

多波束勘测运动传感器偏移的改正方法

阳凡林² 卢秀山^{1,2} 李家彪³ 郭金运^{1,2}

(1 海岛(礁)测绘技术国家测绘局重点实验室,青岛市前湾港路 579 号,266510)
(2 山东科技大学测绘科学与工程学院,青岛市前湾港路 579 号,266510)
(3 国家海洋局海底科学重点实验室,杭州市保俶北路 36 号 310012)

摘 要:系统分析多波束勘测时运动传感器偏移造成的姿态误差的特点,以及对波束归位的影响,根据水深误差受横摇误差影响更大、运动传感器偏移带来的横摇误差主要受纵摇决定的规律,借助三维光照水深图、傅立叶或小波分析工具、纵摇与水深误差关系图判断是否存在运动传感器偏移,然后通过消除纵摇与水深误差的线性关系取得运动传感器的偏角,最后对测区所有波束重新归位,完成运动传感器偏移改正,对浅水多波束勘测质量的提高有一定的意义。

关键词:多波束声纳;运动传感器;偏移;误差

中图法分类号:P229.1

多波束测深误差来源较广,像换能器安装、静态吃水、潮汐改正和声线折射等误差较大,已引起广泛关注,并已得到有效处理^[1-7],一些算法已用于随机软件或商业软件中。而动态运动残差(dynamic motion residuals)^[8],像瞬时姿态测量误差、运动传感器(MRU)偏移带来的误差、表层声速误差等等,因为数值较小,很少引起注意,也基本未在商业软件中得到处理。尽管多数情况下其在 1%水深精度范围内,但仍会影响海底微地形表达、微地貌分析和成图美观,而且各种因素累积效应不应忽视,特别是横摇残差的影响,在海况不好时容易引起测深精度超限。Clarke 对此进行了较多的分析,得到了一些较好的结果^[8]。Demkowicz 等根据模拟数据分析了横摇误差的影响,并采用 Kalman 滤波算法来移除该影响^[9],在有些情况下可达到一定效果。本文具体分析运动传感器偏移带来的误差及改正方法。如果运动传感器与换能器安装在一起,且其纵轴与船坐标纵轴平行,可保证两者的姿态一致。但大多数情况下,它们是分离的,运动传感器测量的姿态并不完全与换能器姿态一致,它们之间的偏差称之为运动传感器偏移误差,包含运动传感器纵轴与船

坐标纵轴方向不一致带来的姿态误差,运动传感器与换能器分离,由前者引起的姿态误差带来的上下升沉误差。

1 运动传感器偏移的影响及特性

假设换能器与船坐标系已对齐(通过 Patch test),即换能器的指向与船坐标系纵轴 X 方向平行,测船的纵横摇等同于换能器的纵横摇,运动传感器与换能器分开安装,其中心位于船坐标系的原点,但纵轴指向沿船坐标系 X 轴旋转了 α 角,如图 1 所示。定义姿态符号为:船左舷上升时,横摇角度为正;船艏抬升时,纵摇角度为正;换能器垂直向上运动时,上下升沉的量值为正;设艏偏东为正。图 2 显示了测船仅存在纵摇 p 时,运动传感器偏移引入的姿态测量误差。由于运动传感器纵轴与船坐标系 X 轴指向不一致,当船横摇为 0、纵摇不为 0 时,运动传感器的横摇测量值并不为 0。图中长虚线代表水平面(WHTODC), O 为船坐标系原点,船艏向为 X 轴,右舷方向为 Y 轴, Z 轴垂直于 XY 平面向下,表示水深方向, XYZ 轴构成右手坐标系。 $OMEF$ 代表的是运动传感器

参考面,与 XOY 平面是同一平面,但运动传感器的参考坐标系纵轴指向(OM)与 X 轴相差 α 角。T、S、D 分别为 L、M、E 点在水平面上的投影点, $\angle ECD = p$, $\angle COE = \alpha$ 。如图 2 所示,当测船仅受纵摇 p 的影响时,运动传感器将测量得到纵摇 p' ($\angle MOS$)和横摇 r' ($\angle EOD$)。根据图示几何关系可得出 p 与测量的横摇 r' 和纵摇 p' 关系为:

$$\begin{cases} \sin r' = \sin \alpha \cdot \sin p \\ \sin p' = \cos \alpha \cdot \sin p \end{cases} \quad (1)$$

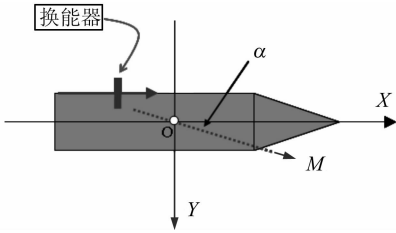


图 1 运动传感器的偏移

Fig. 1 Imperfect Alignment of MRU

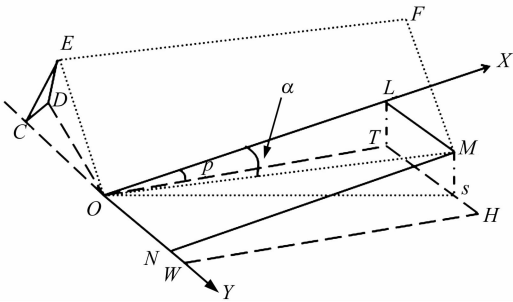


图 2 测船仅存在纵摇时 MRU 偏移对横摇和纵摇测量值的影响

Fig. 2 Measured Roll and Pitch Are Biased by Unaligned MRU when the Pitch of Vessel Only Exists

同理可得船仅存在横摇 r 时, r 与测量的横摇 r' 和纵摇 p' 关系为:

$$\begin{cases} \sin r' = \cos \alpha \cdot \sin r \\ \sin p' = -\sin \alpha \cdot \sin r \end{cases} \quad (2)$$

由式(1)和式(2)得,当同时存在横摇 r 和纵摇 p 时,它们与测量的横摇 r' 和纵摇 p' 关系为:

$$\begin{cases} \sin r' = \sin \alpha \cdot \sin p + \cos \alpha \cdot \sin r \\ \sin p' = \cos \alpha \cdot \sin p - \sin \alpha \cdot \sin r \end{cases} \quad (3)$$

从式(3)可看出,不管是测量的横摇 r' 还是纵摇 p' ,都与真实的横摇 r 和纵摇 p 相关。运动传感器偏移引起的姿态误差受横摇和纵摇的综合影响,在 α 不变时,横摇误差即 r' 与 r 差值主要受 p 决定,纵摇误差即 p' 与 p 差值主要受 r 决定。根据这一特点,可有效区分类似的水深误差是受运动传感器尺度误差、时延误差还是偏移误差引起。对水深影响更大的还是横摇误差,假设 α 取 3° , p

取 5° , r 取 8° , 则 r' 为 8.25° , 与真实值差 3.2% , 对边缘波束来说已超出 1% 的水深精度范围; p' 为 4.57° , 与真实值差 -8.5% , 0.5° 的纵摇误差即使在沿 30° 斜坡海底勘测时引起的水深误差也不到 0.5% 水深,而且这种情况属于较极端情况,故我们更关注运动传感器偏移造成的横摇误差的影响。

大部分情况下,运动传感器位置在测船龙骨线上,换能器安置在船侧,这种情况下换能器和起伏传感器不重合,换能器的垂直变化和起伏与传感器的测量值是不同的,它们相差一个由纵摇和横摇引起的感生起伏(induced heave)。因此,换能器总的起伏值 δ_h 由传感器测量的起伏 δ_m 和感生起伏 δ_i 两部分组成:

$$\delta_h = \delta_m + \delta_i \quad (4)$$

感生起伏误差和横摇、纵摇及换能器与垂直参考单元之间偏移量的测量误差有关。根据艏向、横摇和纵摇三个欧拉角表示的旋转矩阵,可将瞬时的船坐标系旋转到当地坐标系,从而将在船坐标系中表示的 dz 表示为当地水平坐标系下的 δ_i ^[8,10]:

$$\delta_i = dx \sin p - dy \sin r \cos p + dz(1 - \cos r \cos p) \quad (5)$$

假设运动传感器偏移产生的 r 、 p 误差均为 0.5° , dx 、 dy 、 dz 仍为如上取值,则上下升降的误差为 8 cm ,该值比较小,说明姿态误差对上下升降的影响不太大,在较深水中不需考虑此影响,然而当 dx 、 dy 、 dz 继续增大,水很浅时(16 m 内,水深误差将超过 0.5%),应考虑其影响。

在假定水层只有一层、忽略声线折射的影响前提下,将船坐标系围绕横摇、纵摇、运动传感器偏移角旋转,波束的归位可表示为:

$$\begin{bmatrix} y \\ x \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{R}_3(\alpha) \mathbf{R}_2(-p) \mathbf{R}_1(r) \cdot \begin{bmatrix} L \cdot \sin \theta \\ 0 \\ L \cdot \cos \theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, $\mathbf{R}_1(r)$ 、 $\mathbf{R}_2(-p)$ 、 $\mathbf{R}_3(\alpha)$ 为旋转矩阵; L 代表斜距; θ 为波束角。将式(6)展开为:

$$(x \ y \ z)^T = L \cdot$$

$$\begin{bmatrix} \sin \theta \cdot (\cos r \cdot \sin \alpha + \sin r \cdot \sin p \cdot \cos \alpha) - \cos \theta \cdot (\sin r \cdot \sin \alpha - \cos r \cdot \sin p \cdot \cos \alpha) \\ \sin \theta \cdot (\cos r \cdot \cos \alpha - \sin r \cdot \sin p \cdot \sin \alpha) - \cos \theta \cdot (\sin r \cdot \cos \alpha + \cos r \cdot \sin p \cdot \sin \alpha) \\ \sin \theta \cdot \sin r \cdot \cos p + \cos \theta \cdot \cos r \cdot \cos p \end{bmatrix} \quad (7)$$

换能器测量的水深须对瞬时上下起伏进行改正,为:

$$z' = z - \delta_h \quad (8)$$

式中, z' 为改正后的水深, 将式(5)和式(7)代入式(8), 得:

$$z' = L \cdot \cos p \cdot \cos(\theta - r) - \delta_m - dx \sin p + \text{dysin} r \cos p - dz(1 - \cos r \cos p) \tag{9}$$

联合式(3)、式(7)和式(9), 即可得到运动传感器偏移引起的水深误差 Δz :

$$\begin{aligned} \Delta z = & L \cdot \cos p' \cdot \cos(\theta - r') - dx \sin p' + \\ & \text{dysin} r' \cos p' - dz(1 - \cos r' \cos p') - \\ & L \cdot \cos p \cdot \cos(\theta - r) + dx \sin p - \\ & \text{dysin} r \cos p + dz(1 - \cos r \cos p) \end{aligned} \tag{10}$$

当勘测水深存在因运动传感器偏移引起的姿态误差时, 在三维光照地形图上, 沿航向将出现明显的系统周期性的起伏, 其中引起的横摇误差对水深的影响是越接近边缘波束越明显, 而引起的纵摇和上下升沉误差的影响类似, 对同一 ping 波束的水深起伏是相同的。

2 运动传感器偏移的改正方法

2.1 水深误差与地形趋势信号的分离

为确定是否存在运动传感器偏移误差, 首先必须将地形趋势信号从观测数据中分离, 得到反映运动传感器偏移误差的水深数据。设原始信号采样的时间长度为 T (对应条带测量时间段), 采样个数为 N (对应 ping 数), 采样频率为 f_s (由每 ping 周期确定), 则原始采样序列对应的最高频率为:

$$\omega = \frac{N}{2T} = \frac{f_s}{2} \tag{11}$$

假设姿态的最低频率为 f_a , 地形趋势信号的最高频率为 f_t , 则小波剖分的层数 n 为:

$$f_t < \omega/2^n < f_a \tag{12}$$

根据傅立叶变换后的频谱图, 结合姿态信号大致的周期(测船的姿态变化主要是由波浪引起的, 通常波浪的周期约为几秒到十几秒, 最大可达几十秒), 可以识别姿态误差所占的频段, 从而根据式(12)计算小波剖分的层数。对相同波束号不同时序的水深数据进行小波分解, 将高频部分重构就可以有效地提取出运动传感器偏移引起的水深误差和低频部分重构的数据。实际情况下, 不可能完全分离水深误差和部分高频地形细节, 但对后者, 因为数值小, 不影响结果的分析。

2.2 运动传感器偏移的确定

对于多波束水深数据, 需要判断是否有姿态误差存在, 以及姿态误差是属于本身设备误差还是偏移放置引起的误差。观察三维光照地形图,

如发现有与航向垂直的周期性起伏, 说明有姿态误差存在, 然后结合同一条带相同波束号的时序信号傅立叶谱特征来进一步分析。由于横摇误差对水深影响更显著, 可以分析横摇误差来判断姿态误差的来源。因为多波束内部波束对横摇误差不敏感, 最外部波束偶然误差和噪声概率较大, 可取中间偏外部的波束进行分析。在合理的姿态信号周期数值范围内, 记下傅立叶谱峰值对应的频率, 如果姿态误差是运动传感器固有误差(尺度和时延)引起的, 则该频率对应的周期与横摇周期基本一致; 如果是运动传感器偏移引起的, 则该周期与纵摇周期基本一致。记录该数值可作为小波剖分层数的依据。

如果还不能准确判断, 可根据横摇、纵摇与水深误差的关系进一步佐证。横摇误差引起水深误差与水深比为:

$$E_v/Z = 1 - \cos \delta_r + \tan \theta \cdot \sin \delta_r \tag{13}$$

式中, E_v 为水深误差; θ 为波束角; δ_r 为横摇误差; Z 表示测量的水深。由运动传感器偏移产生的 δ_r 通常小于 0.5° , 则式(13)右边前两项可忽略不计, 而 $\tan \theta$ 为常量, 故水深误差(%)基本上与 $\sin \delta_r$ 线性相关。通常偏角 α 较小, 一般不超过 3° , 则 $\cos \alpha$ 非常接近 1, 在这种情况下, 由式(3)有:

$$\sin r' - \sin r = \sin \alpha \cdot \sin p \tag{14}$$

在 $\delta_r = r' - r$ 很小的情况下, 由式(14), δ_r 可表示为:

$$\delta_r = \sin r' - \sin r = \sin \alpha \cdot \sin p \tag{15}$$

根据式(13)和式(15), 在 $\sin p$ 与 $\sin p'$ 差别较小时, 可得水深误差与 $\sin p'$ 存在明显线性关系, 即

$$E_v/Z = k \cdot \sin p' \tag{16}$$

式中, k 为比例系数。

图 3 显示的是模拟中间偏外部的部分波束数据的投影图, 表示水深误差与 $\sin p'$ 、 $\sin r'$ 的关系, 运动传感器偏角 α 为 2° , dx 为 6 m, dy 为 -3 m,

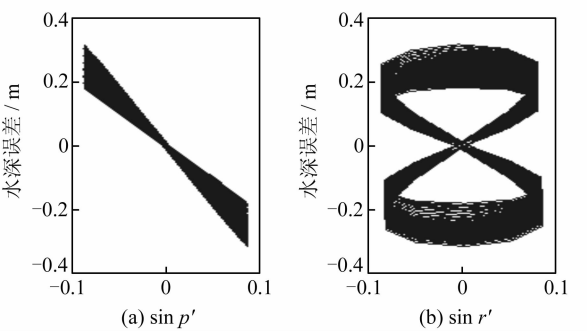


图 3 $\sin p'$ 、 $\sin r'$ 与水深误差投影图
Fig. 3 Relation of $\sin p'$, $\sin r'$ and Depth Errors Calculated

dz 为 4 m, r 周期为 10 s, 振幅 5° , p 周期为 20 s, 振幅 5° 。可见, 水深误差与 $\sin p'$ 有明显的线性关系, 而与 $\sin r'$ 没有明显的线性关系。

2.3 波束归位的改正

- 1) 对于一段连续时间段(运动传感器未移动)的勘测区域, 在先进行异常数据去除、换能器安装误差、声线折射、潮汐等改正后, 如存在姿态误差(通过三维光照地形图), 选择一段平坦区, 借助傅立叶分析判断水深误差周期, 再利用傅立叶或小波分析工具移去地形趋势信号, 得到水深误差。根据水深误差与 $\sin p'$ 是否线性相关判断是否存在运动传感器偏移。
- 2) 如存在运动传感器偏移, 逐步调整运动传感器偏角 α , 根据式(7)和(9)重新计算波束位置, 观察水深误差与 $\sin p'$ 的投影图的变化, 当它们的线性关系消失时, 记下此时的 α 值, 即为运动传感器实际偏角。为了计算简便, 可根据原有波束位置, 采用简单等效声速剖面反算波束角和旅行时。
- 3) 根据计算的 α 值对测区所有波束重新归位计算, 得到消除运动传感器偏移误差后的水深数据。

3 实例分析

实测数据来源于 2002 年在东海进行的我国近海海洋环境调查与评价专项的海底地形调查, 采用的是 ELAC 公司的 Seabeam 1180/1050 双探头多波束声纳, 该系统每 ping 有 126 个波束。本文选取 10 个相邻条带中的一段进行说明, 该部

分数据勘测时间是 9 月底到 10 月初。图 4(a)显示的是原始数据的三维光照地形图, 光照方向为正前方, 高度角 30° , 横坐标为侧向距离, 纵坐标为航向距离, 单位为 m, 每条带覆盖长度约 15.6 km, 宽度约 500 m, 水深约 75 m。图中可明显发现存在着与航向垂直的水深起伏系统误差。为辨别是何种因素引起的姿态误差, 挑取了左边第 4 条带最上面部分数据进行说明(图 4(a)中白色方框内部分), 该部分水深起伏误差明显。首先利用小波分析去除地形趋势信号, 得到基本不受地形影响的水深误差, 通过横摇正弦-水深误差、纵摇正弦-水深误差二维投影图(图 5)加以验证。图 5(a)、5(b)是水深误差与横摇、纵摇正弦的关系图, 可明显发现两者线性关系的存在(白色虚线), 说明勘测数据既含运动传感器偏移误差, 还含尺度误差。图 6 坐标轴含义与图 5 一致, 图 6(a)为调整尺度 0.13 后的两者关系投影, 图 6(b)为调整运动传感器偏角 2.1° 及进行感生起伏改正后的投影图, 此时横摇正弦-水深误差、纵摇正弦-水深误差的线性关系已消失。

对比图 5(a)、5(b)和图 6(a)、6(b), 可见已较大程度地减小了水深误差, 大约减少了 0.3 m, 改正的结果达到了 1% 的水深精度要求。对比图 4 中白框放大部分可见, 经过运动传感器尺度误差改正后, 已较明显地减小了水深误差, 但仍有较小的与航向垂直的水深起伏, 再经过运动传感器偏移误差改正, 已很好地消除了其带来的姿态误差的影响, 使海底地形更为合理。

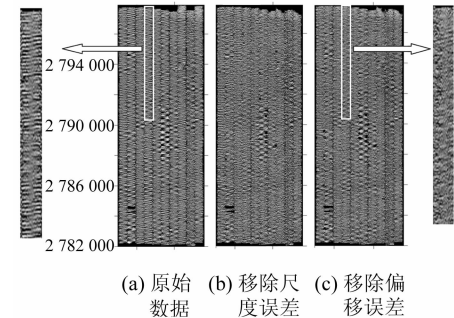


图 4 水深数据三维光照地形图
Fig. 4 3D Sun-illuminated Terrain of Seafloor

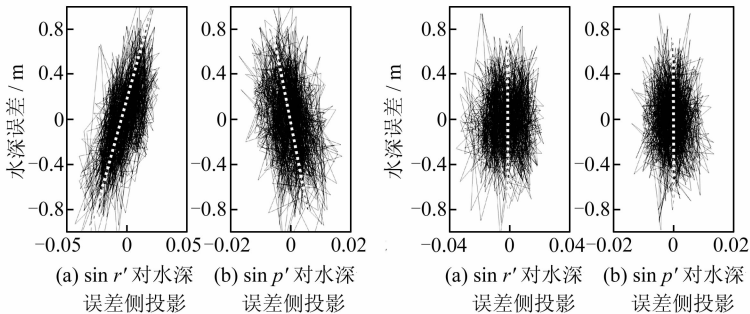


图 5 横摇、纵摇正弦与原始水深数据关系
Fig. 5 Relation of Sine Roll, Pitch and Raw Depth Errors

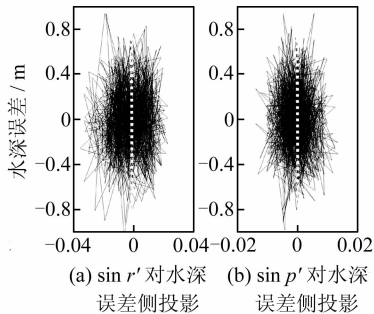


图 6 横摇、纵摇正弦与改正后水深数据关系
Fig. 6 Relation of Sine Roll, Pitch and Corrections of Depth Errors

4 结论与建议

- 1) 在误差改正前, 需去除地形趋势信号的影响,

否则既难正确判断姿态误差属于何种类型, 也无法进行后续的运动传感器偏角的确定。一些较大的误差可先分别进行处理。

- 2) 横摇误差对水深的影响最为明显, 也是最

容易造成边缘波束水深误差超限的一个因素。在偏角不变时,运动传感器偏移引起的横摇误差主要受纵摇决定。

3) 根据纵摇的正弦函数和水深误差的线性相关程度可逐步逼近真实的偏角,从而对整个测区重新进行波束归位。

4) 由运动传感器偏移引起的横摇、纵摇误差带来的感生起伏误差通常较小,一般不用考虑。但在水很浅、换能器与运动传感器偏距较大时应考虑它的影响,加以改正。

参 考 文 献

[1] Hammack J A, Fabre D H, Clarke J E, et al. Hydrographic Multibeam Processing System (HMPS) Swath Alignment tool[C]. Proceedings of the Canadian Hydrographic Conference, Ottawa, Ontario, 1998

[2] 李家彪. 多波束勘查原理技术与方法 [M]. 北京:海洋出版社,1999

[3] Brennan L, Hess K, Huff L, et al. The Design of an Uncertainty Model For The Tidal Constituent and Residual Interpolation (TCARI) Method for Tidal Correction of Bathymetric Data [EB/OL]. http://www.thsoa.org/hy05/09_2a.pdf, 2009

[4] Kammerer E. A New Method for the Removal of Re-

fraction Artifacts in Multibeam Echosounder Systems [D]. Canada: University of New Brunswick, 2000

[5] Yang Fanlin, Li Jiabiao, Wu Ziyin, et al. A Post-processing Method for the Removal of Refraction Artifacts in Multibeam Bathymetry Data[J]. Marine Geodesy, 2007, 30(3):235-247

[6] 阳凡林,李家彪,吴自银,等. 浅水多波束勘测数据精细处理方法[J]. 测绘学报,2008,37(4):444-450

[7] 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

[8] Clarke J. Dynamic Motion Residuals in Swath Sonar Data : Ironing out the Creases [J]. International Hydrographic Review, 2003,4(1):6-23

[9] Demkowicz J, Dubniewski Z, Stepnowski A, et al. Geocorrection of 3D Bottom Images from Multibeam Sonar Records [C]. The WCU 2003 Conference, Paris, 2003

[10] 多波束技术组. 浅水多波束勘测技术研究[R]. 国家海洋局第一海洋研究所,青岛,1999

第一作者简介:阳凡林,博士,副教授,主要从事海洋测绘、GNSS 应用等方面的研究。
E-mail:flygps@sina.com

Correction of Imperfect Alignment of MRU for Multibeam Bathymetry Data

YANG Fanlin^{1, 2} LU Xiushan^{1, 2} LI Jiabiao³ GUO Jinyun^{1, 2}

(1 Key Laboratory of Surveying and Mapping Technology on Island and Reef, SBSM, 579 Qianwangang Road, Qingdao 266510, China)

(2 Geomatics College, Shandong University of Science and Technology, 579 Qianwangang Road, Qingdao 266510, China)

(3 Key Laboratory of Submarine Geosciences of SOA, 36 Baochu Road, Hangzhou 310012, China)

Abstract: In this paper, we analyzed the characteristics of attitude errors caused by imperfect alignment of the MRU with the reference frame of vessel, and influences on the positions of beams in multibeam survey in detail. In this case, according to the rules that depth error is mainly determined by roll error, and roll error is mainly related with pitch, the 3D sun-illuminated terrain of seafloor, the math tool of Fourier or Wavelet, and the side projection of depth errors are used to confirm whether imperfect alignment of the MRU exists or not. If it exists in multibeam survey, we can obtain the offset angle when the linear relations of pitch and depth errors are disappeared. Finally, all data which are impacted by the imperfect alignment of the MRU will be corrected by the offset angle. It provides a reference for improving multibeam bathymetry, especially in shallow water.

Key words: multibeam sonar; MRU; alignment; error