

基于小波分析的多波束声呐图像角度响应改正方法

朱正任¹,冯成凯¹,徐琪尧¹,韩冰¹,付桂合¹,阳凡林^{1,2}

(1.山东科技大学 测绘与空间信息学院,山东 青岛 266590;

2.海岛(礁)测绘技术国家测绘地理信息局重点实验室,山东 青岛 266590)

摘要:多波束声呐图像在海底底质分类中具有重要应用,而角度响应(angular response, AR)对多波束声呐图像的影响较大,给声呐图像的判读带来了困难。为此,针对多波束角度响应曲线具有非平稳离散随机信号的特点,提出一种基于小波分析的多波束声呐图像角度响应改正方法。首先,将AR曲线进行小波分解,获得长波项和短波项;然后,分别绘制长波项和短波项的三维概率密度图,通过短波项的三维概率密度图获得小波分解的最优参数,通过长波项的三维概率密度图对多波束条带进行同底质区域的划分;最后,在同底质区域下进行长波项的AR改正,将改正后的长波项和短波项进行信号重构,获得高质量的多波束声呐图像。实验分析表明,该方法在保留原始细节的基础上,有效削弱了角度响应对声呐图像的影响,对多波束声呐图像处理具有参考和应用价值。

关键词:多波束;反向散射强度;小波分析;三维概率密度;角度响应

中图分类号:P229

文献标志码:A

Angular response correction method of multibeam sonar images based on wavelet analysis

ZHU Zhengren¹, FENG Chengkai¹, XU Qiyao¹, HAN Bing¹, FU Guihe¹, YANG Fanlin^{1,2}

(1.College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2.Key Laboratory of Surveying and Mapping Technology on Island and Reef,

National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: Multibeam sonar images have important applications in seabed substrate classification, but they are significantly influenced by angular response (AR), which brings difficulties to their interpretation. Considering the characteristics of multibeam AR curves with non-stationary discrete random signals, an angular response correction method of multibeam sonar images based on wavelet analysis is proposed in this paper. Firstly, the AR curve was decomposed by wavelet to obtain long-wave term and short-wave term. Then, 3D histograms of long-wave and short-wave terms were drawn respectively to obtain the optimal parameters of wavelet decomposition and the division of multibeam bands with the same substrate area respectively. Finally, AR correction of long-wave term was carried out in the same substrate area, and the corrected long-wave and short-wave term were reconstructed to obtain high-quality multibeam sonar images. Experimental analysis shows that this method can effectively reduce the influence of angular response on sonar images while retaining the original details, and thus has reference and application value for multibeam sonar image processing.

Key words: multibeam; backscatter; wavelet analysis; 3D histogram; angular response

收稿日期:2019-08-23

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFF0212203, 2017YFC1405006, 2018YFC1405900, 2016YFC1401210); 山东省重点研发计划项目(2018GHY115002)

作者简介:朱正任(1996—),男,山东济宁人,硕士研究生,主要从事多波束反向散射强度数据处理方面的研究。

阳凡林(1974—),男,湖北荆州人,教授,博士生导师,主要从事海洋测绘及GNSS应用等方面的研究,本文通信作者。E-mail: yang723@163.com

多波束测深系统(multibeam echo sounder, MBES)不仅可以得到高精度的水深地形数据,还能获取丰富的反向散射强度数据。反向散射强度在较大程度上可确定沉积物类型,是识别海底底质类型的重要参数^[1-3]。但是,在实际测量过程中,影响多波束反向散射强度的因素较多,除海底底质的物理特性外,声呐系统参数、海水特性(吸收和折射)、测量模式(发射距离和角度)等因素也会对反向散射强度产生影响^[4-5]。因此,国内外学者对反向散射强度数据处理进行了广泛的研究,并形成了基于主动声呐方程的较为完善的改正模型。反向散射强度数据经过模型改正后,其中大部分影响可以消除,但角度响应由于受到声波散射机理的影响,表现为反向散射强度随入射角而变化,传统的角度响应改正模型在复杂底质环境下适应性较差,改正效果不理想。

针对多波束声呐图像角度响应改正问题,国内外学者从两种角度出发,针对AR改正后存在的残差进行改正。一种是从数理统计的角度出发,如唐秋华等^[6]通过条带两侧强度数据加权内插得到中央波束区域强度数据进行中央区域残差改正;Yang等^[7]采用等均值方差拟合的方法,通过对中央区域数据的压缩和移动进行改正;王煜^[8]通过构建中央波束区与非中央波束区模型进行残差改正,上述方法均未考虑真实的声波散射机理,改正效果往往与真实底质有较大差异,造成一定的精度损失。另一种是从声学机理角度出发,完善AR改正模型,如Hemmerstand等^[9]建立了Lambertian模型进行AR改正;Hellequin等^[10]建立了综合声学模型进行AR改正;严俊等^[11]通过提取角度响应曲线的AR参数,进行AR改正模型的重构。上述方法均有效减弱了角度响应对声呐图像的影响,但未考虑不同底质对AR改正模型的影响。Zhao等^[12]建立了基于预分类的AR改正模型,但未给出高效的分类数的确定方法且计算量较大,存在一定局限性。AR曲线本身亦可以用于分类,但由于其以ping为单位,分类结果的精度低于声呐图像,故本研究有效结合两者的优势,提出一种基于小波分析的多波束声呐图像角度响应改正方法,通过小波分解技术,将AR曲线分解为长波项与短波项,利用AR曲线长波项三维概率密度图先进行同底质区域划分,然后在同底质区域下完成AR改正。该方法可以在不需要确定分类数的前提下,有效消除不同底质对AR改正的影响,获取高质量的声呐图像,为后续高精度的海底底质分类提供基础。

1 角度响应曲线的小波分解及其三维概率密度表示

角度响应曲线是反向散射强度随入射角变化的曲线,由于海底底质的不同,声呐系统接收到的回波强度信号严格地说是非平稳信号^[13],因此,需要用非平稳随机信号的方法进行处理。小波变换在空间域和频率域同时具有良好的分析特性^[14],可以对非平稳信号进行有效分析。故将角度响应曲线进行小波分解,分解后得到其长波项(低频信号)和短波项(高频信号)。然而单ping角度响应曲线的长波项和短波项很难看出其规律性变化,为直观地显示长波项和短波项的趋势变化和分布情况,绘制长波项和短波项的三维概率密度图。

1.1 角度响应曲线的小波分解

小波变换可以将信号 $f(x)$ 分解成各种不同的频道和频率成分或各种不同的尺度成分。

$$WT_x(j:k) = \int f(t) \overline{\phi_{jk}(t)} dt, \quad (1)$$

式中, $\phi_{jk}(t) = 2^{-\frac{1}{2}} \phi(2^{-j}t - k)$, $\phi(t)$ 是母小波, j 为尺度, k 为位移,横线表示共轭。角度响应曲线 $BS(\theta)$ 经小波分解后可表示为:

$$BS(\theta) = \sum_{j=1}^n D_j(\theta) + A_n(\theta). \quad (2)$$

式中, $A_n(\theta)$ 是角度响应曲线的长波项, $\sum_{j=1}^n D_j(\theta)$ ($j=1, \dots, n$)是角度响应曲线的短波项, n 为分解层数。

1.2 短波项三维概率密度图及其特点

短波项代表角度响应曲线的声强特征变化,为直观地显示其反向散射强度随入射角变化的整体趋势,绘制短波项的三维概率密度图。由于反射散射强度随入射角的变化曲线呈对称分布,选取 $[0^\circ, 60^\circ]$ 进行分析。

图1(a)和1(b)分别是同底质区域和不同底质区域下相邻50 ping角度响应曲线短波项的三维概率密度

图(这里以小波参数:小波基 coif5 、分解层数 1 为例,说明短波项三维概率密度图的特点)。其中,横坐标代表入射角,纵坐标表示反向散射强度,在指定的入射角处,反向散射强度出现的频率以图右侧的颜色条表示。可以看出,无论在同底质区域下还是不同底质区域下短波项的反向散射强度均随入射角的变化在 0 附近波动,这是由于短波项代表角度响应曲线变化的细节信息,不包含其整体变化趋势。

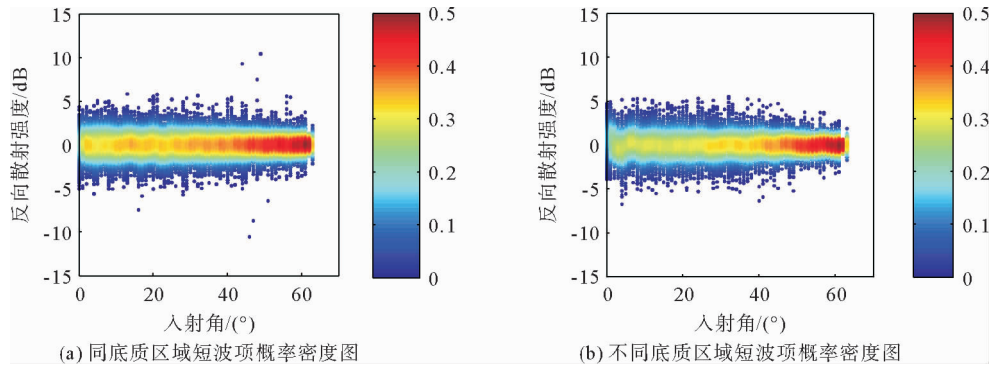


图 1 短波项的三维概率密度图

Fig. 1 3D histogram of short-wave term

1.3 长波项三维概率密度图及其特点

长波项代表角度响应曲线的轮廓线,包含角度响应曲线的主要变化趋势。由于不同的底质类型对应不同的角度响应曲线^[15],因此,长波项三维概率密度图可以直观地显示某一区域是否为同一底质类型。

如图 2(a)和图 2(b)所示,分别是同底质区域下和不同底质区域下角度响应曲线长波项的三维概率密度图。可以看出图 2(a)只包含 1 种类型的角度响应曲线,认为该区域是同一底质类型;而图 2(b)中包含 2 种类型的角度响应曲线,故该区域存在不同底质类型。

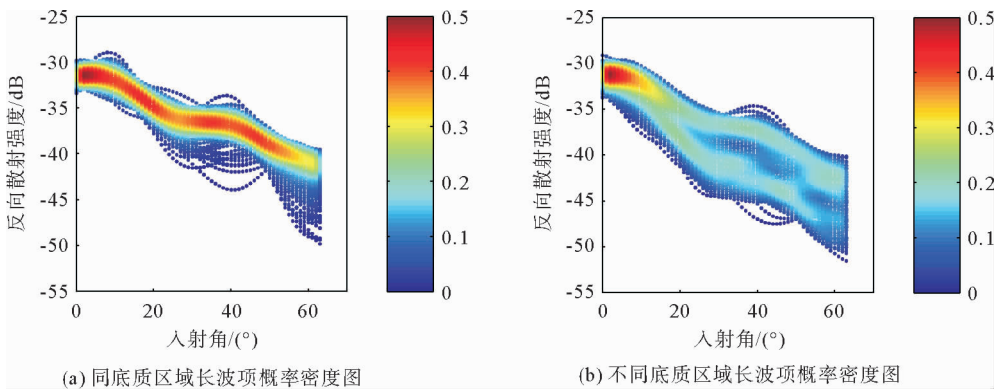


图 2 长波项的三维概率密度图

Fig. 2 3D histogram of long-wave term

2 多波束声呐图像角度响应改正方法

多波束角度响应曲线经小波分解为长波项和短波项。其中,长波项包含角度响应曲线的主要变化趋势。因此,声呐图像的角度响应改正即角度响应曲线长波项的改正,将改正后的长波项与短波项进行信号重构,得到改正后的多波束声呐图像。

2.1 最优小波分解参数的获取

小波基和分解层数是小波分解的重要参数,不同分解参数对信号分解的影响不同^[16]。因此,最优参数的选择是进行角度响应曲线小波分解的重要前提。本研究基于小波分解后的短波项不受角度响应影响的特点,提出了利用短波项三维概率密度曲线的特征参数来确定最优小波分解参数的方法(图3)。

由1.2节可知,短波项的三维概率密度图可以直观地显示反向散射强度在给定入射角 θ 处的数量 q ,但无法给出定量的分析。因此,引入了概率密度曲线 $\overline{BS}(\theta)$,通过提取概率密度曲线及其统计特征参数,对多 ping 角度响应曲线的短波项进行定量分析。

图4(a)是短波项三维概率密度图的剖面图,表示在不同入射角处反向散射强度出现的频率(横坐标为反向散射强度,纵坐标为出现的频率,这里以 15° 和 60° 为例),由图可以看出,在指定入射角处,角度响应曲线的短波项近似服从 $N(0, \sigma^2)$ 的正态分布,其中 σ^2 为方差。依据中心极限定理,角度响应曲线序列数 $N > 30$ 时,子样 $BS_\theta(N)$ 、 $BS_N(\theta)$ 序列均服从正态分布^[17],且均值在 $u=0$ 处波动,因此,其概率密度函数为

$$f_{BS_\theta}(N) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{N^2}{2\sigma^2}}, \quad (3)$$

$$f_{BS_N}(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\theta^2}{2\sigma^2}}, \quad (4)$$

$$\overline{BS}(\theta) = q_{\max}(BS_\theta(N)). \quad (5)$$

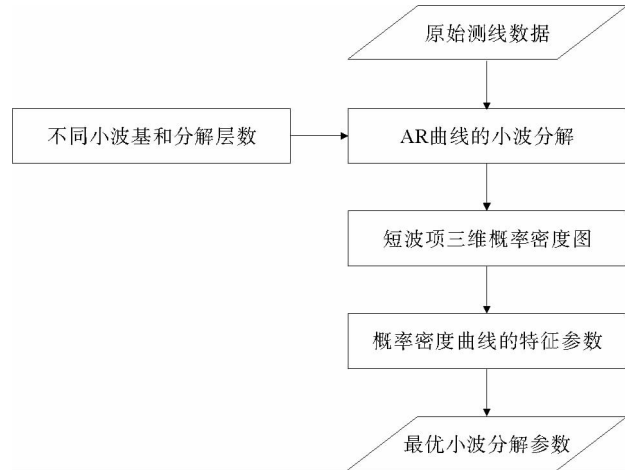


图3 最优小波参数获取的流程图

Fig. 3 Flowchart of optimal wavelet parameter acquisition

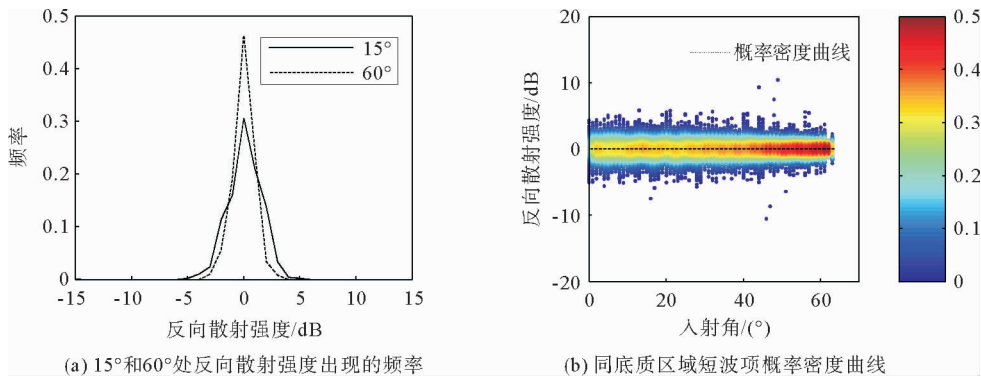


图4 短波项三维概率密度的剖面图及其概率密度曲线

Fig. 4 Short-wave term's 3D histogram profile and its probability density curve

如图4(b),通过公式(5)可提取出概率密度曲线 $\overline{BS}(\theta)$,其中 q_{\max} 代表取密度最大函数。由上述分析可知,短波项的概率密度曲线应具有均值 u 和方差 σ^2 都近似为0的统计特性。因此,选取同底质区域连续50 ping的数据在不同小波基和分解层数下进行角度响应曲线的小波分解,获得其短波项概率密度曲线的统计特征参数。选取Coiflets、Symlets、Daubechies小波族下具有代表性的coif5、sym4和db6等3个小波基进行实验,实验结果如图5、表1所示。

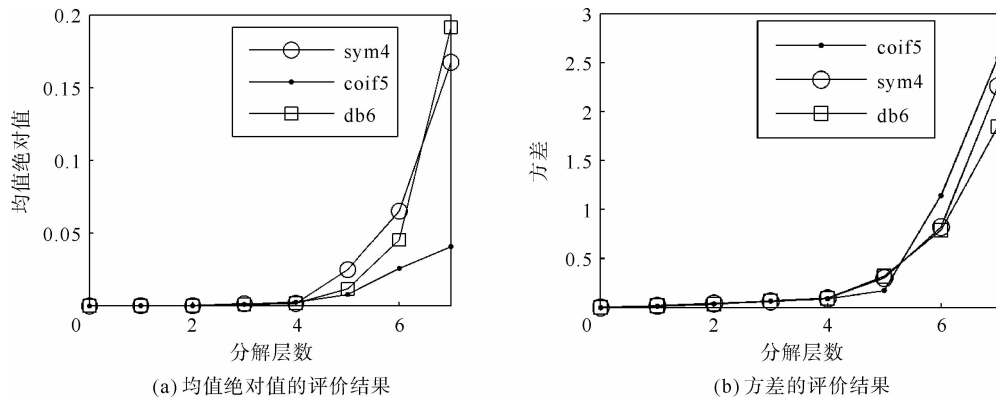


图 5 统计参数对小波基和分解层数的评价结果

Fig. 5 Evaluation results of wavelet base and decomposition layers by statistical parameters

表 1 不同小波基和分解层数下的统计参数结果

Tab. 1 Results of statistical parameters under different wavelet bases and decomposition layers

小波基	统计参数	分解层数						
		1	2	3	4	5	6	7
coif5	均值绝对值	0.000 6	0.000 8	0.001 1	0.002 5	0.007 8	0.256 0	0.040 6
	方差	0.013 4	0.037 4	0.065 1	0.088 4	0.171 9	1.141 4	2.550 5
sym4	均值绝对值	0.000 5	0.000 7	0.001 4	0.001 6	0.024 7	0.065 1	0.167 5
	方差	0.014 0	0.039 9	0.061 0	0.093 5	0.300 8	0.820 7	2.258 5
db6	均值绝对值	0.000 4	0.000 7	0.000 9	0.001 6	0.011 5	0.045 3	0.191 6
	方差	0.014 2	0.033 0	0.065 4	0.092 7	0.317 5	0.790 4	1.847 1

以短波项概率密度曲线的特征参数符合均值与方差近似为 0 的原则下(确保角度响应曲线的特征趋势不被分解到短波项),尽可能地保证较多的分解层数(确保角度响应曲线分解得彻底)。由图 5(a)和图 5(b)可以看出,在不同小波基的情况下,均值绝对值与方差在分解层数为 5 时产生较大跳变,即分解层数大于 5 时,角度响应曲线的特征趋势会被分解到短波项中,因此,最优分解层数为 5 层,结合表 1,在相同分解层数为 5 时,小波基 coif5 的均值绝对值和方差分别为 0.007 8 和 0.171 9,均小于小波基 sym4(0.024 7,0.300 8)和小波基 db6(0.011 5,0.317 5)的均值绝对值和方差。为此,将小波基 coif5、分解层数为 5 层作为角度响应曲线小波分解的最优参数。图 6(b)和图 6(c),为 1 ping 角度响应曲线在小波基 coif5 和分解层数 5 时,小波分解得到的长波项和短波项,其中,短波项不受角度响应的影响,在强度值 0 附近波动;长波项变化趋势明显,包含角度响应曲线的主要信息,验证了该参数选择的有效性。

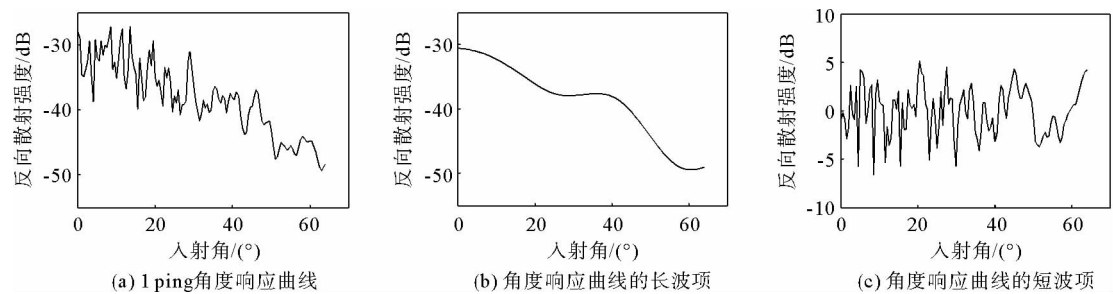


图 6 1 ping 角度响应曲线的小波分解

Fig. 6 Wavelet decomposition of 1 ping angular response curve

2.2 多波束条带同底质区域划分

在获取角度响应曲线小波分解的最优参数后,还需对多波束条带进行同底质区域划分,来消除不同底质类型对 AR 改正的影响,进行自适应分区改正。由 1.3 节可知,长波项三维概率密度图可以判别某一区域是否为同一底质类型,因此,采用二分法对多波束条带进行同底质区域划分,整体流程如图 7 所示。

由于长波项三维概率密度图无法进行定量分析,绘制同底质区域下和不同底质区域下长波项三维概率密度图(图 2)的剖面图。在常见底质下,入射角 θ 较小时(一般不超过 15°),换能器接收的多为镜面反射,称为 D_1 区;当 θ 变大时(一般在 $15^\circ \sim 60^\circ$ 之间)换能器接收的多为后向散射部分,称为 D_2 区,即漫反射区; θ 进一步增大时(一般超过 60°),称为 D_3 区或高入射区^[12]。因此,选取绘制 D_1 、 D_2 、 D_3 区的边界角度 15° 和 60° 处的反向散射强度出现的频率,如图 8(a)和图 8(b)所示。

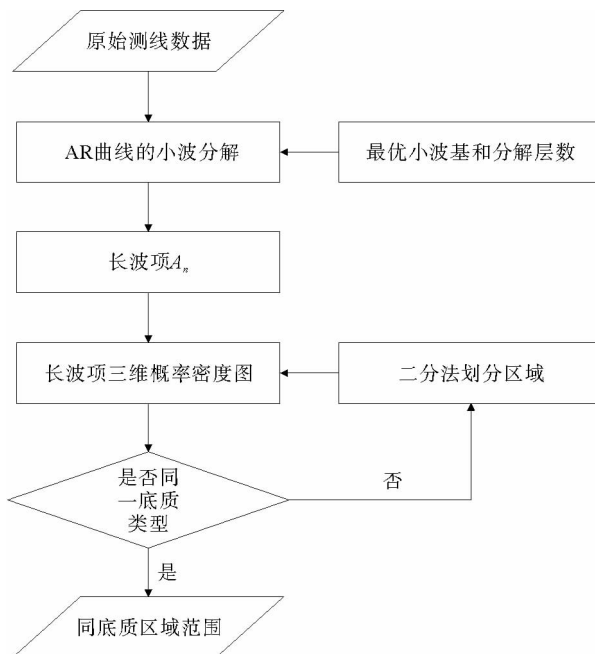


图 7 多波束条带同底质区域划分流程图

Fig. 7 Flowchart of division of multibeam bands with same substrate area

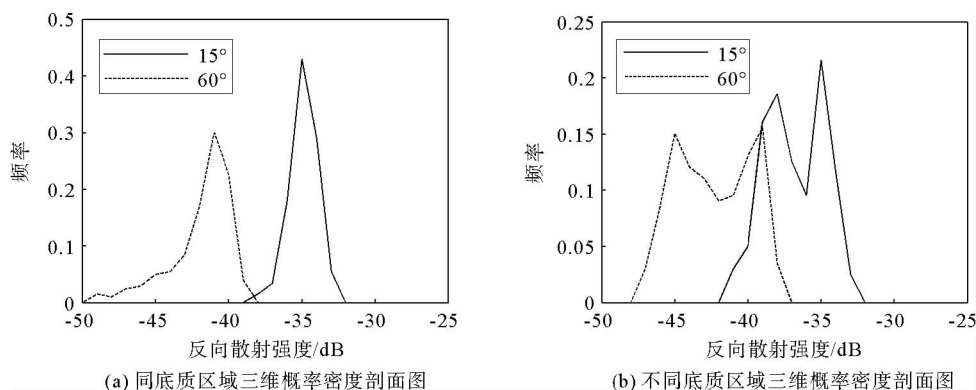


图 8 长波项三维概率密度图的剖面图

Fig. 8 Profile of 3D histogram of long-wave term

分析图 8 可得,同底质区域下,长波项三维概率密度图的剖面图只存在 1 个波峰,当某一区域存在不同底质时,长波项三维概率密度图的剖面图存在 2 个或多个波峰。故以长波项三维概率密度在入射角 15° 和 60° 处的剖面图波峰的个数为判定条件,采用二分法对多波束条带进行同底质区域划分(图 9)。

由于条带左右两部分可能存在不同的角度响应曲线,将条带划分为左右两部分进行同底质区域划分(海底底质复杂,以角度响应曲线按块划分无法保证某一区域完全是同一底质,这里对条带进行粗划分,为后续 AR 改正提供同底质区域范围,提高改正效率)。

2.3 长波项的 AR 改正及强度信号重构

对于任意一条测线,采用 2.1 节中的方法可以获得角度响应曲线小波分解的最优参数:小波基 `coif5` 和分解层数 5;采用 2.2 节中的方法可以得到多波束条带左右舷的同底质区域。由上述分析可得对声呐图像角度响应改正即对角度响应曲线长波项的改正。因此,算法整体流程如图 10 所示。

为避免单 ping 信号改正的偶然性,在同底质区域下,将角度响应曲线的长波项叠加取平均,获得该区域长波项的均值曲线 BS_{Mean} ;然后将该区域每 1 ping 的长波项减去该均值曲线,并统一归化到长波项漫反射区的平均值强度 BS_M ,从而实现长波项的 AR 改正。即:

$$\hat{A}_n(\theta) = A_n(\theta) - BS_{\text{Mean}} + BS_M. \quad (6)$$

将消除角度响应影响的长波项 \hat{A}_n

(θ)与短波项 $\sum_{j=1}^n D_j(\theta)$ ($j=1, \dots, n$) 通过公式(2)进行长波项和短波项的叠加,完成信号重构,得到改正后的声呐图像。

3 实验与分析

为验证本研究算法的有效性,采用高分辨率浅水多波束系统 R2SONIC2024 在我国某附近海域获取的相邻 4 条带数据进行实验,该次实验多波束的采样模式为平均强度采样,波束个数为 256 个,波束开角 120° ,声呐频率 400 kHz,实验区水深 20~30 m。选取 4 条带中的 1 条测线采用本算法进行 AR 改正。

首先,将原始多波束反向散射强度数据进行传播损失改正、声照区面积改正等一系列预处理改正;其次,将条带左舷和右舷的角度响应曲线进行小波分解,分解参数采用 2.1 节中得到的最优分解参数:小波基 *coif5*、分解层数 5 层,分解后得到角度响应曲线的长波项和短波项;然后,绘制长波项的三维概率密度图,并通过二分法对条带进行同底质区域的划分,划分结果如图 11 所示,在划分的条带小区域内基本属于同一底质类型。最后,在同底质区域下,进行角度响应曲线长波项的 AR 改正,将改正后的长波项与短波项进行信号重构,得到改正后的声呐图像(图 12(c))。

为了对比现有方法,结果中添加了未进行 AR 改正的原始声呐图像(图 12(a))和传统 Lambert 法则改正后的声呐图像(图 12(b))。通过对比分析图 12(a)和图 12(c)可以看出,经过 AR 改正后的多波束声呐图像底质分布均匀,条带中央区域“高亮”的灰度异常现象被消除,同时边缘区域的数据也被归化到平均回波强度上,表明了本算法的有效性。对比图 12(b),由于 Lambert 法则改正算法只是固定的改正模型,没有考虑不同底质类型 AR 曲线的不同,因此,在复杂海底底质情况下,无法进行自适应改正,会出现过度改正或改正不彻底的现象,同时也验证了本方法的优越性。

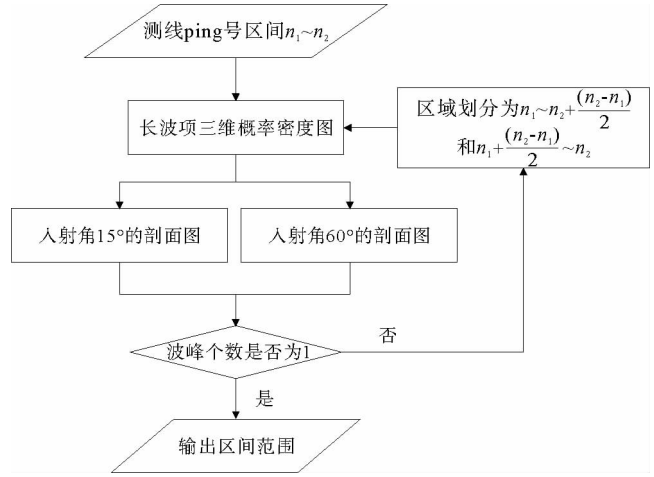


图 9 二分法同底质区域划分流程图

Fig. 9 Flowchart of division of same lower area by dichotomy

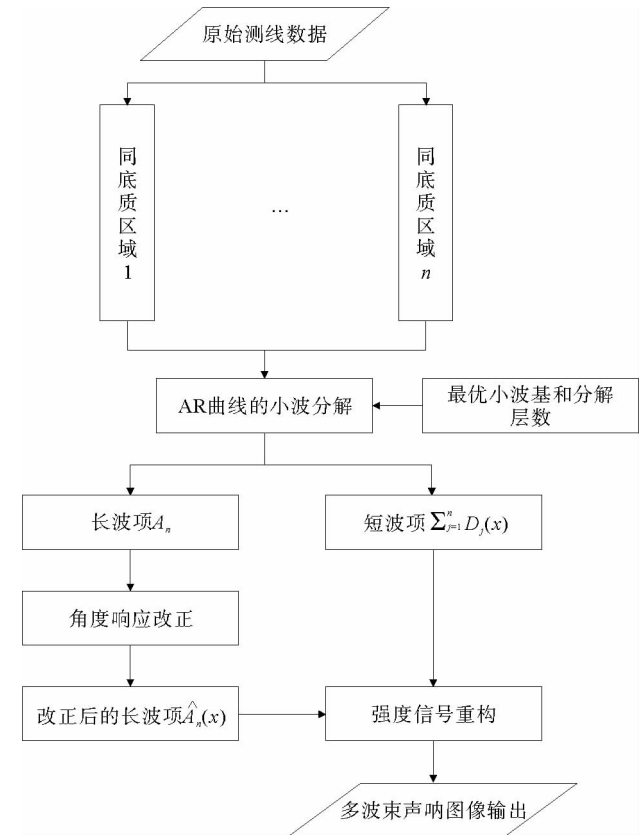


图 10 多波束声呐图像角度响应改正流程图

Fig. 10 Flowchart of angular response correction of multibeam sonar images

以测线为单位依次消除 AR 影响,并在地理编码下进行拼接,形成整个区域的海底声呐图像,拼接结果如图 13(c)所示。与原始声呐图像拼接后的结果(图 13(a))相比,声呐图像中条带中央和边缘区域“高亮”现象得到了有效改善,整个测区灰度变化均匀,底质分界清晰。图 13(b)为 Lambert 法则改正后地理编码的结果,可以看出,该方法在一定程度上减弱了 AR 的影响,但仍存有一定残差,影响了声呐图像的质量。为进一步量化 AR 改正的效果,选取同底质区域连续 50 ping 数据绘制反向散射强度散点图并拟合趋势线,获取其 MIC(maximal information coefficient)指数^[18]。

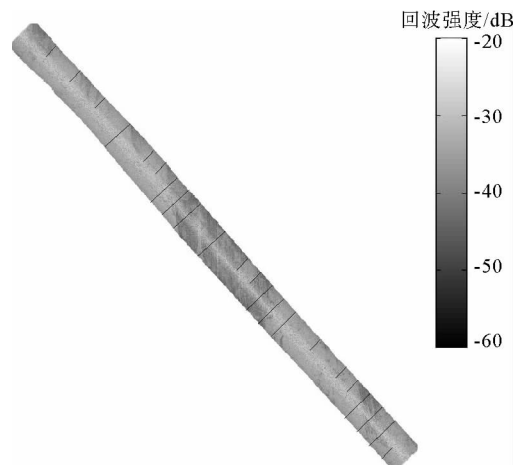


图 11 二分法划分区域后的结果

Fig. 11 Result of dividing regions by dichotomy

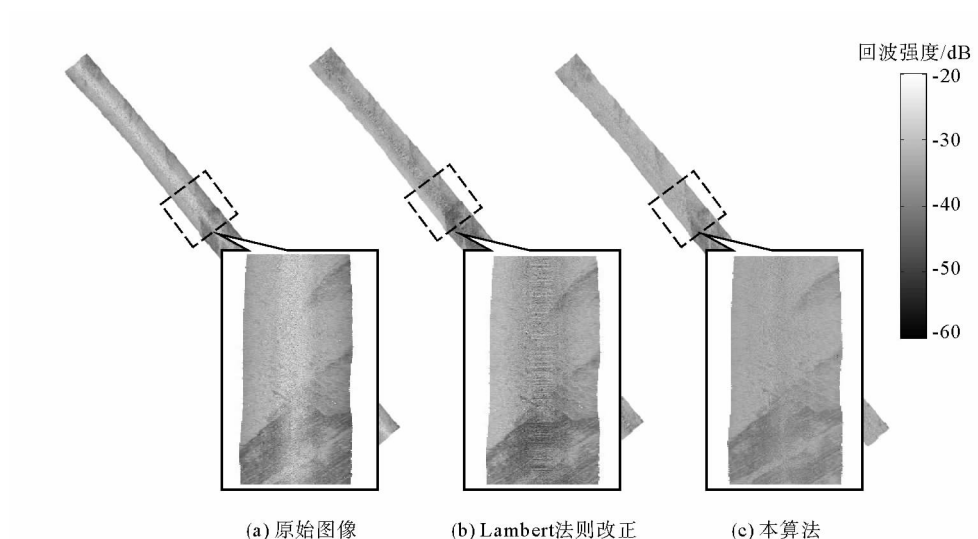


图 12 AR 改正前后声呐图像比较

Fig. 12 Comparison of sonar images before and after AR correction

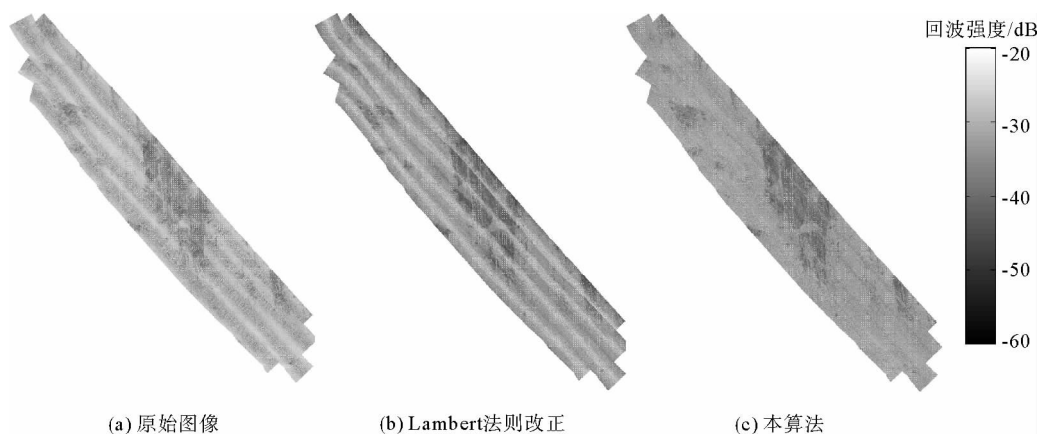


图 13 整个测区的 AR 改正比较

Fig. 13 Comparison of AR correction in the whole survey area

MIC 指数是衡量变量之间相关性的参数, MIC 指数越小, 说明反向散射强度与入射角的相关性越小, 即 AR 改正效果越好。如图 14 所示, 本算法的 MIC 指数为 0.092, 相较于 AR 改正前的 0.433 降低了 0.341, 小于 Lambert 法则改正的 0.274; 且改正后的强度点较为集中, 趋势线基本呈直线, 证明了本算法的有效性。

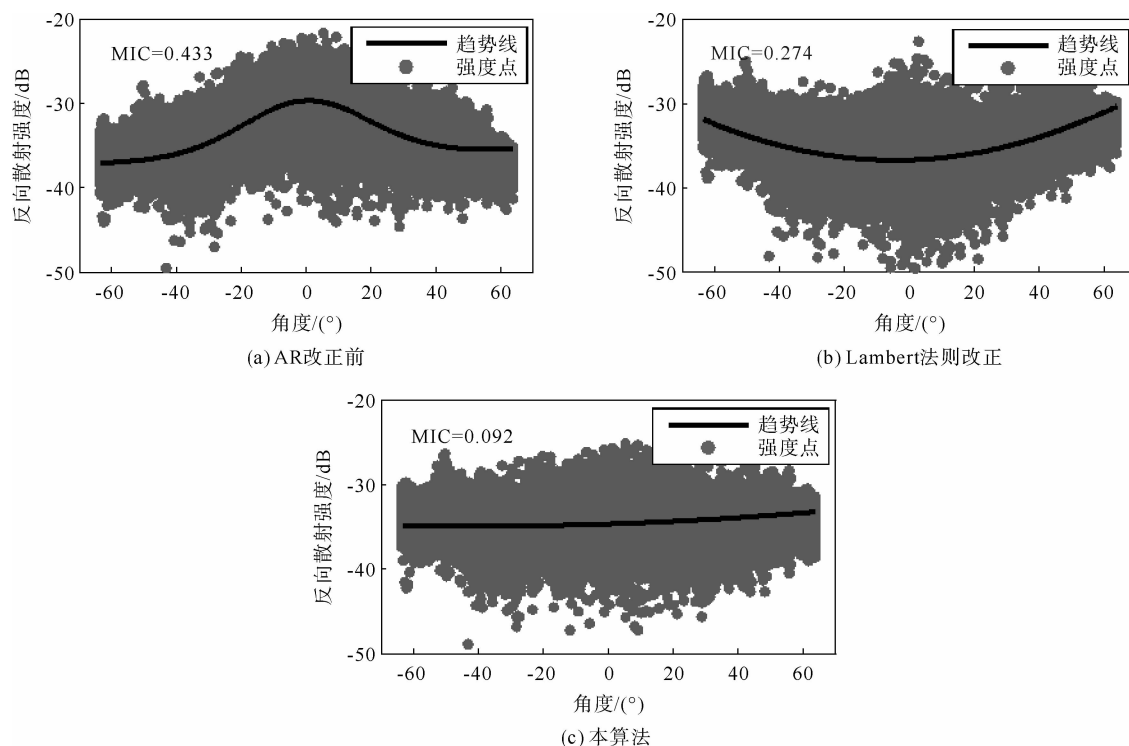


图 14 AR 改正效果比较

Fig. 14 Comparison of AR correction

4 结论

针对多波束声呐图像角度响应改正, 本研究综合考虑了不同底质类型对 AR 改正的影响, 提出一种基于小波分析的多波束声呐图像改正方法, 该方法利用信号分解与重构的思想, 将多波束角度响应曲线分解为长波项和短波项, 利用长波项和短波项各自的特点, 绘制三维概率密度图, 得到小波分解的最优参数和多波束条带同底质区域的划分范围, 然后在同底质区域下进行 AR 改正得到改正后的声呐图像。实验结果表明, 对多波束条带同底质区域划分, 进行自适应分区改正, 改善了传统改正模型适应性差、改正不精确等问题, 减弱了角度响应对多波束声呐图像的影响, 提高了声呐图像的质量, 有效适用于浅水海域地形平坦和底质较复杂的区域, 为多波束声呐图像处理提供了参考。

参考文献:

- [1]HERKÜL K,PETERSON A,PAEKIVI S.Applying multibeam sonar and mathematical modeling for mapping seabed substrate and biota of offshore shallows[J].Estuarine, Coastal & Shelf Science,2017,192(5):57-71.
 - [2]WANG M W,WU Z Y,YANG F L,et al.Multifeature extraction and seafloor classification combining LiDAR and MBES data around Yuanzhi Island in the South China Sea[J].Sensors,2018,18(11):3828.
 - [3]ZHOU J Q,WU Z Y,JIN X L,et al.Observations and analysis of giant sand wave fields on the Taiwan banks,northern South China Sea[J].Marine Geology,2018,406(1):132-141.
 - [4]阳凡林,韩李涛,王瑞富,等.多波束声纳水柱影像探测中底层水域目标的研究进展[J].山东科技大学学报(自然科学版),2013,32(6):75-83.
- YANG Fanlin,HAN Litao,WANG Ruifu,et al.Progress in object detection in middle and bottom-water based on multibeam

- water column image[J].Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2013,32(6):75-83.
- [5]卜宪海,王明伟,阳凡林,等.多波束测深波束归位近似转换模型研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2016,35(5):28-34.
- BU Xianhai,WANG Mingwei,YANG Fanlin,et al.Research on approximate conversion model of beam homing in multibeam echosounding[J].Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2016,35(5):28-34.
- [6]唐秋华,周兴华,丁继胜,等.多波束反向散射强度数据处理研究[J].海洋学报,2006,28(2):51-55.
- TANG Qiuhua,ZHOU Xinghua,DING Jisheng,et al.Study on processing of multibeam backscatter data[J].Acta Oceanologica Sinica,2006,28(2):51-55.
- [7]YANG F L,ZHAO C X,ZHANG K,et al.Calibrating nadir striped artefacts in a multibeam backscatter image using the equal mean-variance fitting model[J].Journal of Applied Remote Sensing,2017,11(3):35-20.
- [8]王煜.多波束声纳图像入射角效应和镜面反射区异常的改正[D].青岛:山东科技大学,2009.
- WANG Yu.Correction of incidence effect and mirror reflection exception on multibeam sonar image[D].Qingdao:Shandong University of Science and Technology,2009.
- [9]HAMMERSTAD E,POHNER F,PARTHIOT F,et al.Field testing of a new deep water multibeam echo sounder[C]//Ocean Technologies and Opportunities in the Pacific for the 90's Proceedings,Honolulu,Hawaii,1991.
- [10]HELLEQUIN L,BOUCHER J M,LURTUN X.Processing of high-frequency multibeam echo sounder data for seafloor-characterization[J].Journal of Oceanic Engineering,2003,28(1):78-89.
- [11]严峻,张红梅,赵建虎,等.多波束声呐后向散射数据角度响应模型的改进算法[J].测绘学报,2016,45(11):1301-1307.
- YAN Jun,ZHANG Hongmei,ZHAO Jianhu,et al.Study on improvement of multibeam backscatter angular response model[J].Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2016,45(11):1301-1307.
- [12]ZHAO J H,YAN J,ZHANG H M,et al.Two self-adaptive methods of improving multibeam backscatter image quality by removing angular response effect[J].Journal of Marine Science and Technology,2017,22:288-300.
- [13]张海勇.基于局部波法的非平稳随机信号分析中若干问题的研究[D].大连:大连理工大学,2001.
- ZHANG Haiyong.Research on the problems of nonstationary random signal analysis and processing based on local wave method[D].Dalian:Dalian University of Technology,2001.
- [14]侯遵泽,杨文采.中国重力异常的小波变换与多尺度分析[J].地球物理学报,1997,40(1):85-95.
- HOU Zunze,YANG Wencai.Wavelet transform and multi-scale analysis on gravity anomalies of China[J].Acta Geophysica Sinica,1997,40(1):85-95.
- [15]金绍华,肖付民,边刚,等.利用多波束反向散射强度角度响应曲线的底质特征参数提取算法[J].武汉大学学报(信息科学版),2014,39(12):1493-1498.
- JIN Shaohua,XIAO Fumin,BIAN Gang,et al.A method for extracting seabed feature parameters based on the angular response curve of multibeam backscatter strength[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2014,39(12):1493-1498.
- [16]陶珂,朱建军.多指标融合的小波去噪最佳分解尺度选择方法[J].测绘学报,2012,41(5):749-755.
- TAO Ke,ZHU Jianjun.A hybrid indicator for determining the best decomposition scale of wavelet denoising[J].Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2012,41(5):749-755.
- [17]金绍华,李家彪,吴自银,等.海底底质分类反向散射强度三维概率密度法[J].测绘学报,2019,48(1):124-131.
- JIN Shaohua,LI Jiabiao,WU Ziyin,et al.3D histogram of backscatter strength for seafloor substrates classification[J].Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2019,48(1):124-131.
- [18]RESHEF D N,RESHEF Y A,FINUCANE H K,et al.Detecting novel associations in large data sets[J].Science,2011,334(6062):1518-1524.

(责任编辑:高丽华)