

DOI:10.13203/j.whugis20170112



文章编号:1671-8860(2019)04-0525-07

# 一种多波束声速剖面反演与海底地形校正技术

马 凯<sup>1,2</sup> 徐卫明<sup>1</sup> 许 坚<sup>1</sup> 董洲洋<sup>1,3</sup>

1 海军大连舰艇学院海洋测绘系,辽宁 大连,116018

2 92899 部队,浙江 宁波,315299

3 32023 部队,辽宁 大连,116023

**摘 要:**为了解决在多波束测深中声速剖面代表性误差会造成平坦海底地形凹凸变形的问题,提出了一种基于海底观测值的声速剖面反演与海底地形改正技术。该技术利用波束入射角以及单程回波时间信息,建立波束位移与误差声剖的函数关系,采用间接平差与 LM(Levenberg-Marquardt)法反演得到与实际声速剖面相近的改正声速剖面,从而达到校正海底畸变地形的目的。海上实验数据验证表明:与含有误差的海上声剖值相比,反演改正后的声剖值更接近海上实际声剖值;水深改正的相对标准差降低 50% 以上,有效地削弱了畸变海底地形的影响。

**关键词:**多波束测深;声速剖面反演;海底地形校正;间接平差

**中图分类号:**P229

**文献标志码:**A

目前,集成了卫星导航定位、计算机、数字传感器等技术的多波束测深系统被广泛应用于海洋工程、海洋矿产资源开发、海洋国防建设等领域中<sup>[1-2]</sup>。多波束测深精度在很大程度上取决于声速剖面的测量精度,由于声速剖面测量点的时空分辨率有限,难免产生声速剖面代表性误差,得到一组有偏差的水深数据,以海底地形的“笑脸”和“哭脸”现象表现<sup>[3]</sup>。改正声速剖面的方法主要有以下 3 种<sup>[1,3-4]</sup>:一是基于时-空域最近原则的声速剖面替代法,该方法改正效果有限,难以满足高精度测深需要;二是在数据后处理系统中人工修改某些参数,以达到声剖改正的目的,该方法较为繁琐且具有一定的主观随意性;三是根据正交经验函数做数值分析,该方法需要较多样本及参数,改正计算较复杂,需要进一步优化。

海洋声速反演是一种通过海底地形的深度测量值利用数学算法反推声速信息的技术<sup>[4-5]</sup>。现代水下回声定位技术的主要原理为通过计算声线积分得到声波传播路径,确定目标定位信息<sup>[6]</sup>,这与多波束测深原理相似,同样也会遇到声速误差问题。其改正方法采用了海洋声速反演技术,先对定位点数据依据最小二乘原则进行去差处理,然后反演求得比时-空域最近原则的声速剖面更

可靠的声速剖面,最后计算出更准确的定位信息<sup>[6-8]</sup>。受该类技术的启发,结合多波束测深的特点,适用于校正多波束测深数据处理的声速反演技术成为可能。

为满足现代多波束测量的高精度测深数据、信息处理自动化和计算简便快捷的需求<sup>[9-10]</sup>,解决声速剖面代表性误差问题,本文结合间接平差思想及 LM(Levenberg-Marquardt)法<sup>[11]</sup>建立了一种声速剖面非线性反演模型,求解改正声剖以校正失真地形。

## 1 声剖误差对海底地形测量的影响

在利用多波束系统测深时,受海洋复杂环境、声速测量仪器状态和声剖站布设的影响,声剖数据难免会有一些的误差,制约了多波束测深的精度<sup>[3,12]</sup>。受温度、盐度、压强(水深)等影响,海水介质变化会导致声速改变并发生连续折射现象(图 1)。

根据 Snell 定律<sup>[1]</sup>,整个水体可以看成是由多个均匀水层组成的,以  $1, 2 \cdots n$  来标记各个水层,在各个水层的分界面上,根据折射定律有:

收稿日期:2018-02-23

项目资助:国家自然科学基金(61071006)。

第一作者:马凯,硕士,助理工程师,主要从事沿岸地形测量与海道测量数据处理理论与方法研究。869834988@qq.com

通讯作者:徐卫明,博士,副教授。xwm05@mails.tsinghua.edu.cn

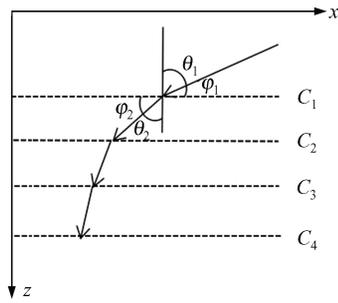


图1 声波折射

Fig. 1 The Geometry of Acoustic Refraction

$$\frac{\cos\varphi_1}{C_1} = \frac{\cos\varphi_2}{C_2} = \dots = \frac{\cos\varphi_n}{C_n} = p \quad (1)$$

式中,  $\varphi_i (i=1, 2, \dots, n)$  是波束历经各个水层的掠射角;  $C_i (i=1, 2, \dots, n)$  是各水层的声速;  $p$  是 Snell 常数。由 Snell 定律知, 波束连续穿过多个声层后便会出现声线弯曲现象。显然, 声速误差通过声线弯曲会干扰水深数据精度, 在边缘波束(波束入射角超过  $60^\circ$ ) 这种干扰尤为严重, 海底地形在横向剖面上会出现对称凸状, 出现“哭脸”, 或者对称上翘, 即“笑脸”<sup>[13-14]</sup>。在不产生整体性严重的声速剖面误差时, 其凹凸地形是与原地形相割的, 在波束角  $40^\circ$  附近的地形数据精确度更高<sup>[12]</sup>。

经研究可知, 水深测量误差  $E$  与声速的关系为<sup>[3]</sup>:

$$E = D \frac{\Delta C}{C_0} [1 - 2\tan^2\alpha_0 + 2\tan\beta\tan\alpha_0] \quad (2)$$

式中,  $D$  为水深值;  $\Delta C$  为声速误差;  $C_0$  为介质内声速;  $\beta$  为海底坡度角;  $\alpha_0$  为波束折射角的补角。可见, 多波束测深精度很大程度上由声剖精度所决定。

## 2 反演模型的建立及分析

根据 §1 分析, 建立反演模型如下: 以各层声速为参数, 建立关于单 ping 海底地形观测值的间接平差误差方程组<sup>[7, 15]</sup>; 结合 LM 迭代算法进行有偏估计并迭代求解<sup>[11, 16]</sup>, 形象描述, 可理解为有依据地将凹凸状的单 ping 地形逐渐“拉直”并求解其声速参数; 以新的反演声速剖面为准, 改正计算所有受该误差声速剖面影响的测深数据, 校正海底地形畸变。

### 2.1 建立反演模型的准备

声速反演模型的建立需要原误差地形的单 ping 观测值信息, 因此模型的成立对观测值数据特别是中央波束观测值有一定的精度要求。当声速剖面平均误差达到 20 m/s 时, 中央波束下的测

深值偏差超过 1%, 失去参考价值<sup>[13]</sup>。在进行声速剖面反演前, 若地形畸变程度较大, 需要进行预处理, 如利用时-空域最近声剖替代法对中央波束测深值进行预改正<sup>[9]</sup>, 可排除严重声速剖面偏差的影响, 以保证反演模型有效建立。

建立反演模型所需的信息有单 ping 下各波束的波束指向角、Snell 常数以及波束单程传播时间等。波束指向角信息可通过转化读取原始测线数据得到<sup>[3]</sup>, Snell 常数由式(1)获知, 波束单程总传播时间  $T$  可以根据原始测深数据文件查阅到。为了贴近实际声线, 反演模型的声线计算基础是常梯度声线跟踪法。按照常梯度声线跟踪法, 将海水依照声速剖面的采样间距分为  $i=1, 2, \dots, n$  层, 声速在层内是常梯度  $g_i$  变化。层内声线是连续弧段, 弧段的曲率半径为  $R_i$ , 梯度与曲率半径分别为<sup>[3, 17]</sup>:

$$g_i = \frac{C_{i-1} - C_i}{Z_{i+1} - Z_i} \quad (3)$$

$$R_i = -1/pg_i \quad (4)$$

式(3)中,  $C_i$  表示声波在  $i$  层的声速;  $Z_i$  为平均深度值; 式(4)中,  $p$  表示该条波束的 Snell 常数;  $g_i$  为第  $i$  层的声速梯度。第  $i$  层的水平位移  $x_i$  和波束在第  $i$  层的传播时间  $t_i$  为:

$$x_i = \frac{\cos\theta_i - \cos\theta_{i+1}}{pg_i} \quad (5)$$

$$t_i = \frac{R_i(\theta_i - \theta_{i+1})}{C_{H_i}} = \frac{\theta_i - \theta_{i+1}}{pg_i^2 \Delta Z_i} \ln \frac{C_{i+1}}{C_i} \quad (6)$$

式中,  $\theta_i$  表示第  $i$  层的声波入射角;  $\Delta Z_i$  为第  $i$  层厚度;  $C_{H_i}$  为声波在第  $i$  层内传播的 Harmonic 平均声速,  $C_H$  的表达式如下:

$$C_H = (Z - Z_0) \left( \sum_{i=1}^N \frac{1}{g_i} \ln(1 + \frac{g_i}{C_i} \Delta Z_i) \right)^{-1} \quad (7)$$

式中,  $Z$  和  $Z_0$  为整个水柱的底部深度值和顶部深度值;  $N$  为整个水层的分层数,  $i=1, 2, \dots, N$ ;  $g_i$  为第  $i$  层声速梯度;  $C_i$  为第  $i$  层的声速;  $\Delta Z_i$  为第  $i$  层厚度。由此, 可获取波束单程传播时间。

### 2.2 基于单 ping 的声速剖面反演

利用多波束测深值反演海水声速数据的目的是寻求一组模型声速改正参数, 使其计算位移与实际位移达到最优拟合。首先, 设某 ping 中第  $j$  条波束累计垂直位移为  $Z_j$ , 水平位移为  $X_j$ , 在不考虑表层声速误差情况下, 根据间接平差方法, 建立失真 ping 观测值与各层声速间的误差方程关系式  $F_j(C)$ 、 $H_j(C)$  如下<sup>[15, 18]</sup>:

$$X_j = F_j(C_1, C_2, \dots, C_n) = \sum_{i=1}^{n-1} \Delta t_{ij} C_i^2 p_j + (T_j - \sum_{i=1}^{n-1} \Delta t_{ij}) C_n^2 p_j \quad (8)$$

$$Z_j = H_j(C_1, C_2 \dots C_n) = \sum_{i=1}^{n-1} \Delta Z_{ij} + (T_j - \sum_{i=1}^{n-1} \Delta t_{ij}) C_n \cos \theta_{nj} \quad (9)$$

式中,  $i=1, 2 \dots n$ , 为层编号;  $j=1, 2 \dots m$ , 为波束编号;  $C_i$  为各层声速;  $p$  为 Snell 射线参数;  $T_j$  为波束总单向传播时间;  $\theta_i$  为波束入射角;  $\Delta Z_i$  为层厚度;  $\Delta t_{ij}$  为波束单层传播时间, 计算式如下:

$$\Delta t_{ij} = \frac{\Delta Z_{ij}}{C_i \cdot \cos \theta_{ij}} = \frac{\Delta Z_{ij}}{C_i [1 - (p_j C_i)^2]^{1/2}} \quad (10)$$

设波束的数量  $m$  大于声速参数的数量  $n$ , 所以方程组有解。解决非线性问题, 依据 LM 算法的线性化原则, 对式(8)、式(9)按泰勒级数展开, 取一阶近似, 可得<sup>[11,15]</sup>:

$$\tilde{X}_j = X_j^0 + dX_j = F_j(\tilde{C}_1, \tilde{C}_2 \dots \tilde{C}_i) = F_j(C_1^0, C_2^0 \dots C_i^0) + \sum_{i=1}^n A_{ij} \hat{c}_i \quad (11)$$

$$\tilde{Z}_j = Z_j^0 + dZ_j = H_j(\tilde{C}_1, \tilde{C}_2 \dots \tilde{C}_i) = H_j(C_1^0, C_2^0 \dots C_i^0) + \sum_{i=1}^n B_{ij} \hat{c}_i \quad (12)$$

式中,  $\tilde{X}_j$  和  $\tilde{Z}_j$  为波束水平位移和垂直位移真值;  $X_j^0$  和  $Z_j^0$  为观测值;  $dX_j$  和  $dZ_j$  为偏差小量;  $\tilde{C}_i$  为声速真值;  $C_i^0$  为声速观测值;  $\hat{c}_i$  为声速改正量;  $A_{ij}$  和  $B_{ij}$  为  $\hat{c}$  的系数, 即垂直位移和水平位移对声速的偏导。联立全部  $m$  条波束的垂直位移误差方程和水平位移误差方程, 可得  $m \times n$  的雅克比矩阵  $\mathbf{A}$  和  $\mathbf{B}$ , 其中, 矩阵元  $A_{ij}$  和  $B_{ij}$  变为:

$$A_{ij} = \left( \frac{\partial F_j}{\partial C_i} \right)_{C_i^0} = \frac{\Delta Z_i (C_i^{0^2} - C_n^{0^2}) \sin^3 \theta_{1j}}{(C_1^{0^2} - C_i^{0^2} \sin^2 \theta_{1j})^{3/2}} - \frac{2 \Delta Z_i \sin \theta_{1j}}{\sqrt{C_i^{0^2} - C_i^{0^2} \sin^2 \theta_{1j}}} - \frac{\Delta Z_i (C_i^{0^2} - C_n^{0^2}) \sin \theta_{1j}}{C_i^{0^2} \sqrt{C_i^{0^2} - C_i^{0^2} \sin^2 \theta_{1j}}} \quad (13)$$

$$B_{ij} = \left( \frac{\partial H_j}{\partial C_i} \right)_{C_i^0} = \frac{\Delta Z_i C_1^0 C_n^0 \sin^2 \theta_{1j} \sqrt{1 - \frac{C_n^0 \sin^2 \theta_{1j}}{C_i^{0^2}}}}{(C_i^{0^2} - C_i^{0^2} \sin^2 \theta)^{3/2}} - \frac{\Delta Z_i C_1^0 C_n^0 \sqrt{1 - \frac{C_n^0 \sin^2 \theta_{1j}}{C_i^{0^2}}}}{C_i^{0^2} \sqrt{C_i^{0^2} - C_i^{0^2} \sin^2 \theta}} \quad (14)$$

矩阵  $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$  分别对应波束垂直位移误差方程组和水平位移误差方程组的系数矩阵, 两组方程组的参数都是关于  $1 \sim n$  层的声速, 联立得总矩阵  $\mathbf{D}$ :

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{B} \end{bmatrix} \quad (15)$$

最后, 根据最小二乘原则  $\mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V} = \min$ , 其中,  $\mathbf{V}$  是观测值改正量矩阵,  $\mathbf{P}$  是权阵, 求解法方程反

演得到各声层的声速改正量矩阵  $\hat{\mathbf{c}}^{[16]}$ :

$$\hat{\mathbf{c}} = (\mathbf{D}^T \mathbf{P} \mathbf{D})^{-1} \mathbf{D}^T \mathbf{P} \mathbf{L} \quad (16)$$

式中, 权的设定要根据各条波束的测量精度而定, 精度低的边缘波束的权值相对小于中央波束<sup>[3,14]</sup>; 常数项矩阵  $\mathbf{L}$  表示为:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}^0 - \mathbf{F}(\mathbf{C}^0) \\ \mathbf{Z}^0 - \mathbf{H}(\mathbf{C}^0) \end{bmatrix} \quad (17)$$

研究发现, 由于式(16)中系数方阵  $\mathbf{D}^T \mathbf{P} \mathbf{D}$  的某些特征值小且方程条件数大, 导致方阵的逆奇异成为病态矩阵, 解趋于发散。LM 算法采用的方法是岭估计<sup>[14]</sup>, 即在方阵后加入阻尼因子  $\alpha \mathbf{I}$ , 该方法的基本思想是限制改正量的增长使近似有效, 同时改善方程条件, 则式(16)改为<sup>[16]</sup>:

$$\hat{\mathbf{c}} = (\mathbf{D}^T \mathbf{P} \mathbf{D} + \alpha \mathbf{I})^{-1} \mathbf{D}^T \mathbf{P} \mathbf{L} \quad (18)$$

式中,  $\mathbf{I}$  为单位矩阵;  $\alpha$  为阻尼系数, 阻尼系数的大小根据发散情况进行选择, 若系数方阵  $\mathbf{D}^T \mathbf{P} \mathbf{D}$  的奇异性较大, 则需要较大的阻尼系数, 反之则选择较小的系数。进而, 海底观测值改正值矩阵  $\mathbf{V}$  为<sup>[15-16]</sup>:

$$\mathbf{V} = \hat{\mathbf{B}} \hat{\mathbf{c}} - \mathbf{L} \quad (19)$$

非线性最小二乘问题没有闭式解。根据 LM 迭代原理, 需要逐次迭代逼近最优解<sup>[11]</sup>, 方法是将声速改正量加入原声剖数据中, 再次作为初始参量进行计算, 直至满足  $\delta_k < q$  的要求, 停止迭代。其中  $\delta_k$  为迭代因子,  $q$  为阈值, 最后输出反演声速剖面。反演迭代过程如图 2 所示。

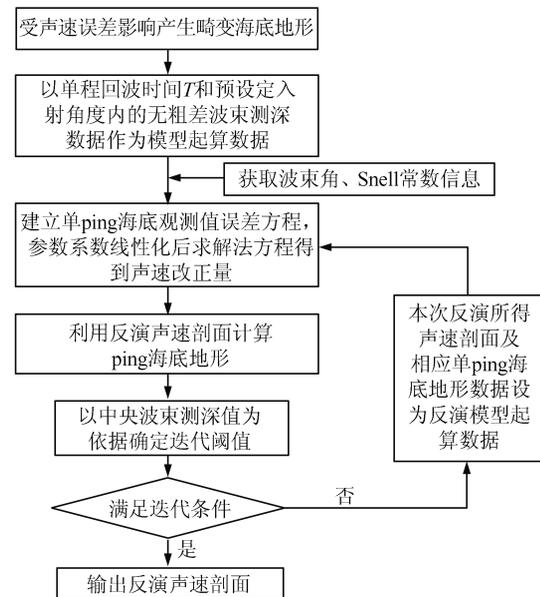


图 2 声速剖面反演流程

Fig. 2 Flowchart of Sound Velocity Profile Inverting

### 3 数据实验与分析

实验数据取自 2011 年 3 月于  $43^{\circ}04' \text{N} \sim$

43°03'N、70°44'W~70°42'W 水域测量作业的实测声速剖面及相应测深数据(图3)。声速剖面共5组(图4),设为 svp1 至 svp5,测区海底最大水深488.1 m,最浅水深441.3 m,较为平坦。换能器单 ping 共128条波束,波束总开角145°。为了验证实验的实用性及有效性,设计如下两组实验。

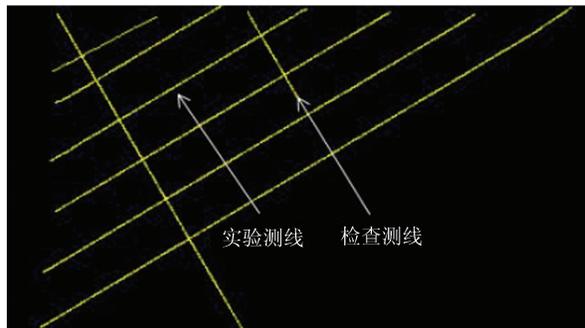


图3 实验测区

Fig. 3 The Experiment Area

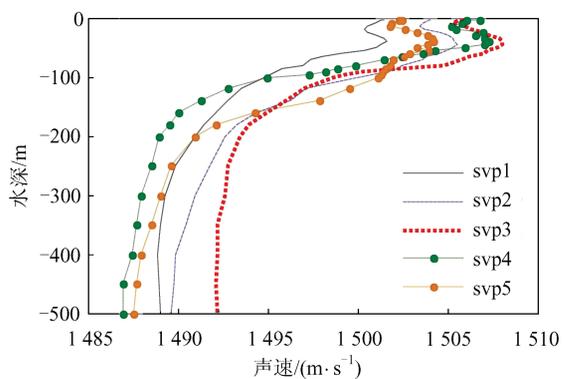


图4 声速剖面图

Fig. 4 Sound Velocity Profile

实验1 选取实测声速剖面 svp1 及相应测线,依据距离最近法则,在其余4组声速剖面中选取一组声速剖面(svp2)替代 svp1 重新计算水深。由于声速剖面含有误差,地形产生了一定程度的“凹凸地形”畸变(图5中替代声速剖面计算的地形),需要对其进行声速反演改正。根据§2.2所述,依据声速剖面结构对海水进行分层:0~100 m 每层5 m,100~300 m 每层10 m,300~500 m 每层20 m。建立单 ping 测深数据的声剖反演模型,按照常梯度声线跟踪法,求解出波束单向回波时  $T$ 。入射角  $68^\circ$  内无粗差波束的水平位移和垂直位移列入观测方程进行解算处理。在设定权时,根据文献[3,15-16]对边缘波束测深相对误差的分析,将波束入射角  $0.55^\circ \sim 45^\circ$ 、 $45^\circ \sim 55^\circ$ 、 $55^\circ \sim 63^\circ$  和  $63^\circ \sim 68^\circ$  间波束所测的观测值权定为1、1/2、1/4、1/8。进一步解算法方程时,协因数矩阵均趋向于奇异性且奇异性较小,需要设立合理阻

尼系数值。目前应用最广的快速设定合理阻尼系数的方法为岭估计法<sup>[14-15]</sup>,其方法是以0.5为起点设定一组  $\alpha$  的取值,协因数阵发散程度越大,取值越大,反之则取值越小,并一一列出相应参数值,取使各参数值最为稳定的  $\alpha$  为阻尼系数。最终确定该实验组反演模型的阻尼系数  $\alpha=10^{-2}$ 。

在判定迭代时,因中央波束受声线弯曲影响最小,但实际测量时中央波束所测水深值与真实数据仍有所偏差。根据§1分析,以波束角  $0^\circ \sim 40^\circ$  下的水深平均值为改正参考值  $H_0$ ,计算所有边缘波束(波束角超过  $60^\circ$ )测深值  $H_k (k=1,2 \dots n)$  与  $H_0$  差绝对值  $\delta_k = |H_k - H_0|$ 。参考《国际海道测量标准 S-44》(第五版)<sup>[19]</sup>规定的最大总垂直不确定度( $TVU_{\max}$ ),设阈值  $q = \frac{1}{5} \times TVU_{\max}$ ,当满足95%的  $\delta_k < q$  时迭代结束。9次迭代计算后,得到反演声速剖面记为 svp6。需要注意的是,若海底地形有一定的倾斜角度,还需对阈值加入相应的倾斜补偿值<sup>[20]</sup>。

输出反演声剖 svp6、实测声剖 svp1 和替代声剖 svp2(图5),相应反演 ping 的水深数据(图6)。由于测深点的水平位置限差,较大声速误差对其影响较小,可不必输出结果<sup>[4,21-22]</sup>。定量统计反演声剖、替代声剖与原声剖间的偏差,见表1。为了验证算法有效性,增加反演结果的真实性,在测区条带交叉处,利用反演 svp 计算的边缘波束(入射角大于  $55^\circ$  的波束)测深结果与检查测线(图3)的中央波束测深结果进行相对测深误差统计分析(表2),在水深中误差统计时,采用基于测深评估法的重复点水深相对标准差进行精度评估<sup>[19]</sup>。

对比发现,经反演算法改正的声速剖面较替代法更加接近原实测声速剖面。反演 svp 计算的水深值精度更高,在条带交叉处,测线边缘波束水深值与检查线中央波束水深值的偏差明显降低。

表1 实验1声剖误差统计表/( $m \cdot s^{-1}$ )Tab. 1 The Error Statistics of Sound Velocity Profile in Experiment One/( $m \cdot s^{-1}$ )

声剖类型	偏差平均值	标准差绝对值
误差声剖1	2.025	1.570
反演声剖1	0.781	0.611

表2 实验1水深误差统计表/m

Tab. 2 The Error Statistics of Water Depth in Experiment One/m

水深类型	偏差平均值	标准差绝对值
误差水深1	1.387	0.921
校正水深1	0.392	0.318

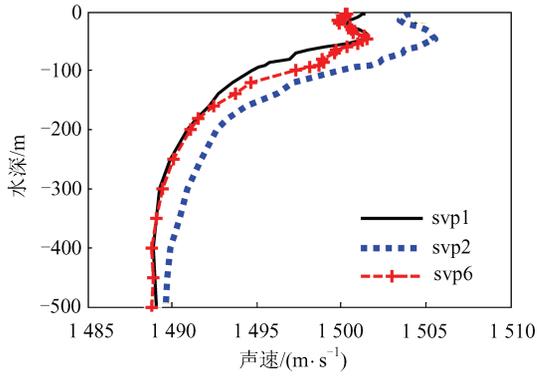


图 5 实验 1 声速剖面对比

Fig. 5 Comparison of Sound Velocity Profile in Experiment One

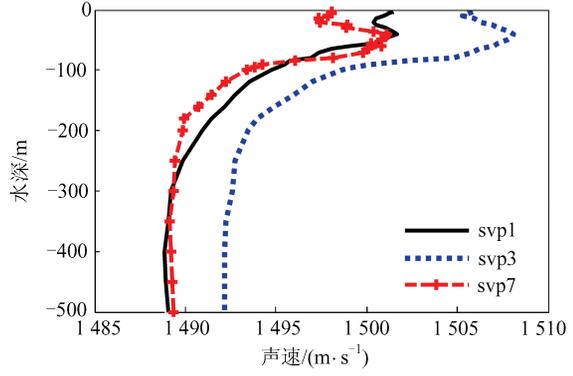


图 7 实验 2 声速剖面对比

Fig. 7 The Comparison of Sound Velocity Profile in Experiment Two

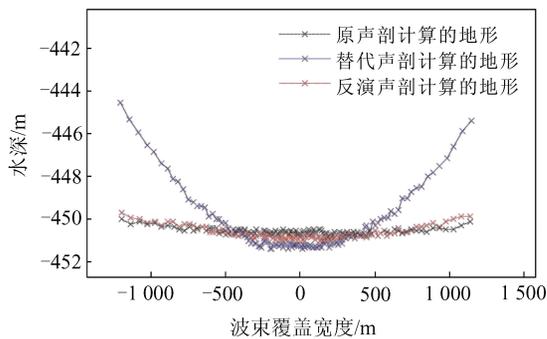


图 6 实验 1 水深数据

Fig. 6 The Water Depth of Experiment One

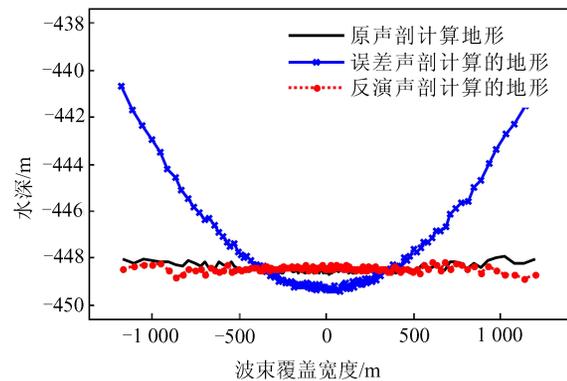


图 8 实验 2 水深数据

Fig. 8 The Water Depth of Experiment Two

实验 2 为进一步验证反演方法的实用性,在选取 svp1 及其相应测线数据的基础上,另选取剩余 3 组声速剖面中与 svp1 声速剖面平均偏差较大的声速剖面(svp3)代替 svp1 计算水深;为保证反演效果,先依照时-空最近法则选择声速剖面(svp2)计算中央波束测深值;接下来重复实验 1 的步骤。声速剖面反演结果如图 7 所示,反演 ping 的地形对比如图 8 所示,声速剖面误差及条带交叉处的水深误差统计如表 3 和表 4 所示。

表 3 实验 2 声剖误差统计表/( $m \cdot s^{-1}$ )

Tab. 3 The Error Statistics of Sound Velocity Profile in Experiment Two /( $m \cdot s^{-1}$ )

声剖类型	偏差平均值	标准差绝对值
误差声剖 2	3.524	2.633
反演声剖 2	1.011	0.821

表 4 实验 2 水深误差统计表/m

Tab. 4 The Error Statistics of Water Depth in Experiment Two/m

水深类型	偏差平均值	标准差绝对值
误差水深 2	2.110	1.822
校正水深 2	0.537	0.451

实验结果显示,对于含有较大误差的声速剖面,该反演算法仍具有有效性,反演得到的声速剖面较替代声速剖面更加贴近原实测声速剖面,反演 ping 的“凹凸”失真地形也同样得到有效校正。在条带交叉处的水深统计结果再次证明了反演算法的有效性。

为验证声速剖面反演算法的实用性,进一步对受误差声速剖面 svp3 影响的连续 30 m 相邻两测线数据进行改正。通过目前公认的 Caris 软件子区模式输出图像,如图 9 和图 10 所示。

从图 9 和图 10 中可见,经反演声速改正后,受误差声速剖面影响的“凹凸”状地形消失,反演声速剖面对多个 ping 的海底数据校正仍有效果,再一次验证了反演算法的实用性。

## 4 结 语

本文首先指出了多波束系统在进行测量作业时,声速剖面误差是导致海底地形“凹凸状”畸变的主要原因。然后结合间接平差和 LM 阻尼最小二乘算法,提出了一种声速剖面反演与海底地

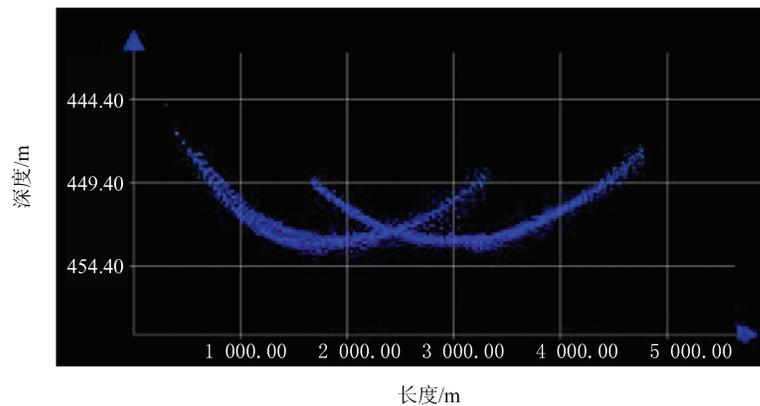


图9 失真海底地形

Fig. 9 Distorted Seafloor Topography

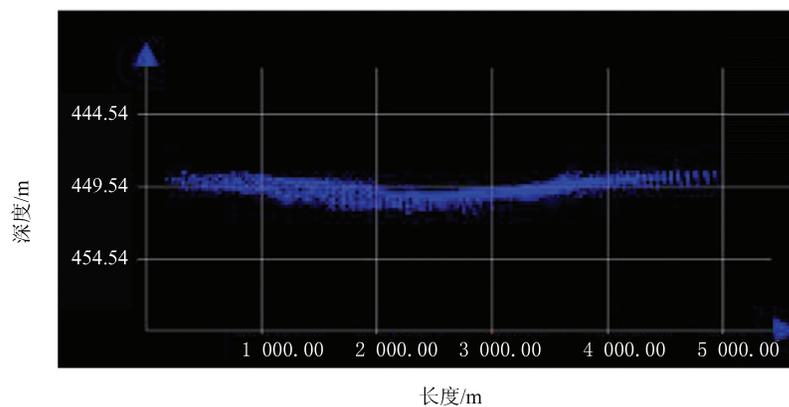


图10 校正海底地形

Fig. 10 Corrected Seafloor Topography

形畸变校正的技术。最后通过实例数据进行验证分析得到以下结果。

1) 通过反演算法得到的反演 svp 较替代 svp 更接近原实际 svp; 经反演声剖重新计算的单 ping 水深数据精度较替代 svp 更高; 反演 ping 的“凹状”畸变地形基本消失, 且统计证明反演算法有效。

2) 反演算法对于偏差较大的声速剖面也有良好的改正效果, 这是基于时-空域最近声剖与原声剖相似的前提实现的, 因此应避免在恶劣海洋环境下进行测量作业。

3) 条带交叉处的水深误差统计结果显示, 反演 svp 对受声速剖面代表性误差产生的海底地形畸变改正具有一定的有效性, 同时反演 svp 对受误差声速影响的两相邻测线水深数据进行了有效校正, “凹状”地形以及条带拼接处的“交叉状”地形得到明显改善, 进一步证明反演算法的有效性及其实用性。

本文提出的反演模型数学处理方法明确, 切实可行, 计算简便快捷, 对于多波束高精度测深数据处理研究有一定的意义。

## 参 考 文 献

- [1] Ye Jiuchang, Liu Jiawei. Hydrographic Surveying [M]. Beijing: Haichao Press, 1993 (叶久长, 刘家伟. 海道测量学[M]. 北京: 海潮出版社, 1993)
- [2] Zhai Guojun, Huang Motao. Comments on Informationization of Hydrographic Surveying and Charting [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2014, 34(5):1-6 (翟国君, 黄谟涛. 关于信息化海洋测绘问题的探讨[J]. 海洋测绘, 2014, 34(5):1-6)
- [3] Zhao Jianhu, Liu Jingnan. Multi-beam Bathymetric Survey and Image Processing [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2009 (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, 2009)
- [4] 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)
- [5] Dashen R, Flatte S M, Munk W H, et al. Sound Transmission Through a Fluctuating Ocean [M].

- Cambridge: Cambridge University Press, 2010
- [6] Jin G, Lynch J F, Chiu C S, et al. A Theoretical and Simulation Study of Acoustic Normal Mode Coupling Effects Due to the Barents Sea Polar Front with Applications to Acoustic Tomography and Matched Field Processing [J]. *J Acoust Soc Am*, 1996, 101 (1):193-205
- [7] Zhang Minglei, Huang Minyan, Feng Haihong. Iteration Algorithm of Revising Sound Velocity for Long Baseline Acoustic Positioning System [J]. *Technical Acoustics*, 2010, 29 (3): 253-257 (张明磊, 黄敏燕, 冯海泓. 长基线水声定位系统中一种迭代声速修正算法[J]. 声学技术, 2010, 29(3): 253-257)
- [8] Sun Wanqing. Studies on Underwater Acoustic Localization Technique in Shallow Water and Its Application [D]. Qingdao: Ocean University of China Press, 2007 (孙万卿. 浅海水声定位技术及应用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007)
- [9] Zhai Guojun, Ouyang Yongzhong, Lu Xiuping, et al. Comments on the Revision of the Specifications for Hydrographic Survey [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2014, 34(1): 76-79 (翟国君, 欧阳永忠, 陆秀平, 等. 《海道测量规范》修订的若干问题 [J]. 海洋测绘, 2014, 34(1): 76-79)
- [10] Xue Yigeng, Zielinski A. Precise Multi-beam Acoustic Bathymetry [J]. *Marine Geodesy*, 1999, 22 (3): 157-167
- [11] Ranganathan A. The Levenberg-Marquardt Algorithm [J]. *Tutorial on Lm Algorithm*, 2013, 11 (1): 101-110
- [12] Zhao J, Zou Y, Zhang H, et al. A New Method for Absolute Datum Transfer in Seafloor Control Network Measurement [J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2016, 21(2): 216-226
- [13] Liu Shengxuan, Qu Xiaojuan, Gao Peilan. New Idea for the Accuracy of Multibeam Affected by SVP [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2008, 28(4): 31-34 (刘胜旋, 屈小娟, 高佩兰. 声速剖面对多波束测深影响的新认识[J]. 海洋测绘, 2008, 28(3): 31-34)
- [14] Zhao Jianhu, Zhang Hongmei, Yan Jun, et al. Weakening Influence of Residual Error for MBS Sounding [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(10): 1 184-1 187 (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): 1 184-1 187)
- [15] Survey Adjustment Department of School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University. Error Theory and Foundation of Surveying Adjustment [M]. 2nd ed. Wuhan: Wuhan University Press, 2009 (武汉大学测绘学院测量平差学科组. 误差理论与测量平差基础 [M]. 2 版. 武汉: 武汉大学出版社, 2009)
- [16] Cui Xizhang. Generalized Surveying Adjustment [M]. 2nd ed. Wuhan: Wuhan University Press, 2009 (崔希璋. 广义测量平差 [M]. 2 版. 武汉: 武汉大学出版社, 2009)
- [17] Lu Xiuping, Bian Shaofeng, Huang Motao, et al. An Improved Method for Calculating Average Sound Speed in Constant Gradient Sound Ray Tracing Technology [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(5): 590-593 (陆秀平, 边少锋, 黄谟涛, 等. 常梯度声线跟踪中平均声速的改进算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(5): 590-593)
- [18] Kan Guangming, Liu Baohua, Wang Kuiyang, et al. Method for Inversing Sound Velocity Profiles Based on Multi-beam Acoustic Line Travel [J]. *Advances in Marine Science*, 2006, 24(3): 379-383 (阚光明, 刘保华, 王揆洋, 等. 基于多波束声线传播的声速剖面反演法[J]. 海洋科学进展, 2006, 24(3): 379-383)
- [19] Yin Xiaodong, Chen Yue, Tang Jun, et al. A Comparison of International Standards for Hydrographic Survey [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2011, 32(4): 35-38 (殷晓冬, 陈跃, 唐俊, 等. 国际海道测量标准比较研究[J]. 海洋测绘, 2011, 32(4): 35-38)
- [20] Yu Jiacheng, Xu Xueqiang. Digital Water Depth Processing for Multibeam Based on Average Slope of Terrain [J]. *Journal of System Simulation*, 2015, 27(5): 990-996 (于家成, 徐学强. 基于地形平均斜率的多波束数字水深处理[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(5): 990-996)
- [21] Zhao Jianhu, Liu Jingnan. Development of Method in Precise Multi-beam Acoustic Bathymetry [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2002, 27(5): 473-477 (赵建虎, 刘经南. 精密多波束测深系统位置修正方法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2002, 27(5): 473-477)
- [22] Geological Survey Technical Standard of China Geological Survey. D2/T0292-2016 (Specification of Marine Multi-beam Measurement) [S]. Beijing: China Geological Survey, 2012 (中国地质调查局地质调查技术标准(海洋多波束测量规程). D2/T0292-2016 [S]. 北京: 中国地质调查局, 2012)

mization as objective function respectively, and an improved adaptive genetic algorithm based on sigmoid function is proposed to solve the optimization model. Finally, two simulation experiments are executed to validate the validity of proposed method.

**Key words:** region imaging; strip stitching; imaging task planning; lateral swing angle; optimization

**First author:** LI Shixue, postgraduate, majors in imaging task planning of remote sensing satellite. E-mail: shixueli@whu.edu.cn

**Corresponding author:** SHEN Xin, PhD, associated professor. E-mail: xinshen@whu.edu.cn

**Foundation support:** The National Key Research and Development Program of China, No. 2016YFB0500801; the National Natural Science Foundation of China, Nos. 41501383, 91538106, 41501503, 41601490; Fundamental Research Funds for the Central University, No. 2042016kf0163.

(上接第 531 页)

## A Method for Inversing Velocity Profiles and Correcting Seafloor Topography Distortion in Multibeam Systems

MA Kai<sup>1,2</sup> XU Weiming<sup>1</sup> XU Jian<sup>1</sup> DONG Zhouyang<sup>1,3</sup>

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

2 Troops 92899, Ningbo 315299, China

3 Troops 32023, Dalian 116023, China

**Abstract:** To solve the deformed seabed topography caused by the representative error sound velocity profile (SVP) in the flat seafloor during measuring the depth of sea by multibeam systems, a sound velocity profile inversed and seafloor topography corrected method is proposed on the basis of the seabed observation. Looking on the incidence angles and the travel time of beam as the input parameters, the function relationships are built up between the beam displacement and the travel time of the error sound velocity. Then, the modified SVP, which was approximated to the true SVP, is inversed by the indirect adjustment and the Levenberg-Marquardt (LM) method. Thus, correcting the distorted terrain is achieved. Through the field data validating, results show that the inversed SVP is more converged to the original SVP than that of the error SVP. Meanwhile, the distorted terrain caused by the sound velocity errors can be reduced effectively by the proposed inversion method, and the STD (standard deviation) of the modified depth is reduced by 50% above.

**Key words:** multibeam systems; inversion of sound velocity profile; correction of seafloor topography; indirect adjustment

**First author:** MA Kai, master, assistant engineer, specializes in the theories and methods of coastal surveying and hydrographic data processing. E-mail: 869834988@qq.com

**Corresponding author:** XU Weiming, PhD, associate professor. E-mail: xwm05@mails.tsinghua.edu.cn

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, No. 61071006.