

水声定位系统中迭代适应点分层的声线修正算法

陈嘉兴^{1,2}, 赵晓旭¹, 董怡靖¹, 丁路³, 刘志华³

(1. 河北师范大学 中燃工学院, 河北 石家庄 050024; 2. 河北正定师范高等专科学校, 河北 石家庄 050800; 3. 河北师范大学 计算机与网络空间安全学院, 河北 石家庄 050024)

摘要: 水声定位系统中, 声线弯曲是造成定位误差大的主要原因, 本文针对该问题提出了一种迭代适应点分层(IAPL)的声线修正算法, 将声速剖面筛选分层修正声线。首先搭建水声定位模型, 通过拟合目标海域的监测数据, 得到声速高次函数; 其次探究声线弯曲时目标位置与掠射角的关联性, 由此构造出声线插值函数并求解路径参数; 最后提出划分原则, 精简声速剖面分层。仿真结果表明, 所提算法定位误差较低, 分层精简率均维持在 48.04%的水平, 使计算量平均下降可达 50.27%, 能够最大程度保留声速剖面的原始特征, 减少分层数量, 提高计算效率。

关键词: 水声传感器网络; 水声定位; 声速剖面; 声线弯曲; 适应点

中图分类号: TP393 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2023)4-0000-00

DOI: 10.11759/hyxx20220328003

近年来, 海洋科学领域吸引了国内外学者的广泛关注, 人们对世界水域进行不懈的探索和开发。水声传感器网络(Underwater Acoustic Sensor Networks, UASNs)技术在对海洋的开发和国家的建设中发挥了关键作用, 为收集、组织和报告任务数据提供基本的技术支持^[1]。

海洋水声环境中的目标探测技术是水中探测、测量及通信的主要手段, 也是潜艇战和反潜战的重要工具^[2]。在 UASNs 中借助水声信号的传播时间和相位差, 可以确定目标和声源之间的距离与方位, 来实现对目标的定位与跟踪^[3, 4]。然而海洋环境复杂多变, 地面无线传感网络的节点定位技术无法直接应用于 UASNs。声速随着海域地理位置和测量时刻的变化而变化, 为水声传感器网络技术应用带来了一定的难度^[5]。以 UASNs 定位问题为例, 使用恒定声速、采用欧式距离表示水声信号的传播距离, 会给斜距测量引入误差, 导致信号接收器(位置已知节点)无法准确接收信号发出源(待定位节点)发出的水声信号, 从而影响定位结果。除此之外, 由于水下介质的非均匀性, 依赖深度的声速剖面(Sound Speed Profile, SSP)随深度而改变, 水声信号在传播时易发生折射与弯曲, 此时将水声信号的传播轨迹视为声线, 这种现象称为声线弯曲^[6, 7]。目前有射线模型(Bellhop)、简正波模型(Kraken)、抛物模型(Ram)可解决声线弯曲的问题, 其中射线模型计算速度更快,

在浅海区域的适用性及可行性优势更加突出^[8]。因此, 本文以射线模型为理论基础, 即假设目标海域的复杂 SSP 可近似为由多个简单结构的声速层组成, 每个独立分层内的声速折线分布来代替整体 SSP 的连续变化。为此, 需要预先测量目标海域的 SSP 并进行完整评估, 结合真实环境进行声线修正。

LUO 等^[9]分析了复杂海洋环境对定位的影响, 提出一种高精度定位算法, 但未考虑声速变化带来的误差, 将声速固定为 1 500 m/s。王方旗等^[10]采用声速反演方法获取地层深度和平均声速的数据, 并利用回归分析方法对平均声速进行了研究。由于平均声速理论假设过于简单, 难以消除声线弯曲的影响, 会在距离观测中导致系统误差。为了降低声线弯曲导致的定位误差, 常采用对 SSP 分层计算和逐层累加思想进行声线修正, 然而大量的 SSP 数据点会导致计算量随层数增多而显著加大^[11]。针对高密度 SSP 问题, 张志伟等^[12]应用声线修正的 D-P 算法, 对声速数据进行压缩, 重构 SSP, 当声速变化剧烈时效

收稿日期: 2022-03-28; 修回日期: 2022-09-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61771181, 62171179, 62071167)
[Foundation: The National Natural Science Foundation of China No.61771181, No.62171179, No.62071167]

作者简介: 陈嘉兴(1977—), 男, 天津人, 教授, 博士, 主要从事水下信息物理系统、水声通信技术、感知融合下的水下协同控制研究, 电话: 13930194955, E-mail: 13930194955@163.com; 刘志华(1977—), 通信作者, 电话: 15227865118, E-mail: liuzhuhua@hebtu.edu.cn

果不佳。冯国君等^[13]对 SSP 进行全局的搜索,利用最大差别确定最佳分层点,然而距离阈值对适应点选取影响较大。杨阳等^[14]提出一种改进的 PSO 算法进行声线修正,对声线弯曲现象进行补偿修正,将最小化适应度函数值下的粒子位置作为待定位节点的估计位置,然而未结合目标海域实际的 SSP 简化成负梯度变化。HE 等^[15]考虑了具有等梯度 SSP 的水下目标定位与跟踪问题,提出在分布式水声系统中,节点按照星型拓扑结构部署进行声线修正。李昂等^[16]提出基于 Bellhop 射线模型的水下实时声波定位的 RAR 算法,对声速变化和声线轨迹进行补偿,降低了声线弯曲的影响,同时缩小了搜索范围,减少了计算开销。对此,本文针对声速变化和声线弯曲的 UASNs 定位系统,将静态通信定位体制与声速变化相结合,兼顾信号发出源与多个信号接收器的位置特征,探究声线弯曲时目标位置与掠射角的关联性,提出一种迭代适应点分层(Iterative Adaptive Points Layering, IAPL)的声线修正算法。利用 Snell 定律获取单层掠射角,引入插值法模拟声线真实特征,借助声线插值函数求解路径参数,并从理论上证明了函数的存在唯一性。本文对水下介质分层效应造成的声线弯曲现象进行了声线修正处理,保留 SSP 的原始特征,确定了合理分层结构,减少了分层数量,为此提出 IAPL 算法。算法中提出精简 SSP 分层的 8 种划分原则,进而降低声线弯曲对定位的影响。最后探究声速变化、声线弯曲的结构参数和分层数量对计算时间的影响规律,并对 IAPL 算法进行了仿真验证。

1 模型搭建

1.1 水声定位系统模型

如图 1 所示,设海域环境的 UASNs 系统由信号发出源 S 和信号接收器 $R_r (r=1,2,\dots,n)$ 组成,均处于 x - o - z 平面,对 S 进行估计定位。假设 S 在 t_s 时刻发送水声信号, R_r 在 t_r 时刻接收该信号。

1.2 射线模型

为探究声线在某一深度的声速,文献^[17]提出了经验公式如式(1)所示:

$$c(z) = 1449.2 + 4.6T_e - 0.055T_e^2 + 0.017z + (1.39 - 0.012T_e)(S_a - 35), \quad (1)$$

式中: z 为测量环境的水深, T_e 为温度, S_a 为盐度。由于

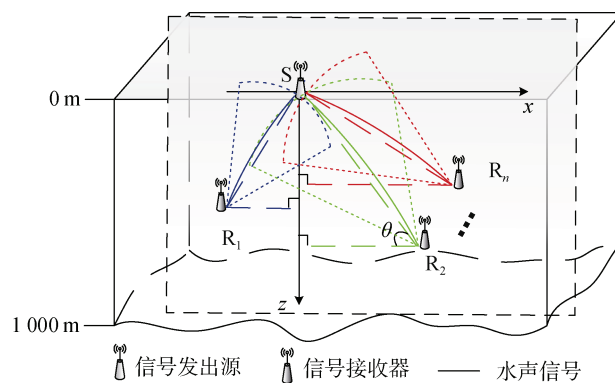


图 1 UASNs 定位系统示意图

Fig. 1 System diagram of underwater acoustic sensor networks

声线受水平方向的影响较小,故而大部分文献将声线看成仅与 z 相关的函数 $c(z)$ ^[18-20]。由于水下介质的非均匀特性,声线在分层处方向会发生改变^[21],并假设声线符合 Snell 折射定律^[22]如式(2)所示:

$$\frac{\cos \theta_i}{c(z_i)} = k \quad (i=0,1,\dots,N), \quad (2)$$

式中: k 为比例系数, θ_i 为第 i 层声线方向与水平坐标 x 轴的夹角,称为掠射角^[23]。设信号受分层效应影响,在 $S(x_s, z_s)$ 和 $R_r(x_r, z_r)$ 间弯曲传播,将 $[z_0, z_N]$ 等间隔分为 N 层,第 i 层的深度 z_i 如式(3)所示:

$$z_i = z_0 + i \cdot \frac{z_N - z_0}{N}, \quad (3)$$

在目标海域的一个分层内,由于信号的直达声脉冲在时间上可与界面反射声分开,并且信号发出源或信号接收器指向性会抑制界面反射声,因此本文不考虑障碍物折射情况。假设声线在任意深度 z_i 处仅经过一次,掠射角 $\theta_i \in (0, \pi/2)$ 。

结合式(2)求解声线在单层内的计算时间 t_i 与水平传播距离 d_i 分别如式(4)、式(5)所示:

$$t_i = \frac{1}{2g_i} \left| \ln \frac{1 + \sin \theta_i}{1 - \sin \theta_i} - \ln \frac{1 + \sin \theta_{i+1}}{1 - \sin \theta_{i+1}} \right|, \quad (4)$$

$$d_i = \frac{c(z_i)}{g_i \cos \theta_i} |\sin \theta_i - \sin \theta_{i+1}|, \quad (5)$$

式中: $g_i = \frac{c(z_{i+1}) - c(z_i)}{z_{i+1} - z_i}$, 表示第 i 层的梯度值。

2 IAPL 算法

由于在水声定位系统中,水下介质的非均匀特性造成了声线弯曲的现象,这是造成定位误差大的主要原因。同时,SSP 的分层数量也影响定位的精度

和计算量。因此，本文从声线修正入手，提出了 IAPL 算法确定合理的分层结构，降低了由于声线弯曲引起的定位误差并且提高了计算效率。

2.1 准备阶段

定义 1: 根据 IAPL 算法迭代获得的 SSP 新分层点，称为适应点。

将信号发出源 S 与所有信号接收器 R_r 通信所得的第 i 层的深度 z_i 、距离 d_i^{sum} 、掠射角 θ_i 和梯度值 g_i ($i=0,1,\dots,N$) 存储于矩阵 $R_r^{N \times 4}$ 内。由于二维平面借助 3 个已知节点即可定位 S^[24]，为方便分析， R_r 中的 r 取 1,2,3。用 $F^{N \times 4}$ 来存储声线的各层信息，运算规则如式(6)所示：

$$F^{N \times 4} = \begin{bmatrix} R_1^{N \times 4} & R_2^{N \times 4} & R_3^{N \times 4} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

为了模拟声线的真实特征，进一步说明精简分层的适应点数量 N 的选取，本文构造随深度 z 变化的分层传播声线线性插值函数 $P(z)$ 。假设适应点集合为 $T = \{z_0, \dots, z_i, \dots, z_N\}$ ，对应的 $P(z)$ 函数值集合为 $\{P(z_i) | i=0,1,\dots,N\}$ ，其中 $P(z_i) = d_i^{sum}$ 。

定理 1: S 与 R_r 的通信过程中，存在声线关于深度的线性插值函数 $P(z)$ 且形式唯一。

证明 由于声线在深度 $[z_0, z_N]$ 上有定义，且可求得在 z_i 上的 d_i^{sum} ($i=0,1,\dots,N$)，设声线有线性插值函数如式(7)所示：

$$P(z) = a_0 + a_1 z + \dots + a_i z^i + \dots + a_N z^N, \quad (7)$$

式中： a_i 为实数，可以得到关于 a_i 的 $N+1$ 元线性方程组，如式(8)所示：

$$\begin{cases} 1 \cdot a_0 + z_0 a_1 + \dots + z_0^N a_N = d_0^{sum} + \xi \\ 1 \cdot a_0 + z_1 a_1 + \dots + z_1^N a_N = d_1^{sum} + \xi \\ \vdots \\ 1 \cdot a_0 + z_N a_1 + \dots + z_N^N a_N = d_N^{sum} + \xi, \end{cases} \quad (8)$$

式中： $\xi = P(z_0)$ ，方程组式(8)的系数矩阵如式(9)所示：

$$V = \begin{bmatrix} 1 & z_0 & \dots & z_0^N \\ 1 & z_1 & \dots & z_1^N \\ 1 & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & z_N & \dots & z_N^N \end{bmatrix}, \quad (9)$$

由于 z_i ($i=0,1,\dots,N$) 互异，可知矩阵 V 为范德蒙德(Vandermonde)矩阵^[25]，故行列式 $\det V$ 如式(10)所示：

$$\det V = \prod_{\substack{i,j=0 \\ i>j}}^N (z_i - z_j) \neq 0, \quad (10)$$

因此仅存在一组满足线性方程组式(8)的解 a_0, a_1, \dots, a_N ，即可得唯一的线性插值函数 $P(z)$ 。

$P(z)$ 存在唯一性说明根据深度 z_i 可求得唯一的 $P(z_i)$ 。在目标海域中，SSP 分层数 N 直接关系到定位准确性与计算量，为说明 N 的取值对精简后 SSP 模拟实际声线的近似程度的影响，下面提出定义 2。

定义 2 设 S_{P_i} 表示相邻适应点的插值函数值 $P(z_i)$ 、 $P(z_{i+1})$ 与坐标轴围成梯形的面积， S_p 表示声线的线性插值函数 $P(z)$ 与坐标轴围成的面积，则当 SSP 划分层数为 N 时，精简后 SSP 与实际声线的近似度 η_N 定义如式(11)所示：

$$\eta_N = \frac{\sum_{i=0}^N S_{P_i}}{S_p}, \quad (11)$$

定理 2: SSP 划分层数 N 越大， η_N 越接近于 1。

证明 设声线在深度 $[z_0, z_N]$ 内存在适应点 A_i ，其对应的横坐标为 z_i ，且 $\exists \delta_i > 0$ ，有 $z_{i+1} = z_i + \delta_i$ ($i=0,1,\dots,N$)，则弯曲声线与横坐标围成的面积 S_p 如式(12)所示：

$$S_p = \int_{z_0}^{z_N} P(z) dz > \lim_{\substack{N \rightarrow \infty \\ \delta_i \rightarrow 0}} \sum_{i=0}^N S_{P_i}, \quad (12)$$

式中： $S_{P_i} = \frac{\delta_i}{2} \cdot [P(z_i) + P(z_{i+1})] < \int_{z_i}^{z_{i+1}} P(z) dz$ 。

设分层数 $N < M$ ，区间内面积比较如式(13)所示：

$$\lim_{\substack{N \rightarrow \infty \\ \delta_i \rightarrow 0}} \sum_{j=0}^N S_{P_j} < \lim_{\substack{M \rightarrow \infty \\ \delta_i \rightarrow 0}} \sum_{i=0}^M S_{P_i} < \int_{z_0}^{z_N} P(z) dz, \quad (13)$$

则分层数 N 与 M 的近似度分别为 η_N 、 η_M ，如式(14)所示：

$$\eta_N = \frac{\lim_{\substack{N \rightarrow \infty \\ \delta_i \rightarrow 0}} \sum_{j=0}^N S_{P_j}}{\int_{z_0}^{z_N} P(z) dz} < \frac{\lim_{\substack{M \rightarrow \infty \\ \delta_i \rightarrow 0}} \sum_{i=0}^M S_{P_i}}{\int_{z_0}^{z_N} P(z) dz} = \eta_M, \quad (14)$$

综上所述，SSP 划分层数 N 越大，近似度 η_N 越大且越接近于 1，精简后的 SSP 接近实际声线的近似度越高。

2.2 选取适应点阶段

既要精简 SSP 以提高计算效率，又要最大程度接近真实 SSP 来减小实测数据的误差，而等间隔分层方法无法同时兼顾提高计算效率与降低定位误差。本节将通过调整深度间距 δ_i ，进一步说明 N 的合理取值，从而减少不必要的分层点。

IAPL 算法的主要思想为：根据 $F^{N \times 4}$ 中离散点坐标 $A_i [z_i, P(z_i)]$ ($i=0,1,\dots,N$)，选取 S 作为声线的起始适

应点 $A_0[z_0, P(z_0)]$ 、 R_r 作为最终适应点 $A_N[z_N, P(z_N)]$ ，连接两点得到直线 A_0A_N ，计算与水平横轴方向直线倾斜角 $\hat{\theta}_{0,N}$ 如式(15)所示：

$$\hat{\theta}_{0,N} = \arctan\left(\frac{z_N - z_0}{P(z_N) - P(z_0)}\right), \quad (15)$$

为了使 $P(z)$ 最大程度保留实际声线的特征点并减少定位的计算耗时，迭代遍历 $F^{N \times 4}$ 找到符合条件掠射角 θ_j 所对应的点 $A_j(z_j, P(z_j))$ ，将该点保留并作为适应点，并以此为界限，将直线 A_0A_N 分成 A_0A_j 和 A_jA_N 两部分，再在两部分中分别迭代判断。此过程称为阶段性重分层，如图 2 所示。

图 2 中， $\hat{\theta}_{0,N}$ 表示分层区间 $[z_0, z_N]$ 内直线 A_0A_N 与水平横轴方向的倾斜角， A_j 为第一次分层确定的适应点，其中 $j \sim (0, N)$ ，并以此点为界限，分别在区间 $[z_0, z_j]$ 与 $[z_j, z_N]$ 内进行分层； $\hat{\theta}_{0,j}$ 、 $\hat{\theta}_{j,N}$ 分别为直线 A_0A_j 与 A_jA_N 的倾斜角，由此可确定第二次分层得到的适应点 A_m 与 $A_{m'}$ ，其中 $m \in (0, j)$ 、 $m' \in (j, N)$ ；第三次分层则分别在区间 $[z_0, z_m]$ 、 $[z_m, z_j]$ 、 $[z_j, z_{m'}]$ 、 $[z_{m'}, z_N]$ 内进行，直到所有掠射角 θ_i 均被遍历。由于在遍历掠射角、确定适应点的过程中会出现相邻层的合并、增加、剔除等多种情况，因此本文借助掠射角对迭代执行的条件进行判别，给出定义 3。

定义 3: 设 θ_j 与 θ_{j+1} 分别为相邻两个掠射角， $\hat{\theta}_j$

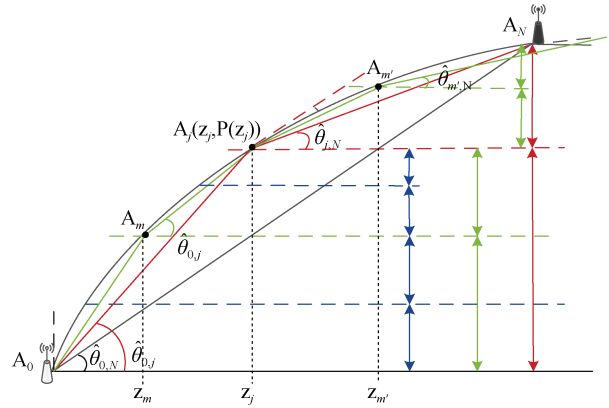


图 2 阶段性重分层示意图

Fig. 2 Schematic of phased layering

为分层区间起始点连线的倾斜角，令 $\Delta\theta_j = \hat{\theta}_j - \theta_j$ ， $\Delta\theta_j = \hat{\theta}_j - \theta_j$ ，则称 $\Delta\theta_j$ 和 $\Delta\theta_{j+1}$ 为 A_j 的角差组，记为 Group_j ，其公式定义如式(16)所示：

$$\text{Group}_j = \{\Delta\theta_j, \Delta\theta_{j+1}\}, \quad (1)$$

对 SSP 进行精简时，迭代遍历 $F^{N \times 4}$ 中的 θ_j ，计算掠射角的变化幅度，根据 A_j 的角差组 Group_j 与预先设定的阈值 μ 的大小关系，从而判别 $A_j[z_j, P(z_j)]$ 是否确定为适应点，然后对 SSP 原始分层进行重新划分。划分原则按照以下 5 种情形予以讨论，如表 1 所示。

表 1 符合划分条件的掠射角 θ_j 可以找到

Tab. 1 The grazing angle θ_j satisfying the division condition can be found

情形	Group _j 与 μ 的大小关系	分层原则
情形 1	$\begin{cases} \Delta\theta_j \leq \mu \\ \Delta\theta_{j+1} \leq \mu \\ \Delta\theta_j - \mu \leq \Delta\theta_{j+1} - \mu \end{cases}$	将等间隔分层中第 j 层与第 $j+1$ 层合并，保留至第 j 层作为新的适应点，该点深度为 $(z_j + z_{j+1})/2$ 。
情形 2	$\begin{cases} \Delta\theta_j \leq \mu \\ \Delta\theta_{j+1} \leq \mu \\ \Delta\theta_j - \mu > \Delta\theta_{j+1} - \mu \end{cases}$	将等间隔分层中第 j 层与第 $j+1$ 层合并，保留至第 $j+1$ 层作为新的适应点，该点深度为 $(z_j + z_{j+1})/2$ 。
情形 3	$\begin{cases} \Delta\theta_j \leq \mu \\ \Delta\theta_{j+1} > \mu \end{cases}$	将等间隔分层中第 $j+1$ 层剔除，保留第 j 层作为新的适应点。
情形 4	$\begin{cases} \Delta\theta_j > \mu \\ \Delta\theta_{j+1} \leq \mu \end{cases}$	将等间隔分层中第 j 层剔除，保留第 $j+1$ 层作为新的适应点。
情形 5	$\begin{cases} \Delta\theta_j > \mu \\ \Delta\theta_{j+1} > \mu \end{cases}$	第 j 层与第 $j+1$ 层均保留并寻找新的适应点。迭代求解 $\Delta\theta = (\theta_j + \theta_{j+1})/2$ ，直到满足 $ \Delta\theta - \hat{\theta} \leq \mu$ ，计算新增层的掠射角。

将已确定的适应点间的梯度值更新,用 G 表示,其可以表示重新分层中任意层声线方向变化的程度,在精简分层中可以起到预先判断的作用。然而在阶段性分层中存在遍历无法找到 θ_j 情

况,即表示借助 Group_j 与 μ 的关系无法在此段再精简细分,此时将计算所得的 G 与原始梯度值 g_i 比较。划分原则照以下 3 种情形予以讨论,如表 2 所示。

表 2 符合划分条件的掠射角 θ_j 无法找到

Tab. 2 The grazing angle θ_j satisfying the division condition cannot be found

情形	G 与 g_i 的大小关系	分层原则
情形 1	$\begin{cases} g_j \leq G \leq g_{j+1} \\ g_j \cdot g_{j+1} > 0 \end{cases}$	将等间隔分层中第 j 层与第 $j+1$ 层合并,保留至第 j 层作为新的适应点。
情形 2	$\begin{cases} g_j \leq G \leq g_{j+1} \\ g_j \cdot g_{j+1} < 0 \end{cases}$	将等间隔分层中第 j 层与第 $j+1$ 层均保留,作为新的适应点。
情形 3	$\begin{cases} G \geq g_j \text{ 或 } G \leq g_j \\ G \geq g_m \text{ 或 } G \leq g_m \end{cases}$ $(j < m < N)$	将等间隔分层中第 j 层与第 m 层均保留作为新的适应点。

遍历 $F^{N \times 4}$ 确定并更新所有适应点信息,迭代直到每一个适应点满足的角差组 Group_j 均小于阈值 μ ,并且依据梯度值无需再分层,将最终结果作为 SSP 的分层结果 N 。

IAPL 算法适用于有梯度变化的实际海域情况,减少了由于等间隔分层产生不必要的分层点,同时提高了声速梯度变化较大时 SSP 的真实性,进而减小实测数据产生的各类误差。

2.3 算法步骤

步骤 1: 将深度 z_N 等间隔分成 N 层,利用 AoA 测得声线到达 R_r 射出掠射角 θ_N 。

步骤 2: 计算深度值 z_i 对应的瞬时声速,根据式(2)计算 Snell 系数 k ,求解各层掠射角 θ_i ,根据式(5)计算水平传播距离 d_i^{sum} 。

步骤 3: 调用矩阵集合 $F^{N \times 4}$ 数据信息,迭代遍历计算各个适应点的直线倾斜角 $\hat{\theta}_j$,计算角差组 Group_j 与梯度值 G 并根据 8 种划分原则寻找新的适应点。

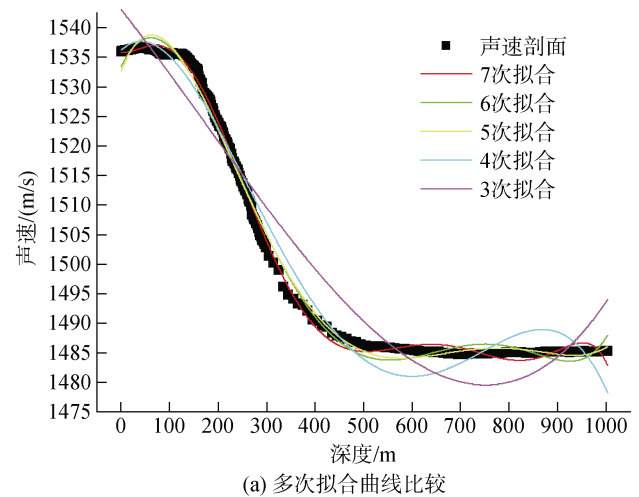
步骤 4: 依据与 μ 的近似程度、依据梯度值是否需再分层, Group_j 判定继续分层或终止退出。

3 仿真实验

本文应用 MATLAB 平台、Argo 系统的实时数据^[26]进行仿真实验。

3.1 声线函数拟合

为了验证 IAPL 算法的有效性,本文利用 2021 年 7 月太平洋海域(0.088°N, 155.742°E)0~1 000 m 实测 SSP 数据集进行实验,结合式(1)得到 SSP 如图 3



(a) 多次拟合曲线比较

模型	声速-深度拟合模型
方程	$a+a1*x+a2*x^2+a3*x^3+a4*x^4+a5*x^5$
绘图	声速
a	1532.57745 ± 0.39522
$a1$	0.21481 ± 0.0095
$a2$	$-0.00215 \pm 6.73627E-5$
$a3$	$5.05834E-6 \pm 1.85899E-7$
$a4$	$-4.80059E-9 \pm 2.17186E-10$
$a5$	$1.6327E-12 \pm 9.01332E-14$
Reduced Chi-Sqr	2.55186
R平方 (COD)	0.9943
调整后R平方	0.99417

(b) 最优模型参数

图 3 目标海域 SSP 多次拟合结果比较

Fig. 3 Comparison of multiple fitting result images of SSP in the target sea area

所示。由于在一定深度范围内，声速经验公式的结果才相对准确^[27]，当海水深度大于 1 000 m，温度或盐度会超出声速经验模型公式的适用范围，因此本文将 1 000 m 内的环境作为目标海域。

在对声线进行模拟时，使用工具 Origin Pro 2017C 对 $c(z)$ 进行多项式函数的最优模型拟合。为获取更高的精度，将函数关系进行 3~7 次拟合比较，拟合曲线比较结果如图 3(a)所示。从图 1(b)可以看出，使用 5 次多项式函数拟合 COD 值为 0.9943。在拟合结果符合实际 SSP 的情况下，5 次函数拟合相比于 7 次而言计算量减少 2 个数量级，因此选择 5 次拟合结果近似代替 $c(z)$ ，即使用式(17)计算任意深度 z 声速处的声速值。

$$c(z) = 1532.57745 + 0.21481z - 0.00215z^2 + 5.05834z^3 \cdot 10^{-6} - 4.80059z^4 \cdot 10^{-9} + 1.6327z^5 \cdot 10^{-12} \quad (17)$$

3.2 实验分析

3.2.1 分层数量比较

以 AoA 测得射出掠射角为 45° 作为仿真初始条件，记录一个信号接收器布放位置(800, 800)，收集每个适应点对应数据，并载入数据集，根据真实 SSP 表示 0~100 不同分层数量情况下传播距离与计算时间变化。

由图 4 可知，同深度情况下水声信号的水平传播距离随划分层数的增加逐渐增长，由于 IAPL 算法将起始点记为第 0 层，信号接收点记为第 N 层，而当 $N=0$ 时不满足定位系统原理，因此实际分层数量舍弃 $N=0$ 的情况。整体来看，随着 N 取值逐步增大至 $N=100$ ，水平传播距离控制在 805~820 m 之内，产生 15 m 的水平波动；计算时间从 0 s 开始逐步增加，大约到 1.4 s 完成层数划分及水声信号的传输，可见分层数量的增加会延长计算时间。

图 4 所示，分层数量 $N < 40$ 时，水声信号的水平传播距离在层内变化值相差较大，进而对两点实际距离计算的影响明显，分层数量的调整能在较大程度上对定位误差产生影响；然而当 $N > 40$ 时，随着划分层数的增加，每增加一层，水平传播距离的差距逐渐减小，同时在计算时间上仅仅相差大约 0.01 s，由图 4 中右下角局部放大图可知。鉴于这种情况对定位误差的影响甚微，但划分层数的增加，增加了计算量，故阈值的比较在 $N=40$ 基础上进行分析。

3.2.2 阈值比较

IAPL 算法是在设定阈值的情况下对 SSP 进行重

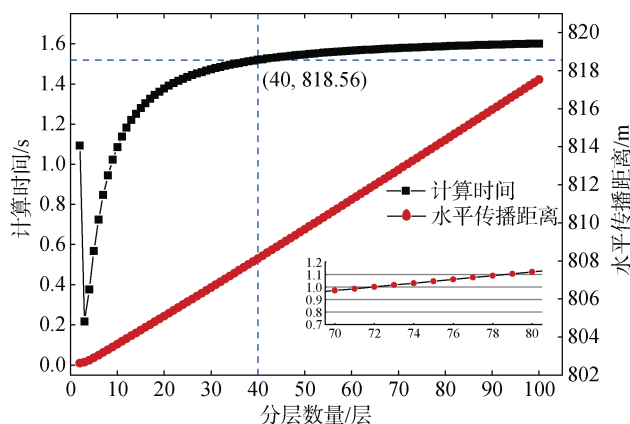


图 4 不同分层数量对传播距离与计算时间的影响
Fig. 4 Effects of different layers on the horizontal propagation distance and computation time

新构造，表示划分掠射角的最小限制，是决定适应点疏密的重要指标。因此，找到一个合适的阈值来搜索适应点至至关重要。可根据搜索迭代结果的差值与精度要求来设定。为了进一步分析不同阈值 μ 对 SSP 分层的影响，使用 SSP 的分层精简率来评估声线。为此，提出定义 4。

定义 4: 设 N_p 表示 SSP 减小之前分层数， N_a 表示适应点数，则分层精简率 Simp 定义如式(18)所示：

$$\text{simp} = \frac{|N_p - N_a|}{N_p} \times 100\% \quad (18)$$

实验结果如表 3 所示。

表 3 不同阈值下的 SSP 分层精简率
Tab. 3 SSP Simp Under Different Thresholds

阈值	N_p /层	N_a /层	Simp/%
0.001	40	25	37.50
0.002	40	25	37.50
0.003	40	21	47.50
0.004	40	22	45.00
0.005	40	22	45.00

从表 3 中可以看出，随着阈值的增加，分层精简率 Simp 呈现先升高再降低趋势。当阈值选择为 0.003 时，原始轮廓的分层精简率接近于 50%；当阈值小于 0.003 时，独立分层情况数量增加，分层精简率不是理想的；当阈值大于 0.003 时，分层情况变化不大，仅借助角差组不足以确定适应点，则需要考虑原始梯度值。因此，可根据不同的实际海域数据选取 SSP 的相应阈值，本例选为 0.003，实现了算法的适应点快速分层，大大提高了算法的计算效率。

3.2.3 SSP 特征比较

相比于等间隔分层方法, 适应点分层方法在分层精简率上的优势如表 4 所示。从中可以看出, 不同深度目标海域 SSP 的分层精简率均可维持在 48.04% 的水平, 有效缩减了 SSP 的划分层数, 进而减少了定位的计算时间。

表 1 不同深度下的 SSP 分层精简率
Tab. 4 SSP Simp Under Different Depths

深度/m	N_p /层	N_a /层	Simp/%
400	20	10	50.00
500	25	13	48.00
600	30	17	43.33
700	35	17	51.43
800	40	21	47.50

图 5 为在不同的深度下, 运用 IAPL 算法对 SSP

进行分层的情况。由于 IAPL 算法精简分层数量受起始适应点与最终适应点深度差的影响, 本文以 20 m 深度等间隔划分为例, 将深度分别为 400、600、800 m 的情况分为 20、30、40 层, 由图 5a、5b、5c 的网格线比较可知, 随着深度的增加, 网格线分布越密集, 适应点数量相应增加。通过图中的局部放大图可见, 选取不同深度的海域, 对声速剖面的精简情况各不相同, 但 IAPL 算法都可以达到不同程度的精简效果。相比于基于大量数据构成的海域 SSP, 等间隔分层后的 SSP 可以大致描述原始剖面, 但该方式欠缺对真实剖面的特征考虑, 且适应点较密集, 计算时间增长。IAPL 算法充分考虑海域的实际梯度变化, 增加了梯度变化波动大时的特征点, 将不必要适应点进行适当合并, 精简后的 SSP 适应点能够在最大程度上保留 SSP 的原始特征, 在贴近真实的剖面的情况下减少分层数量, 同时提高了定位的效率。

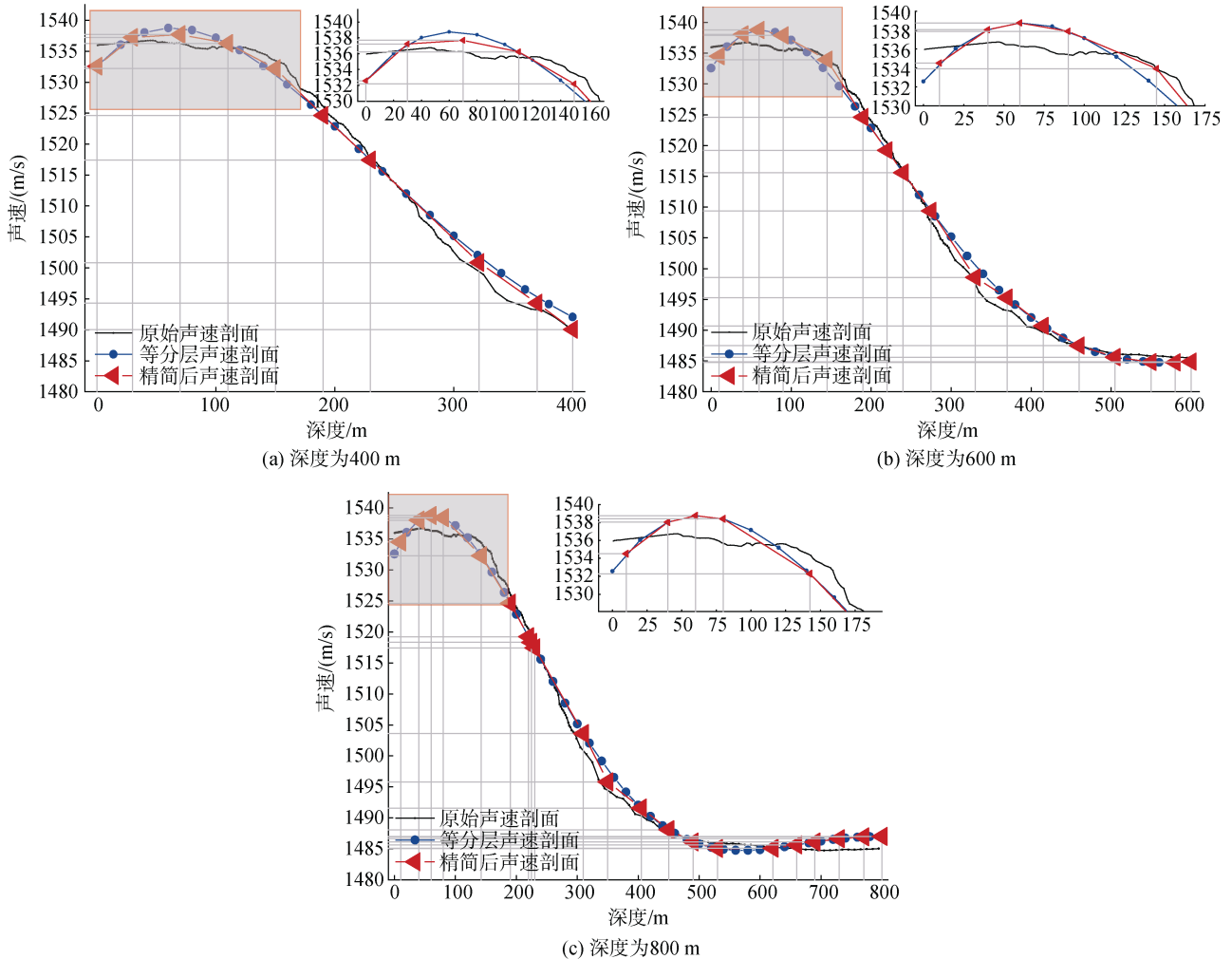


图 5 不同深度下 SSP 划分图

Fig. 5 Division of SSP at different depths

3.2.4 定位误差

为了验证 IAPL 算法的定位性能, 本文将与等间隔分层方法、D-P 算法^[12]、ADMV^[13]3 种经典分层方法进行比较。如图 6 所示, 随着划分层数的增加, 定位误差呈现下降趋势。相比之下, 等间隔分层的方法由于缺乏对实际剖面结构的考虑, 无法准确反映出适应点特征, 算法精度受到笼统性分层的影响, 定位误差高于 D-P 算法、ADMV 算法和 IAPL 算法。D-P 算法是等间隔分层的改进, 定位精度较等间隔分层方法所有提高。但对一些较复杂的 SSP 进行压缩时易产生自相交等错误, 阻碍部分数据压缩, 容易受测量误差的影响。ADMV 算法是对 D-P 算法的一种改进, 从全局考虑但阈值的设定是影响适应点的重要因素。IAPL 算法通过比较掠射角一次分层、通过梯度值二次确定能够对所有剖面数据进行比较, 充分考虑适应点位置。相比于 ADMV 算法所提的距离阈值, 本算法中的角度阈值对适应点确定的影响较小, 因此距离阈值对定位误差的影响小于 ADMV 算法, 相比较优。

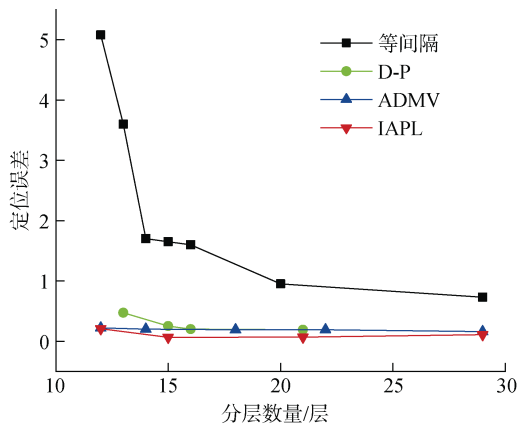


图 6 不同算法 SSP 分层数与定位误差的关系

Fig. 6 Relationships between the number of sound speed profile layering and the localization errors for different algorithms

3.2.5 定位时间

相应地, 如图 7 所示, IAPL 算法展现了计算时间的优势。可以看出, 使用适应点对 SSP 进行分层相比于等间隔分层方法, 计算时间明显减少, 并且平均下降可达 50.27%, 所以, 本文所提算法显著提高了计算效率。

4 结论

本文针对水声传感器网络环境中声速误差导致的声线弯曲现象, 提出 IAPL 算法进行声速修正来降

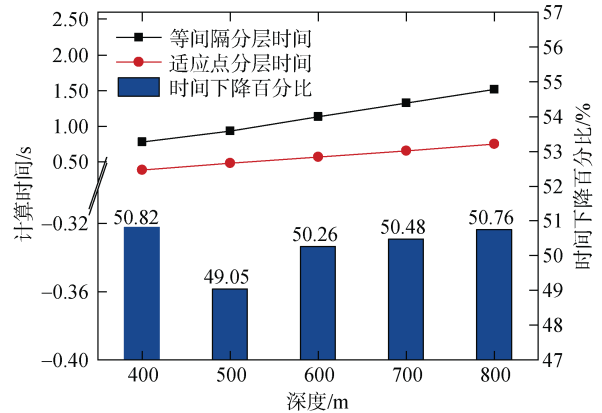


图 7 不同深度计算时间对比与下降百分比

Fig. 7 Comparison of calculation time and percentage of decline at different depths

低声线弯曲对定位误差的影响。本文采用目标海域的实测数据, 拟合出声速高次函数来降低声速变化带来的误差, 根据分层掠射角提出了适应点分层原则计算各层水平传播距离, 从而能够最大限度消除声线弯曲和水下介质分层带来的影响。通过分析阈值与适应点分层精简率的关系, 确定符合条件的最佳阈值。在此基础上, 适应点位置最大程度模拟了 SSP 的真实特征, 分层数量的减少降低了计算时间, 相应地提高效率。该方法简单易实现, 信号发出源与信号接收器相互通信的次数和传输信息量少, 适合于处理存储能力有限的测量设备。IAPL 算法掠射角阈值对适应点选取影响较小, 在原理上与常梯度跟踪算法的思想相吻合, 因此能够保证 SSP 的特征点, 可以在降低定位误差的同时明显提高了计算效率。

参考文献:

- [1] 姜静波, 刘庆奎, 于非, 等. 一种低功耗海洋定位信号的研制与应用[J]. 海洋科学, 2020, 44(11): 6.
JIANG Jingbo, LIU Qingkui, YU Fei, et al. Research and development of integrated acoustic monitoring system for marine instrument test field[J]. Marine Sciences, 2020, 44(11): 6.
- [2] 朱敏, 武岩波. 水声通信技术进展[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(3): 289-296.
ZHU Min, WU Yanbo. Development of underwater acoustic communication technology[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(3): 289-296.
- [3] 李浩铭, 鄢社锋, 徐立军, 等. 基于射线声学的水下传感网络静默定位算法[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(3): 781-787.
LI Haoming, YAN Shefeng, XU Lijun, et al. A silent location algorithm for underwater sensor network based

- on ray acoustics[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2021, 43(3): 781-787.
- [4] 赵晨, 乔钢, 周锋. 基于正交移动双水下自主潜航器的水下合作目标定位方法[J]. *电子与信息学报*, 2021, 43(3): 834-841.
ZHAO Chen, QIAO Gang, ZHOU Feng. Underwater cooperative target localization method based on double orthogonal moving autonomous underwater vehicles[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2021, 43(3): 834-841.
- [5] 李睿. 水下无线传感网络移动节点定位及目标跟踪关键技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021: 1-49.
LI Rui. Research on key technologies of mobile node localization and target tracking in underwater wireless sensor network[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021: 1-49.
- [6] MRIDULA K M, AMEER P M. Localization under anchor node uncertainty for underwater acoustic sensor networks[J]. *International Journal of Communication Systems*, 2018, 31(2): 1-14.
- [7] LIU Y, XUE S, QU G, et al. Influence of the ray elevation angle on seafloor positioning precision in the context of acoustic ray tracing algorithm[J]. *Applied Ocean Research*, 2020, 105: 102403.
- [8] 肖鹏. 深海会聚区及影区声传播与声场特性研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2017.
XIAO Peng. Study on acoustic characteristics of deep-water in convergence and shadow zone[D]. Xian: Northwestern Polytechnical University, 2017.
- [9] LUO J, YANG Y, WANG Z, et al. A mobility-assisted localization algorithm for three-dimensional large-scale UWSNs[J]. *Sensors*, 2020, 20(15): 4293.
- [10] 王方旗, 陶常飞, 林旭波, 等. 基于高分辨率浅剖与钻孔信息对比的金州湾海底声速的统计特征[J]. *海洋学报*, 2020, 42(11): 112-122.
WANG Fangqi, TAO Changfei, LIN Xubo, et al. Statistical characteristics of seabed sound velocity in the Jinzhou bay based on high resolution sub-bottom profile data[J]. *Haiyang Xuebao*, 2020, 42(11): 112-122.
- [11] LIU Y, Lu X, XUE S, et al. A new underwater positioning model based on average sound speed[J]. *Journal of Navigation*, 2021: 1-17.
- [12] 张志伟, 暴景阳, 金山. 一种多波束测深声线跟踪自适应分层方法[J]. *海洋测绘*, 2018, 38(1): 5.
ZHANG Zhiwei, BAO Jingyang, JIN Shan. A self-adapting division method for ray-tracing of multibeam echosounding[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2018, 38(1): 5.
- [13] 冯国君, 单志龙, 项婉. 基于最小方差的声线跟踪自适应分层算法[J]. *声学技术*, 2020, 39(4): 511-516.
FENG Guojun, SHAN Zhilong, XIANG Wan. An adaptive stratification algorithm for acoustic ray tracking based on minimum variance[J]. *Technical Acoustics*, 39(4): 511-516.
- [14] 杨阳. 基于水下无线传感器网络的定位算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
YANG Yang. Research on localization algorithm based on underwater wireless sensor networks[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [15] HE C, WANG Y, YU W, et al. Underwater target localization and synchronization for a distributed SIMO sonar with an isogradient SSP and uncertainties in receiver locations[J]. *Sensors(Basel, Switzerland)*, 2019, 19(9): 1-23.
- [16] 李昂, 陈姝君, 王艳. 水下传感网络中基于 BELLHOP 模型的声定位算法[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2019, 14(10): 1083-1087.
LI Ang, CHEN Shujun, WANG Yan. Bellhop-based real-time acoustic ranging in underwater sensor networks[J]. *Journal of CAEIT*, 2019, 14(10): 1083-1087.
- [17] 邓宇. 基于水声传感器网络的定位精度优化技术研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2018.
DENG Yu. Research on optimization for positioning accuracy in underwater acoustic sensor networks[D]. Xiamen: Xiamen University, 2018.
- [18] 朴胜春, 栗子洋, 王笑寒, 等. 深海不完整声道下反转点会聚区研究[J]. *物理学报*, 2021, 70(2): 343-352.
PIAO Shengchun, LI Ziyang, WANG Xiaohan, et al. Lower turning point convergence zone in deep water with an incomplete channel[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(2): 343-352.
- [19] KAROLINA Z, ŁUKASZ M, AILEEN B, et al. Automatic identification of internal wave characteristics affecting bathymetric measurement based on multibeam echosounder water column data analysis[J]. *Energies*, 2021, 14(16): 4774.
- [20] MRIDULA K M, NAFISUR R, AMEER P M. Sound velocity profile estimation using ray tracing and nature inspired meta-heuristic algorithms in underwater sensor networks[J]. *IET Communications*, 2019, 13(5): 528-538.
- [21] 胡浩. 多波束测深自适应声速改正模型和方法研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2019.
HU Hao. Research on the model and method of multibeam bathymetry adaptive sound velocity correction[D]. Qingdao: Shandong: Shandong University of Science and Technology, 2019.
- [22] SHAMS R, OTERO P, AAMIR M, et al. E2JSL: energy efficient joint time synchronization and localization algorithm using ray tracing model[J]. *Sensors*, 2020, 20(24): 7222.

- [23] 王文博, 苏林, 王臻, 等. 利用宽带声场频率-掠射角干涉结构的深海直达声区目标深度估计方法[J]. 声学学报, 2021, 46(2): 161-170.
WANG Wenbo, SU Lin, WANG Zhen, et al. A broadband source depth estimation based on frequency domain interference pattern structure of vertical array beam output in direct zone of deep sea[J]. Chinese Journal of Acoustics, 2021, 46(2): 161-170.
- [24] 孟庆波, 王振杰, 王柏杨, 等. 一种改进的水下声学定位算法[J]. 海洋科学, 2019, 43(11): 7.
MENG Qingbo, WANG Zhenjie, WANG Boyang, et al. An improved underwater acoustic localization algorithm[J]. Marine Sciences, 2019, 43(11): 7.
- [25] MYKHAILO K, LOTHAR R, SHIYANOVSKII S V. Fast factorization of rectangular vandermonde matrices with chebyshev nodes[J]. Numerical Algorithms, 2018, 81(2): 547-559.
- [26] CHEN C, YAN F, GAO Y, et al. Improving reconstruction of sound speed profiles using a self-organizing map method with multi-source observations[J]. Remote Sensing Letters, 2020, 11(6): 572-580.
- [27] 王子衡, 王振杰, 聂志喜, 等. 声速剖面 EOF 重构的实测数据采样深度研究[J]. 海洋科学, 2021, 45(6): 126-134.
WANG Ziheng, WANG Zhenjie, NIE Zhixi, et al. Research on the sampling depth in the EOF reconstruction of the sound speed profile[J]. Marine Sciences, 2021, 45(6): 126-134.

Iterative adaptive points layering algorithm for sound ray correction in an underwater acoustic localization system

CHEN Jia-xing^{1, 2}, ZHAO Xiao-xu¹, DONG Yi-jing¹, DING Lu³, LIU Zhi-hua³

(1. College of Engineering, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China; 2. Zhengding Advanced Normal College of Hebei, Shijiazhuang 050800, China; 3. College of Computer and Cyber Security, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China)

Received: Mar. 28, 2022

Key words: Underwater acoustic sensor networks; acoustic localization; sound speed profile; sound ray bending; adaptive points

Abstract: In this paper, an iterative adaptive points layering(IAPL)algorithm is proposed to target the sound ray bending in an underwater acoustic localization system. This algorithm is used to correct the sound ray by selecting and layering the sound speed profile. First, an underwater acoustic localization model is built, and the high-order function of sound speed is obtained by fitting the monitoring data of the target sea area. Second, the relationship between the target location and grazing angle during the sound ray bending is studied, the interpolation function of the sound ray is constructed, and the path parameters are derived. Finally, the principle of layering is proposed to simplify the layers of the sound speed profile. The simulation results show that the proposed algorithm has a low localization error, the layering reduction rate is maintained at 48.04%, and the computational load can be reduced to 50.27% on average. The proposed algorithm can reduce the number of layers of the sound profile, retain its original characteristics to the maximum extent, and improve computational efficiency.

(本文编辑: 谭雪静)