

削弱残余误差对多波束测深综合影响的方法研究

赵建虎¹ 张红梅² 严俊¹ 张雨庆¹

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

(2 武汉大学动力与机械工程学院,武汉市东湖南路 8 号,430072)

摘要:提出了一种基于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。实验验证了该方法的有效性。

关键词:多波束测深系统;残余误差;系统性影响;地形变化特征;误差削弱

中图法分类号:P229.3

多波束是由多传感器组成的综合性测深系统,除受自身测量误差影响外,还受声速、姿态、安装偏角等误差影响^[1-6]。海水中声线传播非直线,致使波束在海底的初始指向点与实际投射点存在偏差^[2],且随着入射角的增大而增大。借助声速剖面 and 声线跟踪可获得投射点位置,但声速测量误差及其代表性误差均会给测点深度计算带来系统性影响^[1],实测地形常呈“哭脸”或“笑脸”现象(如图 1 所示)^[3-5]。

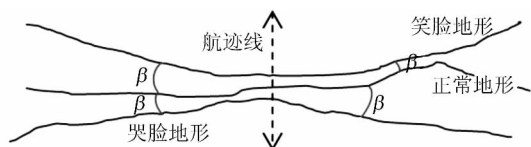


图 1 声速误差对测深的影响

Fig. 1 Influence of Sound Velocity Error for Sounding

姿态和安装偏差影响着波束初始入射角及测深点位置和深度的计算,其影响具有系统性。上述因素虽在数据处理中有所改正,但其自身测量误差及其诱导的系统性测深误差仍存在,严重影响了测深成果的质量。上述各残余误差变化具有随机性和高斯分布特征^[2],实际数据处理中只能对其控制,无法彻底消除;此外,这些残余误差的影响具有系统性和综合性,借助常规数据处理方法,难以对其影响实施分离和削弱。目前许多学者根据相邻条带公共覆盖区测深结果的一致性,提出一种误差强制压制方法^[5-6],虽解决了相邻条

带测深成果的一致性问题,但没有从根本上消除/削弱上述因素影响。为此,本文根据上述残余误差影响的特点,提出一种基于地形变化长波项与短波项相结合的残余误差影响综合削弱方法。

1 残余误差对测深影响的特点

声速误差、安装角偏差误差和姿态误差对深度的影响均基于声线跟踪形成。下面以声速误差为例,借助声线跟踪说明残余误差对测深的影响规律和程度。

声线跟踪基于层追加实现,对层 i ,

$$z_i = C_i t_i \cos \varphi_i \quad (1)$$

若实际声速为 C_i^0 ,存在误差 ΔC ,则有:

$$\frac{z'_i}{z_i} = \frac{C'_i t_i \cos \varphi'_i}{C_i^0 t_i \cos \varphi_i} = \frac{C'_i \cos \varphi'_i}{C_i^0 \cos \varphi_i}$$

结合 Snell 法则:

$$C_0 / \sin \varphi_0 = C_i^0 / \sin \varphi_i^0 = C'_i / \sin \varphi'_i = p$$

则:

$$1 + \frac{\Delta z_i}{z_i} = \frac{\sin \varphi'_i \cos \varphi'_i}{\sin \varphi_i \cos \varphi_i} = \frac{\sin 2 \varphi'_i}{\sin 2 \varphi_i} \quad (2)$$

即 $\Delta z_i / z_i = \sin 2 \varphi'_i / \sin 2 \varphi_i - 1$
当 $0^\circ \leq \varphi' \leq \varphi < 45^\circ$ 时, $\Delta z / z < 0$, ΔC 导致深度偏浅; $\Delta z / z > 0$, 深度偏深。当 $45^\circ \leq \varphi' \leq \varphi < 90^\circ$ 时, $\Delta z / z > 0$, ΔC 导致深度偏深; $\Delta z / z < 0$, ΔC 导致深度偏浅。

$$\frac{\sin \varphi'_i}{\sin \varphi_i^0} = \frac{C'_i}{C_i^0} = \frac{C_i^0 + \Delta C}{C_i^0} = 1 + \frac{\Delta C}{C_i^0}$$

收稿日期:2013-06-12。

项目来源:国家自然科学基金资助项目(40976061,41376109,41176068)。

$$\text{则: } \Delta C = C_i^0 \left(\frac{\sin \varphi_i'}{\sin \varphi_i^0} - 1 \right) \quad (3)$$

C_0, φ_0 一定时, ΔC 影响折射角 φ' 。 ΔC 越大, φ' 越大, 引起的测深误差越显著。若整个水柱包含 n 层, ΔC 的综合影响 ΔZ 为:

$$\Delta Z = \sum_{i=1}^n \Delta z_i = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\sin 2\varphi_i'}{\sin 2\varphi_i} - 1 \right) z_i \quad (4)$$

以上综合影响 ΔZ 导致图 2 所示现象, 且随深度的增加和波束角的增大愈加显著。

2 残余误差综合削弱原理

声速、安装偏角和姿态等残余误差对测深的综合影响在 $0^\circ \leq \varphi < 45^\circ$ 时(中央波束)相对较小, $45^\circ \leq \varphi < 90^\circ$ 时(边缘波束)相对较大。此外, 残余误差对测深的影响具有系统性, 改变了测深数据对地形长波项的正确反映, 而尚未影响短波项。

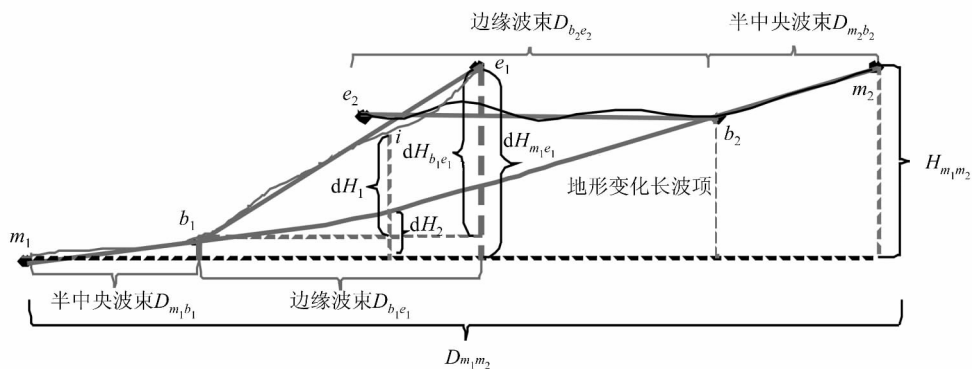


图 2 条带间地形变化长波项提取原理示意图

Fig. 2 Sketch Diagram of Drawing Long-wave Terrain from Middle Beams

获得了条带间地形变化的长波项后, 还需获得残余误差影响下的 Ping 断面靠近相邻条带的边缘波束实测水深地形的变化趋势, 如图 2 中的 b_1-e_1 (左条带) 和 b_2-e_2 (右条带)。基于地形变化长波项与短波项叠加的误差削弱方法即实现实测地形的趋势项与真实地形变化长波项一致。以左条带为例, 边缘波束中任一点 i 测深数据改正分为由测深误差引起的改正 dH_1 和由相邻条带中央波束所得到的实际的地形变化 dH_2 。若设 i 到中心点距离为 D_{m1i} , 到中央波束与边缘波束分界点 b_1 的距离为 D_{b1i} , 则有:

$$dH_1 = \frac{dH_{b_1e_1} \times D_{b_1i}}{D_{b_1e_1}}, dH_2 = \frac{dH_{m_1m_2} \times D_{m_1i}}{D_{m_1m_2}} \quad (6)$$

i 点实测深度的改正量 dH 为:

$$dH = dH_1 - (dH_2 - (dH_{m_1e_1} - dH_{b_1e_1})) \quad (7)$$

则该点的实际深度 Z' 为:

据此, 下面给出一种基于地形变化长波项与短波项相结合的残余误差削弱方法。

残余误差对中央波束测深影响较小, 可借助相邻条带 Ping 断面中央波束测深数据构建地形变化长波项 L 。地形变化的短波项 S 可直接从原始测深数据中提取出来。合成 L 和 S , 可实现对地形 T 的复原及残余系统误差对测深影响的削弱:

$$T = L + S \quad (5)$$

残余误差仅对 L 产生影响, 因此下面研究 L 的获取方法。

残余误差导致相邻条带对应 Ping 边缘波束上翘, 而中央波束由于受残余误差的影响较小, 可认为正确地反映了海床的实际地形变化。因此, 借助相邻条带的中央波束测深数据, 可以反映条带间海床地形的变化趋势, 也即为地形在条带间变化的长波项, 即图 2 中的 $m_1-b_1-b_2-m_2$ 。

$$Z' = Z - dH \quad (8)$$

3 几个关键问题

3.1 地形变化长波项提取

上述方法需将条带边缘波束实测深度的趋势项变换到实际地形长波项, 因此地形长波项提取显得非常重要。考虑条带覆盖宽度较小, 每 Ping 中央波束测深数据可靠, 提取的地形长波项反映的是地形变化的主趋势, 基于相邻条带中央波束的地形变化长波项可借助如下两种方式提取:

1) 直线/平面。若海床平坦, Ping 断面地形长波项可用直线反映; 若为区域地形, 可用平面来反映:

$$\text{直线 } Z(l) = a_0 + al$$

$$\text{平面 } Z(\Delta B, \Delta L) = b_0 + b_1 \Delta B + b_2 \Delta L \quad (9)$$

式中, 深度 Z 为 l 的函数; l 为测深点到 Ping 断面

起点距; (B, L) 为测深点坐标。

2) 多项式曲线/曲面。若地形变化较复杂, 则 Ping 断面地形长波项可借助曲线来反映; 对于区域地形, 可借助曲面来反映地形变化的长波项:

$$\begin{aligned} \text{曲线 } Z(l) &= c_0 + c_1 l + c_2 l^2 \\ \text{曲面 } Z(\Delta B, \Delta L) &= d_0 + d_1 \Delta B + d_2 \Delta L + d_3 \Delta B^2 + d_4 \Delta L^2 \end{aligned} \quad (10)$$

相对直线/平面模型, 曲线/曲面模型增强了对地形变化的逼近程度, 但过高的模型阶数会导致对地形细部反映异常, 一般用二阶即可。

3.2 相邻条带间 Ping 断面的连续匹配

以上方法需寻找相邻条带对应的 Ping 断面, 进而获得条带间地形变化长波项, 实现残余误差影响削弱。丢 Ping 和航向瞬时变化会给对应 Ping 的寻找带来问题。为此, 下面给出两种匹配方法。

1) 最小距离法。以一个条带的 Nadir 点为基点, 在其相邻条带的 Nadir 点序列中寻找直线距离最小点, 对应的 Ping 即为两条带的匹配 Ping。受丢 Ping 影响, 最小距离法在某些情况下可能得不到对应 Ping。

2) 最小偏角法。若航迹为直线, 左条带 Ping 断面数据中 Nadir 点到右条带对应 Nadir 点连线为直线, 与测线正交, 偏角为 0; 若航迹不为直线或存在丢 Ping 现象, 则寻找右条带中与之近邻的 Nadir 点, 其连线与测线正交线偏角最小。由于与右条带的正交点距离较近, 所得对应 Ping 以及由此所得条带间地形变化趋势, 完全可以真实地反映条带间地形变化的实际趋势, 且克服了最小距离法找不到对应 Ping 的缺陷。

4 误差削弱效果评估

基于上述方法, 可实现相邻条带公共覆盖区测深数据一致及残余误差综合影响削弱。对于第一个目标, 可借助相邻条带在公共覆盖区测深数据的一致性来评价。公共覆盖区相同位置存在属于左、右条带的两个测深数据 Z_1 和 Z_2 , 根据二者的不符值统计参数, 可对第一目标实现评估:

$$\text{STD} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta Z_i)^2}{m}}, \Delta Z_i = Z_2 - Z_1 \quad (11)$$

另外, 还可借助均值、最大值和最小值等统计参数对公共覆盖区测深数据的一致性进行评估。对于第二个问题, 可以借助不符值 ΔZ 的均值来评估。当均值为 0 或接近 0 时, 表明系统误差已被消除或削弱。

5 实验

为检验上述方法的正确性, 在某海域开展了海上实验, 测深数据处理后绘制如图 5 所示海床 DEM。可以看出, 条带间存在规律性“隆起”, 但从整体趋势来看, 该“隆起”为异常, 分析认为是由声速、姿态、安装偏差等残余误差引起的边缘波束测深异常所致。为检验该假设, 在相邻条带中抽取 1 个对应 Ping 断面如图 3 所示, 可以看出除中央波束外, 边缘波束均存在“翘起”。

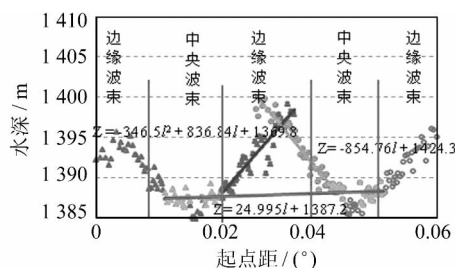


图 3 Ping 断面地形及误差压制

Fig. 3 Ping Segment and Error Weakening

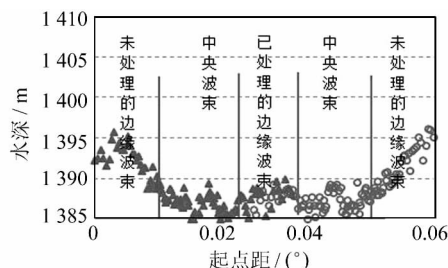


图 4 误差压制后的 Ping 断面地形

Fig. 4 Ping Segment After Error Weakening

为消除该“隆起”, 以 Ping 断面为对象, 借助相邻两个条带对应 Ping 中央波束计算得到地形变化长波项 (如图 3 所示); 然后计算左条带右侧边缘波束趋势项、右条带左侧边缘波束的趋势项; 根据这两个趋势项及其与地形变形长波项几何关系, 借助式 (6)~式 (8), 对两个边缘波束的测深数据实施改正, 如图 4 所示。可以看出, 改正后的边缘波束测深数据反映的地形变化与中央波束一致。为分析这种改正后测深数据的精度和可靠性, 对两个条带在公共覆盖区测深数据的一致性借助式 (11) 进行了统计分析, 参数如表 1 所示。

表 1 改正前后相邻条带公共覆盖区测深数据一致性评估参数

Tab. 1 Statistic Parameter of ΔZ in Common Coverage

统计参数	最大偏差/m	最小偏差/m	均值/m	标准偏差/m
改正前	4.555	-7.300	-1.286	± 3.134
改正后	2.003	-1.087	0.062	± 0.755

从表 1 中的最大、最小偏差值可以看出,改正后相邻条带公共覆盖区测深数据的互差 ΔZ 的分布相对改正前聚敛性得到了很大程度的提高。从均值可以看出,改正前的均值为 1.28 m,表明测深数据中存在系统偏差;改正后接近 0,符合高斯正态分布,表明本文方法有效地消除了这些误差的系统性影响;此外 ΔZ 的标准偏差也显著降低。

借助最短距离、最小偏角 Ping 断面匹配法及以上系统误差削弱方法,对测区内所有条带数据进行处理,如图 5 所示。

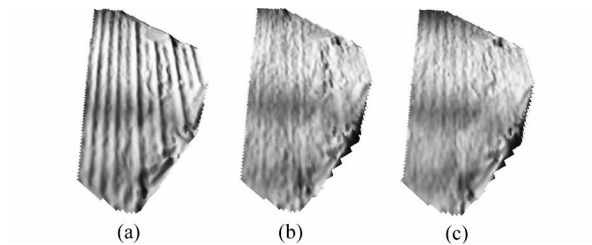


图 5 误差削弱后的海床 DEM

Fig. 5 Seabed DEM after Error Weakening

由图 5 可知,处理后的 DEM 合理地反映了海床地形变化,“隆起”现象得以消除。比较最短距离(图 5(b))和最小偏角匹配(图 5(c))所得

DEM 可以看出,二者在相邻条带 Ping 断面对应情况下处理结果一致;而在 Ping 缺失时,后者不但实现了邻近 Ping 的自动获取,且确保了数据处理的正确性和自动化,因此实际数据处理中建议采用该法。

参 考 文 献

- [1] 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] 赵建虎.现代海洋测绘[M].武汉:武汉大学出版社,2007
- [3] 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
- [4] 刘胜旋,关永贤.多波束系统的参数误差判断及校正[J].海洋测绘,2002,22(1):33-37
- [5] 丁继胜.声速剖面对多波束测深的影响[J].海洋测绘,2000(2):
- [6] 吴自银,金祥龙,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

第一作者简介:赵建虎,博士,教授,博士生导师,主要从事海洋测绘研究。

E-mail:jhzhaosgg.whu.edu.cn

Weakening Influence of Residual Error for MBS Sounding

ZHAO Jianhu¹ ZHANG Hongmei² YAN Jun¹ ZHANG Yuqing¹

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 School of Power and Mechanical Engineering, 8 South Donghu Road, Wuhan 430072, China)

Abstract: Though a completed procedure implemented in MBS data processing, an ideal sounding result still can not be achieved, the multibeam echo sounding data still comprehensively influenced by the residual errors, such as the measurement errors of sound speed profile (SVP), representative error of SVP, alignment deviation error of MBS transducer, and attitude error. The synthetic influence of these residual errors on sounding result takes on systematicness, is difficult to be separated and weakened by traditional methods, and is especially obvious in the area of deep water and fringe beam of MBS. Therefore, a new method based on the blend of the long wave and the short wave of seabed topography is put forward in this paper to weaken the influence of these residual errors, and its efficiency has been proved by experiment.

Key words: multi-beam bathymetric system (MBS); residual error; systematic influence; characteristics of seabed topographical; error weakening

About the first author: ZHAO Jianhu, professor, Ph.D supervisor, majors in hydrography and nautical cartography.

E-mail: jhzhaosgg.whu.edu.cn