



一种基于LM算法的多波束横摇残差改正方法

张永厚^{1,2} 肖付民¹ 金绍华¹ 边刚¹ 汤寓麟¹

1 大连舰艇学院军事海洋与测绘系,辽宁 大连,116018

2 中国航海图书出版社,天津,300450

摘要:针对多波束测深系统由于存在运动残差而产生横摇误差,从而导致数据条带边缘呈现“波浪”状周期性起伏的问题,提出了一种基于列文伯格-马夸尔特(Levenberg-Marquardt, LM)算法的多波束横摇残差改正方法。该方法首先建立水深与横摇残差之间的函数关系式,然后采用非线性最小二乘LM算法并结合剖面趋势线构建思想进行横摇残差提取,最终实现对海底地形的改正。实例计算结果表明,改正后地形过渡更加平滑,趋近真实海底;左、右舷剖面水深标准差降低约50%,而剖面水深均值则几乎不变;对两组横摇序列进行相似性计算,初步判断横摇残差包含延时与杆晃影响。所提方法能够较准确地提取系统横摇残差,改正后海底地形起伏相对标准差明显降低,有效地削弱了运动残差对多波束测深数据的影响。

关键词:多波束测深系统;横摇残差;LM算法;剖面趋势线

中图分类号:P229

文献标志码:A

多波束测深系统(multi-beam echo sounder, MBES)已成为目前水下地形测量的主要手段之一^[1-3],它的广泛应用在使得水下地形测量变得更加精细、高效的同时^[4-5],也需要顾及更多误差对测量数据质量的影响,例如换能器安装偏差、姿态误差、声速误差、接收波束角测量误差等^[6-9]。如何减弱或消除这些误差的影响,提高多波束测量的数据质量一直是国内外专家学者研究的重点。多波束测量误差按照其性质可分为静态误差和动态误差^[10],国内外许多研究人员对静态误差进行了较为深入的研究并提出了相应的改正方法,取得了较好的效果^[11-13],而动态误差则因其影响机制复杂、影响因素多样而处理难度较大,但其对提高测量数据精度以及海底精细化探测同样影响较大,例如海底“起伏”现象^[14-16]。

多波束运动残差主要分为姿态传感器固有误差(尺度误差和时延)、横/纵摇轴与参考系不完全对准的误差以及换能器固定杆晃动误差^[14]。实际情况下,由于舷侧安装的固定支点太高或者换能器固定杆太细而不足以抗衡测量船运动引起的换能器侧向阻力影响,测量过程中不可避免地导致换能器固定杆发生晃动和轻微形变,那么

换能器姿态不再是船体的姿态,而是附加了换能器抖动。多波束作业一般采用姿态传感器与换能器分开安装的方式,因此姿态传感器测量的是测船的实时姿态,而不是实际换能器的实时姿态。运动残差的本质均是直接产生较大的横摇误差,使多波束数据姿态改正不彻底,从而间接导致数据条带边缘产生“起伏”现象。

文献[17]系统地分析了姿态测量误差对波束脚印归位的影响,通过对实验数据进行统计分析得出了姿态测量误差对波束点位坐标的影响规律。文献[18]基于多波束测量原理及船姿实验数据,综合分析了姿态对坐标参数的影响,推导了坐标计算和误差影响数学模型,结合国际海道测量组织(international hydrographic organization, IHO)测深规定计算了不同姿态测量的精度指标,并进一步针对姿态测量误差对条带拼接的影响提出了相应的解决办法。文献[19]根据声速、姿态、安装偏角等残余误差对测量数据影响的特点,提出了一种地形变化长波项与短波项相结合的残余误差综合削弱方法,并通过实验验证了该方法的有效性。文献[10,20]详细分析了姿态误差的特点以及其对波束归位的影响,利用傅

收稿日期:2020-09-14

项目资助:国家自然科学基金(41876103,41576105)。

第一作者:张永厚,硕士,主要从事海道测量数据处理理论与方法研究。zyhjtxy@163.com

通讯作者:肖付民,博士,副教授。xiaofum@163.com

里叶或小波分析工具将水深误差与地形趋势信号分离,得到反映姿态误差的水深数据,进一步判断其误差类型并进行相应改正,实测数据处理结果较为理想。文献[7]通过计算每 ping 探测的失真海底的倾斜角度,建立换能器振动角与测船横摇角的传递模型,提出了基于最小二乘拟合的多波束换能器振动估计方法,取得了一定改正效果。上述文献多是针对某单一误差源的影响进行分析与改正,然而运动残差误差源多为共同影响,而并非单一存在。因此,考虑到横摇残差是各误差源使数据发生畸变的主要原因,针对数据条带边缘呈现波浪状周期性起伏的问题,本文提出了一种基于列文伯格-马夸尔特(Levenberg-Marquardt, LM)算法的多波束横摇残差改正方法。

1 横摇残差改正模型

横摇残差对多波束测深数据的影响最为显著,是导致数据边缘出现波浪状的主要原因^[21]。与横摇相比,纵摇和升沉误差对同一 ping 的影响的量级较小,因此本文主要研究横摇残差对测量数据的影响及其改正方法。

首先,经过声线跟踪之后利用换能器安装偏差,将测深中心坐标系下的点位坐标转换至测船坐标系(vessel frame system, VFS)。然后对数据进行姿态改正,可将水深点数据转换至当地水平坐标系(local level system, LLS):

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{LLS}} = R(\gamma)R(\beta)R(\alpha) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{\text{VFS}} \quad (1)$$

式中, α 、 β 、 γ 分别为船体坐标系绕 x 轴、 y 轴和 z 轴的旋转角; $R(\alpha)$ 、 $R(\beta)$ 、 $R(\gamma)$ 为相应的旋转矩阵; $[X \ Y \ Z]^T_{\text{LLS}}$ 、 $[x \ y \ z]^T_{\text{VFS}}$ 分别表示水深点在 LLS 和 VFS 下的点位坐标向量。

在综合考虑吃水和升沉影响后,结合水位观测数据将水深归算至深度基阵面,此时水深的表达式为:

$$Z' = Z_{\text{LLS}} + h_m + h_w - h_r - h_t \quad (2)$$

式中, Z' 为改正后水深; Z_{LLS} 表示 LLS 下的水深值; h_m 为姿态传感器测量升沉; h_w 为测船吃水; h_r 为测船坐标系原点至船底的高度; h_t 为潮汐观测值。

顾及船体实际横、纵摇旋转角 α 、 β 与横、纵摇观测值 R 、 P 之间的关系^[22],将式(2)整理为:

$$Z' = -x \sin P + y \sin R + z \sqrt{\cos^2 P - \sin^2 R} + h_m + h_w - h_r - h_t \quad (3)$$

进一步可得到横摇残差 ΔR 引起的水深误差 ΔZ 为:

$$\Delta Z = y \sin(R + \Delta R) + z \sqrt{\cos^2 P - \sin^2(R + \Delta R)} - y \sin R - z \sqrt{\cos^2 P - \sin^2 R} \quad (4)$$

2 基于 LM 算法的横摇残差提取

残差改正的目的是获得一组横摇时序改正数,使利用改正横摇得到的水深计算值与真值达到最佳拟合,可以形象地认为是将海底“起伏”逐渐“熨平”的过程。结合横摇残差影响性质,采用非线性最小二乘 LM 算法进行残差的提取^[23],由于 LM 算法具有较强的鲁棒性,因此更适合解决影响因素较为复杂的非线性运动残差问题。

选取问题条带中连续 N 个 ping 的水深数据,提取每 ping 中某一固定入射角度附近若干波束水深数据作为观测值。根据文献[20]建议,本文选取同一条带左、右舷 50° 附近波束的水深数据。根据非线性最小二乘思想,建立各 ping 水深值与内插姿态采样值之间的误差方程关系式:

$$Z_{ij} = F\left(\sum_{k=1}^s a_{jk} r_{jk}, \theta_{ij}, t_{ij}\right) \quad (5)$$

式中, j 为采样 ping 的序号, $j=1,2,3,\dots,N$; i 为 ping 内的波束点序号, $i=1,2,3,\dots,s+1$; k 为内插姿态采样的序号, $k=1,2,3,\dots,s$; r_{jk} 为第 j 号 ping 用于姿态内插的第 k 个横摇采样值; a_{jk} 为内插时 r_{jk} 的权值,本文采用时域内反距离内插法,即基于时间间隔的反距离加权; θ_{ij} 、 t_{ij} 、 Z_{ij} 分别为第 j 号 ping 中选取的第 i 个波束点的回波角度、回波时间和水深值; F 表示水深归算函数。

假设测量回波角度和时间无误差,根据 LM 算法的线性化原则,将式(5)进行泰勒级数展开并取至一阶近似可得:

$$\tilde{Z}_{ij} = F\left(\sum_{k=1}^s a_{jk} \tilde{r}_{jk}, \theta_{ij}, t_{ij}\right) = F\left(\sum_{k=1}^s a_{jk} r_{jk}^0, \theta_{ij}, t_{ij}\right) + \sum_{k=1}^s A_{ijk} \hat{r}_{jk} \quad (6)$$

式中, \tilde{Z}_{ij} 为波束水深真值; \tilde{r}_{jk} 为横摇真值; r_{jk}^0 为横摇观测值; \hat{r}_{jk} 为横摇残差; A_{ijk} 为水深对横摇的偏导,即 \hat{r}_{jk} 的系数。结合式(3),横摇残差系数可表示为:

$$A_{ijk} = \left(\frac{\partial F}{\partial r_{jk}^0} \right) = a_{jk} y_{ij} \cos r_j^0 - \frac{a_{jk} z_{ij} \sin 2r_j^0}{2\sqrt{\cos^2 p_j - \sin^2 r_j^0}} \quad (7)$$

式中, y_{ij} 、 z_{ij} 分别表示第 j 号 ping 中选取的第 i 个波束点在 VFS 下的横坐标值和水深值; p_j 表示第 j 号 ping 的纵摇观测值; r_j^0 为第 j 号 ping 的横摇观测值。由此, 水深误差 V_{ij} 可表示为:

$$V_{ij} = \sum_{k=1}^s A_{ijk} \hat{r}_{jk} - [Z_{ij}^0 - F(\sum_{k=1}^s a_{jk} r_{jk}^0, \theta_{ij}, t_{ij})] \quad (8)$$

多波束测线一般平行于等深线方向布设, 因此沿测线方向水深变化相对稳定, 并且每次选取的解算 ping 时长一般较短, 从而可将海底描述为线性函数, 即利用加权最小二乘法对沿航迹向左、右舷 50° 附近波束测量水深进行线性拟合, 构建左、右舷两侧 50° 水深剖面趋势线。将两侧剖面中同一 ping 的测量水深与趋势线差值之和视为由横摇残差造成的剖面内该 ping 总水深误差, 基于横摇残差对同一 ping 左、右舷相同波束入射角处波束测量水深影响大小相同、方向相反的特点, 对左、右舷水深剖面趋势线进行改正, 使同一 ping 在左、右舷剖面中的测量水深与改正后趋势线水深之差大小相同、符号相反, 且均为总水深误差的 $1/2$ 。此时, 改正后左、右舷剖面趋势线即可认为是理想海底, 将剖面趋势线中相应 ping 的水深值作为误差方程中常数项的近似值 Z_{ij}^0 。

令 $L_{ij} = [Z_{ij}^0 - F(\sum_{k=1}^s a_{jk} r_{jk}^0, \theta_{ij}, t_{ij})]$, 结合本文参数定义, 将式(8)展开为:

$$\begin{bmatrix} V_{1j} \\ V_{2j} \\ \vdots \\ V_{(s+1)j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{1j1} & A_{1j2} & \cdots & A_{1js} \\ A_{2j1} & A_{2j2} & \cdots & A_{2js} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{(s+1)j1} & A_{(s+1)j2} & \cdots & A_{(s+1)js} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{r}_{j1} \\ \hat{r}_{j2} \\ \vdots \\ \hat{r}_{js} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_{1j} \\ L_{2j} \\ \vdots \\ L_{(s+1)j} \end{bmatrix} \quad (9)$$

此时, 第 j 号采样 ping 中选取的 $(s+1)$ 个波束点的水深误差方程组系数阵 A_j 为一个 $(s+1) \times s$ 的雅可比矩阵, 该方程系数为 s 个内插横摇采样值。根据最小二乘原理, 求解横摇残差矩阵 \hat{r}_j :

$$\hat{r}_j = (A_j^T P A_j)^{-1} A_j^T P L_j \quad (10)$$

式中, L_j 表示第 j 号 ping 误差方程的常数项矩阵; 权阵 P 要根据系数阵中所选波束入射角度余弦值

大小而定, 权大小由中央向边缘依次降低。研究发现, 式(10)中法方程的系数方阵 $A_j^T P A_j$ 接近奇异值成为病态矩阵。LM 算法采用岭估计^[23-24]的方法来改善方阵的病态性, 即在系数方阵的主对角线上加上一个常数 k :

$$\hat{r}_j = (A_j^T P A_j + kE)^{-1} A_j^T P L_j \quad (11)$$

选用不同的 k 值可以得到不同的岭估计值, 当 k 取零时, 即是最小二乘估计。

3 实例计算与分析

实验数据取自某海域外业实测数据, 采用的是 R2sonic 2024 浅水多波束测量系统, 水深约为 23 m。利用 CARIS 软件对水深数据进行处理时发现条带边缘出现了明显的规律性“起伏”, 幅度约为 1 m, 初步判定是运动残差导致。为验证本文方法有效性, 设计了如下实验。

选取问题条带中长度 200 ping 的数据段, 提取该数据段内的姿态信息、水深信息、定位信息、声速信息、潮汐信息等相关数据内容。此次测量所采用的多波束测深系统的波束采样周期 T_{ping} 为 0.11 s, 姿态采样周期 t_{pos} 为 0.02 s。利用上述剖面趋势线的构建思想, 对左、右舷 50° 波束水深剖面进行计算, 将剖面趋势线中相应 ping 的水深值作为误差方程中常数项的近似值。权阵 P 的确定原则为利用入射角余弦值作为权。在解算法方程时发现其系数方阵接近奇异值, 利用岭估计法改善其病态性, 最终确定的 k 值为 0.01。

图 1(a)、1(b) 为使用相同颜色范围进行 3 维显示的改正前后海底地形, 图 2 为改正前后左、右舷 50° 波束水深剖面比对图, 图 3 为改正前后姿态横摇对比图。

从图 1(a)、1(b) 中可以发现, 改正前边缘波束较为明显的规律性起伏问题在改正后得到很好的改善, 沿航迹方向地形过渡更加平滑, 更为接近真实海底变化。图 2 中剖面比对数据见表 1。由表 1 可以看出, 左、右舷剖面水深变化范围明显缩小, 右舷剖面水深变化区间由改正前的 0.9 m 降至改正后 0.5 m, 左舷则由 0.96 m 降至 0.44 m。同时剖面水深标准差也明显降低, 左舷剖面标准差降低约 62%, 右舷标准差降低约 57%, 左、右舷起伏地形均得到一定程度的校正。改正前后左、右舷剖面水深均值几乎不变, 这也证明了本文方法的可行性, 即在对“起伏”进行抑制的同时也保证了海底的基本走势。

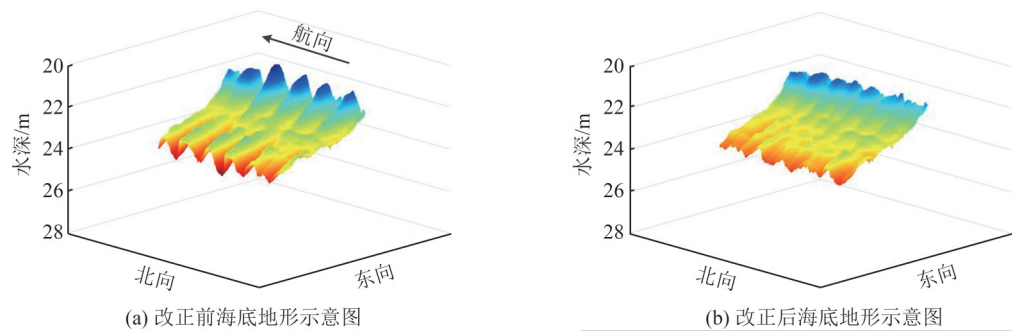


图 1 改正前后海底地形

Fig.1 Submarine Topography of Before and After Correction

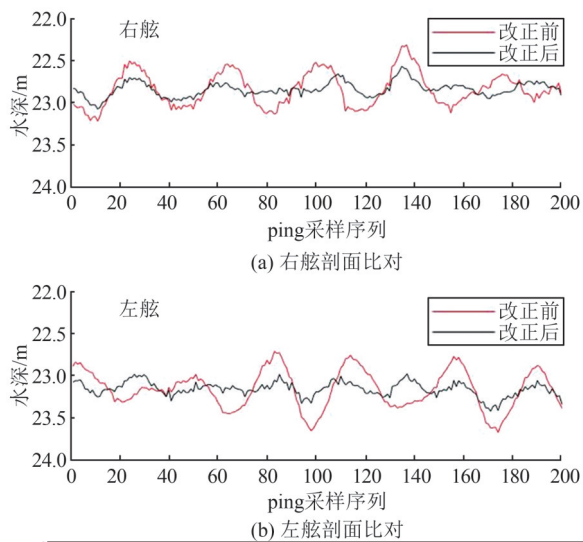


图 2 改正前后左、右舷水深剖面比对

Fig.2 Comparison of Port and Starboard Depth Before and After Correction

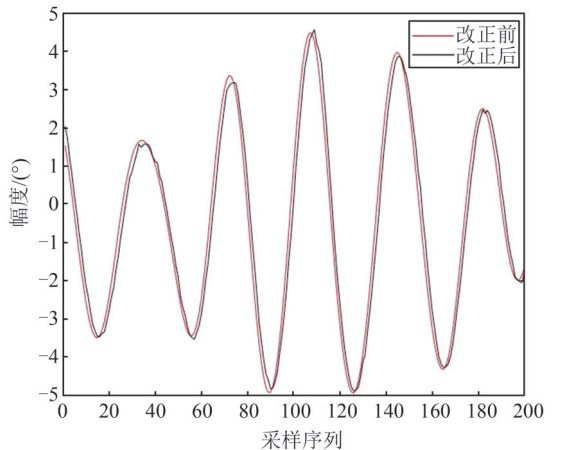


图 3 改正前后姿态横摇

Fig.3 Roll of Before and After Correction

从图 3 中可以发现,两者横摇序列具有较强的相关性。利用相似性相关概念对两组横摇序列进行计算,发现当延时为 116.7 ms 时相关系数最大,为 99.95%,杆晃残差变化幅度的区间范围为 $-0.2^{\circ}\sim 0.2^{\circ}$,可初步判断此时的横摇残差包含延时影响与杆晃影响。

表 1 水深剖面比对数据/m

Tab.1 Contrastive Data of Water Depth Profile/m

剖面	类型	最大值	最小值	平均值	中误差
右舷 50°	改正前	23.22	22.32	22.84	0.199
	改正后	23.07	22.57	22.84	0.085
左舷 50°	改正前	23.67	22.71	23.16	0.224
	改正后	23.42	22.98	23.16	0.084

4 结 语

本文推导了多波束横摇残差与水深误差的函数关系式,构建了横摇残差改正模型,提出了一种采用非线性最小二乘 LM 算法并结合剖面趋势线构建思想的横摇残差提取方法,该方法充分顾及了海底基本走势,综合考虑了横摇残差对水深的影响,具有较高的理论可行性。利用提取的横摇残差对畸变海底进行改正,实例验证结果表明,本文方法能够较准确地提取横摇残差,在保证海底基本走势的同时,可有效地对测量条带左、右舷边缘呈现的规律性“起伏”现象进行抑制,左、右舷水深剖面相对起伏标准差均降低约 50%。本文模型推导严密,方法切实可行,计算过程简捷,具有实际的工程应用价值。

参 考 文 献

[1] Zhao Jianhu, Liu Jingnan. Multibeam Bathymetric Surveying and Image 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)

[2] Wu Ziyin, Yang Fanlin, Luo Xiaowen, et al. High Resolution Submarine Geomorphology [M]. Beijing: Science Press, 2017 (吴自银,阳凡林,罗孝文,等. 高分辨率海底地形地貌—探测处理理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2017)

[3] Liu Yang, Wu Ziyin, Zhao Dineng, ea al. The MF Method for Multi-source Bathymetric Data Fusion

- and Ocean Bathymetric Model Construction [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(9):1171-1181 (刘洋, 吴自银, 赵获能, 等. MF多源测深数据融合方法及大洋水深模型的构建[J]. 测绘学报, 2019, 48(9):1171-1181)
- [4] Zhao Dineng, Wu Ziyin, Zhou Jieqiong, et al. A New Method of Automatic SVP Optimization Based on MOV Algorithm [J]. *Marine Geodesy*, 2015, 38: 225-240
- [5] Wang Mingwei, Wu Ziyin, Yang Fanlin, et al. Multifeature Extraction and Seafloor Classification Combining LiDAR and MBES Data Around Yuanzhi Island in the South China Sea [J]. *Sensors*, 2018, 18(11):3828
- [6] Huang Xianyuan. Research on Method Multibeam Echosounding Data Quality Control [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2011 (黄贤源. 多波束测深数据质量控制方法研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2011)
- [7] Sun Wenchuan. Research on the Major Error and Quality Control of Submarine Topography Survey [D]. Dalian: Dalian Naval Academy, 2015 (孙文川. 海底地形测量主要误差分析与控制[D]. 大连: 大连舰艇学院, 2015)
- [8] Zhu Xiaochen. Research on the Data Processing Critical Modeling and Application on Multi-beam Echo Sounding [D]. Dalian: Dalian Naval Academy, 2011 (朱小辰. 多波束测深数据处理关键模型及应用研究[D]. 大连: 大连舰艇学院, 2011)
- [9] Kammerer E. New Method for the Removal of Refraction Artifacts in Multi-beam Echosounder Systems [D]. Fredericton: The University of New Brunswick, 2000
- [10] Yang Fanlin, Li Jiabiao, Wu Ziyin, et al. The Methods of Removing Instantaneous Attitude Errors for Multi-beam Bathymetry Data [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2009, 38(5): 450-456 (阳凡林, 李家彪, 吴自银, 等. 多波束测深瞬时姿态误差的改正方法[J]. 测绘学报, 2009, 38(5):450-456)
- [11] Li Tie, Zhou Fengnian, Zhao Jianhu. Overall Calibration Method of Multi-beam Echo Sounder Installation Biased Based on Terrain Feature Matching [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(4):512-519 (李铁, 周丰年, 赵建虎. 多波束系统安装偏差整体校准的地形特征匹配方法[J]. 测绘学报, 2019, 48(4):512-519)
- [12] Zhang Zhiwei, Bao Jingyang, Xiao Fumin, et al. Inversion of Velocity Profile in Multibeam Survey Based on Simulated Annealing Algorithm [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(8): 1234-1241 (张志伟, 暴景阳, 肖付民, 等. 利用模拟退火算法反演多波束测量声速剖面[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(8): 1234-1241)
- [13] Lu Xiuping, Huang Chenhu, Huang Motao, et al. Tidal Correction in Coastal Surveying Using Multi-beam Bathymetric Sounding System [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(9):922-925 (陆秀平, 黄辰虎, 黄漠涛, 等. 浅水多波束测深潮汐改正技术研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(9):922-925)
- [14] Clarke J E H. Dynamic Motion Residuals in Swath Sonar Data: Ironing out the Creases [J]. *International Hydrographic Review*, 2003, 4(1):6-23
- [15] Wu Ziyin, Jin Xianglong, Zheng Yulong, et al. Integrated Error Correction of Multi-beam Marginal Sounding Beam [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 27(4):88-94 (吴自银, 金翔龙, 郑玉龙, 等. 多波束测深边缘波束误差的综合校正[J]. 海洋学报, 2005, 27(4):88-94)
- [16] Shi Qingfa. Analysis and Evaluation of the Depth Accuracy of Edge Beam in Multi-beam Sounding [J]. *Hydrographic Survey and Charting*, 2018, 38(6): 25-28 (史青法. 多波束测量边缘波束测深精度分析与评估[J]. 海洋测绘, 2018, 38(6): 25-28)
- [17] Liu Yi, Zhou Xinghua, Shi Yongzhong, et al. Influence Analysis of Multibeam Bathymetric Data on Attitude Measurement Errors [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2015, 24(9): 31-33 (刘毅, 周兴华, 史永忠, 等. 姿态测量误差对多波束测深数据影响分析[J]. 测绘工程, 2015, 24(9):31-33)
- [18] Zhao Jianhu, Liu Jingnan, Zhang Hongmei. The Analysis of Vessel Attitude and the Effect for Multibeam Echo Sounding [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2001, 26(2): 144-149 (赵建虎, 刘经南, 张红梅. 船姿分析及其对多波束测量的影响[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2001(2):144-149)
- [19] Zhao Jianhu, Zhang Hongmei, Yan Jun, et al. Weakening Influence of Residual Error for MBES Sounding [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(10): 1184-1187 (赵建虎, 张红梅, 严俊, 等. 削弱残余误差对多波束测深综合影响的方法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(10): 1184-1187)
- [20] Yang Fanlin, Lu Xiushan, Li Jiabiao, et al. Correction of Imperfect Alignment of MRU for Multi-beam Bathymetry Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(7):816-820 (阳凡林, 卢秀山, 李家彪, 等. 多波束勘测运动传感

- 器偏移的改正方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(7): 816-820
- [21] Demkowicz J, Bikonis K, Stepnowski A, et al. Geocorrection and Filtering of 3D Bottom Images from Multibeam Sonar Records[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2003, 114(4): 2346
- [22] He Linbang, Zhao Jianhu, Zhang Hongmei, et al. A Precise Multi-beam Sound Ray Tracking Method Taking into Account the Attitude Angle[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2015, 36(1): 46-50 (何林帮, 赵建虎, 张红梅, 等. 顾及姿态角的多波束声线精确跟踪方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(1): 46-50)
- [23] Cui Xizhang. Generalized Surveying Adjustment [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2009 (崔希璋. 广义测量平差[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2009)
- [24] Ma Kai, Xu Weiming, Xu Jian, et al. A Method for Inversing Velocity Profiles and Correcting Seafloor Topography Distortion in Multi-beam Systems[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(4): 525-531 (马凯, 徐卫明, 许坚, 等. 一种多波束声速剖面反演与海底地形校正技术[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(4): 525-531)

A Correction Method for Multi-beam Roll Residual Based on LM Algorithm

ZHANG Yonghou^{1,2} XIAO Fumin¹ JIN Shaohua¹ BIAN Gang¹ TANG Yulin¹

¹ Department of Military Oceanography and Hydrography and Cartography, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China

² China Navigation Publications Press, Tianjin 300450, China

Abstract: Objectives: To solve the problem of periodic undulations like “wave” at the edge of data strip caused by roll residual due to motion residual of multi-beam echo sounder, a correction method for multi-beam roll residual is proposed on the basis of LM(Levenberg-Marquardt) algorithm. **Methods:** By establishing the functional relation between the depth of water and the roll residual, this method uses the non-linear least square LM algorithm and combines the idea of profile trend line construction to extract the roll residual, and realizes the correction of the submarine topography. This method fully takes into account the basic trend of the seabed and the influence of rolling residual on the water depth, which has high theoretical feasibility. **Results:** The results show that the transition of submarine topography was much smoother after correction, and closer to the real seabed; the STD(standard deviation) of port and starboard depth profiles decreased by more than 50%, while the mean of the depth profiles almost unchanged; the similarity of the two groups of roll was calculated and the roll residual was preliminarily judged to include delay of roll and shaking of the pole. **Conclusions:** This method can extract the systemic roll residual accurately, and the STD of submarine topographic undulations is significantly reduced after the correction, and the effect of motion residual on multi-beam data is effectively weakened.

Key words: multi-beam echo sounder; roll residual; Levenberg-Marquardt algorithm; profile trend line

First author: ZHANG Yonghou, master, specializes in the theories and methods of hydrographic data processing. E-mail: zyhtxy@163.com

Corresponding author: XIAO Fumin, PhD, associate professor. E-mail: xiaofum@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China(41876103, 41576105).

引文格式: ZHANG Yonghou, XIAO Fumin, JIN Shaohua, et al. A Correction Method for Multi-beam Roll Residual Based on LM Algorithm [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(7): 1140-1145. DOI: 10.13203/j.whugis20200103 (张永厚, 肖付民, 金绍华, 等. 一种基于 LM 算法的多波束横摇残差改正方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(7): 1140-1145. DOI: 10.13203/j.whugis20200103)