

# 多波束测深数据系统误差的削弱方法研究

赵建虎<sup>1</sup> 刘经南<sup>2</sup> 阳凡林<sup>3</sup>

(1 武汉大学测绘学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(2 武汉大学 GPS 工程技术研究中心, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(3 山东科技大学地球信息科学与工程学院, 泰安市岱宗大街 223 号, 271019)

**摘要:**在多波束数据处理中,系统误差一般很少被顾及,部分文献采用两步滤波法削弱了系统误差的影响,但所建模型的可靠性较差。半参数(非参数)法在系统分析了测深数据系统误差来源以及各误差源间相互比例关系的基础上,对系统误差进行分解,确定系统误差各贡献成分的函数模型;根据估计点位,结合已确立的模型,计算各贡献成分对系统误差的贡献量;综合各贡献量,获得估计点深度的系统误差,进而在原始深度数据中消除系统误差的影响。

**关键词:**多波束;系统误差;半参数(非参数)法

**中图分类号:**P207;P229.1

现有滤波方法的一个较大缺陷在于仅对粗差进行诊断和标定,而忽视了系统误差对深度的影响。文献[1]根据重叠区深度数据不匹配的特点,提出了一种近似的平差处理方法——两步滤波法,来削弱系统误差的影响,以实现重叠区深度数据的消融。两步滤波法由于观测与模型参量的相关性不是非常强,有时表面上解决了深度数据的不匹配问题,但实际上可能导致处理后的地形结果产生扭曲或变形,降低了成果质量,因此,需对平差后的结果进行显著性分析。为了真实地反映系统误差的影响,本文将半参数(非参数)法应用于深度数据中系统误差的确定。

## 1 半参数(非参数)法削弱系统误差的基本思想

设声速和姿态测量误差对深度观测量会产生系统性影响  $\Delta$ , 则观测量  $l$  可表达为:

$$l = Ax + \Delta + n \quad (1)$$

式中, 噪声  $n \sim N(0, \sigma^2)$ ;  $\Delta$  为系统误差, 是位置或时间的函数。设正定权阵  $P_n = \text{diag}(\sigma_1^{-2}, \dots, \sigma_m^{-2})$ ,  $\Delta = (\Delta_1, \dots, \Delta_m)^T$ ,  $n = (n_1, \dots, n_m)^T$ ,  $l = (l_1, \dots, l_m)^T$ , 则其法方程为:

$$\begin{bmatrix} A^T P_n A & A^T P_n \\ P_n A^T & P_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \Delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^T P_n l \\ P_n l \end{bmatrix}$$

由于法方程为半正定的, 因而是奇异的, 如果不给定任何约束条件, 则无法得到  $\Delta$  和  $n$  的确定估值。根据 Fisher 和 Hegland(1999)的观点, 在最小二乘法上附加惩罚项  $\alpha \cdot \Delta^T R \Delta$ , 则可获得参数的惟一确定解,  $\alpha$  为规则化参数或平滑参数;  $R$  为规则化器。则新的法方程为:

$$\alpha \cdot \Delta^T R \Delta + n^T P_n n = \min \quad (2)$$

式(2)的矩阵形式为:

$$\alpha \cdot \left( \begin{bmatrix} x^T & \Delta^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \Delta \end{bmatrix} \right) + \left( \begin{bmatrix} A & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \Delta \end{bmatrix} - l \right)^T P_n \left( \begin{bmatrix} A & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \Delta \end{bmatrix} - l \right) = \min$$

则法方程变为:

$$\begin{bmatrix} A^T P_n A & A^T P_n \\ P_n A^T & P_n + \alpha R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \Delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^T P_n l \\ P_n l \end{bmatrix}$$

其解为:

$$\begin{cases} D = P_n + (1/\alpha)R^{-1} \\ N = A^T D^{-1} A \\ \hat{x} = N^{-1} A^T D^{-1} l \\ \Delta = \frac{1}{\alpha} R^{-1} D^{-1} (l - A\hat{x}) \\ \hat{n} = P_n^{-1} D^{-1} (l - A\hat{x}) \end{cases} \quad (3)$$

半参数和非参数的区别在于系数阵  $A$ , 若  $A=0$ , 则称为非参数估计; 否则, 称为半参数估计。根据多波束深度计算的误差来源, 若以深度的真误差  $l = z - \hat{z}$  ( $z$  为深度观测值,  $\hat{z}$  为其真值) 为观测量, 系统误差为  $\Delta$ , 观测噪声为  $n$ , 则观测方程式(1)变为:

$$l = z - \hat{z} = \Delta + n \quad (4)$$

根据式(3)和式(4)可得参数的解为:

$$D = P_n^{-1} + \frac{1}{\alpha} R^{-1}$$

$$\Delta = \frac{1}{\alpha} R^{-1} D^{-1} l \quad (5)$$

$$\hat{n} = P_n^{-1} D^{-1} l$$

## 2 深度数据中系统误差的组成

从上述计算模型来看, 只要深度的观测权能够准确给定, 系统误差  $\Delta$  的确定过程是比较简单和容易的。但半参数(非参数)法的核心并不在这里, 其过程如下。

- 1) 根据系统误差各贡献成分的特点, 对系统误差  $\Delta$  进行分解;
- 2) 分析各贡献成分在总系统误差中所占的比重, 结合测点位置, 确定各成分的量值与位置的函数关系, 并根据该关系计算其他测点相应成分的量值;
- 3) 将各分量值求和, 计算出待插点的系统误差, 并将其从深度中剔除。

若动态传感器和声速剖面仪均严格校验, 可认为姿态和声速参数仅受到偶然误差的影响。考虑环境的复杂性, 声速还受声速断面代表性误差的影响。取横、纵摇  $r, p$  为  $6^\circ$ , 其测量误差  $dr, dp$  均为  $0.1^\circ$ , 根据文献[2]和声速断面代表性误差, 取声速测量误差为  $0.2\text{m/s}$ 。参照文献[3]中声速和姿态误差对深度影响的计算模型, 结合实测数据, 统计它们的影响量  $\Delta_{sp}$  和  $\Delta_{Ma}$  如表 1 所示,  $\Delta_{sp}$  是声速误差对深度的影响;  $\Delta_{Ma}$  是船姿误差对深度的影响。

分析表 1 发现,  $\Delta_{Ma}$  和  $\Delta_{sp}$  在  $\Delta$  中所占的份额分别约为 65.5% 和 34.5%。根据该比例关系、参与计算点的平面位置以及根据式(5)得到的系统误差  $\Delta$ , 可建立如下函数关系:

$$\Delta_{sp} = f_{sp}(x, y) = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 xy + a_4 x^2 + a_5 y^2$$

$$\Delta_{Ma} = f_{Ma}(x, y) = b_0 + b_1 x + b_2 y + b_3 xy + b_4 x^2 + b_5 y^2 \quad (6)$$

将待插点的点位  $(x, y)$  代入式(6), 计算待插

表 1 声速和姿态测量误差对深度的影响/m

Tab. 1 Effect of Sound Velocity Error and Attitude Error on Depth/m

深度	$\Delta_{sp}$	$\Delta_{Ma}$	深度	$\Delta_{sp}$	$\Delta_{Ma}$	深度	$\Delta_{sp}$	$\Delta_{Ma}$
50	0.05	0.09	500	0.50	0.95	2 000	2.00	3.80
100	0.10	0.19	600	0.60	1.14	2 500	2.50	4.75
150	0.15	0.28	700	0.70	1.33	3 000	3.00	5.69
200	0.20	0.38	800	0.80	1.52	4 000	4.00	7.59
300	0.30	0.57	1 000	1.00	1.90	5 000	5.00	9.49
400	0.40	0.76	1 500	1.50	2.85	10 000	10.01	18.98

注:  $\Delta \approx \Delta_{sp} + \Delta_{Ma}$ 。

点的  $\Delta_{sp}$  和  $\Delta_{Ma}$ , 消除系统误差的影响可得:

$$\hat{z} = z - (\Delta_{sp} + \Delta_{Ma}) = z - (f_{sp}(x, y) + f_{Ma}(x, y)) \quad (7)$$

需要说明的是, 上述数据处理需在深度数据粗差剔除工作完成后进行。

## 3 规则化器 $R$ 和规则化参数 $\alpha$ 的确定

根据 Beat Fisher(1999)的观点, 对于一维的情况, 选择矩阵  $G(p \times m$  维), 设定  $R$  为:

$$R = G^T G \quad (8)$$

对  $R$  进行 Cholesky 分解, 设  $A$  为由  $R$  对角线上的特征值组成的对角阵, 即

$$R = Q^T A Q, A = A^{1/2} A^{1/2} \quad (9)$$

则  $G = A^{1/2} Q$

在实际应用中, 为了提高函数估计的平滑度, 在一维情况下,  $G$  通常被定义为一个  $(m-1) \times m$  维的离散微分矩阵 (Varah, 1979):

$$G = \begin{bmatrix} -1 & 1 & & & \\ & -1 & 1 & & \\ & & & \dots & \\ & & & & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

对于包含常值的参量模型, 会出现  $Ge=0$  的情况 ( $e=[1, \dots, 1]^T$ , 是矩阵  $A$  的常值列向量)。

解决该问题的方法是增加约束条件  $\sum_{i=1}^m \Delta_i = 0$ , 则修改后的规则化器  $R$  可表达为:

$$R = \begin{bmatrix} G \\ \gamma e^T \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} G \\ \gamma e^T \end{bmatrix} = G^T G + \gamma^2 e e^T \quad (10)$$

从式(10)可以看出, 附加项  $e e^T$  和拉格朗日因子  $\gamma^2$  被引入到式(2)法则中。根据式(2), 在保证  $\alpha \Delta^T R \Delta + n^T P_n n = \min$  的情况下,  $\alpha$  在整个法则中扮演着平衡  $\Delta^T R \Delta$  和  $n^T P_n n$  大小的作用, 因此,  $\alpha$  对滤波效果起着十分重要的作用。如图 1 所示, 图中参量单位均为 m, 且  $x, y$  经过平移和

缩小。

由图 1 可以看出,  $\alpha$  值较小时, 滤波效果比较好。可解释为,  $\alpha$  较小,  $\Delta$  的作用被降低, 当已知深度点分布均匀且数量较多时, 近似等价于一

个已知的地形曲面来纠正实测的地形曲面; 当已知深度点数量较少, 地形变化复杂, 尽管  $\alpha$  较小, 但其滤波效果也不一定理想。可见,  $\alpha$  的过大或过小对于系统误差的削弱都是不利的。

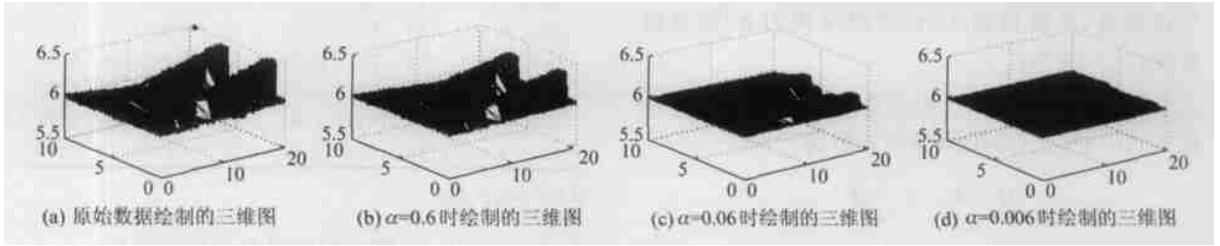


图 1 规则化参数  $\alpha$  对滤波效果的影响

Fig. 1 Effect of Regular Parameter  $\alpha$

根据 Hansen(1992)的观点,  $\alpha$  可通过  $L$  波法确定,  $L$  波法通过构造关于  $\alpha$  的信号法则图来确定  $\alpha$  值。根据式(2),  $\Delta$  和  $n$  的信号法则  $\Delta(\alpha)$  和  $n(\alpha)$  分别为:

$$\Delta(\alpha) = \Delta^T(\alpha)R\Delta(\alpha), n(\alpha) = \hat{n}^T(\alpha)P_n\hat{n}(\alpha)$$

根据  $\alpha$  的平衡作用,  $\alpha$  为某一定值时,  $\Delta(\alpha)$  和  $n(\alpha)$  应分别处于一个量值交换时刻, 根据  $L$  波思想, 这时的  $\alpha$  便是需要寻找的规则化参数。

根据图 1 中的数据, 在  $R$  确定后, 利用  $L$  波法便可确定  $\alpha$ 。从图 2 可以看出, 当  $0 < \alpha < 0.06$  时, 噪声的作用占主要; 当  $\alpha > 0.06$  时, 曲线变化平缓, 系统误差(信号)作用占主要, 因而  $\alpha = 0.06$  实为噪声与信号的转换点, 即在保证式(2)左边两

的有效性, 本文对 Simrad 公司在深度为 6m 试验场实测的一个条带数据(长度为 100m, 宽度为 200m, 测点间隔为 0.1m)进行了滤波。数据处理流程如下。

- 1) 消除测深数据中粗差的影响;
- 2) 抽取部分测深点作为已知点, 根据式(4)建立相应的数学模型;
- 3) 采用式(5)解算系统误差  $\Delta$  和随机误差  $n$ ; 根据式(8)确定  $R$ , 通过  $L$  波法确定  $\alpha$ ;
- 4) 根据表 1 得出的结论对  $\Delta$  进行分解, 并确定函数  $f_{spp}(x, y)$  和  $f_{Ma}(x, y)$ ;
- 5) 将待插点坐标代入  $f_{spp}(x, y)$  和  $f_{Ma}(x, y)$ , 确定  $\Delta_{Ma}$  和  $\Delta_{sp}$ , 并利用式(7)得到  $\hat{z}$ 。

图 1(a)、1(b)为滤波前后该地区的 DTM 图。通过比较可以看出, 滤波效果是比较明显的。

将上述方法应用于 RESON 公司提供的相邻两个条带重叠区的深度数据滤波中, 比较滤波前后等深线的分布(图 3)不难发现, 滤波后, 在同一个条带内, 等深线分布更加合理、平滑; 同时, 条带重叠区深度的不匹配问题也得到了很好的解决。

由于两个条带的测深数据处理采用同一种方法, 且分别进行, 故重叠区深度数据不匹配问题的消除(或很大程度上的削弱)更加验证了这种方法的正确性。

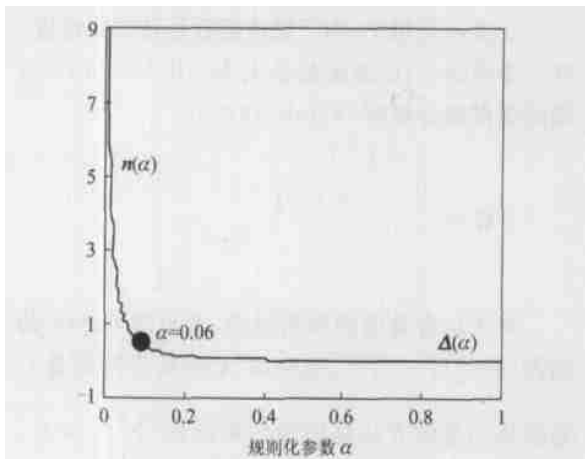


图 2  $\alpha$  的影响及其确定

Fig. 2 Effect and Determination of  $\alpha$

项和最小的情况下, 0.06 实为要确定的规则化参数  $\alpha$  的值。就实际滤波效果来看(图 1),  $\alpha = 0.06$  时的滤波效果是比较理想的。

### 4 滤波实践及分析

为了验证半参数法削弱测深数据中系统误差

### 5 结 语

在使用半参数法(或非参数法)削弱系统误差时, 要注意如下几点。

- 1) 半参数(非参数)法需在剔除粗差影响后进行。
- 2) 半参数(非参数)法确定系统误差的关

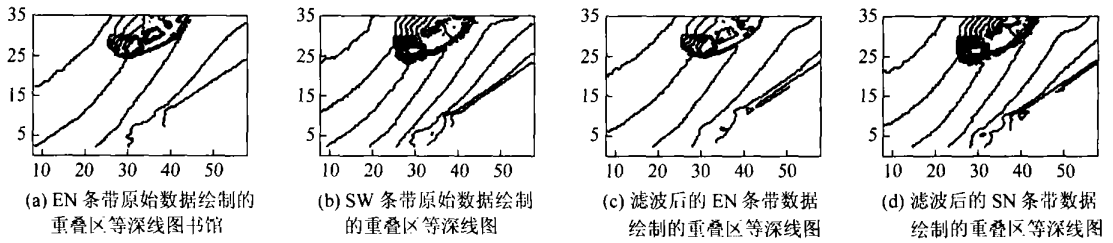


图 3 半参数法滤波前后条带重叠区的等深线图

Fig. 3 Comparison of Contours Before Filter and After Filter in Overlap Area

键在于确定正则化器  $R$  和正则化参数  $\alpha$ , 以及对系统误差各组成成分的认识和所占份额的了解。

3) 另外一个影响系统误差确定的因素是, 系统误差各组成成分关于位置的函数模型  $\Delta = f(x, y)$  给定得是否合适。  $f(x, y)$  的准确性主要取决于模型确定得是否合适以及数据处理区域的大小和地形变化的复杂程度等。

为了提高半参数(非参数)法确定系统误差的精度, 建议在地形变化非常复杂的地区附加较多的已知深度数据。

## 参 考 文 献

- 1 黄谟涛, 翟国君, 管 铮, 等. 多波束测深技术研究进展与展望. 第 12 届海洋测绘年会, 杭州, 2001
- 2 赵建虎. 多波束深度及图像数据处理方法研究: [ 博士论文 ]. 武汉: 武汉大学, 2002
- 3 Green P. J. Penalised Likelihood for General Semi-parametric Regression Model. International Statistical Review, 1998, 53, 245 ~ 269

第一作者简介: 赵建虎, 博士, 副教授。现从事 GPS 和海洋测绘研究。

E-mail: jhzhao@sgg.wtusm.edu.cn

## Weaken Systematic Error in Depth Data of MES

ZHAO Jianhu<sup>1</sup> LIU Jingnan<sup>2</sup> YANG Fanlin<sup>3</sup>

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

(2 Research Center of GPS, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(3 Geoinformation Science and Engineering College, Shandong University of Science and Technology, 223 Daizong Street, Taian 271019, China)

**Abstract:** This paper analyzes the reason of systematic error forming, the sound velocity error and attitude error are thought to be two main contribution factors. Although the error character themselves shows random, their effect for depth presents systematic. For a sonar system, according to the nominal accuracy, in whole systematic error, the contribution of sound velocity error for depth is about 35%, and the contribution of attitude error for depth is about 65%. Based on the proportion, according to the character of non-parametric (semi-parametric) method, the systematic error in depth is estimated and weakened.

**Key words:** MES (multibeam echo sounder); systematic error; semi-parameter (non-parameter) estimation

About the first author: ZHAO Jianhu, Ph. D. associate professor, his major research orientation is GPS and Hydrography.

E-mail: jhzhao@sgg.wtusm.edu.cn

(责任编辑: 平子)