

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2417565

水声阵元域数据在角域分离的相关性仿真分析*

何先忠

(中国科学院声学研究所 北京 100190)

摘要: 为了解决用实验来进行水声阵元域数据在角域分离前后定性分析、误差和相关性定量测量的困难,提出用仿真的方法对输入和分离后的阵元域数据在方位向和距离向进行相关性仿真分析。以一些典型的海洋底质回波作为输入从不同方向入射到直线阵为仿真模型,仿真输入和分离后输出数据的波形和计算相关性指标。仿真结果表明,通过端点预加重后输入的典型海洋底质回波的阵元域数据与角域带通滤波输出数据在方位向具有更好的相关性。计算结果表明,礁石底回波的相关系数由 0.988 1 提高到 0.999 8,沙泥底回波的相关系数由 0.934 2 提高到 0.996 7,泥底回波的相关系数由 0.838 8 提高到 0.958 1。

关键词: 阵元域;角域;相关性;底质分类;模式识别

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6020

Simulation of correlation between the array data by separating in the angular domain

He Xianzhong

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: To address the difficulty of analyzing qualitatively and measuring quantitatively the correlation of underwater acoustic array element domain data before and after angular domain separation through experiments, a simulation method is proposed to perform correlation simulation analysis on the input and separated array element domain data in the azimuth and distance directions. Some typical seafloor echoes are used as inputs to the linear array from different directions as the simulation model. The correlation index between the input and the separated data is simulated. By pre-emphasizing on the ends, the simulation results show that the data of the typical seafloor echo input has better correlation with the data of the angular bandpass filter output in the azimuth directions. The results show that the correlation coefficient of reef bottom echoes has increased from 0.988 1 to 0.999 8, the correlation coefficient of sand and mud bottom echoes has increased from 0.934 2 to 0.996 7, and the correlation coefficient of mud bottom echoes has increased from 0.838 8 to 0.958 1.

Keywords: array element domain; angular domain; correlation; seafloor classification; pattern recognition

0 引言

在阵列信号处理中波束形成是将接收阵各阵元信号经过延迟、加权及求和等处理使其对空间某个方向具有所需响应的方法,波束域数据的特性和阵元域数据的特性是不同的^[1-2]。在鱼类声学识别时用水声接收换能器输出的阵元域信号能识别出鲤鱼和鲫鱼等不同种类的鱼并且能有 80%~90% 以上的识别正确率^[3-4]。目前利用阵元域数据的这些鱼类识别方法只能对固定的鱼类目标进行识别,尚不能识别自由环境下的各种鱼类,因此迫切需要将水声接

收换能器阵输出的阵元域数据在角域分离,从而得到不同方向入射声波的阵元域数据以实现识别自由环境下的各种鱼的散射回波。在海底表层底质识别中接收换能器接收到海底表层沉积物的回波信号,接收换能器输出信号是阵元域信号,比较真实地反映沉积物的声散射信号。用阵元域数据作为输入的海底表层底质识别算法能识别出海底表层的礁石、基岩、砾石、沙和泥等底质,识别正确率高^[5-6]。基于阵元域数据的专用底质识别算法国内外陆续出现了一批商业化的底质探测系统,但是单波束声呐系统在探测识别底质时只能对船只航迹线正下方进行测量,效率比较低,类

收稿日期:2024-12-05

* 基金项目:国家自然科学基金(62271478)项目资助

似于多波束条带测深系统,一些研究人员开展了基于多波束声呐系统的海底表层底质条带识别研究^[7-9]。多波束海底表层底质条带识别系统将接收换能器阵接收到海底沉积层的声散射信号用波束形成的方法形成并行的多个波束,不同的波束对应海底不同的位置,波束输出的数据作为底质分类和识别器的输入。基于波束域数据的海底表层底质条带识别正确率低,目前应用多波束声呐系统进行海底表层底质分类和识别技术尚不成熟^[10-12]。如果将底质条带识别系统接收换能器阵的阵元域数据在角域分离,基于阵元域数据的单波束海底表层底质识别算法就可以应用到底质条带识别系统中从而提高底质识别的准确率和测量效率。可模式识别的水声成像方法^[13]是一种新的成像方法,该成像方法将不同方向入射的平面波在角域分离,分离后平面波的幅度作为像素值,同时得到阵元域数据在角域分离出具有阵元域性质的数据可以进行要求输入具有阵元域性质数据的模式识别方法。用角域带通滤波将阵元域数据在角域分离其输出和输入通道数都和接收阵阵元数目相同,指向一个预定空间方向有多路输出信号,这些具有阵元域数据性质的空间分集信号可以满足小样本非统计信号处理和近年来快速发展的机器学习方法对输入信号的要求^[14-15]。综上所述,阵元域数据在角域分离的需求越来越多,如何定量测量阵元域数据分离前后的误差和相关性尚没有公开的报道,更没有如何减少误差和提高其相关性方面的研究,这是一个急需解决的问题,本文就是在这样的背景下开展工作以填补这方面的知识空白。

在雷达和声呐等探测系统工作时,当被探测目标离接收阵的距离大于远场条件时,入射到接收阵的目标散射回波都被当作平面波来处理。来自空间各个方向的平面回波在接收阵的阵元位置处叠加,每一个阵元响应叠加的微波或声波转换成输出的电信号,所以各阵元包含着很多的信息量,阵元数据的波形非常复杂。目前针对接收阵元所表现的波形信息的研究及处理尚处于起步阶段^[16-17]。用实验来验证阵元域数据在角域中相分离是很困难的,以下用典型的海底表层底质水声回波作为仿真输入,用角域带通滤波的方法来分离出不同方向入射的海底回波,对输入和分离后的阵元域数据在方位向和距离向进行误差和相关性仿真分析,并且进行了减少误差和提高相关性方面的尝试。

1 阵元域数据角域滤波

在雷达和声呐等系统的阵元域信号处理中如果用一个 $N \times N$ 的复系数矩阵对 N 元接收阵的一个快拍数据进行相乘运算,输出数据仍保持阵元域数据的特性,这样的运算称为矩阵滤波。如果用空间直角坐标 x 、 y 和 z 作为自变量来设计复系数矩阵,那么这样的矩阵滤波称为空域矩阵滤波。如果用平面波的入射角 θ 作为唯一的自变量来设计复系数矩阵,那么这样的矩阵滤波称为方位滤波,又称为角域滤波^[13]。相对于空域矩阵滤波,角域滤波更适用于扇面

滤波。

图 1 为一个等间距直线接收阵的模型,阵元数目为 N ,相邻阵元的间距为 d ,入射平面波的波长为 λ ,各阵元接收灵敏度相同,阵元无指向性,幅度为 A 的平面波从 θ 方向入射到接收阵, τ 为平面波到达相邻阵元的时延,那么各阵元输出的信号如式(1)所示。

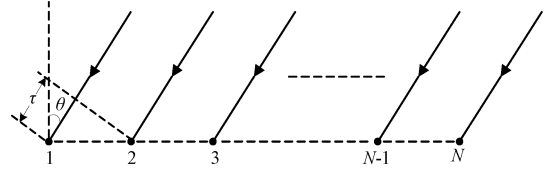


图 1 等间距直线接收阵模型

Fig. 1 Equidistant linear receiving array model

$$\begin{aligned} F_1(t) &= A \cos(\omega t) = A \operatorname{Re}[e^{-j\omega t}] \\ F_2(t) &= A \cos(\omega t + \varphi) = A \operatorname{Re}[e^{-j\omega t} \cdot e^{-j\varphi}] \\ F_3(t) &= A \cos(\omega t + 2\varphi) = A \operatorname{Re}[e^{-j\omega t} \cdot e^{-j2\varphi}] \\ &\vdots \\ F_N(t) &= A \cos[\omega t + (N-1)\varphi] = A \operatorname{Re}[e^{-j\omega t} \cdot e^{-j(N-1)\varphi}] \end{aligned} \quad (1)$$

其中, ω 为入射平面波的角频率, $\operatorname{Re}(\cdot)$ 为取实部的符号, φ 为相邻阵元接收信号间的相位差,有 $\varphi = 2\pi f\tau = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta$,对于半波长直线接收阵有 $d = \lambda/2$,所以 $\varphi = \pi \sin\theta$ 。

在阵列信号处理中为了减少运算量一般将接收到的阵元域数据经过正交解调数字下变频到基带信号,为了防止频谱混叠一个快拍基带信号用复信号表示如式(2)所示。

$$\begin{aligned} s(1) &= A \\ s(2) &= A e^{-j\pi \sin\theta} \\ s(3) &= A e^{-j2\pi \sin\theta} \\ &\vdots \\ s(N) &= A e^{-j(N-1)\pi \sin\theta} \end{aligned} \quad (2)$$

从式(2)可以看出在入射平面波幅度 A 保持不变的情况下接收阵接收到的阵元域基带信号只与平面波的入射角 θ 有关,因此可以设计一个以 θ 为变量的带通滤波器来对入射的平面波进行滤波^[12-13],使得平面波在角通带 Θ_p 扇面内信号完全通过,而在角阻带 Θ_s 扇面内信号完全被压制的滤波器,即设计的滤波器的复系数矩阵 \mathbf{H} 和一个阵元域数据快拍向量 $s(\theta)$ 满足:

$$\mathbf{H}s(\theta) = \begin{cases} s(\theta), \theta \in \Theta_p \\ 0, \theta \in \Theta_s \end{cases} \quad (3)$$

对于其他接收阵类型(如非均匀阵列、曲线阵列等)或动态变化场景,一个快拍基带信号与式(2)不同,但是只要阵元空间间隔足够密集使接收到的信号角谱不发生混叠,那么用实际形状接收阵接收到的基带信号代替 $s(\theta)$ 同样能够实现角域滤波功能。

2 阵元域数据分离仿真

从上节角域带通滤波器的原理分析可以看出,角域带通滤波器能将扇面空间中从不同方向入射的平面波在角域中进行分离。在给定角域带通滤波器的角阻带满足一定衰减量的情况下设计角域带通滤波器,与常规形成波束的角度分辨率受孔径限制一样,角域带通滤波器的角度分辨率即角通带的最小带宽也受接收换能器阵的孔径限制,经过优化设计使得滤波器角通带的带宽与相应常规形成波束的主瓣宽度相同,这样设计的角域带通滤波器输出的数据实际上就是波束主瓣内远场目标平面回波到达接收阵时的快拍数据。

以海底表层底质回波为例,分布在不同海底位置的不同底质的平面回波的阵元域数据可以在角域中进行分离。假设海底表层底质分布有礁石、沙泥和泥,上述海底三列平面回波同时入射到图 1 的 48 个等间距半波长直线接收阵,入射角以接收阵的法线为基准,顺时针方向入射角为负,逆时针方向入射角为正,三列海底平面回波的入射角分别为: $\theta_1 = 7^\circ$, $\theta_2 = 26^\circ$ 和 $\theta_3 = -35^\circ$ 。下面分别对接收阵的一个快拍数据和距离向的回波数据进行阵元域数据分离仿真。

2.1 一个快拍的阵元域数据分离

假设礁石底平面回波幅度电平和入射方向分别为: $A_1 = 0$ dB, $\theta_1 = 7^\circ$;沙泥底平面回波幅度电平和入射方向分别为: $A_2 = -12$ dB, $\theta_2 = 26^\circ$;泥底平面回波幅度电平和入射方向分别为: $A_3 = -23$ dB, $\theta_3 = -35^\circ$ 。每列平面回波以上述入射角单独入射到如图 1 所示的 48 个阵元半波长直线接收阵时一个快拍数据的阵元域仿真波形如图 2(a)~(c)所示。上述三列平面波同时入射到该接收换能器阵时得到的一个快拍仿真数据的阵元域波形如图 2(d)所示。

图 2(d)的阵元域数据分别经过中心角度为 $\theta_1 = 7^\circ$, $\theta_2 = 26^\circ$ 和 $\theta_3 = -35^\circ$ 的角域带通滤波器滤波后得到的阵元域波形分别如图 3(a)~(c)中的虚线。

将图 3 虚线的阵元域数据在角域分离的结果与图 2(a)~(c)对比可以发现靠近中间位置的阵元数据吻合得比较好,但是靠近两端点位置的阵元数据偏差比较大,出现了比较明显的端点效应,受上述影响将导致原始输入与分离后阵元域数据的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 数值比较大,相关系数 (correlation coefficient, CORR) 的数值混乱。为了改善这种情况在设计角域带通滤波器的复系数矩阵 \mathbf{H} 时对它的角通带 Θ_p 内的阵列流形向量 \mathbf{v}_p ($p = 1, 2, \dots, P$) 进行端点预加重,通过迭代优化后得到新的带通滤波器的复系数矩阵 \mathbf{H}' ,用 \mathbf{H}' 代替 \mathbf{H} 重新对图 2(d)的海底回波快拍数据在角域中进行阵元域数据分离,得到相应的阵元域数据在角域分离的波形如图 3 中的实线。

将图 3(a)~(c)中的实线、虚线波形和图 2(a)~(c)的波形分别进行比较,以图 2(a)~(c)的阵元域数据波形为基准,图 3(a)~(c)的实线波形和虚线波形相对于图 2(a)~(c)波

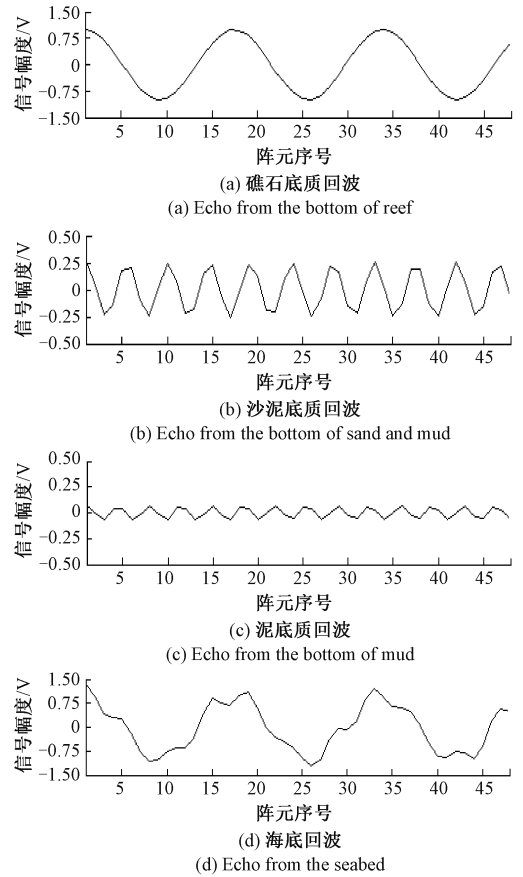


图 2 一个快拍仿真数据的阵元域波形

Fig. 2 The waveform of a snapshot simulation data in the array element domain

形的误差分别如图 4(a)~(c)的实线和虚线波形。

从图 4 可以看到采用端点预加重的方法来设计角域带通滤波器的复系数矩阵 \mathbf{H}' 来进行阵元域数据在角域分离能得到更高的精度。

2.2 距离向回波的阵元域数据分离

为了获得典型海底表层底质的真实回波,本研究在南海某海域用 H/HDT100 型海底表层底质探测系统进行走航式底质测量。测量海域水深为 40 多米,二级海况,测量前用机械取样器进行海底表层底质实地取样,确定礁石、沙泥和泥共三片平坦的典型海底底质海域。走航式测量时海底表层底质探测系统发射声波的频率为 25 kHz,工作于 CW 模式,脉冲宽度为 0.5 ms。H/HDT100 型海底表层底质探测系统的接收换能器是单阵元,以该底质测量系统保存的基带信号作为图 1 的 48 个等间距半波长直线阵中第 24 个阵元的仿真数据,其余 47 个阵元数据是通过接收阵的阵列流形向量进行扩展。仿真条件同上。为了避开端点效应选择接近接收阵中心的第 24 个接收阵元接收到的信号为例,礁石底质距离向回波基带信号波形如图 5(a),沙泥底质距离向回波基带信号波形如图 5(b),泥底质距离向回波基带信号波形如图 5(c),上述三列平面波分别以 7° 、 26° 和 -35°

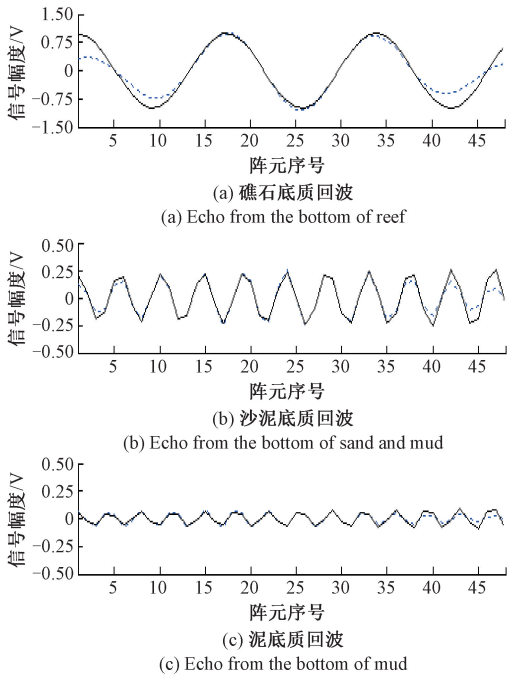


图 3 图 2(d) 快拍仿真数据的阵元域分离波形
 Fig. 3 The waveform of a snapshot simulation data by separating from Fig. 2 (d)

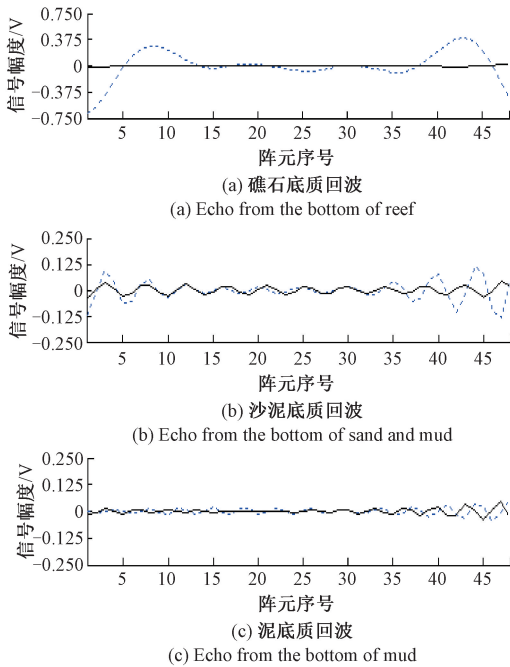


图 4 图 3 相对于图 2 的误差波形
 Fig. 4 The error waveform of Fig. 3 relative to Fig. 2

的入射角同时入射到接收换能器阵时线性叠加后第 24 个阵元接收到的海底距离向回波基带信号如图 5(d)。

得到的第 24 个阵元距离向回波基带信号波形分别如图 6(a)~(c) 所示。

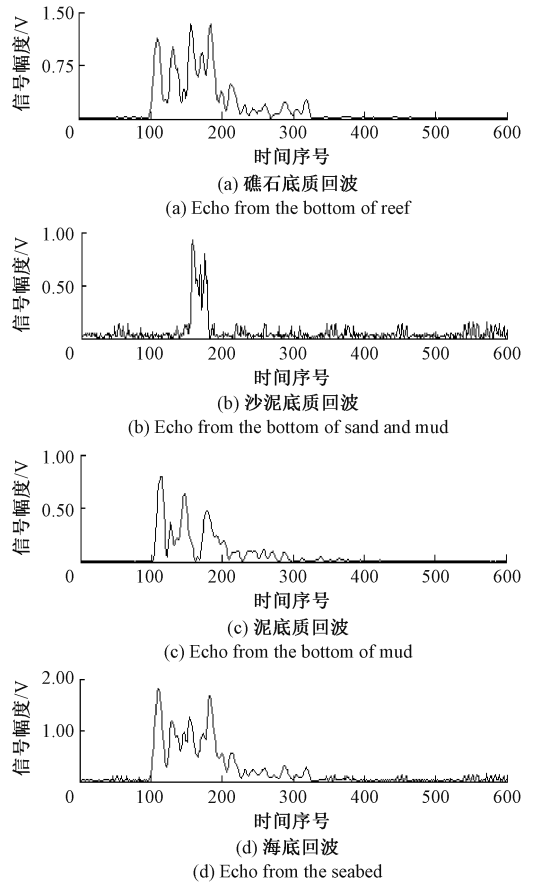


图 5 距离向的阵元域仿真数据波形
 Fig. 5 The waveform of array element domain simulation data in the range direction

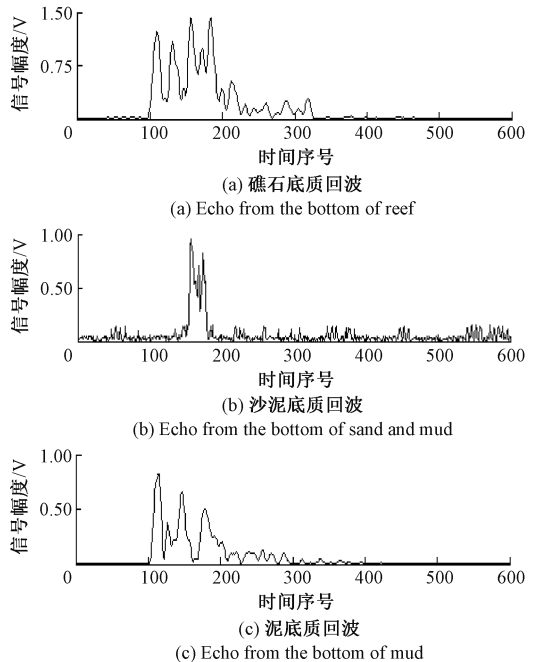


图 6 角域带通滤波后距离向回波波形
 Fig. 6 Range echo waveforms after filtering by three angular band-pass filters

3 相关性仿真结果与分析

上面两节用波形图直观地比较了阵元域数据在角域中分离后与原始输入波形的相似性,这些比较是定性的。为了分析阵元域数据在角域分离的性能和精度,下面从相关系数 CORR、均方根误差 RMSE 和拟合优度 (R^2) 三个方面定量地进行精度评定,评定指标如下:

1) 相关系数 CORR

CORR 是指原始阵元域数据信号 $x(n)$ 与阵元域数据在角域分离后信号 $y(n)$ 的相关系数,其值越接近于 1 说明分离后的结果与原始阵元域数据间的相关性越好,计算公式如下:

$$CORR = \frac{\sum_{n=1}^M (y(n) - \bar{y})(x(n) - \bar{x})}{\sqrt{\sum_{n=1}^M (y(n) - \bar{y})^2 \sum_{n=1}^M (x(n) - \bar{x})^2}} \quad (4)$$

式中: n 、 $x(n)$ 、 \bar{x} 、 $y(n)$ 和 \bar{y} 分别为采样点序号、原始回波信号、原始回波信号的均值、分离后信号和分离后信号的均值, M 为原始回波信号 $x(n)$ 的点数。

2) 均方根误差 RMSE

RMSE 指分离后信号与原始回波信号差值的平方和与原始回波信号 $x(n)$ 的点数 M 比值的平方根,其值越小,表示拟合的效果越好,计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{n=1}^M (y(n) - x(n))^2} \quad (5)$$

3) 拟合优度 R^2

R^2 是表示拟合精度的一个评定指标,其值范围在 0~1 之间, R^2 的值越接近于 1,说明阵元域数据在角域中分离的效果越好,计算公式如下:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{n=1}^M (y(n) - x(n))^2}{\sum_{n=1}^M (x(n) - \bar{x})^2} \quad (6)$$

3.1 数据方位向分离的相关性结果

图 2(a)和图 3(a)虚线为礁石底质回波一个快拍的阵元域数据方位向分离前后的仿真波形,图 2(b)和图 3(b)虚线为沙泥底质回波一个快拍的阵元域数据方位向分离前后的仿真波形,图 2(c)和图 3(c)虚线为泥底质回波一个快拍的阵元域数据方位向分离前后的仿真波形。为了比较方位向阵元域数据分离前后波形的相似度根据式(4)~(6)计算得到的相关性性能指标结果如表 1 所示。

表 1 阵元域数据方位向分离相关性结果

Table 1 Correlation of array element domain data by separating in the azimuth

底质类型	CORR	RMSE/V	R^2
礁石底	0.988 1	0.217 7	0.972 0
沙泥底	0.934 2	0.050 5	0.969 0
泥底	0.838 8	0.017 5	0.881 5

从表 1 可以看出 3 种海底表层底质回波的一个阵元域快拍数据分离前后的相关系数 CORR 和拟合优度 R^2 与 1 有差距,相关性不够强,尤其是礁石底回波分离前后的均方根误差 RMSE 比较大,原因是由于接收换能器阵的端点效应引起的。对角域带通滤波器的复系数矩阵进行迭代优化过程中在角通带内将阵列流形向量进行端点预加重而得到角域带通滤波器的复系数矩阵 H' ,与图 3 实线用 H' 将阵元域数据在角域分离相对应的分离前后的数据根据式(4)~(6)计算得到的相关性性能指标结果如表 2 所示。

表 2 端点预加重后阵元域数据方位向分离相关性结果

Table 2 Correlation of array element domain data by separating in the azimuth after endpoint pre-emphasis

底质类型	CORR	RMSE/V	R^2
礁石底	0.999 8	0.141 2	0.988 2
沙泥底	0.996 7	0.043 8	0.976 7
泥底	0.958 1	0.013 0	0.934 7

从表 2 可以看出 3 种海底表层底质回波的一个阵元域快拍数据分离前后的相关系数 CORR 和拟合优度 R^2 与 1 比较接近,均方根误差 RMSE 减少了,分离前后的数据相关性更强。

3.2 数据距离向分离的相关性结果

图 5 和图 6 为 3 种不同底质回波的阵元域数据在角域分离前后第 24 个接收阵元的波形,图 5(a)和图 6(a)为礁石底质回波距离向的阵元域数据相分离前后的仿真波形,图 5(b)和图 6(b)为沙泥底质回波距离向的阵元域数据相分离前后的仿真波形,图 5(c)和图 6(c)为泥底质回波距离向的阵元域数据相分离前后的仿真波形。为了比较距离向阵元域数据分离前后波形的相似度根据式(4)~(6)计算的相关性性能指标结果如表 3 所示。

表 3 阵元域数据距离向分离相关性结果

Table 3 Correlation of array element domain data by separating in the azimuth

底质类型	CORR	RMSE/V	R^2
礁石底	1.000 0	0.021 5	1.000 0
沙泥底	1.000 0	0.004 6	1.000 0
泥底	1.000 0	0.006 9	1.000 0

从表 3 可以看出 3 种海底表层底质回波距离向的一线阵元域数据分离前后的相关系数 CORR 和拟合优度 R^2 非常接近于 1,均方根误差 RMSE 非常小,距离向分离前后的数据相关性非常强。

从评估指标结果可以看出,基于角域带通滤波将接收到的阵元域数据在角域进行分离能够高效地分离出不同方向入射平面波所产生的阵元域数据,距离向阵元域数据分

离结果比较理想,通过端点预加重的方法改善了方位向阵元域数据分离的相关性结果。

4 结 论

水声阵元域数据在角域分离前后的相关性测量在实验中难以实现。本文提出了一种仿真分析方法,对一些典型的海底底质回波从方位向和距离向两个方面将阵元域数据在角域分离,从仿真波形和相关性指标的计算结果表明该评价方法有效。通过对接收阵端点阵元预加重后仿真分离前后波形,发现误差减少,相关性更强,分离出的波形精度更高,有利于后续要求输入为阵元域性质数据的模式识别算法能识别出更多的分类种类,识别精确率更高。本文的方法对于雷达阵元域数据在角域分离前后的波形误差和相关性测量及其评价同样适用。

参考文献

- [1] 李秀坤,王集,于歌. 基于双基地阵元级数据融合的声源定位算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2024, 45(10): 2007-2013.
LI X K, WANG J, YU G. Source localization in bi-static sonar systems based on element-level data fusion[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2024, 45(10): 2007-2013.
- [2] 李智,杨士莪. 水声矢量传感器研究进展与挑战[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(11): 1-19.
LI ZH, YANG SH E. Advances and challenges in underwater acoustic vector sensors[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 47(11): 1-19.
- [3] 杜伟东,李海森,魏玉阔,等. 基于SVM决策融合鱼类识别方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(5): 623-627.
DU W D, LI H S, W Y K, et al. Fish recognition method based on SVM decision fusion[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2015, 36(5): 623-627.
- [4] RAUF H T, LALI M I U, ZAHOR S, et al. Visual features based automated identification of fish species using deep convolutional neural networks [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 167: 105075.
- [5] 李国富,王宁,高大治. 单波束测深仪沉积层地声反演底质分类[J]. 声学学报, 2014, 39(6): 663-672.
LI G F, WANG N, GAO D ZH. Single beam bathymeter of sedimentary layers for seafloor material classification [J]. Acta Acustica, 2014, 39(6): 663-672.
- [6] 罗宇,郑旭,施剑,等. 基于浅地层回波信号的底质分类技术研究[J]. 海洋技术学报, 2020, 39(6): 42-47.
LUO Y, ZHENG X, SHI J, et al. Research on bottom material classification technology based on shallow layer echo signals [J]. Journal of Marine Technology, 2020, 39(6): 42-47.
- [7] LANDMARK K, SOLBERG A H S, AUSTENG A. Bayesian seabed classification using angle-dependent backscatter data from multi-beam echo sounders[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2014, 39(4): 724-739.
- [8] HERKUL K, PETERSON A, PAEKIVI S. Applying multi-beam sonar and mathematical modeling for mapping seabed substrate and biota off shore shallows[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2017, 192(6): 57-71.
- [9] 唐秋华,纪雪,丁继胜,等. 多波束声学底质分类研究进展与展望[J]. 海洋科学进展, 2019, 37(1): 1-10.
TANG Q H, JI X, DING J SH, et al. Research progress and prospects of multi beam acoustic substrate classification [J]. Advances in Marine Science, 2019, 37(1): 1-10.
- [10] JI X, YANG B SH, TANG Q H. Seabed sediment classification using multibeam backscatter data based on the selecting optimal random forest model [J]. Applied Acoustics, 2020, 167: 107387.
- [11] TANG Q H, LEI N, LI J, et al. Seabed mixed sediment classification with multi-beam echo sounder backscatter data in Jiaozhou Bay [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2015, 33(1): 1-11.
- [12] FAJARYANTI R, KANG M. A preliminary study on seabed classification using a scientific echosounder[J]. Bulletin of the Korean Society of Fisheries Technology, 2019, 55(1): 39-49.
- [13] 何先忠,许枫. 可模式识别的水声成像方法[J]. 声学学报, 2019, 44(3): 345-352.
HE X ZH, XU F. An underwater acoustic imaging method for pattern recognition [J]. Acta Acustica, 2019, 44(3): 345-352.
- [14] 姚博文,彭喜元,于希明,等. 深度神经网络的自适应联合压缩方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(5): 21-32.
YAO B W, PENG X Y, YU X M, et al. Adaptive joint compression method for deep neural networks[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(5): 21-32.
- [15] 李晨,许雪,郭业才. 基于深度神经网络的单幅图像盲去噪算法[J]. 电子测量技术, 2023, 46(21): 183-192.
LI CH, XU X, GUO Y C. Blind denoising algorithm for single image based on deep neural network [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(21): 183-192.
- [16] 张目宁,杨鲲,吴永亭,等. 用于海底目标识别与底质分类的多波束水体波形预处理[J]. 海洋通报, 2021, 40(1): 44-52.
ZHANG M N, YANG K, WU Y T, et al. Multi beam water waveform preprocessing for seabed target recognition and sediment classification [J]. Marine Science Bulletin, 2021, 40(1): 44-52.
- [17] 陈新华,张龙恩,郑恩明,等. 深海海底反射拖船噪声伪目标判别[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(10): 272-283.
CHEN X H, ZHANG L EN, ZHENG EN M, et al. False target discrimination of tugboat noise reflected by deep seabed [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(10): 272-283.

作者简介

何先忠, 博士, 副研究员, 主要研究方向为水声信号处理。

E-mail: hexianzhong@mail.ioa.ac.cn