

Doi: 10.11840/j.issn.1001-6392.2023.01.005

基于二次多项式拟合的超短基线声线修正方法

罗宇, 程梦迪, 李倩倩, 宋熙昭, 施剑

(山东科技大学 测绘与空间信息学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 超短基线定位解算中的距离观测值是指换能器与水下应答器之间的直线距离, 而海水声速的不均匀分布导致声波在海水中的实际传播路径为连续弯曲的曲线, 需要结合实测声速剖面进行声线修正。根据声速在分层介质中的传播特性, 本文提出了一种基于二次多项式拟合的声线跟踪算法, 采用线性插值方法对声速剖面数据进行合理加密并按等深度进行分层, 设定每层声速梯度是不断变化的, 用二次多项式拟合声速, 基于运动学原理建立了完整的数学解算模型。仿真结果表明, 该方法修正后的水下目标分布具有明显的收敛性, 且优于等梯度声线跟踪算法和等效声速剖面法, 显著提高了超短基线水声定位系统的定位精度。

关键词: 超短基线水声定位系统; 声线弯曲误差; 声线跟踪算法; 二次多项式拟合

中图分类号: P733.21; P229

文献标识码: A

文章编号: 1001-6392(2023)01-0042-06

Ultra-short baseline sound ray correction method based on quadratic polynomial fitting

LUO Yu, CHENG Mengdi, LI Qianqian, SONG Xizhao, SHI Jian

(College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: The observed distance in the ultra-short baseline positioning is the linear distance between the transducer and the underwater transponder, while the uneven distribution of sound speed in seawater leads to the actual propagation path of sound wave in seawater being continuous curve, which needs to be corrected in combination with the measured sound speed profile. According to the propagation characteristics of sound speed in the layered medium, this paper proposes a sound ray tracing method based on quadratic polynomial fitting. Using linear interpolation method encrypts the sound speed profile reasonably. The sound speed profile is stratified by equal depth, and the gradient of sound speed in each layer is set to be constantly changing. Quadratic polynomial method is used to fit the sound speed, and the complete mathematical model is established based on the principle of kinematics. The simulation results show that the distribution of modified underwater target has obvious convergence. The method in the paper is superior to the equal gradient sound ray tracing method and equivalent sound speed profile method, thus significantly improves the positioning accuracy of the ultra-short baseline underwater acoustic positioning system.

Keywords: ultra-short baseline underwater acoustic positioning system; sound ray bending error; sound ray tracing method; quadratic polynomial fitting

在复杂的海洋环境里, 海洋的不均匀性和多变性导致水中传播声线不再是一条直线, 声线往声速

小的方向弯曲^[1-3], 且弯曲程度与声速变化率呈正相关。对于水声定位系统^[4-6], 声线弯曲会造成声

收稿日期: 2022-03-11; 修订日期: 2022-05-18

基金项目: 国家自然科学基金 (11704225)

作者简介: 罗宇 (1974—), 博士, 教授, 主要从事海洋测绘、海洋声学、信息与信号处理等研究, 电子邮箱: luoyu@sdust.edu.cn

通信作者: 施剑, 博士, 副教授, 电子邮箱: shijian@sdust.edu.cn

波在发射、接收换能器之间的实际传播时延大于直线传播时延, 水声测距得到的是声线的实际传播距离, 而非声学发射换能器与接收换能器间的直线传播距离。因此, 声线弯曲会使超短基线水声定位结果发生偏移, 降低定位精度, 严重时还会出现野值点, 必须进行声线修正。

目前声线修正方法大都是基于射线声学理论提出的: 等效声速剖面法^[7-8]、查表法^[9]、有效声速法^[10]以及声线跟踪法^[11-12]等。辛明真等提出了一种等效声速的迭代计算方法^[13], 孙大军等提出了一种基于有效声速表的声速修正算法^[14], 冯国军等提出了一种基于最小方差的声线跟踪自适应分层算法^[15]。在声速剖面已知的情况下, 声线跟踪法是修正声线弯曲误差最有效的方法, 是水下目标定位的重要基础, 尤以等梯度声线跟踪算法^[16-17]应用最为广泛。随着水下定位技术水平的提高, 对声线跟踪法的定位精度和计算效率提出了更高的要求。因此, 研究声线弯曲对超短基线 (Ultra-Short Baseline, USBL) 水声定位系统产生的影响以及如何修正此种影响对提高 USBL 定位精度有重要的意义。

针对以上问题, 本文基于二次多项式拟合法改进了等梯度声线跟踪算法, 用二次多项式拟合声速, 采用数值积分累加的方法完成 USBL 声线弯曲误差修正, 并通过圆概率误差分析法对比分析了该算法的定位精度、稳定性和可靠性。

1 超短基线水声定位系统定位原理

USBL 系统工作时, 换能器基阵和应答器分别安装在测量船和水下目标上, 由发射换能器发出声信号, 水下应答器接收到信号后回发一个不同频率的声信号, 再由换能器接收基阵接收, 测量并计算出 x 、 y 方向相邻阵元接收信号的相位差^[18], 并根据声信号传播时延计算出水下应答器到换能器基阵的距离 R , 计算得到水下目标在基阵坐标系下的位置, 最后进行坐标变换, 求解得到水下目标的地理位置, 从而完成超短基线水声定位, 定位原理如图 1 所示, 取“北东地”直角坐标系分别为 x 轴、 y 轴和 z 轴。

图 1 中, 1、2、3 为基元, 各方向上基元间距均为 d , 水下目标位于 S 处, 其坐标为 (X, Y, Z) , S' 是水下目标在平面上的投影, h 为目标深度。根

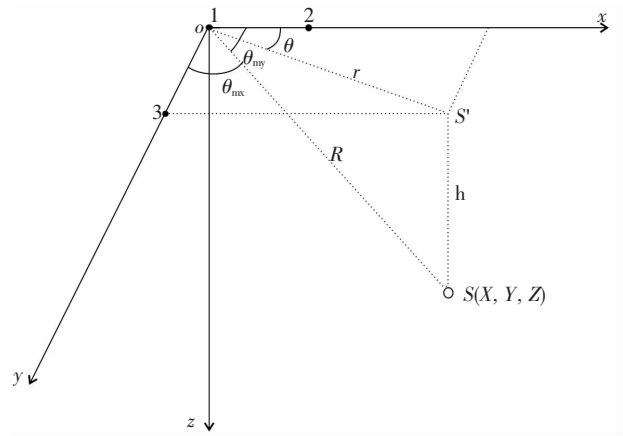


图 1 超短基线水声定位原理图

据几何关系可得:

$$\cos \theta_{mx} = \frac{X}{R} \quad (1)$$

$$\cos \theta_{my} = \frac{Y}{R} \quad (2)$$

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (3)$$

式中: θ_{mx} 和 θ_{my} 分别为水下应答器到换能器基阵的传播声线与 x 轴和 y 轴的夹角; R 为水下目标与换能器基阵之间的斜距。

由于基阵的尺寸很小, 在平面波近似下, 有:

$$\varphi = \frac{2\pi d \cos \theta_{mx}}{\lambda} \quad (4)$$

$$\psi = \frac{2\pi d \cos \theta_{my}}{\lambda} \quad (5)$$

式中: φ 为 x 轴相邻阵元接收信号的相位差; ψ 为 y 轴相邻阵元接收信号的相位差; λ 为波长。

根据公式 (4) 和 (5) 可获得相位差与水下目标坐标之间的关系, 从而求解得到水下目标在换能器基阵坐标系下的位置。

$$X = \frac{\lambda \varphi R}{2\pi d} \quad (6)$$

$$Y = \frac{\lambda \psi R}{2\pi d} \quad (7)$$

$$Z = \sqrt{R^2 - X^2 - Y^2} \quad (8)$$

2 基于二次多项式拟合的声线跟踪算法

2.1 算法原理

海水声速沿深度方向存在显著变化, 且有水平分层现象, 导致海水中声线传播路径发生弯曲^[19-20]。

为了避免产生较大的测量误差,采用分层介质模型模拟水下声速分布来精确逼近声波的实际声线轨迹。在声速剖面上将目标深度按一定规律或方法进行合理分层,每层近似视为由声速梯度构成且不断变化,用二次多项式拟合声速,采用数值积分的方法计算每层声线的传播时间和水平距离,最后累加获得声线总的传播时间和水平距离。如图 2 所示,认为海水介质中声速仅是海水深度的函数,深度 z 处的声线掠射角为 α 。

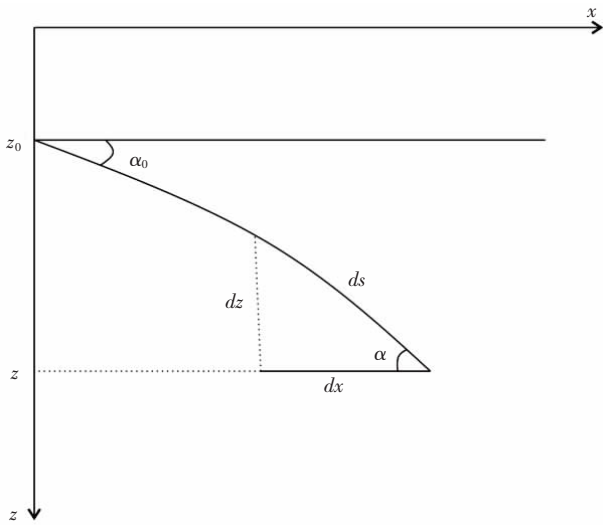


图 2 声线轨迹水平距离和时间计算示意图

根据射线声学理论,层中声速梯度可表示为:

$$g(z) = g_0 + r \cdot \Delta z \quad (9)$$

式中: g_0 为初始声速梯度; r 为声速梯度变化率。

因此,根据运动学原理,层中声速可表示为:

$$c(z) = c_0 + g_0 \cdot \Delta z + \frac{1}{2} r \cdot \Delta z^2 \quad (10)$$

式中: c_0 为初始速度,如图 2 所示,在该处截取足够小的声线微元 ds ,应用 Snell 折射定律,得到声线轨迹的微分方程为:

$$dx = \frac{dz}{\tan \alpha} = \frac{\cos \alpha_0}{\sqrt{n^2(z) - \cos^2 \alpha_0}} dz \quad (11)$$

式中: 定义 $n(z) = \frac{c_0}{c(z)}$; α_0 为初始掠射角。

对上式进行积分,得到层内声线轨迹的水平距离:

$$x = \int_{z_0}^z \cos \alpha_0 \frac{c(z)}{\sqrt{c_0^2 - \cos^2 \alpha_0 \cdot c^2(z)}} dz \quad (12)$$

式中: z_0 为初始深度,声线经过该微元 ds 距离所需的时间为 $dt = ds/c$ 。因声速随深度的变化而发生变化,故层内声线传播时间为:

$$t = \int \frac{ds}{c} \quad (13)$$

当声线微元 ds 足够小时:

$$ds = \frac{dz}{\sin \alpha} \quad (14)$$

由此,可得层内声线传播时间为:

$$t = \int_{z_0}^z \frac{dz}{c(z) \cdot \sin \alpha} \quad (15)$$

根据 Snell 折射定律可得:

$$c(z) \cdot \sin \alpha(z) = \frac{c_0}{n^2(z)} \sqrt{n^2(z) - \cos^2 \alpha_0} \quad (16)$$

将公式 (16) 代入 (15) 得:

$$t = \frac{1}{c_0} \int_{z_0}^z \frac{n^2(z)}{\sqrt{n^2(z) - \cos^2 \alpha_0}} dz \quad (17)$$

2.2 计算步骤

基于二次多项式拟合的声线跟踪算法计算步骤具体如下:

步骤一: 对已知声速剖面进行三次样条插值,增加数据密度以满足实际作业需求;

步骤二: 对声速剖面进行等深度分层,将 5 m 归为一层,也可以采用 D-P (douglas-peucker) 算法^[21]、最大偏移量 (maximum offset of sound velocity, MOV) 法^[22]、自适应分层法^[23]以及垂直距离简化法 (Perpendicular Distance) 等方法进行分层;

步骤三: 利用非线性回归函数求解每层初始声速梯度 g_0 和声速梯度变化率 r ,根据公式 (9) 求解声速梯度 g ; 根据公式 (10) 求解声速 c ,同时比对原始声速剖面验证方法的拟合效果;

步骤四: 采用数值积分法求解修正后的声线水平距离 x_c 、传播时间 t_c 以及应答器与基阵中心之间的距离 R_c ;

步骤五: 根据声线修正后的传播时延与系统信号处理设备估计得到的测量时延,计算它们之间的差值,并判别时延差值是否满足预先设定的逼近度要求,决定是否追加水层;

步骤六: 根据超短基线定位原理,求解修正后应答器在基阵坐标系下的坐标 X_{Jc} ;

步骤七: 根据坐标转换关系,求解声线修正后水下应答器的地理坐标。

$$\begin{bmatrix} X_D \\ Y_D \\ Z_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix} + R_U^T \begin{bmatrix} X_{Jc} \\ Y_{Jc} \\ Z_{Jc} \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中： X_c 为测量船地理坐标，由高精度全球导航卫星系统（global navigation satellite system, GNSS）测量得到； R_c^T 为地理坐标系向船坐标系转换的旋转矩阵，由测量船姿态组成。

3 结果与分析

本文采用数值仿真的手段，仿真设定水下应答器真实地理坐标 X_D 为 (240 059 m, 3 987 744 m, 500 m)；设定测量船航行轨迹为对称的圆形，圆心坐标 X_0 设为 (240 059 m, 398 774 4 m, 10 m)，半径 R_0 设为 400 m。为了更逼近真实复杂的水下作业环境，在仿真过程中加入了方差为 5 的高斯白噪声，仿真结果如图 3 所示。

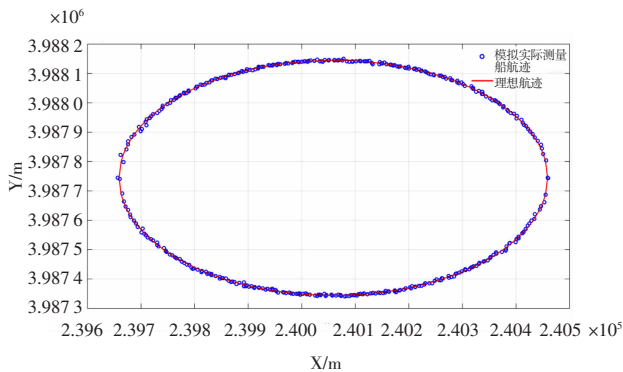


图 3 测量船模拟轨迹示意图

仿真采用的声速剖面数据资料来自中国 Argo 实时资料中心^[24]，采用 Chen Millero 声速经验公式计算得到实测声速剖面^[25]。通过绘制等梯度声速剖面、基于二次多项式拟合的声速剖面和实测的声速剖面，验证了本文所提算法的拟合效果更佳，如图 4 所示。

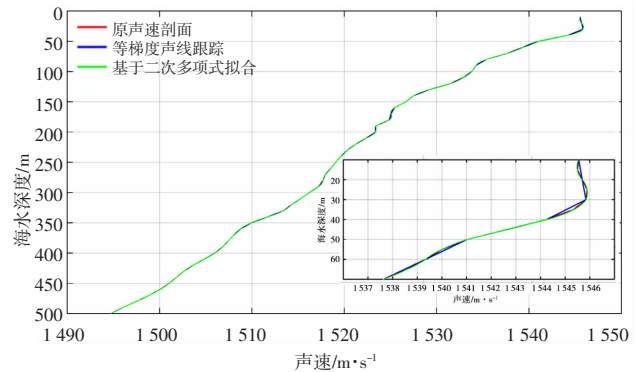


图 4 声速剖面

根据上述方案，通过与等梯度声线跟踪算法和等效声速剖面法比较，仿真验证了本文所提算法的定位精度、稳定性和可靠性。超短基线水声定位结果如图 5 所示。

通过定位结果对比发现：声线修正前水下应答器定位分布比较分散，定位散点呈现明显的航迹图形；等梯度声线跟踪算法和等效声速剖面法修正后分布较校准前密集，深度定位明显改善；基于二次

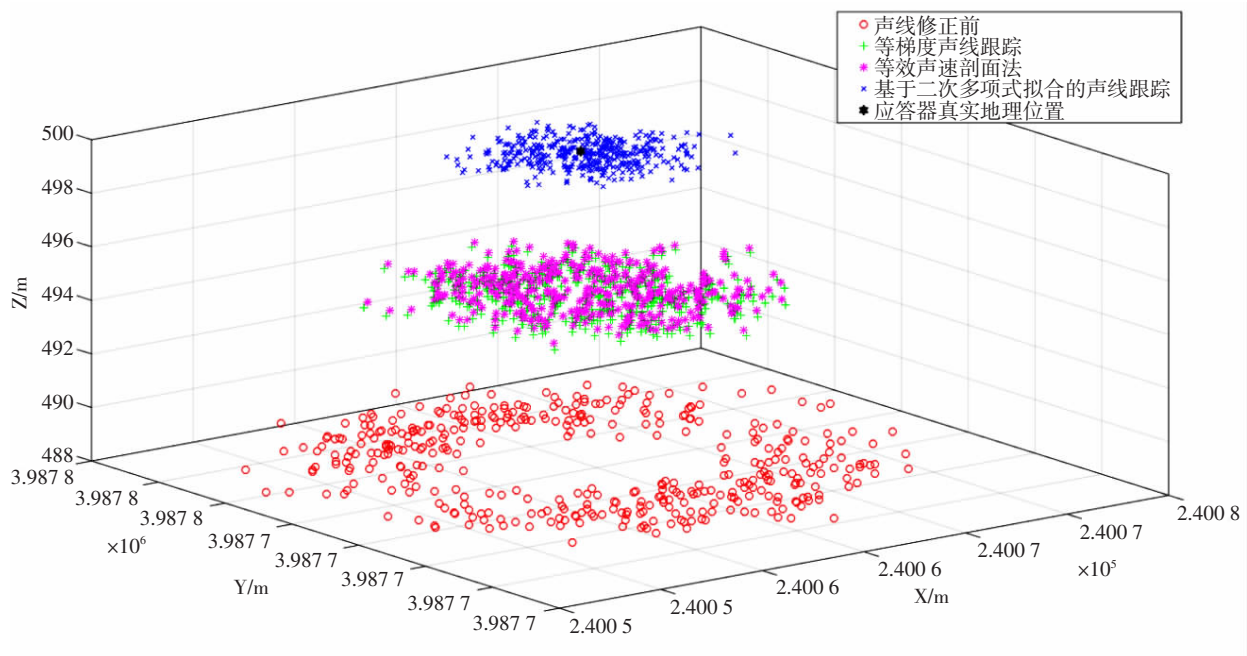


图 5 超短基线水声定位结果图

(注：由于小数点后保留有效数字位数原因，部分数值显示不完全)

多项式拟合的声线跟踪算法修正后密集效果更加明显,较修正前有显著的收敛性。为了更清楚地显示声线修正前后水平定位效果对比,绘制了定位结果偏差散点图,如图6所示。

对比定位结果偏差散点图发现,声线修正前 X 方向最大偏差达 13.457 6 m, Y 方向最大偏差达 15.542 2 m; 等梯度声线跟踪算法修正后 X 方向最大偏差达 9.489 7 m, Y 方向最大偏差达 10.602 4 m; 等效声速剖面法修正后 X 方向最大偏差达 9.374 8 m, Y 方向最大偏差达 10.439 6 m; 基于二次多项式拟合的声线跟踪算法修正后 X 方向最大偏差达 6.519 5 m, Y 方向最大偏差达 6.393 8 m, 水平位置

偏差集中在零点附近,说明该算法修正后应答器的水平位置误差最小,定位性能最稳定。采用圆概率误差分析法对仿真数据进行统计分析,结果如表1所示。

由表1可知,声线修正后圆概率误差半径比修正前明显减小,以最小的范围覆盖最多的定位点数,证明声线修正方法效果良好且有效,对提高超短基线水声定位精度有重要作用。采用精度评定方法对定位结果作进一步研究分析,精度评定结果如表2所示。

由表2可知,标准差反映一个数据集的离散程度;均方根误差反映定位数据偏离真实值的程度,

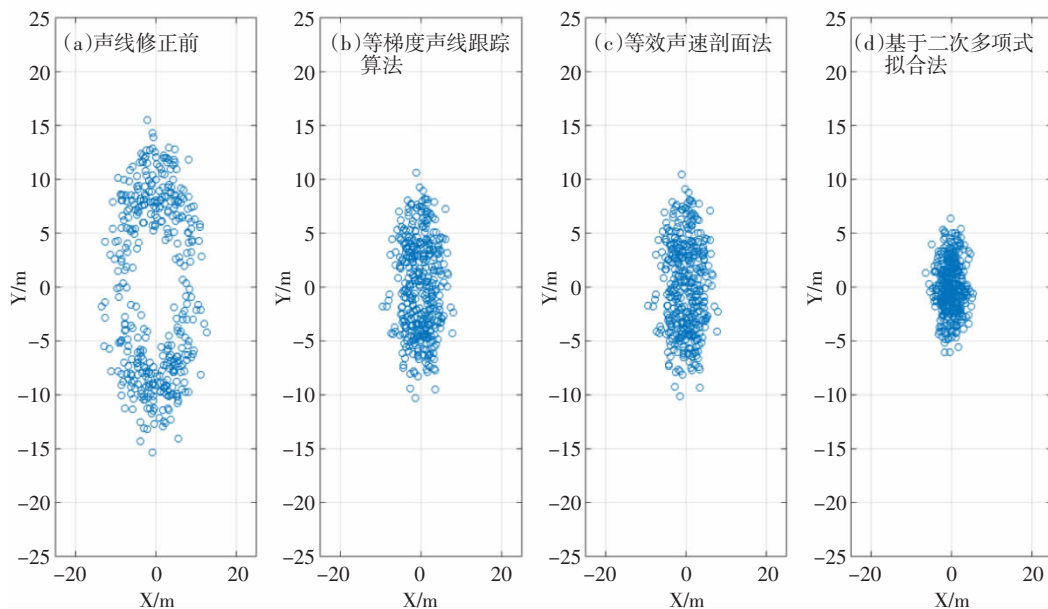


图6 定位结果偏差散点图

表1 圆概率误差统计分析

圆概率误差半径	偏离圆心概率 50%(CEP)/m	偏离圆心概率 95%(CEP ₉₅)/m	偏离圆心概率 99%(CEP ₉₉)/m
声线修正前	8.142 1	16.964 2	21.042 2
等梯度声线跟踪算法	4.417 4	9.203 7	11.416 2
等效声速剖面法	4.307 8	8.975 4	11.133 0
基于二次多项式拟合的声线跟踪算法	2.603 8	5.425 1	6.729 2

表2 定位精度评定

研究方法	标准差		均方根	深度平均相对误差
	Std _x /m	Std _y /m	RMS/m	MRE _z
声线修正前	5.741 0	8.082 5	9.913 9	23.146 9‰
等梯度声线跟踪算法	3.182 4	4.317 4	5.363 5	10.768 3‰
等效声速剖面法	3.109 3	4.204 4	5.229 3	10.360 3‰
基于二次多项式拟合的声线跟踪算法	2.058 2	2.362 5	3.133 3	0.222 1‰

值越小,表示测量精度越高;相对误差反映测量的可信程度。基于二次多项式拟合的声线跟踪算法的标准差、均方根误差以及平均相对误差最小,证明相较于等梯度声线跟踪算法和等效声速剖面法,该算法定位精度更高。

4 结论

本文针对声线在复杂海洋环境中曲线传播的难题,提出了一种基于二次多项式拟合的超短基线声线修正算法,采用数值仿真的手段,并通过与等梯度声线跟踪算法和等效声速剖面法比较,得出以下结论:

(1) 随着声速剖面的时序变化,超短基线定位解算的水深方向坐标变化明显大于水平方向坐标变化,仿真结果证实了声线弯曲误差主要影响超短基线水声定位系统测距的精度,尤其对深度定位影响最为显著。

(2) 对比等梯度声线跟踪算法和等效声速剖面法,本文所提算法更好地拟合了声速剖面,保留了更多的信息量,保证了更高的定位精度,可推广应用于同类水声定位系统,具有重要的工程应用价值、实用性和通用性。

(3) 本文只研究了声速的垂直变化规律,在空间尺度上,海水中任一点声速的时空变化对水下目标定位的影响还有待后续深入研究,基于射线声学理论的声线修正方法还有待进一步提高。

参 考 文 献

- [1] 曹震卿,张永刚,李庆红,等.基于 WOA13 数据的北大西洋声传播分析[J]. 海洋通报,2018,37(5):554-564.
- [2] 刘慧敏,王振杰,吴绍玉,等.顾及声线弯曲的浅海多目标水声定位算法[J]. 石油地球物理勘探,2019,54(1):9-15.
- [3] 龚浩亮,陈波,万莉莉,等.一种二分迭代实时声线修正算法[J]. 声学技术,2018,37(4):303-308.
- [4] 杨元喜,徐天河,薛树强.我国海洋大地测量基准与海洋导航技术研究进展与展望[J]. 测绘学报,2017,46(1):1-8.
- [5] 孙大军,郑翠娥,张居成,等.水声定位导航技术的发展与展望[J]. 中国科学院院刊,2019,34(3):331-338.
- [6] YANG Y X, XU T H, XUE S Q. Progresses and prospects of marine geodetic datum and marine navigation in China[J]. Journal of Geodesy and Geoinformation Science, 2018, 1(1): 16-24.
- [7] 辛明真,阳凡林,闫循鹏,等.一种等效声速梯度的迭代计算方法[J]. 海洋测绘,2015,35(5):28-31.
- [8] ZHANG K, LI Y, ZHAO J H, et al. Underwater navigation based on real-time simultaneous sound speed profile correction[J]. Marine Geodesy, 2016, 39(1): 98-111.
- [9] 梁民赞,余毅,王黎明,等.一种声线修正的查表方法[J]. 声学技术,2009,28(4):556-559.
- [10] WANG J J, LIN T, FU J. Analysis of effective sound velocity spatial characteristic of typical MUNK deep sea channel [C]//2018 IEEE 8th International Conference on Underwater System Technology: Theory and Application, Wuhan, China: IEEE, 2018: 1-6.
- [11] 王振杰,李圣雪,聂志喜,等.水声定位中一种大入射角声线跟踪方法[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2016,41(10):1404-1408.
- [12] LI J, GU Q, CHEN Y, et al. A combined ray tracing method for improving the precision of the USBL positioning system in smart ocean[J]. Sensors, 2018, 18(10): 3586-3594.
- [13] XIN M, YANG F L, WANG F, et al. A TOA/AOA underwater acoustic positioning system based on the equivalent sound speed[J]. The Journal of Navigation, 2018, 71(6): 1431-1440.
- [14] SUN D J, LI H, ZHENG C E, et al. Sound velocity correction based on effective sound velocity for underwater acoustic positioning systems[J]. Applied Acoustics, 2019, 151(8): 55-62.
- [15] 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.
- [16] 陆秀平,边少锋,黄漠涛,等.常梯度声线跟踪中平均声速的改进算法[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2012,37(5):590-593.
- [17] 辛明真,阳凡林,薛树强,等.顾及波束入射角的常梯度声线跟踪水下定位算法[J]. 测绘学报,2020,49(12):30-37.
- [18] 李海鹏,韩云峰,郑翠娥.声速修正技术在高精度水下定位系统中的应用[J]. 导航定位学报,2020,8(3):47-52.
- [19] 马越原,许扬胤.关于水下定位中声线改正问题的探讨[C]//第十一届中国卫星导航年会论文集,2020:169-174.
- [20] 王薪普,薛树强,曲国庆,等.水下定位声线扰动分析与分段指数权函数设计[J]. 测绘学报,2021,50(7):982-989.
- [21] 刘宁,徐天河.基于自适应分层的声线跟踪改进算法[C]//中国卫星导航年会,2019:74-78.
- [22] 赵获能,吴自银,周洁琼,等.声速剖面精简运算的改进 D-P 算法及其评估[J]. 测绘学报,2014,43(7):681-689.
- [23] 郑根,张红梅,冯磊,等.基于面积差的声速剖面自适应简化方法[J]. 测绘学报,2018,47(10):1415-1423.
- [24] 吴森森,曹敏杰,杜震洪,等.全球 Argo 资料共享与服务平台设计与实现[J]. 海洋通报,2018,37(3):287-295.
- [25] ZHANG B, XU T, GAO R. Research on acoustic velocity correction algorithm in underwater acoustic positioning [C]// China Satellite Navigation Conference, Springer, Singapore, 2018: 10.

(本文编辑:王少朋)