



引文格式:龙佳威,赵建虎,传杰,等.MRU位置偏差二次探测及多波束异常条纹地形消除方法研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(5):785-793.DOI:10.13203/j.whugis20210556

Citation:LONG Jiawei,ZHAO Jianhu,LIU Chuanjie,et al.Secondary Detection of MRU Position Deviation and Terrain Elimination of Multi-beam Abnormal Stripe[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2024,49(5):785-793.DOI:10.13203/j.whugis20210556

MRU位置偏差二次探测及多波束异常条纹 地形消除方法研究

龙佳威^{1,2} 赵建虎^{1,2} 刘传杰³ 付五洲³ 龚权华⁴

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

2 武汉大学海洋研究院,湖北 武汉,430079

3 长江水利委员会水文局长江口水文水资源勘测局,上海,200136

4 中国交通建设集团第三航务工程局新能源工程有限公司,上海,200137

摘要:针对多波束测深数据中常出现的沿航迹向异常条纹在浅水影响显著,传统方法机理不完善和异常消除不彻底问题,基于多波束数据处理原理分析成因,认为主要由于诱导涌浪未补偿或姿态传感器(motion reference unit, MRU)位置偏差量测不准带来的诱导涌浪补偿残余所致,为此提出基于往返测线测深点对深度不符值的MRU位置偏差二次分段探测方法和异常条纹消除方法。首先通过最近平面点搜索,发现同名点对;然后分段构建深度不符值与欲探测的MRU位置偏差关系模型,并借助支持向量机回归参数抗差估计法估计位置偏差;最后给出修正模型,消除测深数据中异常条纹影响。实验表明,所提方法从机理上较彻底地消除了异常测深条纹影响,也为MRU安装偏差探测提供了一种新方法。

关键词:多波束系统;异常条纹;MRU位置偏差;诱导涌浪补偿残余

中图分类号:P229

文献标识码:A

收稿日期:2022-04-29

DOI:10.13203/j.whugis20210556

文章编号:1671-8860(2024)05-0785-09

Secondary Detection of MRU Position Deviation and Terrain Elimination of Multi-beam Abnormal Stripe

LONG Jiawei^{1,2} ZHAO Jianhu^{1,2} LIU Chuanjie³ FU Wuzhou³ GONG Quanhua⁴

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

2 Institute of Marine Science and Technology, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3 Changjiang River Estuary Bureau of Hydrological and Water Resources Survey, Bureau of Hydrology of Changjiang Water Resources Commission, Shanghai 200136, China

4 New Energy Engineering Co. Ltd, Third Navigation Engineering Bureau of China Communications Construction Group, Shanghai 200137, China

Abstract: Objectives: The anomaly along-track stripes which often appear in the multi-beam sounding data have significant influence on shallow water. Aiming at the problem that the mechanism of traditional methods is not perfect and the elimination of anomalies is not complete, the causes are analyzed based on the multi-beam data processing principle. It is considered that the main reason is induced heave compensation residual caused by uncompensated induced heave or inaccurate measurement of position deviation of motion reference unit (MRU). **Methods:** For this reason, a method of position deviation detection and elimination of abnormal stripes based on the sounding data of common coverage area is proposed. First, homologous point pairs are found by automatic nearest plane point searching. Second, the relationship model between the water depth difference of the homologous point and the position deviation to be detected was constructed, and the position deviation was

基金项目:国家重点研发计划(2022YFC2808303);上海市海洋局科研项目(沪海科2023-10);国家自然科学基金(42176186)。

第一作者:龙佳威,硕士,主要从事多波束数据处理研究。2016301610101@whu.edu.cn

通讯作者:赵建虎,博士,教授。jhzhaosgg@whu.edu.cn

estimated by support vector machine regression parameter robust estimation method. Finally, a modified model is given to eliminate the influence of abnormal stripes in the sounding data. **Results:** Experimental results show that: (1) After the calibration of the proposed method, the standard deviation of the difference between the common coverage area of the round-trip lines decreases from 8.5 cm to 2.6 cm. (2) The mutual difference between the detection results of each section is about 1 cm. (3) The proposed method performs (significantly different) on adjacent lines with 50% and 15% overlap area, with standard deviations decreasing from 6.9 cm to 3.9 cm and from 12.9 cm to 7.6 cm, respectively. (4) Using the detected relative position deviation to correct the entire measurement area, the standard deviation of the discrepancy value in the common coverage area is reduced from 0.07 m to 0.03 m. **Conclusions:** The proposed method can completely eliminate the influence of abnormal sounding stripes and provide a new method for detecting MRU installation deviation. However, the results are affected by the overlap area of the adjacent lines, so it is recommended to be performed on the round-trip lines whenever possible.

Key words: multi-beam bathymetric system; abnormal stripe; MRU position deviation; compensation residual of induced heave

多波束测深系统已成为当前主流测深设备,因其全覆盖、全水深、高精度、高分辨率等特点,被广泛应用于水下地形测量、海底地貌勘查、水下目标检测等方面^[1]。多波束是一个由多传感器组成的综合系统,其测深精度受各传感器精度、传感器间耦合效应及环境等综合影响,测深数据中除伴随随机误差和粗差外,还时常带有系统误差,如沿航迹向的异常测深条纹,严重影响了成果质量^[2-5]。阳凡林等^[2]利用局部方差、中值滤波和小波分析提出一种粗差定位和消除方法,对系统误差引起的异常条纹也有一定的压制作用;赵建虎等^[3]提出一种基于半参数法的测深数据系统误差削弱方法,但对异常条纹影响消除作用欠佳;张志衡等^[4]提出一种基于影响域的趋势面滤波法,将影响域定义为散乱水深点的局部最小范围,以消除局部测深异常,但对削弱规律性较强的异常测深条纹则效果不明显;赵祥鸿等^[5]结合小波分析,提出一种基于二维经验模态分解重构多波束测深地形趋势面的方法,以此探测和消除测深异常值,但同其他滤波方法一样,对沿航迹向异常波纹压制效率不理想。Mohammadloo等^[6]分析了脉冲(ping)测深断面边缘异常测深问题,将此归因于声速误差影响,使用差分进化算法和高斯-牛顿法进行声速反演,削弱声速对边缘波束测深影响,但ping测深断面间的条纹依然存在。赵建虎等^[7]通过对沿航迹的不同波束测深序列滑动平均来消除异常条纹,但消除不彻底。柴江波^[8]根据条纹的变化周期,通过低通滤波压制异常条纹,但存在周期探测不准确、压制波纹的同时错误地压制了微地形等问题。

以上研究一定程度上提高了多波束测深数

据质量,但对沿航迹向的异常测深条纹削弱效果不理想,未从机理上给出异常条纹产生的成因,多从数据表现层面通过滤波来消除异常。为此,本文针对异常条纹产生的特点,根据多波束数据处理原理,从机理上给出产生异常条纹的成因,构建异常测深条纹的削弱模型,以期从机理上彻底解决该问题的影响。

1 异常条纹及其成因分析

多波束测深数据反映出的条纹地形可能是真实的沙波地形,也可能是由测量误差造成的。沙波地形由海流对海底底质的作用产生,属于正常海底地貌。测量误差引起的异常条纹(图1)有以下特点:(1)沿航迹向分布,与沙波地形在形态和走向方面差异明显;(2)同ping断面地形被整体抬升或降低;(3)对沿航迹向的相邻ping断面地形影响不同,呈近似的周期性峰谷变化;(4)对相邻测线对应ping断面地形的影响不同。

测深点的高程 h 可借助下式获得^[9]:

$$h = W_{\text{Tide}} - (D_0 + \Delta d_{\text{draft}} + \Delta d_m + \Delta d_i) \quad (1)$$

式中, W_{Tide} 为水位; D_0 为实测的换能器到海底的深度,可借助波束入射角、姿态、声速等通过声线跟踪获得^[10]; Δd_{draft} 为换能器吃水; Δd_m 和 Δd_i 为姿态传感测量(motion reference unit, MRU)的升沉变化以及诱导升沉^[10-11]。

1.1 安装偏角对深度的影响

声线跟踪中,波束的实际入射角会受发射和接收导向角、船体姿态、MRU和换能器安装偏角等因素影响。波束导向角和姿态分别由换能器和姿态传感器提供;安装偏角可以探测,但可能

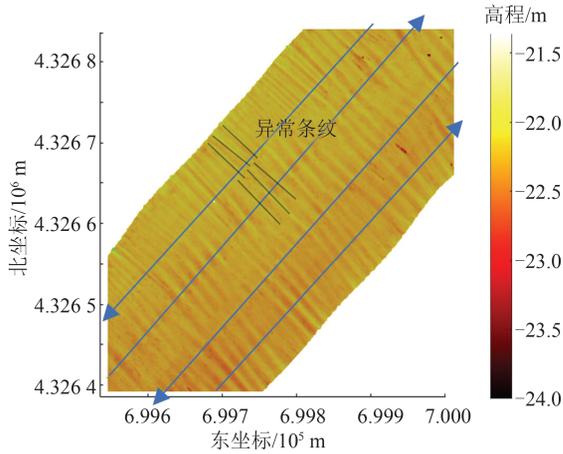


图 1 沿航迹向异常条纹现象

Fig. 1 Along-Track Abnormal Stripe Terrain

探测不准确,可将其分解为纵摇偏角 ΔP 、横摇偏角 ΔR 和艏摇偏角 ΔA , ΔA 仅影响平面位置,而 ΔP 和 ΔR 会影响水深。假设海底平坦且水体声速恒定, ΔP 和 ΔR 对水深的影响为^[12]:

$$\Delta d = \begin{cases} -r(1 + \tan^2(\theta + R) + \tan^2 P)^{-3/2} \cdot \\ \quad \tan P \cos^{-2} P \Delta P \\ -r(1 + \tan^2(\theta + R) + \tan^2 P)^{-3/2} \cdot \\ \quad \tan(\theta + R) \cos^{-2}(\theta + R) \Delta R \end{cases} \quad (2)$$

式中, Δd 为水深误差; θ 为波束指向角; P 和 R 分别为纵、横摇角; r 为斜距。

1.2 声速误差对深度的影响

换能器到海底的深度 D_0 借助声线跟踪获得,且严格依赖声速剖面^[13]。声线跟踪常采用层内常声速或层内常梯度声线跟踪方法来实现,若声速存在误差,则会对深度产生系统性影响^[14]。为简化问题且不失一般性,设层 i 声速为常声速,该层表层入射参数为 C_{i-1} 、 θ_{i-1} ,层内声速 C_i 的测量误差为 dC_i ,根据 Snell 法则, dC_i 对该层折射角 θ 和实际 l 的影响为^[15]:

$$d\theta_i = \frac{\sin \theta_{i-1}}{C_{i-1} \cos \theta_i} dC_i \quad (3)$$

$$dt_i = \frac{\Delta z_i \sec \theta_i \tan \theta_i}{C_i} d\theta_i - \frac{\Delta z_i \sec \theta_i}{C_i^2} dC_i \quad (4)$$

由式(4)可知,声速误差对折射角及时间影响均随入射角增大而增大,且误差通过折射角影响进而影响波束在下一层的传播,入射角越大,影响越大^[16]。

1.3 吃水对深度的影响

吃水变化会影响水深。静吃水 $\Delta d_{s-draft}$ 受船体载重变化影响,在一段时间内为一个常值。动吃水 $\Delta d_{k-draft}$ 可以借助霍密尔模型来表达^[17]:

$$\Delta d_{k-draft} = K \sqrt{\frac{D_i}{z_m}} V^2 \quad (5)$$

式中, D_i 为静吃水; z_m 为对应区域水深; V 为实际船速; K 为船型系数。式(5)表明, $\Delta d_{k-draft}$ 与船速正相关,多波束测量中船速相对稳定,由此产生的动吃水变化稳定。

1.4 涌浪及诱导涌浪对测深的影响

涌浪 Δd_m 可借助 MRU 提供的不同测深时刻的涌浪参数来反应和消除。当测量船在波浪中运动产生横纵摇和升沉运动时,波浪中运动产生的测量船上每一点升沉是不同的,这是因为测船上的每处除了产生与测量船重心相同的升沉运动外,还有横纵摇运动引起的附加升沉运动。受船姿 P 和 R 的影响,换能器与 MRU 不同心会导致两处的涌浪值不一致,进而产生诱导涌浪 Δd_i ^[18],计算如下:

$$\Delta d_i = x \sin P - y \sin R \cos P - z (\cos R \cos P - 1) \quad (6)$$

式中, Δd_i 为诱导涌浪; x 、 y 、 z 为换能器与涌浪传感器的相对位置偏差。由式(6)可知,诱导涌浪含有周期性变化的船体横摇和纵摇参数,会对深度造成周期性影响。

同时由式(1)可知,潮位残差会直接影响测深数据的深度。综合以上模型,各因素对 ping 断面测深、沿航迹测深的影响及特点如图 2 和表 1 所示,图 2(a) 为根据以上分析模拟的各因素在不同入射角下对单 ping 的测深影响;图 2(b) 来源于实验数据中的一段测线,测深约为 20 m,通过提取其中央区域的测深及对应时刻的潮位、动吃水、船体横、纵摇等数据,模拟出各因素对测深的沿航迹向影响。

由以上分析可知,诱导涌浪与异常条纹变化幅度和周期相同,且在中央区域与边缘区域具有一致的变化幅度,可认为是沿航迹向异常条纹的主要成因。若诱导涌浪未补偿,可利用 MRU(或涌浪传感器)与多波束换能器在船体坐标系下的坐标差和姿态进行重新补偿;若已开展了诱导涌浪补偿,则可能因为位置偏差不准确引起补偿残余及异常条纹,需进行 MRU 安装偏差二次探测和异常条纹消除。

2 MRU 安装偏差的二次探测及异常条纹消除

若仅受诱导涌浪影响,在两测线公共覆盖区相同位置的测深点对深度满足如下关系:

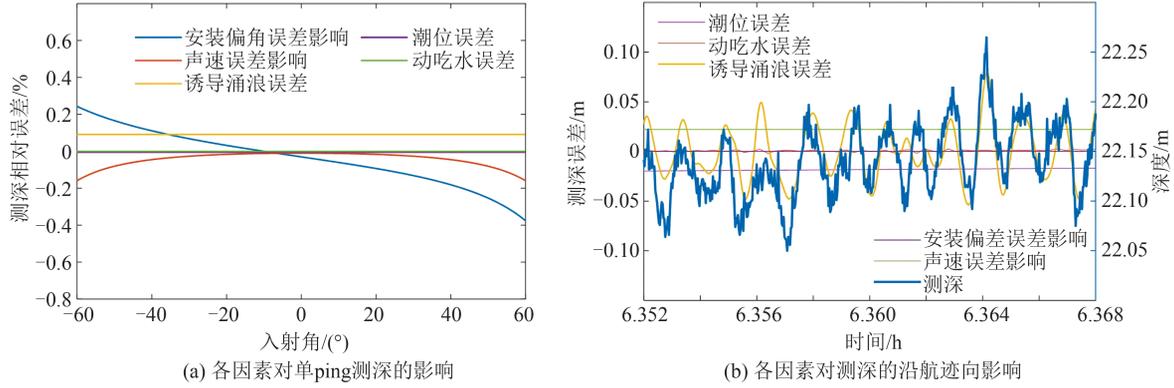


图 2 各因素对单 ping 测深和沿航迹测深的影响

Fig. 2 Effects of Different Factors on Depth in a ping and Along-Track

表 1 影响测深的因素及其特点

Tab. 1 Influence Characteristics of Different Factors on Depth

影响因素	影响特点及变化周期
潮位误差	ping 内测深数据整体抬升或降低, 变化周期与潮位周期相同
安装偏角	对 ping 断面测深数据影响与波束入射角相关, 在整个测线内一直存在
声速误差	对 ping 断面测深数据影响随波束入射角增大而增大, 在局域一直存在
动吃水	引起 ping 断面测深数据整体抬升或降低, 与船速变化周期相关, 一段时间内保持稳定
诱导涌浪	引起 ping 断面测深数据的整体抬升或降低, 与姿态的变化周期相关, 变化周期短

$$\begin{cases} h_i' = h_i - (x \sin P_i - y \sin R_i \cos P_i \\ \quad - z (\cos R_i \cos P_i - 1)) \\ h_k' = h_k - (x \sin P_k - y \sin R_k \cos P_k \\ \quad - z (\cos R_k \cos P_k - 1)) \\ h_i' = h_k' \end{cases} \quad (7)$$

式中, h_i, h_k 为分属测线 i 和 k 的相同位置测深(匹配)点对的实测水深, 对应的姿态分别为 P_i, R_i 和 P_k, R_k , 真实水深为 h_i', h_k' ; (x, y, z) 为需探测的 MRU 位置偏差。

实测水深不仅受诱导涌浪影响, 还受声速误差、安装偏差等角相关误差及潮位、动吃水等非角相关误差的影响, 其中角相关误差影响较为显著。为从受综合影响的测深数据中探测出 MRU 的位置偏差, 应尽量避免其他因素的影响。根据图 2(a) 和已有文献, 声速误差对 ping 断面 $-30^\circ \sim 30^\circ$ 的测深数据影响较小^[15], 安装偏角对中心波束附近的测深数据影响较小^[19]。为此, 本文根据非角相关误差短时影响的稳定性和角相关误差对中心波束附近水深影响较小的特点, 利用同一测线往返测量数据中航迹线 $-5^\circ \sim 5^\circ$ 测深点对的测深不符值, 提出一种 MRU 位置偏差分段二次探测方法, 具体流程如图 3 所示。

2.1 匹配点对提取

为避免区域搜索匹配点对效率过低问题, 先将两条测线所有点云数据格网化, 格网大小根据

测线覆盖率及点的平均密度确定; 然后遍历搜索, 对存在两个测线测深点的相同格网, 匹配点搜索范围为当前格网及其邻域 8 格网, 提取出其中平面坐标满足以下条件的所有匹配点组:

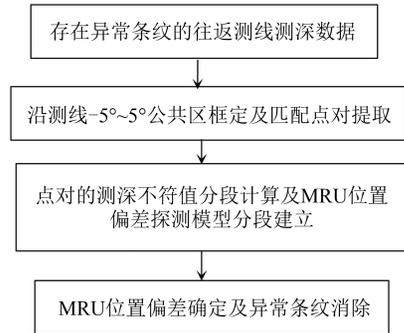


图 3 MRU 位置偏差分段探测及异常条纹消除
Fig. 3 Determination of MRU Location Bias and the Elimination of Abnormal Stripe Terrain

$$\sqrt{(X_i^1 - X_k^2)^2 + (Y_i^1 - Y_k^2)^2} < \delta \quad (8)$$

式中, $(X_i^1, Y_i^1), (X_k^2, Y_k^2)$ 分别为两条测线中某点的平面坐标; δ 为认为可作为近似相同点的限差。

由于本文所用数据定位精度较高, 且经过了安装偏差校准, 因此在本文实验中将 δ 设置为 0.05 m。若数据定位精度较低, 可将其设置为更大值。

2.2 基于支持向量机 (support vector machine, SVM) 回归法的位置偏差估计模型建立

获得了匹配点对组后, 将匹配点对组代入模

型建立回归方程,求解换能器与涌浪传感器的相对位置偏差 (x, y, z) 。位置偏差的回归方程为:

$$h_i - h_k = (\sin P_i - \sin P_k)x - (\sin R_i \cos P_i - \sin R_k \cos P_k)y - (\cos R_k \cos P_k - \cos R_i \cos P_i)z \quad (9)$$

在偏移同量级情况下, z 产生的诱导涌浪非常小^[18],为简化计算,式(9)可简化为:

$$h_i - h_k = (\sin P_i - \sin P_k)x - (\sin R_i \cos P_i - \sin R_k \cos P_k)y \quad (10)$$

式中,各符号的意义同前。

顾及式(10)中各测量数据中的噪声影响,采用 SVM 对式(10)进行回归求解^[20]。SVM 是在有限的噪声样本基础上来获得未知模型参数的一种有效方法,可实现线性回归和非线性回归问题的求解^[21]。由于上述模型只存在线性关系,故本文实验中引入线性核函数。较一般线性回归,SVM 引入了损失函数 ϵ ^[22]:

$$|y_i - \omega x_i - b| \leq \epsilon \quad (11)$$

式中, ϵ 用于控制拟合精度; ω 、 b 为回归函数系数,用于拟合 $\{x_i, y_i\}$ 。

使用线性回归函数对样本进行拟合,依据结构风险最小化准则,使目标函数最小,同时考虑到在 ϵ 下不能顾及的数据,引入松弛因子,标准的支持向量回归表示为:

$$\begin{cases} \min \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \sum_{i=1}^n (\xi_i + \xi_i^*) \\ \text{s.t.} \begin{cases} y_i - \omega_i - b \leq \epsilon + \xi_i \\ \omega_i + b - y_i \leq \epsilon + \xi_i^* \\ \xi_i, \xi_i^* \geq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (12)$$

式中, $\frac{1}{2} \|\omega\|^2$ 为目标函数; ξ_i 、 ξ_i^* 为松弛因子; $C > 0$ 是平衡因子,表现为对超出误差范围样本的惩罚程度。引入拉格朗日乘子 α_i 、 α_i^* 进行回归参数求解:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) x_i^T x + b \quad (13)$$

对于不敏感损失函数 ϵ ,在计算中依据仪器设备的测量精度确定,平衡因子 C 依据测量精度及沿航迹向条纹幅值大小确定。

2.3 MRU 位置偏差的确定及异常条纹消除

以上 MRU 位置偏差分段确定中,段的长度主要根据船速的稳定性确定。对 m 段确定的结果 (x, y) ($i=1, 2, \dots, m$)取平均,得到最终的 MRU 位置偏差 (x, y) :

$$x = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i, y = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_i \quad (14)$$

式中, (x, y) 为探测的 MRU 位置偏差; m 为分段数。

结合姿态参数 R 和 P ,可使用如下两种方法对沿航迹向条纹现象进行消除:方法 1:先根据探测出的相对位移偏差对船文件中的换能器与涌浪传感器的相对位移进行改正,然后使用改正后的船文件重新进行声线跟踪及归位计算。方法 2:直接根据下式对多波束的测深点云进行改正:

$$h_i' = h_i - (x \sin P_i - y \sin R_i \cos P_i) \quad (15)$$

式中, h_i 和 h_i' 分别为改正前、后的水深。

方法 2 不需要重新进行声线跟踪,但其改正的诱导涌浪是对最后的测深结果进行直接改正,并不是改正声线传播的起始位置,因而会产生一定的误差。因此在条件允许下,一般采用方法 1 对条纹进行消除。

3 实验及分析

实验数据来源于渤海地区某水域的一批多波束测深数据,所用仪器为 Reason 公司的 Sea-Bat 7125 SV2 浅水型双频多波束,其工作频率为 200 kHz,扇开角为 120°,波束个数为 256。测区大小约为 7×7 km,测区水下地形较为平缓,水深范围约为 20~25 m。

根据§2 数据选取原则,选取区域内两条约 350 m 长的往返测线 $L1$ 和 $L2$ 作为实验测线,对原始测量数据进行质量控制后,进行归位计算获得多波束点云。多波束点云经过粗差剔除后形成的局部地形图如图 4 所示,局部放大如图 4(b)所示。可以看出,沿航迹向的异常条纹地形非常明显,条纹在垂向起伏达到了±20 cm,而国际海道测量组织规定的超等航行安全测量最低水深标准为 15 cm。尤其当整体地形平坦时,条纹地形影响显得尤为突出,开展异常条纹影响消除非常必要。

匹配点对提取时将范围定在测线左右 $-5^\circ \sim 5^\circ$ 范围,该区域测深精度较高。按§2.1 所述方法在此区域分段提取出匹配点对,共获得了 4 612 个匹配点对。将每组匹配点两点的原始水深、对应时刻船体横纵摇值按式(9)建立模型,借助支持向量回归得到换能器与涌浪传感器的位置偏差,将误差改正至测线对应船文件中,重新进行归位计算,形成的地形图如图 5 所示。相较图 4,改正后两测线的沿航迹向条纹现象得到明显消除,合理地反映了整体地形的变化。图 5(b)展示了改正后细部地形,在高分辨率下条纹现象得到

显著消除,清晰展示出了多波束地形的细部特征。以上表明本文分析的异常波纹成因的正确

性以及给出的位置参数探测方法和异常波纹消除方法的正确性。

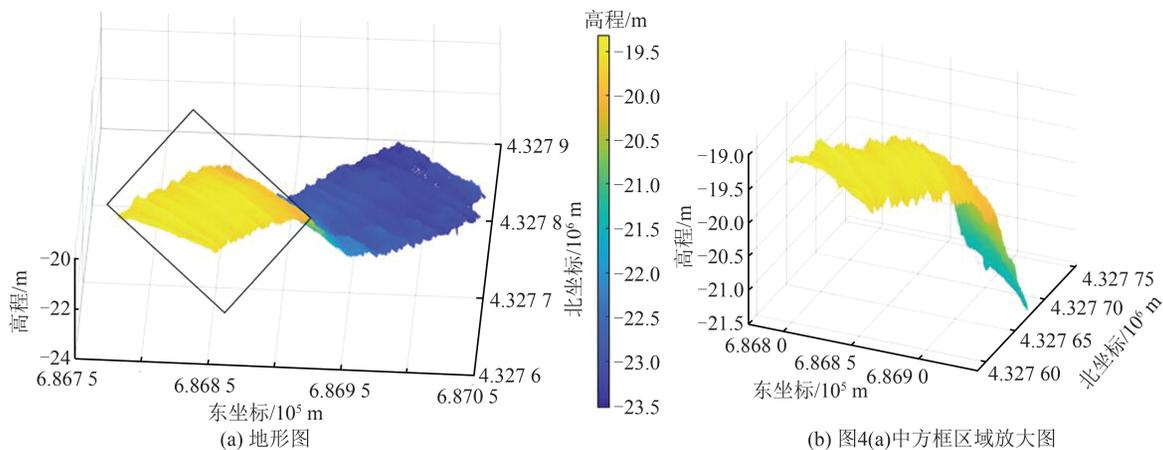


图4 改正前地形

Fig. 4 Terrain Before the Correction

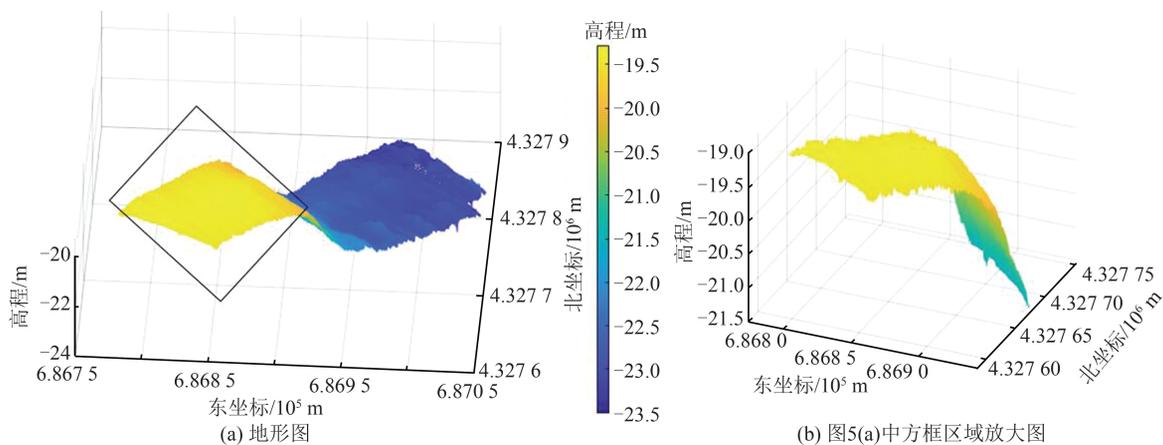


图5 改正后地形

Fig. 5 Terrain After the Correction

4 评估与分析

为了验证本文给出的位置偏差探测方法的正确性及探测精度与测线公共覆盖率的关系,在整个测区分别选取两测线公共覆盖率为15%、50%和100%的区段实验,探测结果如表2所示。由表2可知:(1)覆盖率为100%情况下,各段探测结果互差为1 cm,基本相同,探测结果非常稳定。(2)覆盖率为50%情况下,各段探测结果互差为4 cm,探测结果稳定。(3)覆盖率为15%情况下,探测结果波动较大。

基于表2探测结果开展异常条纹地形改正,根据相邻测线公共覆盖区的测深不符值,对改正前、后的地形进行精度评估,结果如表3所示。由表3可以看出,基于本文方法探测结果改正诱导涌浪效果最明显,其次为覆盖率为

50%以及15%的情况。分析认为,利用覆盖率为50%和15%的匹配点对数据建模和确定MRU位置偏差时,测深精度受角相关误差(安装偏角误差、声速误差等)的影响,且随着波束入射角的增大而增大,导致由测深点对计算得到的深度差不仅受诱导涌浪补偿残余的影响,还受其他误差的影响,进而影响MRU位置偏差探测精度及诱导涌浪消除。本文方法利用往返测线 $-5^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 测深点对不符值构建模型,最大限度地规避了这些角相关误差的影响,因此提高了MRU位置偏差的探测精度以及最终的地形精度。

利用探测的位置偏差对实验区域共11条测线进行波纹异常削弱,并利用相邻测线公共覆盖区的深度不符值、交叉线与测量线交叉区域的测

深不符值进行精度评估,误差统计结果为:改正前的最大值、最小值、平均值、标准差分别为 0.64 m、-0.43 m、0.06 m 和 0.07 m;改正后分别为 0.19 m、-0.17 m、0.03 m 和 0.03 m。误差的分布范围如图 6 所示,改正前、后的整个实验区地形如图 7 所示。

表 2 两相邻测线不同公共覆盖率情况下的位置偏差探测结果

Tab. 2 Position Offset Detections of Two Surveying Lines with Different Common Coverage

段数	公共区域覆盖率/%					
	50		100		15	
	x/m	y/m	x/m	y/m	x/m	y/m
1	-1.75	1.88	-1.84	1.78	-1.46	2.19
2	-1.73	1.89	-1.84	1.78	-1.55	2.03
3	-1.77	1.89	-1.84	1.78	-1.84	2.07

表 3 不同公共覆盖率的相邻测线改正结果

Tab. 3 Correction Results of Adjacent Lines with Different Common Coverages

公共区域覆盖率/%	改正前后	最大值/cm	最小值/cm	平均值/cm	标准差/cm
100	前	21.0	-25.3	6.9	8.5
	后	14.1	-12.8	2.1	2.6
50	前	37.8	-48.3	6.0	6.9
	后	35.4	-48.6	4.0	3.9
15	前	62.3	-56.5	17.4	12.9
	后	73.4	-64.7	6.4	7.6

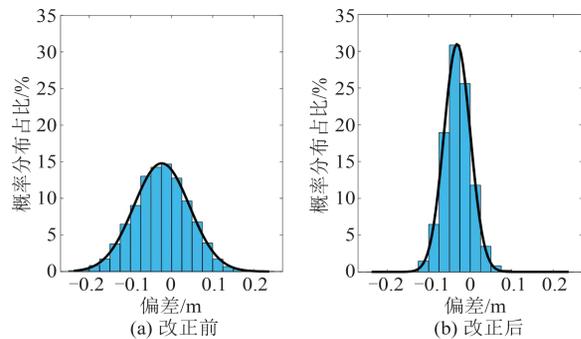
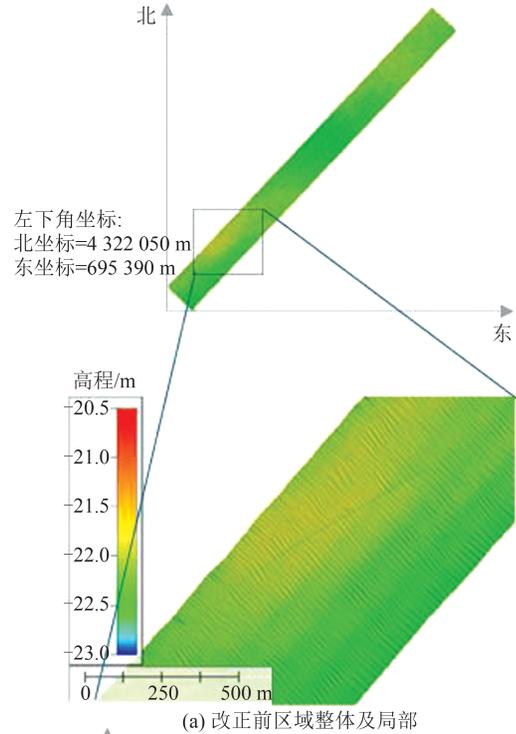


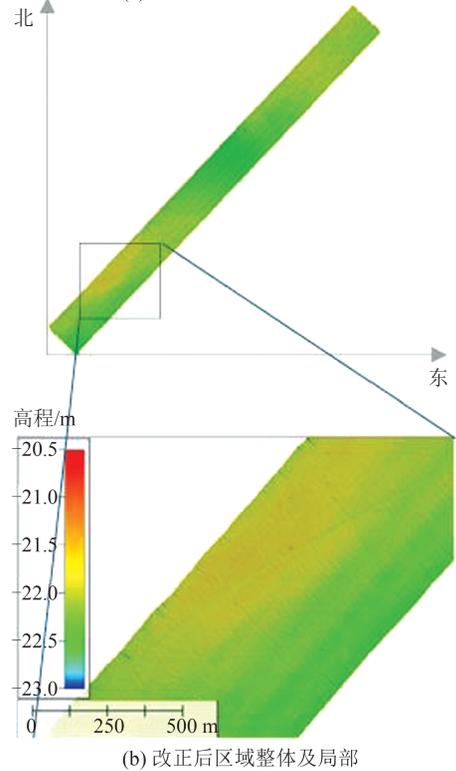
图 6 外部检验的概率分布函数曲线

Fig. 6 Probability Distribution Function Curve of External Tests

可以看出,无论是内部检验还是外部检验,本文方法均削弱了异常条纹给测深带来的系统性影响,显著提高了测深精度,表明本文发现的异常波纹成因的正确性及提出的换能器与涌浪传感器的位置偏差探测方法和异常波纹消除方法的正确性。



(a) 改正前区域整体及局部



(b) 改正后区域整体及局部

图 7 改正前、后区域整体及局部地形

Fig. 7 Whole and Local Terrain Before and After the Correction

5 结 语

本文提出的 MRU 位置偏差二次探测及多波束异常条纹地形消除方法,从机理上准确地探测出了 MRU 位置偏差量或量测不准确量,补偿了诱导涌浪或诱导涌浪补偿残余,较好地消除了

多波束测深数据中常出现的沿航迹向异常条纹地形的影响,提高了多波束测深精度,也为MRU安装偏差探测提供了一种新方法。所得结论如下:

1)诱导涌浪未补偿或因MRU位置偏差量测不准导致的诱导涌浪补偿残余,均是产生沿航迹向高频异常条纹地形的成因,且对浅水测量影响显著。若测量前准确量测了MRU位置偏差,可对诱导涌浪进行准确补偿;若偏移参数未知或量测不准,可借助本文方法进行二次探测和诱导涌浪二次补偿。

2)利用往返测线 $-5^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 的测深点对的测深不符值构建MRU位置偏差或残余偏差探测模型,可以较好地规避其他角相关误差的影响,提高MRU位置偏差探测精度。

参 考 文 献

- [1] Liu Jingnan, Zhao Jianhu, Ma Jinye. Concept of Constructing the Underwater PNT Network with the Abilities of Communication, Navigation and Remote Sensing in the Deep Sea[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(10): 1523-1534. (刘经南, 赵建虎, 马金叶. 通导遥一体化深远海PNT基准及服务网络构想[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(10): 1523-1534.)
- [2] Yang Fanlin, Liu Jingnan, Zhao Jianhu. Detecting Outliers and Filtering Noises in Multi-beam Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(1): 80-83. (阳凡林, 刘经南, 赵建虎. 多波束测深数据的异常检测和滤波[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2004, 29(1): 80-83.)
- [3] Zhao Jianhu, Liu Jingnan, Yang Fanlin. Weaken Systematic Error in Depth of MB-ES [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(5): 394-397. (赵建虎, 刘经南, 阳凡林. 多波束测深数据系统误差的削弱方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2004, 29(5): 394-397.)
- [4] Zhang Zhiheng, Peng Rencan, Huang Wenqian, et al. An Improved Algorithm of Tendency Surface Filtering in Multi-beam Bathymetric Data Considering the Natural Neighboring Points Influence Field [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(1): 35-47. (张志衡, 彭认灿, 黄文骞, 等. 考虑自然邻点影响域的多波束测深数据趋势面滤波改进算法[J]. 测绘学报, 2018, 47(1): 35-47.)
- [5] Zhao Xianghong, Bao Jingyang. Method for Detecting Outliers of Multi-beam Sounding Data [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2018, 39(9): 1458-1464. (赵祥鸿, 暴景阳. 多波束测深异常数据探测方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(9): 1458-1464)
- [6] Mohammadloo T H, Snellen M, Renoud W, et al. Correcting Multibeam Echosounder Bathymetric Measurements for Errors Induced by Inaccurate Water Column Sound Speeds [J]. *IEEE ACCESS*, 2019, 7: 122052-122068.
- [7] Zhao Jianhu, Zhang Hongmei, Wu Meng. A Sound Ray Tracking Algorithm Based on Template-Interpolation of Constant-Gradient Sound Velocity [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(1): 71-78. (赵建虎, 张红梅, 吴猛. 一种基于常梯度模板插值的声线跟踪算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(1): 71-78.)
- [8] Chai Jiangbo. Research on Processing Method of Abnormal Multi-beam Bathymetry Data Taking into Account the Changing Trend of Terrain [D]. Wuhan: Wuhan University, 2021. (柴江波. 顾及地形趋势的异常多波束测深数据处理方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2021.)
- [9] Zhao Jianhu, Liu Jingnan. Problems on the Conformity to the Real Sounding Points from the Multi-beam Sounding System [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2003, 23(1): 6-7. (赵建虎, 刘经南. 多波束测深系统的归位问题研究[J]. 海洋测绘, 2003, 23(1): 6-7.)
- [10] Jin Shaohua, Liu Guoqing, Sun Wenchuan, et al. The Research on Depth Reduction Model of Multi-beam Echosounding Considering Ship Attitude and Sound Ray Bending [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2019, 39(1): 19-22, 34. (金绍华, 刘国庆, 孙文川, 等. 顾及姿态及声线弯曲的多波束测深归算模型研究[J]. 海洋测绘, 2019, 39(1): 19-22, 34.)
- [11] Yang Fanlin, Xin Mingzhen, Liu Jingnan, et al. Discussion of Deep-sea Dynamic Positioning Methods with Ultra-short Baseline Multi-beacon Constraint [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(11): 1876-1883. (阳凡林, 辛明真, 刘经南, 等. 超短基线多信标约束的深海动态定位方法探讨[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(11): 1876-1883.)
- [12] Liu Fanglan, Zhang Zhirong, Yu Ping. The Methods Correcting Roll and Pitch Biases of Multibeam Bathymetric System [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2004, 34(4): 621-624. (刘方兰, 张志荣, 余平. 多波束系统横摇、纵倾参数的校正方法[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2004, 34(4): 621-624.)
- [13] Dong Qingliang, Han Hongqi, Fang Zhaobao. The

- Influence of Sound Speed Profiles Correction on Multi-beam Survey [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2007, 27(2): 56-58. (董庆亮, 韩红旗, 方兆宝, 等. 声速剖面改正对多波束测深的影响[J]. 海洋测绘, 2007, 27(2): 56-58.)
- [14] Dinn D F, Loncarevic B D, Costello G. The Effect of Sound Velocity Errors on Multi-beam Sonar Depth Accuracy [C]// OCEANS' 95 MTS/IEEE, San Diego, CA, USA, 1995.
- [15] Zhao Jianhu, Liu Jingnan. Multi-beam Sounding and Image Data Processing [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2008. (赵建虎, 刘经南. 多波束测深及图像数据处理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2008.)
- [16] Zhu Xiaochen, Xiao Fumin, Liu Yanchun, et al. Research on the Influence of Surface Sound Velocity in Multi-beam Echo Sounding [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2007, 27(2): 23-25. (朱小辰, 肖付民, 刘雁春, 等. 表层声速对多波束测深影响的研究[J]. 海洋测绘, 2007, 27(2): 23-25.)
- [17] Zhao Jianhu, Liu Jingnan, Zhou Fengnian. Method in Determining Vessel Attitude with GPS [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2000, 25(4): 353-357. (赵建虎, 刘经南, 周丰年. GPS测定船体姿态方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2000, 25(4): 353-357.)
- [18] Ge Jian, Xiao Fumin, Feng Qiming. Effect of Monitoring Heave of Transducer Due to the Spatial Offset Between Motion Sensor and Transducer [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2008, 28(4): 4-7. (葛健, 肖付民, 丰启明. 姿态传感器与换能器安装位置偏差对换能器升沉监测的影响[J]. 海洋测绘, 2008, 28(4): 4-7.)
- [19] Li Qingquan, Zhu Jiasong, Wang Chisheng, et al. Shipborne Combined Laser and Bathymetric Surveying Technique in Coastal Zone: An Overview [J]. *Journal of Geomatics*, 2017, 42(5): 1-6. (李清泉, 朱家松, 汪驰升, 等. 海岸带区域船载水岸一体综合测量技术概述[J]. 测绘地理信息, 2017, 42(5): 1-6.)
- [20] Kwok T Y. Support Vector Mixture for Classification and Regression Problems [C]// The 14th International Conference on Pattern Recognition, Brisbane, Australia, 1998.
- [21] Wang Dingcheng, Fang Tingjian, Tang Yi, et al. Review of Support Vector Machines Regression Theory and Control [J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2003, 16(2): 192-197. (王定成, 方廷健, 唐毅, 等. 支持向量机回归理论与控制的综述[J]. 模式识别与人工智能, 2003, 16(2): 192-197.)
- [22] Vapnik V N. The Nature of Statistical Learning Theory [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1997, 8(6): 1564.