

# 基于回波重构的机载 LiDAR 测深海面位置确定算法

高兴国<sup>1</sup>, 尤超帅<sup>1</sup>, 江峻毅<sup>1</sup>, 石鑫龙<sup>2</sup>, 张一衡<sup>2</sup>, 亓超<sup>2,3</sup>, 阳凡林<sup>2,3</sup>, 宿殿鹏<sup>2,3</sup>

(1. 山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013; 2. 山东科技大学 测绘与空间信息学院, 山东 青岛 266590;

3. 自然资源部 海洋测绘重点实验室, 山东 青岛 266590)

**摘要:**针对近水面渗透(NWSP)误差影响海面位置精确确定的问题,本研究提出一种基于回波重构的机载 LiDAR 测深海面位置确定算法对回波的海面位置进行改正,并对改进前后的海面、海底点测量误差进行理论分析。实验测试证明,本算法平均海面偏差降低 20 cm, NWSP 减少 40%~50%, 海底点坐标与单波束数据的均方根误差(RMSE)下降 7.5%。本算法能够有效减少 NWSP, 有效提升国产机载 LiDAR 测深数据精细化处理水平。

**关键词:**机载 LiDAR 测深; 海面位置确定; 近水面渗透; 水体模型; 回波重构

中图分类号:P229

文献标志码:A

## An airborne LiDAR bathymetric sea surface positioning algorithm based on echo reconstruction

GAO Xingguo<sup>1</sup>, YOU Chaoshuai<sup>1</sup>, JIANG Junyi<sup>1</sup>, SHI Xinlong<sup>2</sup>, ZHANG Yiheng<sup>2</sup>,

QI Chao<sup>2,3</sup>, YANG Fanlin<sup>2,3</sup>, SU Dianpeng<sup>2,3</sup>

(1. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan 250013, China;

2. College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

3. Key Laboratory of Oceanic Surveying and Mapping, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Qingdao 266590, China)

**Abstract:** To address the issue of near water surface penetration (NWSP) error affecting the precise determination of sea surface position, this study proposes an airborne LiDAR bathymetric sea surface positioning determination algorithm based on echo reconstruction to correct the sea surface position derived from echo data. A theoretical analysis is conducted on the measurement errors for sea surface and seafloor points before and after the improvement. Experimental results demonstrate that this algorithm reduces the average sea surface deviation by approximately 20 cm, decreases NWSP errors by 40%-50%, and lowers the root mean square error (RMSE) between seabed coordinates and single-beam data by 7.5%. This algorithm can effectively reduce NWSP errors and significantly enhance the refined processing level of domestic airborne LiDAR bathymetric data.

**Key words:** airborne LiDAR bathymetry; sea surface positioning; near water surface penetration; water model; echo reconstruction

收稿日期:2024-10-23

**基金项目:**国家自然科学基金项目(42304051);山东省自然科学基金项目(ZR2024QD062);中国博士后科学基金项目(2021M700155);山东省高等教育青年创新科技计划项目(2023KJ088);青岛市关键技术攻关及产业化示范类项目(23-1-3-hygg-1-hy);青岛市自然科学基金项目(24-8-4-zrjz-2-jch);山东科技大学科研创新团队支持计划项目(2019TDJH103)

**作者简介:**高兴国(1984—),男,山东潍坊人,高级工程师,硕士,主要从事海洋测绘、电力工程勘测研究。

宿殿鹏(1988—),男,山东莱州人,副教授,博士,主要从事机载 LiDAR 测深数据处理与应用方面研究,本文通信作者。E-mail: sudianpeng@126.com

21世纪以来,人类步入大规模开发利用海洋资源的新纪元,对高精度、全覆盖的海底地形测量数据的需求愈发迫切<sup>[1]</sup>。在海岸带、岛礁等浅水区域,利用人工跑滩、多波束测深等传统海洋测绘手段获取海底地形数据效率低、精度低、难度大<sup>[2]</sup>。但机载雷达测深(airborne LiDAR bathymetry, ALB)技术可以有效避免上述问题<sup>[3]</sup>,为海陆一体化地形测量提供一种新的手段<sup>[4]</sup>。在ALB海底地形探测中,海底点的测量精度取决于激光在水体中传播时间的提取精度,而该传播时间的计算需要准确的海面位置<sup>[5]</sup>。因此,有必要探讨海面位置的精准确定方法,以提高ALB数据质量<sup>[6]</sup>。

现有双波段ALB测深系统搭载的1064 nm近红外(near infrared, NIR)激光与532 nm的绿色波段激光,利用NIR激光难以穿透水体且易被海面直接反射的特性,可获取激光空中斜距,生成准确的海面位置信息<sup>[7]</sup>。然而,NIR信号到达海面部分会被镜面反射,导致无法记录有效的海面回波<sup>[8]</sup>。鉴于此,已有学者针对532 nm激光回波开展海面位置的研究,证明绿色波段激光同样可用于海面位置的确定,然而,由于绿色波段激光的透水性,仅利用绿色波段的海面回波信号确定海面位置时会出现“海面不确定”现象<sup>[9]</sup>,从而影响海面位置的识别。为此,Mandlbürger等<sup>[8]</sup>通过对相邻回波的统计分析,探讨绿色波段激光的透水性规律,将“海面不确定”归因于绿色波段激光“近水面渗透”(near water surface penetration, NWSP)效应,并证实了NWSP深度与水质直接相关,较差的水质条件会引起更为显著的NWSP现象。如Pan等<sup>[10]</sup>提出一种连续小波变换(continuous wavelet transformation, CWT)的海面位置确定方法,证明采用CWT方法确定的海面位置结果优于高斯函数分解法和经验系统响应(empirical system response, ESR)分解法。Zhao等<sup>[11]</sup>基于实测数据与悬浮泥沙浓度(suspended sediment concentration, SSC)的关系,构建了一种NWSP误差的校正模型,以确定海面回波时刻。Tao等<sup>[12]</sup>提出一种回波上升沿线性近似的海面位置确定算法,通过线性外推绿色波段激光的前沿位置获取精确的海面回波时刻。王丹茹等<sup>[13]</sup>提出一种NWSP误差修正的半经验波形分解算法,通过构建半经验信号卷积模型对回波信号各组分进行重构以确定海面位置。然而,现有算法依赖辅助数据和半经验模型,导致其适用性有限,尤其是在水质差异较大的情况下,难于清除海面波形渗透误差对海面位置准确识别的影响。

本研究提出一种基于回波重构的机载激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)测深海面位置确定算法(以下简称本算法),对回波的海面位置进行精确确定,并对算法前后的海面、海底点测量误差进行理论分析;利用双指数函数构建单条带水体模型,将该模型代入同条带其余回波进行海面回波重构,实现对单波段ALB海面位置的精确确定,提升海底地形测量精度。

## 1 基于回波重构的ALB海面位置确定算法

本算法的目的在于获取准确的海面回波时刻,以计算精确的激光传播时间,为海底点云解算提供数据基础。算法的核心是通过双指数函数构建单条带水体模型,并代入同条带其余回波进行海面回波重构,进而获取精确的海面位置时刻。

### 1.1 算法实现流程

本算法的流程如图1所示,主要步骤如下:

- 1) 绿色波段激光NWSP误差与修正分析,通过理论分析探讨NWSP改正前后对海面、海底点云精度的影响;
- 2) 基于双指数函数的水体模型构建,通过高斯函数拟合海面波形上升沿来提取单个水体波形,并利用双指数函数拟合单个条带的水体叠加平均波形;
- 3) 顾及水体模型的海面回波重构与位置探测,将水体模型代入同条带其余波形进行回波重构,根据重构后的波形来精确确定激光到达海面的时刻。

### 1.2 绿色波段激光NWSP误差与修正分析

为验证NWSP修正的必要性,通过坐标推导方法分析其对海面与海底点坐标归算误差的影响,并探讨修正后的理论效果。

1) 绿色波段激光 NWSP 引起的坐标误差分析。通过坐标推导方法,分析 NWSP 对海面与海底点坐标归算误差的影响,理论分析如图 2 所示。

在载体坐标系下,采用  $[x_0, y_0]^T$  表示激光发射中心  $O$  的位置,绿色波段激光脉冲从激光发射中心  $O$  发出,以角度  $\varphi$  到达海面  $S$  点,随后以角度  $\theta$  倾斜进入水体,到达海底  $B$  点后沿相同路径返回激光器,此时海面点  $S$ 、 $B$  分别为:

$$\mathbf{S} = \mathbf{O} + \frac{c_a \Delta t_1}{2} \begin{bmatrix} \sin \varphi \\ \cos \varphi \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{O} + \frac{c_a \Delta t_1}{2} \begin{bmatrix} \sin \varphi \\ \cos \varphi \end{bmatrix} + \frac{c_w \Delta t_2}{2} \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (2)$$

式中:  $[\sin \varphi \quad \cos \varphi]^T$  为激光在空气中传输方向单位矢量,  $c_a$  为激光在空气中的传播速度,  $\Delta t_1$  为激光脉冲空中往返传播时间,  $[\sin \theta \quad \cos \theta]^T$  为激光在水体中传输方向单位矢量,  $c_w$  为激光在水体中的传播速度,  $\Delta t_2$  为激光脉冲在水体中往返传播时间,  $\varphi$  为激光入射角,  $\theta$  为激光入水折射角。

然而,由于绿色波段激光的透水性,绿色波段激光脉冲从  $O$  发出到达海面  $S$  时,并不会立马返回激光器,而是向下渗透一定距离  $\Delta d$  到达  $S'$  点后,一部分脉冲能量返回激光器,另一部分脉冲能量以角度  $\theta$  倾斜进入水体,到达海底  $B'$  点后沿相同路径返回激光器<sup>[9]</sup>。此时海面点  $S'$ 、海底点  $B'$  分别为:

$$\mathbf{S}' = \mathbf{O} + \frac{c_a \Delta t_1}{2} \begin{bmatrix} \sin \varphi \\ \cos \varphi \end{bmatrix} + \frac{\Delta d}{\cos \varphi} \begin{bmatrix} \sin \varphi \\ \cos \varphi \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{B}' = \mathbf{S}' + \frac{c_w \Delta t_2}{2} \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \cos \theta \end{bmatrix} - \frac{c_w \Delta d}{\cos \varphi c_a} \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (4)$$

式中,  $\Delta d$  为 NWSP 高程差值。

因此,由于 NSWSP 造成的海面点误差  $\mathbf{E}_a$ 、海底点误差  $\mathbf{E}_w$  可表示为:

$$\mathbf{E} = \mathbf{S}' - \mathbf{S} = \frac{\Delta d}{\cos \varphi} \begin{bmatrix} \sin \varphi \\ \cos \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta d \tan \varphi \\ \Delta d \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\mathbf{E}_w = \mathbf{B}' - \mathbf{B} = \left[ \frac{\Delta d (n_w \sin \varphi - \sin \theta)}{\cos \varphi \times n_w} \quad \frac{\Delta d (n_w \cos \varphi - \cos \theta)}{\cos \varphi \times n_w} \right]^T. \quad (6)$$

式中,  $n_w = c_a / c_w$  为水体折射率。

在水质较好的情况下,激光的 NWSP 深度为 10~25 cm,随着水质条件的变差,NWSP 深度将持续增

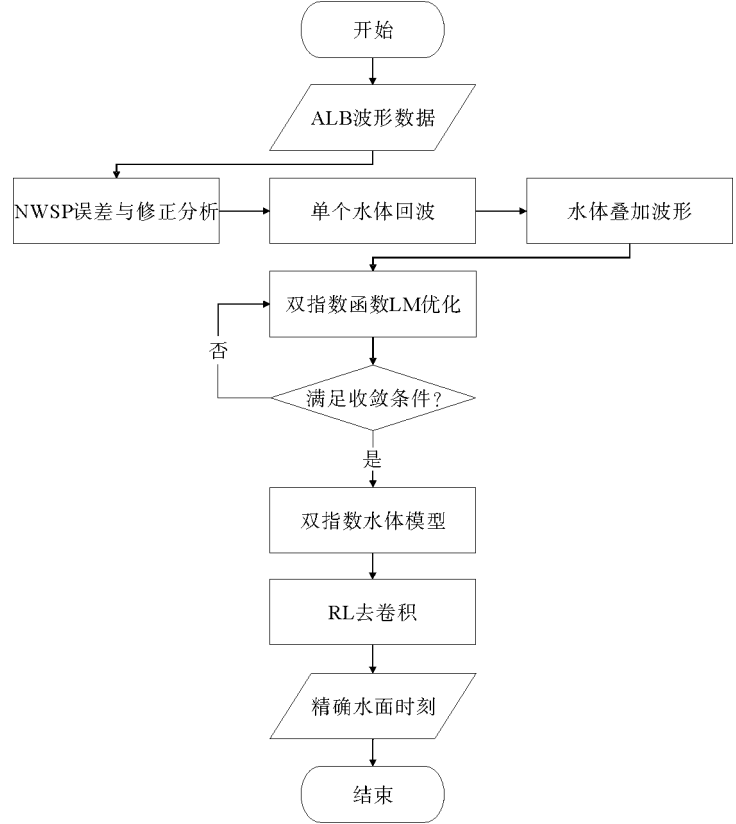


图 1 本算法流程图

Fig. 1 Flowchart of the algorithm in this paper

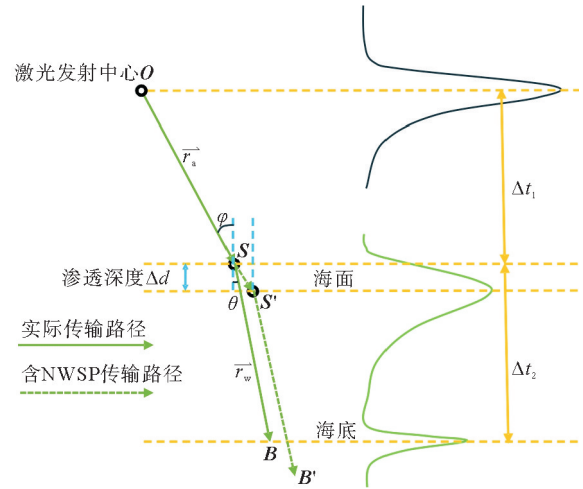


图 2 NWSP 修正前理论分析图<sup>[11]</sup>

Fig. 2 Theoretical analysis diagram before NWSP correction

大<sup>[14]</sup>。由式(5)和式(6)可知,NSWP 将会导致海面 and 海底坐标发生偏差。因此有必要对 NSWP 误差进行修正。

2) 绿色波段激光 NSWP 修正的理论效果分析。为进一步探讨 NSWP 修正的必要性,通过分析激光穿透海-气界面的传输时间差反映 NSWP 修正后的海底点位置变化,如图 3 所示。

激光从系统发射到海底并返回的过程中,无论采用 NSWP 对海面位置进行多少次修正,激光传输的总时间差  $\Delta T_z = T_2 - T_0$  始终保持不变,  $T_2$  是绿色通道波形水底回波时刻;  $T_0$  是激光发射波形峰值时刻。当进行 NSWP 修正后,激光从发射位置到达海面的传输时间差将缩短,即空中斜距将缩短为  $\Delta D_1$ :

$$\Delta D_1 = c_a \times \frac{T_1 - T_0}{2} \times \cos\varphi - c_a \times \frac{T'_1 - T_0}{2} \times \cos\varphi = c_a \times \frac{\Delta T_s}{2} \times \cos\varphi. \quad (7)$$

式中:  $T_1$  是绿色通道波形水面峰值时刻,  $T'_1$  是 NSWP 修正后的水面回波时刻,修正的进水面渗透误差为  $\Delta T_s = T_1 - T'_1$ 。

假设海面位置保持不变,由于激光从海面到达海底的传输时间差增加,水下斜距随之变长,导致海底位置在空间上延伸  $\Delta D_2$  (如图 3 右侧紫色虚线所示)。然而,NSWP 修正后的海面点 (如图 3 中  $P_1$  位置红色虚线所示),会使海底点向激光发射方向移动  $\Delta D_{hd}$ ,修正后的海底点如图 3 中  $P_2$  位置红色虚线所示。

$$\Delta D_2 = c_w \times \frac{T_2 - T'_1}{2} \times \cos\theta - c_w \times \frac{T_2 - T_1}{2} \times \cos\theta = c_w \times \frac{\Delta T_s}{2} \times \cos\theta, \quad (8)$$

$$\Delta D_{hd} = \Delta D_1 - \Delta D_2 = \frac{\Delta T_s}{2} (c_a \times \cos\varphi - c_w \times \cos\theta). \quad (9)$$

### 1.3 基于双指数函数的水体模型构建

为提高回波信号的处理效率与效果,提升 ALB 测深精度,在波形处理前,需对 ALB 测深波形进行去噪等数据预处理工作。本研究采用一种小波自适应阈值去噪算法对原始回波信号进行平滑去噪,以提高回波信号的信噪比。首先,对 ALB 原始回波信号进行小波分解,得到相应的小波系数;随后,对小波变换后的小波系数,利用可导阈值函数和自适应阈值进行阈值量化处理,旨在保证阈值函数的伸缩性和连续可导性;最后,对去噪后的小波系数进行小波重构,进而得到去噪后的回波信号。其中可导阈值函数表达式为:

$$p = \begin{cases} \mu x + (1-\mu) \cdot \text{sgn}(x) \left( |x| - \frac{\lambda_a}{\exp(|x|/\lambda_a - 1)^{n_a}} \right), & |x| \geq \lambda_a; \\ 0, & |x| < \lambda_a. \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $p$  为阈值函数去噪后的小波系数;  $x$  为原始信号的小波系数;  $\lambda_a$  为自适应阈值,可根据实际的波形信号进行灵活调节;  $\mu$  为尺度因子;  $\text{sgn}()$  为符号函数。

ALB 绿色波段激光的回波信号由海面反射回波、水体散射回波、海底反射回波以及噪声信号构成。然而,当 ALB 在水深较大或水体较浑浊区域工作时,回波信号中的海底信号往往被水体散射回波或噪声信号所淹没,导致回波组分中缺乏显著的海底反射信号特征,因此,可利用此类波形实现水体回波信号的准确提取<sup>[15]</sup>。

由于 ALB 在激光脉冲时域上符合高斯分布,且激光从发射至到达海面的过程中仅受大气因素的影响 (可忽略不计),因此,可认为海面回波信号同样遵循高斯分布,并采用高斯函数对其进行拟合分解<sup>[16]</sup>。然而,高斯分解需要提供峰值位置、峰值振幅和标准差等参数的初始值,因此首先利用峰值探测方法来确定峰值位置:

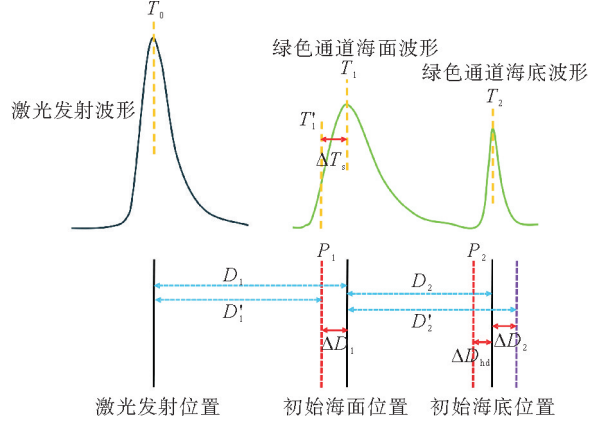


图 3 NSWP 修正后理论分析图

Fig. 3 Theoretical analysis diagram after NSWP correction



$$T_s = \text{find}(\text{diff}(\text{sgn}(\text{diff}(w))) < 0 + 1), \quad (11)$$

$$S(t) = A_i \exp[-(t - T_s)^2 / 2\sigma_i^2]. \quad (12)$$

式中:  $T_s$  为峰值位置;  $\text{find}$  为波形采样时刻搜索函数;  $\text{diff}$  为差分运算;  $w$  为回波波形;  $A_i$  为峰值振幅, 通过将峰值位置代入波形数据计算;  $\sigma_i$  为波形标准差, 通过线性插值法计算。

考虑到 ALB 回波波形在水体中传输时会受到 NWSP 影响, 本研究利用峰值探测获取的最大峰值位置作为初始海面位置, 并在执行海面波形的高斯分解过程中, 仅对海面波形的上升沿部分进行分解, 旨在最大程度地减少 NWSP 对水体信号提取准确性的负面影响。如图 4 所示, 针对高斯分解后的海面回波信号, 利用小波去噪后的接收波形减去分解得到的海面信号, 以获取单个波形的初始水体波形。假设 ALB 在单条带作业时, 海域水质均匀, 则可以对单条带内所有海底回波不显著的波形信号进行水体回波初始提取, 并对所有提取的初始水体波形进行叠加平均, 以构建高精度的水体模型。然而受扫描角、风速等因素的影响, 初始海面位置呈规律变化<sup>[9]</sup>, 直接对所有初始水体波形进行叠加平均的方法在实际应用中存在局限性, 且对水体信号提取的准确性也产生显著影响。为此, 将扫描角  $15^\circ$ 、码盘角  $75^\circ$  时的海面初始回波时刻作为所选波形的初始海面时刻, 通过计算每个波形初始海面位置与扫描角  $15^\circ$ 、码盘角  $75^\circ$  时初始海面回波时刻的差值, 对所有初始水体波形进行叠加平均, 以减弱扫描角、风速等因素对水体信号提取的影响。

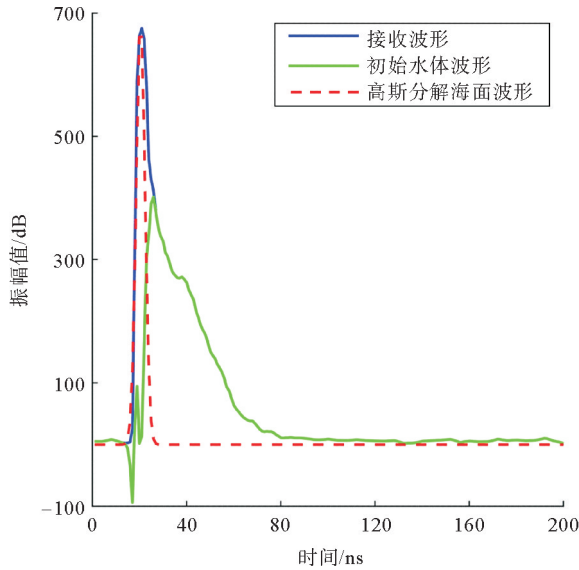


图 4 单个波形初始水体波形获取示意图

Fig. 4 Diagram of obtaining the initial water waveform of a single waveform

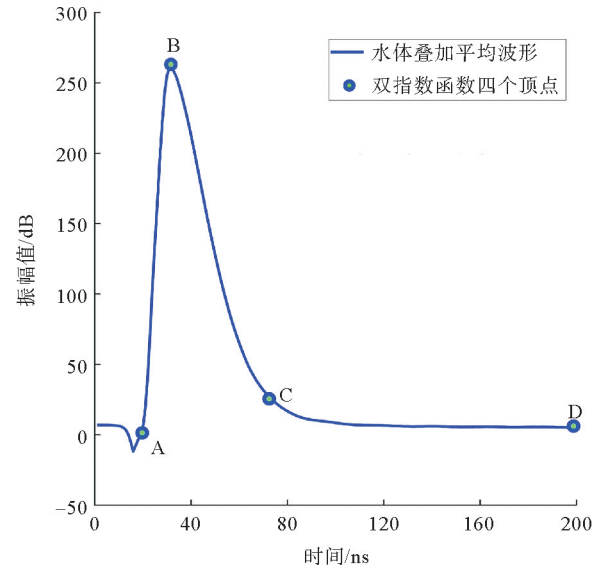


图 5 双指数水体模型叠加平均波形示意图

Fig. 5 Diagram of the superimposed average waveform of the double exponential water body model

由上述方法获取如图 5 蓝色实线所示的水体叠加平均波形。依据光在水体中辐射传输定理可知, 激光脉冲在水体中的传输呈指数衰减的形式, 因此本研究采用双指数函数来表征激光在水体中的传输过程<sup>[17]</sup>, 即利用双指数函数分解求取的水体叠加平均波形表示该过程:

$$f_c(t) = \begin{cases} 0, & t < a_x; \\ 0, & t \geq d_x; \\ b_y \times \left( \frac{t - a_x}{b_x - a_x} \right), & a_x \leq t < b_x; \\ \exp\left(\frac{c_x \times \ln b_y - b_x \times \ln c_y}{c_x - b_x}\right) \times \exp\left[\frac{(\ln c_y - \ln b_y)}{c_x - b_x} t\right], & b_x \leq t < c_x; \\ \exp\left(\frac{d_x \times \ln c_y - c_x \times \ln d_y}{d_x - c_x}\right) \times \exp\left[\frac{(\ln d_y - \ln c_y)}{d_x - c_x} t\right], & c_x \leq t < d_x. \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $a_x$ 、 $b_x$ 、 $c_x$ 、 $d_x$  分别表示双指数函数的 4 个顶点(图 5 中 A、B、C、D)对应的时刻,  $b_y$ 、 $c_y$ 、 $d_y$  分别为 B、C、D 的振幅值。因此, 所提取的水体叠加平均波形可采用一个双指数数学模型进行准确表征, 在文中称该模型为“双指数水体模型”。

#### 1.4 顾及水体模型的海面回波重构与位置探测

本研究提出的水体模型通过对多个回波波形进行叠加平均计算获得。考虑到 ALB 单条带数据采集时间较短, 水体水质变化较小, 因此该水体模型能够准确代表该条带内测点的水体回波特性, 并可进一步应用于海面回波的精准重构。

对于单个激光回波, 利用 1.3 节所提方法对初始海面回波进行拟合分解, 再从接收波形中剔除分解得到的初始海面回波, 便可获取其包含水体散射、海底反射回波的波形信号, 如图 6(a) 中玫红色实线所示。然而, 双指数函数所表征的水体叠加平均波形是在固定扫描角条件下拟合获取的, 与在其他扫描角下获取的水体回波存在起始时间差, 难以直接用于海面回波重构。

为解决该问题, 首先, 对剔除高斯海面回波后的回波信号进行峰值探测, 以确定接收波形中的水体峰值位置与双指数水体模型间的峰值位置时间差  $\Delta T_b$ 。通过将构建的水体模型在时间轴上平移  $\Delta T_b$ , 使其与原始波形中的水体散射信号对齐, 并将水体模型替换原始波形中的水体散射部分; 然后, 将替换后的水体模型与海底反射信号进行拟合, 并采用 Levenberg-Marquardt(LM) 算法进行整体优化<sup>[18]</sup>; 最后, 利用原始接收波形减去合并拟合后的水体与海底反射回波, 重构更精确的海面回波信号, 如图 6(b) 绿色虚线所示。

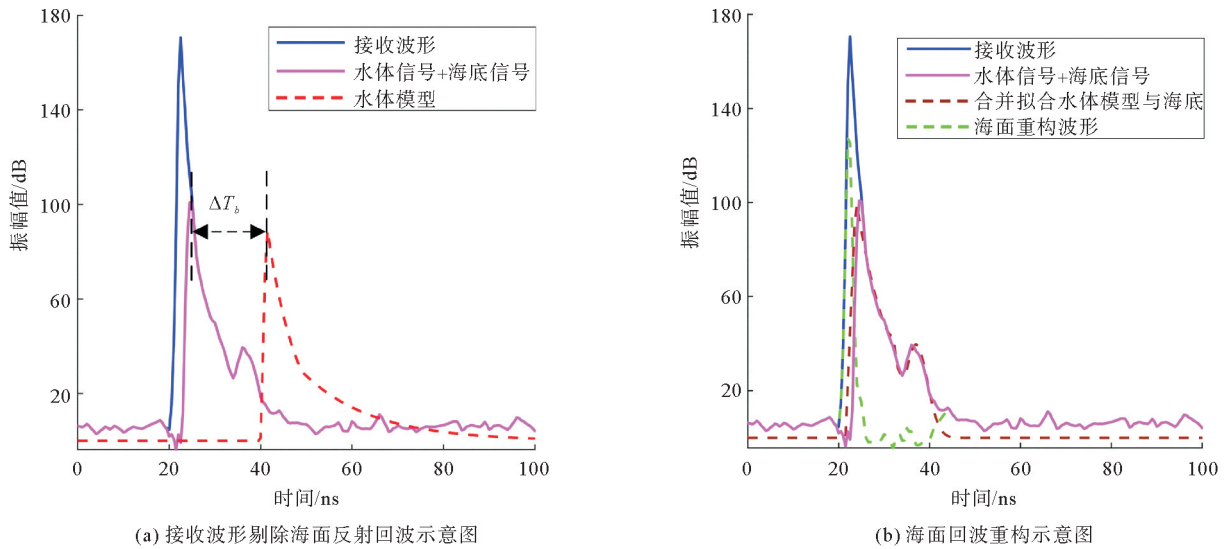


图 6 海面回波剔除-重构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of sea surface echo culling-reconstruction

为了从重构的海面回波信号中获取准确的海面位置信息, 利用 Richardson-Lucy(RL) 去卷积算法对海面回波信号进行处理。RL 去卷积算法可被用于图像复原与信号处理<sup>[19]</sup>, 算法将 LiDAR 波形视为一维图像, 通过在时间域内反复迭代来逼近最优解, 以消除回波波形中由展宽引起的失真, 其所得到的直接结果为波形的目标横截面。本研究通过识别 RL 去卷积算法所恢复目标横截面形状的峰值作为海面瞬时位置。RL 去卷积的第  $i$  次迭代计算为:

$$f_{i+1}(t) = f_i(t) \times \left( g(t) * \frac{R(t)}{f_i(t) * g(t)} \right). \quad (14)$$

式中:  $*$  代表卷积运算,  $g(t)$  代表发射波形,  $R(t)$  代表接收波形,  $f_i(t)$  代表第  $i$  个波形的目标横截面。每次迭代的残差  $r_i(t)$  为:

$$r_i(t) = R(t) - (f_i(t) * g(t)). \quad (15)$$

随着迭代的进行,残差会逐渐收敛,通过设置固定迭代次数或残差阈值终止迭代,最后从终止迭代的结果中得到重构后的海面峰值位置。

## 2 实验与分析

### 2.1 实验概况

为验证本算法的有效性,利用 2023 年 12 月 12 日和 2024 年 9 月 5 日在青岛胶州湾附近海域采集的全波形数据进行实验与分析,赛齐盘透明度分别为 3.75 和 1.55 m,用于验证水质对实验的影响。如图 7 所示,实验使用无人机搭载中科院上海光机所自主研制的 Mapper 20 KU ALB 系统,系统重 6.5 kg,脉冲采集频率为 20 kHz,配备了 4 个可同步采集的激光通道,采样间隔为 1 ns,飞行航高为 120 m,航速为 20 m/s。此外,对比数据为海鹰 HY1601 于 2021 年 8 月采集的单波束测深数据。由于测区内礁石分布密集,船载单波束难以靠近岸线作业,因此采集的单波束测深点数量有限,覆盖范围相对较小。

### 2.2 海面回波重构结果定性分析

为验证本算法的有效性与可靠性,利用测区采集的 3 个航带数据开展海面位置的确定实验。实验选用 Mapper 20 KU 的 532 nm 深水通道全波形数据,海面参考位置为 NIR(1 064 nm)通道回波的峰值位置。为便于讨论,将 532 nm 通道回波的峰值探测方法命名为“NWSP 改正前”,本算法命名为“NWSP 改正后”。需要注意的是,实验构建了 6 个双指数水体模型,分别对应测区中的 6 条航带如图 7 所示,对应名称为 H1~H6,再进行每个条带的海面回波重构。

#### 1) H1 航带海面高程的定性分析

如图 7 中 H1 航带的处理结果见图 8,分别展示了 532 nm 通道峰值探测法、海面回波重构法以及所参考的 1 064 nm 通道峰值探测法解算的海面点云剖面图。针对同一片点云,分别展示以  $x$  轴、 $y$  轴为横轴的点云剖面图。从图 8 可以看出,若将原始 532 nm 绿色通道接收波形的峰值

位置作为激光到达海面的瞬时位置,所解算的海面点云与基于 NIR 通道峰值位置解算的海面点云之间存在显著高差,主要是由绿色波段激光的 NWSP 效应引起的。而采用本算法解算的海面点云更接近参考数据,表明该算法能够有效削弱 NWSP 深度的影响,显著提高海面点云解算的精度与可靠性。

为直观反映本算法对 NWSP 误差的改正情况,对不同高程范围的海面点云数量进行统计,如图 9 所示。结果显示,绿色通道峰值探测法得到的海面点云的大地高  $z$  值范围为 3.2~3.6 m,而本算法得到的海面点云的大地高  $z$  值范围为 3.3~3.9 m,更接近于参考海面点云的  $z$  值范围。在空间分布上,与 532 nm 通道峰值探测法相比,本算法得到的海面点云更接近 NIR 通道波形解算的参考海面,证明本算法能有效修正 NWSP 误差。

#### 2) H2~H6 航带海面高程的定性分析

为进一步评估本算法在海面位置确定方面的效果,并验证其对单条带 ALB 测深数据处理的合理性,对实验测区内的两个航带(H2 和 H3)分别进行处理,如图 10 所示为两个航带海面瞬时位置的确定结果。

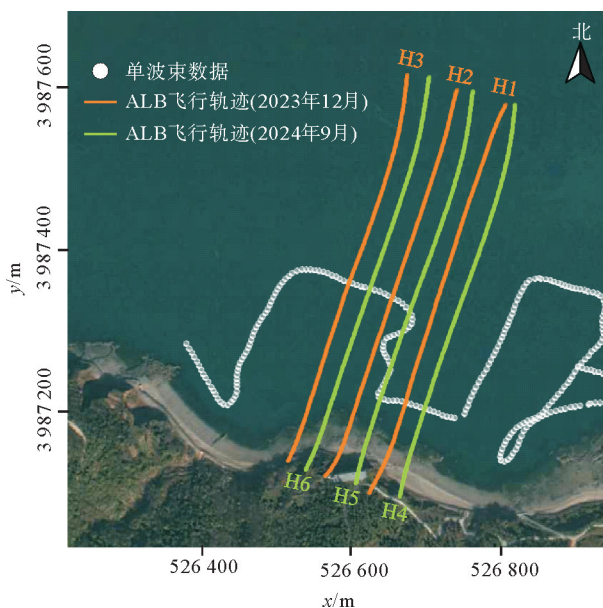


图 7 测线布设

Fig. 7 Survey line

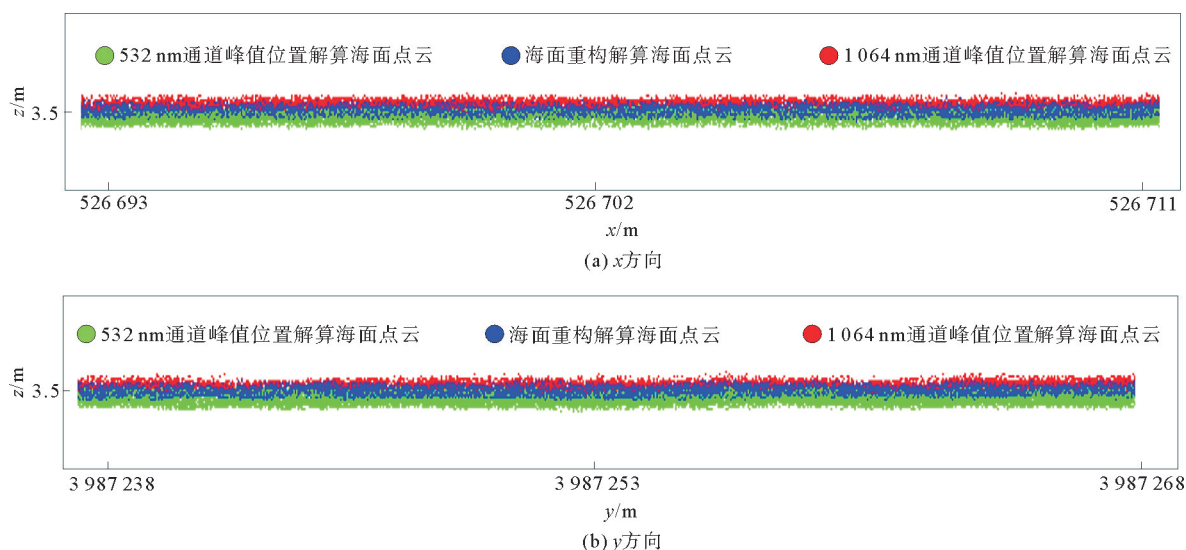


图8 3种算法所解海面点云剖面图

Fig. 8 Sea surface point cloud profile solved by three methods

由图 11 可见,相较于 NWSP 改正前,改正后的海面瞬时位置更接近于 NIR 通道的参考海面位置,表明本算法能有效修正 NWSP 引起的误差,进行海面位置的确定。图 11 展示了测区内两个架次 6 条航带在 NWSP 改正前后的海面高程误差分布情况。可以看出,改正前的误差集中在 0.4~0.6 m,改正后则主要集中在 0.2~0.4 m。不同架次间观测的水质虽存在差异,但对改正效果几乎没有影响,表明本算法在不同水质条件下均能有效提高 ALB 海面点云高程的精度,显著修正 NWSP 误差。

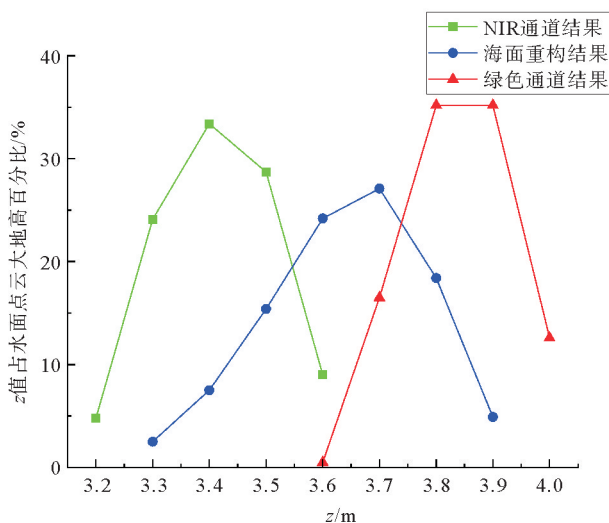
### 2.3 海面回波重构结果定量分析

#### 1) 海面精度评定

为定量评估本算法性能,利用最小值、最大值、平均值及中位数 4 个评价指标,对测区两个架次 6 个航带的平均海面点云高程进行定量分析,结果如表 1 所示,对于平均海面点云结果,NWSP 深度为 43.0 cm,相较于参考值,本算法所确定的海面平均高度的精度提升了 20 cm,相比于 532 nm 通道峰值探测法,NWSP 误差修正约 46%。证明本算法可获取较为准确的海面位置,验证了其处理 ALB 单条带数据的合理性和有效性。另外,从 1 064 nm 的参考平均海面高程可见,几个航带的平均海面高程有所不同,这是由于潮汐现象导致了不同航带的平均海面高程存在差异。

#### 2) 海底精度评定

为定量评估本算法对海底点的影响,在计算海面、海底坐标位置后,通过与单波束测深点对比进行海底点精度分析。ALB 海底点与单波束测深点仅在 H1 航带有重合,因此截取了 H1 航带的点云剖面,如图 12 所示。其中,NWSP 改正前后的海底点均采用基于信号分辨率增强模型和分数阶微分的算法<sup>[20]</sup>获取。由图 12 可以看出,NWSP 改正后的海面点云高程明显增加,海底点高程也存在上升趋势,与 2.1 节结果相符。

图9 3种算法所解海面点云在不同 $z$ 值范围内的折线图Fig. 9 Line chart of sea surface point clouds solved by the three methods in different  $z$ -value ranges



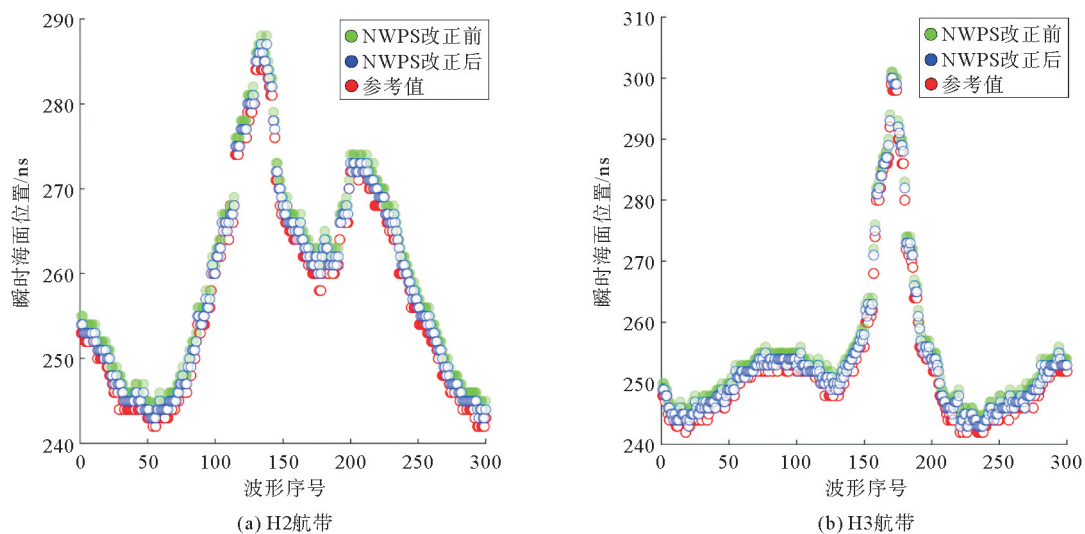


图 10 两个航带海面瞬时位置确定图

Fig. 10 Map of instantaneous sea surface position determination of two navigational zones

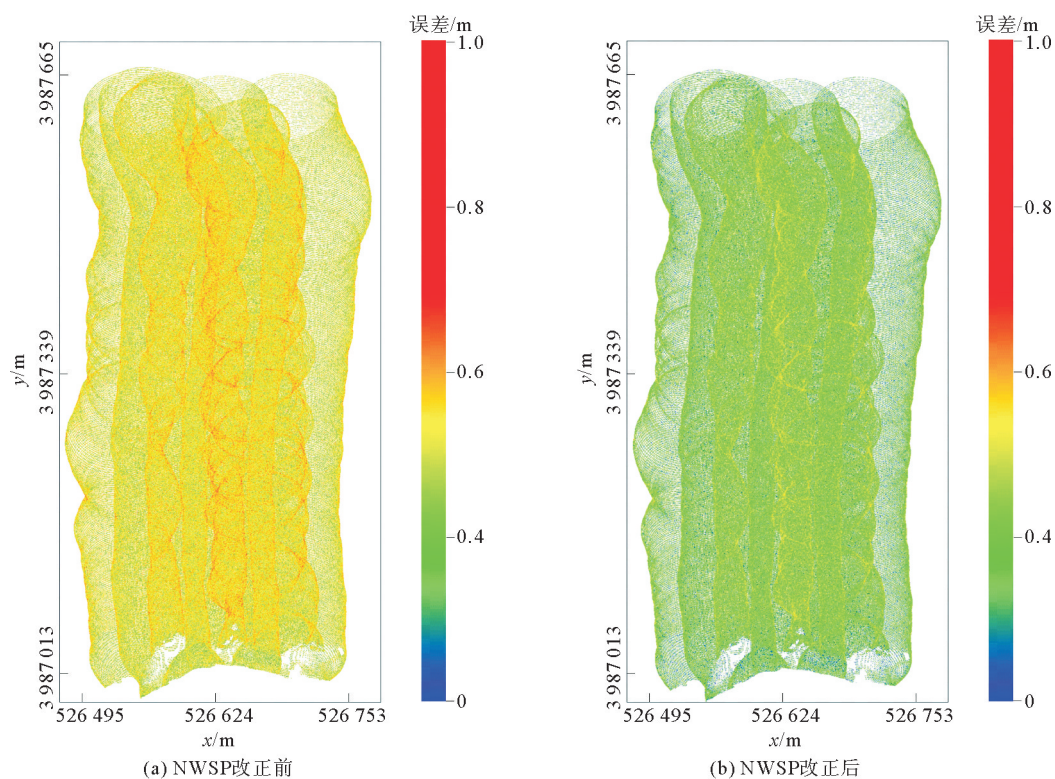


图 11 测区 NWSP 改正前后海面高程误差分布图

Fig. 11 Sea level error distribution before and after NWSP correction

另外,截取图 12 红色框中的海底点云,分别从垂直、平行于航带方向展示海底点细节。统计图 12 右侧框中 NWSP 改正前后部分海底点坐标,NWSP 改正后,海底点高程  $z$  平均增加了 7.2 cm,且平面位置存在不大于 2 cm 的差异。由式(11)可知,该现象主要是由于激光海气折射率差异与海面点位置变化所致。

为验证本算法在确定海面瞬时位置和提升 ALB 测深精度方面的可行性,本研究对 H1 航带 NWSP 改正前后的海底点与单波束同名点进行对比分析。结果表明,NWSP 改正前、改正后的平均绝对误差(mean

表 1 测区 6 个航带 3 种算法所解平均海面点云  $z$  值的误差分析Table 1 Error analysis of  $z$  value of average sea surface point cloud from six navigation zones and three methods m

航带	算法	最小值	最大值	平均值	中位数
H1~H3	532 nm 通道峰值探测法	3.205	3.695	3.463	3.462
	海面回波重构法	3.351	3.906	3.677	3.700
	1064 nm 通道峰值探测法	3.625	4.094	3.893	3.894
H4~H6	532 nm 通道峰值探测法	4.422	4.956	4.673	4.671
	海面回波重构法	4.633	5.167	4.913	4.915
	1064 nm 通道峰值探测法	4.912	5.389	5.191	5.192

absolute error, MAE) 分别为 18.6、16.8 cm, 均方根误差 (root mean square error, RMSE) 分别为 20.1、18.6 cm。经过 NWSP 改正后, MAE 降低了 9.7%, RMSE 降低了 7.5%, 表明本算法可有效实现海面回波重构, 修正浅海水域 ALB 绿色波段激光的 NWSP 误差, 显著提升了 ALB 海底地形测量数据的准确性。

### 3 结论

针对现有方法难以准确确定 ALB 测深海面回波位置, 影响海底点云解算精度的问题, 本研究提出一种基于回波重构的机载 LiDAR 测深海面位置确定算法, 利用 Mapper 20 KU 的 ALB 实测数据进行实验分析, 得到以下结论:

- 1) 以 NIR 通道波形确定的海面位置为参考, 相较于 NWSP 改正前, 本算法能够改正 20 cm 海面平均偏差, 修正约 40%~50% 的 NWSP 深度, 且水质差异不会对算法有较大影响;
- 2) 对于 NWSP 改正前后获取的海底点与单波束同名点的高程误差, 相较于 NWSP 改正前, NWSP 改正后的 MAE、RMSE 分别降低了 9.7%、7.5%;
- 3) 本算法尽管不能完全消除 NWSP 误差对海面位置确定精度的影响, 但可为减少 NWSP 误差提供一种新的思路, 为后续设计更为有效的波形处理算法提供技术参考。

### 参考文献:

- [1] 宿殿鹏, 阳凡林, 陈亮, 等. 无人机载 LiDAR 测深系统进行海岸带测绘的可行性分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2022, 41(5): 11-20.  
SU Dianpeng, YANG Fanlin, CHEN Liang, et al. Feasibility analysis of UAV-airborne LiDAR bathymetry system for coastal zone mapping[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2022, 41(5): 11-20.
- [2] 贺岩, 陶邦一, 俞家勇, 等. 机载激光测深技术及应用[J/OL]. 中国激光, 2024, 51(11). DOI:10.3788/CJL240437.  
HE Yan, TAO Bangyi, YU Jiayong, et al. Development of airborne LiDAR bathymetric technology and application[J/OL]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(11). DOI:10.3788/CJL240437.
- [3] 陈传法, 王梦樱, 杨帅, 等. 适用于林区机载 LiDAR 点云的多分辨率层次插值滤波方法[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2021, 40(2): 12-20.  
CHEN Chuanfa, WANG Mengying, YANG Shuai, et al. A Multi-resolution hierarchical interpolation-based filtering method for airborne LiDAR point clouds in forest areas[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2021, 40(2): 12-20.
- [4] 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.

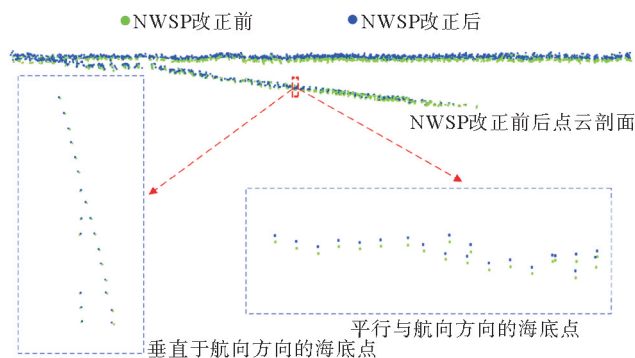


图 12 H1 航带点云剖面图

Fig. 12 Point cloud cross-section of flight strip H1

- LIU Yanxiong, GUO Kai, HE Xiufeng, et al. Research progress of airborne laser bathymetry technology[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(9): 1185-1194.
- [5] 崔子伟, 徐文学, 刘焱雄, 等. 机载激光测深数据获取及处理技术现状[J]. 自然资源遥感, 2023, 35(3): 1-9.  
CUI Ziwei, XU Wenxue, LIU Yanxiong, et al. Current status of the acquisition and processing of airborne laser sounding data[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(3): 1-9.
- [6] 亓超, 宿殿鹏, 阳凡林, 等. 机载 LiDAR 测深中海底地形坡度的影响及改正[J]. 遥感学报, 2022, 26(12): 2642-2654.  
QI Chao, SU Dianpeng, YANG Fanlin, et al. Analysis and correction in the airborne LiDAR bathymetric error caused by the effect of seafloor topography slope[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26(12): 2642-2654.
- [7] GUENTHER G C, CUNNINGHAM A G, LAROCQUE P E, et al. Meeting the accuracy challenge in airborne LiDAR bathymetry[C]// Proceedings of the EARSeL-SIG-Workshop LIDAR, Dresden, Jun. 16-17, 2000.
- [8] MANDLBURGER G, PFENNIGBAUER M, PFEIFER N. Analyzing near water surface penetration in laser bathymetry: A case study at the River Pielach[C]// ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Antalya, Nov. 11-13, 2013, 2(5): 175-180.
- [9] GUENTHER G C. Airborne laser hydrography system design and performance factors[C]// NOAA Professional Paper Series, National Ocean Service 1, National Oceanic Atmospheric Administration, U. S. Department of Commerce, Washington, Mar. 1, 1985: 1-385.
- [10] PAN Z G, GLENNIE C, HARTZELL P, et al. Performance assessment of high resolution airborne full waveform LiDAR for shallow river bathymetry[J]. Remote Sensing, 2015, 7: 5133-5159.
- [11] ZHAO J H, ZHAO X L, ZHANG H M, et al. Shallow water measurements using a single green laser corrected by building a near water surface penetration model[J/OL]. Remote Sensing, 2017, 9. DOI: 10. 3390/rs9050426.
- [12] TAO B Y, LI J Z, GUO W, et al. Precise detection of water surface through the analysis of a single green waveform from bathymetry LiDAR[J]. Optics Express, 2022, 30(22): 40820-40841.
- [13] 王丹韵, 徐青, 邢帅, 等. 机载激光测深近水面渗透误差修正的半经验波形分解方法[J]. 测绘学报, 2023, 52(6): 944-955.  
WANG Dandi, XU Qing, XING Shuai, et al. Semi-empirical waveform decomposition method for correction of near water surface penetration error in airborne LiDAR bathymetry[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2023, 52(6): 944-955.
- [14] MANDLBURGER G, PFEIFER N, SOERGEL U. Water surface reconstruction in airborne laser bathymetry from redundant bed observations[J]. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2017, IV-2/W4: 123-130.
- [15] GUO K, LI Q Q, WANG C S, et al. Development of a single-wavelength airborne bathymetric LiDAR: System design and data processing[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2022, 185: 62-84.
- [16] 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: 100-112.
- [17] 亓超, 周丰年, 吴敬文, 等. 基于机载 LiDAR 测深水体波形的漫衰减系数提取方法[J]. 海洋学报, 2021, 43(1): 147-154.  
QI Chao, ZHOU Fengnian, WU Jingwen, et al. Extraction method for diffuse attenuation coefficient based on airborne LiDAR bathymetric water column waveform[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(1): 147-154.
- [18] 李鹏程, 徐青, 邢帅, 等. 全局收敛 LM 的激光雷达波形数据分解方法[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(8): 2262-2267.  
LI Pengcheng, XU Qing, XING Shuai, et al. Full-waveform LiDAR data decomposition method based on global convergent LM[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(8): 2262-2267.
- [19] 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.
- [20] YANG F L, QI C, SU D P, et al. An airborne LiDAR bathymetric waveform decomposition method in very shallow water: A case study around Yuanzhi Island in the South China Sea[J/OL]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2022, 109. DOI: 10. 1016/j. jag. 2022. 102788.

(责任编辑:高丽华)