR 测深系统进行海岸带测绘的可行性分析. 山东科技大学学报(自然科学版), 41(5): 11-20) [DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2022.05.002]
- Wagner W, Ullrich A, Ducic V, Melzer T and Studnicka N. 2006. Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 60(2): 100-112 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2005.12.001]
- Wang D D, Xing S, Xu Q, Lin Y Z and Li P C. 2022. Automatic sea-land waveform classification method for single-wavelength airborne LiDAR bathymetry. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 51(5): 750-761 (王丹韵, 邢帅, 徐青, 林雨准, 李鹏程. 2022. 单频机载激光测深海陆回波自动分类方法. 测绘学报, 51(5): 750-761) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2022.20200314]
- Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R and Simoncelli E P. 2004. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. IEEE Transactions on Image Processing, 13(4): 600-612 [DOI: 10.1109/TIP.2003.819861]
- Yang E, Larocque P, Guenther G, Reid D, Pan W B and Francis K. 2007. Shallow water depth extraction-progress and challenges//U. S. Hydrographic Conference. [s.l.]: [s.n.]: 1-13.
- Zhao J H, Zhao X L, Zhang H M and Zhou F N. 2017. Shallow water measurements using a single green laser corrected by building a near water surface penetration model. Remote Sensing, 9(5): 426 [DOI: 10.3390/rs9050426]
- Zhao X L, Liang G, Zhao J H and Zhou F N. 2024. Ocean-land waveform classification based on multichannel weighted voting of airborne green laser. Laser and Optoelectronics Progress, 61(9): 0901004 (赵兴磊, 梁刚, 赵建虎, 周丰年. 2024. 利用多通道加权投票的机载绿激光海陆波形分类. 激光与光电子学进展, 61(9): 0901004) [DOI: 10.3788/LOP223239]
- Zhao X L, Wang X Y, Zhao J H and Zhou F N. 2019. Water-land classification using three-dimensional point cloud data of airborne LiDAR bathymetry based on elevation threshold intervals. Journal of Applied Remote Sensing, 13(3): 034511 [DOI: 10.1117/1.JRS.13.034511]

Ocean–land interface detection based on the mixed infrared laser waveforms of airborne LiDAR

ZHAO Xinglei¹, GAO Jianfei¹, ZHOU Fengnian²

1. College of Information Science and Engineering, Shandong Agricultural University, 61 Daizong Street, Tai'an 271018, China;

2. Survey Bureau of Hydrology and Water Resources of Yangtze Estuary, Shanghai 200136, China

Abstract: Ocean-Land Interfaces (OLIs) are instantaneous boundaries between fluctuating ocean surfaces and land and provide fundamental information for scientific research on ocean hydrology, ocean-land resource management, and sea level rise. However, detecting OLIs with high accuracy and resolution in automated manners is a challenging task. Airborne oceanic LiDARs (AOLs) are high-resolution, efficient, and flexible measurement systems that can be used for integrated ocean and land measurements. In areas where the ocean meets land, both ocean and land may exist in the laser spot of AOL, resulting in mixed ocean-land waveforms. If these mixed waveforms can be accurately identified, they can be used to detect the precise location of the ocean-land interface.

Considering the existence of mixed ocean-land waveforms, a mixed waveform method based on AOL mixed ocean-land waveforms is proposed for ocean-land interface determination in this paper. First, the waveform features of the AOL infrared lasers are extracted, and principal component analysis is performed to reduce redundant features. Second, the waveform features are used to classify the AOL waveforms to obtain a membership matrix, and the Otsu method is used to determine the mixed ocean-land waveforms. Third, the DBSCAN algorithm is used to identify and eliminate misclassified mixed waveforms. Fourth, the PAEK algorithm is applied to smooth the laser points corresponding to the mixed ocean-land waveforms and output the ocean-land interface. Finally, the expression of the infrared laser-radar equation for mixed ocean and land is provided, and a method combining theoretical analysis and measured data verification is used to analyze the differences between ocean, land, and mixed ocean and land waveforms.

The correctness and effectiveness of the methods proposed in this paper were verified via raw AOL datasets collected by the Optech CZMIL system. Compared with the traditional AOL elevation threshold method, the proposed AOL mixed waveform method reduced the mean and standard deviation of the ocean-land interface bias by 24.07% and 9.76%, respectively, and improved the SSIM index by 0.031, providing a new approach for detecting the ocean-land interface on tidal flats via AOL.

The coexistence of water and land within AOL laser spots generates mixed ocean-land waveforms, and identifying these mixed waveforms has important theoretical and practical value. This study proposes an identification method for infrared laser mixed waveforms based on waveform fuzzy classification and Otsu threshold determination and an ocean-land interface extraction method using those identified mixed waveforms. Furthermore, this study extends the laser-radar equation by proposing an infrared laser-radar equation for infrared laser interactions with mixed ocean and land, providing a theoretical basis for studying mixed infrared laser waveforms. On the basis of this equation, a differential analysis was conducted on the ocean, land, and mixed ocean-land waveforms. The correctness and practicality of the infrared laser-radar equation for mixed ocean and land were verified via visualization analysis results of raw waveform data.

Key words: airborne oceanic LiDAR, infrared laser, ocean-land waveform classification, mixed ocean-land waveform, ocean-land interface

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41906166); Shandong Provincial Natural Science Foundation (No. ZR2023MD016)