

海洋激光雷达的自适应深度提取算法

刘梦庚^{1,2,3}, 贺岩^{2*}, 陈卫标^{1,3}, 王永星^{4,5}, 朱霞⁵, 石先高⁵, 黄田程⁶, 张宇飞^{1,2}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³上海科技大学物质科学与技术学院, 上海 201210;

⁴南京大学中国南海研究协同创新中心, 江苏 南京 210023;

⁵中国海监南海航空支队, 广东 广州 510310;

⁶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

摘要 海洋激光雷达发射的激光脉冲在海水中传输, 脉冲波形随深度会发生展宽, 相应的雷达接收系统接收到的信号与激光发射脉冲差异会增大, 该现象会导致以发射脉冲作为匹配滤波器的固定匹配滤波方法在处理深水激光雷达回波信号时产生误判。为了改进匹配滤波算法对于海洋激光雷达回波数据的性能, 使用蒙特卡罗法研究在测区条件下不同深度的激光脉冲在雷达探测器上的波形, 并以这组波形作为深度自适应的匹配滤波器来代替匹配滤波算法中的固定匹配滤波器, 并用南海的实测数据检验算法的性能。实验表明, 自适应深度提取算法相比于匹配滤波算法稳定性和准确性更好。为了验证算法的正确性, 以单波束声呐测深在同一测区的测深数据为基础, 对雷达测深数据进行精度评定。

关键词 遥感; 机载激光测深; 匹配滤波算法; 海底数值高程

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1010001

Adaptive Depth Extraction Algorithm for Ocean Lidar

Liu Menggeng^{1,2,3}, He Yan^{2*}, Chen Weibiao^{1,3}, Wang Yongxing^{4,5},
Zhu Xia⁵, Shi Xiangao⁵, Huang Tiancheng⁶, Zhang Yufei^{1,2}

¹Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³School of Physical Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai, 201210, China;

⁴Collaborative Innovation Center of South China Sea Studies, Nanjing University,
Nanjing, Jiangsu Province 210023, China;

⁵South China Sea, Air-Borne Detachment of China Marine Surveillance, Guangzhou, Guangdong 510310, China;

⁶State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography,
State Oceanic Administration, Hangzhou, Zhejiang 310012, China

Abstract The laser pulse emitting from the ocean lidar would be stretched while it travels through the deep sea water, and the waveform received by the ocean lidar is quite different from the emitting signal. Therefore, the normal matched filtering algorithm using emitting signal as the matched filtering has a bad performance in processing ocean Lidar data. To improve the performance of matched filtering algorithm, Mento Carlo method is used to simulate the signal waveforms at different depths. The simulation waveforms are used as the matched filtering at the corresponding depth. The adaptive depth extraction algorithm is tested on the data set which is measured in the South China Sea. The test shows that the adaptive depth extraction algorithm is more accurate and robust on ocean lidar data set. A set of single beam sonar data is used to evaluate the accuracy of depth using the adaptive depth extraction algorithm.

收稿日期: 2018-03-16; 修回日期: 2018-04-16; 录用日期: 2018-05-07

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项任务(2013YQ120343)

* E-mail: heyan@mail.chcnc.ac.cn

Key words remote sensing; airborne laser bathymetry; matched filtering algorithm; digital elevation model of depths

OCIS codes 280.1355; 010.3640

1 引 言

机载蓝绿激光雷达是当前海洋测绘的重要手段之一。与传统的声呐等水声波测深技术相比,这种技术具有机动性高、测绘面积大、成本低等优势。机载蓝绿激光雷达集成全球定位系统、惯性导航系统、扫描系统与激光测距系统,通过各个子系统得到位置、姿态和距离信息来解算地物的空间位置^[1]。对于全波形采样的机载蓝绿激光雷达而言,提取探测器上海面回波与海底回波出现的时间可以得到对应海底点的距离信息和深度信息,海底回波提取算法是机载蓝绿激光雷达的关键技术^[2],也是研究的热点。

海底回波提取算法可以分为三类:回波检测、解卷积、波形分解^[3-6]。这几种方法中大多算法都要用到原始激光波形作为先验知识,因此,提取精度都依赖于对激光波形的准确描述。匹配滤波是回波检测中运算速度较快的一种算法,这种算法通过计算回波波形与发射波形的相关度来确定回波位置。事实上激光脉冲在水下传播时会受到水体的吸收和散射作用,水体的后向散射光会返回探测器形成较大的噪声信号,海水的前向散射引发的多路径效应会使激光脉冲衰减和展宽^[7],这种形状的变化会使海底回波与发射波形的相关度下降。本文使用蒙特卡罗方法研究激光脉冲在水下传输时的变化规律,针对不同水深生成最佳匹配滤波器,提升匹配滤波算法的精度和深度提取能力。

2 基本原理

2.1 自适应深度提取算法原理

自适应深度提取算法是基于匹配滤波算法原理改进的算法,它同样以回波与匹配滤波器的匹配程度作为回波位置提取的依据,匹配滤波器是一个模板信号。一个好的匹配滤波算法的匹配滤波器应该尽可能的与要提取的信号形状相似,自适应深度提取算法中匹配滤波器根据水深与水质情况的不同自适应的改变来模拟并补偿激光脉冲经海水传输后的改变。匹配滤波算法通过计算接收信号与匹配滤波器的匹配程度来获取接收信号与匹配滤波器最匹配的时刻,匹配度的计算可以是平均方差^[8],计算公式为

$$D(t) = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N [S(m) - W_R(m+t)]^2, \quad (1)$$

式中: D 为方差,作为量化匹配度指标方差越小越匹配; S 为匹配模板信号; N 为模板信号的长度; W_R 为回波信号; t 为偏移量。

如果发射波形与探测目标回波的形状相似,以发射波形作为匹配滤波器的匹配滤波算法就能得到很好的结果。激光脉冲在空气中传输时变形较小,匹配滤波算法对陆地激光雷达是一种有效的数据处理算法^[9]。

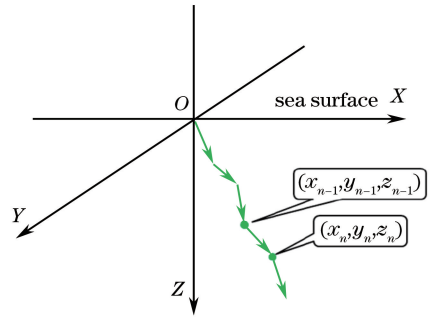


图 1 光子包在水中传输并散射

Fig. 1 Transmission and scattering of photon packet

激光脉冲在水中被散射后出现多路径效应如图 1 所示,多路径效应导致脉冲在时域展宽,所以固定的匹配滤波的方法并不适用于海洋雷达数据处理。自适应深度提取算法使用的滤波器随着深度变化,希望能够使滤波器与不同深度的海底回波信号匹配,算法的关键是匹配滤波器与真实情况相近。蒙特卡罗方法可以对不同水质和不同深度的回波进行仿真,其结果与真实结果相近,不同深度的仿真结果可以生成一组匹配滤波器作为自适应深度提取算法的滤波器。自适应深度提取算法的流程为:1)获取实验测区的水质参数;2)根据水质参数使用蒙特卡罗方法对不同深度的海底回波进行仿真,获取不同深度的海底回波和回波峰值偏移。海底回波作为自适应深度提取算法的匹配滤波器;3)使用匹配滤波器对雷达波形进行滤波,获取海底回波位置;4)对海底回波峰值位置进行后处理。

为了算法的稳定性和精度,获取的峰值位置进行的后处理为:1)对提取到的回波峰值周围进行插值得到亚采样间隔的结果;2)回波位置的强度 $W_R(t)$ 必须大于某一阈值 W_{min} , 否则舍弃提取结果;3)根据仿真结果的峰值偏移进行深度校正。

2.2 解卷积算法原理

解卷积算法任务海洋激光雷达信号是发射脉冲与信道响应函数的卷积,雷达信号模型可以描述为^[5]

$$W(t) = S(t) \cdot H(t) + N(t), \quad (2)$$

式中 $W(t)$ 为雷达信号, $S(t)$ 为发射激光脉冲, $H(t)$ 为海面、海水海底响应函数, $N(t)$ 为噪声。雷达信号中真正能够反映地物信息的部分为 $H(t)$, $H(t)$ 包含的三个响应函数是分离的, 所以更容易提取海底回波位置。

Richardson-Lucy 解卷积算法用迭代的方式实现解卷积^[6], 即

$$\bar{H}^{i+1}(t) = \bar{H}^i(t) \left[\frac{W(t)}{\bar{H}^i(t) * S(t)} \cdot \hat{S}(t) \right], \quad (3)$$

式中 $\hat{S}(t)$ 为发射波形的反转, 迭代停止的条件是残差 $\|W(t) - \bar{H}^i(t) * S(t)\|$ 小于阈值或者迭代次数达到终止次数, \bar{H} 为响应函数。

2.3 激光脉冲传输的蒙特卡罗仿真

蒙特卡罗算法对光子传输过程进行模拟, 统计脉冲发射后能够到达探测器的光子包的到达时间和能量, 得到激光雷达接收信号的波形^[10], 根据光子包发生反射或后向散射位置可以将波形分为海面反射波形、水体散射波形与海底反射波形, 其中经过海底反射的光子包所形成的波形作为深度提取算法的自适应滤波器。

图 2 为算法流程图。光子包在空气中沿直线传输。光子包在海水中传输是一个循环的过程, 光子

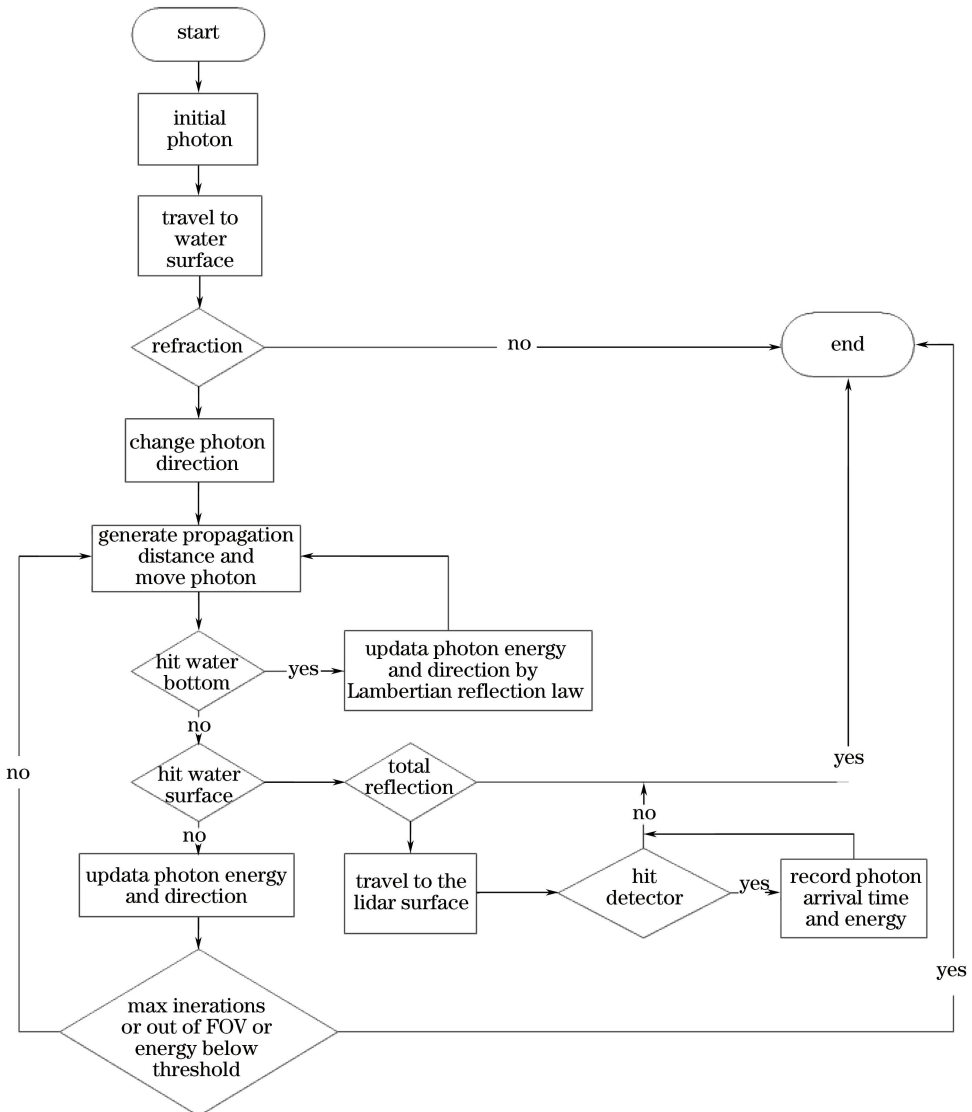


图 2 蒙特卡罗算法流程图

Fig. 2 Flow chart of Monte Carlo algorithm

包每传播一个随机距离就会发生散射,方向和能量会发生改变,直到光子包损耗、不在视场中或者不在海水中^[11]。

3 实验结果与分析

3.1 实验数据说明

实验数据获取设备是中国科学院上海光学与精密机械研究所研发的机载双频激光雷达系统(LADM II),如图3所示,实验区域是三亚蜈支洲岛附近海域。该系统同时具有陆地和海洋测绘模

块,陆地测绘模块使用 1550 nm 波长激光,一字型扫描,覆盖角度 $\pm 30^\circ$;海洋测绘模块使用 532 nm 波长激光,椭圆形扫描,覆盖角度为 $\pm 15^\circ$,图4为两个模块扫描方式示意图。系统数据采集模块的采集频率为1 GHz,采样间隔为 1 ns。雷达系统集成姿态定位系统,全球定位系统(GPS)、惯导信息与测距信息结合可以生成测区的点云。机载双频激光雷达系统海洋测绘模块参数如表1所示。实验测区为海南蜈支洲岛附近水域,实测海水衰减系数为 0.54。

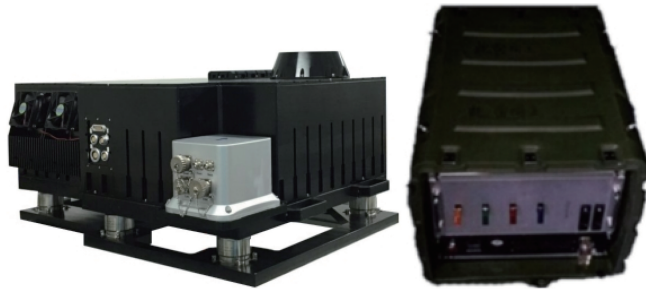


图3 机载双频激光雷达

Fig. 3 Airbone double frequency ocean lidar

表1 机载双频激光雷达系统海洋模块参数

Table 1 Parameters of airborne double frequency ocean modular

Parameter	Value
Wavelength /nm	532
Pulse width /ns	2
Pulse energy /mJ	3
Repetition rate /kHz	1
Divergence angle /mrad	0.2
Scanning mode	Ellipse
Scanning angle /($^\circ$)	± 15
Sensor	PMT
Aperture /mm	200
Field of view /mrad	40/6

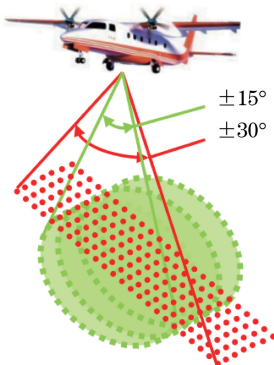


图4 机载双频激光雷达系统扫描方式

Fig. 4 Scanning mode of LADM II system

3.2 蒙特卡罗法生成深度自适应匹配滤波器

蒙特卡罗法所采用的硬件仿真参数与激光雷达系统实际参数相同,水质参数为测区同步实测值,具体参数如表2所示。仿真的海底深度范围为 10~40 m,深度间隔为 1.1 m,在仿真中光子每走一个随机步长就会发生散射,光子散射会损失一定比例的能量,返回的光子数量随深度呈指数衰减,海底返回的光子数随海底深度变化如图5所示。

表2 蒙特卡罗仿真参数

Table 2 Monte Carlo simulation parameters

Parameter	Value
Wavelength /nm	532
Pulse width /ns	2
Pulse energy /mJ	3
Divergence angle /mrad	0.2
Sea water refractive index	1.33
Air refractive index	1
Attenuation coefficient	0.54
Scattering coefficient	0.43
Photon packet threshold	1
Field of view /mrad	40
Lidar height /m	400
Asymmetric parameter	0.924

光子在海水中传输的过程中有概率发生散射,散射后光子到达同一深度相比于未散射光子光程增加,在时域上表现为脉冲前沿发生散射的光子向脉

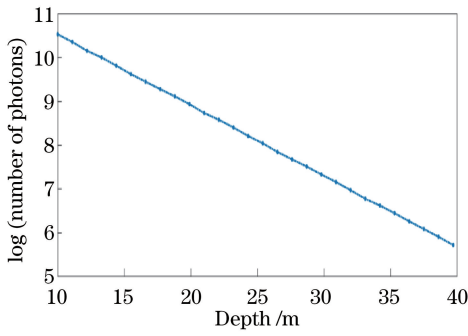


图 5 海底回波能量与深度关系

Fig. 5 Relationship between energy and depth of echo wave

冲后沿移动,脉冲后沿发生散射的光子向更后移动,脉冲波形的出现拖尾现象,随着深度的增加,脉冲波形拖尾现象会更显著。图 6 为海底回波展宽随深度变化图,海底回波展宽随着深度发生线性变化,变化曲线的斜率受水质参数的影响。

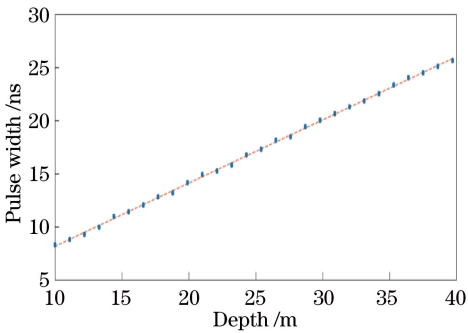


图 6 海底回波脉冲宽度与深度关系

Fig. 6 Relationship between pulse width and depth of echo wave

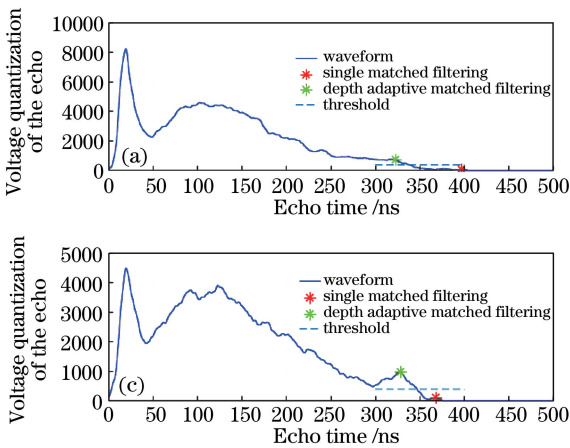


图 8 不同深度深水区域匹配滤波算法与自适应深度提取算法结果。(a) 33.22 m;(b) 33.64 m;(c) 34.57 m;(d) 33.67 m

Fig. 8 Results of matched filtering and adaptive depth extraction algorithm in deep area under different depths.

(a) 33.22 m; (b) 33.64 m; (c) 34.57 m; (d) 33.67 m

根据海底回波随深度展宽的特性,仿真生成不同海底回波的波形,将这些对应深度的回波波形作为不同深度的匹配滤波器的模板信号,形成具有深度自适应的匹配滤波器。图 7 为几个典型深度的匹配滤波器的模板信号,即不同深度的仿真回波信号波形,深度 0 m 代表发射激光波形。

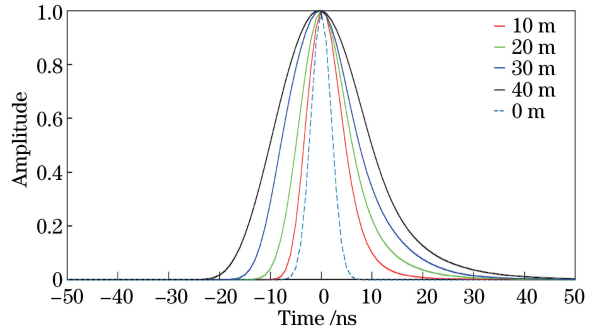


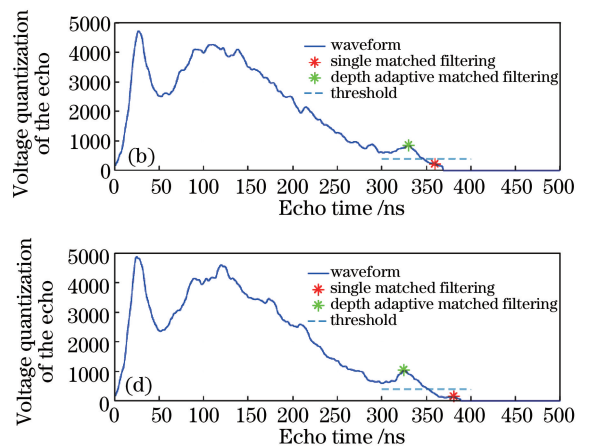
图 7 匹配滤波器

Fig. 7 Matched filtering

3.3 实验结果

3.3.1 自适应深度提取算法与匹配滤波算法结果与比较

图 8 为固定匹配滤波算法与自适应深度提取算法对水深大于 30 m 的激光雷达回波处理的结果,横坐标代表回波时间,单位是 ns,1 ns 对应水下载传播深度 0.11 m,纵坐标代表回波的电压量化值。可以看出,在水深大于 30 m 时,激光雷达回波宽度近似 20 ns,与 2 ns 宽度的原始激光波形差异较大,以原始激光波形为模板信号的固定匹配滤波算法不能提取出海底回波,而自适应深度提取算法可以正常工作。



为了对比固定匹配滤波算法与自适应深度提取算法的提取能力,统计测区中 10000 个回波深度提取的结果,自适应深度提取算法提取成功 9537 个波形,深度大于 30 m 的回波数量为 1610;固定匹配滤波算法提取成功 8687 个波形,深度大于 30 m 的回波数量为 812。图 9 为不同深度有效提取数据量的统计结果,可以看出当深度大于 30 m 的时候,自适

应深度提取算法提取成功的点明显多于固定匹配算法提取成功的点。图 10 为不同算法提取能力的对比,横轴为水深,纵轴为两种算法对应深度提取波形个数的比值的对数,可以看出,在水深大于 30 m 的区域,自适应深度提取算法的提取能力是固定匹配滤波算法的数倍。

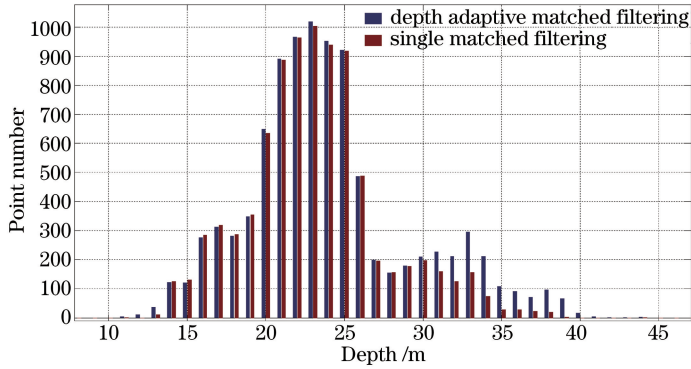


图 9 雷达回波深度统计

Fig. 9 Depth statistics of lidar data

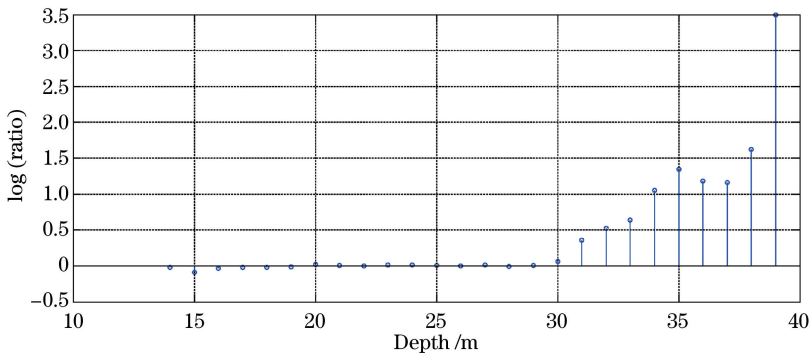


图 10 不同算法提取能力对比

Fig. 10 Comparison of extraction capacity with different methods

图 11 为固定匹配滤波算法与自适应深度提取算法处理得到的测区的点云,数据点根据自身深度进行伪彩色处理,图 11(a)和(b)的数据分别做了伪彩色处理,所以两图中的色标不同,色标的单位为 m。在深度超过 30 m 的区域,自适应深度提取算法结果的点云密度大于固定匹配滤波算法结果的点云密度。

3.3.2 自适应深度提取算法精度验证

为了评价自适应深度提取算法精度,实验中使用单波束声呐在同一测区进行同步测深,基于声呐测深结果对激光雷达结果进行精度评定。图 12 中白色的点为单波束声呐的数据点,伪彩色点为激光雷达数据点,测深数据在测区中分布比较均匀,可以完整地评价自适应深度提取算法结果的精度,图上

标注了部分声呐测深数据的深度,单位为 m。用于评价的声呐数据共 134 个,其中深度为 10~20 m 的有 33 个数据,深度为 20~30 m 的有 76 个数据,深度大于 30 m 的有 25 个数据。

单波束声呐测深点的位置与激光雷达测深点的位置不完全匹配,图 13 所示白色点为声呐数据,红色点为激光雷达数据,在评价中选择距离声呐测深点阈值范围内的激光雷达数据做插值进行比较,评价指标为中误差(RMSE),结果如表 3 所示。

3.3.3 自适应深度提取算法与解卷积算法比较

评价一个算法的有效性,要综合考虑提取能力、提取精度和提取速率。自适应深度提取算法与解卷积两种算法对同样 10000 个波形进行处理,用深度数据提取率表征提取能力,用单波束声呐测深数据

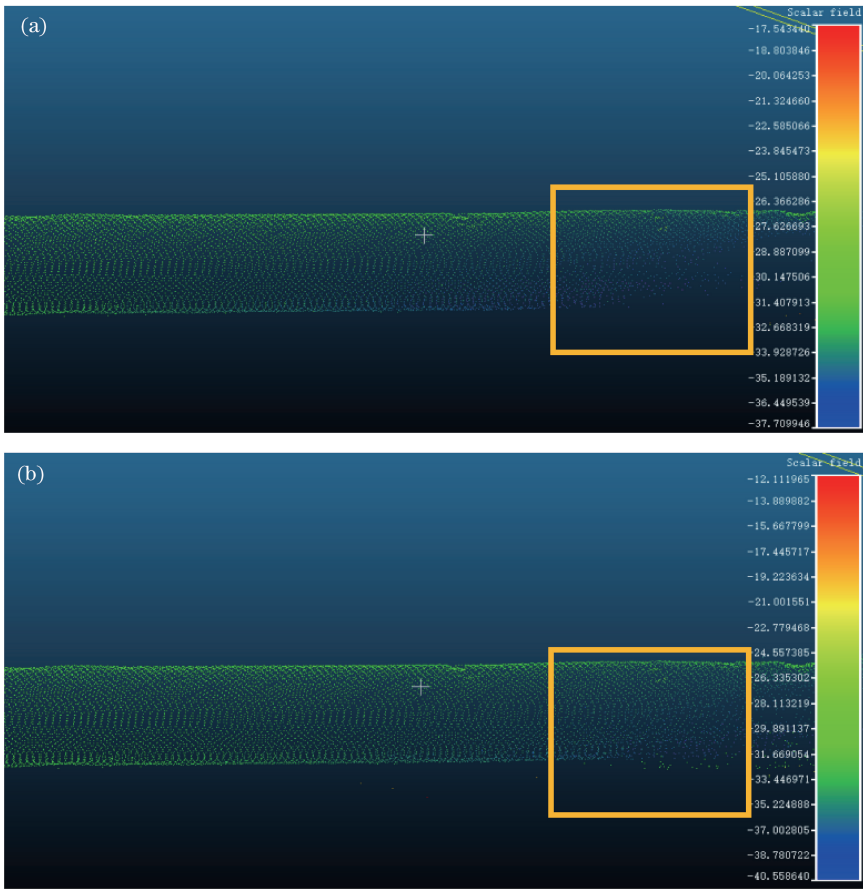


图 11 测区点云图。(a)固定匹配滤波算法;(b)自适应深度提取算法

Fig. 11 Point cloud of surveying area. (a) Fixed matching filtering algorithm; (b) adaptive depth extraction algorithm

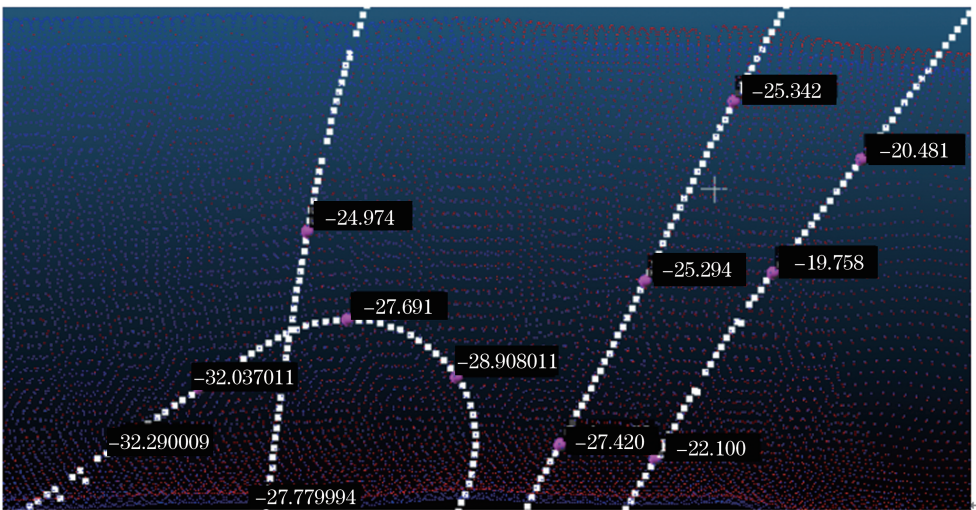


图 12 单波束声呐数据

Fig. 12 Single beam sonar data

的误差表征提取精度,用每个波形的平均处理时间表征提取速率,综合比较结果如表 4 所示。

解卷积算法可以分离水体和海底的回波,从而通过峰值实现海底水深的提取,该算法的提取能力基本不受水深影响,在提取能力和自适应

深度提取算法相当。解卷积算法要对整个回波进行迭代运算,算法的复杂度高,精度相对较高。而自适应深度提取算法只需要对回波进行一次滤波,虽然精度比解卷积算法稍低,但是在时间花费上有较大优势。

表 3 精度分析

Table 3 Accuracy analysis

Depth /m	RMSE /m
10-20	0.239
20-30	0.258
>30	0.292

表 4 算法性能比较

Table 4 Performance of different methods

Method	Average time cost /s	RMSE /m	Success rate /%
Adaptive depth extraction	0.006148	0.263	95.4
Deconvolution	0.032564	0.227	95.3

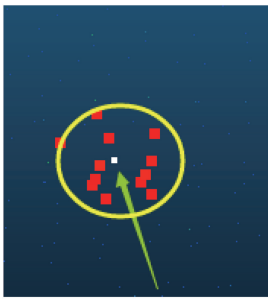


图 13 单波束声呐数据与雷达数据位置不匹配

Fig. 13 Location unmatched between single beam sonar data and lidar data

4 结 论

相比于固定的匹配滤波算法,自适应深度提取算法能够解决激光脉冲在海水中传输变形所带来的回波波形与滤波器不匹配的问题,从而实现海洋激光雷达海底回波位置提取。实验验证自适应的深度提取算法对深度大于 30 m 测区的数据的提取能力显著优于固定匹配滤波算法。与解卷积算法相比,自适应深度提取算法精度较低但是时间花费远小于解卷积算法,有希望达到激光雷达深度数据的实时解算。该算法能够满足海洋测绘的精度需求,可以应用于机载海洋激光雷达深水波形处理,为后续的点云生成、数字高程模型生成等工作奠定基础。

参 考 文 献

[1] Hu S J, He Y, Zang H G, *et al.* A new airborne laser bathymetry system and survey result [J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(9): 1163-1167. 胡善江, 贺岩, 臧华国, 等. 新型机载激光测深系统及其飞行实验结果 [J]. 中国激光, 2006, 33(9): 1163-1167.

[2] Zhao J H, Ouyang Y Z, Wang A X. Status and

development tendency for seafloor terrain measurement technology [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1786-1794.

赵建虎, 欧阳永忠, 王爱学. 海底地形测量技术现状及发展趋势 [J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1786-1794.

[3] 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 and Remote Sensing, 2015, 101: 22-35.

[4] Wagner W, Ullrich A, Ducic V, *et al.* Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2006, 60(2): 100-112.

[5] Wu J Y, van Aardt J A N, Asner G P. A comparison of signal deconvolution algorithms based on small-footprint LiDAR waveform simulation [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(6): 2402-2414.

[6] Lucy L B. An iterative technique for the rectification of observed distributions [J]. The Astronomical Journal, 1974, 79(6): 745-754.

[7] Li X L, Chen Y H, Yu F, *et al.* Comparison and analysis of inversion models for water optical property parameters by ocean lidar [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(10): 1001005. 李晓龙, 陈永华, 于非, 等. 海洋激光雷达水体光学特性参数反演模型对比及分析 [J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1001005.

[8] Jacovitti G, Scarano G. Discrete time techniques for time delay estimation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(2): 525-533.

[9] Roncat A, Wagner W, Melzer T, *et al.* Echo detection and localization in full-waveform airborne laser scanner data using the averaged square difference function estimator [J]. The Photogrammetric Journal of Finland, 2008, 21(1): 62-75.

[10] Du Z F, Lu Y M, Yang Z K, *et al.* Monte Carlo calculations of the received ocean lidar signals [J]. Chinese Journal of Lasers, 1999, 26(1): 52-56. 杜竹峰, 卢益民, 杨宗凯, 等. 海洋激光雷达接收信号的 Monte Carlo 计算 [J]. 中国激光, 1999, 26(1): 52-56.

[11] Hu X H. Research of adaptive digital array receiving technology in underwater optical communication system [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2015: 9-18. 胡秀寒. 水下光通信系统中的自适应数字化阵列接收技术研究 [D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2015: 9-18.