

国产机载激光雷达测深系统的波形处理方法

黄田程^{1**}, 陶邦一^{1*}, 贺岩², 胡善江², 俞家勇³, 李强⁴, 朱云峰⁴,
尹国清⁴, 黄海清¹, 朱乾坤¹, 龚芳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山东科技大学测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

⁴中国海监南海航空支队, 广东 广州 510310

摘要 综合了已有的机载激光雷达测深系统的波形处理方法。基于国产多通道海洋激光雷达波形数据的多通道优势,运用去卷积、数值拟合和信号滤波等波形处理方法,针对不同类型的波形,提出了一套适用于国产硬件的波形处理方法。该方法可保证回波位置提取的稳健性。

关键词 遥感; 激光雷达; 测深系统; 波形处理; 波形分类; 去卷积; 数值拟合; 信号滤波

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.082808

Waveform Processing Methods in Domestic Airborne Lidar Bathymetry System

Huang Tiancheng^{1**}, Tao Bangyi^{1*}, He Yan², Hu Shanjiang², Yu Jiayong³,
Li Qiang⁴, Zhu Yunfeng⁴, Yin Guoqing⁴, Huang Haiqing¹, Zhu Qiankun¹, Gong Fang¹

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

⁴South China Sea Air-Borne Detachment of China Marine Surveillance, Guangzhou, Guangdong 510310, China

Abstract The existing waveform processing methods in the airborne Lidar bathymetry system are reviewed. Based on the multi-channel advantages of the domestic airborne Lidar bathymetry waveform data and by using the multiple waveform processing methods, such as deconvolution, numerical fitting and signal filtering, a set of waveform processing methods suitable for domestic hardwares is proposed as for different types of waveforms. This set of methods can ensure the robustness of waveform peak position extraction.

Key words remote sensing; laser radar; bathymetry system; waveform processing; waveform classification; deconvolution; numerical fitting; signal filtering

OCIS codes 280.3640; 010.4450; 010.1350; 010.0280

1 引言

海洋工程、港口建设、渔业、采掘业、科学与环境

研究和军事等领域对海底地形均有较高需求。由于船只无法安全到达浅海、岛礁、暗礁等区域,多波束等声学手段无法获取浅海海底地形,而机载激光雷

收稿日期: 2018-04-13; 修回日期: 2018-06-07; 录用日期: 2018-06-11

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(QNYC201602)

* E-mail: taobangyi@sio.org.cn; ** E-mail: njuhtc@163.com

达具有高效率、低费用、机动性强等优点,特别适合于大面积的调查或研究,因此机载激光海洋测深系统已经成为浅水水深测量的有效手段之一^[1-4]。机载激光测深系统的研发始于 20 世纪 60 年代末期,已开发的系统主要有 5 种,分别是加拿大的 SHOALS 系统、瑞典的 Hawk Eye 系统、澳大利亚的 LADS 系统、美国航空航天局(NASA)的 EAARL 系统以及加拿大的 SHOALS 系统的升级产品 CZMIL 系统^[5]。然而,这些系统大多存在技术壁垒,且售价昂贵,其数据处理软件的算法均是保密的,核心技术只有少数几个国外激光雷达生产商掌握(如 Optech 公司和 AHAB 公司等),出于商业保密原因具体方法并未公开。在国内,华中科技大学等联合单位起步较早,已成功研制机载激光探浅装置^[2];中国科学院上海光学精密机械研究所于 2013 年起联合国家海洋局第二海洋研究所等单位,开展了机载双频海洋激光雷达产品化工作,在硬件方面已经攻克了窄脉宽高功率激光器、探测动态范围扩展等关键技术难题。为了处理国产机载双频海洋激光雷达数据,需要一套适用于国产硬件的波形处理方法。

激光在海水介质中传播,会发生海气界面折射,受到水体颗粒衰减影响,脉冲展宽,故海洋激光雷达的波形处理方法比陆地激光雷达的更复杂^[6],海洋激光测深雷达的难点之一是激光波形处理。海洋波形处理的核心问题是有效识别海表和海底的回波信号,波形的处理主要分为两步:海陆波形与水体波形的分类和回波峰值位置的提取。海陆波形分类的必要性在于点云生成时,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,需确定激光是在空气或水体介质中传播^[7]。进行水体波形分类是因为在海底回波峰值位置的提取中,近岸浅水回波中海表回波和海底回波混合,能否正确分离两者是最小测深能力的体现^[8]。近岸浅水回波中海表面回波和海底回波需要通过信号处理进行分离,必须准确识别近岸浅水回波。海水对激光具有吸收和散射作用,水体中发生远场激光空间分布展宽^[9],激光回波的信号幅度变化大,国产机载激光雷达测深系统采用视场角不同的浅水通道和深水通道,两通道之间的波形特点也不相同。因此,要采用不同的处理方法对浅水通道或深水通道回波提取海底回波。

Pe'eri 等^[10]总结了基于波形本身的 6 种分类算法。一类是看近红外回波是否饱和,国产机载双频激光雷达在 1064 nm 通道的回波并不存在饱和现

象。另一类是通过增加拉曼散射通道或偏振测量通道区分海陆波形,但是增加上述通道时要求有更大功率的激光光源和更复杂的接收装置,提高了硬件开发的复杂程度和成本,目前国产机载双频激光雷达并未采用。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^[11-14],对陆地和海洋不同类型波形分类的分析研究较少。

在海底回波峰值位的探测方面,研究主要集中在海表回波、水体散射和海底回波的分离和峰值位置的提取。波形的处理方法包括回波探测、数学模拟及去卷积^[15]。Hofton 等^[16]提出了一种基于高斯模型的波形分解方法,该方法虽然能将原始波形数据分解为若干个高斯分量,但容易陷于局部最优解,无法得到高精度的拟合结果。李鹏程等^[17]提出一种全局收敛的 Levenberg-Marquardt 全波形数据分解方法,与传统方法相比,该方法更具有稳健性。Wang 等^[14]总结了目前激光雷达波形的处理方法,包括高斯分解法、去卷积法、四边形非线性拟合方法、平均方差法、峰值差分探测法,并针对 Optech 单通道波形数据进行了对比。国产机载双频海洋激光雷达采用分视场方式获得的浅水通道和深水通道波形表现出来的新特点,以上现有的单个处理方法不能准确地进行处理。为了实现海陆一体化测绘,本文提出了适用于国产多通道海洋激光雷达波形的海陆波形分类方法,并对激光雷达水体波形进行了分类。在总结国内外波形处理方法的基础上,针对不同类型的波形,提出了适用于国产硬件的波形处理方法。

2 仪器与数据

实验采用的数据为中国科学院上海光学精密机械研究所研制的新型机载双频雷达激光测深系统在中国海南省三亚市附近海域和三沙市南海某海岛附近海域获取的飞行实验数据。

机载双频激光雷达测深系统如图 1 所示,其具有 1064 nm 近红外海表通道(简称海表通道)、倍频后 532 nm 绿光浅水通道(简称浅水通道)及绿光深水通道(简称深水通道)。根据海深和海水水质的不同,国产机载激光雷达测深系统采用了扩展探测动态范围的分视场的硬件设计方案,如图 2 所示,其中 APD 为雪崩二极管。在 532 nm 绿光波段,系统的激光发散角为 0.3 mrad,总的接收视场角为 40 mrad,抠出中间的 6 mrad 小视场作为浅水通道。而剩下的 6~40 mrad 的环形视场作为深水通道,用于接收大动态范围的海底回波信号,以接收更



图1 国产机载激光雷达测深系统

Fig. 1 Domestic airborne Lidar bathymetry

深深度的底部回波,能够提高最大测深能力,同时避免了浅水通道信号的饱和。深水通道采用高灵敏度的光电倍增管(PMT)装置,回波的背景噪声更大。系统的详细参数见表1,其中飞行平台为运12

表1 具有多组合测绘模式的国产机载双频激光雷达的参数

Table 1 Parameters for domestic airborne dual-frequency Lidar with multiple combinations of surveying and mapping modes

Parameter	Land surveying and mapping mode	Sea surveying and mapping mode	Sea and land surveying and mapping mode
Flight speed / (km · h ⁻¹)	150-220	150-220	150
Flight height / m	300-1600	300-1100	550
Coverage angle / (°)	±30	±15	±15; ±30
Laser repetition frequency / kHz@wavelength / nm	400@1550	5@532&1064	5@532&1064;400@1550
Laser pulse width / ns	4	1	1&4
Laser pulse energy / μJ	4	1.5×10 ³ @532 nm	1.5×10 ³ @532 nm; 4@1550 nm
Scanning method	Beeline	Ellipse	Ellipse; beeline
Receiving aperture / mm	70	200	200; 70

3 波形处理流程与方法

3.1 波形处理流程

基于不同类型波形采用不同处理方法的原理,根据不同波形的特点,采取不同的波形处理方法。因此,在总结 Parrish 等^[18]和叶修松等^[13]提出的波形处理方法的基础上,针对不同类型的波形,提出适用于国产硬件的不同波形处理方法。

首先,进行海陆波形的分类,将激光雷达波形分为海洋波形和陆地波形。定义海表和海底回波信号混叠在一起的波形为近岸浅水波形,浅水通道中存在海底回波信号的波形为浅水波形,浅水通道中无海底回波信号而深水通道中仍存在海底回波信号的波形为深水波形。由于深水通道波形表现出和浅水通道不一样的特点,因此根据不同类型波形在频域中的特征,把海洋波形分为三个子类型:近岸浅水波形、浅水波形、深水波形。

最后,综合运用去卷积、数值拟合及信号滤波等

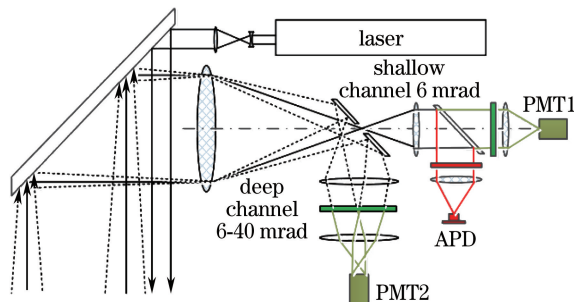


图2 扩展探测动态范围的分视场探测技术示意图

Fig. 2 Schematic of split field detection technology with extended detection dynamic range

或者直8。获取的原始数据包括海表通道、浅水通道和深水通道回波等激光波形数据,以及相关的定位惯导数据。

多种波形处理方法结合的方式,针对陆地波形提出基于高斯拟合的陆地波形峰值位置的提取方法;针对近岸波形提出基于去卷积的近岸波形峰值位置的提取方法,以分离海表反射信号和浅水海底反射信号;针对浅水波形提出基于分步拟合的浅水波形峰值位置的提取方法,以使用指数拟合分离海表信号及海表与海底之间的水体散射信号;针对深水波形提出基于多项式拟合及滤波的深水波形峰值位置的提取方法。当在近岸浅水波形中未能检测到海底回波时,算法将对其浅水波形进行检测。当在浅水波形中未能检测到海底回波时,算法将再次对其深水波形进行检测。具体流程图如图3所示。

3.2 海陆波形与水体波形的分类方法

3.2.1 基于多通道海洋激光雷达的海陆波形分类

黄田程等^[7]建立了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,并对波形分类结果及误分情况进行了分析与讨论。该研究基于多通道海洋激光雷达波形数据的特点,通过提取

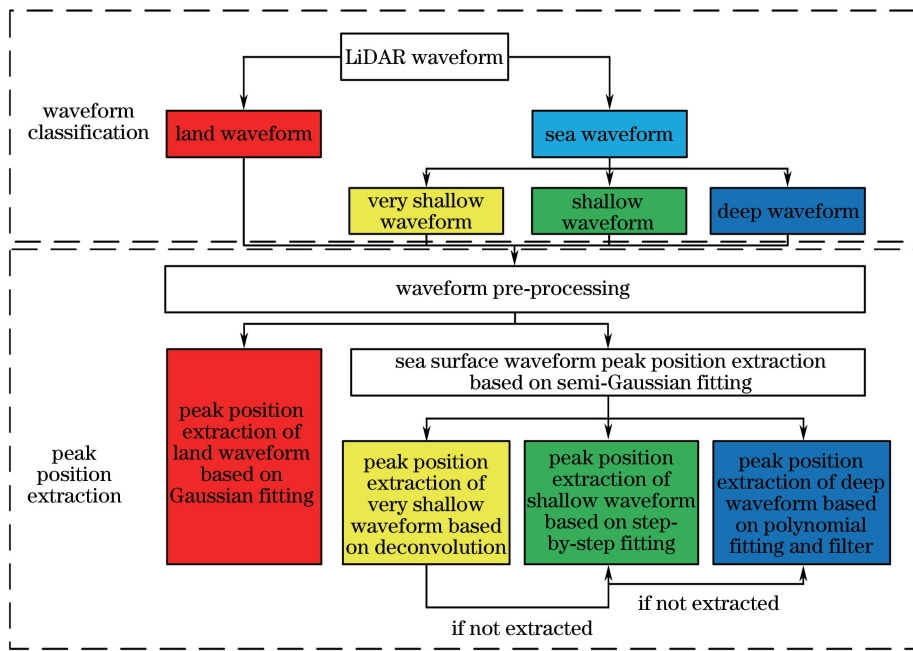


图3 波形处理流程图

Fig. 3 Flow chart of waveform processing

的多通道波形的特征参数,如4个532 nm绿光通道的特征参数(首个回波波宽、归一化曲线下面积、偏度、峰度)和2个1064 nm红外通道的特征参数(红外与绿光强度比值、红外通道响应波宽),采用支持向量机算法构建分类模型对海陆波形进行分类。构建了6个分类模型,通过分类精度结果分析了分类器的性能,最终获得了基于多通道特征因子的海陆分类模型。

3.2.2 基于频谱域的海洋激光雷达水体波形分类

激光雷达获取的回波波形主要可以表示为

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

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。

但外界环境因素(如海面状况、水质、水深等因素)和发射接收条件(如光束入射角、接收视场角等条件)都会对回波信号造成影响。因此在不同的外界环境因素和发射接收条件下,海表和海底的信号波形表现出了多样性和复杂性。但近岸浅水波形、浅水波形和深水波形在频域上却显示出普遍的频域特征。

海洋激光雷达的水体波形分类通过快速傅里叶变换(FFT)将波形时域信息转换成频域信息:

$$F[P_E(f)] = F[P_T(f)] \cdot F[H(f)], \quad (2)$$

式中 $F(\cdot)$ 代表FFT函数, f 为频率。

分析近岸浅水波形、浅水波形和深水波形在频域的特征,利用高斯拟合和6次多项式拟合分别拟合3种波形的低频和高频组分,以拟合偏差作为频域的特征,对波形进行分类^[19]。

3.3 回波峰值位置的提取方法

3.3.1 波形预处理

机载激光测深波形中普遍存在背景噪声,噪声的来源分为两种,一种是接收系统硬件产生的系统噪声,另一种是大气和外部环境产生的非系统噪声。接收系统将光信号转换成电信号,获得回波波形,接收系统的电子设备和模数(A/D)转换处理等会产生各种噪声,一般将这部分噪声等同于高斯白噪声。大气对回波信号的影响,主要来自于大气与激光雷达相互作用产生的后向散射信号成分,包括大气分子和气溶胶粒子^[20]。机载激光雷达平台一般飞行在200~500 m的高度,上述两部分能量在回波信号能量中所占的比重为2%~3%,对回波信号的影响不大。

因此,取各通道波形尾部的小部分样本数据,用于背景噪声估计。通过统计得到样本数据的均值 μ 和标准差 σ 。均值 μ 在各通道用于减去电压水平。若浅水通道信号波形幅值高于噪声的3倍标准偏差,且持续时间大于5 ns,认为一个具有信号的激光脉冲已经找到,且该脉冲的脉宽合理,可用于进一步处理。

3.3.2 基于高斯拟合的陆地回波峰值位置提取

假设陆地波形符合高斯分布,接收的回波是出射激光脉冲和目标物作用的卷积过程,造成回波信号在时域上的展宽。高斯函数有单个高斯、多个高斯和广义高斯函数之分。基于高斯拟合的陆地回波峰值位置提取结果如图4所示。

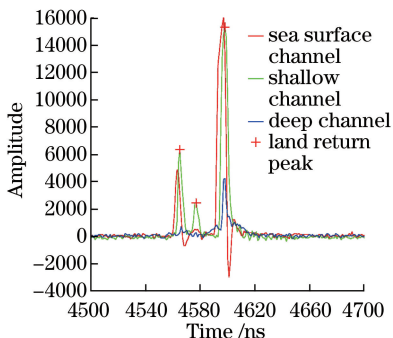


图4 基于高斯拟合的陆地回波峰值位置的提取结果

Fig. 4 Peak position extraction results of land echo waveform based on Gaussian fitting

3.3.3 基于半高斯拟合的海面回波峰值位置提取

海洋激光雷达的基本方程为

$$P_R = \frac{P_T N R F_p A_r \cos^2 \theta}{\pi (n_w H + D)^2} \exp[-2\Delta K D \sec(\varphi)], \quad (3)$$

式中 P_R 为接收功率, P_T 为发射功率, N 为由于发射机、接收机光学组合的损失, R 为底部反射, F_p 为视场不足导致的损失, 又称视场不匹配因子, A_r 为水气界面接收机的光斑大小, θ 为雷达星下角, n_w 为水的折射率, H 为激光雷达在水面的高度, D 为海底深度, Δ 为因时间离散在信号中的水抑制, φ 为进入水后的激光雷达天底角, K 为漫衰减系数。

激光雷达回波可分为三部分信号:海表回波、水体散射和海底回波。分析海表回波形成的物理机制,海表回波的上升沿主要是激光脉冲和粗糙海面相互作用的结果。激光束发散产生空间上的展宽,造成光子到达海面的时间 t 不一致,上升沿出现半高斯形态。故采用半高斯拟合的方式进行海表回波拟合,通过寻找上升沿的局部极大值,截取海表回波的上升沿波形作为输入高斯拟合的输入数据,以获取完整的高斯函数海表信号组分,最终提取海表峰值位置。

高斯拟合的关键在于初值估计,用于估计高斯波分量的个数及每个分量的峰值、均值和方差。现有的高斯拟合初值的估计算法主要包括峰值法、拐点法、重心法等^[12],但其对每个波形重新计算拟合初始参数,计算量大。两个相邻激光点的距离最近,获取的

波形相似,上一个点拟合获得的最佳初值估计值将用于下个点的初值估计,这有效地减少了高斯拟合初值估计的时间,提高了拟合效率。通过基于半高斯拟合的海面回波拟合得到了高斯函数的峰值、均值和方差,参数均值 μ 将作为海表回波的峰值位置。

3.3.4 基于去卷积的近岸浅水波形的峰值位置提取

最小可探测深度是机载激光雷达测深系统的一个重要指标。实测波形表明,近岸浅水波形的海表和海底回波信号交叠会在一起。采用理查德森-露西去卷积(RLD)对海表、海底反射信号进行分离。RLD由Lucy^[21]于1974提出,该方法可在时间域内得到一个逼近极大似然解的结果,派生于贝叶斯定理。运用RLD时,对 $1 \times N$ 的一维信号进行 n 次迭代,获得去卷积结果。Jutzi等^[22]证明RLD具有强大的去噪功能,且能显著提高距离分辨率,有利于精确地提取峰值位置。但RLD算法的缺点在于它依靠多次迭代得到更好的去卷积结果,需要更长的时间。RLD算法的第 i 次计算为

$$\bar{p}^{i+1}(t) = \bar{p}^i(t) \left[w_T(t) * \frac{w_R(t)}{(w_T * \bar{p}^i)(t)} \right], \quad (4)$$

式中 $\bar{p}^{i+1}(t)$ 为第 i 次迭代的目标横截面估计值, $w_T(t)$ 为激光发射波形, $w_R(t)$ 为原始接收波形。当残差 $\|w_R(t) - \bar{p}^{i+1}(t) * w_T(t)\|$ 小于设定阈值或迭代次数达到最大限制次数时,RLD算法迭代终止^[23]。

通过RLD分离得到海表、海底的回波信号,避免了信号重叠带来的海表、海底峰值位置漏检的问题。不同的RLD迭代次数会对海表、海底峰值位置产生影响,也会延长计算和迭代时间。默认迭代次数为10。图5所示为基于去卷积的近岸浅水波形峰值位置的提取结果。

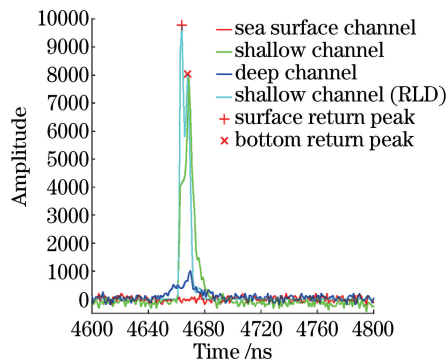


图5 基于去卷积的近岸浅水波形峰值位置的提取结果

Fig. 5 Peak position extraction result of nearshore shallow waveform based on deconvolution

3.3.5 基于分步拟合的浅水波形峰值位置提取

激光在海水介质中的传输比在大气介质中的传输更为复杂,其存在更多的不确定因素,且在海水介质中衰减更为严重。因此,对海洋中激光传输特性的研究对信号的探测和识别具有重要意义。

国产双频机载激光雷达测深系统采用 532 nm 的绿光波段,这是因为近岸清洁水体对蓝绿波段的吸收系数最小。激光束入水后从海面到海底进行传输,在海水中发生衰减和折射。由于海水中的悬浮物质和海水的均匀性,光在水下的传播会被强烈地吸收和散射,光的能量会迅速衰减。海水光衰减系数 c 是海水对光的吸收系数 a 和散射系数 b 的总和。入射到海水中的激光光束受到散射的作用,其光能量将分布在很宽的角度范围内,这将造成激光束发散产生空间上的展宽。通过激光雷达方程可知,单色准直光束通过海水介质时,辐射能呈指数衰减变化,水体散射部分的后向散射可由衰减的指数函数表示^[24-25]。

因此,通过指数函数拟合海表和海底之间的水体散射信号。通过基于半高斯拟合的海面回波拟合获取高斯函数的峰值、均值和方差,以拟合波形信号中的海表信号组分。RLD 后波形减去海表信号组分得到海表和海底之间的水体散射信号与海底回波,这避免了水体散射信号对海底回波峰值位置提取带来的误差。图 6 所示为基于分步拟合的浅水波形峰值位置的提取结果。

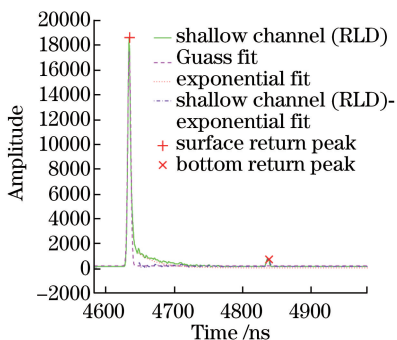


图 6 基于分步拟合的浅水波形峰值位置的提取结果

Fig. 6 Peak position extraction result of shallow waveform based on step-by-step fitting

3.3.6 基于多项式拟合和滤波的深水波形峰值位置提取

随着海底深度在 0~50 m 范围内变化,激光回波的信号幅度变化超过 30 dB,超过了国产机载激光雷达测深系统探测器和高速数据采集模块的动态范围^[6,26]。激光在水中的光斑大小随着深度变深而

变大,尤其是双程中海水对激光均具有吸收和散射作用,水体中发生远场激光空间分布展宽更为明显,信号强度也呈指数快速衰减。因此,深水视场采用了更大的环形视场,激光束刚入水时能量大部分被小视场接收,这避免了激光在海表反射和海底反射信号幅度变化大带来的信号饱和问题。深水通道波形呈现出和小视场浅水通道波形不一样的特点。海气界面的强烈海表信号在浅水和深水通道上均会出现响应,但是激光入水后,深度较浅的水体散射信号主要被小视场的浅水通道接收。随着激光在更深的深度上经过多次水体散射,空间分布展宽更为明显,更多的水体散射信号主要被大视场的深水通道接收。由于视场角损失,且 0.3 mrad 的激光脉冲发散角小于 6 mrad 的浅水通道视场角,深水通道波形的表层水体回波出现先降后升现象,如图 7 所示。

利用多项式拟合深水通道的海表与海底之间的水体散射信号。根据实测数据特征与物理机制分析,五次多项式拟合的海表和海底之间的水体散射信号,能较好地拟合分视场硬件设计方案下先降后升的深水通道波形。RLD 后波形减去海表信号组分得到海表与海底之间的水体散射信号及海底回波。为了获得更深海底深度,海底峰值提取应选择更低的阈值。

海水散射引起激光脉冲的传输延迟,需要进行延迟时间矫正。随着传输距离的增大,传输延迟时间呈类指数增长的趋势^[27]。深水通道时间和空间上的展宽严重,因此在提取深水波形峰值位置时,要确定延迟时间,以修正得到更为精确的深度值。

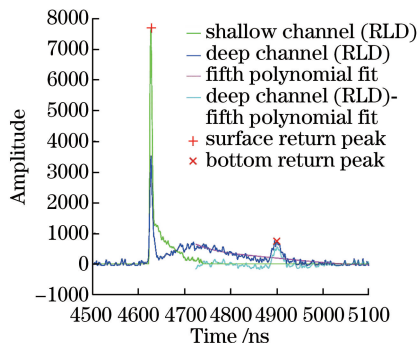


图 7 基于多项式拟合和滤波的深水波形峰值位置的提取结果

Fig. 7 Peak position extraction result of deep waveform based on polynomial fitting and filtering

4 结果与讨论

4.1 海陆波形类型分类结果

将由最佳分类模型取得的分类结果叠加在谷歌

地球底图上,如图 8 所示,其中图 8(a)所示为训练样本结果,图 8(b)~(d)所示为测试样本结果。测试样本结果表明,在近岸浅水过渡区域,存在一定的

陆地误分波形和海洋误分波形,这是海陆边界地物的复杂性及海表面的粗糙随机性等带来的海陆波形混淆。

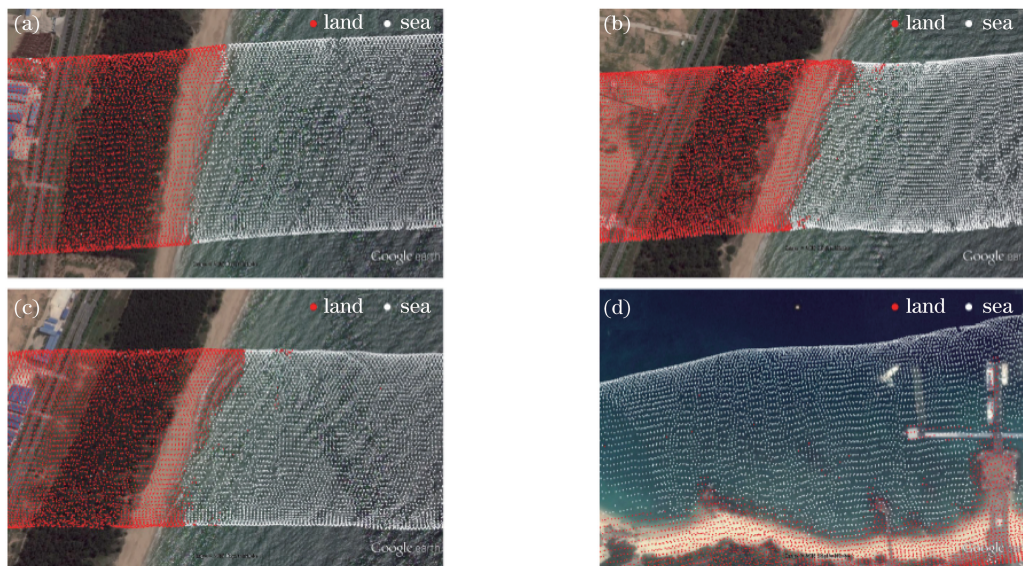


图 8 海陆波形分类结果。(a)训练样本结果;(b)~(d)测试样本结果

Fig. 8 Classification results of sea and land waveforms. (a) Training sample results; (b)-(d) testing sample results

4.2 海陆点云及海底地形结果

通过基于去卷积的近岸浅水波形的峰值位置提取,可以获取近岸浅海(浅水)区域地形。海南三亚市海棠湾某浅河道的激光雷达点云如图 9 所示,可

以看出,通过海陆波形与水体波形分类方法获得的海(河)陆边界明显,通过基于去卷积的近岸浅水波形的峰值位置提取能够有效获取海(河)表点和海(河)底点。

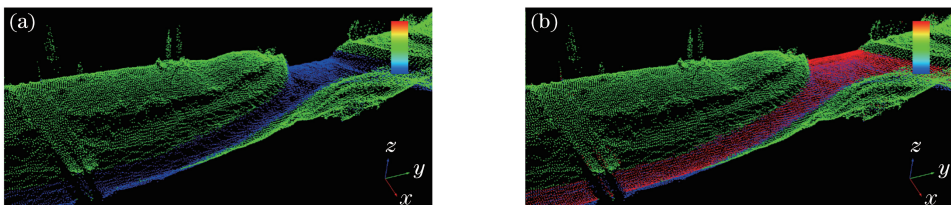


图 9 海南省三亚市海棠湾某浅河道的激光雷达点云。(a)河底;(b)河表(蓝色:河底点云;红色:河表点云)

Fig. 9 Point clouds of a shallow river in Haitang Bay, Sanya City, Hainan Province. (a) River bottom; (b) river surface (blue: point clouds of river bottom; red: point clouds of river surface)

通过提出的适用于国产硬件的不同波形处理方法,得到了国产激光雷达的海陆联测地形图,如图 10 所示。可以看出,陆地处理算法较好地处理了海岛上的植被和裸地等陆地地物,获取了多重同心环状景观。基于去卷积的近岸浅水波形的峰值位置提取能提取海表和海底点,保证了近岸区域和陆地区域的无缝连接测量。基于分步拟合的浅水波形峰值位置提取较好地提取了海岛周边的海底阶地,与卫星影像图高度吻合。卫星影像图上并没有观测到更深的海底地形,而在基于多项式拟合和滤波的深水波形峰值位置提取能提取更深的海底底

部的地形细节更为明显。

4.3 海陆交界区域的海陆波形混淆现象

国产机载激光雷达测深系统采用双频波段和不同视场角的设计方案,旨在实现海陆交界区域的一体化测绘。但海陆边界地物的复杂性及海表面的粗糙随机性,导致了海陆交界区域的海陆波形混淆现象,如图 11 所示。森林的多回波波形与浅水波形的类似,如图 12(a)所示,海面强反射只出现单个回波的情况,如图 12(b)、(c)所示,会造成海陆波形的误分,海陆波形误分难以避免。这些难点问题有待进一步分析和讨论。

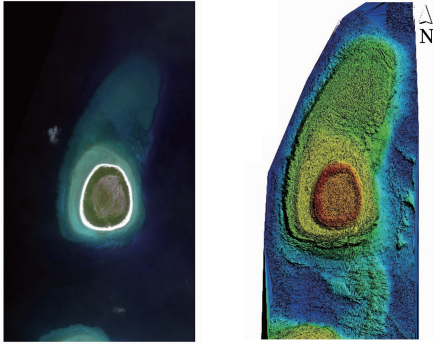


图 10 海南省三沙市某岛。(a)卫星影像;(b)国产激光雷达的海陆联测地形图

Fig. 10 An island in Sansha City, Hainan Province. (a) Satellite imagery; (b) land and sea co-surveying topographic map based on domestic airborne Lidar

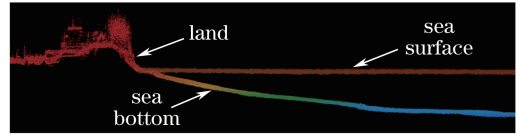


图 11 海陆交界区域的点云

Fig. 11 Point cloud at sea-land junction area

4.4 散射层导致的海底回波混淆现象

在处理实验数据过程中发现,散射层的存在会造成现阶段算法的海底回波误提取现象,如图 13(a)所示。从图 13(b)可以看出,蓝色波形底部回波的展览比同一区域同一深度的青色波形底部回波的大,这是由于散射层造成的回波展览比海底回波的大。后续可以通过此区分特征减少散射层现象导致的误提取。不过,散射层现象正是海洋跃层

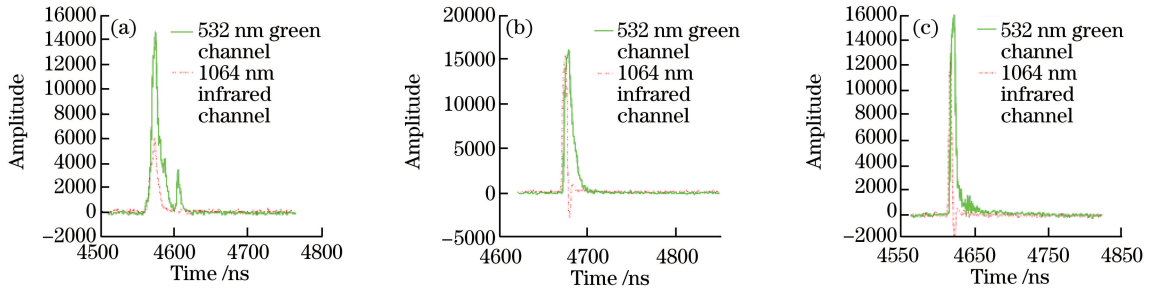


图 12 误分波形。(a)森林多个回波带来的陆地误分波形;(b)海表和海底回波混叠带来的海洋误分波形;(c)海面强反射带来的海洋误分波形

Fig. 12 Misclassification waveforms. (a) Land misclassification waveform caused by multiple echoes in the forest; (b) sea misclassification waveform caused by sea surface and bottom echo wave aliasing; (c) sea misclassification waveform caused by strong sea surface reflection

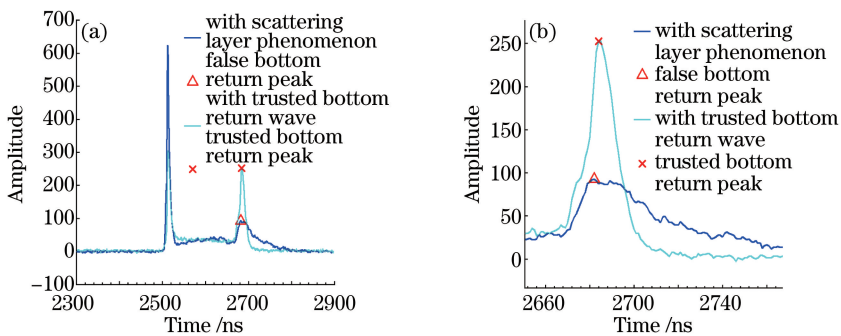


图 13 海底回波混淆和信号展览差异。(a)散射层现象带来的海底回波混淆;(b)散射层与真实海底的回波信号展览差异

Fig. 13 Sea bottom echo wave confusion and signal broadening difference. (a) Sea bottom echo wave confusion caused by scattering layer phenomenon; (b) signal broadening difference between scattering layer and trusted bottom return wave

研究的关注现象,应用机载激光雷达进一步研究散射层现象,可以深化海洋浅层水体的立体研究。

5 结 论

针对国产机载双频海洋激光雷达产业化项目,开展了机载激光雷达测深系统的波形处理方法研

究,验证了多通道海洋激光雷达数据在海陆波形分类方面具有精度高的优势。机载激光雷达测深系统获得的波形类型更为复杂,对于不同类型的波形,运用具有针对性的波形处理方法,可提高波形峰值提取的准确性。结合国产多通道海洋激光雷达波形数据的多通道优势,综合运用去卷积、数值拟合和信号

滤波等多种波形处理方法,形成了一套适用于国产硬件的波形处理方法。

致谢 感谢中国科学院上海光学精密机械研究所提供实验数据,感谢浙江大学计算机科学与技术学院王聪聪提供的帮助和支持!

参 考 文 献

- [1] Huang W J, Li S. The perfect scanning configurations of laser-based airborne hydrographic system[J]. *Laser Journal*, 2001, 22(6): 54-56.
黄卫军, 李松. 基于表面回波的机载激光测深系统的最佳扫描方案[J]. *激光杂志*, 2001, 22(6): 54-56.
- [2] Shi Z W, Yang F L, Liu X, *et al.* Brief airborne laser bathymetry system and its application in seabed classification[J]. *China Water Transport*, 2013(10): 292-295.
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*, 2013(10): 292-295.
- [3] Zhai G J, Wu T Q, Ouyang Y Z, *et al.* The development of airborne laser bathymetry, hydrographic surveying and charting[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.
- [4] Zhai G J, Wang K P, Liu Y H, *et al.* Technology of airborne laser bathymetry[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2014, 34(2): 72-75.
翟国君, 王克平, 刘玉红, 等. 机载激光测深技术[J]. *海洋测绘*, 2014, 34(2): 72-75.
- [5] Ma L. Technical equipment for airborne Lidar bathymetry system [J]. *Geomatics Technology and Equipment*, 2003, 5(2): 39-42.
马兰. 机载激光测深的技术装备[J]. *测绘技术装备*, 2003, 5(2): 39-42.
- [6] Li K, Zhang Y S, Liu X D, *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.
- [7] Huang T C, Tao B Y, Mao Z H, *et al.* Utilization of multi-channel ocean LiDAR data to classify sea and land waveform[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(6): 0610002.
黄田程, 陶邦一, 毛志华, 等. 基于多通道海洋激光雷达的海陆波形分类[J]. *中国激光*, 2017, 44(6): 0610002.
- [8] Yao C H, Chen W B, Zang H G, *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.
- [9] Hu S Q, Zhou T H, Chen W B. Performance analysis and simulation of maximum ratio combining in underwater laser communication[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1206003.
胡思奇, 周田华, 陈卫标. 水下激光通信最大比合并分集接收性能分析及仿真[J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1206003.
- [10] P'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.
- [11] Ma H C, Li Q. 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 J H. Research on the key techniques of the airborne LIDAR data processing[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & 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 X S. 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, Li Q, Liu Y, *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] Liu Y X, Guo K, He X F, *et al.* Research progress of airborne laser bathymetry technology[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan*

- University, 2017, 42(9): 1185-1194.
- 刘焱雄, 郭锴, 何秀凤, 等. 机载激光测深技术及其研究进展[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(9): 1185-1194.
- [16] Hofton M, Minster J B, Blair J B. Decomposition of laser altimeter waveforms[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2000, 38(4): 1989-1996.
- [17] Li P C. The technology of terrain and building reconstruction using airborne full-waveform LiDAR data[D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2015.
- 李鹏程. 机载全波形 LiDAR 数据的地形与建筑物重建技术[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2015.
- [18] Parrish C E, Jeong I, Nowak R D, *et al.* Empirical comparison of full-waveform lidar algorithms [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2011, 77(8): 825-838.
- [19] Huang T, Tao B, Chen P, *et al.* Utilization of multi-channel ocean LiDAR data to classify the types of waveform[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10422: 104221I.
- [20] Wang Y J, Fan C Y, Wei H L. Laser transmission and application in the atmosphere and seawater[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.
- 王英俭, 范承玉, 魏合理. 激光在大气和海水中的传输及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- [21] Lucy L B. An iterative technique for the rectification of observed distributions[J]. Journal of Astronomy, 1974, 79(6): 745-754.
- [22] Jutzi B, Stilla U. Range determination with waveform recording laser systems using a Wiener filter [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2006, 61(2): 95-107.
- [23] Wang D D, Lin Y Z, Lin P C. Comparison of signal extraction method for airborne LiDAR bathymetry based on deconvolution[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(2): 161-169.
- 王丹茹, 林雨准, 李鹏程. 机载激光测深去卷积信号提取方法的比较[J]. 测绘学报, 2018, 47(2): 161-169.
- [24] Ye X S, Huang M T, Ouyang Y Z, *et al.* Application of Raman backscattered in detecting sea level and distinguishing sea with terrene[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2008, 28(6): 13-14.
- 叶修松, 黄谟涛, 欧阳永忠, 等. 拉曼后向散射在海面检测及海面与陆地区分中的应用[J]. 海洋测绘, 2008, 28(6): 13-14.
- [25] Feng S Z. Introduction of marine science[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999.
- 冯士筵. 海洋科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [26] Zhu J, Zang H G, He Y, *et al.* Study on large dynamic range compression in airborne laser bathymetry[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(8): 1172-1176.
- 朱坚, 臧华国, 贺岩, 等. 激光测深系统中大动态范围压缩技术的实验研究[J]. 光学学报, 2006, 26(8): 1172-1176.
- [27] He X S, Zhu X, Tan X S, *et al.* Research on the transmission delay of laser pulse caused by the sea water scattering effects[J]. Laser & Infrared, 2001, 31(1): 19-21.
- 贺细顺, 朱晓, 谭雪松, 等. 海水散射引起激光脉冲传输延迟的研究[J]. 激光与红外, 2001, 31(1): 19-21.