

基于多通道海洋激光雷达的海陆波形分类

黄田程¹, 陶邦一¹, 毛志华¹, 贺岩², 胡善江², 王聪聪³, 俞家勇⁴, 陈鹏¹

¹国家海洋局第二海洋研究所卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 浙江 杭州 310012;

²中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800;

³浙江大学计算机科学与技术学院, 浙江 杭州 310013;

⁴山东科技大学测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590

摘要 针对国产机载激光雷达测深系统海陆波形分类识别的需求, 基于多通道海洋激光雷达波形数据的特点, 通过提取多通道波形的特征参数, 采用支持向量机的方法构建分类模型对海陆波形进行分类。通过检验结果证明, 该分类方法总体精度和 Kappa 系数分别达 99.03% 和 0.9805。该方法海陆波形分类精度满足工程应用需求, 适用于国产机载激光雷达测深系统的波形分类处理, 为后续深度计算过程中水体介质光速校正和潮汐波浪改正奠定基础。

关键词 遥感; 激光雷达; 海陆; 波形分类; 支持向量机

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0610002

Classification of Sea and Land Waveform Based on Multi-Channel Ocean Lidar

Huang Tiancheng¹, Tao Bangyi¹, Mao Zhihua¹, He Yan², Hu Shanjiang²,
Wang Congcong³, Yu Jiayong⁴, Chen Peng¹

¹State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography,
State Oceanic Administration, Hangzhou, Zhejiang 310012, China;

²Shanghai Key Laboratory of Solid-State Laser and Application Technology, Shanghai Institute of Optics and
Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

³College of Computer Science and Technology, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310013, China;

⁴College of Surveying and Mapping Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology,
Qingdao, Shandong 266590, China

Abstract To solve the problem of sea and land waveform classification for domestic airborne lidar bathymetric system, support vector machine method is used to build the model for classification of sea and land waveform. This method is based on the features of multi-channel ocean lidar waveform data, and characteristic parameters of multi-channel waveform are extracted. The validation results indicate that overall accuracy and Kappa coefficient of the classification method are 99.03% and 0.9805, respectively. The accuracy of the sea and land waveform classification of the proposed method is good enough for the engineering application. And it is suit for the waveform classification treatment of domestic airborne lidar bathymetric system. Which can lay the foundation for correcting the velocity of light in the water medium during the depth calculation procedure, tide and wave correction.

Key words remote sensing; lidar; sea and land; waveform classification; support vector machine

OCIS codes 280.3640; 010.3640; 010.4450; 010.1350; 010.0280

收稿日期: 2016-10-24; 收到修改稿日期: 2017-03-06

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项任务(2013YQ120343)、国家重点研发计划(2016YFC1400901)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(QNYC201602)

作者简介: 黄田程(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光数据处理、模式识别方面的研究。E-mail: njuhtc@163.com

导师简介: 陶邦一(1983—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事海洋光学、海洋激光遥感等方面的研究。

E-mail: taobangyi@sio.org.cn(通信联系人)

1 引 言

机载激光雷达测深系统已经成为在浅海、岛礁、暗礁以及船只无法安全到达的水域进行水深测量的有效手段^[1-4]。目前国际上具有代表性的产品有加拿大的海岸带测绘成像雷达(CZMIL)系统和瑞典的 Hawk Eye 系统等^[3,5]。在国内,华中科技大学^[3]和中国科学院上海光学精密机械研究所^[6-7]等单位已开展了机载激光雷达测深系统的研制。2013年,中国科学院上海光学精密机械研究所又联合国家海洋局第二海洋研究所、山东科技大学等单位开展了机载双频海洋激光雷达产品化的工作。目前在硬件水平上已接近国外产品,但在处理软件方面,关键的海洋激光雷达波形处理方法的成熟度与国际同类型产品还有差距。

海洋激光雷达波形处理方法与陆地激光雷达不同,并且更加复杂^[8]。这是因为在进行陆地测绘时,空气对激光传播的影响几乎可以忽略,陆地波形通常被认为是多高斯回波的叠加,而激光在海洋中传播时,受到水-气粗糙随机界面和水体吸收散射等的调制作用,从而出现复杂的脉冲展宽和不同速率的回波强度指数衰减等现象,导致波形呈现复杂的非多高斯分布。同时在最终点云生成时,还要增加水体光速和折射路径校正以及潮汐波浪改正等工作^[9-10]。因此为了能够有针对性地对陆地波形和海洋波形采用不同的处理方法,需要首先进行海洋波形和陆地波形的分类。

目前国内波形数据处理研究主要集中在海洋波形分解和海底回波提取方法研究^[11-14],但忽视了对陆地和海洋不同类型波形分类的分析研究。而在国际上,Pe'eri S等^[15]总结了基于波形本身的分类算法,第一类算法如Collin A等^[16]提出的以近红外回波是否饱和和作为区分海陆波形的依据,而国产雷达的实验结果表明在1064 nm通道回波并不存在饱和现象;第二类算法则是通过增加特殊通道(如532 nm激发的647 nm水体拉曼散射通道或者532 nm的偏振测量通道^[17])来区分海陆波形。但是增加上述通道时要求更大功率的激光光源和更加复杂的接收装置,会增加硬件开发的复杂程度和成本,目前国产激光雷达并未采用这些算法。另外,国外的主要激光雷达生产商(如Optech公司和AHAB公司等)出于商业保密原因并未公开具体方法,故国产激光雷达海陆波形分类算法需自主开发。

因此,本文研究目标是建立适用于国产多通道海洋激光雷达波形数据特点的海陆波形分类方法,拟利用国产多通道海洋激光雷达的多通道优势,通过提取不同通道波形的特征参数构建特征向量,采用支持向量机(SVM)构建分类模型对海陆波形进行分类。

2 数据与方法

2.1 实验数据介绍

实验数据由中国科学院上海光学精密机械研究所研制的机载双频激光雷达系统所获得。该系统具有1064 nm近红外海表通道(简称近红外通道)、倍频后532 nm绿光浅水通道(简称绿光通道)及绿光深水通道,并采用卵形扫描方式,扫描角度为 $\pm 15^\circ$,激光重频1 kHz,激光脉宽为2 ns^[18]。数据来源于该系统于2015年12月在海南三亚附近水域实验获得的双频激光雷达波形原始数据。获取的原始数据包括近红外通道、绿光通道回波波形等激光波形数据,以及相关的定位惯导数据。

实际上,激光雷达获取的回波波形主要可以表示为两个量的卷积形式^[19]

$$P_E(t) = P_T(t) * H(t), \quad (1)$$

式中 t 为系统与地物之间的时间, $P_E(t)$ 为回波波形, $P_T(t)$ 为发射波形, $H(t)$ 为地物的响应函数,*为卷积运算符。激光雷达系统发射波形为高斯脉冲,与地物作用后获取的海洋与陆地的典型波形 $P_E(t)$ 如图1所示。激光波形主要分为海洋和陆地两大类,但是这两类波形在各自类别中存在的更为复杂的子类型是造成海陆波形混淆的主要原因,这增加了波形分类的复杂性。其中典型的陆地回波有两种:1)裸土、海滩、建筑物等非森林地物的绿光和近红外通道波形只有单个回波,是典型的陆地波形[图1(a)];2)森林波形较为复杂,绿光和近红外通道波形产生多个回波,波形的峰值能量大,上升沿和下降沿都很陡峭[图1(b)]。而典型的海洋回波也有两种:1)浅水回波波形[图1(c)],将此类波形定义为绿光通道波形海表信号和海底信号混叠在一起,呈单个波峰的回波;2)深水回波[图1(d)],其绿光通道波形呈典型的双峰状结构,第一峰为海面回波,第二峰为海底回波,双峰之间为以指数方式衰减的水体散射信号,波形的上升沿陡峭、下降沿较为平

缓,呈右偏态;海洋回波的近红外通道波形呈单个波峰,上升沿和下降沿都很陡峭。总的来说,由图 1 可以得出波形的复杂性:从陆地角度,多冠层森林会出现多个回波可能会跟深水回波出现混淆;从海洋波形角度,浅水波形海表信号和海底信号混叠在一起,会和非森林回波出现混淆。因此,海陆波形分类是一个复杂的问题,需要通过提取不同通道波形的特征参数对波形分类。

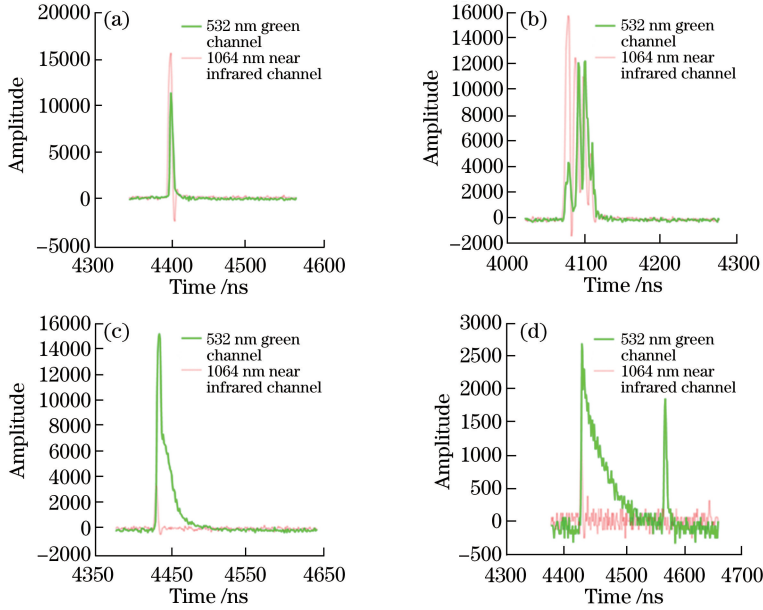


图 1 (a) 裸土、海滩、建筑物等非森林地物回波;(b) 森林回波;(c) 浅水回波;(d) 深水回波
Fig. 1 (a) Bare soil, seabeach, buildings and some other non-forest echo; (b) forest echo; (c) shallow-water echo; (d) deep-water echo

2.2 分类方法

根据(1)式对海陆波形的回波特征及产生原因的分析可知,由波形获得的地物响应函数 $H(t)$ 实际上是表征地物类型的物理参数,因此分类模型主要针对 $H(t)$ 进行构建,主要分类模型构建步骤如下:

1) 通过对原始波形的窗口回波之后某固定位置开始取得的高斯白噪声样本,计算其平均值及 5 倍标准差之和作为阈值,从雷达出射窗口位置的回波位置开始,当后续波形中连续 5 次高于阈值的信号作为有效波形起始参考位置,从而截取绿光通道和近红外通道的有效波形,分别为 $[P_g(t_1) \cdots P_g(t_m)]$ 和 $[P_{ir}(t_1) \cdots P_{ir}(t_n)]$ (简化为 $[P_g(1) \cdots P_g(m)]$ 和 $[P_{ir}(1) \cdots P_{ir}(n)]$)。然后,使用理查德森-露西去卷积算法^[14] 进行去卷积去噪,获得地物的响应函数 $[H_g(1) \cdots H_g(m)]$ 和 $[H_{ir}(1) \cdots H_{ir}(n)]$;

2) 提取绿光通道和近红外通道波形数据的特征参数,组合构建不同维数的特征向量 x ,其中,多通道的特征提取是对海陆波形分类的关键;

3) 采用支持向量机方法构建不同维数特征参数的分类模型;

4) 利用测试样本对构建的分类器进行结果检验。

2.2.1 特征选取

基于对大量海陆波形特征的分析,选择以下 6 个特征参数,如表 1 所示。其中绿光通道的特征参数 4 个,近红外通道 2 个。各特征参数的计算方法和其所针对的海陆波形特征差异将进行详细介绍。

表 1 特征参数表

Table 1 Feature parameters table

Item	Value
Channel	532 nm green channel 1064 nm near infrared channel
Feature parameter	W_f, S_a, S_k, K_u R_{IG}, W_{ir}

1) 首个回波波宽(W_f)

定义首个回波 $[H_g(m_1) \cdots H_g(m_2)]$ 的波宽 $W_f = (m_2 - m_1)$ 来描述不同地物的波形的展宽程度,其中

($m_1 \geq 1$ 且 $m_2 \leq m$)。从系统接收到的首个回波可以看出,对于陆地的回波,首个回波与出射激光的波形相似,展宽程度较小。海洋深水区域回波展宽明显,主要来自水体散射信号的叠加作用。使用首个回波波宽能够有效区分以上波形,但对于海洋浅水区域回波,海表信号和海底信号混叠在一起,会与多冠层森林回波出现混淆。

2) 归一化曲线下面积(S_a)

同时使用自定义的归一化曲线下面积 S_a 在二维尺度上描述不同地物的波形的展宽程度。由于水体散射信号相叠加,无论海洋浅水回波还是深水回波得到的 S_a 值较陆地回波的 S_a 值都偏大。归一化的目的是为了减小回波强度的影响,回波强度受多参数的影响导致差异较大,如飞行的高度,扫描角度等,归一化后的曲线更能够体现海陆波形不同的形状特征。 S_a 的计算公式为

$$S_a = \frac{1}{2} \sum_{i=m_1}^{m_2-1} \left\{ \frac{H_g(i+1) + H_g(i)}{\max[H_g(m_1) \cdots H_g(m_2)]} \right\} \quad (2)$$

3) 偏度(S_k)

对于首个回波 $[H_g(m_1) \cdots H_g(m_2)]$,使用偏度 S_k 用于描述其偏移程度^[16]。绿光通道接收的首个回波波形与出射激光脉冲波形相似,呈对称形态,偏度值接近于0。而海面回波呈现右偏态,较陆地回波 S_k 值偏大。 S_k 的计算公式为

$$S_k = \left\{ \frac{1}{m_2 - m_1} \sum_{i=m_1}^{m_2} \left[\frac{H_g(i) - \bar{H}_g}{\sigma} \right]^3 \right\}, \quad (3)$$

式中 \bar{H}_g, σ 分别为 $[H_g(m_1) \cdots H_g(m_2)]$ 的均值和标准差。

4) 峰度(K_u)

对于首个回波 $[H_g(m_1) \cdots H_g(m_2)]$,使用峰度 K_u 来描述其平坦程度^[16]。正态分布的峰度为3,峰度大于3则表示较为平坦的波形,峰度小于3则表示较为陡峭的波形。海洋回波较陆地回波波形平缓,尤其是海洋浅水回波,由于海表信号和海底信号混叠在一起, K_u 值偏大,因此得以区分。 K_u 的计算公式为

$$K_u = \left\{ \frac{1}{m_2 - m_1} \sum_{i=m_1}^{m_2} \left[\frac{H_g(i) - \bar{H}_g}{\sigma} \right]^4 \right\} \quad (4)$$

5) 近红外与绿光强度比值(R_{IG})

参照陆地地物使用多波段进行分类的方法,利用光谱特征近红外与绿光强度最大值的比值 R_{IG} 来度量近红外通道对不同地物的敏感程度。陆地地物如森林、裸土对近红外波段的反射较强, R_{IG} 值偏大,海洋在无镜面反射的情况下,对近红外波段的反射较弱, R_{IG} 值偏小。同时激光回波的强度不仅与反射介质的特性有关,还同激光的入射角度、激光脉冲作用的距离等因素相关^[20],需用每次波形记录中出射窗口的能量进行归一化处理获得 \bar{I} ,避免了仪器出射强度对接收到的回波强度的影响,计算公式为

$$R_{IG} = \frac{\bar{I}_{ir}}{\bar{I}_g}, \quad (5)$$

式中 \bar{I}_{ir} 为近红外通道归一化后强度, \bar{I}_g 为绿光通道归一化后强度。

6) 近红外通道响应波宽(W_{ir})

响应波宽,即近红外通道回波信号中地物引起的信号响应 $[H_{ir}(n_1) \cdots H_{ir}(n_2)]$ 的宽度 $W_{ir} = (n_2 - n_1)$,其中($n_1 \geq 1$ 且 $n_2 \leq n$)。近红外激光脉冲不易穿透海水,但由于受海风和潮汐的影响,无论采用何种探测方式,都不能保证所有的近红外脉冲经海水表面反射后能被有效地探测到^[1],因此接收到的近红外通道回波只有一个甚至没有响应脉冲。但陆地回波波形不同,近红外通道回波信号会产生一个或多个响应脉冲,如多冠层森林会返回多个响应脉冲,相应的响应波宽要长。因此特征参数 W_{ir} 能够很好地区分出海陆波形混淆中的多冠层森林回波和海洋回波。

2.2.2 基于支持向量机的分类模型

支持向量机分类,即通过少量的支持向量确定最优超平面来进行分类,由 Cortes C 等^[21]于1995年首先提出。本实验中的基于支持向量机的分类模型采用径向基函数,通过参数寻优,确认核函数中的伽马函数设

置及最佳惩罚参数 c , 通过多通道的多特征参数组合构建不同维数的特征向量 \mathbf{x} , 使得在二维空间中一个线性不可分的问题, 向高维空间转化后变得线性可分, 即 $f(\mathbf{x}) = \text{sign}(\boldsymbol{\omega}^T \mathbf{x} + b)$ 中 \mathbf{x} 转换为 $\phi(\mathbf{x})$, 分类器输出陆地波形 [$f(\mathbf{x}) = 1$] 或海洋波形 [$f(\mathbf{x}) = -1$] 的预测类别, 最后通过构建的不同分类模型和分类精度的关系来分析分类器性能。

2.3 检验方法

通过提取疑似首个回波波形的解算出波形对应的经纬度位置, 叠加于 Google Earth™ 来判断海陆波形及人工对海陆波形目视判读结果, 以此作为真值用来进行分类效果评价。为了更好地评价分类效果, 把分类的结果输出分成两类, 即: 裸土、海滩、建筑物、森林等陆地波形与浅水、深水等海洋波形, 构建分类结果的混淆矩阵(表 2), A 和 D 分别为海陆波形正确分类的波形数, 对应混淆矩阵中的对角线元素, B 和 C 分别为海陆波形误分的波形数。同时通过计算生产者精度、用户者精度、总体精度 (a_o) 和 Kappa 系数 (\hat{K}) 来定量评价分类结果。 a_o 为正确分类的波形数与总波形数的比值。 \hat{K} 用于衡量分类结果与检验结果之间的整体一致性, 0.61~0.80 区间代表高度的一致性, 0.81~1 区间代表几乎完全一致性。 a_o 和 \hat{K} 的计算公式为

$$a_o = (A + D) / N, \tag{6}$$

式中 $N = A + B + C + D$ 。

$$\hat{K} = \frac{N(A + D) - (A + B)(C + D)(A + C)(B + D)}{N^2 - (A + B)(C + D)(A + C)(B + D)} \tag{7}$$

表 2 混淆矩阵及精度评价指标计算表

Table 2 Calculation table of confusion matrix and accuracy evaluation index

Class	Prediction		User's accuracy / %	Kappa
	Land	Sea		
Land	A	B	$A / (A + B)$	—
Sea	C	D	$D / (C + D)$	—
Producer's accuracy / %	$A / (A + C)$	$D / (B + D)$	a_o	\hat{K}

3 结果与分析

3.1 模型比较

首先选取单一典型飞行条带数据, 其中涵盖了沙滩、森林、裸土、建筑物等陆地波形, 及深水、浅水等海洋波形, 并选取了不同的特征参数组合成不同维数的特征向量, 进行 6 个分类模型构建, 通过分类精度结果来分析构建的分类器性能。

图 2 是 6 个模型的训练结果, 包括总体精度和 Kappa 系数。从图 2 中可以发现, 当选取的训练样本超过 80% 后, 各模型分类总体精度和 Kappa 系数都趋于稳定, 可以证明构建各模型的稳定性。更为重要的是, 随着红外通道特征参数的加入, 分类效果明显改善。为了进一步说明各模型分类效果, 给出了各模型最佳精度评价表, 如表 3 所示。从表 3 可知, 随着特征参数选择方案中特征参数维数的增加, 其分类的精度包括

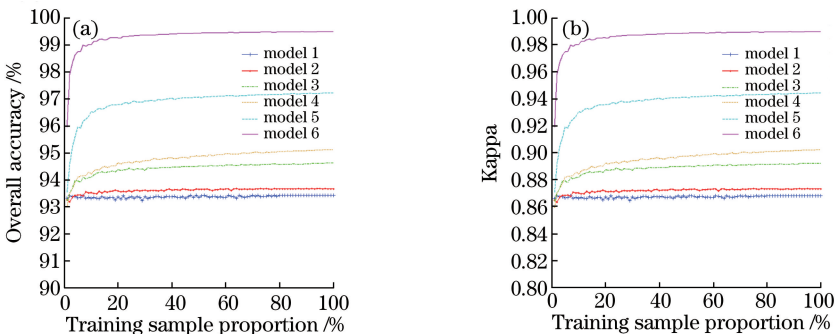


图 2 不同分类模型训练结果。(a) 总体精度; (b) Kappa 系数

Fig. 2 Training results of different classification models. (a) Overall accuracy; (b) Kappa coefficient

生产者精度、用户者精度及总体精度都有所提升,但提升的速度存在着较大差异。其中,仅使用绿光通道的特征参数,模型的总体精度达到 95.12%,较模型 1 提升了 1.7%,Kappa 系数仅达 0.9023,提升效果并不明显,但随着近红外通道的特征参数的加入,其分类的精度和 Kappa 系数有大幅度的提升,相比较于仅使用绿光通道特征的模型 4 的总体精度分别提升了 2.11%和 2.27%,Kappa 系数分别达 0.9445 和 0.9901,错分的波形数量随之减少,因此基于多通道波形数据特征构建的模型 6 最符合应用需求,可作为最终分类模型。

表 3 不同维数特征参数构建模型最佳精度评价表

Table 3 Best accuracy evaluation table of different dimensions feature parameters for building model

Model No.	Feature selection	Class	Prediction		User's accuracy / %	Kappa
			Land	Sea		
Model 1	W_f	Land	11260	829	93.14	—
		Sea	712	10610	93.71	—
		Producer's accuracy / %	94.05	92.75	93.42	0.8683
Model 2	$W_f + S_a$	Land	11324	765	93.67	—
		Sea	718	10604	93.66	—
		Producer's accuracy / %	94.04	93.27	93.67	0.8732
Model 3	$W_f + S_a + S_k$	Land	11427	662	94.52	—
		Sea	599	10723	94.71	—
		Producer's accuracy / %	95.02	94.19	94.61	0.8921
Model 4	$W_f + S_a + S_k + K_u$	Land	11492	597	95.06	—
		Sea	546	10776	95.18	—
		Producer's accuracy / %	95.46	94.75	95.12	0.9023
Model 5	$W_f + S_a + S_k + K_u + R_{IG}$	Land	11674	415	96.56	—
		Sea	234	11088	97.93	—
		Producer's accuracy / %	98.03	96.38	97.23	0.9445
Model 6	$W_f + S_a + S_k + K_u + R_{IG} + W_{ir}$	Land	12034	55	99.55	—
		Sea	61	11261	99.46	—
		Producer's accuracy / %	99.50	99.51	99.50	0.9901

3.2 结果检验

为了对提出的海陆波形分类模型进行检验,使用不同飞行条带数据来作为测试样本。其中,最佳分类模型 6 取得的分类结果叠加在 Google Earth™底图上,如图 3 所示,图 3(a)为训练样本结果,图 3(b)~图 3(d)为测试样本结果。海陆波形分类结果和底图海陆边界稍有不同,这是由于两者是在不同潮汐时刻获得的结果所造成的。而在海陆交界处,有零星的海陆波形点位存在交叉混叠的情况,很可能是由于采用椭圆扫描方式时扫描角的计算精度或定位误差所造成的,后续还需进行进一步的定位精度校正。但总体来说,图 3 中可

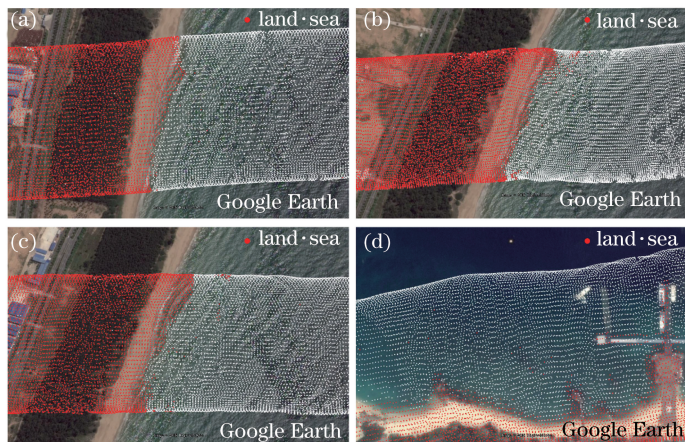


图 3 海陆分类结果。(a)训练样本结果;(b)~(d)测试样本结果

Fig. 3 Classification results of sea and land. (a) Training sample result; (b)~(d) testing sample results

以很好分辨出瞬时海陆边界,该结果证明基于多通道波形分类模型 6 对海陆波形分类识别有效。

为了定量描述各模型分类结果,进一步选取测试样本结果(b)~(d)中海陆边界部分区域的波形,同样采用人工判读结果作为真值进行检验。同时为了保证检验结果的公平性,测试样本中陆地与海洋的波形数目大致相同,也涵盖了沙滩、森林、裸土、建筑物等陆地波形,及深水、浅水等海洋波形。利用了测试样本对各分类模型进行了检验,分别构建了分类结果的混淆矩阵以及计算了生产者精度、用户者精度、总体精度和 K ,形成了各分类模型分类精度评价表,如表 4 所示。从表 4 中得知,仅采用绿光通道的特征参数时,模型 4 的分类精度最高能达到 91.76%,但加入近红外通道的两个特征参数以后,模型 6 比较于仅使用绿光通道特征的模型 4 总体精度分别提升了 2.91%和 4.36%,提升效果明显,最终陆地分类精度达 98.33%,海洋分类精度达 99.73%,总体精度达 99.03%,Kappa 系数达 0.9805,落在区间 0.81~1 之内,分类结果一致性检验几乎呈完全一致性。因此,检验结果同样表明多通道波形数据特征构建的模型 6 的分类精度最优,可应用于国产机载激光测深雷达数据的海陆波形分类。

表 4 分类结果精度评价表

Table 4 Accuracy evaluation table of classification result

Model No.	Feature selection	Class	Prediction		User's accuracy / %	Kappa
			Land	Sea		
Model 1	W_f	Land	18441	4587	80.08	—
		Sea	3996	19485	82.98	—
		Producer's accuracy / %	82.19	80.94	81.54	0.6308
Model 2	$W_f + S_a$	Land	20763	2265	90.16	—
		Sea	2955	20526	87.42	—
		Producer's accuracy / %	87.54	90.06	88.78	0.7756
Model 3	$W_f + S_a + S_k$	Land	21303	1725	92.51	—
		Sea	2754	20727	88.27	—
		Producer's accuracy / %	88.55	92.31	90.37	0.8353
Model 4	$W_f + S_a + S_k + K_u$	Land	21795	1233	94.65	—
		Sea	2598	20883	88.94	—
		Producer's accuracy / %	89.35	94.42	91.76	0.8353
Model 5	$W_f + S_a + S_k + K_u + R_{IG}$	Land	22200	828	96.40	—
		Sea	1653	21828	98.34	—
		Producer's accuracy / %	93.07	96.35	94.67	0.8933
Model 6	$W_f + S_a + S_k + K_u + R_{IG} + W_{ir}$	Land	22965	63	99.73	—
		Sea	390	23091	98.34	—
		Producer's accuracy / %	98.33	99.73	99.03	0.9805

3.3 误分原因分析

实际上,精度最高的模型 6 的分类结果中仍会出现海陆波形误分的情况,其中典型的误分波形如图 4 所示。同时为了更好地说明模型 6 分类结果中仍存在海陆波形误分情况的原因,给出了训练样本中 4 种典型的海陆波形类型数据集的特征参数的数据分布特征(包括均值和标准方差)(表 5)。通过分析,主要误分情况有以下几种:

1) 图 4(a)为陆地波形中的森林回波被误分为海洋波形的情况,其误分原因可能是由于地物的复杂性。从表 5 中所列的多个特征参数可以看出,森林和海洋浅水的回波波形的特征参数分布范围存在较大的重叠,如 W_f 、 S_a 等。即便从海陆波形区分度较高的特征参数 R_{IG} 值的频率分布直方图(图 5)中也可以看出,陆地的森林回波 R_{IG} 值整体上在 $[1, 10]$ 之间都有大量分布,而海洋波形的 R_{IG} 值呈偏态分布,数据大多集中于 $[0, 2]$ 之间,因此两者在 $[1, 2]$ 之间存在的大量数据重叠,这很可能造成此类波形误分。

2) 图 4(b)为海洋浅水波形被误分为陆地波形的情况。在这种情况下当中,绿光通道波形由于海表信号和海底信号“混叠”呈现出单个回波特征,近红外通道波形受瞬时粗糙海面的随机镜面反射影响同样出现非常强的单峰回波,导致该类波形回波特征(如 K_u 、 R_{IG} 和 W_{ir})与典型的陆地波形相似。例如从表 5 中可以看

到浅水波形的绿光通道特征参数 K_u 的分布和陆地非森林地物波形几乎一致,而同样从图 5 中可以看到近红外通道特征参数 R_{IG} 在大于 1 的范围也存在一定量的数据分布。这些都能说明浅水波形与陆地波形容易混淆。

3) 图 4(c) 为海洋深水波形误分为陆地波形的情况。在这种情况下当中,由于水质清澈,水体反射较弱,同时水深太深导致海底回波无法探测,绿光通道波形同样呈现单个回波。近红外通道波形也受瞬时粗糙海面的随机镜面反射影响出现强反射,波形的峰值能量大。同样呈现出与浅水误分波形类似的波形特征,导致海陆波形误分的情况发生。

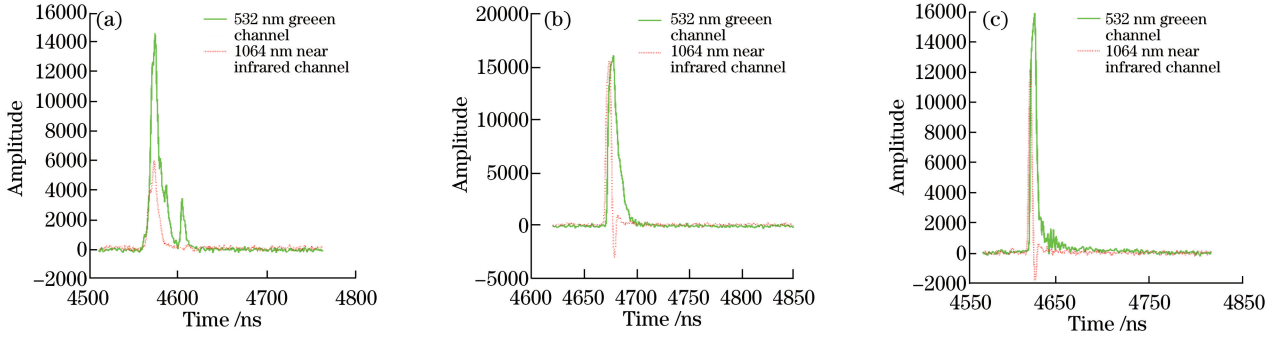


图 4 (a) 陆地误分波形; (b) 海洋浅水误分波形; (c) 海洋深水误分波形

Fig. 4 (a) Land misclassification waveform; (b) sea misclassification waveform of shallow water in sea; (c) miss classification of deepwater in sea

表 5 海洋/陆地样本特征参数分布区间表

Table 5 Distribution interval table of sea/land samples feature parameters

Class	Subclass (number of waveforms)	Mean /standard deviation	532 nm green channel				1064 nm near infrared channel	
			W_f	S_a	S_k	K_u	R_{IG}	W_{ir}
Land	Non-forest	Mean	21.12	6.21	1.02	2.39	4.18	21,27
	(474)	Standard deviation	4.36	0.88	0.16	0.45	2.37	16.30
	Forest	Mean	41.28	11.68	1.03	3.05	4.17	48.31
	(371)	Standard deviation	13.13	3.65	0.44	1.21	2.39	19.78
Sea	Shallow-water	Mean	38.50	12.65	0.73	2.35	0.91	6.51
	(204)	Standard deviation	6.92	3.85	0.33	0.64	1.21	2.67
	Deep-water	Mean	114.33	26.95	1.81	7.13	1.13	4.28
	(494)	Standard deviation	6.82	8.59	0.94	4.86	2.05	4.25

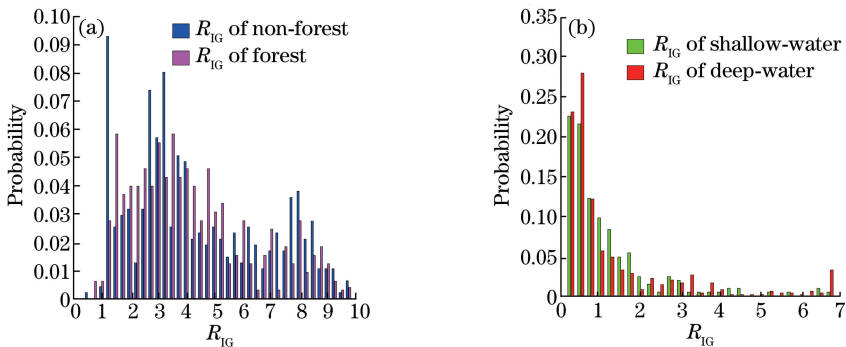


图 5 (a) 陆地波形 R_{IG} 频率分布直方图; (b) 海洋波形 R_{IG} 频率分布直方图

Fig. 5 (a) Frequency histogram of land waveform R_{IG} ; (b) frequency histogram of sea waveform R_{IG}

因此,对于分类模型 6,即便选取了不同通道的多个特征参数,但由于海陆边界地物的复杂性及海表面的粗糙随机性仍然会导致其被误分。这些难点问题还有待进一步地分析和讨论。

4 结 论

使用国产多通道激光雷达波形原始数据,构建了多通道海陆波形分类模型。该分类模型陆地分类精度达 98.33%,海洋分类精度达 99.73%,总体精度达 99.03%,Kappa 系数达 0.9805,验证了多通道海洋激光雷达数据在海陆波形分类具有精度高的优势。该模型能够满足对海陆波形分类的精度需求,并已运用于国产机载激光雷达测深系统的海陆交界区域、海岛和岛礁的波形数据处理,为后续深度计算过程中水体介质光速校正及潮汐波浪改正等工作奠定基础。

参 考 文 献

- [1] Li Song, Huang Weijun. The perfect scanning configurations of laser-based airborne hydrographic system[C]. National Conference on Integrated Surveying and Mapping Instruments, 2001.
李 松, 黄卫军. 基于表面回波的机载激光测深系统的最佳扫描方案[C]. 全国测绘仪器综合学术年会, 2001.
- [2] Zhai Guojun, Wu Taiqi, Ouyang Yongzhong, *et al.* The development of airborne laser bathymetry[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2012, 32(2): 67-71.
翟国君, 吴太旗, 欧阳永忠, 等. 机载激光测深技术研究进展[J]. 海洋测绘, 2012, 32(2): 67-71.
- [3] 时振伟, 阳凡林, 刘 翔, 等. 用简述机载激光测深系统及其在海底底质分类中的应用[J]. 中国水运月刊, 2013, 13(10): 292-295.
- [4] Zhai Guojun, Wang Keping, Liu Yuhong. Technology of airborne laser bathymetry[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2014, 34(2): 72-75.
翟国君, 王克平, 刘玉红. 机载激光测深技术[J]. 海洋测绘, 2014, 34(2): 72-75.
- [5] 马 兰, 甄洪排, 宋海英, 等. 机载激光测深仪 SHOALS 的发展与应用[C]. 海洋测绘综合性学术研讨会, 2007.
- [6] Wang Quandong, Chen Weibiao, Lu Yutian, *et al.* Analysis of relationship between parameter choice of airborne laser bathymetry and maximum penetrability[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(10): 1255-1260.
汪权东, 陈卫标, 陆雨田, 等. 机载海洋激光测深系统参量设计与最大探测深度能力分析[J]. 光学学报, 2003, 23(10): 1255-1260.
- [7] Yao Chunhua, Chen Weibiao, Zang Huaguo, *et al.* Study of the capability of minimum depth using an airborne laser bathymetry[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(10): 1406-1410.
姚春华, 陈卫标, 臧华国, 等. 机载激光测深系统的最小可探测深度研究[J]. 光学学报, 2004, 24(10): 1406-1410.
- [8] Li Kai, Zhang Yongsheng, Liu Xiaodi, *et al.* Study on airborne laser bathymetric system receiver field of view[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(7): 0701005.
李 凯, 张永生, 刘笑迪, 等. 机载激光海洋测深系统接收 FOV 的研究[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0701005.
- [9] Huang Motao, Zhai Guojun, Ouyang Yongzhong, *et al.* Wave correction in airborne laser hydrography[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University (Information Science Edition), 2003, 28(4): 389-392.
黄谟涛, 翟国君, 欧阳永忠, 等. 机载激光测深中的波浪改正技术[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2003, 28(4): 389-392.
- [10] Hu Shanjiang, He Yan, Chen Weibiao. Correction of sea wave for airborne laser bathymetry[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(11): 2103-2105.
胡善江, 贺 岩, 陈卫标. 机载激光测深系统中海面波浪影响的改正[J]. 光子学报, 2007, 36(11): 2103-2105.
- [11] Ma Hongchao, Li Qi. Modified EM algorithm and its application to the decomposition of laser scanning waveform data [J]. Journal of Remote Sensing, 2009, 13(1): 35-41.
马洪超, 李 奇. 改进的 EM 模型及其在激光雷达全波形数据分解中的应用[J]. 遥感学报, 2009, 13(1): 35-41.
- [12] Wang Junhong. Research on the key techniques of the airborne LiDAR data processing [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
王俊宏. LiDAR 数据处理关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [13] Ye Xiusong. Research on principle and data processing methods of airborne laser bathymetric technique [D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2010.
叶修松. 机载激光水深探测技术基础及数据处理方法研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2010.
- [14] Wang C S, Li Q Q, Liu Y X, *et al.* A comparison of waveform processing algorithms for single-wavelength LiDAR bathymetry[J]. Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2015, 101: 22-35.
- [15] Pe'Eri S, Morgan L V, Philpot W D, *et al.* Land-water interface resolved from airborne LiDAR bathymetry (ALB)

- waveforms[J]. *Journal of Coastal Research*, 2011, 62: 75-85.
- [16] Collin A, Long B, Archambault P. Merging land-marine realms: spatial patterns of seamless coastal habitats using a multispectral LiDAR[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 123: 390-399.
- [17] Tulldahl H M, Steinvall K O. Simulation of sea surface wave influence on small target detection with airborne laser depth sounding[J]. *Applied Optics*, 2004, 42(12): 2462-2483.
- [18] 贺 岩, 田茂义, 吕德亮, 等. 机载双频激光雷达系统参数设计和性能分析[C]. 红外、遥感技术与应用研讨会暨交叉学科论坛, 2015.
- [19] Ullrich A, Pfennigbauer M, Horn. Echo digitization and waveform analysis in airborne and terrestrial laser scanning [J]. *Photogrammetric Week*, 2011, 11: 217-228.
- [20] Liu Jingnan, Zhang Xiaohong. Classification of laser scanning altimetry data using laser intensity[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University (Information Science Edition)*, 2005, 30(3): 189-193.
刘经南, 张小红. 利用激光强度信息分类激光扫描测高数据[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2005, 30(3): 189-193.
- [21] Cortes C, Vapnik V. Support-vector networks[J]. *Machine Learning*, 1995, 20(3): 273-297.