

一种改进的机载激光测深深度偏差模型

赵建虎¹ 吴敬文² 赵兴磊³ 周丰年²

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

2 长江水利委员会水文局长江口水文水资源勘测局,上海,200136

3 山东农业大学信息科学与工程学院,山东 泰安,271018

摘要:机载激光测深在潮间带获取海底地形应用中具有高效、灵活、经济等优点,但测深精度受海洋水文参数和仪器测量参数影响严重,传统偏差模型因顾及的要素不全面,修正精度不高。因此,采用逐步回归法构建了一种改进的顾及水深、水体含沙量、波束扫描角和传感器高度等参数的深度偏差修正模型。实验结果表明,机载激光测深原始水深经传统偏差模型和改进偏差模型修正后均能满足国际海道测量组织(International Hydrographic Organization, IHO)一等测深标准,且改进模型修正精度优于传统模型修正精度。

关键词:机载激光测深;深度偏差;改进的深度偏差模型;测量参数;水文参数

中图分类号:P229;P237 **文献标志码:**A

机载激光测深(airborne LiDAR bathymetry, ALB)已被证明是一种高精度、低成本、快速灵活的测量方法,适用于声呐作业效率较低甚至无法实施的浅水及海岸带测量^[1-3]。ALB应用广泛,除用于传统海图绘制外,还用于泥沙输送监测、环境保护、资源管理和开发等^[4],此外,还可用于制作海底反射强度图、底质分类图以及水柱特征图等^[5]。

精度是衡量ALB性能的一个重要指标,而水文要素是影响其测深精度的主要因素^[1]。ALB误差分为深度偏差和残差,残差呈随机分布^[6]。深度偏差主要由绿激光底回波波形失真引起。激光在水体中的几何发散和多次散射导致绿激光底回波在时间上展宽,即脉冲展宽效应。脉冲展宽效应造成波形失真,例如波峰位移等^[7-11]。绿激光底回波波峰位移引起的深度偏差最大可达真实水深的92%^[7],是ALB的最大误差源。深度偏差可通过理论分析法^[7-8]、经验建模法^[6,12-13]和误差统计法^[14-15]等方法修正。

文献[8]采用蒙特卡罗数值模拟法,利用环境响应函数计算了波束在水柱中传播引起的深度偏差,认为深度偏差强依赖于波束扫描角、水深及海水的光学属性。激光传播引起的深度偏差是散射光学路径的函数,需要对海水散射系数进行准确

估计,然而很难精确有效地估计散射系数。文献[7]采用卷积法分析了波束垂直入射下由海底坡度引起的深度偏差,并构建了关于光斑大小、水深及海床倾角的深度偏差模型。借助该模型可分析海床倾角对深度偏差的影响,但该模型基于波束垂直入射和均匀水质假设,不符合实际情况。

文献[6,12]利用实测ALB与声呐测深数据,利用回归分析构建了关于水深的深度偏差模型。利用该偏差模型修正水深可满足国际海道测量组织(International Hydrographic Organization, IHO)S-44测深精度要求,但该模型仅是水深的函数,对复杂多变的海洋水文和仪器测量参数的适应性弱。因此,经验模型尚需进一步完善。

文献[13]以地面测量值为参考,评估了ALB在河道测深中深度偏差的大小和空间变化,对其进行了统计分析,发现深度偏差在河道中与地形和水深的关系不明显,基于平均偏差对ALB数据进行了区域水深修正。文献[14]采用同样方法对ALB数据进行了修正。该方法在深度偏差随水深变化不明显的区域可以有效修正水深,具有简单高效的优点,但在具有复杂水文特征的海域,其适用性需进一步检验。

以上研究一定程度上改善了ALB精度,但各有其特点。误差统计法具有简单高效的优点,但

对复杂海洋水文环境的适应性较弱。物理分析法可以解释深度偏差涉及的物理过程,但因基于简单化假设,需进一步完善。经验建模法可针对具体环境构建模型,简单、易于实现,但需充分分析影响深度偏差的主要因素,并根据显著性建模,否则模型的适用性将受到极大挑战。

本文在分析 ALB 机理和影响深度偏差主要因素的基础上,采用逐步回归法构建了一种顾及水深、水体含沙量、波束扫描角、传感器高度的深度偏差改进模型,以提高 ALB 水深修正的精度。

1 深度偏差模型的构建

1.1 深度偏差修正模型

文献[6]以声呐测深数据为参考,计算了 ALB 深度偏差,发现 ALB 深度偏差 Δd 随水深线性递增,以此构建了关于水深的线性偏差模型:

$$\Delta d = \beta d \quad (1)$$

式中, d 和 β 分别为水深和模型系数。

文献[13]通过添加常数项 b 将上述偏差模型改进为:

$$\Delta d = \beta d + b \quad (2)$$

β 描述了 Δd 随水深变化的快慢。文献[1,6-8]认为 Δd 不但与 d 有关,还与波束扫描角、光斑大小、海水浑浊度相关。因此,本文将传统偏差模型扩展为:

$$\left. \begin{aligned} \Delta d &= \beta d + b \\ \beta &= \alpha_1 + \alpha_2 \varphi + \alpha_3 \varphi^2 + \alpha_4 F + \alpha_5 F^2 + \\ &\quad \alpha_6 T + \alpha_7 T^2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中, b 表示截距; β 为顾及诸影响要素的改进模型系数,是波束扫描角 φ 、光斑大小 F 、海水浑浊度 T 的函数; $\alpha_1 \sim \alpha_7$ 为模型系数。

海水浑浊度除了与含沙量有关,还与物质组成、颗粒大小相关。然而,现有的实验结果表明,海水浑浊度跟水体含沙量具有良好的线性关系。因此,式(3)中浑浊度 T 可表示为关于水体含沙量 C 的线性函数^[16]:

$$T = a_1 C + a_2 \quad (4)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} d_1 & \varphi_1 d_1 & \varphi_1^2 d_1 & H_1 d_1 & H_1^2 d_1 & C_1 d_1 & C_1^2 d_1 & 1 \\ d_2 & \varphi_2 d_2 & \varphi_2^2 d_2 & H_2 d_2 & H_2^2 d_2 & C_2 d_2 & C_2^2 d_2 & 1 \\ d_3 & \varphi_3 d_3 & \varphi_3^2 d_3 & H_3 d_3 & H_3^2 d_3 & C_3 d_3 & C_3^2 d_3 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_m & \varphi_m d_m & \varphi_m^2 d_m & H_m d_m & H_m^2 d_m & C_m d_m & C_m^2 d_m & 1 \end{bmatrix}_{m \times 8}$$

$$\mathbf{l} = [\Delta d_1 \quad \Delta d_2 \quad \Delta d_3 \quad \cdots \quad \Delta d_m]_{m \times 1}^T$$

$$\mathbf{X} = [\beta_1 \quad \beta_2 \quad \beta_3 \quad \beta_4 \quad \beta_5 \quad \beta_6 \quad \beta_7 \quad b]^T$$

式中, a_1 和 a_2 为函数系数。

F 表示激光束在海表照射范围,可用激光传感器高度和激光束发散角计算^[7]:

$$F = H \tan(\gamma) \quad (5)$$

式中, H 为传感器高度; γ 为激光束发散角。

ALB 系统采用的激光发射器决定了激光脉冲特性(如初始半径、发散角)^[17],因此,发散角不必作为自变量包含在偏差模型中。将式(4)、式(5)代入式(3),可得:

$$\left. \begin{aligned} \Delta d &= \beta d + b \\ \beta &= \beta_1 + \beta_2 \varphi + \beta_3 \varphi^2 + \beta_4 H + \beta_5 H^2 + \\ &\quad \beta_6 C + \beta_7 C^2 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中, $\beta_1 \sim \beta_7$ 为模型系数。

式(6)为本文给出的考虑诸影响因素的 ALB 深度偏差初始模型。该初始模型还需通过逐步回归,在分析模型中各参数显著性的基础上进行优化,以得到改进的偏差模型。

1.2 改进深度偏差模型的构建

式(6)可利用如下数据来构建:

1)同区域 ALB 和声呐测深数据 d ;

2)测区水文数据(水体含沙量 C)和 ALB 测量参数(波束扫描角 φ 、传感器高度 H)。

ALB 深度偏差 Δd 可由 ALB 和地面测量获得的海底高程计算^[14]:

$$\Delta d = H_{\text{ALB}}^B - H_{\text{sonar}}^B \quad (7)$$

可演变为:

$$\Delta d = (H_{\text{ALB}}^S - d_{\text{ALB}}) - (H_{\text{sonar}}^S - d_{\text{sonar}}) \quad (8)$$

式中, H_{ALB}^B 和 H_{sonar}^B 分别为 ALB 和地面测量获得的海底高程;测量时刻对应的海表高程分别为 H_{ALB}^S 和 H_{sonar}^S ;水深分别为 d_{ALB} 和 d_{sonar} 。

d_{ALB} 可借助 ALB 的红外激光和绿激光测量的海面 and 海底高程获得:

$$d_{\text{ALB}} = H_{\text{ALB}}^S - H_{\text{ALB}}^B \quad (9)$$

在所有 ALB 和声呐测量的公共测点上,利用以上参数构建模型,其矩阵形式为:

$$\mathbf{V}_{m \times 1} = \mathbf{B}_{m \times 8} \mathbf{X}_{8 \times 1} - \mathbf{l}_{m \times 1} \quad (10)$$

式中, m 为 ALB 和声呐公共测量点数;

基于最小二乘准则,解算 \mathbf{X} :

$$\mathbf{X} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{l}$$

1.3 模型优化

偏差模型式(6)仅为顾及诸影响因素的初始模型,模型中参数之间可能具有多重共线性,因此并不是每个参数都需要包含在最终模型中。需采用逐步回归,在分析初始模型中各参数显著性的基础上优化初始模型,以得到最终的改进模型。逐步回归是一种自动选择模型变量的方法,经过逐步回归,使得最后保留在模型中的变量既具有统计显著性,又避免了多重共线性的影响。模型参数的显著性可通过 t 检验实现。对于深度偏差模型:

$$\Delta d = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_j x_j + \epsilon \quad (11)$$

式中, Δd 为深度偏差; x_j 为影响深度偏差的诸参数; β_j 是各参数 x_j 的偏回归系数; ϵ 为残差。零假设 H_0 及备择假设 H_1 为:

$$\left. \begin{aligned} H_0 : \beta_j &= 0 \\ H_1 : \beta_j &\neq 0 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

固定其他自变量, β_j 表示参数 x_j 对深度偏差的影响系数,零假设 H_0 意味着该参数对深度偏差没有影响,否则,则认为该参数对深度偏差的影响具有显著性。以上即为模型参数的显著性检验^[18]。用于检验 H_0 的统计量称为 t 统计量,可表达为:

$$t_{\hat{\beta}_j} = \frac{\hat{\beta}_j}{s(\hat{\beta}_j)} \quad (13)$$

式中, $\hat{\beta}$ 是 β_j 的最小二乘估计值; $s(\hat{\beta}_j)$ 为标准误差。

p 值为当零假设为真时所得样本观察结果或更极端结果出现的概率。一旦 p 值被确定,便可用于拒绝或接受零假设。将 p 值与显著性水平 $\alpha = 0.05$ 进行比较,当 $p < 0.05$ 时,拒绝原假设,即该参数对深度偏差的影响具有统计显著性,需保留在模型中。反之,参数对深度偏差的影响不具有统计显著性,需从深度偏差模型中剔除。

2 ALB 深度偏差修正实验

2.1 数据获取

为验证和评估本文提出的 ALB 深度偏差改进模型的可靠性及其精度,在中国江苏省连云港市附近的一个 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ 的高浑浊度海域于 2014 年 12 月开展了综合测量。

ALB 测量采用 Optech 公司的机载激光测深系统 CZMIL,其性能参数如表 1 所示。借助 CZMIL 测量了 6 条航线。ALB 测深的同时,在

同区域进行了单波束水深测量和水体含沙量现场采集。水深测量采用 HY1600 型单波束测深仪,其测深精度为 $\pm (0.01 + 0.001d)\text{ m}$;在测区周边布置了 3 个水体含沙量采样站,鉴于测区水深较浅,各采集点采集了表层、中层和底层的水样,并取平均得到各站的平均水体含沙量。测量水域及其水下地形图以及水体含沙量采集位置如图 1 所示,CZMIL、单波束测深航迹如图 2 所示,3 个水体含沙量采样站采集的水体含沙量如表 2 所示。

表 1 CZMIL 系统的主要技术参数
Tab. 1 Technologic Parameters of CZMIL

参数	规格
操作高度/m	400(标称)
脉冲重复频率 / kHz	10
激光波长/nm	红外激光:1 064 绿激光:532
最小可测深度/m	<0.15
测深精度	$[0.32 + (0.013d)^2]^{1/2}\text{ m}$, 2 倍中误差
水平精度	$(3.5 + 0.05d)\text{ m}$, 2 倍中误差
扫描角/(°)	20(圆形扫描)
扫描带宽/m	294(标称)

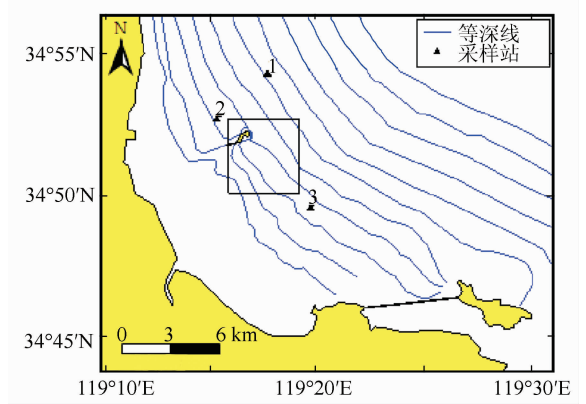


图 1 研究区域和海底地形图
Fig. 1 Study Area and Seafloor Map

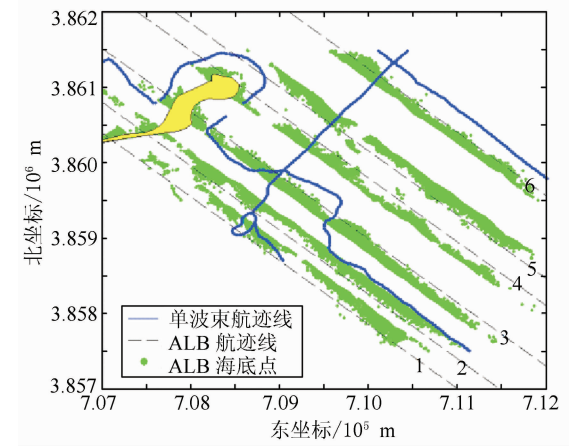


图 2 CZMIL 和 HY1600 测量航迹
Fig. 2 Tracks of CZMIL and HY1600

表 2 采样站泥沙含量

Tab. 2 Suspended Sediment Concentrations of Sampling Locations

采样站编号	垂线平均水体含沙量/(mg·L ⁻¹)
1	122
2	315
3	134

2.2 模型构建及优化

借助 CZMIL 提供的随机软件对 ALB 原始测深数据进行处理,获得海面点、海底点高程。同时,借助 Hypack 软件对测深数据处理获得海底点高程。根据式(7),以单波束海底点高程为参考,在公共位置可计算 ALB 深度偏差 Δd , Δd 分布如图 3 所示。可以看出, Δd 与水深 d 的关系近似呈线性变化,表明本文建立的 Δd 与 d 线性变化模型式(3)是合理的。

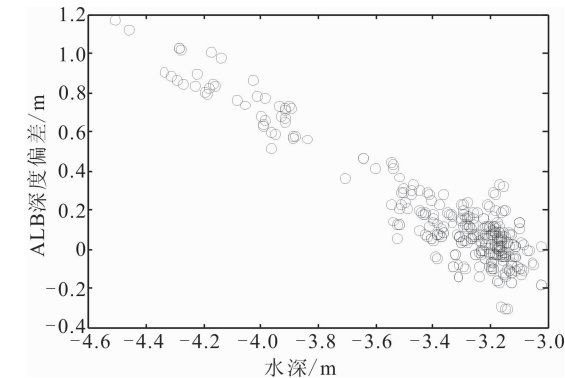


图 3 深度偏差随水深的变化

Fig. 3 Depth Bias Changes with Depth of Water

测区内,具有近似公共位置的 ALB 和声呐测深点对有 350 对,随机选取其中 290 对用于构建如式(6)的深度偏差模型,剩余 60 对用于检验深度偏差模型。建模中采用的参数如表 3 所示。

表 3 建模参数

Tab. 3 Model Parameters Used in the Modeling

统计参数	深度偏差 Δd /m	水深 d /m	含沙量 C /(mg·L ⁻¹)	传感器高度 H /m	波束扫描角 φ / (°)
最大值	1.22	-3.1	193	440	20.8
最小值	-0.16	-4.6	164	394	16.3
中位数	0.16	-3.4	177	420	19.1
标准差	0.29	0.3	5.8	11	1

借助式(6)构建深度偏差初始模型。采用 t 检验对模型中各参数进行显著性检验(见表 4)。

初始模型中多项 p 值大于显著性水平,表明初始模型具有多重共线性,不能很好地表示深度偏差,需采用逐步回归进行优化。式(14)为逐步回归优化后的改进偏差模型,改进模型中各参数的回归系数及显著性检验结果如表 5 所示。

表 4 初始偏差模型系数估计及显著性检验

Tab. 4 Coefficients of Eq. (8) and t -test Results of the Initial Depth Bias Model

参数项	系数/单位	估值	t	p
d	β_1/L	3.89×10^{-1}	0.16	0.87
φd	$\beta_2/(^{\circ}-1)$	-1.09×10^{-2}	-2.23	0.03
$\varphi^2 d$	$\beta_3/(^{\circ}-2)$	2.87×10^{-3}	2.18	0.03
Hd	β_4/m^{-1}	1.96×10^{-2}	1.48	0.14
$H^2 d$	β_5/m^{-2}	2.51×10^{-5}	-1.60	0.11
Cd	$\beta_6/(\text{mg}^{-1} \cdot \text{L})$	-4.27×10^{-2}	-2.36	0.02
$C^2 d$	$\beta_7/(\text{mg}^{-2} \cdot \text{L}^2)$	1.13×10^{-4}	2.19	0.03

表 5 改进模型系数估计及显著性检验

Tab. 5 Coefficients of Eq. (8) and t -test Results of the Improved Depth Bias Model

参数项	系数/单位	估值	t	p
d	β_1/L	1.33	3.00	0.003
φd	$\beta_2/(^{\circ}-1)$	-1.32×10^{-1}	-2.95	0.003
$\varphi^2 d$	$\beta_3/(^{\circ}-2)$	3.52×10^{-3}	2.92	0.004
$H^2 d$	β_5/m^{-2}	-1.83×10^{-6}	-5.48	0.000
Cd	$\beta_6/(\text{mg}^{-1} \cdot \text{L})$	-3.13×10^{-3}	-7.29	0.000

$$\left. \begin{aligned} \Delta d &= \mu d + b \\ \mu &= \beta_1 + \beta_2 \varphi + \beta_3 \varphi^2 + \beta_5 H^2 + \beta_6 C \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

改进的深度偏差模型剔除了 Hd 和 $C^2 d$ 两项,表明水体含沙量对深度偏差的影响可用简单的线性函数表示。改进模型中各参数 p 值均小于显著性水平 $\alpha = 0.05$,对深度偏差的影响均具有统计显著性,均需保留在模型中。显著性检验结果同样表明深度偏差模型中顾及海水水文参数和仪器测量参数的必要性和合理性。改进偏差模型中水体含沙量、传感器高度对测深偏差的影响均表现为正相关,即测深偏差随各参数递增。

2.3 模型精度评估

为评估改进模型的精度,分别利用传统偏差模型和改进偏差模型对剩余的 60 个点对上的深度偏差进行了修正,两种模型精度如表 6 所示,深度偏差的概率密度函数曲线如图 4 所示。

表 6 ALB 深度偏差及模型修正/cm

Tab. 6 Raw ALB-Derived Depth Biases and Corrected by the Depth Bias Models/cm

深度偏差	原始水深	传统模型修正后	改进模型修正后
最大值	117.3	13.5	10.7
最小值	-16.7	-23.3	-10.1
平均值	26.2	-2.1	0.8
标准差	32.7	8.5	5.4
是否满足 IHO	否	是	是

IHO S-44 定义了 95% 置信水平一等测深总垂直不确定度 (total vertical uncertainty, TVU) 最大允许值 T 为:

$$T = \pm \sqrt{0.5^2 + (0.013d)^2}$$

根据 LaRocque 采用的方法,用平均误差加 2

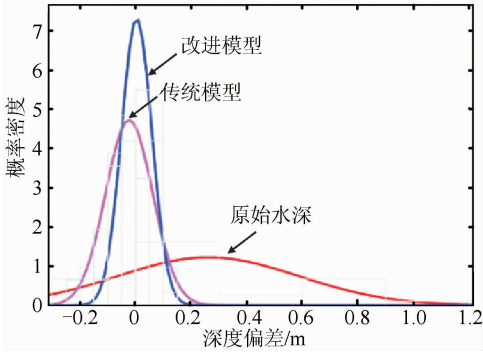


图4 深度偏差概率密度分布
Fig.4 PDF Curves of Depth Biases

倍中误差作为最差情况来判断水深修正结果是否满足 IHO 测深标准^[19]。

由表 6 和图 4 可以看出,ALB 原始水深最大偏差达 117.3 cm,标准差达 32.7 cm,且存在显著系统误差,最差情况超出了最大允许值,不能满足 IHO 一等测深精度要求;ALB 原始水深经传统模型和改进模型修正后均能满足要求。传统和改进模型对 ALB 测深精度有了显著改善,系统偏差均得到了较好的削弱,原始水深经传统模型和改进模型修正后的残余偏差标准差分别为 8.5 cm、5.4 cm,表明改进模型优于传统模型。

3 结语

本文通过逐步回归构建的改进偏差模型充分顾及了影响 ALB 测深的水文要素和仪器测量要素,显著性检验结果表明了改进偏差模型构建的必要性和合理性。同时,实验结果表明改进的偏差模型优于传统偏差模型。相比传统偏差模型,改进模型显著提高了 ALB 水深修正的精度,确保了 ALB 测深成果的质量。

传统偏差模型可应用于水体含沙量变化不大的测区,水体含沙量变化显著的测区更适宜采用改进模型。同时,为保证模型构建精度,需要根据测区实际情况确定水体含沙量采样站的布设密度和空间分布。

参 考 文 献

[1] Guenther G C, Cunningham A G, LaRocque P E, et al. Meeting the Accuracy Challenge in Airborne Bathymetry[C]. EARSel-SIG Workshop LiDAR, Dresden, Germany, 2000

[2] Liu Yanxiong, Guo Kai, He Xiufeng, et al. Research Progress of Airborne Laser Bathymetry Technology[J]. *Geomatics and Information Sci-*

ence of Wuhan University, 2017, 42(9): 1 185-1 194(刘焱雄,郭楷,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): 1 185-1 194)

[3] Zhao Jianhu, Ouyang Yongzhong, Wang Aixue. Status and Development Tendency for Seafloor Terrain Measurement[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1 786-1 794 (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): 1 786-1 794)

[4] Wozencraft J, Millar D. Airborne LiDAR and Integrated Technologies for Coastal Mapping and Nautical Charting[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2005, 39(3): 27-35

[5] Ramnath V, Feygels V, Kopilevich Y, et al. Predicted Bathymetric LiDAR Performance of Coastal Zone Mapping and Imaging LiDAR (CZMIL) [C]. SPIE Defense, Security, and Sensing, Orlando, USA, 2010

[6] Penny M F, Abbot R H, Phillips D M, et al. Airborne Laser Hydrography in Australia[J]. *Applied Optics*, 1986, 25(13): 2 046-2 058

[7] Bouhdaoui A, Bailly J S, Baghdadi N, et al. Modeling the Water Bottom Geometry Effect on Peak Time Shifting in LiDAR Bathymetric Waveforms [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(7): 1 285-1 289

[8] Guenther G C. Airborne Laser Hydrography: System Design and Performance Factors[C]. NOAA Professional Paper Series, Rockville, MD, USA, 1985

[9] Walker R E, McLean J W. LiDAR Equations for Turbid Media with Pulse Stretching[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(12): 2 384-2 397

[10] Guenther G C. Airborne LiDAR Bathymetry[R]. Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual, Bethesda, USA, 2007

[11] Guenther G C, Thomas R W. Error Analysis of Pulse Location Estimates for Simulated Bathymetric LiDAR Returns [R]. NOAA Technical Report OTES 01, Washington, USA, 1981

[12] Billard B, Abbot R H, Penny M F. Modeling Depth Bias in an Airborne Laser Hydrographic System[J]. *Applied Optics*, 1986, 25(13): 2 089-2 098

[13] Wright C W. Depth Calibration and Validation of the Experimental Advanced Airborne Research LiDAR, EAARL-B [J]. *Journal of Coastal Research*, 2016, 76: 4-17

[14] Hildale R C, Raff D. Assessing the Ability of Air-

borne LiDAR to Map River Bathymetry[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2008, 33(5): 773-783

[15] Skinner K D. Evaluation of LiDAR-Acquired Bathymetric and Topographic Data Accuracy in Various Hydrogeomorphic Settings in the Deadwood and South Fork Boise Rivers[R]. U. S. Geological Survey Scientific Investigations Report, Idaho, USA, 2007

[16] Chanson H, Takeuchi M, Trevethan M. Using Turbidity and Acoustic Backscatter Intensity as Surrogate Measures of Suspended Sediment Concentration in a Small Subtropical Estuary[J]. *Journal of Environmental Management*, 2008, 88(4): 1 406-1 416

[17] Carr D A. A Study of the Target Detection Capabilities of an Airborne LiDAR Bathymetry System [D]. Georgia: Georgia Institute of Technology, 2013

[18] Afifi A, May S, Clark V A. Computer-Aided Multivariate Analysis[M]. Boca Raton: CRC Press, 2003

[19] LaRocque P E, Banic J R, Cunningham A G. Design Description and Field Testing of the Shoals-1000t Airborne Bathymeter; Defense and Security [C]. International Society for Optics and Photonics, Bellingham, UK, 2004

A Correction Model for Depth Bias in Airborne LiDAR Bathymetry Systems

ZHAO Jianhu¹ WU Jingwen² ZHAO Xinglei³ ZHOU Fengnian²

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 The Survey Bureau of Hydrology and Water Resources of Yangtze Estuary, Shanghai 200136, China

3 College of Information Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

Abstract: Airborne LiDAR bathymetry (ALB) has the characteristics of high efficiency and cost-effectiveness to obtain submarine topography in the intertidal zone. However, the accuracy of ALB is seriously affected by oceanic hydrological factors and cannot meet the accuracy standard of International Hydrographic Organization (IHO). Traditional correction models are used to correct the ALB depth biases. However, because the factors considered are not comprehensive enough in the traditional models, the accuracy of the traditional correction model for depth bias is not high. A comprehensive bias correction model and its construction method are proposed, which take into account the parameters of depth of water, suspended sediment concentration, beam scan angle and flight height. The traditional and the comprehensive models are used to correct the ALB depth biases. The experimental results show that ALB depth biases corrected by the both models can meet the accuracy standard of IHO, and the comprehensive model is better than the traditional model.

Key words: airborne LiDAR bathymetry (ALB); depth bias; correction model for depth bias; measurement factors; hydrological factors

First author: ZHAO Jianhu, PhD, professor, specializes in marine survey. E-mail: jhzhao@sgg.whu.edu.cn

Corresponding author: ZHAO Xinglei, PhD. E-mail: xingleizhao@126.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41576107, 41376109, 41176068; National Science and Technology Major Project, No. 2016YFB0501703.