

doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2019.03.003

海洋声速起伏对声传播及定位精度影响分析

张志伟^{1,2}, 孙 翱¹, 张 旭¹

(1. 解放军 91550 部队 43 分队, 辽宁 大连 116023; 2. 解放军 92493 部队博士后科研
工作站, 辽宁 大连 116023)

摘 要:海洋中声速起伏导致水声信道发生变化,进而引起声线到达结构的变化,对水声传播及定位精度产生一定影响。为讨论这一效应,基于 TDOA 体制建立了考虑声线弯曲的水下目标无源定位模型,分析了声速起伏对水下声传播路径及传播时间的影响,进而研究了声速起伏对水下无源定位测量精度影响程度。结果表明:当水平传播距离较大时,声速剖面起伏对声传播路径及传播时间的影响更为显著;以典型四元阵为例,若基线长度为 20 km,接收阵位于水下 5 km 处,在不考虑其它随机误差影响下,海洋声速起伏造成的声源定位误差量级在 0.5 m 以内。分析结果有助于更好地利用环境特征优化无源定位测量方案,可为高精度水下无源定位系统设计及精度评估提供依据。

关键词:声速起伏;本征声线;无源定位;传播时间;精度分析

中图分类号:P229.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-2029(2019)03-0015-06

由于声波在海水中具有良好的传播特性,通常可利用水声信号实现对声源目标的准确探测与定位^[1]。水下无源定位技术无需发射信号即可利用水声信号确定目标位置,在军事领域应用广泛,现已成为各国技术人员研究的重点。目前常用的水声无源定位方法主要包括多基站交会定位、球面内插法、目标运动分析方法(TMA)和匹配场处理技术(MFP)等^[2-6]。利用多个基站进行交会测量,通常采用纯方位(bearings-only, BO)交会定位、信号到达时间(time of arrival, TOA)或到达时间差(time difference of arrival, TDOA)定位^[7-8]。随着深海测量范围的增加,方位交会因误差随距离增大较快变得不适用;TOA 定位体制需声源与阵元之间严格的时间同步,被广泛应用于合作目标的定位中,但在无源定位中是不可行的,而 TDOA 定位体制主要是通过测量待测声源到各阵元之间传播时间差而实现定位,仅需要各阵元之间的时间同步,特别对于实时声信号有较快、较强的处理能力且定位精度较高。因此,基于

TDOA 体制多站时差定位方法更加适用于水下无源定位测量。在该测量体制下,影响定位测量精度的因素众多,主要包括站址误差、时延测量误差、声速起伏误差、基站构型等^[9-10]。其中海洋声速起伏主要为受内波、锋面和涡旋等现象引起局地海区的海洋环境变化,在海洋中是一种比较常见的现象^[11]。声速起伏对声传播路径及传播时间产生影响,进而对水声定位精度产生一定影响,而目前关于声速起伏对定位精度的影响程度缺乏认识。

针对上述问题,本文拟基于 TDOA 体制建立水下无源定位模型,采用 WOA09 气候态数据集和 Argo 数据分析声速起伏对水下声传播路径及传播时间的影响,并进一步分析声速起伏对水下无源定位精度的影响。

1 建立定位模型及算法

基于 TDOA 体制的多站时差定位方法本质上

收稿日期:2019-01-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61701504)

作者简介:张志伟(1987-),男,博士研究生,工程师,主要从事水下测量技术研究。E-mail:15566832778@163.com

是利用一组双曲线交会的方法确定声源位置,即利用每一组时延差测量值确定一条双曲线,最后由多组双曲线相交确定待测声源位置。图 1 为基于 TDOA 体制的无源定位示意图,其中,黑色圆点为多个接收基阵,红色三角形符号表示双曲线交会的声源位置。

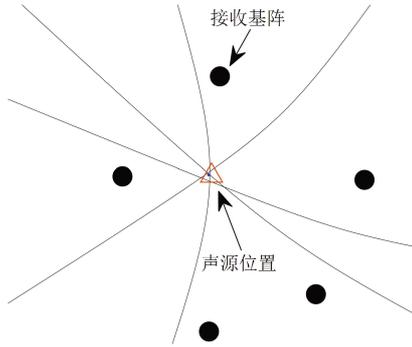


图 1 基于 TDOA 体制的无源定位示意图

Fig.1 Schematic diagram of passive localization based on TDOA

Taylor 级数展开算法是一种递归算法,可用来求解 TDOA 非线性方程,在每一次递归中通过求解 TDOA 测量误差的局部最小二乘(LS)解来改善估计位置^[2]。在传统的无源定位模型中,往往将声速看成一常数,而在实际海洋中,声速会随温度、盐度、压力等发生变化,具有分层的特性。为此,本文在 Taylor 级数展开算法的基础上,拟建立考虑声线弯曲的水下无源定位模型及算法,具体如下:

在某测量海域一定范围内布设 n ($n \geq 3$) 个接收基站,以测量海区中心为坐标原点,建立站心大地坐标系, Y 轴正半轴指向正北, X 轴正半轴指向正东, Z 轴正半轴垂直于 OXY 平面向上为正,与 X 轴、 Y 轴构成右手坐标系。设 n 个接收基站位置坐标 X_i 已知, $X_i=(x_i, y_i, z_i)^T$ ($i=1, 2, \dots, n$),声源位置 $X=(x, y, z)^T$,则声源至各基站距离为:

$$R_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} \quad (1)$$

式中: x, y, z 分别为声源横坐标、纵坐标及水深。将式(1)进行线性化处理,即在待测点附近选取某一初始位置 $X^0=(x_0, y_0, z_0)^T$ 进行泰勒级数展开,忽略二阶及以上分量只保留前两项,利用该值模拟高斯-马尔柯夫(Gauss-Markoff)定理。

$$R_i \approx R_i^0 + \frac{x_0-x_i}{R_i} (x-x_0) + \frac{y_0-y_i}{R_i} (y-y_0) + \frac{z_0-z_i}{R_i} (z-z_0) \quad (2)$$

若已知声信号至各基站时间测量值为 T_i , 设等效声速为 \bar{C}_i , 则:

$$T_i = R_i / \bar{C}_i \quad (3)$$

将式(2)代入式(3),可得:

$$T_i = \frac{R_i^0}{\bar{C}_i} + \frac{x_0-x_i}{R_i \bar{C}_i} (x-x_0) + \frac{y_0-y_i}{R_i \bar{C}_i} (y-y_0) + \frac{z_0-z_i}{R_i \bar{C}_i} (z-z_0) \quad (4)$$

设 T_i^0 为初始位置至各基站到达时延, $T_i^0 = R_i^0 / \bar{C}_i$, 由式(4)可得时延差为:

$$T_i - T_j = T_i^0 - T_j^0 + \left(\frac{x_0-x_i}{R_i \bar{C}_i} - \frac{x_0-x_j}{R_j \bar{C}_j} \right) (x-x_0) + \dots$$

$$\left(\frac{y_0-y_i}{R_i \bar{C}_i} - \frac{y_0-y_j}{R_j \bar{C}_j} \right) (y-y_0) + \left(\frac{z_0-z_i}{R_i \bar{C}_i} - \frac{z_0-z_j}{R_j \bar{C}_j} \right) (z-z_0) \quad (5)$$

上式可进一步改写成如下形式:

$$\Delta T = B \Delta X \quad (6)$$

式中: T_1 为声信号由声源至参考基站的传播时延。

$$\Delta T = \begin{bmatrix} (T_2 - T_1) - (T_2^0 - T_1^0) \\ (T_3 - T_1) - (T_3^0 - T_1^0) \\ \vdots \\ (T_n - T_1) - (T_n^0 - T_1^0) \end{bmatrix}, \Delta X = \begin{bmatrix} (x-x_0) \\ (y-y_0) \\ (z-z_0) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$B =$

$$\begin{bmatrix} \frac{x_0-x_2}{R_2 \bar{C}_2} - \frac{x_0-x_1}{R_1 \bar{C}_1} & \frac{y_0-y_2}{R_2 \bar{C}_2} - \frac{y_0-y_1}{R_1 \bar{C}_1} & \frac{z_0-z_2}{R_2 \bar{C}_2} - \frac{z_0-z_1}{R_1 \bar{C}_1} \\ \frac{x_0-x_3}{R_3 \bar{C}_3} - \frac{x_0-x_1}{R_1 \bar{C}_1} & \frac{y_0-y_3}{R_3 \bar{C}_3} - \frac{y_0-y_1}{R_1 \bar{C}_1} & \frac{z_0-z_3}{R_3 \bar{C}_3} - \frac{z_0-z_1}{R_1 \bar{C}_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_0-x_n}{R_n \bar{C}_n} - \frac{x_0-x_1}{R_1 \bar{C}_1} & \frac{y_0-y_n}{R_n \bar{C}_n} - \frac{y_0-y_1}{R_1 \bar{C}_1} & \frac{z_0-z_n}{R_n \bar{C}_n} - \frac{z_0-z_1}{R_1 \bar{C}_1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

由最小二乘原理可得^[13]:

$$\Delta X = (B^T B)^{-1} B^T \Delta T \quad (9)$$

$$\hat{X} = X^0 + \Delta X \quad (10)$$

为保证计算精度,需进行多次迭代,每次迭代后令 $X^0 = \hat{X}$, 当 $\|\hat{X} - X^0\| \leq \varepsilon$ (设门限 ε 为一小正数) 时,迭代停止,此时 X 即为待测点最终位置。

在上述算法中,初始位置的选择会影响 Taylor 迭代算法精度,Chan 氏算法是求解 TDOA 方程的一种常用算法,该方法不需要初始值,计算量小,但算法整体适用环境比较受限,一般与其他算法协同定位,故可先由 Chan 氏算法求解 TDOA 方程,作为 Taylor 算法的初始值^[14-15]。此外,由于每次迭代过程

中初始位置 X^0 发生变化, 导致声线传播时间 T_i^0 发生变化, 其值可采用声速剖面分层方式计算得到, 而等效声速 $\bar{C}_i^0 = R_i^0 / T_i^0$, 故 \bar{C}_i^0 也发生变化, 由于初始位置与真实位置距离远小于到各接收基站的距离, 所以 $\bar{C}_i^0 \approx \bar{C}_i$, 因此在每次迭代过程中要考虑声线弯曲效应的影响, 理论上不应简单地将声速设为常数。

2 声速起伏对声线传播的影响

2.1 声速起伏对声传播路径的影响

选择某一实验海域, 采用 WOA 全球气候态海洋学数据集(可提供 $1^\circ \times 1^\circ$ 的剖面数据)和 Argo 剖面浮标数据, 根据 Mackenzie 声速经验公式计算该海域声速剖面 (SVP)^[16]。设位于该海域中心处的 WOA 剖面为参考声剖, 提取此海区历年同月份 Argo 剖面(共 100 组)作为波动声速环境的数据源, 如图 2(a)所示(红线为参考声剖, 蓝线为波动声速剖面)。

假设接收基阵水深 5 000 m, 距离声源的水平距离为 20 000 m, 若以 WOA 参考声剖作为声速环境输入, 可求得直达本征声线, 其入射角为 79.18° ; 若 Argo 声速剖面序列也以该入射角, 则声线传播路径如图 2(b)所示。在不同声速环境下, 声源到位于不同水平距离水听器的直达本征声线传播路径如图 2(c)所示。当声传播水平距离不同时, 直达本征声线入射角随声剖变化情况如图 3 及表 1 所示。

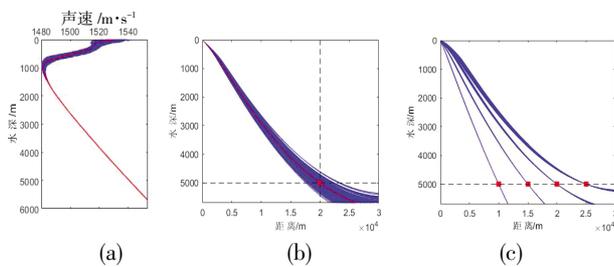


图 2 声速剖面及声线传播路径

Fig.2 The sound velocity profile and the sound propagation path

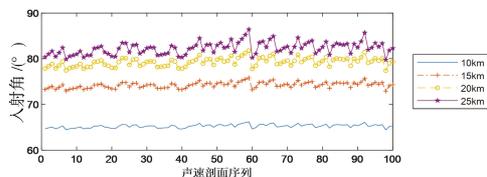


图 3 不同水平距离直达本征声线入射角随声剖变化情况

Fig.3 Incidence angle of eigenrays varying with SVP on different horizontal distance

表 1 不同水平距离直达本征声线入射角随声剖变化情况统计

Tab.1 Statistics of incidence angle of eigenrays varying with SVP on different horizontal distance

水平距离/m	10 000	15 000	20 000	25 000
平均值/(°)	65.26	74.21	79.26	82.28
标准差/(°)	0.39	0.63	0.94	1.35

由图 2~图 3 及表 1 可以看出, 在相同入射角情况下, 当声速剖面出现起伏时, 声源到接收基阵间的声传播路径发生了变化, 且随着水平传播距离的增加, 声传播路径变化显著。直达本征声线入射角随水平传播距离增大而增大, 且入射角标准差也随之增大, 进一步说明了声速剖面起伏对声传播路径的影响, 尤其在水平传播距离较大时, 影响更为显著。

2.2 声速起伏对声传播时间的影响

当声源位置为(0 m, 0 m, 0 m), 接收器处于不同位置时, 在不同声速环境下由声源到接收阵直达本征声线的传播时间随声速剖面序列变化情况如图 4 所示, 图中黑色虚线为参考声剖直达本征声线传播时间。表 2 为水深 5 000 m 的接收阵位于不同水平距离时直达本征声线传播时间统计情况。由图 4 及表 2 可以看出, 沿直达本征声线传播时间标准

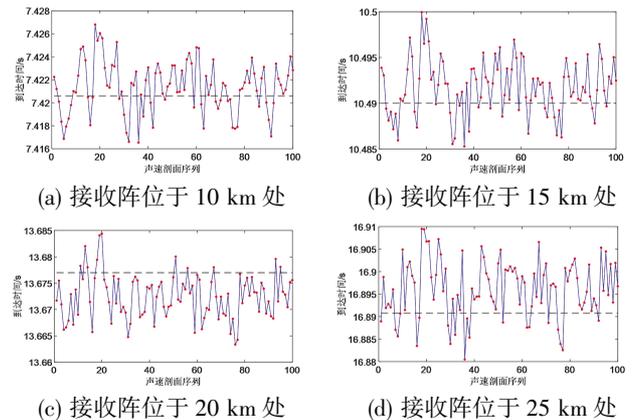


图 4 不同声速环境下声传播时间随声速剖面序列变化

Fig.4 The sound propagation time varying with orders of SVP under different sound velocity environment

表 2 接收阵位于不同水平距离时直达本征声线传播时间统计

Tab.2 Statistics of eigenrays propagation time when the receiving array is in different horizontal distance

水平距离/m	参考声剖/s	Mean/s	Std/s	Max/s	Min/s
10 000	7.420 6	7.421 4	0.002 2	7.426 8	7.416 5
15 000	10.490 0	10.491 7	0.003 0	10.500 0	10.485 3
20 000	13.677 0	13.672 5	0.004 3	13.684 4	13.663 3
25 000	16.890 8	16.896 1	0.006 5	16.909 5	16.880 5

差随距离增大而增大,当水平距离越小时,对传播时间影响越小。

3 声速起伏对声源定位的影响

通过前文分析可知,海洋声速起伏对声传播时间和传播路径产生一定影响,进而影响声源定位精度。下面将结合前文建立的无源定位模型,通过仿真分析声速起伏对声源定位精度产生的影响,具体步骤如下:

(1) 在实验海域选取典型四基站布设方式,基线长度为 20 km,各接收基站位于水下 5 km 处,基站坐标分别设为 (10 000 m, 10 000 m, 5 000 m), (-10 000 m, -10 000 m, 5 000 m), (10 000 m, -10 000 m, 5 000 m), (-10 000 m, 10 000 m, 5 000 m);

(2) 在不考虑其他误差源的情况下,提取波动声速环境的数据源 Argo 剖面(共 100 组),如图 1(a)所示。根据基站坐标和设定的声源位置,利用声速剖面分层方式,求得观测量时延差;

(3) 设定声源初始位置为(100 m, 100 m, 0 m),初始时延差可由声源初始位置、接收基站坐标结合声速剖面得到。按式(9)~式(10)进行迭代计算,得到 100 组不同声速剖面下的声源位置;

(4) 对上述定位结果进行统计,观察声速起伏对定位精度的影响。

图 5 为声源处于不同位置时声速起伏对声源定位精度的影响,表 3 为声速起伏对声源定位精度影响结果统计情况。可以看出,在不考虑其它随机

误差影响下,声速起伏造成的声源定位误差量级在 0.5 m 以内,且声源处于不同位置时,声速起伏对定位精度影响不同。在实验海域中心位置附近时,声速起伏对定位精度的影响较小。

表 3 声速起伏对声源定位影响结果统计

Tab.3 Statistical results of sound velocity fluctuation influencing on positioning precision

声源位置/m	X 方向 标准差/m	Y 方向 标准差/m	总位置 误差/m
(0,0,0)	0.117 0	0.163 4	0.201 0
(1 000, 0, 1 000)	0.214 6	0.196 0	0.290 6
(1 000, 0, 2 000)	0.221 1	0.232 1	0.320 6
(2 000, 0, 1 000)	0.235 7	0.173 4	0.292 6

4 结论

本文主要分析了声速起伏对声传播及定位精度的影响。首先基于 TDOA 体制建立了考虑声线效应的水下无源定位模型,其次利用 WOA 气候态数据集及 Argo 剖面数据分析了声速起伏对水下声传播路径及传播时间的影响,最后分析了声速起伏对无源定位精度的影响程度。通过分析,可得出如下结论:当水平传播距离较大时,声速剖面起伏对声传播路径及传播时间的影响更为显著。以典型四基站布局方式为例,在不考虑其它随机误差影响下,声速起伏造成的声源定位误差量级在 0.5 m 以内,且声源处于不同位置时,声速起伏对定位精度影响不同。在实验海域中心位置附近时,声速起伏对定位精度的影响较小。分析结果有助于更好地了解声速环境起伏对定位测量系统影响程度,可为深远海无源定位测量系统优化设计提供参考依据。

论文仅根据一组典型声速剖面数据,给出声传播时延和定位精度的量值结果,存在一定的局限性,下一步将针对不同声速起伏环境进行研究。此外,为研究声速起伏对定位精度的影响,本文暂未考虑其他误差源的影响,下一步将针对声速起伏在多误差源情况下对定位精度的影响情况进行分析。

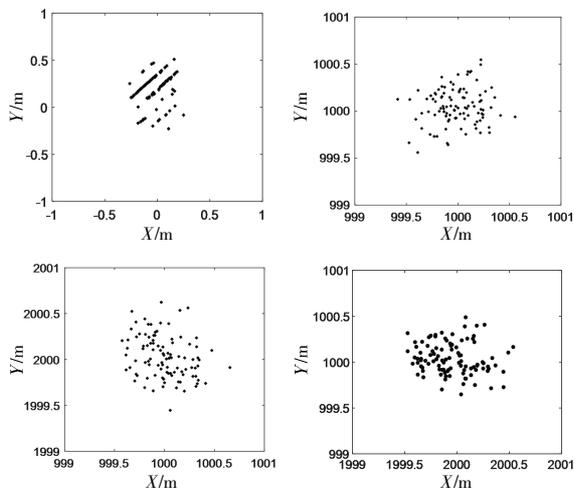


图 5 声源处于不同位置时声速起伏对定位精度的影响

Fig.5 Influence of sound velocity fluctuation on positioning precision when the sound source is in different positions

参考文献:

- [1] 刘伯胜, 雷家煜. 水声学原理(第二版)[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2009.
Liu Bosheng, Lei Jiayu. Principles of hydroacoustics(second edition)[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2009.
- [2] Smith J O, Abel J S. Closed-form least-squares source location estimation from range-difference measurements[J]. IEEE Transactions, Speech, and Signal Processing, 1981, 35(12): 1661-1669.
- [3] Hinich M J, Sullivan E L. Maximum likelihood signal processing for a vertical array[J]. J Acoust Soc Am, 1973, 54: 499-503.
- [4] Bucker H P. Use of calculated sound fields and matched field detection to locate sound sources in shallow water [J]. J Acoust Soc Am, 1976, 59: 368-373.
- [5] Kuperman W A. An overview of beamforming matched-field processing and time reversal techniques [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2016, 139(4) : 2081-2081.
- [6] 王彪, 蒋亚立, 戴跃伟. 基于 IO 范数的匹配场源定位方法[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2017, 53(4): 675-680.
Wang Biao, Jiang Yali, Dai Yuwei. A matched filed source localization method based on sparse structure [J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2017, 53(4): 675-680.
- [7] 刘聪锋. 无源定位与跟踪[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2011.
Liu Congfeng. Passive location and tracking[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2011.
- [8] 焦小涛. 水下目标被动定位系统关键技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2013.
Jiao Xiaotao. Research of key technologies in the underwater target passive location system [D]. Xi'an : Xi'an Technological University, 2013.
- [9] 陈连, 于国栋, 宋永志, 等. 声源定位算法的精度分析[J]. 测绘科学, 2016, 41(5): 21-25.
Chen Lian, Yu Guodong, Song Yongzhi, et al. Precision analysis based on acoustic positioning algorithm [J]. Science of Surveying and Mapping, 2016, 41(5): 21-25.
- [10] 张旭, 韩旭, 辛健. 垂向航行体水下多元阵测量精度仿真算法[J]. 探测与控制学报, 2017, 39(3): 86-90.
Zhang Xu, Han Xu, Xin Jian. Underwater vertical vehicle measuring accuracy simulation based on seabed multielement array[J]. Journal of Detection & Control, 2017, 39(3): 86-90.
- [11] 段睿. 深海环境水声传播及声源定位方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2016.
Duan Rui. Studies on sound propagation and source localization methods in deep water [D]. Xi'an :Northwestern Polytechnical University, 2016.
- [12] W Foy. Position-location solutions by Taylor series estimation[J]. IEEE on Aerospace and Electronic Systems, 1976, 12(3): 187-194.
- [13] 武汉大学测绘学院测量平差学科组. 误差理论与测量平差基础[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2014.
School of Geodesy and Geomatics Survey Adjustment Discipline Group. Error theory and foundation of surveying adjustment[M]. Wuhan: WuHan University Press, 2014.
- [14] Y T Chan, K C Ho. A simple and efficient estimator for hyperbolic location [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(8): 1905-1914.
- [15] 白玲. 基于时间测量的声源定位装置研究与实现[J]. 电脑知识与技术, 2017, 13(20): 215-217.
Bai Ling. Design and implementation of sound location system based on TDOA [J]. Computer Knowledge and Technology, 2017, 13(20): 215-217.
- [16] 张旭, 程琛, 刘艳. 西北太平洋副热带模态水形成区声传播特性分析[J]. 海洋学报, 2014, 36(9): 94-102.
Zhang Xu, Cheng Chen, Liu Yan. Acoustic progation effect caused by subtropical mode water of northwestern Pacific [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 36(9): 94-102.

Analysis on the Influence of Sound Velocity Fluctuation in the Oceans on Acoustic Propagation and Positioning Precision

ZHANG Zhi-wei^{1,2}, SUN Ao¹, ZHANG Xu¹

1. Team 43 in Troop 91550 of the People's Liberation Army, Dalian 116023, Liaoning Province, China;

2. Postdoctoral Scientific Research Station in Troop 92493 of the People's Liberation Army, Dalian 116023, Liaoning Province, China

Abstract: The acoustic velocity fluctuation in the oceans leads to the changes of underwater acoustic channel, which change the arrival structure of soundlines and influence the acoustic propagation and the positioning accuracy. To discuss this effect, the underwater passive location model considering sound ray bending is built based on the TDOA system, the influence of sound velocity fluctuation on underwater sound propagation path and propagation time is analyzed, and besides, the influence of acoustic velocity fluctuation on underwater passive localization accuracy is studied in detail in this paper. The results show that the influence of sound velocity fluctuation on underwater sound propagation path and propagation time is more significant when the horizontal propagation distance is larger. Take the four element array for example, if the length of baseline is 20 km, and the depth of receiving arrays is 5 km, the influence of acoustic velocity fluctuation on positioning precision is less than 0.5 m without considering other random errors. The analysis results are helpful to optimize the passive location measurement scheme with environmental characteristics and provide basis for the design and precision evaluation of the underwater passive positioning system.

Key words: acoustic velocity fluctuation; eigenrays; passive localization; propagation time; precision analysis