

多波束测深异常数据检测与剔除方法研究综述

纪雪¹, 周兴华^{1,2}, 唐秋华¹, 赵洪臣^{1,2}

(1. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 南京大学 地理与海洋科学学院, 南京 210023)

摘要: 针对多波束测深数据处理在测深异常数据检测与剔除方法上存在的不足, 综合分析了近几十年国内外研究人员在多波束测深异常数据检测与剔除方法方面的研究成果, 根据工作原理将其分为基于数据统计理论和基于函数或统计推值比较两类方法, 选取中值滤波、小波分析、CUBE 算法、趋势面滤波、最小二乘支持向量机滤波法等典型的多波束异常数据检测方法进行重点介绍, 并通过列表的方式对不同检测方法进行优缺点对比分析。最后总结了多波束测深异常数据检测与剔除方法研究的现状和趋势。

关键词: 多波束测深; 异常数据; 异常值检测; 滤波

【中图分类号】P229

【文献标志码】A

【文章编号】1009-2307(2018)01-0038-07

DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2018.01.008

A survey of filtering methods in multibeam bathymetry outliers data

Abstract: According to the fact that there is no enough algorithm of multibeam bathymetric outliers detection and filter, this paper analyzed the research results of multibeam bathymetric outliers detection and filter in recent decades. According to the working principle, the existing methods are divided into two categories. One method is based on statistical theory of data and the other is based on the function or statistical value comparison. The typical methods of multibeam bathymetric outliers detection and filter, such as median filter, wavelet analysis, CUBE algorithm, trend surface filter, LS-SVM are introduced. The advantage and disadvantage of the different detecting methods are compared through list. This paper summarizes the research status and trend of multibeam bathymetric outliers detection and filter, which has certain significance for the further development of multibeam bathymetric outliers detection and filter.

Keywords: multibeam bathymetry; outliers; outliers detection; filter

Ji Xue¹, ZHOU Xinghua^{1,2}, TANG Qiuhua¹, ZHAO Hongchen^{1,2} (1. The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao, Shandong 266061, China; 2. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China)



作者简介: 纪雪(1989—), 女, 山东青岛人, 硕士研究生, 主要研究方向为海底地形地貌数据精细处理、分析及应用。

E-mail: jixuetimeless@163.com

收稿日期: 2016-05-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(40706038); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(2011T05); 国家国际科技合作专项资助项目(2014DFA21710); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2009FM005); 海洋公益性行业科研专项(201205004)
通信作者: 周兴华 教授 E-mail: xhzhou@fia.org.cn

0 引言

随着通信技术、计算机技术、数据处理技术等现代科学技术的发展, 多波束测深系统(multibeam bathymetric system, MBES)因其高覆盖率、高分辨率、高精度、采样密集等优势日渐成为海洋测深的主流设备^[1]。其工作过程中因受复杂海洋动态环境、仪器自身及人为操作等因素影响, 多波束测深数据不可避免地存在大量异常数据, 而测深数据的质量直接影响真实海底地形的描述。

尽管多波束测深系统出现至今已有半个多世纪, 但其在数据处理理论的研究方面起步相对较晚。以人工剔除和人机交互半自动剔除方法为代表的传统滤波方式, 面对海量的测量数据及手动

操作中不可避免地带入人为主观因素的影响, 表现出工作量繁重、效率低下、严重滞后性等种种问题, 因而长期以来高效、客观的多波束测深异常值自动检测方法一直是各国多波束测深系统仪器厂商和相关科研院所的科研人员的关注重点。

对于多波束测深异常数据检测与剔除的问题, 国内外专家学者对其进行了大量的研究工作并得到了一系列宝贵的经验和可靠的成果。总体看来, 这些滤波方法按照数据规模可划分为区域类和条带类; 按编辑方式可划分为手工类和自动类; 按估计方法可划分为抗差类和非抗差类; 按处理形式可划分为实时类和后处理类^[2]。为进一步探索高效、实时、自动化程度高、异常值检测精准的多波束测深异常值检测与剔除方法, 现将已有的方法按工作原理分类并进行分析和归纳总结。

1 基于数据统计理论的检测方法

随着统计学在地学中的不断发展和应用, 越来越多的学者将其应用到多波束测深当中以解决实际问题。数据统计理论是基于数据的统计特征, 将待测点的数值与邻域内其他深度值作对比, 按照一定的标准规则作接收或拒绝判断, 关于多波束滤波方法的研究国外起步较早, 最早的尝试可追溯到 20 世纪 80 年代。

1.1 国外研究现状

目前国外应用数据统计理论进行多波束滤波的研究成果主要有文献 [3] 提出的 COP 算法, 文献 [4] 提出的 Ware 法, 文献 [5] 提出的 AR 模型法, 文献 [6] 提出的 Du 法, 文献 [7] 提出的统计法、 3×3 Boxes 法和内部坡度方差法, 文献 [8] 提出的鲁棒统计法, 法国海道测量局 (SHOM) 通过局部区域内邻近点深度值的均值和方差来设置门限定位异常值 (1998), Simrad 公司开发的 Neptune 后处理软件应用的 Binstst 方法, 文献 [9] 提出的多通道滤波法, 文献 [10] 提出的中值滤波等, 下面就比较常用的滤波方式进行归纳总结。

1) COP 法。NOAA COP 邻域选择法 (combined offline processing, COP) 是最早的多波束异常值检测方法^[3]。该方法根据船航行方向的时间和垂直航行方向的距离, 围绕兴趣点进行邻域选取, 根据邻域波束的测深值, 确定深度的平均值 μ 和标准偏差 σ , 根据 2σ 或 3σ 的原则

对大于设定误差的波束数据进行删除操作, 反之则保留。

2) Ware 法。该方法是一种基于加权平均移动的滤波方法^[4]。假设海底只在相对低的 (空间) 频率变化, 在条带数据覆盖范围内求解标准偏差 σ , 并识别出标准异常高于平均值的深度点, 即水深必须在标准差的允许范围内, 这就使得其拒绝准则与观测海区海底变化成正比, 而与水深不一定成比例, 同样根据 2σ 或 3σ 判断准则发现并标定奇异点^[11]。

3) Du 法。Du 法是基于聚类模式思想, 类似于交互式测幅编辑方法中, 凭直觉选择界外值的方式进行自动探测界外值, 即通过估计测深数据的分布密度和直方图来确定异常值, 并模拟操作人员的数据处理操作流程实现数据的自动处理^[6]。该方法打破了之前每次只检测一个波束的局限, 在假定所有的邻近波束都可以接受的前提下, 使用分区中所有的波束并寻求自然的分离方式。

4) 中值滤波^[10]。要检测测深点 $p(x, y, z)$ 是否为异常值, 首先定位该测深点; 然后取其邻域范围内的 M 个测深点, 将这 $M+1$ 个测深点根据深度值排序, 选取排序后深度值序列的中值 z_{ref} 作为该测深点的参考深度值; 最后利用经典的 3σ 进行异常值判别, 如式 (1) ~ 式 (3) 所示。

$$|z - z_{ref}| > 3\sigma \quad (1)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{M+1} \sum_{i=1}^{M+1} (z_i - \mu)^2 \quad (2)$$

$$\mu = \frac{1}{M+1} \sum_{i=1}^{M+1} z_i \quad (3)$$

式中: σ 为 $z_i (i = 1, 2, \dots, M+1)$ 的均方差; μ 为均值。若式 (2) 成立, 则该测深点判断为异常值; 反之, 该点属于正常测深值。被检测为异常值的测深点可直接从测深数据中剔除, 也可通过邻域测深值相关计算的插值代替。中值滤波计算方法简单且计算量小, 可以较好地克服线性滤波器带来的细节模糊, 具有一定的抗差性^[12]; 对小异常值不敏感, 对细节有一定的影响, 对独立脉冲式大异常值检测效果较好; 在平坦地形中, 当异常值分布较密, 即呈簇群分布时, 异常值的检测效果较差。

上面提到的 4 种滤波方法提出得比较早, 在自动化程度以及准确度等方面难免有不足, 其滤波方法对比见表 1。

表 1 4 种滤波方法比较

Tab 1 Comparison of Several Filtering Methods

对此项目	方法			
	COP	Ware	Du	中值滤波
海底假设	不明确	相对平坦	无	相对平坦
领域范围确定	不	敏感	不	敏感
操作对象	单 Ping	多 Ping	多 Ping	多 Ping
邻近波束选择	时间/ 横向距离	可变	可变	可变
无邻近波束时的操作	不运行	运行	运行	不运行
单尖峰信号处理	不隐藏	可能隐藏	不隐藏	不隐藏
海底粗糙敏感性	不敏感	敏感	敏感	敏感

1.2 国内研究现状

相对于国外的多波束异常值检测领域国内的工作开展较晚, 尽管如此, 国内学者在总结国外先进思想和技术的同时创新性得提出了很多方法, 如文献 [13] 研究了重叠区的近似平差法, 文献 [2] 提出基于中值滤波、局部方差检测和小波分析相结合的测深数据粗差探测法。

小波分析检测方法综合中值滤波、局部方差检测以及小波分析的思想, 首先进行中值滤波操作但不直接进行异常值剔除处理, 在兴趣点处确定一个奇数像元的窗口 W , 窗口内各像元按灰度或数值大小排序, 并用序列中间值 $g(x, y)$ 替代原数值 $f(x, y)$, 如式(4)所示。

$$g(x, y) = \text{median}\{f(x-k, y-l), (k, l) \in W\} \quad (4)$$

得到全局方差和局部方差, 再用全局方差计算小波阈值, 用局部方差剔除异常值, 局部方差的计算如式(5)所示。

$$\hat{\sigma}_j^2 = \frac{1}{j-1} \sum_{i=1}^j [g_i(x, y) - u_i]^2 \quad (5)$$

式中: j 是点数; u_i 是中值滤波后局部窗口内的点的平均深度值; $g_i(x, y)$ 为测深值, 比较后两者的差值, 若超过 $3\hat{\sigma}_i$ 则判定为异常值, 并利用局域内插值代替该点的深度。最后利用小波分析剔除一些较小的随机噪声, 小波去噪中小波系数阈值确定非常关键, 它直接影响滤波效果, 通常阈值的确定公式为式(6)。

$$t = \sqrt{2 \lg N} \sigma \quad (6)$$

式中: σ 为噪声方差; N 是点数。噪声方差可以通过已有的一些阈值估计方法得到。

总的来说, 该方法综合了中值滤波、局域方差检测和小波分析的优势, 在避免中值滤波对细节产生破坏的同时, 又增强了数据的抗差性和可

靠性, 其将非平稳的分形信号转换成平稳的信号进行处理, 从理论上保证了算法的严密性, 运算效率高, 自动化程度高, 适用于较大区域^[2]。但由于小波变换是按照频率高低对信号进行分解的, 所以对连续多波束异常值的阈值异常值检测效果不佳, 加之该方法无法定位异常值, 因而对后期判断处理效果有一定不足。

2 基于函数或统计推值比较的检测方法

面对多波束滤波研究过程中经典统计学不断暴露出的弊端, 专家学者们试图通过借助变异函数及统计外推等方法, 在已有方法的基础上将数据本身及其空间位置相结合, 即将变异分析、区域变化以及空间估计等方法相结合, 用于多波束测深数据滤波。

2.1 国外研究现状

到目前为止国外在该方面已进行了不少的尝试和研究, 如文献 [14] 提出的 Eeg 法, 文献 [15] 利用多 ping 测深数据进行最小二乘曲面拟合, 文献 [16-17] 提出 CUBE 算法, 文献 [18] 提出三角网图法, 文献 [19] 提出自适应曲面法, 文献 [20] 提出一种基于平均内插细分方法的测深异常值快速检测与剔除算法等方法。

1) Eeg 法。该方法通过表格的方式将每个潜在的尖峰信号用嫡值进行量化, 根据嫡值来设置阈值判断尖峰信号是否予以接受, 即通过识别和降低测深尖峰信号的方法实现深度数据的滤波。首先得到能近似描述被选择点附近海底的多项式曲面, 并在此基础上确定海面的深度平均值和标准方差。假设被选择点的深度为 z , 邻域波束的实测深度为 z_k ($k = 1, 2, \dots, n$), 则嫡值 $q(z)$ 的定义见式(7)。

$$\left. \begin{aligned} q(z) &= \frac{(n-1)(\text{Var1} - \text{Var2})}{\text{Var2}} \\ \text{Var1} &= (z - \bar{z})^2 + \sum_{k=1}^n (z_k - \bar{z})^2 \\ \text{Var2} &= \sum_{k=1}^n (z_k - \hat{z})^2 \\ \bar{z} &= \frac{1}{n+1} (z + \sum_{k=1}^n z_k) \\ \hat{z} &= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n z_k \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

嫡值确定了选择点的残差与周围点残差对标准偏差平方和贡献的比值, 反映了兴趣点同其邻域深度点之间的相对关系。嫡值越大, 关心点与

周围点的偏差越大^[14]。

2) CUBE 算法。CUBE 算法是通过建立贝叶斯动态线性模型 BDLM (Bayesian dynamic linear model), 利用 Kalman 滤波和多重估计, 结合测深数据的水平和垂向不确定度来计算网格节点, 对测区内的网格节点进行水深及其误差估计的方法^[16-17]。其具体操作流程^[21]如下: ①获取测区网格节点平面坐标, 选取适用于该节点水深估计的实测水深数据; ②采用中值滤波方法对设定水深进行估计序列; ③用动态卡尔曼滤波模型生成该节点水深值及误差估计; ④若该节点滤波过程中产生“多重水深”估计值, 则运用“最优”原则选取合适的水深估计值。CUBE 算法自动处理, 效率高, 抗差性强, 但仍不能替代手工作业方法实现全自动化处理, 在测区的边缘地带, 噪声数据比例过大和测区地形变化较为复杂的区域(如沉船、暗礁等)极易产生失效的情况^[22]。

3) 基于平均内插细分法。空间均值是数据集中比较有力的组成部分, 适合用作起点趋势分析, 该算法利用数据点之间的空间相关性, 通过细分算法这种比较自然的方法利用均值快速产生一个全局趋势面, 可准确地复制数据集的趋势并可实时应用^[20]。

该方法目前还只是一个算例, 实验验证具有一定的滤波效果, 但稳健性不够。为对其滤波效果进行全面研究还需要将其完善成成品, 加入更健壮的块平均估计等。以上滤波方式具体特征的比较分析见表 2。

表 2 几种滤波方式的相关特征

检测方法	抗差性	计算复杂度	计算速度	操作对象
CUBE	强	大	慢	网格节点或多 Ping
平均内插细分	较弱	小	快	网格节点或多 Ping

检测方法	自动化程度	参数或窗口选择	滤波精度
CUBE	高	敏感(需反复调节有关参数)	高
平均内插细分	一般	敏感(栅格宽度影响滤波精度)	一般

2.2 国内研究现状

国内科研工作者在这个领域也做了大量的研究, 如文献 [23] 提出了基于趋势面分析的粗差探测与剔除和相邻条带数据的整体拼接方法, 文献 [1] 提出了抗差 M 估计滤波, 文献 [24] 提出的交互式滤波, 文献 [25] 提出的利用 Bayes 估计和基于最小二乘支持向量机进行多波束测深异常

数据探测方法, 文献 [26] 提出了抗差 Kriging 拟合, 文献 [27] 在提出了截断最小二乘估计的趋势面滤波, 文献 [28] 提出了基于动态聚类的单声脉冲的多波束测深数据滤波方法。

2.2.1 趋势面滤波

趋势面滤波是将测深数据的空间坐标信息(平面坐标和深度值)用多项式曲面函数 $z = f(x, y)$ 拟合构造出一个能近似反映海底地形的参考趋势面, 根据测量深度值 z 与该测深点在参考趋势面上的参考深度值 \hat{z} 之间的残差, 并结合 2σ 或 3σ 原则来判别异常值^[29]。

一般情况下, 多项式曲面函数 f 可给定为式(8)形式。

$$f(x, y) = \sum_{k=0}^j \sum_{i=0}^k a_{ki} x^{(k-i)} y^i \quad (8)$$

式中: (x, y) 为测深点水平位置坐标; a 为曲面函数模型系数; j 为曲面函数阶次, 一般取值 2、3。

趋势面滤波计算简单, 对显著的异常值剔除效果好, 对小异常值检测能力较差, 对平坦海区滤波效果较好, 计算范围、模型阶次和检测原则的选定对异常值检测结果的影响较大, 如果趋势面模型构建不合理, 会对异常值的检测产生较大影响, 因而只适用于精度要求不高的海底调查。

2.2.2 抗差 M 估计趋势面滤波

抗差 M 估计方法是通过使用某测深点邻域范围内所包含的测深数据的选权迭代加权平均值作为该测深点的深度估计进行异常值的识别与检测的方法^[30]。

基于抗差 M 估计的参数平差模型抗差解为式(9)。

$$\hat{X}^{(k+1)} = (A^T \bar{P}^{(k)} A)^{-1} A^T \bar{P} L \quad (9)$$

第 $k+1$ 步迭代结果为式(10)。

$$\hat{X}^{(k+1)} = (A^T \bar{P}^{(k)} A)^{-1} A^T \bar{P}^{(k)} L \quad (10)$$

式中: X 为模型的待定参数向量; A 为方程系数阵; \bar{P} 为等权阵; L 为自由项。假设被检测测深点 p 邻域内有 m 个测深值为 $z_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 的测深点 p_i , 在此基础上建立基于抗差 M 估计的选权迭代加权平均模型为式(11)。

$$\hat{z}^{(k+1)} = (\sum_{i=1}^m \bar{p}_i^{(k)} z_i) / \sum_{i=1}^m \bar{p}_i^{(k)} \quad (11)$$

式中: \bar{p}_i 为等价权。

抗差 M 估计相比于基于残差平方和最小原则的最小二乘估计, 一定程度上解决了趋势面拟合深度数据受异常值污染而造成的失真, 从而无法获得可靠的残差用于异常值判断的问题, 该方法的异常值检测虚警率较高, 但该方法计算复杂, 对迭代函数、权函数等参数的选择很敏感, 一般用于地形复杂的海区。

2.2.3 最小二乘支持向量机滤波法

该方法基于最小二乘支持向量机 (LS-SVM) 构造趋势面, 通过选取不同的核函数、调整权重系数, 得到一类具有最优特性的决策函数^[25]。

LS-SVM 的优化目标和约束条件分别为式 (12) 和式 (13)。

$$\min(\frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \sum_{i=1}^n \xi_i) \quad (12)$$

$$L_i = \omega^T \varphi(x_i, y_i) + b + \xi_i \quad (13)$$

式中: ω 为权向量; C 为权重系数; ξ_i 为松弛因子; (x_i, y_i) 为平面坐标; L_i 为测深值; 非线性映射 $\varphi(x_i, y_i)$ 为平面坐标的函数, 属于函数类 $H = \text{span}\{\varphi_0(x, y), \dots, \varphi_k(x, y)\}$; i 为样本编号 ($i = 1, 2, \dots, n$); b 为实常数。引入拉格朗日函数 F 求解实常数 b 及拉格朗日乘子 a_i 进而利用 LS-SVM 构造最优决策函数, 如式 (14) 所示。

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^n a_i K((x, y), (x_i, y_i)) + b \quad (14)$$

利用选取的训练样本及核函数构造出海底趋势面之后, 结合实际观测的水深值得残差值, 以 2σ 原则对测深数据中的异常值进行剔除。

LS-SVM 应用到测深数据异常值检测与剔除中, 训练样本及核函数的选取是关键, 且应尽量选取中央波束并结合测深点平面坐标构成训练样本, 若中央波束存在较多的异常数据, 那么训练样本不仅不能真实地反映海底实际地形, 且核函数中的参数及权重系数的选取也将变得更加复杂, 从而影响滤波效果。

2.2.4 截断最小二乘估计的趋势面滤波

截断最小二乘估计是一种具有最高崩溃点的稳健估计方法, 定义为式 (15)~式 (17)。

$$\hat{\beta}_{\text{LTS}} = \arg \min_{\beta} (\sum_{i=1}^h r_i^2) \quad (15)$$

$$r_i = y_i - f(x_i, \beta) \quad (16)$$

$$h = \text{INT}[n/2] + 1 \quad (17)$$

式中: $\hat{\beta}_{\text{LTS}}$ 为待求估计参数的最优解; β 为估计参数, 通常用单变量参数估计模型求解; r_i 为观测值 y_i 与估计值 $f(x_i, \beta)$ 的残差, 按照升序排列; n 为参与估计的数据点量; h 表示 n 的一半数值。截断最小二乘估计实质就是在求解曲面参数的最优解。最后利用测深值与趋势面的残差来识别异常值^[27]。

基于截断最小二乘估计高崩溃点特性, 算法具有很强的稳健性, 一定程度上避免了异常值参与趋势面拟合, 提高拟合曲面的真实性以及异常值剔除效果, 对集群存在和离散存在的异常深度数据点均具有较好的检测效果; 对窗口尺寸比较敏感, 窗口尺寸的选择直接影响滤波的精度。

由于算法本身的优势和局限性所以不同估计方法表现出不同的滤波特性, 几种估计方法的比较见表 3。

表 3 不同估计方法的滤波特征比较

Tah 3 Filtering Feature Comparison of Different Estimation Methods

滤波特性	最小二乘估计	抗差 M 估计	截断最小二乘估计
抗差性	无 (1/n)	有	有 (50%)
计算速度	最快	慢	较快
滤波效果	大异常值剔除效果较好, 小异常值、集群异常值效果较差	对参数选择很敏感, 对大、小、集群异常值效果较好	对窗口尺寸敏感, 对集群和离散的异常值均剔除效果较好

2.2.5 动态聚类的单声脉冲滤波

手动滤波的判断原则往往是看兴趣点相对于其他数据点是不是“孤立”的, 聚类的思想正是来源于此。对一定范围内深度数据的聚类组合来提取地形特征, 模拟人对地形的判断, 逐步实现对真实地形特征的提取, 从而实现对聚类区域外的异常点的剔除, 其操作流程大致可分成测深数据聚类集合的划分、特征域的选定和聚类目标输出 3 步^[28]。

该方法不同于传统方法对一定面积内的测深数据进行拟合进而滤波, 可对单声脉冲进行实时连续滤波, 趋势地形因子的加入, 有效地避免了局部连续假地形对滤波结果的影响, 准确度较高。但当存在大面积、连续深度异常或是单声脉冲测深数据沿侧向中心距方向存在连续较大距离数据缺失时, 聚类滤波就会失效。

3 结束语

本文对多波束测深异常值检测与剔除方法按照其工作原理进行了分类分析和归纳总结, 发现目前绝大多数滤波方法都是在假设海底地形变化连续、平缓的前提下提出的。对于困难海区以及地形复杂的海区并不普遍适用。大部分滤波方法是基于坐标格网及沿着或垂直航迹方向滑动等方式进行滤波操作, 这就存在边缘部分因为缺少数据而产生异常值剔除不完全的问题。虽然滤波自动化程度在一步步提高, 但每种方法都存在一定的缺陷和不足, 自动化成果不尽如人意, 所以始终不能完全摆脱人工。不同滤波方法对地形特征的适应性、数据空间相关性、不同类型异常值敏感性、抗差能力、异常值检测虚警率、参数设置敏感度、自动化程度、算法复杂度和运算速度等方面往往表现出不同的特性, 如何在保持算法优

势的基础上对不同算法进行有效组合, 取长补短, 提高测深数据值的质量有待于进一步研究。国内多波束异常自动检测理论与方法的研究起步较晚, 而且发展速度相对较慢, 研究的方法存在一定的局限性。实时、高效、高度自动化的滤波方法的研究和尝试, 开发功能完善的多波束数据处理软件是我们接下来努力的方向。

参考文献

- [1] 黄谟涛, 翟国君, 王瑞, 等. 海洋测量异常数据的检测[J]. 测绘学报, 1999, 28(3): 269-277. (HUANG Mo-tao, ZHAI Guojun, WANG Rui, et al. Detection of abnormal data in marine survey[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1999, 28(3): 269-277.)
- [2] 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. (YANG Fanlin, LIU Jingnan, ZHAO Jianhu. Detecting outliers and filtering noises in multibeam data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2004, 29(1): 80-83.)
- [3] GUENTHER G C, GREEN J E. Improved depth selection in the bathymetric swath survey system(BS3) combined offline processing(COP)algorithm[R]. National Oceanic and Atmospheric Administration, Technical Report OTES-10, Department of Commerce, Rockvill, MD, 1982.
- [4] WARE C, SLIPP L, WONG K W, et al. A system for cleaning high volume bathymetry [J]. International Hydrographic Review, 1992, 69: 77-94.
- [5] SHAW S, ARNOLD J. Automated error detection in multibeam bathymetry data[J]. Ocean, IEEE, 1993: 89-94.
- [6] DU Z, WELLS D E, MAYER L A. An approach to automatic detection of outliers in multibeam echo sounding data[J]. Hydrographic Journal, 1996, 79: 19-25.
- [7] BOURILLET J F, EDY C, RAMBERT F, et al. Swath mapping system processing: bathymetry and cartography [J]. Marine Geophysical Researches, 1996, 18: 487-506.
- [8] BISQUAY H, FREULON X, DE FOUQUET C, et al. Multibeam data cleaning for hydrography using geostatistics [C]//OCEANS' 98 Conference Proceedings. [S. l.]: [s. n.], 1998: 1135-1143.
- [9] LIRAKIS C B, K P B. Automated multibeam data cleaning and target detection[C]//Oceans 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. [S. l.]: [s. n.], 2000: 719-723.
- [10] MANN M, AGATHOKLIS P, ANTONIOU A. Automatic outlier detection in multibeam data using median filtering[J]. IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing. 2001, 2: 690-693.
- [11] 董江, 任立生. 基于趋势面的多波束测深数据滤波方法[J]. 海洋测绘, 2007, 27(6): 25-28. (DONG Jiang, REN Lisheng. Filter of MBS sounding data based on trend surface[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2007, 27(6): 25-28.)
- [12] 孙岚, 王海栋, 余成道, 等. 多波束测深数据异常值检测算法比较[J]. 海洋测绘, 2009, 29(5): 57-60. (SUN Lan, WANG Haidong, YU Chengdao, et al. Detection algorithms in multibeam bathymetry outliers data[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2009, 29(5): 57-60.)
- [13] 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. (ZHAO Jianhu, LIU Jingnan. Multibeam echo sounding and image data processing[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2008.)
- [14] EEG J. On the identification of spikes in multibeam bathymetry data[J]. Ocean, IEEE, 1993: 89-94.
- [15] MITCHELL N C. Processing and analysis of simrad multibeam sonar data[J]. Marine Geophysical Researches, 1996, 18: 729-739.
- [16] CALDER B, MAYER L A. Robust automatic multibeam bathymetric processing [C]//U. S. Hydrographic Conference. USA: Norfolk, VA, 2001.
- [17] CALDER B, MAYER L A. Automatic processing of high-rate, high-density multibeam echosounder data [J]. Geochem. Geophys. Geosyst, 2003, 4(6): 24-48.
- [18] CANEPA G, BERGEM O, PACE N G. A new algorithm for automatic processing of bathymetric data[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2003, 28(1): 62-77.
- [19] DEBESE N. Multibeam echosounder data cleaning through an adaptive surface-based approach [C]//U. S. Hydrographic Conference. Virginia: Norfolk, 2007.
- [20] BJØRKE J T, NILSEN S. Fast trend extraction and identification of spikes in bathymetric data[J]. Computers & Geosciences, 2009, 35: 1061-1071.
- [21] 贾帅东, 张立华, 曹鸿博. 基于 CUBE 算法的多波束水深异常值剔除[J]. 测绘科学, 2010, 35(s1): 57-59. (JIA Shuaidong, ZHANG Lihua, CAO Hongbo. A method for eliminating outliers of multibeam echosounder data based on CUBE[J]. Science of Surveying and Mapping, 2010, 35(s1): 57-59.)
- [22] 孙岚, 刘雁春, 陆秀平, 等. 利用 CUBE 算法处理多波束测深数据研究[C]//第二十一届海洋测绘综合性学术研讨会. 成都: [出版者不详], 2009: 122-126. (SUN Lan, LIU Yanchun, LU Xiuping, et al. Study on processing method of multibeam sounding data based on CUBE algorithm [C]//The 21st comprehensive Symposium on

- Marine of Surveying and Mapping, Chengdu: [s. n.], 2009:122-126.)
- [23] 朱庆,李德仁. 多波束测深数据的误差分析与处理[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 1998, 23(1): 43-46. (ZHU Qing, LI Deren. Error analysis and processing of multibeam soundings[J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 1998, 23(1): 43-46.)
- [24] 吴自银,李家彪. 多波束勘测的数据编辑方法[J]. 海洋通报, 2000, 19(3): 74-78. (WU Ziyin, LI Jiabiao. The editing methods of multi-beam survey data[J]. Marine Science Bulletin, 2000, 19(3): 74-78.)
- [25] 黄贤源,翟国君,隋立芬,等. 最小二乘支持向量机在海洋测深异常值探测中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2010, 35(10): 1188-1191. (HUANG Xianyuan, ZHAI Guojun, SUI Lifan, et al. Application of least square support vector machine to detecting outliers of multi-beam data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2010, 35(10): 1188-1191.)
- [26] 王海栋,柴洪洲,王敏. 多波束测深数据的抗差 Kriging 拟合[J]. 测绘学报, 2011, 4(2): 238-242. (WANG Haidong, CHAI Hongzhou, WANG Min. Multibeam bathymetry fitting based on robust Kriging[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2011, 4(2): 238-242.)
- [27] 陆丹,李海森,魏玉阔,等. 基于截断最小二乘估计的多波束异常测深值剔除方法[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(1): 89-93. (LU Dan, LI Haidong, WEI Yukuo, et al. A method of multi-beam bathymetry outliers elimination based on trimmed least squares estimation[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2012, 32(1): 89-93.)
- [28] 陈小龙,庞永杰,李晔. 基于动态聚类的单声脉冲多波束测深数据滤波[J]. 热带海洋学报, 2012, 32(5): 73-78. (CHEN Xiaolong, PANG Yongjie, LI Ye. Single ping filtering of multi-beam echo sounder data based on dynamic clustering[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2012, 32(5): 73-78.)
- [29] 何义斌,吴书帮,谢洪燕,等. 多波束异常测深数据检测方法实践[J]. 测绘科学, 2004, 29(1): 50-52. (HE Yibin, WU Shubang, XIE Hongyan, et al. Study of detection and filter of outlier on the sounding data of MES[J]. Science of Surveying and Mapping, 2004, 29(1): 50-52.)
- [30] 黄谟涛,翟国君,王瑞,等. 海洋测量中异常数据的定位研究[J]. 海洋测绘, 1999, 19(2): 10-19. (HUANG Motang, ZHAI Guojun, WANG Rui, et al. The detection of abnormal data in marine survey[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 1999, 19(2): 10-19.)

(责任编辑:邓国臣)

(上接第 37 页)

- [17] YIN H. Sparse representation with learned multi-scale dictionary for image fusion[J]. Neurocomputing, 2015, 148(148): 600-610.
- [18] RUBINSTEIN R, BRUCKSTEIN A M, ELAD M. Dictionaries for sparse representation modeling[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(6): 1045-1057.
- [19] ENGAN K, AASE S O, HUSOY J H. Multi-frame compression: theory and design[J]. Signal Processing, 2000, 80(10): 2121-2140.
- [20] AHARON M, ELAD M, BRUCKSTEIN A. K-SVD: An algorithm for designing overcomplete dictionaries for sparse representation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(11): 4311-4322.
- [21] AIAZZI B, BARNOTI S, SELVA M. Improving component substitution pansharpening through multivariate regression of MS + Pan data[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2007, 45(10): 3230-3239.
- [22] PAJARES G, CRUZ J M D L. A wavelet-based image fusion tutorial[J]. Pattern Recognition, 2004, 37(9): 1855-1872.
- [23] TU T M, SU S C, SHYU H C, et al. A new look at IHS-like image fusion methods[J]. Information Fusion, 2001, 2(3): 177-186.
- [24] LABEN C A, BROWER B V. Process for enhancing the spatial resolution of multispectral imagery using pan-sharpening[Z]. [S. l.]: [s. n.], 2000.
- [25] JIANG C, ZHANG H, SHEN H, et al. A practical compressed sensing-based pan-sharpening method[J]. Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, 2012, 9(4): 629-633.
- [26] WALD L. Quality of high resolution synthesised images: Is there a simple criterion? [C]//Proceedings of the Third Conference (fusion of earth data: merging point measurements, raster maps and remotely sensed images). France: SEE/URISCA, 2000.
- [27] WANG Z, BOVIK A C. A universal image quality index[J]. Signal Processing Letters, IEEE, 2002, 9(3): 81-84.
- [28] ALPARONE L, BARONTI S, GARZELLI A, et al. A global quality measurement of pan-sharpened multispectral imagery[J]. Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, 2004, 1(4): 313-317.