

水下地形多波束幅相联合自适应检测与滤波

高家伟^{1,2,3}, 翟羽飞^{1,2,3}, 朱建军^{1,2,3}, 陈宝伟^{1,2,3}, 周天^{1,2,3}, 杜伟东^{1,2,3}

(1. 哈尔滨工程大学 水声技术全国重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 海洋信息获取与安全工信部重点实验室(哈尔滨工程大学) 工业和信息化部, 黑龙江 哈尔滨 150001; 3. 哈尔滨工程大学 水声工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:现代多波束声呐在海洋测绘中具有重要意义,然而传统幅相联合检测算法在复杂水域存在角度分界值难以精确定、测量易含异常值的问题。为有效避免以上问题对水下地形检测质量所造成的影响,本文在质量因子模型的基础上,构建角度判决因子理论模型,实现幅相联合检测算法角度分界值的自适应确定,同时构建二次检测与滤波模型对异常值进行实时处理。通过模拟不同坡度地形数据进行仿真试验,验证了角度判决因子理论模型以及异常值二次检测与滤波模型的有效性。湖试结果也进一步表明:在实际环境中角度判决因子模型依然可有效适应不同坡度的地形,实现不同算法间角度分界值的自适应确定,并且二次检测与滤波模型对异常值的检测与滤波依旧高效稳定,与传统坡度滤波算法对比显示,所建立的二次检测模型得出的结果更为平滑,野值点相对更少。本文算法在提升数据质量和减少误差上具有优越性,为获取可靠的地形探测结果提供有效保障。

关键词:多波束声呐; 幅相联合; 角度分界值; 质量因子; 角度判决因子; 自适应确定; 异常值检测; 滤波处理

DOI: 10.11990/jheu.202506007

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1390.U.20250623.1741.026>

中图分类号: TB566 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7043(2025)08-1566-09

Multibeam amplitude-phase joint adaptive detection and filtering for underwater terrains

GAO Jiawei^{1,2,3}, ZHAI Yufei^{1,2,3}, ZHU Jianjun^{1,2,3}, CHEN Baowei^{1,2,3}, ZHOU Tian^{1,2,3}, DU Weidong^{1,2,3}

(1. National Key Laboratory of Underwater Acoustic Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. Key Laboratory of Marine Information Acquisition and Security (Harbin Engineering University), Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150001, China; 3. College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Modern multibeam sonars are of immense significance in marine mapping. However, conventional amplitude-phase joint detection algorithms face challenges in complex waters, such as issues with the accurate determination of angle thresholds and the influence of measurement outliers. To address these issues affecting the quality of detection of underwater terrains, this study constructs an angle decision factor model based on a quality factor model to realize adaptive determination of angle thresholds for the joint detection algorithm. Additionally, a secondary detection and filtering model was developed for real-time outlier processing. Simulation experiments with terrain data of varying slopes were conducted to verify the effectiveness of the angle decision factor model and the outlier secondary detection and filtering model. The Lake test results further reveal that the angle decision factor model can effectively adapt to terrains of different slopes in real environments, thereby achieving adaptive threshold determination. It was also proved that the secondary detection and filtering model remains efficient and stable while performing outlier detection and filtering processing. Compared with conventional slope filtering algorithms, the proposed model yields smoother results with fewer outliers, demonstrating its superiority in improving data quality and minimizing errors for reliable terrain detection. The results of this study can provide effective guidance for obtaining reliable outcomes in the field of terrain detection.

Keywords: multibeam sonar; amplitude-phase joint; angle thresholds; quality factor; angle decision factors; adaptive determination; outlier detection; filtering processing

现代多波束声呐由于具有全海深宽覆盖的海底

特征遥感能力而成为海洋测绘领域的重要工具,其通过发射换能器阵列向海底发射宽扇面覆盖的声波,并利用接收换能器阵列对海底回波进行窄波束接收,实现了一次扫描即可获得多个波束的测深数据,极大地提高了海底地形测量的效率和精度^[1]。在检测算法方面,受回波信号幅度特性和噪声干扰

收稿日期: 2025-06-05.

网络出版日期: 2025-06-24.

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2441254, 42176192, 42306212); 黑龙江省自然科学基金优秀青年项目(YQ2022D008); 深海空间站国家科技重大专项.

作者简介: 高家伟,男,硕士研究生;
周天,男,教授,博士生导师.

通信作者: 周天, E-mail: zhou.tian@hrbeu.edu.cn.

的影响,幅度检测算法在海底镜像区域展现出较高的回波到达时间(time of arrival, TOA)估计精度;然而,由于回波信号展宽,该算法对外侧波束的 TOA 估计精度明显降低,相比之下,相位法能够获得更优的海底检测性能。基于不同算法的互补性,海底检测算法已从单一的幅度检测算法或相位差检测算法发展到加权时间平均(weighted mean time, WMT)结合多子阵相位差的联合检测算法,以实现多波束整个探测扇面内海底测量点的高精度 TOA 估计。然而在实际探测中,算法选择的角度分界值多依赖工程经验设定,难以适配复杂多变的水下环境,限制了检测算法在不同场景下的适应性与测量的精准性。同时,由于海底真实深度的未知性以及不可视性^[2],受复杂水域环境下低信噪比及各类干扰源等因素的影响,检测结果中难以避免存在异常值^[3-5],这些异常值不仅降低数据准确性,还会对后续数据分析与应用产生负面影响。因此对算法选择的角度分界值的确定以及声呐测量结果异常值的处理是不可回避的问题。

针对异常值问题,2000 年 Brian^[6]提出了综合不确定度和深度估计(combined uncertainty and bathymetry estimator, CUBE)算法,其通过中值滤波与动态卡尔曼滤波结合,精确获取水深及误差估计值^[7-8]。CUBE 算法的提出,极大地缩短了人工处理测深数据的时间,提升了数据处理的效率^[9-10]。但该算法属于后处理阶段,其操作过程是在所有数据完成采集之后进行,仅适用于归位后的点云数据,实现过程复杂且无法满足实时处理需求。

Lurton^[11]提出基于信号局部信噪比估计构建深度误差模型。因需详细系统分析且实际信噪比难以准确估计,难以应用于复杂场景。随后 Lurton 等^[12-13]提出的质量因子评估模型理论,通过量化深度测量误差,直接依据信号相位差或幅度时间序列特征进行质量评估,有效提升了水深测量评估的效率以及准确度。

尽管上述研究在异常值处理方面取得了一定进展,但针对幅相联合检测算法角度分界值的自适应确定问题,目前尚未有系统性研究。现有方法多依赖固定经验值,无法根据实时环境动态调整算法切换。为了进一步增强算法的自主性和对时空变化水下探测环境的自适应能力,本文针对多波束声呐的幅相联合检测算法角度分界值的自适应确定问题以及检测异常值的实时滤波问题进行研究,在质量因子的基础上构建角度判决因子判决模型,实现算法之间角度分界值的自适应确定,并基于质量因子对实时标记的异常值进行二次检测与滤波处理,进一步提升多波束声呐地形检测结果的可靠性和准确度。

1 质量因子理论分析与建模

1.1 幅度检测法相对测深误差

如图 1 所示,幅度检测法通过对海底回波信号的包络进行考察,并结合能量中心算法,从而实现海底回波信号到达时刻的精确估计^[14]。

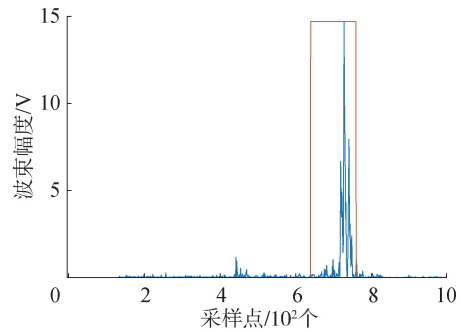


图 1 波束数据回波包络示意

Fig. 1 Schematic diagram of beam data echo envelope

当声呐的接收基阵接收到海底的回波时,系统会根据波束的幅度信息确定海底散射信号的有效回波区间。并在有效时间区间内利用信号包络幅度对时间进行加权平均来计算海底回波的 TOA^[15]:

$$t_{\text{TOA}} = \sum_{i=0}^n t_i \cdot A'_i \quad (1)$$

$$A'_i = A_i / \sum_{i=0}^N A_i \quad (2)$$

式中: A_i 为回波信号的包络幅度; A'_i 为回波信号的归一化包络幅度; t_{TOA} 为所对应的信号到达时间。

由于海底回波信号包络存在波动性,导致通过 WMT 算法所获取的 TOA 结果出现误差。在理想条件下,在理想条件下,假设海底的背向信号是一段持续时间为 T 的矩形包络,且由大量独立、随机分布的散射体叠加形成,根据中心极限定理,其幅度围绕理想值按照瑞利定律产生波动,在不考虑加性噪声的情况下,采用 WMT 算法对信号进行 TOA 估计,其估计的 TOA 估计标准差可表示为:

$$\delta_t = \sqrt{\frac{1}{12(N+1)f_s^2} \left(\frac{4}{\pi} - 1 \right) N(N+2)} \quad (3)$$

式中: N 为信号的可用样本数; f_s 为信号的采样率。

当信号的可用样本 N 足够大时,所对应的 TOA 估计标准差可近似表示为:

$$\delta_t \approx 0.15T / \sqrt{N} \quad (4)$$

在实际过程中,对于一个钟形信号包络通常不存在精确的解析解,但其 TOA 估计标准差 δ_t 对信号的持续时间 T 与可用样本 N 的依赖关系是相同的,因此式(4)可表示为更一般的形式:

$$\delta_t \approx BT / \sqrt{N} \quad (5)$$

式中 B 为比例因子。其参数的选择取决于信号的

处理过程以及信号的包络形状。

由于海底回波信号存在随机不确定性导致其有效宽度无法准确确定,且海底散射信号样本之间存在相关性,针对此问题对模型进一步改进^[13-14]。

将信号的有效回波时间 T_E 定义为基于海底回波信号包络的时间二阶矩的 2 倍,其表达式为:

$$T_E = 2 \sqrt{\sum_{i=m}^n A_i' (t_i - \sum_{j=m}^n A_j' t_j)^2} \quad (6)$$

式中 A_i' 表示为信号包络幅度 A_i 归一化后的结果。

在此基础上进一步引入信号样本间的相关性,获得改进后的公式,可表示为:

$$\delta_i \approx B\sqrt{C}/N_0 f_s \quad (7)$$

式中: N_0 是发射脉宽包含的样本个数; f_s 为信号的采样频率; C 表示了由信号脉冲宽度引起的样本间相关性,其具体表达式为:

$$C = \sum_{i=-N_0+1}^{N_0-1} (N_E - |i|)(N_E - 1 - |i|) \cdot (N_E + 1 - |i|)(N_0 - |i|)^2 \quad (8)$$

式中 N_E 为有效回波时间 T_E 所对应的采样点数。

1.2 相位检测法相对测深误差

相位差拟合及误差示意图如图 2 所示,图中 $\delta\Delta\varphi$ 为相位拟合标准差, t_p 为拟合曲线过 0 时刻, Δt_p 为相位检测窗的窗长。在多波束声呐系统的相位处理过程中,对测量得到的相位差数据 $\Delta\varphi$ 进行线性拟合^[16],拟合后的结果为 $\hat{\Delta\varphi}$,其表达式为:

$$\hat{\Delta\varphi}(t) = \hat{k}t + \hat{b} \quad (9)$$

式中: \hat{k} 为拟合相位曲线斜率; \hat{b} 为拟合相位曲线截距。

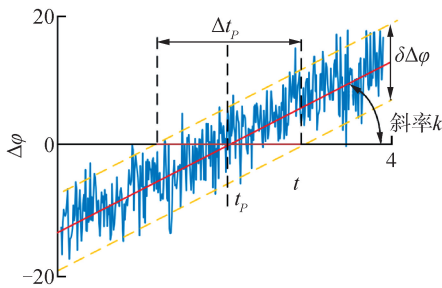


图 2 相位差的线性拟合及误差示意

Fig. 2 Linear fitting and error diagram of phase difference

相位差曲线受噪声影响同样会产生瑞利波动^[17],拟合后的相位误差的方差可表示为:

$$\sigma_\varepsilon^2 = \frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N (\hat{\Delta\varphi}(t_i) - \Delta\varphi(t_i))^2 \quad (10)$$

式中: N 为相位差曲线的可用样本数; $\Delta\varphi(t_i)$ 为相位差数据原始结果; $\hat{\Delta\varphi}(t_i)$ 为相位差数据拟合结果。

由于估计量 \hat{k} 和 \hat{b} 是无偏的、收敛的,且二者相

互独立,由此推导出估计量 $\hat{\Delta\varphi}(t)$ 的方差 $\delta\Delta\varphi^2$,其估计量本身也是无偏且收敛的,具体可表示为:

$$\delta\Delta\varphi^2 = \sigma_\varepsilon^2 \left(\frac{(t - \bar{t})^2}{\sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2} + \frac{1}{N} \right) \quad (11)$$

考虑上述过程中产生的相位误差以及相位曲线斜率,基于相位法所估计的 TOA 方差可表示为:

$$\delta\Delta t_p^2 \approx \frac{\sigma_\varepsilon^2}{\hat{k}^2} \left(\frac{(\hat{t}_{\text{TOA}} - \bar{t})^2}{\sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2} + \frac{1}{N} \right) \quad (12)$$

式中: \hat{t}_{TOA} 为 TOA 估计值; \bar{t} 为时间均值。

在实际环境中,由于分辨率单元内目标及其他所有散射体的贡献同时被声呐的接收系统所接收,导致无法分辨目标与其他散射体准确位置。假设目标与其他散射体在分辨率单元内呈几何等距分布^[18],则它们的贡献在时间上按照持续时间为 T 的均匀分布所接收。由此通过相位检测法所获得的 TOA 的估计标准差 δ_{ip} 最终可表示为:

$$\delta_{ip} = \sqrt{\delta_{\phi}^2 + \delta_{T'}^2} = \sqrt{\frac{\sigma_\varepsilon^2}{\hat{k}^2} \left(\frac{(\hat{t}_{\text{TOA}} - \bar{t})^2}{\sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2} + \frac{1}{N} \right) + \frac{T_0^2}{12}} \quad (13)$$

式中 T_0 为发射信号的脉冲宽度。

1.3 质量因子模型

多波束测深质量因子 Q_F 作为表征多波束声呐系统深度测量不确定度的关键评估指标,可表示为深度误差倒数的对数值^[14]:

$$Q_F = \lg(q_F) = \lg\left(\frac{h}{\delta_h}\right) \quad (14)$$

式中: q_F 为相对测深误差倒数; h 为测得的水深; δ_h 为深度值标准差。

由于测量的海底深度与 TOA 紧密关联,因此多波束测深质量因子可以进一步表示为关于 TOA 的表达式,从信号传播时间的维度对多波束声呐系统深度测量不确定度进行评估,其表达式为^[14]:

$$Q_F = \lg\left(\frac{t}{\delta_t}\right) \quad (15)$$

式中: t 为海底回波的到达时间; δ_t 为回波到达时间估计的标准差。具体的质量因子数值与测深误差 (δ_t/h) 的对应关系如表 1 所示。

2 角度分界值确定与异常值滤波

为提升算法在时空变化水下环境中的自主性与自适应能力,针对现有多波束声呐幅相联合检测算法中角度分界值多依赖经验设定,难以适应复杂多变的水下环境,以及检测数据受噪声、信号畸变等因

素影响,异常值频发降低地形检测可靠性与准确度等问题展开研究。

表 1 质量因子与深度测量误差对照表

Table 1 Comparison table of quality factor and depth measurement error

深度误差/%	质量因子
>1	<2.0
0.3	2.5
<0.1	>3.0

在质量因子模型的基础上,通过构建理论模型实现幅相联合检测算法角度分界值的动态自适应调整,确保算法在不同场景下均能发挥最优性能。并基于质量因子对标记的异常值展开二次检测与滤波处理,以进一步提高地形检测结果的可靠性与准确性。

2.1 幅相联合检测角度分界值确定

针对传统幅相联合检测算法角度依赖经验设定问题,本节提出一种基于幅度检测法与相位检测法 TOA 估计标准差的角度分界值自适应确定方法。

如式(7)与式(13)所示,幅度检测法的 TOA 估计标准差主要受回波信号包络尖锐程度影响,而相位检测法的 TOA 估计标准差则与相位差曲线斜率特性及可用样本量密切相关。

对于镜像回波而言,多波束声呐的发射波束以近乎垂直的角度照射海底时,声波会遵循类似镜面反射的规律进行反射,镜像回波区域的不同角度的水底回波几乎同时抵达声呐接收端,使得回波能量高度集中、包络更为尖锐,可以获得更高的 TOA 估计精度。相比之下,非镜像回波由于脉冲展宽的影响,虽导致接收波束脚印增大,但因其具有更长的相位曲线这一特点,可以获得相对幅度检测法更高的 TOA 估计精度。

通过定义角度判决因子 (angle decision factor, ADF),结合幅度数据与相位数据的信噪比,动态比较 2 种算法在不同回波类型下 TOA 估计标准差的变化趋势,实现幅相联合检测角度分界值的自适应确定,如式(16)所示。

$$V_{ADF} = \lg \left[\left(\frac{\delta_{tA}}{\delta_{t\varphi}} \right)^w \left(\sqrt{\frac{\varphi_{SNR}}{A_{SNR}}} \right)^{1-w} \right] = \lg \left[\left(B \frac{\hat{k} \sqrt{C}}{N_0 f_s \cdot \delta \Delta \varphi} \right)^w \left(\sqrt{\frac{\varphi_{SNR}}{A_{SNR}}} \right)^{1-w} \right] \quad (16)$$

式中: V_{ADF} 为角度判决因子曲线结果; B 为幅度检测法 TOA 估计标准差的比例因子; A_{SNR} 与 φ_{SNR} 分别为幅度数据与相位数据的信噪比; w 为加权因子。

结合式(15),式(16)可变为:

$$V_{ADF} = \lg \left[\left(\frac{\delta_{tA}}{\delta_{t\varphi}} \right)^w \left(\sqrt{\frac{\varphi_{SNR}}{A_{SNR}}} \right)^{1-w} \right] = w \left[Q_{F\varphi} - Q_{FA} - \lg \left(\frac{t_\varphi}{t_A} \right) \right] + \frac{1}{2} (1-w) \lg \left(\frac{\varphi_{SNR}}{A_{SNR}} \right) \quad (17)$$

式中: $Q_{F\varphi}$ 与 Q_{FA} 分别为相位检测法与幅度检测法下检测结果的质量因子; t_φ 与 t_A 则分别表示为相位检测法与幅度检测法下的 TOA 检测结果。

对角度判决因子的计算结果进行滑动平均,构建角度判决因子曲线,具体表达式为:

$$\overline{V_{ADF}}(n) = \sum_{i=-L/2}^{L/2} V_{ADF}(n+i) \cdot w(i) / \sum_{i=-L/2}^{L/2} w(i) \quad (18)$$

式中: V_{ADF} 为角度判决因子; $w(i)$ 为窗函数; L 为窗长度。

将计算的角度判决因子结果与阈值 0 进行对比,完成幅度检测法与相位检测法角度分界值的确定,其具体表达式为:

$$\begin{cases} \overline{V_{ADF}} > 0, & \text{相位检测法} \\ \overline{V_{ADF}} \leq 0, & \text{幅度检测法} \end{cases} \quad (19)$$

2.2 幅度检测法异常值二次检测与滤波

针对幅度检测法异常值的二次检测流程如图 3 所示。

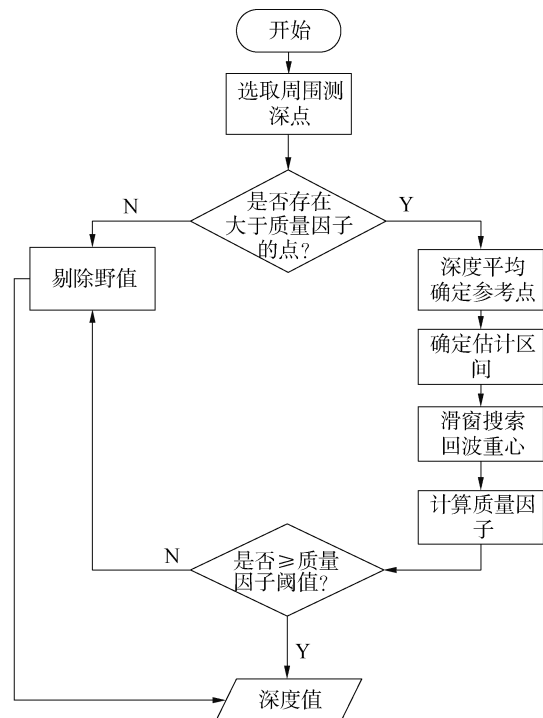


图 3 幅度检测法异常值二次检测

Fig. 3 Secondary detection of abnormal value by amplitude detection method

针对幅度法检测法所标记的异常值的处理流程

中,首先根据-3 dB 波束宽度范围内满足质量因子阈值要求的相邻波束测深点信息,以此来确定二次检测过程中检测窗口的中心时刻,具体计算为:

$$t_0 = \frac{\sum_{i=1}^N t_i \cdot \cos \theta_i}{N} \cdot \frac{1}{\cos \theta_0} \quad (20)$$

式中: t_i 为周围有效波束的 TOA 结果; θ_i 为周围有效波束的波束控制角; θ_0 为当前波束的波束控制角; N 为二次检测过程中所利用的有效波束数。

随后在二次检测窗口的中心时刻周围划出 1 个较大的时间区间,基于式(6)所定义的回波有效宽度,对回波的能量集中区间重新进行搜索,并对回波的重心进行确定,同时对大于 Q_F 阈值的测深值予以保留,以进一步提高异常值处理的准确性和可靠性。

2.3 相位检测法异常值二次检测与滤波

针对相位检测法异常值的二次检测流程如图 4 所示。

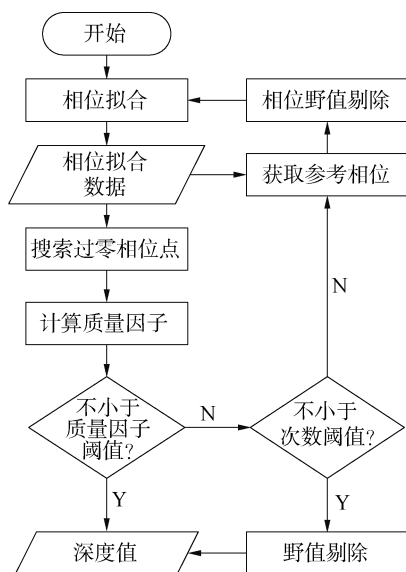


图 4 相位检测法异常值二次检测

Fig. 4 Secondary detection of abnormal value by phase detection method

针对相位检测法中所标记的异常值的处理流程中,时间窗口的长度保持不变,检测窗口中心定位到第 1 次估计的到达时刻,基于上一次拟合得到的相位差结果,计算检测窗口内实际相位差与拟合结果之间的残差为:

$$\varepsilon_{\Delta\varphi} = |\Delta\hat{\varphi} - \Delta\varphi| \quad (21)$$

式中: $\Delta\hat{\varphi}$ 为拟合后的相位差数据; $\Delta\varphi$ 为原始相位差数据。

完成残差计算后,将误差较大的数据点剔除,并对经过滤波处理的数据再次进行线性拟合与过零检测。数据在二次处理后再次进行质量评估,通过多次的滤波与拟合操作,逐步减小误差,提高数据质量,从而获得更为准确可靠的结果。

最终依据预设的质量因子阈值对测深值进行筛选,对大于该阈值的测深值予以保留,以此确保最终数据结果能够更为准确地反映真实可靠的地形。

3 计算机仿真分析与验证

3.1 角度判决因子曲线仿真验证

为检验角度分界值自适应确定算法在不同坡度地形条件下的有效性,分别仿真不同坡度的海底地形数据进行测试验证。仿真相关参数设置如下:接收阵的阵元数为 96,阵元间距为 1.5 mm。左侧扇区信号中心频率为 475 kHz,右侧扇区信号中心频率为 525 kHz,覆盖扇面为 130°,有效波束数为 256,扇区中央波束的仿真海底深度为 10 m,海底地形坡度分别为 0°、5°、-5°,其波束形成结果如图 5 所示。

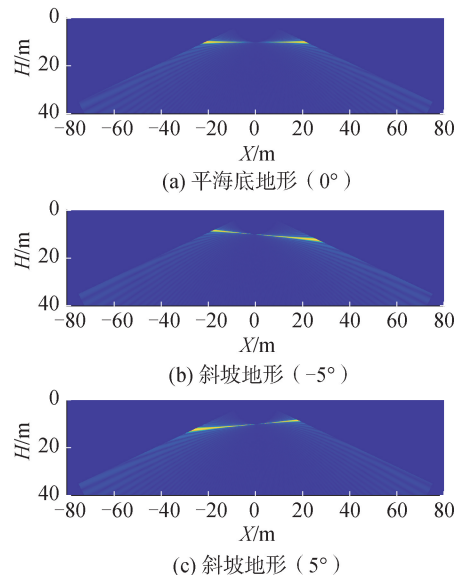


图 5 不同坡度地形仿真条件下波束形成结果

Fig. 5 Beamforming results under different slope terrain simulation conditions

通过对 ADF 曲线的过零检测,完成海底地形检测过程中幅度检测法与相位检测法角度分界值的确定,不同坡度地形条件下的确定结果如图 6 所示。由于海底地形的倾斜,导致海底回波镜像回波区域发生改变,通过 ADF 曲线可有效实现角度分界值的确定,且角度分界值的大小符合镜像回波区域范围的变化规律,即随着镜像回波区域范围扩大,角度分界值相应增大,反之,镜像回波区域范围缩小,则角度分界值随之减小,同时也进一步验证了 ADF 曲线在回波区域划分中的有效性。

3.2 异常值检测与滤波处理仿真验证

为了对幅度检测法与相位检测法质量因子评估模型进行有效验证,在计算机仿真中,通过减少中央波束有效回波数据的采样点数并降低回波能量强度,同时针对边缘波束人为引入干扰源,生成 1 组中间波束与右侧边缘波束存在缺陷的平海底仿真数

据,其余仿真相关参数不变,仿真的海底深度为 10 m。仿真海底数据的波束形成结果如图 7 所示。

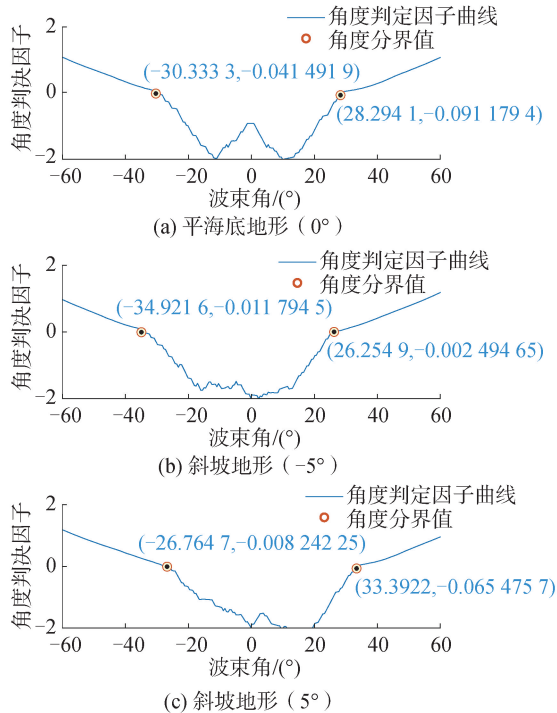


图 6 不同坡度地形条件下基于仿真数据的角度分界值确定结果

Fig. 6 Determination of angle boundary values based on simulation data under different slope terrain conditions

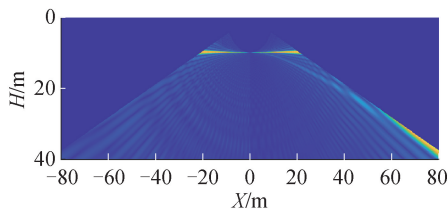


图 7 计算机模拟海底波束数据

Fig. 7 Computer simulation of seabed beam data

对仿真所获取的数据采用幅相联合检测算法进行处理,最终得到的 TOA 结果与质量因子评估结果,如图 8 所示。由于仿真数据的中间波束与右侧边缘波束存在异常,致使中间与右侧边缘区域的波束形成效果不佳,而质量因子模型能够有效地对检测到的异常值进行判断并准确地加以标记,为后续处理提供便利。

4 湖试数据处理

为检验基于质量因子的角度分界值确定算法,以及多波束异常检测值的二次检测与滤波处理算法的有效性,通过进行湖上试验,完成数据的采集与处理工作。声呐安装情况及湖上试验环境如图 9 所示。试验过程中,声呐设备安装于船侧,声呐基阵的辐射面保持水平,同时将声呐设备的入水深度设定为 1 m。

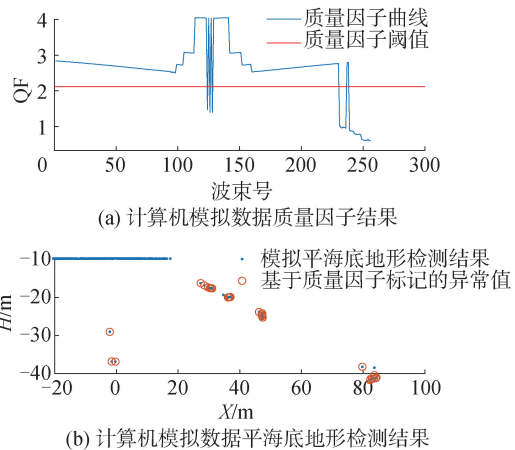


图 8 模拟海底数据 TOA 检测结果与质量因子对比
Fig. 8 Comparison of TOA detection results and quality factors of simulated seabed data



图 9 声呐设备安装情况及湖上试验环境

Fig. 9 Sonar equipment installation and lake test environment

声呐实际工作中的相关参数为:接收基阵的阵元数为 96,阵元间距为 1.5 mm。左侧扇区发射信号的中心频率为 475 kHz,右侧扇区发射信号的中心频率为 525 kHz,覆盖扇面为 130°,有效波束数为 256。

为验证角度分界值自适应确定算法的有效性,对不同坡度地形条件下采集的试验数据进行处理与分析。不同坡度地形条件下的波束形成结果,以及对应的角度判决因子曲线分别如图 10、图 11 所示。

通过对比图 10、图 11 中不同坡度地形条件下的角度分界值的判定结果可以发现,该算法可以有效适应地形坡度变化,实现角度分界值的自适应确定。

声呐的安装条件以及实际工作中的相关参数保持不变,进一步对松花湖采集的试验数据进行处理,对基于质量因子的异常值二次检测与滤波算法进行验证,单采校周期数据的处理结果如图 12 所示。

从图 11 中对某一采校周期湖试数据的处理结果可以看出,在实际的水下环境中,质量因子模型依旧能够有效地对检测到的异常值进行判断与标记,说明质量因子评估模型在实际的复杂水下环境中依然有效。在此基础上,进一步对湖试过程中采集的多采校周期数据进行处理,获得基于质量因子二次检测与滤波处理前后的对比结果,同时与坡度滤波算法处理结果进行对比。对比结果如图 13 所示。

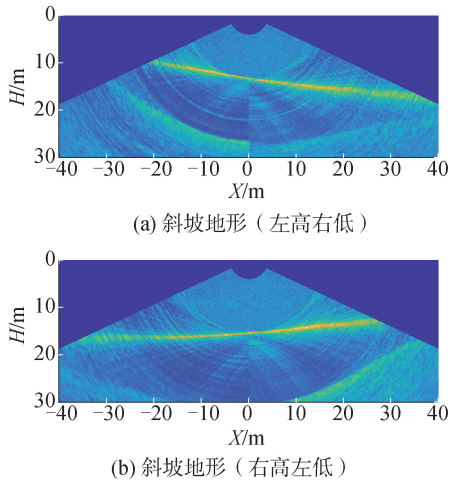


图 10 不同坡度地形条件下波束形成结果
Fig. 10 Beamforming results under different slope terrain conditions

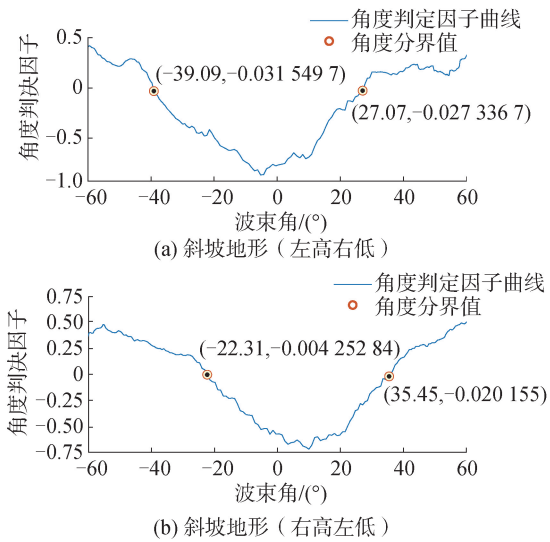


图 11 不同坡度地形条件下基于湖试数据的角度分界值确定结果
Fig. 11 Determination of angle boundary values based on lake test data under different slope terrain conditions

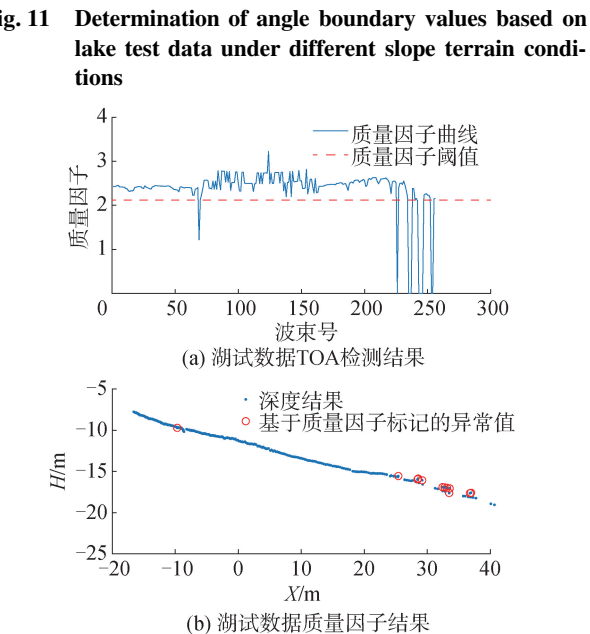
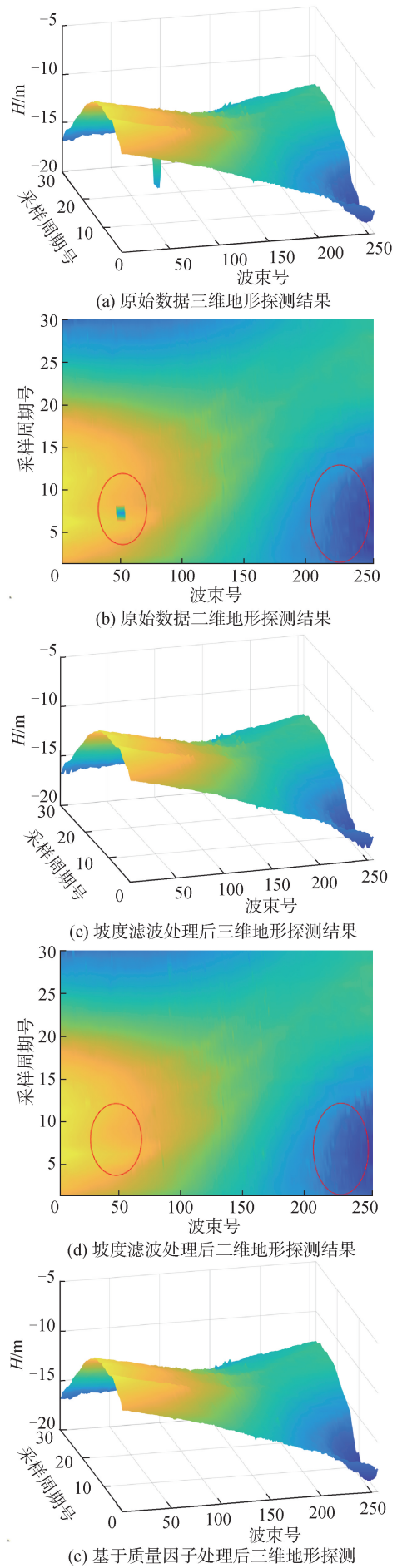


图 12 湖试数据 TOA 检测结果与质量因子结果对比
Fig. 12 Comparison of TOA test results and quality factor results of lake trial data



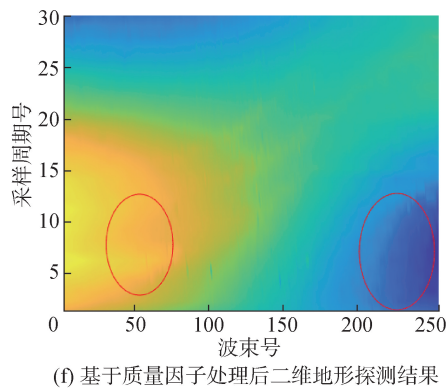


图 13 不同算法处理后地形探测结果对比

Fig. 13 Comparison of terrain detection results after different algorithms

进一步对比图 13 中基于质量因子处理前后,以及坡度滤波算法处理后的二维与三维地形结果,可以发现,基于质量因子所建立的二次检测模型得出的结果更为平滑,野值点相对更少。有效说明该算法在提升数据质量和减少误差方面的优越性,为获取可靠的地形探测结果提供有效保障。

5 结论

1) 本文针对多波束声呐幅相联合检测算法中角度分界值自适应确定问题以及对检测过程中可能出现的异常值问题进行研究。在幅度法和相位法 2 种检测技术质量因子模型的基础上,通过定义角度判决因子,并结合幅度数据与相位数据的信噪比,实现幅相联合检测角度分界值的自适应确定。

2) 在检测结果中实时标记的异常值基础上,通过进一步构建基于质量因子的异常值二次检测与滤波模型,通过分别对幅度检测法与相位检测法检测出的异常值进行二次检测与滤波处理,有效提升了海底地形检测结果的准确性。

3) 通过对不同坡度海底地形进行仿真,以及对外场试验数据进行处理,对角度分界值判决因子模型以及基于质量因子的多波束异常检测值的二次检测与滤波处理算法进行验证。试验结果表明,所构建的角度分界值判决因子可以有效适应地形坡度变化,并能够实现角度分界值的自适应确定,此外,质量因子能够有效判断并标记检测结果中的异常值,并基于质量因子所建立的二次检测与滤波模型,可以获得更为真实可靠的水下地形探测结果,能够有效应用到复杂水域环境的地形探测中。

参考文献:

[1] 李海森,周天,徐超. 多波束测深声呐技术研究新进展[J]. 声学技术, 2013, 32(2): 73-80.
LI Haisen, ZHOU Tian, XU Chao. New developments on the technology of multi-beam bathymetric sonar[J]. Tech-

nicul acoustics, 2013, 32(2): 73-80.
[2] 李力, 邹砚湖. 海底采矿车路径跟踪的变论域模糊控制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(2): 489-496.
LI Li, ZOU Yanhu. Tracking moving path of seabed mining vehicle based on theory of variable universe fuzzy control[J]. Journal of Central South University (science and technology), 2012, 43(2): 489-496.
[3] LIU Xuefeng, LI Qi, TANG Rui, et al. A combined noise source model based on vertical coherence to quantify the proportions of two types of noise power[J]. The journal of the acoustical society of America, 2025, 157(1): 84-100.
[4] GUOLONG L, BOYU Z, BIN Q I, et al. Underwater multitarget fusion tracking method for passive sonar[J]. Acta acustica, 2024, 49(3): 501-512.
[5] 赵祥鸿, 暴景阳. 多波束测深异常数据探测方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(9): 1458-1464.
ZHAO Xianghong, BAO Jingyang. Method for detecting outliers of multi-beam sounding data[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39(9): 1458-1464.
[6] CALDER B. Automatic statistical processing of multibeam echosounder data[J]. International hydrographic review, 2003, 4(1): p. 53-68.
[7] 葛健, 刘天阳, 徐卫明. 一种适用于海量多波束测深数据的中值滤波算法[J]. 海洋测绘, 2015, 35(3): 39-42.
GE Jian, LIU Tianyang, XU Weiming. A Median filtering algorithm for massive multibeam bathymetry data[J]. Hydrographic surveying and charting, 2015, 35(3): 39-42.
[8] 贾俊涛, 申家双, 王俊森, 等. 固定网格的 CUBE 曲面地形表征能力分析[J]. 海洋测绘, 2022, 42(4): 74-77.
JIA Juntao, SHEN Jiashuang, WANG Junsen, et al. Analysis of CUBE surface topography characterization capability with fixed grid[J]. Hydrographic surveying and charting, 2022, 42(4): 74-77.
[9] 魏源, 金绍华, 李树军, 等. 利用聚类算法实现多波束水深数据异常值的自动识别与清理[J]. 测绘学报, 2022, 51(11): 2294-2302.
WEI Yuan, JIN Shaohua, LI Shujun, et al. Automatic recognition and cleaning of outliers in multi-beam bathymetric data with clustering algorithm[J]. Acta geodaetica et cartographica sinica, 2022, 51(11): 2294-2302.
[10] 黄漠涛, 翟国君, 柴洪洲, 等. 检测多波束测深异常数据的 CUBE 算法模型解析[J]. 海洋测绘, 2011, 31(4): 1-4.
HUANG Motao, ZHAI Guojun, CHAI Hongzhou, et al. Analysis on the mathematical models of CUBE algorithm for the detection of abnormal data in multibeam echosounding[J]. Hydrographic surveying and charting, 2011, 31(4): 1-4.
[11] LURTON X. Theoretical modelling of acoustical measurement accuracy for swath bathymetric sonars[J]. International hydrographic review, 2003, 4(2): 17-30.
[12] LURTON X, AUGUSTIN J M. A measurement quality factor for swath bathymetry sounders[J]. IEEE journal of oceanic engineering, 2010, 35(4): 852-862.
[13] LADROIT Y. Amélioration des méthodes de détection et de qualification des sondes pour les sondeurs multifaisceaux bathymétriques[D]. Télécom Bretagne; Université de Rennes 1, 2012: 15-34.

(下转第 1582 页)

- kernels: properties and performance evaluation[J]. IEEE transactions on signal processing, 2012, 60(6): 2814–2827.
- [12] BOASHASH B. Time-frequency signal analysis and processing: a comprehensive reference [M]. Elsevier, Oxford, 2003: 1–15.
- [13] BOASHASH B, OUELHA S. An improved design of high-resolution quadratic time-frequency distributions for the analysis of nonstationary multicomponent signals using directional compact kernels[J/OL]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2017, 65(10): 2701–2713.
- [14] STANKOVIĆ L. A measure of some time-frequency distributions concentration[J]. Signal process, 2001, 81(3): 621–631.
- [15] 周志华. 机器学习[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016: 36–43.
- ZHOU Zhihua. Machine learning[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016: 36–43.
- [16] 孙瑞祥. 遗传算法及其在信息熵优化中的应用[J]. 西安交通大学学报, 1999, (9): 98–102, 107.
- SUN Ruixiang. Genetic algorithm and its application in information entropy optimization [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1999, (9): 98–102, 107.

本文引用格式:

- 罗俊, 李秀坤, 杜金鑫. 基于遗传算法的目标声散射回波多方向核函数匹配[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2025, 46(8): 1574–1582.
- LUO Jun, LI Xiukun, DU Jinxin. Multidirection kernel function matching of target acoustic scattering echo based on genetic algorithm[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2025, 46(8): 1574–1582.

(上接第 1573 页)

- [14] 周天, 袁伟家, 杜伟东, 等. 多波束测深声呐自主数据质量监测及门限控制[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2024, 45(5): 902–909, 921.
- ZHOU Tian, YUAN Weijia, DU Weidong, et al. Autonomous data quality monitoring and depth gate control of multibeam bathymetric sonar[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2024, 45(5): 902–909, 921.
- [15] 王久, 卢秉武, 张玉山, 等. 多波束声纳水柱影像在浅水目标探测中的应用[J]. 海洋测绘, 2018, 38(6): 54–58.
- WANG Jiu, LU Bingwu, ZHANG Yushan, et al. Application of multi-beam sonar water column image in object detection in shallow water[J]. Hydrographic surveying and charting, 2018, 38(6): 54–58.
- [16] 陈世进, 吴永清, 薛勐, 等. 一种基于质量因子的多波束测深声呐多子阵相位检测方法[J]. 信号处理, 2023, 39(10): 1890–1900.
- CHEN Shijin, WU Yongqing, XUE Meng, et al. A phase detection method for multiple subarrays of multi-beam echo sounder based on quality factor[J]. Journal of signal processing, 2023, 39(10): 1890–1900.
- [17] LURTON X. Swath bathymetry using phase difference: theoretical analysis of acoustical measurement precision [J]. IEEE journal of oceanic engineering, 2000, 25(3): 351–363.
- [18] 袁伟家. 基于海洋无人平台的多波束测深声呐数据质量控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023: 1–18.
- YUAN Weijia. Research on quality control method of multi beam sounding sonar data based on ocean unmanned platform [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2023: 1–18.

本文引用格式:

- 高家伟, 翟羽飞, 朱建军, 等. 水下地形多波束幅相联合自适应检测与滤波[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2025, 46(8): 1566–1573, 1582.
- GAO Jiawei, ZHAI Yufei, ZHU Jianjun, et al. Multibeam amplitude-phase joint adaptive detection and filtering for underwater terrains [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2025, 46(8): 1566–1573, 1582.