

基于垂直声强流的水中目标深度分类方法

毕雪洁^① 惠娟^② 赵安邦*^② 王彪^① 马林^① 李晓曼^①

^①(江苏科技大学电子信息学院 镇江 212100)

^②(哈尔滨工程大学水声工程学院 哈尔滨 150001)

摘要: 现有的基于声场干涉结构特征的目标深度分类方法的频率适用范围有限, 仅适用于目标线谱频率激发前2阶简正波的情况。针对上述问题, 该文提出基于匹配场处理的目标深度分类算法, 该算法将垂直复声强无功分量作为匹配量进行目标深度的匹配估计, 利用目标深度的粗略估计结果辅助进行目标深度的二元分类。算法适用于线谱频率激发前3阶简正波的情况, 有效拓展了算法的频率适用范围。仿真结果验证了算法的可行性和稳健性。该文分析了环境失配情况对算法性能的影响。所提算法具有较高的准确性和稳健性。

关键词: 水中目标; 声场干涉结构; 深度分类; 匹配场处理

中图分类号: O427

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)11-3237-10

DOI: [10.11999/JEIT201045](https://doi.org/10.11999/JEIT201045)

Underwater Target Depth Classification Method Based on Vertical Acoustic Intensity Flux

BI Xuejie^① HUI Juan^② ZHAO Anbang^② WANG Biao^①
MA Lin^① LI Xiaoman^①

^①(School of Electronic and Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China)

^②(College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: The existing target depth classification methods based on acoustic interference structure characteristics have a limited frequency range, and are only suitable for the case where target frequency can excite first two modes. Aiming to this problem, a novel target depth classification algorithm based on matching field processing is proposed in this paper. The proposed algorithm uses the reactive component of vertical complex acoustic intensity as matching variable to estimate target depth. The rough estimation results of target depth can be used to assist the binary classification of target depth. This method is suitable for the case where target frequency can excite first three modes, so as to expand the frequency range of the algorithm. The feasibility and robustness of the algorithm are verified by simulation results. The influence of mismatched sea environmental parameters on algorithm performance are also analyzed. The proposed algorithm has high accuracy and robustness.

Key words: Underwater target; Acoustic interference structure; Depth classification; Matched field processing

收稿日期: 2020-12-14; 改回日期: 2021-06-04; 网络出版: 2021-08-18

*通信作者: 赵安邦 zhaanbang@hrbeu.edu.cn

基金项目: 江苏科技大学科研启动基金 (1032932003, 1032931907), 国家自然科学基金 (11574120, 12004143), 国防科技重点实验室基金 (6142108190907), 海洋智能装备与系统教育部重点实验室开放基金(MIES-2020-09)

Foundation Items: The Scientific Research Starting Foundation of Jiangsu University of Science and Technology (1032932003, 1032931907), The National Natural Science Foundation of China (11574120, 12004143), The Science and Technology Foundation of State Key Laboratory (6142108190907), The Open Foundation of Key Laboratory of Marine Intelligent Equipment and System, Ministry of Education (MIES-2020-09)

1 引言

潜艇为了保持其安全性和隐蔽性,往往以被动方式进行目标信息获取,从而实现目标探测、定位和识别等。可靠且有效的被动信息获取技术在潜艇的未来发展趋势中有着重要地位。而目标的深度特征在目标定位及识别领域具有很高的应用价值。利用目标产生的浅海声场干涉结构特征可以实现目标的深度分类(水面目标还是水下目标)。传统的被动目标深度分类方法对阵元数目要求较高。考虑到水下平台的空间局限性和安全性需求,可能无法布放或者拖曳一个孔径较大的阵。如何以小孔径矢量阵为接收装置实现目标深度分类的相关研究十分重要。水面目标与水下目标的深度分界位置为临界深度,临界深度值在20 m附近为宜。目标深度的有效分类对水下平台的隐蔽性和安全性保障有着深远影响。

近年来,大量学者在目标深度分类领域做了相关研究工作,大体上可分为以下3大类:(1)基于声学特征的目标深度分类方法。声场的干涉结构中包含多种与深度有关的声学特征,如波导不变量^[1]、信道冲激响应^[2]、水平声强流及垂直声强流^[3]、简正波相关项^[4]、模态特征^[5]、多途时延特征^[6]、声图特征^[7],利用这些声学特征可以实现目标深度分类。该类方法的应用价值大多受限于阵元数目,大孔径阵列会带来较高的安装成本及安装难度,而小孔径阵列会存在算法性能较差或频率适用范围有限的问题。(2)基于匹配处理技术的目标深度分类方法。匹配处理技术包括匹配场处理技术及匹配模处理技术,两者在目标深度分类领域的应用都很广泛^[8,9]。在匹配处理技术的基础上发展起来的深度分类算法的性能与阵元数目直接相关。该类算法依旧存在阵成本及阵安装难度带来的应用局限性,而且该类算法计算量很大,对环境信息失配也比较敏感。(3)联合使用声学特征及匹配处理技术的目标深度分类方法。该类方法通过以不同的声学特征为匹配量获取模糊面,再通过提取模糊面中的特征点实现目标深度分类,主要利用的声学特征包括:互相关性^[10]、频散特征^[11]、声场干涉结构^[12]、可靠声路径中传播的声场强度^[13]、首达波和次达波的到达时差特征^[14]。算法大多需要大孔径阵列进行信号接收,基于单水听器的该类算法对声源级的要求较高。若仅需要实现目标的深度分类,则可以大大降低算法对阵列孔径的要求,算法的复杂度与环境敏感度也随之降低,算法的应用价值得到较大提升。

现有的联合使用声学特征及匹配处理技术的目标深度分类方法大多存在频率适用范围有限的问题,仅适用于目标线谱频率激发前两阶简正波的情

况。针对该问题,本文提出了以线谱干涉特征(垂直复声强无功分量)为匹配量的目标深度分类算法。该算法利用垂直复声强无功分量的深度分布特征进行目标深度的匹配估计,利用目标深度的粗略估计结果辅助进行目标深度的二元分类,从而实现水面目标与水下目标的有效区分。算法适用于线谱频率激发前3阶简正波的情况,有效拓展了算法的频率适用范围。仿真结果表明:本文所提算法在低信噪比工况、复杂的海洋环境下也具有较高的准确性和稳健性。

2 基于匹配场处理的目标深度分类方法

匹配场处理技术通过获取信号场与拷贝场间的相关性实现目标3维定位^[15],在海洋环境参数已知的前提下,选定适宜的目标声场计算模型,实现拷贝场计算。在接收深度固定且已知的情况下,信号场与拷贝场间的相关系数分布实际上就是一个随声源深度及水平距离变化的2维模糊度平面。通过相关系数的2维扫描可以获得目标的水平距离和深度信息。匹配场处理技术通常需要大孔径阵列进行信号采集。阵成本及阵安装难度限制了基于匹配场技术的目标定位算法的应用价值。本文希望通过牺牲测深精度,降低算法对阵元数目的要求,同时希望在单矢量传感器采集的声场数据的基础上,实现目标深度的有效分类。

传统的匹配场处理算法大多以声压场或振速场数据为匹配量,在阵元数目较少时,测距精度和测深精度都较低,算法的实际应用价值也较低。针对该问题,本文联合利用声压场和振速场数据,提出了新的匹配量——线谱干涉结构特征(垂直复声强无功分量)。假定试验海域仅存在单一目标,由于水面目标及水下目标的垂直复声强无功分量的深度分布具有明显差异,该特征与匹配场处理技术的结合可实现水面目标及水下目标的深度的粗略分类,既可以有效解决传统匹配算法对阵元数目要求较高的问题,还可以有效解决仅基于线谱干涉结构特征的深度分类结果存在的临界深度偏大的问题。因此,本文提出基于线谱干涉结构特征(垂直复声强无功分量)及匹配场处理的目标深度分类算法。

2.1 声场计算模型

本文采用简正波理论实现目标声场拷贝场的计算。声压场及振速场的表达式为

$$H_e = H + 1/bk_1 \sin(\alpha_c) \quad (1)$$

$$P(z_0, z, r) = \frac{j}{H_e \sqrt{2\pi r}} \sum_n \frac{1}{\sqrt{\xi_n}} \Psi_n(z_0) \Psi_n(z) e^{-j(\xi_n r - \frac{\pi}{4})} \quad (2)$$

$$V_z(z_0, z, r) = \frac{1}{\omega \rho_1 H_e \sqrt{2\pi r}} \cdot \sum_n \frac{1}{\sqrt{\xi_n}} \Psi_n(z_0) \Psi'_n(z) e^{-j(\xi_n r - \frac{\pi}{4})} \quad (3)$$

其中, H 为海深, c_1 与 c_2 分别为海水层和底质层的声速, $b = \rho_1/\rho_2$, ρ_1 与 ρ_2 分别为海水层和底质层的密度, 波数 $k_1 = \omega/c_1$, ω 是声源角频率, $\alpha_c = \cos^{-1}(c_1/c_2)$ 为海底的全反射临界掠角。 r 为声源与接收器间的水平距离。 $\xi_n^2 = k_1^2 - n^2\gamma^2$, $\gamma = \pi/H_e$, $\Psi_n(z) = \sin(n\gamma z)$ 。 n 为简正波阶数。

2.2 基于匹配场处理的目标深度分类算法

在匹配场处理中, 假定接收深度及海洋环境参数已知, 基于接收传感器采集的信号场数据与利用声场模型计算出的拷贝场数据间的匹配计算结果, 可以获得目标深度的粗略估计结果^[15]。当目标是谐和点源时, 基于式(1)–式(3)可计算出匹配场处理中所需的信号场数据 I_{zR} , 设 $C_n(z_0, z) = \Psi_n(z_0)\Psi_n(z)/(H_e\sqrt{2\pi\xi_n})$, $D_n(z_0, z) = \Psi_n(z_0)\Psi'_n(z)/(\omega\rho_1 H_e\sqrt{2\pi\xi_n})$, 可以计算出相应的拷贝场数据 $I_{zR}^{\text{match}}(z_{\text{mat}})$, 其表达式为

$$I_{zR}^{\text{match}}(z_{\text{mat}}) = \frac{1}{r} \left[\sum_n C_n(z_{\text{mat}}) D_n(z_{\text{mat}}) + \sum_{n, n \neq m} \sum_m C_n(z_{\text{mat}}) D_m(z_{\text{mat}}) \cos(\Delta\xi_{mn}r) \right] \quad (4)$$

其中变量 $z_{\text{mat}} = [z_{\text{mat}}^1, z_{\text{mat}}^2, \dots, z_{\text{mat}}^{\text{len}}]$ 表示声源位置预测值, len表示匹配算法中声源位置预测值扫描次数。拷贝向量 $I_{zR}^{\text{match}}(z_{\text{mat}})$ 由声场模型和设定的声源位置 (r, z_{mat}) 获得, 是一个随声源位置 (r, z_{mat}) 变化的扫描向量。假定已利用某种测距算法获得水平距离估计结果, 定义一个1维相关系数向量 $C_{\text{mat}}(z_{\text{mat}})$ 对采样数据进行扫描, 以寻求最佳匹配点, 该点即为目标深度估计结果。

$$C_{\text{mat}}(z_{\text{mat}}) = \text{corrcoef}[I_{zR}, I_{zR}^{\text{match}}(z_{\text{mat}})] \quad (5)$$

其中, $\text{corrcoef}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \text{cov}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})/(\sigma\mathbf{X}\sigma\mathbf{Y})$ 表示计算长度相同的列向量 \mathbf{X} 与 \mathbf{Y} 相关系数的运算符, $\text{cov}(\cdot)$ 表示协方差运算符, σ 为标准差计算符。相关系数 C_{mat} 表示两个列向量的相似程度。 C_{mat} 值最大时, 对应的 z_{mat} 值为最佳匹配点(目标深度估计结果)。由于目标测深精度受阵元数目、海洋环境复杂度的影响很大, 测深误差一般较大, 在对测深精度要求较高的场合中的应用价值较小。但是 z_{mat} 值对于目标的深度分类过程应用价值很高, 即使目标的测深结果 z_{mat} 值误差较大, 只要水面目标及水下

目标的 z_{mat} 值的分布范围存在明显差异, 水面目标的 z_{mat} 值都小于某一临界深度, 而水下目标的 z_{mat} 值都大于同一临界深度, 则通过判断 z_{mat} 值与临界深度的大小关系就可以实现水面目标及水下目标的有效区分。本文主要利用 z_{mat} 值辅助进行水中目标的深度分类及临界深度调节, 该过程对 z_{mat} 值的精度要求相对较低。

当声源线谱频率固定时, 随着海域深度的增加, 该频率激发的简正波阶数逐渐增加, 声场复杂性随之增加, 从而导致信号场与拷贝场间的相关系数分布的复杂度也随之增加。目标深度分类算法存在理想的接收状态, 该状态下的接收深度对应声源频率激发的最高阶简正波模态函数的第一个非零节点位置。当传感器被布放至理想接收状态附近时, 声场复杂性会降低, 信号场与拷贝场间的相关系数分布的复杂度也会随之降低, 从而实现算法的深度分类效果的有效提升。理想状态下的布放深度 z_{id} 表达式为

$$z_{\text{id}} = \frac{H_e}{N_s} = \frac{1}{N_s} \left[H + \frac{1}{bk_1 \sin(\alpha_c)} \right] \quad (6)$$

2.3 算法的收敛性验证

下面证明基于匹配场处理的目标深度分类算法的收敛性, 保证相关系数最大位置存在且唯一, 利用相关系数得到的最佳匹配点是收敛于真实深度位置的。

假设只存在单一目标且海洋环境参数已知, 由于声源频率为定值, 接收传感器深度也为定值, 则垂直复声强无功分量 $I_{zR}(z_0, r)$ 只与声源深度 z_0 和水平距离 r 有关, 而声源深度 z_0 虽然未知但为固定值。基于余弦函数的幂级数展开式, $I_{zR}(z_0, r)$ 表达式可以表示为关于 r 的多项式:

$$I_{zR}(z_0, r) = G(z_0)r^{-1} + \sum_{n, n \neq m} \sum_m \left[G_{mn}(z_0) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k)!} (\Delta\xi_{mn})^{2k} r^{2k-1} \right] \quad (7)$$

其中, $G(z_0) = \sum_n Q_1(n)\Psi_n^2(z_0)$, $G_{mn}(z_0) = Q_2(n, m)\Psi_n(z_0)\Psi_m(z_0)$ 。 $Q_1(n)$ 与 $Q_2(n, m)$ 表示只与简正波阶数有关的变量, 假设 $\max(n) = \max(m) = N_s$ 。

首先, 当 $z_{\text{mat}} = z_0$ 时, $I_{zR}(z_{\text{mat}}, r) = I_{zR}(z_0, r)$, 因此本文算法至少有一个估计结果 $z_{\text{mat}} = z_0$ 。接下来证明 $z_{\text{mat}} = z_0$ 是 $I_{zR}(z_{\text{mat}}, r) = I_{zR}(z_0, r)$ 的唯一解。在每一个 z_{mat} 处进行的匹配计算中, z_{mat} 与 z_0 是固定值。再基于式(7)及多项式恒等定理, $I_{zR}(z_{\text{mat}}, r) = I_{zR}(z_0, r)$ 等价于式(8)与式(9)同时成立:

$$[G(z_0) - G(z_{\text{mat}})] + [G_{mn}(z_0) - G_{mn}(z_{\text{mat}})] = 0 \quad (8)$$

$$(\Delta\xi_{mn})^{2k} [G_{mn}(z_0) - G_{mn}(z_{\text{mat}})] = 0, k = 1, 2, \dots, N_k \quad (9)$$

其中, $\max(k) = N_k$ 。设 $\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} Q_1^{(1,2)} & Q_1^{(1,3)} & \dots & Q_1^{(1,N_s)} & Q_1^{(2,3)} & \dots & Q_1^{(2,N_s)} & \dots & Q_1^{(N_s-1,N_s)} \\ Q_2^{(1,2)} & Q_2^{(1,3)} & \dots & Q_2^{(1,N_s)} & Q_2^{(2,3)} & \dots & Q_2^{(2,N_s)} & \dots & Q_2^{(N_s-1,N_s)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Q_{N_k}^{(1,2)} & Q_{N_k}^{(1,3)} & \dots & Q_{N_k}^{(1,N_s)} & Q_{N_k}^{(2,3)} & \dots & Q_{N_k}^{(2,N_s)} & \dots & Q_{N_k}^{(N_s-1,N_s)} \end{bmatrix}$,

$Q_k^{(m,n)} = (\Delta\xi_{mn})^{2k}$, 是 N_k 行 $N_s \times (N_s - 1)/2$ 列的矩阵。设 $\mathbf{y}_s = [y_s^{(1,2)}, y_s^{(1,3)}, \dots, y_s^{(1,N_s)}, y_s^{(2,3)}, \dots, y_s^{(2,N_s)}, \dots, y_s^{(N_s-1,N_s)}]^T$, 是 $N_s \times (N_s - 1)/2$ 维列向量, $y_s^{(m,n)} = G_{mn}(z_0) - G_{mn}(z_{\text{mat}})$ 。式(9)实际上是一个齐次线性方程组 $\mathbf{Q}\mathbf{y}_s = \mathbf{0}$, 系数矩阵 \mathbf{Q} 可表示为范德蒙矩阵 \mathbf{Q}_s 与对角矩阵 \mathbf{A}_s 的积, $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_s \mathbf{A}_s$ 。 $\text{rank}(\mathbf{Q}_s) = \text{rank}(\mathbf{L}_s) = N_s \times (N_s - 1)/2$ 。联合 Sylvester 不等式可得: $\text{rank}(\mathbf{Q}) = N_s \times (N_s - 1)/2$ 。矩阵 \mathbf{Q} 的秩等于 \mathbf{Q} 的列数, 那么齐次线性方程组 $\mathbf{Q}\mathbf{y}_s = \mathbf{0}$ 只有零解。

$$\mathbf{Q}_s = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ Q_1^{(1,2)} & Q_1^{(1,3)} & \dots & Q_1^{(N_s-1,N_s)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Q_{N_k-1}^{(1,2)} & Q_{N_k-1}^{(1,3)} & \dots & Q_{N_k-1}^{(N_s-1,N_s)} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{A}_s = \begin{bmatrix} Q_1^{(1,2)} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Q_1^{(1,3)} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & Q_1^{(N_s-1,N_s)} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$\mathbf{I}_{zR}(z_{\text{mat}}, r) = \mathbf{I}_{zR}(z_0, r)$ 的解就是 $\mathbf{y}_s = \mathbf{0}$ 的解。 $\mathbf{y}_s = \mathbf{0}$ 等价于 $\Psi_n(z_0)\Psi_m(z_0) = \Psi_n(z_{\text{mat}})\Psi_m(z_{\text{mat}})$, 当 $N_s \geq 3$ 时:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_1(z_0)\Psi_2(z_0) &= \Psi_1(z_{\text{mat}})\Psi_2(z_{\text{mat}}) \\ \Psi_1(z_0)\Psi_3(z_0) &= \Psi_1(z_{\text{mat}})\Psi_3(z_{\text{mat}}) \\ \Psi_2(z_0)\Psi_3(z_0) &= \Psi_2(z_{\text{mat}})\Psi_3(z_{\text{mat}}) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式(12)在 $z = [z_0, z_{\text{mat}}]$ 且 $\Psi_n(z) \neq 0$ 时满足 $\Psi_n^2(z_0) = \Psi_n^2(z_{\text{mat}})$ 。 $\Psi_1^2(z_0) = \Psi_1^2(z_{\text{mat}})$ 的解为 $z_{\text{mat}} = z_0$ 或 $z_{\text{mat}} = H_e - z_0$ 。当 $z_{\text{mat}} = H_e - z_0$ 时, 不满足式(12)的第1和第3个子式。因此式(12)方程组仅有唯一解 $z_{\text{mat}} = z_0$, 式(9)也仅有唯一解 $z_{\text{mat}} = z_0$ 。 $\mathbf{I}_{zR}(z_{\text{mat}}, r) = \mathbf{I}_{zR}(z_0, r)$ 的解需要同时满足式(8)与式(9), $z_{\text{mat}} = z_0$ 也满足式(8), 故 $z_{\text{mat}} = z_0$ 是 $\mathbf{I}_{zR}(z_{\text{mat}}, r) = \mathbf{I}_{zR}(z_0, r)$ 的唯一解, 证实了本文算法最终只会收敛至真实值。

3 仿真与性能分析

海洋环境参数为: 海深 $H = 200$ m, 海水密度 $\rho_1 = 1.026$ g/cm³, 底质密度 $\rho_2 = 1.769$ g/cm³, 声源频率 $f = 40$ Hz, 海水声速 $c_1 = 1480$ m/s, 底质声速 $c_2 = 1550$ m/s。声源深度范围为1~200 m。水平距离范围: 2~5 km。声压和振速信号都是由单个3维矢量传感器采集。本文主要分析测距误差、声源频率、接收深度、海洋环境参数等因素对深度分类性能的影响, 从而分析算法的稳健性。第3阶和

第4阶简正波的截止频率为 $[f_3, f_4] = [31.1, 43.6]$ Hz, $f_3 < f < f_4$, 声源频率激发前3阶简正波。 $H_e \approx 230$ m, 由式(6)可知: 第3阶简正波模态的节点位置约为75 m, 151 m。接收器深度为 $r_d = 75$ m时, 第3阶简正波模态趋于零, 垂直复声强无功分量主要与第1阶和第2阶模态有关, 信号场与拷贝场间的相关性系数分布复杂度较低, 使得本文算法适用于线谱频率激发3阶简正波的情况。

3.1 测距误差对算法性能的影响

在不同的水平距离范围内, 测距误差不超过600 m时, 测距误差大小对算法性能的影响, 如图1所示。由图可知: 随着测距误差的增加, 信号场与拷贝场间的相关性越来越低, 扫描相关系数寻求最佳匹配点以实现目标深度分类的效果也越来越差。当 $r \in [2000, 3000]$ m, 测距误差不超过300 m时, 近海面处目标的深度特征难以提取, 简正波模态节点位置附近的目标的深度分类效果较差, 但其余深度处的目标的深度分类效果较好, 临界深度约为40 m; 测距误差不超过600 m时, 模态节点位置附近的目标的深度分类效果较差, 算法的收敛性变差, 但算法能实现目标深度的粗略分类, 临界深度较大, 约为100 m。当 $r \in [3000, 4000]$ m, 测距误差不超过400 m时, 模态节点位置附近的目标的深度分类效果较差, 但其余深度处的目标的深度分类效果较好, 临界深度约为20 m; 测距误差不超过600 m时, 模态节点位置附近的目标的深度分类效果较差, 算法的收敛性变差, 但算法能实现目标深度的粗略分类, 临界深度约为50 m。当 $r \in [4000, 5000]$ m, 测距误差不超过500 m时, 模态节点位置附近的目标的深度分类效果较差, 但其余深度处的目标的深度分类效果较好, 临界深度较大, 约为70 m; 测距误差不超过600 m时, 模态节点位置附近的目标的深度分类效果较差, 算法的收敛性变差, 但算法能实现目标深度的粗略分类, 临界深度较, 大约为

70 m。综上，相同的水平距离范围内，随着测距误差的增加，深度分类效果变差，临界深度随之增加；相同的测距误差情况下，随着水平距离的增加，深度分类效果变差；当水平距离不超过5000 m、测距误差不超过600 m时，算法可以获得有价值的深度分类结果，测距误差大小对算法的目标深度分类性能有着直接且重大的影响。

3.2 接收深度对算法性能的影响

激发前3阶简正波模态的频率范围(32~42 Hz)内的第3阶模态函数变化曲线如图2(a)所示。由图可知：模态深度函数值随声源频率的变化比较缓慢，接收深度的小幅度变化对模态深度分布影响较小。

当 $|\Delta r/r| \leq 0.15$ 时，接收深度为[50,100] m，目标深度分类结果如图2(b)，图2(c)所示。由图可知：当接收深度偏离理想位置不超过 ± 25 m时，深度分类结果仍然是有价值的。接收深度为50 m时，近海面处(吃水深度不超过12 m)目标的深度分类效果较差，算法对其余深度处的目标的深度分类效果较好。接收深度为100 m时，算法可以实现目标深度分类，临界深度约为50 m。当接收器布放在理想状态附近时，海洋中流的存在导致的接收深度的小幅度改变对深度分类性能影响不大。

3.3 声源频率对算法性能的影响

当 $|\Delta r/r| \leq 0.15$ 且 $f = [32, 37, 42]$ Hz时，相应的

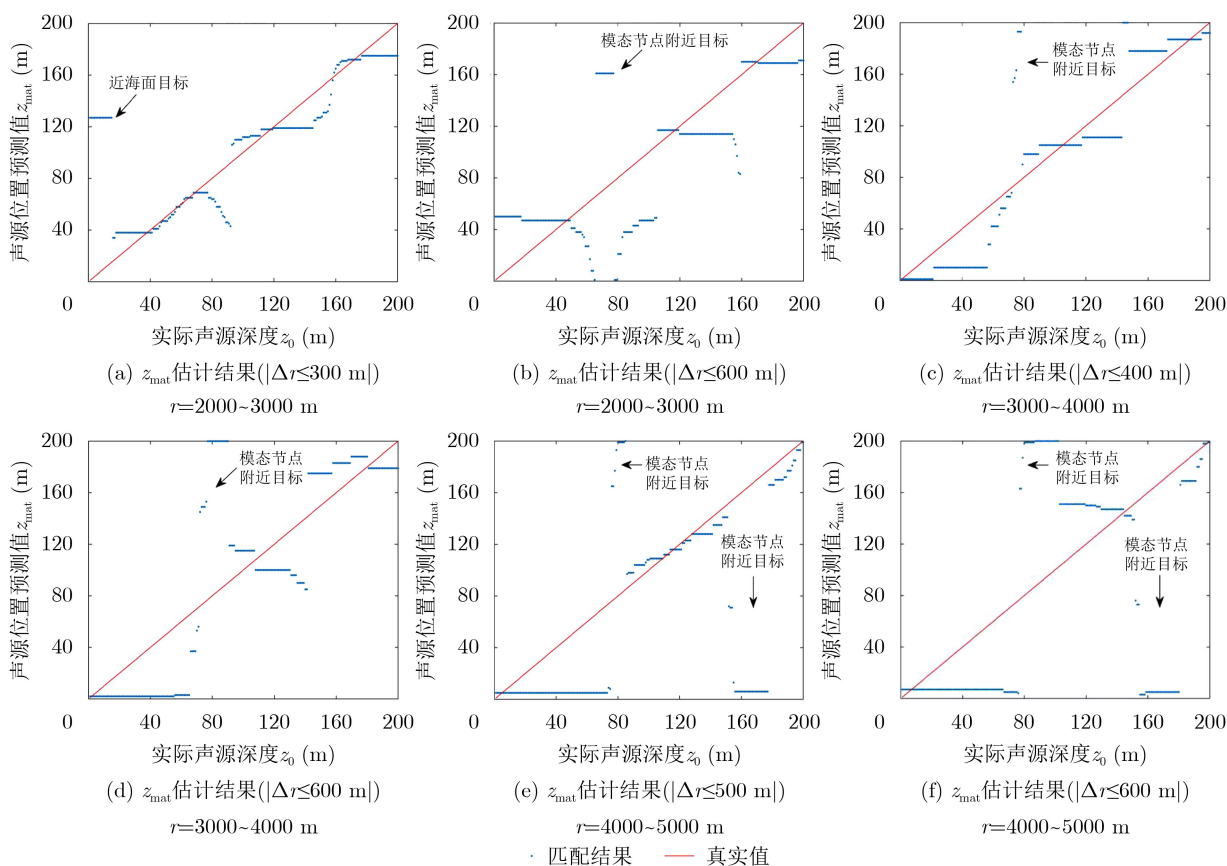


图 1 不同水平距离范围，测距误差对算法性能的影响

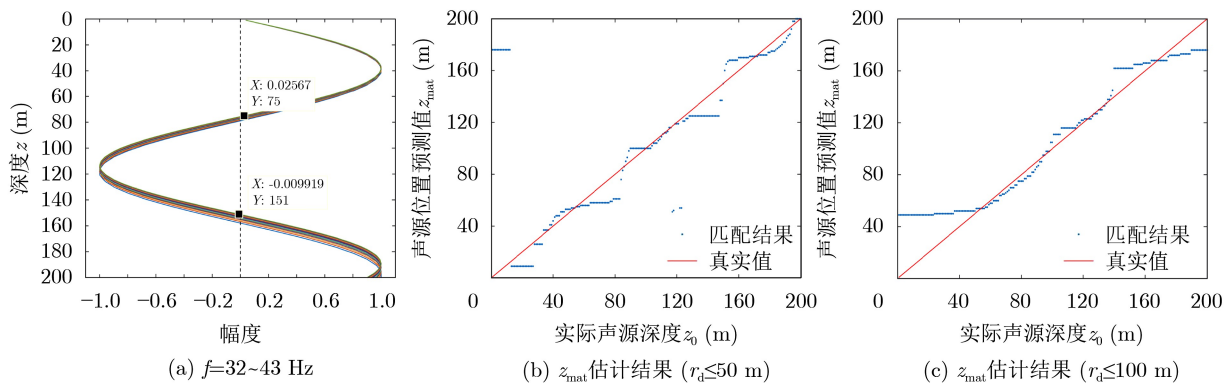


图 2 接收深度对算法性能的影响

深度分类结果如图3所示。由图可知：声源频率的改变对算法性能有一定的影响，临界深度会随着频率的增加而增加。 $f = [32, 37, 42]$ Hz时，临界深度约为5 m, 11 m, 26 m。不同声源频率情况下，当声源频率激发前3阶简正波时，算法获得的深度分类结果都是有价值的。

3.4 信噪比及线谱稳定性对算法性能的影响

假设目标辐射噪声为连续谱上叠加单频线谱，目标一直向远离接收平台方向匀速直线移动。带限白噪声，频带范围：1~300 Hz，信噪比范围：-20~0 dB， $|\Delta r/r| \leq 0.15$ 。目标运动参数：航向角 $\psi = 50^\circ$ ，目标航速 $v_t = 11$ m/s，最近通过距离 $r_{\min} = 1200$ m，初始时刻距离 $r_0 = 2000$ m。平台航速 $v_s = 2$ m/s。总航行时间400 s。接收深度：75 m；声源深度范围：1~200 m。目标深度分类结果如图4(a)、图4(b)所示。假定目标线谱频率能被估计出来，当 $\text{SNR} \geq -20$ dB时，算法可以实现目标深度的有效分类。随着SNR的增加，目标深度分类效果提高，但临界深度几乎不变，约为70 m。

线谱稳定性主要包括幅值稳定性与频率稳定性。幅值稳定性通常表示为线谱出现率 $P_e = T_e/T$ ， T_e 为整个观测时间范围内线谱能被检测到的时长， T 表

示整个观测过程的总时长， P_e 表示整个观测时间范围内线谱能被检测到的概率。频率稳定性指的是线谱频率的偏移量较小。稳定的线谱需要同时满足线谱出现率较高且线谱频率偏移量较小^[16]。线谱频率稳定性对算法性能的影响已在3.3节中进行了研究。当 $\text{SNR} = 0$ dB时，线谱出现率 P_e 对算法性能的影响如图4(c)所示。当 $\text{SNR} = 0$ dB且 $P_e \geq 0.7$ 时，线谱出现率 P_e 对算法性能的影响较小。

3.5 声速分布对算法性能的影响

水声学中通常将水深不大于200 m的海区定义为浅海，将水深大于200 m的海区定义为深海。我国近海以浅海海区为主。浅海常见的声速剖面类型包括负梯度声速剖面与存在温跃层声速剖面。 $|\Delta r/r| \leq 0.15$ 。

负梯度情况下的声速剖面具体参数为： $z = 0$ m处声速为1500 m/s， $z = 200$ m处声速为1485 m/s，梯度为 0.075 s^{-1} ； $z = 0$ m处声速为1510 m/s， $z = 200$ m处声速为1470 m/s，梯度为 0.2 s^{-1} ，相应的声速分布及深度分类效果如图5所示。可以发现：当声速剖面类型由等声速变为负梯度时，算法收敛性变差，算法性能明显下降，且算法性能随着梯度增大而变差。当声速梯度为 0.075 s^{-1} 及 0.2 s^{-1}

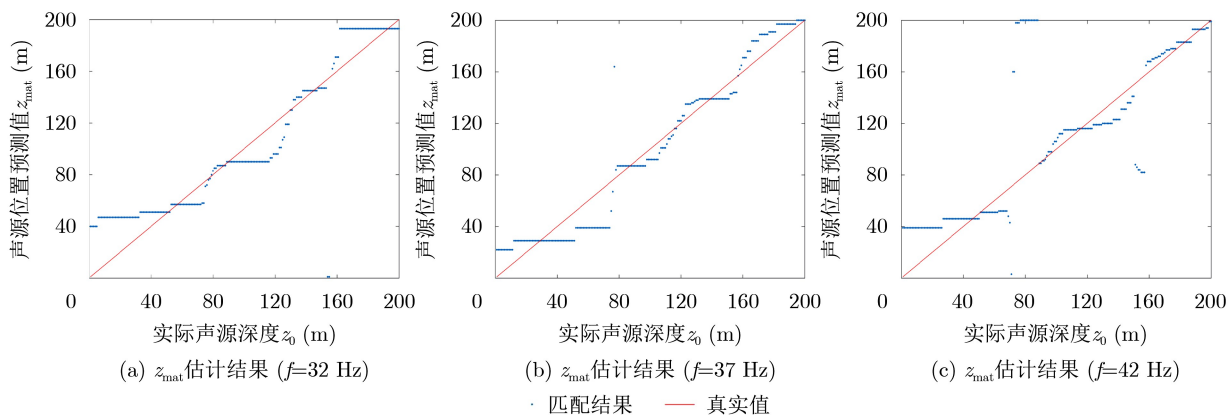


图3 声源频率对算法性能的影响

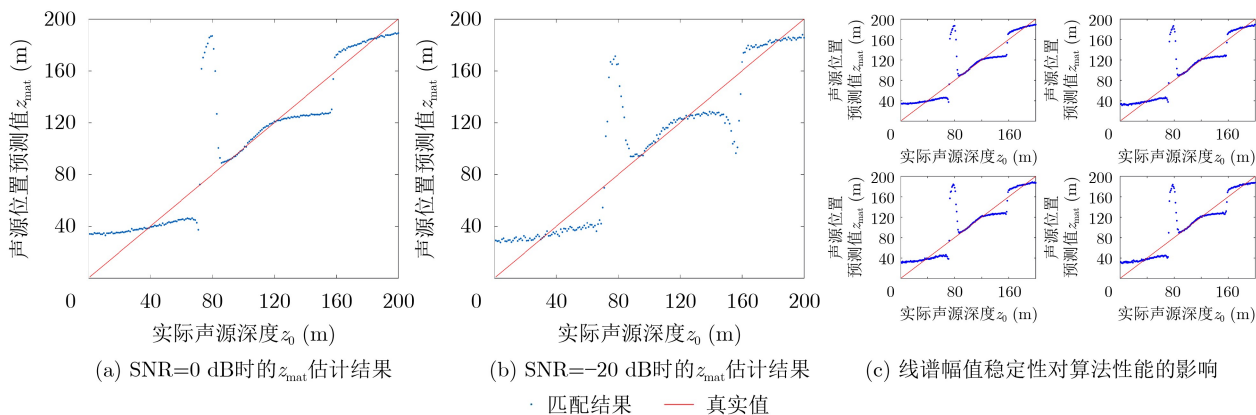


图4 信噪比及线谱稳定性对算法性能的影响

时，临界深度约为80 m及90 m。本文算法仅能实现弱负梯度情况下的目标深度分类，并不适用于强负梯度情况。

假定存在温跃层声速剖面结构为等声速层-负跃层-等声速层。主要研究跃层强度、跃层厚度以及顶界深度不同时，相应的存在温跃层的声速分布对算法性能的影响。当跃层厚度固定为40 m，顶界深度固定为30 m，跃层强度分别为 0.75 s^{-1} ， 0.50 s^{-1} ， 0.25 s^{-1} 时，声速分布如图6(a)所示。当跃层强度固定为 0.5 s^{-1} ，顶界深度固定为30 m，跃层厚度分别为20 m，40 m，80 m时，声速分布如图6(b)

所示。当跃层厚度固定为40 m，跃层强度固定为 0.5 s^{-1} ，顶界深度分别为10 m，30 m，50 m时，声速分布如图6(c)所示。

跃层强度对算法性能的影响如图7所示。算法性能与跃层强度有直接关系。声速梯度为 0.75 s^{-1} 与 0.50 s^{-1} 时，临界深度在60 m附近。声速梯度为 0.25 s^{-1} 时，临界深度在80 m附近。跃层厚度对算法性能的影响如图8所示。跃层厚度越大，算法性能越差。跃层厚度为20 m，40 m时，临界深度约77 m，61 m。跃层厚度为80 m时，算法无法实现目标深度的有效分类。顶界深度对算法性能的影响如

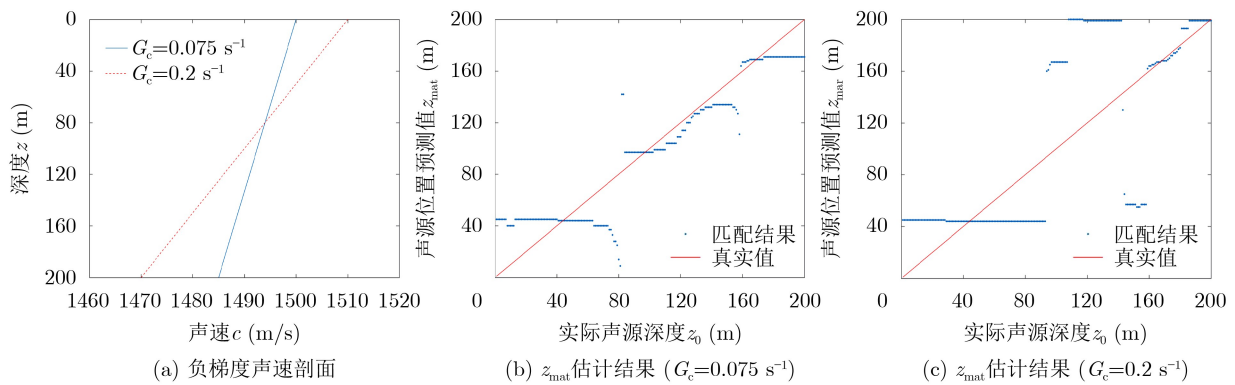


图 5 负梯度情况下，声速梯度对算法性能的影响

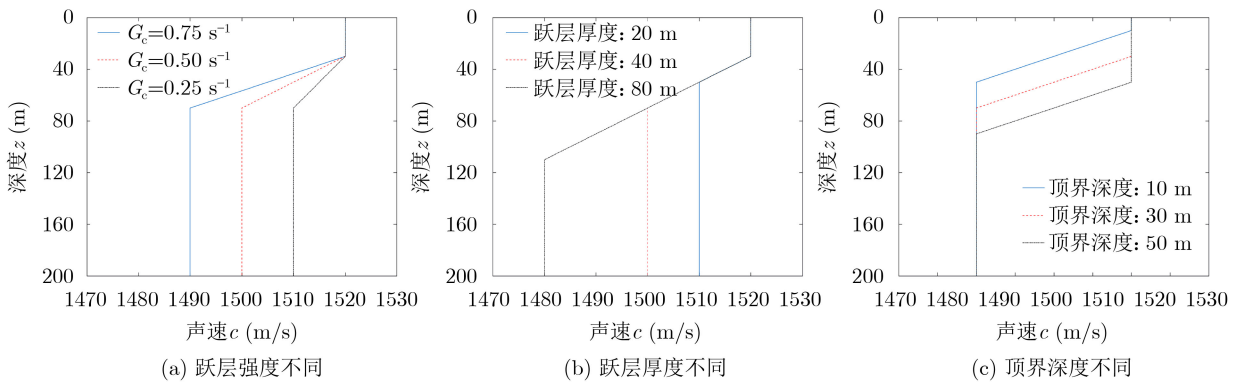


图 6 存在温跃层的声速剖面

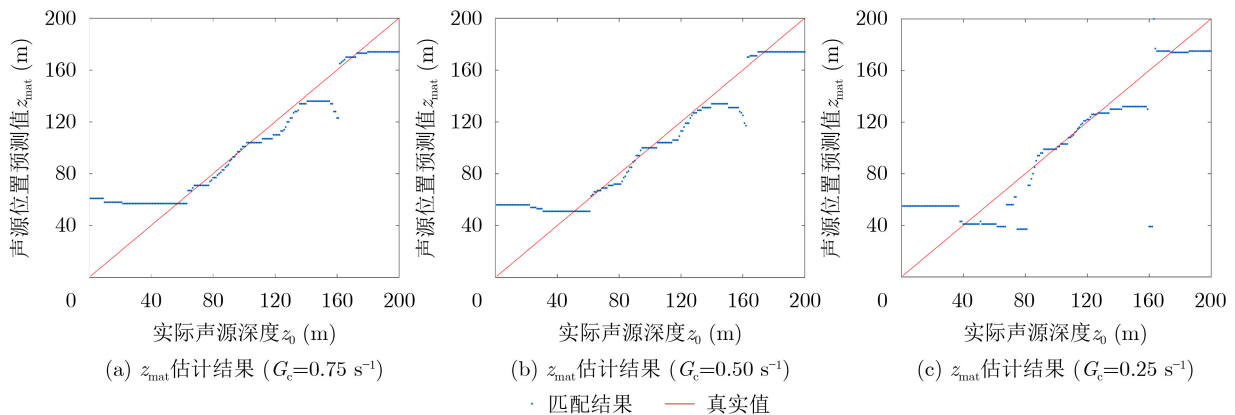


图 7 存在温跃层情况下，跃层强度对算法性能的影响

图9所示。算法性能与顶界深度有一定的关系，顶界深度大小直接影响临界深度大小。顶界深度为10 m, 30 m, 50 m时，临界深度约为75 m, 61 m, 80 m。当声速剖面类型由等声速变为存在温跃层时，算法性能明显下降，跃层强度、跃层厚度以及顶界深度都会对算法性能产生影响。算法在强温跃层情况下也能获得有价值的目标深度分类结果。

3.6 环境失配情况对算法性能的影响

环境失配情况中最常见的就是声速剖面失配，本文主要研究算法对海水层声速参数失配情况的敏

感程度。假定声速剖面为等声速分布，在此基础上进行信号场和拷贝场的仿真，讨论 $|\Delta r/r| \leq 0.15$ 时，海水层参数失配情况对算法性能的影响。假设匹配场算法计算拷贝场时，海水层声速为 $c_1^{up} = [1490, 1500]$ m/s及 $c_1^{down} = [1460, 1470]$ m/s。在 c_1 失配情况下，相应的目标深度分类结果如图10所示。可以发现：当海水层声速参数出现失配时，算法性能受到影响，但算法仍可获取有价值的深度分类结果。 $c_1^{up} = [1490, 1500]$ m/s时，临界深度分别约为26 m, 31 m； $c_1^{down} = [1460, 1470]$ m/s时，临界深

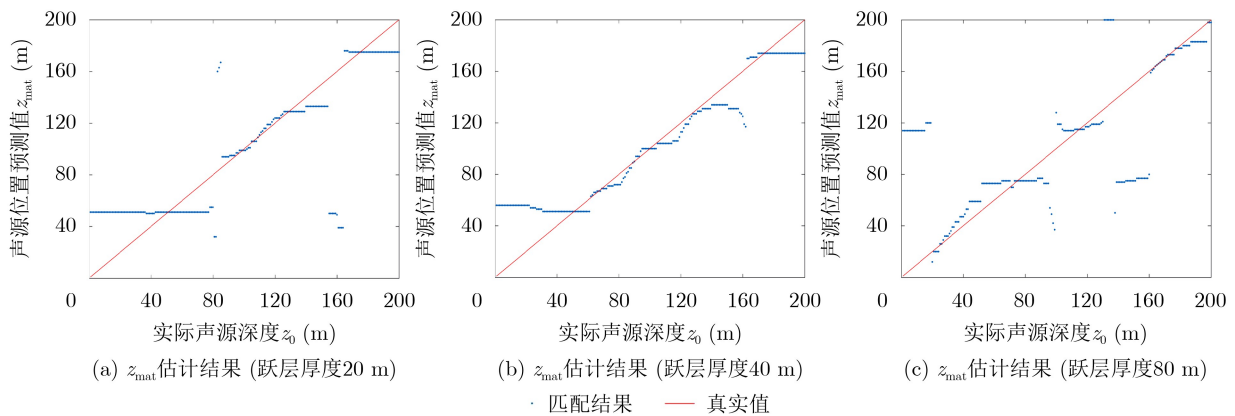


图8 存在温跃层情况下，跃层厚度对算法性能的影响

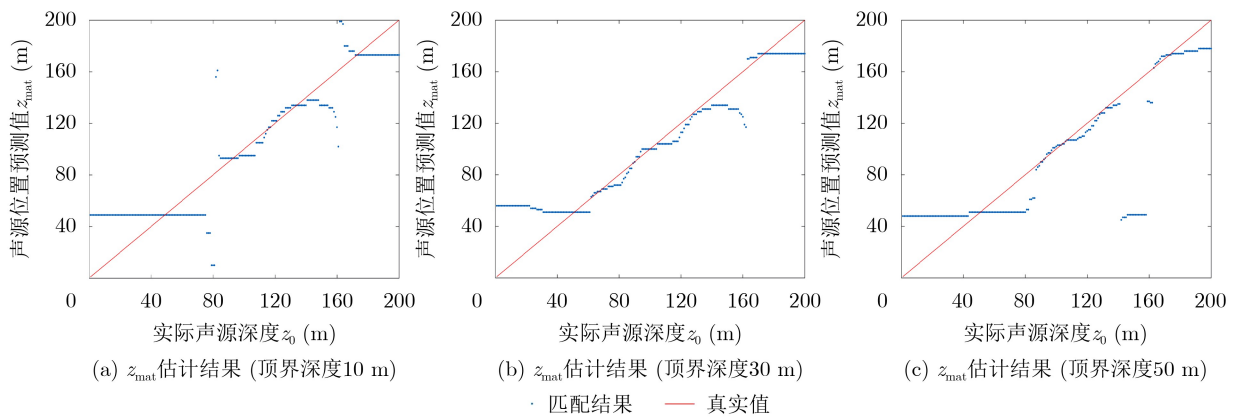


图9 存在温跃层情况下，顶界深度对算法性能的影响

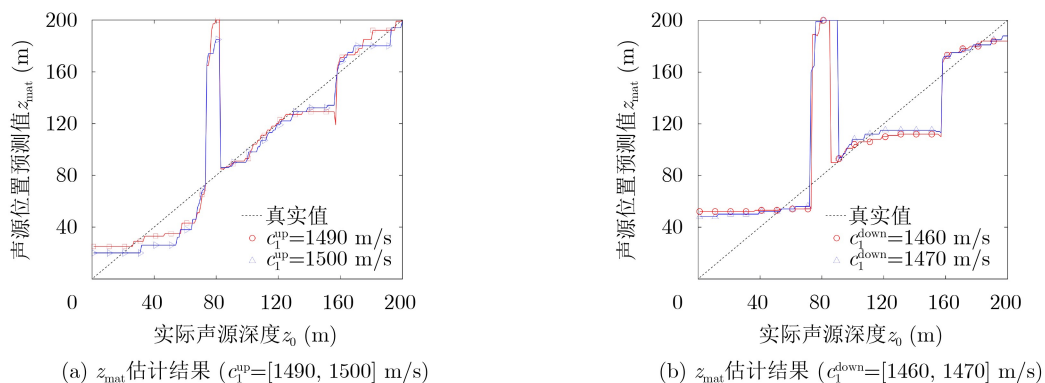


图10 海水层声速失配情况对算法性能的影响

度分别约为73 m, 39 m。综上, 当海水层声速估计值偏离真实值不超过 ± 20 m/s时, 算法在声速失配情况下也能获得有价值的深度分类结果。

3.7 算法性能对比

现有的浅海水中目标深度分类算法主要包括: 基于信道冲激响应的算法1^[2]、基于水平声强流的算法2^[3]、基于简正波相关项的算法3^[4]、基于匹配处理的算法4^[8]以及基于模态能量匹配的算法5^[11]。为验证算法的先进性, 本节将主要分析本文算法与现有的上述5种算法的性能差异, 如表1所示, 从而明确本文算法的适用条件及性能提升程度。

由表1可知: 本文算法与现有的5种算法都假设试验海域仅存在单一目标; 只有本文算法及现有算法2, 3及5的阵列孔径较小, 现有算法1与4存在阵

列孔径偏大的问题; 关于算法对信噪比的要求的相关研究中, 本文算法具有明显优势, 算法在低信噪比工况下仍可以获得有价值的深度分类结果, 而现有算法3及现有算法5对信噪比要求较高, 其余算法的性能与信噪比的关系还未得到深入研究; 本文算法主要针对浅海环境下辐射低频线谱的水声目标的深度分类需求, 现有算法2及现有算法4也满足这一需求, 现有算法4的频率适用范围最宽但阵元数目要求高, 而本文算法及现有算法2在阵元数目要求较小的情况下, 本文算法具有更宽的频率适用范围; 除现有算法4对海洋环境复杂度无明显要求外, 其余现有算法大多只适用于声速随深度缓变的情况, 而本文所提算法不仅适用于声速缓变情况, 还适用于强温跃层情况。

表1 本文算法与现有算法的性能对比

	本文算法	现有算法1	现有算法2	现有算法3	现有算法4	现有算法5
目标数目要求	单一目标	单一目标	单一目标	单一目标	单一目标	单一目标
阵元数目要求	单阵元	垂直阵	双阵元	单阵元	垂直阵	单阵元
信噪比要求	SNR ≥ -20 dB	未分析	未分析	较高(爆炸源)	未分析	较高(气枪)
目标频率适用范围	低频窄带(存在3阶简正波)	低频宽带	低频窄带(存在两阶简正波)	低频宽带	低频窄带	低频宽带
声速分布适用性	弱负梯度 强温跃层	弱温跃层	弱负梯度 弱温跃层	等声速 弱负梯度	无限制	等声速 弱负梯度

综上, 本文算法在保证阵列孔径较小的同时, 对信噪比的要求更低, 适用的频率范围更宽, 适用的海洋环境复杂度更高, 本文算法的性能较现有算法具有明显的提升。

4 结论

针对水中目标深度分类过程存在的临界深度大且难调节的问题, 本文提出了基于垂直声强流的目标深度分类算法, 匹配量为垂直复声强无功分量。通过理论推导证明了算法的收敛性, 验证了基于相关系数的匹配场处理算法最终只会收敛至目标深度的真实值。在进行了充分的理论研究后, 仿真分析了测距误差、接收深度、声源频率、信噪比及线谱稳定性等参数对算法性能的影响, 从而对算法稳健性进行了深入研究, 还分析了单参数(海水层声速)失配情况对算法性能的影响。本文所提出的基于垂直复声强无功分量及匹配场处理技术的目标深度分类算法解决了临界深度较大且难调节的问题, 减小了临界深度值, 且该算法的稳健性及准确性较高。算法对线谱频率稳定性的要求较低, 但对线谱幅值稳定性的要求较高, 线谱出现率必须不低于0.7。算法适用于试验海域仅存在单一目标的情况。

参考文献

- [1] EMMETIÈRE R, BONNEL J, CRISTOL X, *et al.* Passive source depth discrimination in deep-water[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2019, 13(1): 185-197. doi: 10.1109/JSTSP.2019.2899968.
- [2] CHO S I, KIM D, and KIM J S. Source depth discrimination based on channel impulse response[J]. *The Journal of the Acoustical Society of Korea*, 2019, 38(1): 120-127.
- [3] YU Yun, LING Qing, and XU Jiang. Pressure and velocity cross-spectrum of normal modes in low-frequency acoustic vector field of shallow water and its application[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2015, 26(2): 241-249. doi: 10.1109/JSEE.2015.00029.
- [4] 刘志韬, 郭良浩, 闫超. 利用自相关函数warping变换的浅海声源深度判别[J]. *声学学报*, 2019, 44(1): 28-38. LIU Zhitao, GUO Lianghao, and YAN Chao. Source depth discrimination in shallow water based on relation formula warping transform[J]. *Acta Acustica*, 2019, 44(1): 28-38.
- [5] HAN Ning and YAO Shuai. Discrimination of the active submerged/bottom target based on the total scintillation index[J]. *Applied Acoustics*, 2021, 172: 107646. doi: 10.1016/j.apacoust.2020.107646.

- [6] LI Hui, YANG Kunde, DUAN Rui, *et al.* Joint estimation of source range and depth using a bottom-deployed vertical line array in deep water[J]. *Sensors*, 2017, 17(6): 1315. doi: [10.3390/s17061315](https://doi.org/10.3390/s17061315).
- [7] 王森, 王余, 王易川, 等. 水下高速目标声谱图特征提取及分类设计[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(11): 2684–2689. WANG Sen, WANG Yu, WANG Yichuan, *et al.* Feature extraction and classification of spectrum of radiated noise of underwater high speed vehicle[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(11): 2684–2689.
- [8] YANG T C. Source localization in range-dependent and time-varying shallow water: The Shallow Water 2006 experimental results[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2019, 146(6): 4740–4753. doi: [10.1121/1.5138595](https://doi.org/10.1121/1.5138595).
- [9] 李焜, 方世良, 安良. 非合作水声脉冲信号的单水听器匹配场定位研究[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(11): 2541–2547. LI Kun, FANG Shiliang, and AN Liang. Matched field localization for non-cooperative underwater acoustic pulse signals using a single hydrophone[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(11): 2541–2547.
- [10] LEI Zhixiong, YANG Kunde, and MA Yuanliang. Passive localization in the deep ocean based on cross-correlation function matching[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2016, 139(6): EL196–EL201. doi: [10.1121/1.4954053](https://doi.org/10.1121/1.4954053).
- [11] 郭晓乐, 杨坤德, 马远良, 等. 一种基于简正波模态消频散变换的声源距离深度估计方法[J]. 物理学报, 2016, 65(21): 214302. doi: [10.7498/aps.65.214302](https://doi.org/10.7498/aps.65.214302). GUO Xiaole, YANG Kunde, MA Yuanliang, *et al.* A source range and depth estimation method based on modal dedispersion transform[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(21): 214302. doi: [10.7498/aps.65.214302](https://doi.org/10.7498/aps.65.214302).
- [12] DUAN Rui, YANG Kunde, LI Hui, *et al.* A performance study of acoustic interference structure applications on source depth estimation in deep water[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2019, 145(2): 903–916. doi: [10.1121/1.5091100](https://doi.org/10.1121/1.5091100).
- [13] LIU Wenxu, YANG Yixin, LÜ Liangang, *et al.* Source localization by matching sound intensity with a vertical array in the deep ocean[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2019, 146(6): EL477–EL481. doi: [10.1121/1.5139191](https://doi.org/10.1121/1.5139191).
- [14] 高飞, 孙磊. 基于首达波与次达波到达时差的深海浅层移动声源定位[J]. 兵工学报, 2018, 39(11): 2243–2248. doi: [10.3969/j.issn.1000-1093.2018.11.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1093.2018.11.019). GAO Fei and SUN Lei. Localization of moving acoustic source in shallow layer of deep ocean based on the time difference of arrival between the first and second waves[J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(11): 2243–2248. doi: [10.3969/j.issn.1000-1093.2018.11.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1093.2018.11.019).
- [15] 郑胜家, 韩东, 李晓, 等. 匹配场定位强干扰抑制最小方差无畸变响应处理技术[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(7): 1586–1593. ZHENG Shengjia, HAN Dong, LI Xiao, *et al.* Processor of minimum variance distortionless response with strong interference suppression for matched field processing[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(7): 1586–1593.
- [16] 吴国清, 李靖, 陈耀明, 等. 舰船噪声识别(II)——线谱稳定性和唯一性[J]. 声学学报, 1999, 24(1): 6–11. WU Guoqing, LI Jing, CHEN Yaoming, *et al.* Ship radiated-noise recognition(II)—stability and uniqueness of line spectrum[J]. *Acta Acustica*, 1999, 24(1): 6–11.
- 毕雪洁: 女, 1991年生, 博士, 讲师, 研究方向为水声信号处理.
惠娟: 女, 1976年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为矢量信号处理.
赵安邦: 男, 1978年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为水声目标定位.
王彪: 男, 1980年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为水声通信.
马林: 男, 1990年生, 博士, 讲师, 研究方向为水声通信.
李晓曼: 女, 1991年生, 博士, 讲师, 研究方向为水声物理.

责任编辑: 陈倩