文章编号:1001-9014(2025)06-0962-10

DOI:10. 11972/j. issn. 1001-9014. 2025. 06. 014

海洋激光雷达水深测量及水体光学参数反演误差分析

沈振民*, 郑永超, 尚卫东, 刘 辉, 杨 颂, 张景豪, 孙 倩, 雷子昂

(北京空间机电研究所,北京 100094)

摘要:基于自研机载双频海洋剖面激光雷达获取的航飞试验回波数据,分析因波浪折射和水体散射引入的水深测量误差及其修正方法,提出基于Genetic Algorithm(GA)和Levenberg-Marquarelt(LM)算法相结合的波浪折射修正方法;理论分析表明,该波浪折射修正方法相比单一LM算法反演海浪轮廓的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)降低约50%。利用实测回波信号中的海水剖面后向散射部分开展水体光学参数反演方法研究,并理论分析基于Fernald后向迭代积分法反演水体光学参数引入的误差及其影响因素,发现当"粒子激光雷达比"的估计值相对真值偏差为+a%比-a%时,其反演水体漫射衰减系数和180°体积散射系数的误差更小。

关 键 词:海洋激光雷达;180°体积散射系数;漫射衰减系数;粒子激光雷达比

中图分类号:TN249 **文献标识码**: A

Error analysis of bathymetry and water optical parameters inversion by ocean LiDAR

SHEN Zhen-Min*, ZHENG Yong-Chao, SHANG Wei-Dong, LIU Hui, YANG Song, ZHANG Jing-Hao, SUN Qian, LEI Zi-Ang

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: Based on the flight test echo data obtained by self-developed airborne dual-frequency ocean profile LiDAR, the bathymetric error caused by wave refraction and water scattering was analyzed, and the correction method was proposed based on the combination of Genetic Algorithm (GA) and Levenberg-Marquarelt (LM) algorithm. The theoretical analysis shows that compared with the signal LM algorithm, this wave refraction correction method reduces the Root Mean Square Error (RMSE) of the inversion of sea wave profile by about 50%. The inversion method of water body optical parameters based on the seawater profile backscattering part of the measured echo signal was researched, and the errors and influencing factors introduced in the inversion of water optical parameters based on the Fernald backward iterative integration method were theoretically analyzed. It is found that when the estimated value of the "particle laser radar ratio" deviates by a% from the true value compared to $-a$%, the errors in the inversion of water body diffuse attenuation coefficient and 180° volume scattering coefficient are smaller.

Key words: ocean LiDAR, 180° volume scattering coefficient, diffuse attenuation coefficient, ratio of particle laser radar

引言

海洋侦测是人类孜孜追求的目标——"海兴则国强民富,海衰则国弱民穷",建设海洋遥感强国是我国重要的战略目标。海洋遥感多数仅能对海表观测,无法对海洋次表层乃至海底进行三维遥感探测[1-4]。机载海洋激光雷达已应用于近海岸水深测量,与船载声呐相比具有高效率、高分辨率和高探

收稿日期:2025-07-17,**修回日期**:2025-07-23 **Received date**:2025-07-17,**Revised date**:2025-07-23

基金项目:广西创新驱动发展专项(GuikeAA18118038),国家自然科学基金(61705007、61705160)

Foundation items: Supported by the Guangxi Innovation-Driven Development Special Project (GuikeAA18118038), the National Natural Science Foundation of China (61705007, 61705160)

作者简介(Biography):沈振民(1983—),男,高级工程师,博士,主要研究方向为海洋激光遥感. Email: s17610319265@163. com

*通讯作者(Corresponding author): Email: s17610319265@163. com

测精度的优点,典型的商品化激光雷达有CZMIL和RIEGO VQ系列[5-8]。随着卫星CALIPSO、ICESAT-2搭载的激光载荷CALIOP和ATLAS的出现,使星载激光水下探测成为可能[9-15];我国"透明海洋"大科学计划中具有前沿探索与科学发现性质的"观澜"系列卫星目前在研制中。蓝绿波长的激光雷达具备良好的海水穿透特性,可成为海洋剖面探测的一种重要手段。

海洋激光雷达蓝绿激光从大气入射到海水中时,需要对气海界面处水面波动和折射引起的水下传输路径误差进行校正。此外,激光在水中传输过程中具有强烈的前向散射效应,光子传输路径各异,导致海底回波信号展宽。上述因素均带来水深测量误差,误差值在分米至米级。Yang等提出利用海表激光点云,使用Levenberg-Marquarelt (LM)算法重构海表轮廓,进而确定水下光束传输方向[16]。Xu等提出采用自适应邻域选择方法计算激光脉冲入水瞬间的海面法线[17]。Guo等提出基于维数的自适应方法校正激光入射角[18]。Yang等分析了水体前向散射导致星载光子计数激光雷达的测深偏差及其修正方法,基于半解析蒙特卡洛模拟方法,对前向散射效应进行了定量建模和分析,并得到校正ICESAT-2前向散射测深偏差的经验公式[19]。Shangguan等分析了水体散射相函数、吸收系数、激光足印尺度等对水深测量误差的影响[20]。利用海洋激光雷达弹性散射剖面回波信号反演水体光学参数,主要以Fernald后向迭代积分法为主[21-22],其反演误差取决于"粒子激光雷达比"估计的精度。目前需要通过原位测量来确定被测海域对应的"粒子激光雷达比",未见报道有关"粒子激光雷达比"估计偏差对反演水体光学参数误差的影响分析。

本文介绍自主研制的机载双频海洋剖面弹性散射激光雷达,利用其海表和海底回波信号测量水深,分析因波浪折射和水体散射引入的误差及其修正方法;利用其海水剖面回波信号开展水体光学参数反演方法研究,并分析反演水体光学参数引入的误差及其影响因素。

1　误差分析

海洋激光雷达水下弹性散射回波信号可以用于水深测量和水体光学参数反演,本文主要分析二者的误差及修正方法。

1.1　水深测量误差

水深测量误差主要来源于波浪折射引起的水下传输路径变化及水体散射导致的海底回波峰值漂移和展宽。

(1)波浪折射误差

波浪导致激光入水折射角度求取变得复杂,影响水深测量精度。扫描型机载海洋激光雷达可获取一定点密度的海表激光点云,使用该点云数据可拟合出海表轮廓函数,进而确定激光气海界面入射角和折射角,可准确追迹激光水下传输的方向。相比文献[16]中海浪轮廓初始函数拟合使用的LM算法,本文将Genetic Algorithm(GA)和LM算法相结合,拟合精度更高。

利用激光海表点云数据进行海表轮廓拟合,首先需确定海表轮廓函数,其可以表示为连续傅里叶变换谱的叠加:

$$z=\sum_{i=1}^{m}\zeta_i\cos\left[\omega_i t-\frac{\omega_i^2}{g}\left(x\cos\alpha_i+y\sin\alpha_i\right)+\varepsilon_i\right], \quad (1)$$

式中,ζ_i、ω_i、t、α_i和ε_i分别为海表轮廓的幅度、频率、时间、波传播方向角和波初始相位;g为重力加速度;m是余弦波叠加次数。

将获得的某区域内的n个海表激光点云坐标(x', y', z')代入式(1),则变为n个方程求解$4m$个未知数的问题(t=0,认为n个海表激光点云为同一时刻点云);当n>$4m$时,变为求解超定方程组问题。LM算法可用于求解超定方程组,相比于梯度法和牛顿法,具有收敛速度快并能较好地求取全局最优解[23]。振幅ζ_i初始值可由海浪谱公式求解,典型海浪谱有Pierson-Moskowitz(PM)谱、International Towing Tank Conference(ITTC)谱、ITTC双参数谱、Joint North Sea Wave Project(JONSWAP)谱、Bretschneider谱等。海浪谱的选择要根据海区来选取,PM谱适用于风区广阔、波浪充分发展的开阔大洋海域,如太平洋、大西洋;JONSWAP谱适用于风区较短、波浪未充分发展的有限风区海域,如我国北海和东海海域[24-25]。将ω_i、α_i和ε_i初值利用GA求取,相比于文献[16]中初值设为0,此方法重构的海表轮廓函数具有更小的均方根误差。

根据海表轮廓函数可计算出海表激光入射点的波面法向量,利用折射定律求解激光入水折射角,主要公式如下:

$$\vec{I}_{\text{laser}}\cdot\vec{N}=-|\vec{I}_{\text{laser}}||\vec{N}|\cos i_{\text{laser}}, \quad (2)$$

式中,$\vec{I}_{\text{laser}}$为入射激光法向量,$\vec{N}$为激光入射点波面法向量,i_{laser}为激光入射角。

$$\sin r_{\text{laser}} = \frac{n_a \sin i_{\text{laser}}}{n_{\text{w}}} \quad , \quad (3)$$

式中，r_{laser}为激光入水折射角，n_{a}为大气折射率，n_{w}为海水折射率。

(2)水体散射误差

激光在水下传输过程中，水体前向散射导致回波信号展宽和峰值漂移，激光经水体散射后海底回波退化过程可表示为：

$$g(t) = h(t) \otimes f(t) + n(t) \quad , \quad (4)$$

式中，$f(t)$为激光发射时序波形，$h(t)$为海水介质的系统响应函数，$n(t)$为背景光、探测器等噪声，$g(t)$为经水体散射后返回的海底回波信号，⊗为卷积运算。

从式(4)可以看出，激光海底回波相当于激光初始波形与海水散射函数卷积所得，因卷积效应导致回波信号展宽和峰值漂移。因此，要获取准确的激光回波位置信息，需要对回波信号进行去卷积处理。本文采用理查德森-露西去卷积(Richardson-Lucy Deconvolution, RLD)法，该方法属于一种迭代图像恢复算法，具有加速收敛特性；在回波信号较弱时仅需几十次迭代，再使用峰值鉴别法即可准确获取海底回波信号位置。

RLD迭代算法如下[26]：

$$\hat{f}_{k+1}(t) = \hat{f}_k(t)\left(h(t) * \frac{g(t)}{h(t) \otimes \hat{f}_k(t)}\right) \quad , \quad (5)$$

式中，$\hat{f}_k(t)$是f经k次迭代后的估计，*表示相关运算，$h(t) \otimes \hat{f}_k(t)$称为重模糊回波信号。

迭代次数k可根据经验设为固定值，也可利用残差$\int_{t_1}^{t_2} \| g(t) - \hat{f}_{k+1}(t) \otimes h(t) \| \mathrm{d}t \leqslant \varepsilon$限定迭代次数，$\varepsilon$为设定的阈值。

1.2 水体光学参数反演误差

海洋激光雷达方程中涉及的水体光学参数为水体180°体积散射系数和激光雷达衰减系数，如下式所示：

$$P(z) = P_{\text{e}} T^2 A_{\text{r}} \eta_{\text{e}} \eta_{\text{r}} F \left(n_{\text{w}} H + z\right)^{-2} \beta_\pi(z) \Delta l \exp\left[-2 \int_0^z K_{\text{lidar}}(x) \mathrm{d}x \right] \quad , \quad (6)$$

式中，$P(z)$为水深z处返回的激光雷达回波信号功率；P_{e}为激光发射功率；T为大气单程透过率；A_{r}为系统接收口径面积；η_{e}为发射系统效率；η_{r}为接收系统效率；F为视场损失因子；H为激光发射端距离海面的垂直距离；$\beta_\pi(z)$为水深z处的水体180°体积散射系数；$\triangle l$为水下垂直分辨率；$K_{\text{lidar}}(x)$为水深x处的激光雷达系统衰减系数，其与水体漫射衰减系数K_{d}的近似关系如下[27, 28]：

$$K_{\text{lidar}} = K_{\text{d}} + \left(c - K_{\text{d}}\right) \mathrm{e}^{-0.85cD} \quad , \quad (7)$$

式中，c为水体的衰减系数；D为激光雷达系统视场在海表面的直径；cD<<1时，单次散射占据主导；cD>>1时，多次散射占据主导；cD>2~3时，$K_{\text{lidar}} \approx K_{\text{d}}$[27]。

弹性散射激光雷达方程求解β_π和K_{lidar}的方法主要有Fernald法、Klett法等[29, 30]，其中Fernald迭代积分法分开考虑分子和粒子的散射特性，尤其是后向迭代积分方式使得求解更易收敛，见式(8)和(9)：

$$\beta_\pi(z) = \frac{X(z) \exp\left[2\left(S_1 - S_2\right) \int_{z_C}^{z} \beta_2(z) \mathrm{d}z\right]}{\frac{X(z_C)}{\beta_1(z_C) + \beta_2(z_C)} + 2S_1 \int_{z_C}^{z} X(z) \exp\left[2\left(S_1 - S_2\right) \int_{z_C}^{z} \beta_2(\dot{z}) \mathrm{d}\dot{z}\right] \mathrm{d}z} \quad , \quad (8)$$

式中，β_1和β_2分别为水中粒子和水分子的180°体积散射系数；S_1和S_2分别为粒子和水分子激光雷达比，可分别表示为K_1/β_1和K_2/β_2，其中K_1和K_2分别为粒子和水分子的激光雷达衰减系数；标准化回波功率$X(z)$为$P(z)(nH + z)^2$，z_C为某一水深位置处。

$$K_{\text{lidar}}(z) = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right) K_2(z) + \frac{X(z) \exp\left[2\left(S_1 - S_2\right) \int_{z_C}^{z} K_2(z)/S_2 \mathrm{d}z\right]}{\frac{X(z_C)}{K_1(z_C) + \frac{S_1}{S_2} K_2(z_C)} + 2 \int_{z_C}^{z} X(z) \exp\left[2\left(S_1/S_2 - 1\right) \int_{z_C}^{z} K_2(\dot{z}) \mathrm{d}\dot{z}\right] \mathrm{d}z} \quad . \quad (9)$$

Fernald后向迭代积分法求解水体180°体积散射系数β_π和激光雷达系统衰减系数K_{lidar}的精度主要由1)水中粒子激光雷达比S_1，2)标准化回波功率$X(z)$，3)参考位置z_C处粒子180°体积散射系数$\beta_1(z_C)$和粒子激光雷达衰减系数$K_1(z_C)$决定。因此，二者绝对误差可分别表示为：

$$\delta(\beta) = \sqrt{\left(\frac{\partial \beta}{\partial S_1}\right)^2 \delta^2(S_1) + \left(\frac{\partial \beta}{\partial X(z)}\right)^2 \delta^2(X(z)) + \left(\frac{\partial \beta}{\partial \beta_1(z_C)}\right)^2 \delta^2(\beta_1(z_C))} \quad , \quad (10)$$

$$\delta\left(K_{\text{lidar}}\right)=\sqrt{\left(\frac{\partial K_{\text{lidar}}}{\partial S_1}\right)^2\delta^2\left(S_1\right)+\left(\frac{\partial K_{\text{lidar}}}{\partial X(z)}\right)^2\delta^2\left(X(z)\right)+\left(\frac{\partial K_{\text{lidar}}}{\partial K_1\left(z_C\right)}\right)^2\delta^2\left(K_1\left(z_C\right)\right)}\quad .\quad (11)$$

精度(相对误差)分别为:

$$\varepsilon(\beta)=\frac{\sigma\beta}{\beta_{\text{true}}}=\sqrt{\varepsilon(\beta)_{S_1}^2+\varepsilon(\beta)_{X(z)}^2+\varepsilon(\beta)_{\beta_1(z_C)}^2},\quad (12)$$

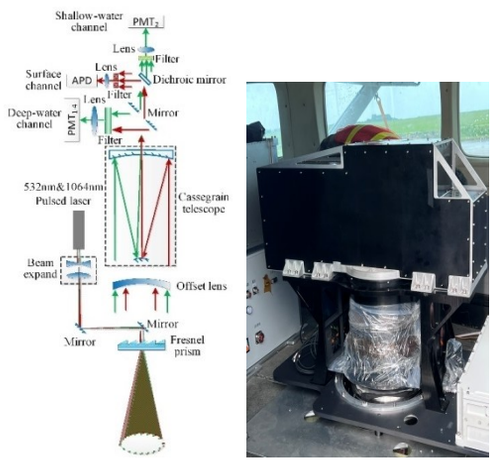
$$\varepsilon\left(K_{\text{lidar}}\right)=\frac{\sigma K_{\text{lidar}}}{K_{\text{lidar true}}}=\sqrt{\varepsilon\left(K_{\text{lidar}}\right)_{S_1}^2+\varepsilon\left(K_{\text{lidar}}\right)_{X(z)}^2+\varepsilon\left(K_{\text{lidar}}\right)_{K_1(z_C)}^2}\quad .\quad (13)$$

2　实验结果

利用实测的机载海洋激光雷达回波波形和水体光学参数原位测量数据,开展波浪折射修正和水体光学参数反演误差影响因素分析。

2.1　机载实验

研制的机载海洋激光雷达系统由激光发射单元、光学接收单元、数据采集单元和综合管理控制单元组成,系统组成和实物分别如图1(a)和图1(b)所示。激光发射单元采用倍频调Q的Nd:YAG脉冲激光器产生532 nm/1 064 nm双波长激光,脉冲宽度约为5 ns/6 ns,脉冲重复频率均为5 500 Hz。在综合管理控制单元指令下,激光器根据触发信号产生激光经发射镜头、菲涅尔扫描棱镜后射向目标。由目标反射的激光回波经收发共孔径扫描镜、马克苏托夫补偿透镜、卡塞格林望远镜后,通过中空反射镜将接收光束按视场大小分为两束,其中透射光束经半反半透镜后又分为两束,以实现海表、浅水和深水的多通道探测。接收光学单元根据各个通道的视场角和谱段进行分波长、分视场设计,将来自海表、浅水、深水的回波送入不同的探测器模块。由于深水回波信号微弱且背景光复杂,其采用四象限PMT变增益探测方式。系统有效接收口径为200 mm;海表和浅水通道视场为5 mrad,深水通道视场为50 mrad;菲涅尔棱镜转速1 680 rpm,激光扫描角10°,可实现一定幅宽(与航高相关)圆形推扫的激光点云轨迹。



(a)　　(b)

图1　海洋剖面激光雷达系统:(a)原理图;(b)实物图

Fig. 1　Marine profile Lidar system: (a) schematic diagram; (b) physical map

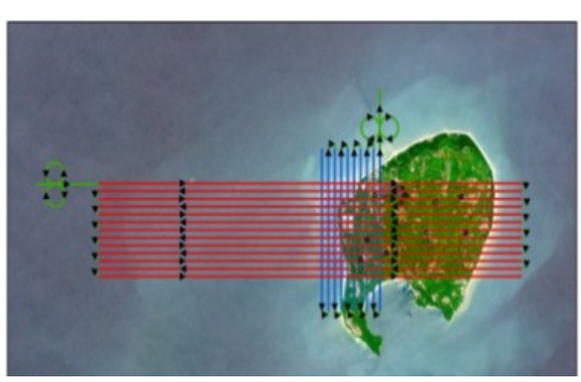


图2　涠洲岛试验区航线图

Fig. 2　Route map of Weizhou Island experimental zone

2022年8月在北海涠洲岛附近海域开展了有人机载海洋激光雷达水深测量实验,测区主要在涠洲岛西侧海域,试验区总面积约为41 km^2,具体如图2所示。海洋剖面弹性散射激光雷达系统搭载于塞斯纳208型号飞机上,航高500 m,飞行速度200 km/h;POS设备型号为立得PPOI-A05。

单点激光发射后多通道回波波形如图3所示,图3(a~c)分别为发射的532 nm激光、海表返回的1 064 nm激光回波和532 nm激光入射海底后返回的浅水通道回波。图3(d~g)分别为532 nm激光入射海底返回后深水通道接收的回波,由于深水通道采用四象限变增益探测方式,所得到的4通道深水波形海底回波信号从不显著到饱和,其中深水2通道波形最为理想。图3(h)为采用深水2通道波形数据RLD后的结果。图3(a)中发射激光波形是使用光电探测器(Photodiode, PD)通过激光器本身腔内散射光获取,导致在电信号输出上有一定的振荡,但激光本身为高斯型,不存在振荡,因此发射激光并不会影响海面和海底回波信号质量。利用RLD算法去卷积处理时,需将激光波形进行高斯拟合处

理。图3(b)海表回波通道波形峰值相比浅水和深水通道的海表回波峰值相对提前,这是由于1 064 nm激光水中衰减严重,确定海表时间以1 064 nm波长为准,而532 nm深浅水通道激光在水中多次散射传输,导致其第一个峰值相对于海表有所滞后,因此需要利用1 064 nm海表回波和深水通道海底回波来确定激光水下传输斜距。

2.2 波浪折射修正影响因素

涠洲岛属于我国北海海域,选取JONSWAP谱进行海表轮廓重建。JONSWAP海浪谱中风区长度设为50 km,海面风速5 m/s,m=30。在进行海表激光点云重构海表轮廓时,需将点云分块处理,较小范围的点云可认为采集时刻相同,图4(a)为获取的局部25 m×25 m内的激光点云,采用GA算法先确定海表轮廓中120个参数的初值,再利用LM迭代算法求解最优的120个参数,得到拟合后的海表轮廓(图4(b)),光线追迹得到激光水下传播路径矢量(图4(c)),最终求取激光斜入射到海底的坐标。

为了分析LM迭代算法拟合海浪轮廓的精度,使用JONSWAP谱生成海浪,轮廓上的三维坐标模拟激光点云数据,比较利用模拟激光点云拟合的海浪轮廓与海浪谱生成的海浪轮廓的RMSE。表1分析了不同点云范围和点云间隔情况下,激光点云对拟合海浪轮廓的精度影响。可以看出,相同点云范围下点云间隔越小,拟合误差越大,这主要是数据量大所致;点云范围越大,拟合误差也随之增大,因此在实际处理时要选取适中的点云范围。另外,当点云范围为100 m×100 m时,LM迭代算法精度显著

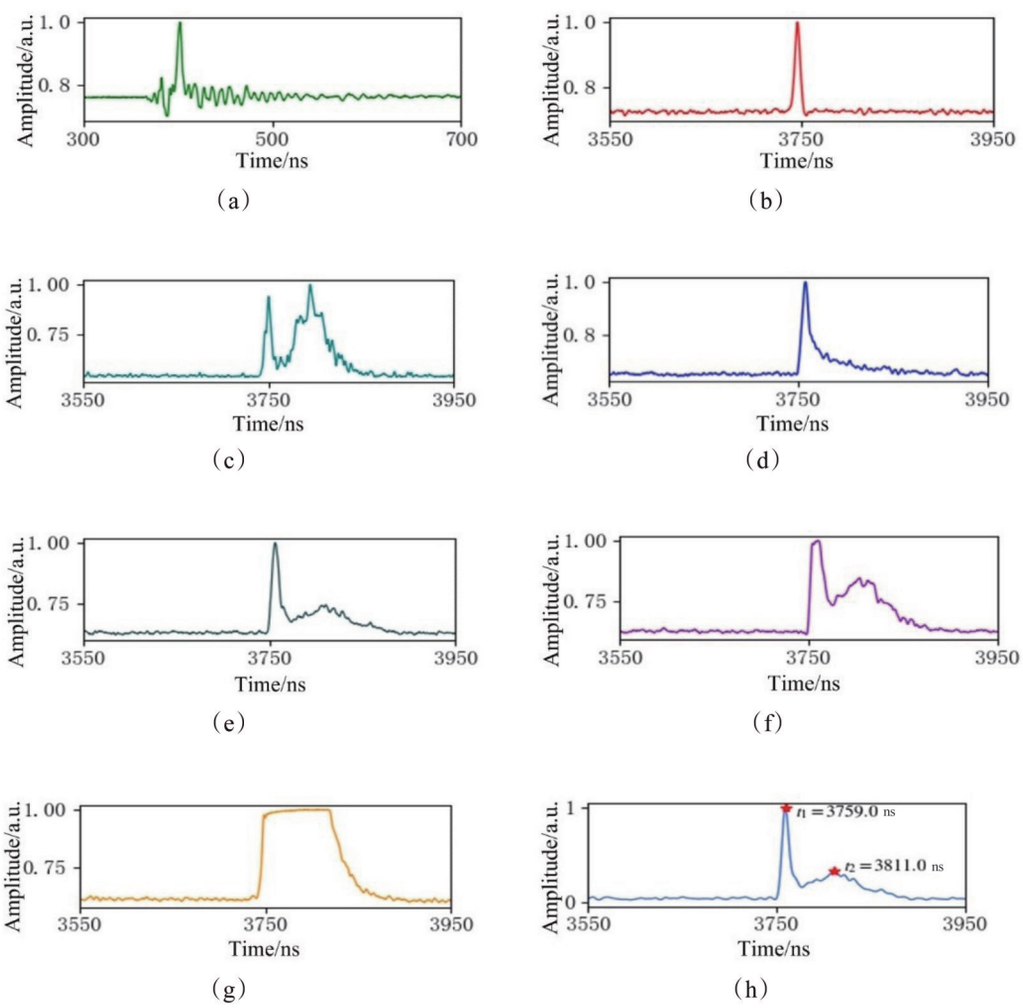
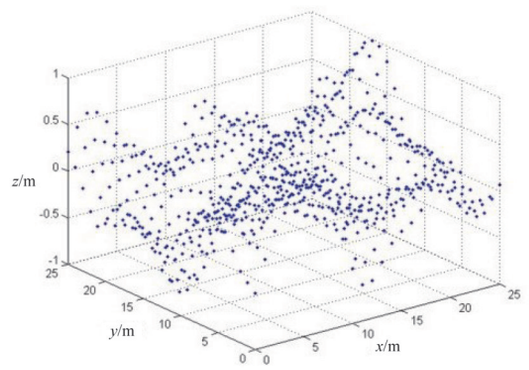
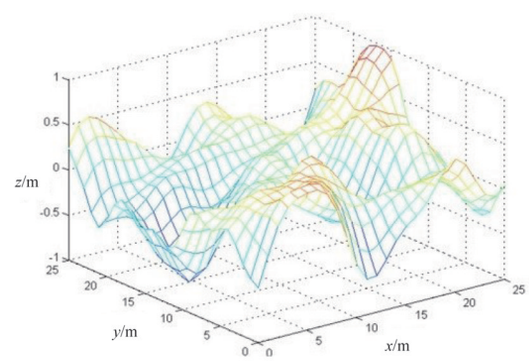


图3 单点激光多通道回波波形:(a) 532 nm激光主波;(b) 1 064 nm海表回波;(c) 浅水通道回波;(d) 深水1通道回波;(e) 深水2通道回波;(f) 深水3通道回波;(g) 深水4通道回波;(h) 深水2通道RLD与峰值鉴别

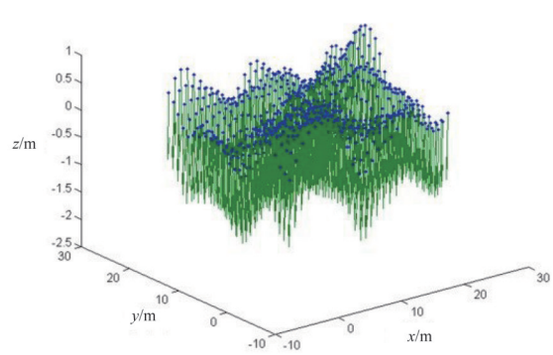
Fig. 3 Single point laser multichannel echo waveform: (a) laser waveform of 532 nm; (b) surface echo of 1064 nm; (c) echo of shallow water channel; (d) echo of deep water channel 1; (e) echo of deep water channel 2; (f) echo of deep water channel 3; (g) echo of deep water channel 4; (h) RLD and peak identification for deep water channel 2



(a)



(b)



(c)

图4　激光点云波浪重构和折射修正:(a) 海表激光点云;(b) 海表轮廓拟合;(c) 激光水下传播路径矢量

Fig. 4　Laser point cloud wave reconstruction and correction: (a) sea surface laser point cloud; (b) sea surface contour fitting; (c) underwater path vector of laser

下降,如果用GA算法先确定LM算法前需要的初值,拟合误差从36.4 cm、41.5 cm分别降为16.7 cm、22.4 cm。从表1可以看出,GA_LM算法相比于LM算法,拟合误差降低约50%。

综上所述,解算出飞行实验海表激光点云如图5所示,经过RLD、峰值鉴别、波浪折射修正后生成的测区局域海底地形图如图6所示,其幅宽为176.3 m。

表1　激光点云参数对拟合海浪轮廓精度的影响

Table 1　The influence of laser point cloud parameters on the accuracy of ocean wave profile fitting

点云范围	点云间隔	LM算法拟合误差(RMSE)	GA_LM算法拟合误差(RMSE)
25 m×25 m	2 m×2 m	2.6 cm	1.9 cm
25 m×25 m	1 m×1 m	3.8 cm	2.3 cm
50 m×50 m	2 m×2 m	12.0 cm	6.1 cm
50 m×50 m	1 m×1 m	13.4 cm	6.8 cm
100 m×100 m	2 m×2 m	36.4 cm	16.7 cm
100 m×100 m	1 m×1 m	41.5 cm	22.4 cm

图5　飞行实验海表激光点云

Fig. 5　Sea surface laser point cloud in flight test

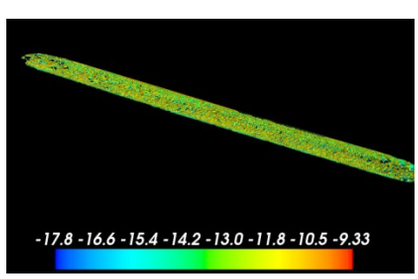


图6　测区海底地形图

Fig. 6　Submarine topographic map of the survey area

为了验证经误差修正后的水深,在涠洲岛附近海域进行船载声呐水深原位测量。原位测量值与经修正后的激光测深值见表2,经修正后测深误差在0.3 m以内。

2.3　水体光学参数反演误差影响因素

研制的海洋剖面激光雷达除可用于水深测量外,还可利用海表到海底间的激光水体散射回波信号进行水体光学参数反演。使用式(8)和式(9)可分别反演水体180°体积散射系数和激光雷达衰减系数的剖面分布情况,而激光雷达衰减系数在一定情况下可近似为水体漫射衰减系数,见式(7)。

对于Fernald后向迭代积分法,参考位置z_c选取

表2 原位测量值与误差修正后激光测深值

Table 2 In-situ measured values and laser depth measurement values after error correction

站点	经度	纬度	原位测量值	激光测深值	绝对误差
P1	109.078°	21.044 0°	10.38 m	10.20 m	0.18 m
P2	109.076°	21.044 7°	11.27 m	11.44 m	−0.17 m
P3	109.074°	21.043 6°	13.07 m	12.85 m	0.22 m
P4	109.069°	21.044 1°	16.98 m	16.71 m	0.27 m

接近海底回波信号深度附近的海水后向散射信号处，从该深度逐渐向海表迭代。参考位置z_C处的激光雷达衰减系数K采用斜率法获得，K-K_2即为粒子的激光雷达衰减系数K_1；对于532 nm激光波长，水分子的激光雷达衰减系数K_2约为0.051 9 m^{-1}[21]。参考位置z_C处的粒子180°体积散射系数β_1可采用K_1/S_1求取；对于532 nm激光波长，水分子的180°体积散射系数β_2约为2.4×10^{-4} $m^{-1}sr^{-1}$。根据文献[21]对K_d与粒子激光雷达对应关系分析，以及结合在涠洲岛附近海域K_d原位测量值，S_1估计值取为210 sr；水分子激光雷达比仅与激光波长有关，对于532 nm激光波长，S_1约为216 sr。

反演结果如图7所示，可以看出，水体上层的光学参数值小于下层水体，一方面是由于Fernald后向迭代积分参考位置起点z_C选取在水体下层，从下层逐渐向上层迭代积分，导致水体下层反演误差大；另一方面可能是因为水体下层分布浮游植物导致水体浑浊所致。

为了验证激光雷达衰减系数反演的置信度，在测量水深真值的同时，采用德国TriOS RPMS自由落体式辐射剖面测量系统获取相应站点的下行辐照度剖面数据，利用斜率法可解算出水体的平均漫射衰减系数K_d，实测四个站点P_1至P_4站点的K_d分别为0.11 m^{-1}、0.12 m^{-1}、0.10 m^{-1}和0.08 m^{-1}。其值在0.08~0.12 m^{-1}之间，与图7(a)反演值区间范围在一个量级。

为了分析Fernald后向迭代积分反演算法的精度，采用Wa-LiD模型生成激光雷达海洋剖面回波波形[31]，如图8所示，仿真参数见表3。此处采取仿真波形来分析算法反演精度，一方面将海水看成是

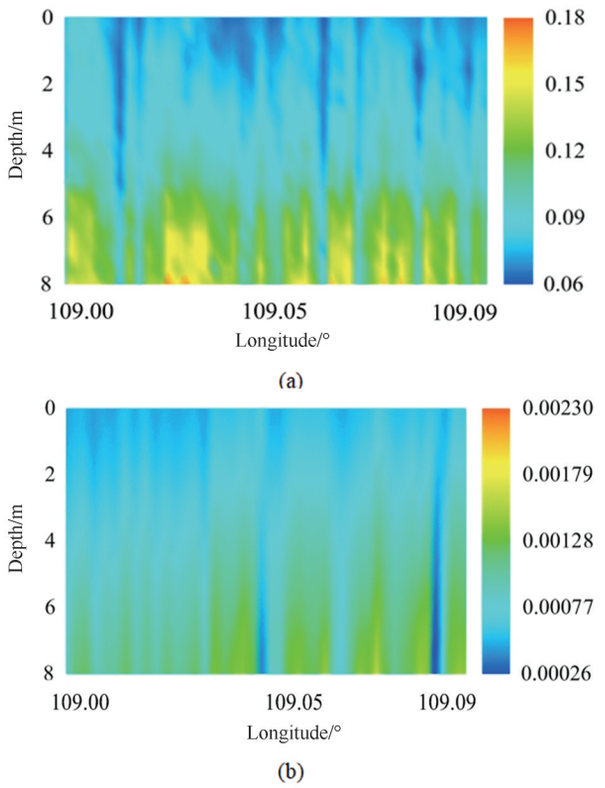


图7 飞行区域内水体光学参数反演结果：(a) 测区K_{lidar}反演值；(b) 测区β_π反演值

Fig. 7 Inversion results of optical parameters of water bodies in the survey area: (a) K_{lidar} inversion value of flight area; (b) β_π inversion value of flight area

均一水体，便于分析相关参数对反演精度的影响；另一方面仿真中的β_π和K_{lidar}相比于实测值，不受环境和测量条件等因素影响。通过仿真与航飞激光回波波形对比，R^2优于0.96。综上所述，可通过仿真波形来分析水体光学参数反演算法的精度。当为分层水体或非均一水体时，需采用分段法进行分析，即将水体分为等间隔深度的区间，在每个区间内进行Fernald后向迭代积分反演算法来求取区间内的光学参数；同理，光学参数的原位测量也分为等间隔深度区间，每个区间内进行光学参数测量。

上述仿真参数中，粒子激光雷达比S_1为270 sr，实际反演中该值较难确定，一种方式是通过走船精确测量出该区域的粒子激光雷达比，该方法成本较高；另一种方式可以通过卫星多光谱数据来估计该

表3 海洋剖面回波仿真参数

Table 3 Ocean profile echo simulation parameters

H	P_e	T	A_r	η_e	η_r	β_π	$\triangle l$	K_{lidar}
500 m	0.6 MW	0.97	0.03 m^2	0.90	0.70	4.18×10^{-4} $m^{-1}sr^{-1}$	1.13 m	0.10 m^{-1}

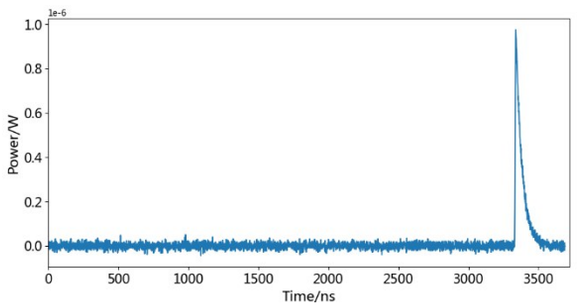


图8　海洋剖面回波波形

Fig. 8　Ocean profile echo waveform

区域的激光雷达比。假设S_1为300 sr,使用式(8)和式(9)对图8的波形数据进行Fernald后向迭代积分处理后,K_{lidar}和β_π的反演值及反演误差分别如图9(a)/(b)和9(c)/(d)所示,反演误差均值分别为3.2%和4.8%。Fernald后向迭代积分参考点水深z_C选取位置为水深40 m处,此处用斜率法求K_{lidar},40 m至25 m迭代过程中误差显著下降,25 m到海表误差趋于稳定,且误差较小(图9(b));β_π的反演误差也在25 m到海表趋于稳定(图9(d))。

粒子激光雷达比S_1估计偏差对K_{lidar}和β_π的反演精度的影响如表4所示,可以看出,S_1估计偏差对K_{lidar}反演误差影响很小;对β_π反演误差影响较大,且S_1估计值偏差+a%比−a%的β_π反演误差要小。因此,在未知原位数据的情况下,S_1估计值尽可能大些。不考虑噪声情况下,标准化回波功率$X(z)$,参考位置z_C处粒子180°体积散射系数$\beta_1(z_C)$和粒子激光雷达衰减系数$K_1(z_C)$对水体光学参数反演误差在3%以内,因此,对水体光学参数K_{lidar}和β_π反演精度主要受S_1估计偏差影响,尤其对β_π影响最为严重。

表4　S_1估计偏差与K_{lidar}和β_π反演精度关系

Table 4　Relation between S_1 estimation bias and inversion accuracy of K_{lidar} and β_π

S_1估计偏差	−30%	−20%	−10%	10%	20%	30%
K_{lidar}反演误差	3.7%	3.5%	3.4%	3.2%	3.2%	3.1%
β_π反演误差	22.7%	14.3%	7.7%	4.5%	6.8%	9.1%

3　结论

弹性散射海洋剖面激光雷达在水深测量和海水光学参数垂直廓线反演方面具有一定的优势。

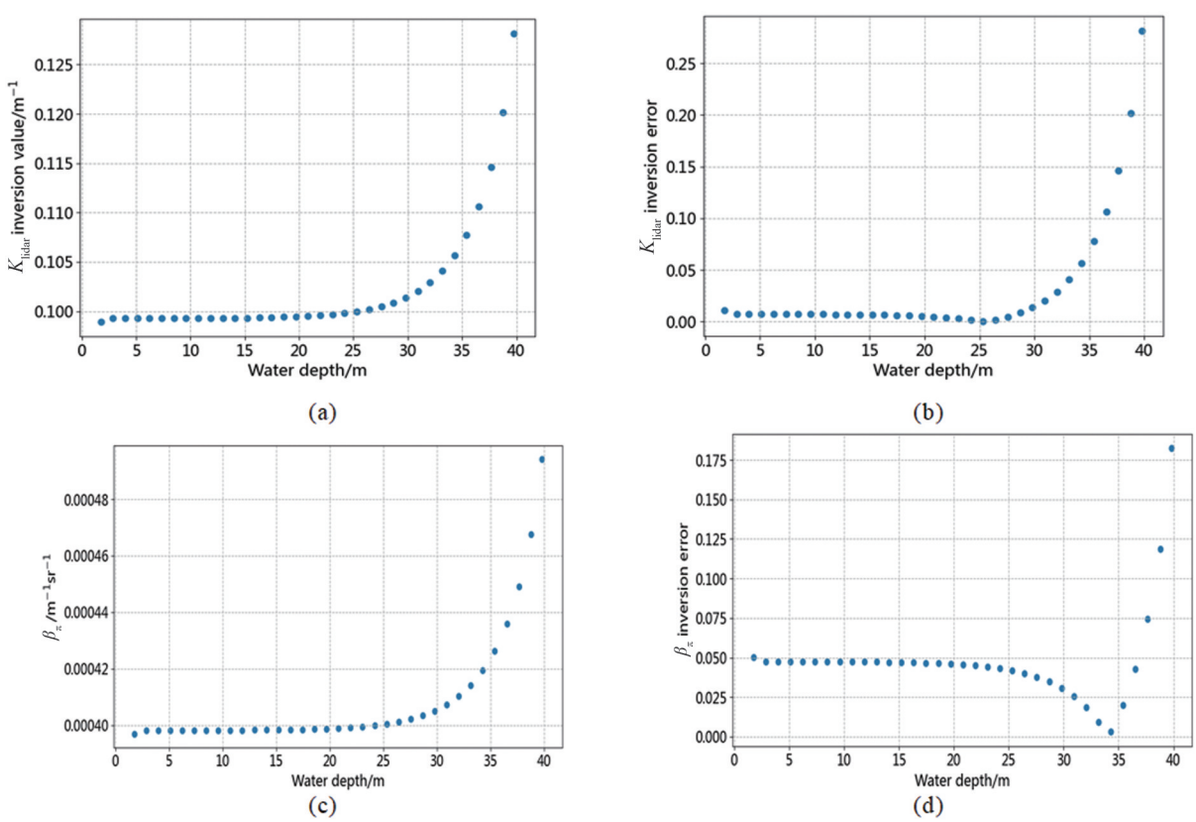


图9　Fernald法水体光学参数反演误差分析:(a) K_{lidar}反演值;(b) K_{lidar}反演误差;(c) β_π反演值;(d) β_π反演误差

Fig. 9　Error analysis of inversion of water optical parameters by Fernald method: (a) K_{lidar} inversion value; (b) K_{lidar} inversion error; (c) β_π inversion value; (d) β_π inversion error

本文利用自主研制的机载双频海洋剖面激光雷达系统成功获取了北海涠洲岛附近海域的海底地形和水体光学参数垂直廓线。

在水深解算方面，分别采用基于RLD、峰值鉴别和波浪折射修正方法实现对海底回波信号提取、鉴别和定位；其中在海表轮廓拟合上采用的GA和LM相结合的算法，相比于单独使用LM算法的拟合精度提高约一倍；并分析了不同点云范围和点云间隔情况下的激光点云对拟合海浪轮廓精度的影响，当点云范围较小和点云密度相对稀疏时，拟合精度更高。

在水体光学参数反演方面，得到测量海域的水体剖面180°体积散射系数和激光雷达衰减系数（当视场足够大时，激光雷达衰减系数近似等于水体漫射衰减系数）；由于机载激光雷达回波数据和船载原位测量数据位置匹配较难，只能在飞机规划航迹上采用船载多站点对水体光学参数进行原位测量，对Fernald后向迭代积分法反演的水体光学参数进行置信度验证。最后通过推导的基于Fernald法的绝对误差公式，分析了粒子激光雷达比估计值对Fernald法反演水体光学参数精度的分析；结果表明，粒子激光雷达比S_1估计值偏差对水体180°体积散射系数影响较大，且S_1估计值偏差为$+a\%$比$-a\%$时的反演误差更小。

References

[1] Li Shu Jing, Pan De Lu. The suggestion for development of space marine remote sensing in China [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2003, 24(1): 43-47.
李淑菁, 潘德炉. 发展中国航天海洋遥感技术的建议[J]. 航天返回与遥感, 2003, 24(1): 43-47.

[2] Pan De Lu, Lin Shou Ren, Li Shu-Jing, et al. The application of watercolor remote sensing in general management of coast zone [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2001, 22(2): 34-39.
潘德炉, 林寿仁, 李淑菁, 等. 海洋水色遥感在海岸带综合管理中的应用[J]. 航天返回与遥感, 2001, 22(2): 34-39.

[3] Hua Deng Xin, Wang Jun. Research progress of ocean laser remote sensing technology(invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(9): 0903003.
华灯鑫, 王骏. 海洋激光遥感技术研究进展[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(9): 0903003.

[4] Tang Jun Wu, Chen Ge, Chen Wei Biao, et al. Three dimensional remote for oceanography and the Guanlan ocean profiling Lidar [J]. Journal of Remote Sensing, 2021, 25(1): 460-499.
唐军武, 陈戈, 陈卫标, 等. 海洋三维遥感与海洋剖面激光雷达[J]. 遥感学报, 2021, 25(1): 460-499.

[5] Gray D J, Anderson J, Nelson J, et al. Using a multi-wavelength LiDAR for improved remote sensing of natural waters [J]. Appl. Opt., 2015, 54: F232-F242.

[6] Ma J, Lu T T, He Y, et al. Compact dual-wavelength blue-green laser for airborne ocean detection lidar [J]. Appl. Opt., 2020, 59(10): c87-c91.

[7] Feygels V, Johnson N, Kopilevich Y, et al. Features of airborne lidar surveys in clear ocean waters using coastal zone mapping and imaging lidar (CZMIL) [C]. Proc. of SPIE, 2018, 10778: 107780l.

[8] He Yan, Tao Bang-Yi, Yu Jia-Yong, et al. Development of airborne LiDAR bathymetric technology and application [J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(11): 1101016.
贺岩, 陶邦一, 俞家勇, 等. 机载激光测深技术及应用[J]. 中国激光, 2024, 51(11): 1101016.

[9] Chen Y F, Zhu Z, Le Y, et al. Refraction correction and coordinate displacement compensation in nearshore bathymetry using ICESat-2 lidar data and remote-sensing images [J]. Optics Express, 2021, 29(2): 2411-2430.

[10] Wang Jing Song, Liu Dong. Comparison and analysis of payloads performance for active and passive spaceborne atmospheric detection [J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(18): 1899902.
王静松, 刘东. 主被动星载大气探测载荷性能对比与分析.[J]. 光学学报, 2023, 43(18): 1899902.

[11] Yan Huai Bin. Retrieval of chlorophyll concentrations in the ocean by using CALIPSO lidar signal below the ocean surface [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
晏怀斌. CALIPSO激光雷达水下信号反演大洋叶绿素浓度的探索[D]. 青岛:中国海洋大学, 2014.

[12] Chen Yi Fu, Li Shuai, Zhang Dong Fang, et al. ICESat-2 LiDAR bathymetry based on adaptive spatial density filtering[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(1): 83-95.
谌一夫, 李帅, 张东方, 等. 自适应空间密度滤波的ICESat-2激光雷达测深[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(1): 83-95.

[13] Zhang D F, Chen Y F, Wang C, et al. Refraction and coordinate correction with the JONSWAP model for ICESat-2 bathymetry [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2022, 186: 285-300.

[14] Li Yu Jia, Zhou Xiao Qing, Li Guo Yuan, et al. Progress and prospect of space-borne photon-counting LiDAR shallow water bathymetry technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(10): 107-116.
李雨佳, 周晓青, 李国元, 等. 星载单光子激光雷达浅水测深技术研究进展和展望[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(10): 107-116.

[15] Albright A, Glennie C. Nearshore bathymetry from fusion of Sentinel-2 and ICESat-2 observations [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2021, 18(5): 900-904.

[16] Yang F L, Su D P, Ma Y, et al. Refraction correction of airborne LiDAR bathymetry based on sea surface profile and ray tracing [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 2017, 55(11): 6141-6149.

[17] Xu W X, Guo K, Liu Y X, et al. Refraction error correction of airborne LiDAR bathymetry data considering sea surface waves [J]. Internation Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation, 2021, 102: 102402.

[18] Guo K, Li Q Q, Mao Q Z, et al. Errors of airborne bathymetry LiDAR detection caused by ocean waves and dimension-based laser incidence correction [J]. Remote Sensing, 2021, 13(9): 1750.
[19] Yang J, Ma Y, Zheng H Y, et al. Analysis and correction of water forward-scattering-induced bathymetric bias for spaceborne photon-counting lidar [J]. Remote Sensing, 2023, 15(4): 931.
[20] Shangguan M J, Liao Z Y, Guo Y R, et al. Seabed backscattered signal peak shift and broadening induced by multiple scattering in bathymetric lidar [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2025, 63: 5701214.
[21] Liu Zhi Peng, Liu Dong, Xu Pei Tuo, et al. Retrieval of seawater optical properities with an oceanic lidar [J]. Journal of Remote Sensing, 2019, 23(5): 944-951.
刘志鹏, 刘东, 徐沛拓,等. 海洋激光雷达反演水体光学参数 [J]. 遥感学报, 2019, 23(5): 944-951.
[22] Lee J H, Churnside J H, Marchbanks R D, et al. Oceanographic lidar profiles compared with estimates from in situ optical measurements [J]. Applied Optics, 2013, 52(4): 786-794.
[23] Nocedal J, Wright S J. Numerical Optimization [M]. 2th ed. Springer, 2006.
[24] USACE. Coastal Engineering Manual/(EM 1110-2-1100) [R]. DC: US Army Corps of Engineers, 2002.
[25] Ministry of Transport of China. Code for hydrology of port and waterway engineering (JTS 145-2015) [S]. Beijing: China Communications Press, 2015.
交通运输部. 港口与航道水文规范: JTS 145-2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
[26] Biggs D S C, Andrews M. Acceleration of iterative image restoration algorithms [J]. Appl. Opt., 1997, 36(8): 1766-1775.
[27] Churnside J H. Review of profiling oceanographic lidar [J]. Optical Engineering, 2014, 53(5): 051405.
[28] Gordon H R. Interpretation of airborne oceanic lidar: effects of multiple scattering [J]. Applied Optics, 1982, 21(16): 2996-3001.
[29] Femald F G. Analysis of annospheric lidar observations: some comments [J]. Applied Optics, 1984, 23(5): 652-653.
[30] Klett J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns [J]. Applied Optics, 1981, 20(2): 211-220.
[31] Abdallah H, Baghdadi N, Bailly J S, et al. Wa-LiD: a new lidar simulator for waters [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012, 9(4): 744-748.