

# 一种水下体目标高精度长基线定位方法

孙大军 李宗晏 郑翠娥\*

(哈尔滨工程大学水声技术重点实验室 哈尔滨 150001)

(海洋信息获取与安全工信部重点实验室 哈尔滨 150001)

(哈尔滨工程大学水声工程学院 哈尔滨 150001)

**摘要:** 水下体目标几何尺度大、运动姿态未知等因素,会导致传统长基线定位模型失配。该文针对此问题,通过体目标姿态、位置联合估计,消除模型误差,实现体目标几何中心的归算,得到了一种水下体目标的长基线高精度定位方法。理论分析及数值仿真结果表明,体目标半径大尺度下模型误差不可忽略,在体目标半径5 m,测距精度0.2 m的条件下,较传统长基线定位方法,将垂直定位精度从32 m提升至0.5 m,实现亚米级精度定位。

**关键词:** 长基线定位; 体目标; 模型误差

中图分类号: TB568; U666.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2023)02-0592-08

DOI: 10.11999/JEIT211395

## A High-precision Long-baseline Positioning Method for Underwater Volume Target

SUN Dajun LI Zongyan ZHENG Cui'e

(Acoustic Science and Technology Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

(Key Laboratory of Marine Information Acquisition and Security (Harbin Engineering University),

Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150001, China)

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

**Abstract:** When positioning underwater volume target using traditional long baseline positioning model, the large geometric scale and unavailable attitude of the volume target always leads to model mismatch problems. In this paper, a long baseline high-precision positioning method for underwater volume target is proposed. The method eliminates the model error and realizes the approximate reduction of the geometric center of the volume target through the joint estimation of the attitude and position coordinates. Theoretical analysis and Numerical simulation results show that the large scale of the radius of the volume target affects the positioning accuracy. The proposed method achieved sub-meter accuracy positioning and improved the vertical positioning accuracy from 32 m to 0.5 m compared with the traditional long baseline positioning method under the conditions of a target radius of 5 m and a ranging accuracy of 0.2 m.

**Key words:** Long baseline positioning; Volume target; Model error

### 1 引言

长基线定位作为一种高精度的技术手段,广泛地应用于水下航行器定位<sup>[1-4]</sup>。国际上知名的高精度长基线定位设备有英国Sonardyne的Fusion 6G、挪威Kongsberg的cPAP、法国iXblue的Ramses等,均在海洋工程领域取得了广泛的应用<sup>[5-7]</sup>。

近年来国内外学者对长基线定位技术开展了深入研究<sup>[8]</sup>。文献<sup>[9]</sup>针对泰勒级数展开法依赖初始参考值的问题,通过Chan算法解算求得初始参考值,兼顾了解算精度和解算效率。为了克服“询问-应答”测量系统应用中的不足,文献<sup>[10,11]</sup>通过在水下航行体上安装合作声信标的方式,提高了水下运动目标的定位精度。文献<sup>[12]</sup>通过水面浮标和水下信标结合的阵型修改阵型拓扑结构,提升了定位性能。文献<sup>[13]</sup>通过增加基站数量提高测点冗余度的方式提升定位精度。以上研究工作分别从算法特性、长基线的信号量测模式、阵型结构设计等方面优化了长基线定位性能,证明了水下长基线3维

收稿日期: 2021-12-01; 改回日期: 2022-06-24; 网络出版: 2022-07-01

\*通信作者: 郑翠娥 zhengcui@hrbeu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB0505805)

Foundation Item: The National Key Research and Development Project (2020YFB0505805)

定位可以达到米级甚至亚米级的精度。然而，目前仍然存在许多因素制约着长基线定位精度的进一步提高。

传统长基线定位场景中目标总被简化为质点模型。而实际情况下存在几何尺度大(口径达到几米)、运动姿态未知的体目标，若继续使用质点长基线定位模型，会带来较大的模型误差，无法满足高精度定位需求。目前针对该问题还没有有效的解决途径。

针对上述问题，本文通过引入体目标姿态、位置联合估计，消除了传统质点算法的模型误差，实现体目标高精度定位。本文从以下4部分展开：第1部分从长基线定位原理出发，分析长基线定位精度的影响因素；第2部分理论分析质点模型对体目标定位精度的影响关系；第3部分提出一种基于体目标姿态、位置联合估计的长基线定位方法，并进行了性能分析；第4部分通过计算机仿真定量评价本文方法对体目标的定位精度，证实了本方法的优势。

## 2 传统长基线定位模型与体目标的适配性分析

### 2.1 传统长基线定位模型及误差分析

长基线定位系统由预置于水下的参考声信标和安装于被定位目标上的测距仪构成，由声信号的传播时间来确定目标和各参考声信标之间的距离，通过距离交汇解算目标位置，如图1所示。

对传统长基线定位，将目标当作质点基于球面交汇原理构建量测方程，通过最小二乘估计求解目标位置

$$\mathbf{R} = f(\mathbf{X}_m, \mathbf{X}_i) \quad (1)$$

其中， $\mathbf{R}$ 为测量斜距， $f(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ 为 $\|\mathbf{a} - \mathbf{b}\|_2$ ， $\mathbf{X}_m = [x_m, y_m, z_m]^T$ 为目标的位置坐标， $\mathbf{X}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$ 为参考声信标的位置坐标，T代表转置。

将式(1)在初值 $\mathbf{X}_m^0$ 处进行线性化后，得到如式(2)的目标位置的矩阵表达形式为

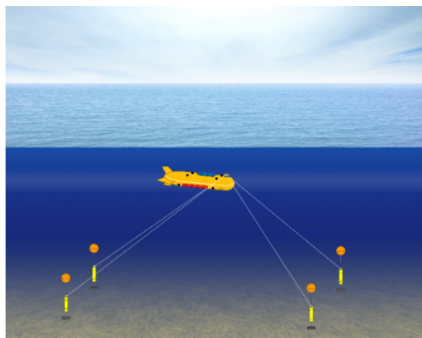


图1 长基线定位系统

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_m &= \mathbf{X}_m^0 + \delta \mathbf{X} = \mathbf{X}_m^0 + (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \delta \mathbf{R}, \\ \mathbf{A} &= \partial f(\mathbf{X}_m^0) / \partial \mathbf{X}_m \\ &= \left[ \frac{\partial f(\mathbf{X}_m^0)}{\partial x_m}, \frac{\partial f(\mathbf{X}_m^0)}{\partial y_m}, \frac{\partial f(\mathbf{X}_m^0)}{\partial z_m} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

其中， $\delta$ 代表改正量， $\partial$ 代表1阶偏导数， $\frac{\partial f}{\partial x_m} = \frac{x_m - x_i}{R_i}$ ， $\frac{\partial f}{\partial y_m} = \frac{y_m - y_i}{R_i}$ ， $\frac{\partial f}{\partial z_m} = \frac{z_m - z_i}{R_i}$ 。

由式(2)可知，目标的位置精度主要由目标与长基线阵型的相对位置关系和测距精度决定。

### 2.2 传统长基线模型与体目标的适配性分析

试验工况参考文献[13]，如图2所示，信标布放海底，目标位于基阵中心处。区别在于文献中被定位的目标为质点目标，而本文为体目标。体目标模型如图3所示，其上均匀安装了一圈发射换能器(声源)，红色换能器为1号声源，其余声源按照逆时针排序。由于换能器的指向性和体目标自身遮挡问题，不同声信标接收体目标上不同声源的信号，如第*i*个长基线信标接收体目标上第*k*个换能器的信号， $i \neq k$ 。 $o$ 为体目标质心， $r_{1i}$ 为参考声信标*i*到体目标质心的距离， $r_{2i}$ 为参考声信标*i*到体目标上声源的距离， $r_0$ 为体目标质心到声源的距离。

对于几何尺寸较大的体目标，通常用几何中心来描述位置。体目标的几何中心与其上对称安装的

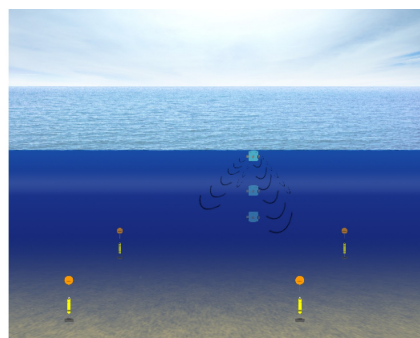


图2 体目标试验工况

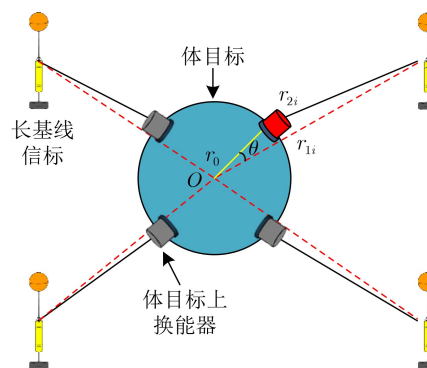


图3 体目标模型

换能器基阵中心重合。由于体目标上各发射换能器与几何中心不重合,做质点模型处理时,带来距离误差 $dR$

$$dR = r_{1i} - r_{2i} = r_{1i} - \sqrt{r_{1i}^2 + r_0^2 - 2r_{1i}r_0 \cos \theta_i} \quad (3)$$

其中,  $\theta_i$ 为信标到体目标质心和体目标质心到声源之间的夹角,其余弦取值范围为 $[0, 1]$ ,与体目标的姿态、半径、体目标与长基线信标几何位置关系均有关。且模型误差与夹角余弦正相关,当 $\cos \theta_i = 1$ 时,质心、换能器、信标共线,此时距离的模型误差为 $r_0$ ,即体目标半径。

模型误差到定位误差的传播公式<sup>[14]</sup>为

$$dX = (A^T A)^{-1} A^T dR \quad (4)$$

其中,  $dX$ 为目标的3维位置误差,  $A$ 参照式(2)。

由此,对体目标采用传统长基线模型解算时,主要误差因素有目标与长基线阵型的相对位置关系、体目标半径、体目标姿态等。由于测距误差是长基线定位的主要误差来源,当体目标的半径与测距精度需求相比拟时,模型误差不可忽略,须修正解算模型以解决体目标模型失配问题。

### 3 基于体目标姿态、位置联合估计的长基线定位方法

为解决上述问题,本文提出基于体目标姿态、位置联合估计的定位解算方法。本方法引入体目标姿态、位置联合估计,得到地理坐标系下体目标上

$$R_{GS} = R_{SG}^T = \begin{pmatrix} \cos \beta \cos \alpha & \cos \beta \sin \alpha & \sin \beta \\ -\cos \gamma \sin \alpha - \sin \gamma \sin \beta \cos \alpha & \cos \gamma \cos \alpha - \sin \gamma \sin \beta \sin \alpha & \sin \gamma \cos \beta \\ \sin \gamma \sin \alpha - \cos \gamma \sin \beta \cos \alpha & -\sin \gamma \cos \alpha - \cos \gamma \sin \beta \sin \alpha & \cos \gamma \cos \beta \end{pmatrix} \quad (6)$$

#### 3.2 体目标长基线定位模型

下面建立体目标姿态、位置联合解算模型,此模型的待求参数为体目标质心在地理坐标系下的坐标和体目标姿态,此时以距离为量测量的观测方程如式(7)

$$R = f(X_t^G, R_{SG}, X_k^S, X_i^G) \quad (7)$$

其中,  $X_t^G$ 为体目标质心在地理坐标系下的坐标,  $R_{SG}$ 为体目标坐标系到地理坐标系的旋转矩阵,与体目标姿态参数 $\alpha, \beta$ 和 $\gamma$ 有关。  $X_k^S$ 为体目标上第 $k$ 个换能器在体目标坐标系下的坐标,与体目标半径 $r_0$ 有关。  $X_i^G$ 为第 $i$ 个长基线信标在地理坐标系下的坐标。由2.2节可知,  $i \neq k$ ,建模时须对应二者关系。

上述模型中体目标质心位置 $X_t^G = (X, Y, Z)^T$ 和姿态参数 $R_{SG} \supset (\alpha, \beta, \gamma)$ 未知。由于体目标主要垂向运动,  $\beta, \gamma$ 趋近于0,可以忽略。因此姿态未知参数仅有航向角 $\alpha$ ,如图4,此时未知参数为 $(x_t^G, y_t^G, z_t^G, \alpha)$ ,

各发射换能器与几何中心的关系,消除了传统质点算法的模型误差,解决了体目标姿态未知问题,实现体目标高精度定位。

#### 3.1 体目标坐标系建立与旋转

假设各换能器与体目标刚性连接,相对位置关系恒定,此时可构建体目标坐标系。引入体目标坐标系相对于地理坐标系的姿态参数,即可确定换能器在地理坐标系下的空间位置。体目标坐标系定义参照地理坐标系,如图4所示。

地理坐标系 $X_G$ 轴指向北方向,  $Y_G$ 轴指向东方向,  $Z_G$ 轴指向天方向,记为 $O-X_G Y_G Z_G$ ;体目标坐标系以体目标质心为原点,  $X_S$ 轴指向体目标艏向,  $Y_S$ 轴指向体目标右舷向,  $Z_S$ 轴指向体目标上方向,记为 $O-X_S Y_S Z_S$ 。其中体目标艏向为体目标质心到体目标上红色(1号)换能器的朝向。

体目标上各个换能器在体目标坐标系下的坐标 $X_k^S$ 如式(5)

$$X_k^S = [r_0 \cos \varphi_k, r_0 \sin \varphi_k, 0]^T \quad (5)$$

其中,  $\varphi_k$ 为体目标上第 $k$ 个换能器与 $X_S$ 轴的夹角,当体目标均匀安装6个换能器时,  $\varphi_k = 60^\circ \cdot (k - 1)$ ,  $k = 1, 2, \dots, 6$ 。

上述两坐标系夹角即体目标姿态参数 $\alpha, \beta$ 和 $\gamma$ ,从地理坐标系旋转到体目标坐标系时,依次绕 $Z, Y, X$ 轴分别旋转 $\alpha, \beta, \gamma$ 角度,参照文献[15]得到的旋转矩阵为

通过最小二乘估计求解体目标位置和姿态,具体算法流程如算法1。

#### 3.3 体目标方法的误差分析

上述模型中未知参数 $n = [x_t^G, y_t^G, z_t^G, \alpha]^T$ ,对应目标函数的雅可比矩阵 $A$ 为

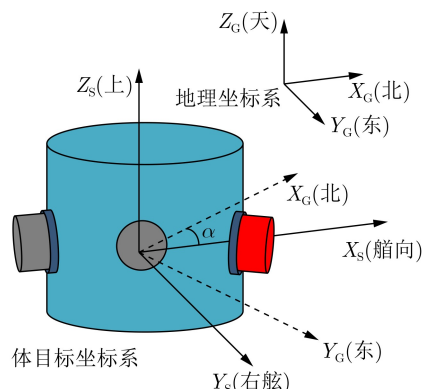


图4 体目标坐标系建立

## 算法1 体目标长基线定位方法

输入：长基线信标在地理坐标系坐标 $\mathbf{X}_i^G$ 、量测距离 $\mathbf{R}$ 、体目标上换能器的编号 $\mathbf{P}$ 、体目标半径 $r_0$

输出：体目标质心在地理坐标系坐标 $\mathbf{X}_t^G$ ，体目标姿态 $\alpha$

- (1)选择体目标质心在地理坐标系坐标、体目标姿态的迭代初值 $\mathbf{X}_{t(0)}^G, \alpha(0)$ ，令flag=1,(flag为标志位)
- (2)根据体目标半径 $r_0$ 计算体目标上第 $k$ 个换能器在体目标坐标系下的坐标 $\mathbf{X}_k^S$
- (3)当满足flag=1时
- (4)根据 $\mathbf{X}_{t(0)}^G, \alpha(0), \mathbf{X}_k^S, \mathbf{X}_i^G, \mathbf{P}, \mathbf{R}$ 计算目标函数值 $\phi_0$
- (5)将观测方程线性化，并计算体目标质心、体目标姿态的更新值 $\mathbf{X}_{t(1)}^G, \alpha(1)$
- (6)根据 $\mathbf{X}_{t(1)}^G, \alpha(1), \mathbf{X}_k^S, \mathbf{X}_i^G, \mathbf{P}, \mathbf{R}$ 计算新的目标函数值 $\phi_1$
- (7)若 $|\phi_0 - \phi_1| < \varepsilon$ ，( $\varepsilon = 10^{-7}$ )，那么
- (8)令 flag=0,  $\mathbf{X}_t^G = \mathbf{X}_{t(1)}^G$ ,  $\alpha = \alpha(1)$
- (9)否则，令 $\mathbf{X}_{t(0)}^G = \mathbf{X}_{t(1)}^G$ ,  $\alpha(0) = \alpha(1)$
- (10)继续循环
- (11)结束

$$A = \left[ \frac{\partial f(n^0)}{\partial x_t^G}, \frac{\partial f(n^0)}{\partial y_t^G}, \frac{\partial f(n^0)}{\partial z_t^G}, \frac{\partial f(n^0)}{\partial \alpha} \right] \quad (8)$$

$$\frac{\partial \mathbf{R}_{SG}}{\partial \alpha} = \begin{bmatrix} -\cos(\beta)\sin(\alpha) & -\cos(\gamma)\cos(\alpha) + \sin(\gamma)\sin(\beta)\sin(\alpha) & \sin(\gamma)\cos(\alpha) + \cos(\gamma)\sin(\beta)\sin(\alpha) \\ \cos(\beta)\cos(\alpha) & -\cos(\gamma)\sin(\alpha) - \sin(\gamma)\sin(\beta)\cos(\alpha) & \sin(\gamma)\sin(\alpha) - \cos(\gamma)\sin(\beta)\cos(\alpha) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

体目标长基线定位的误差传播公式同式(4)。

因此，影响体目标长基线定位精度的因素主要有体目标与长基线阵型的相对位置关系、体目标半径、体目标姿态以及测距精度。在其他条件确定的前提下该方法的定位性能受制于测距精度。

### 3.4 优势分析

针对质点模型对体目标失配问题，本文先构建体目标坐标系，并引入体目标姿态参数，得到地理坐标系下体目标上各发射换能器与几何中心的关系，后通过体目标姿态、位置联合估计，得到一种体目标长基线定位方法。相较于传统的质点长基线定位方法，本文方法具有以下优势：

(1)消除模型误差。本文的体目标定位模型相较传统定位模型，加入了 $\mathbf{R}_{SG}$ 和 $\mathbf{X}_k^S$ 两个参数，从而在定位方程中将体目标上每个换能器转换到体目标的质心处，消除了模型误差。同时，本模型中若姿态已知，该方法可以直接得到体目标上不同换能器的地理位置；若姿态未知，通过求解出体目标质心位置和姿态后，即可得到体目标上不同换能器的地理位置。

(2)解决姿态未知问题。定位模型中新增的 $\mathbf{R}_{SG}$ 和体目标姿态参数有关，但此时体目标的姿态和质

其中

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial x_t^G} &= \frac{x_t^G - x_i + \mathbf{R}_{SG1} \cdot \mathbf{X}_k^S}{R_i} \\ \frac{\partial f}{\partial y_t^G} &= \frac{y_t^G - y_i + \mathbf{R}_{SG2} \cdot \mathbf{X}_k^S}{R_i} \\ \frac{\partial f}{\partial z_t^G} &= \frac{z_t^G - z_i + \mathbf{R}_{SG3} \cdot \mathbf{X}_k^S}{R_i} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\mathbf{R}_{SG} = \mathbf{R}_{GS}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{SG1} \\ \mathbf{R}_{SG2} \\ \mathbf{R}_{SG3} \end{bmatrix}$$

其中， $\mathbf{R}_{SG}$ 为体目标坐标系到地理坐标系的旋转矩阵

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial \alpha} &= \frac{x_t^G - x_i + \mathbf{R}_{SG1} \cdot \mathbf{X}_k^S}{R_i} \cdot \mathbf{R}_{SGD1} \cdot \mathbf{X}_k^S \\ &+ \frac{y_t^G - y_i + \mathbf{R}_{SG2} \cdot \mathbf{X}_k^S}{R_i} \cdot \mathbf{R}_{SGD2} \cdot \mathbf{X}_k^S \\ &+ \frac{z_t^G - z_i + \mathbf{R}_{SG3} \cdot \mathbf{X}_k^S}{R_i} \cdot \mathbf{R}_{SGD3} \cdot \mathbf{X}_k^S \end{aligned} \quad (10)$$

其中

心位置均是未知的，本文方法同时估计体目标姿态、位置，解决姿态未知问题。

综上，本方法在定位模型和求解参数上进行改进，建立了体目标定位模型，消除了模型误差，同时估计体目标姿态，解决体目标姿态未知问题。

## 4 仿真分析

为了验证本文提出的体目标长基线方法的可行性，并与传统长基线方法对比，进行了仿真试验。仿真条件如下，以8只长基线信标布置长基线阵，具体如图5(a)，阵型设计为1 km×1 km的正方形，水深500 m。体目标在长基线阵型的几何中心处，其质心坐标(0,0,400) m。体目标自身状态如图5(b)，其质心为P0点，并在圆周上均匀装有6个换能器，分别为P1到P6，体目标半径为5 m。其初始状态如下所示，以质心为原点6个换能器刚性连接，建立体目标坐标系，P1为1号基元，其在体目标坐标系与 $x$ 轴的初始角度 $\varphi$ 为0°。体目标坐标系与地理坐标系的姿态角 $\alpha, \beta, \gamma$ 均为0°。

由表1可知，体目标位于阵中心时，本文方法不存在定位误差，而传统方法存在较大的定位误差，且所有误差均体现在垂直方向。

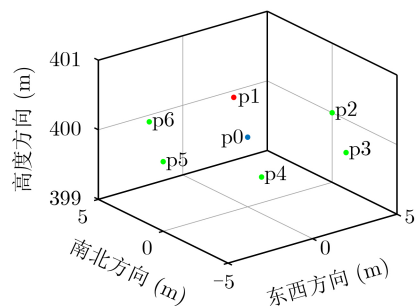
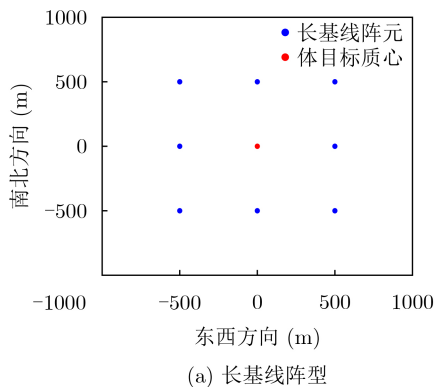


图5 仿真基本场景

由于未加入随机误差,此时影响传统方法定位精度的仅有模型误差。故目标位于基阵中心时模型误差均传递到垂向定位误差上,此时垂向定位误差达到32 m,模型误差不可忽略。相较于传统方法,本文方法消除了模型误差,提高了定位精度。

在后文的仿真中,先分别从体目标与长基线阵型的相对位置关系、体目标半径、体目标姿态、测距精度独立对比分析两种算法的定位性能,后结合实际工况,分析两种算法在各因素耦合时的性能表现。

#### 4.1 仿真试验1: 独立因素变化下的定位精度

##### 4.1.1 体目标与长基线阵型几何位置关系影响

首先分析体目标位于长基线阵型中不同位置的情况。长基线阵型结构固定,待测体目标位于长基线阵型偏心处(300,300,400)m,其他仿真条件同上,表2为体目标位于阵型偏心处两种方法的定位误差。

由表2可知,体目标位于阵偏心处时,本文方法不存在模型误差,而传统方法存在较大的定位误差,且水平和垂直方向均存在定位误差,此时垂直定位误差从32 m减小到21 m。

综合表1、表2可知:(1)传统方法下定位误差与体目标和长基线阵型的相对位置有关,并非恒定量;(2)传统方法下在阵内时水平定位误差相较垂直定位误差较小;(3)相同仿真条件下本文方法不受几何位置关系的影响,定位误差均为0 m。

##### 4.1.2 体目标半径的影响

然后分析体目标半径对两种方法定位结果的影响。体目标半径从1 m变化到8 m,其他仿真条件同上。由于体目标位于阵型中心处两种方法水平定位误差均极小,故仅观察垂直定位误差。两种方法定位结果如图6所示,传统方法垂直定位误差随着半径增大而近似线性增大,半径达到5 m时,定位误差已达到32 m,本文方法不受体目标半径的影响,定位误差均为0 m。

##### 4.1.3 体目标姿态的影响

接下来分析体目标初始姿态对两种方法定位结果的影响。体目标初始姿态从 $0^\circ$ 变化到 $60^\circ$ ,其他仿真条件同上。两种方法定位结果如图7所示,在

表1 体目标位于阵型中心处定位误差(m)

	北向坐标	东向坐标	高程
传统方法	0	0.000	31.933
本文方法	0	0	0

表2 体目标位于阵型偏心处定位误差(m)

	北向坐标	东向坐标	高程
传统方法	-2.132	-1.923	21.180
本文方法	0	0	0

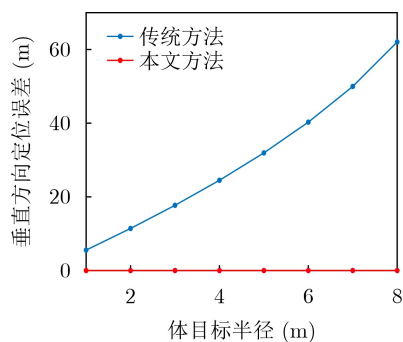


图6 垂直定位误差与体目标半径的关系

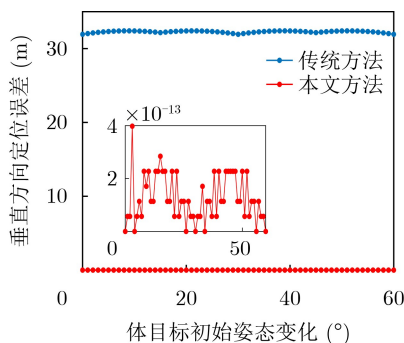


图7 垂直定位误差与目标姿态的关系

半径固定时，传统方法受目标初始姿态影响较小，不同姿态下定位误差在31.9~32.4 m附近，本文方法不受初始姿态的影响，定位误差均为0 m。

#### 4.1.4 测距误差的影响

最后分析测距误差对两种方法定位结果的影响。测距误差从0.1 m变化到0.5 m，其他仿真条件同上。假设测距误差服从零均值高斯分布，进行200次蒙特卡罗仿真。两种方法定位结果如图8所示，本文方法水平定位误差数值上与传统方法相当，定位误差均随测距误差线性增大。本文方法在测距误差0.5 m时，垂直定位误差达到1 m，远优于传统方法的32 m。

#### 4.1.5 小结

本节分别针对体目标与长基线阵型的相对位置关系、体目标半径、体目标姿态、测距误差等因素对两种方法进行仿真试验，本文方法定位精度均优于传统方法。

从仿真结果看出传统方法定位的模型误差与体目标与长基线阵型的相对位置关系、体目标半径、体目标姿态均有关。体目标和长基线阵型的相对位置关系主要影响模型误差到定位误差的传递方向；体目标半径的尺度直接影响模型误差的大小，半径大尺度下模型误差不可忽略。

同时也能看出本文方法相较传统方法消除了模型误差，故受体目标半径和姿态影响较小，但本文方法和传统方法的定位误差同时受测距误差的影响。

#### 4.2 仿真试验2：实际工况下的定位精度

在实际工况下，体目标与长基线阵型的相对位置关系、体目标半径、测距误差等因素均是固定的，仅体目标初始姿态未知。下面针对实际工况，分析此时两种方法的定位精度。仿真条件如下，长基线阵型结构固定，阵型设计为1 km×1 km的正方形，体目标位于阵型中心处，测距精度0.2 m，体目标半径5 m，体目标初始姿态从0°变化到30°，其他仿真条件同上。假设测距误差服从零均值高斯分布，进行200次蒙特卡罗仿真，在此工况下两种方法的定位结果如图9所示。在测距精度0.2 m，体目标半径5 m，初始姿态0~30°的条件下，本文方法相较传统方法水平定位精度基本相同，最大相差2 cm。垂直定位精度从32 m提高到0.5 m，达到了亚米级定位精度。

## 5 结论

本文针对水下体目标几何尺度大、姿态未知等因素，导致传统长基线定位模型不适配、难以实现高精度定位的问题，基于体目标上各点刚性连接、

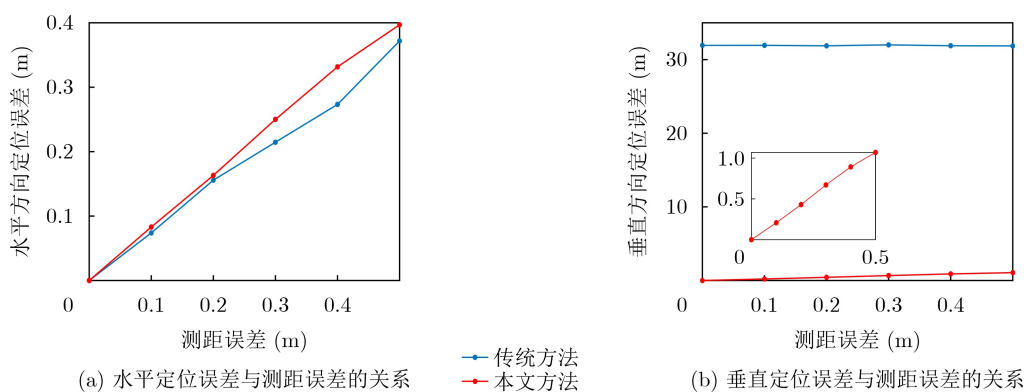


图8 定位误差与测距误差的关系

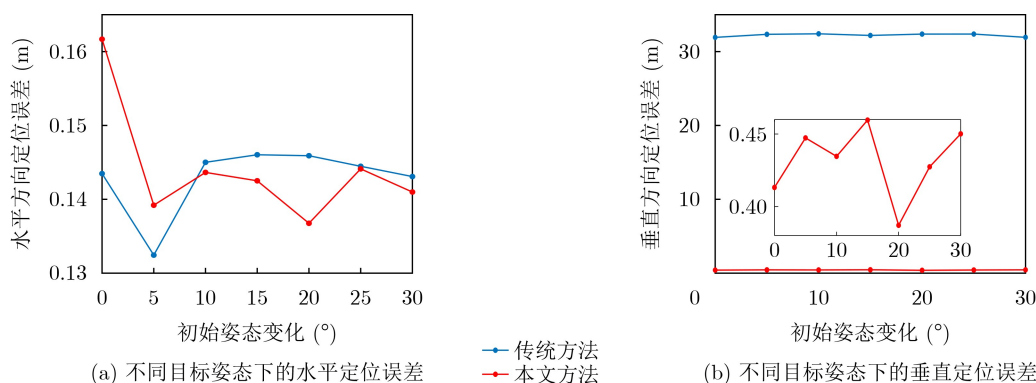


图9 实际工况下不同目标初始姿态的定位误差

相对运动状态恒定的特性,引入了体目标姿态位置联合估计,获得一种针对水下体目标的定位解算方法。通过理论分析证明体目标半径大尺度下模型误差不可忽略的问题。并且用仿真表明了本文的体目标长基线定位方法可以达到亚米级定位精度。本文提出的定位方法和分析方式可为其他类型水下体目标的定位方法、精度分析提供参考。

### 参 考 文 献

- [1] 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. doi: [10.16418/j.issn.1000-3045.2019.03.011](https://doi.org/10.16418/j.issn.1000-3045.2019.03.011).  
SUN Dajun, ZHENG Cui'e, ZHANG Jucheng, et al. Development and prospect for underwater acoustic positioning and navigation technology[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(3): 331–338. doi: [10.16418/j.issn.1000-3045.2019.03.011](https://doi.org/10.16418/j.issn.1000-3045.2019.03.011).
- [2] 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. doi: [10.11999/JEIT200383](https://doi.org/10.11999/JEIT200383).  
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. doi: [10.11999/JEIT200383](https://doi.org/10.11999/JEIT200383).
- [3] 吴永亭. LBL精密定位理论方法及软件系统研制[D]. [博士学位论文], 武汉大学, 2013.  
WU Yongting. Study on theory and method of precise LBL positioning and development of positioning software system[D]. [Ph. D. dissertation], Wuhan University, 2013.
- [4] 韩云峰, 郑翠娥, 孙大军. 长基线定位系统高精度阵型标定方法[J]. 声学学报, 2016, 41(4): 456–464. doi: [10.15949/j.cnki.0371-0025.2016.04.002](https://doi.org/10.15949/j.cnki.0371-0025.2016.04.002).  
HAN Yunfeng, ZHENG Cui'e, and SUN Dajun. A high precision calibration method for long baseline acoustic positioning systems[J]. *Acta Acustica*, 2016, 41(4): 456–464. doi: [10.15949/j.cnki.0371-0025.2016.04.002](https://doi.org/10.15949/j.cnki.0371-0025.2016.04.002).
- [5] 孙大军, 郑翠娥. 水声导航、定位技术发展趋势探讨[J]. 海洋技术, 2015, 34(3): 64–68.  
SUN Dajun and ZHENG Cui'e. Study on the development trend of underwater acoustic navigation and positioning technologies[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2015, 34(3): 64–68.
- [6] 张居成. 深水长基线定位导航技术研究[D]. [博士学位论文], 哈尔滨工程大学, 2014. doi: [10.7666/d.D595394](https://doi.org/10.7666/d.D595394).  
ZHANG Jucheng. Research of deepwater LBL positioning and navigation technology[D]. [Ph. D. dissertation], Harbin Engineering University, 2014. doi: [10.7666/d.D595394](https://doi.org/10.7666/d.D595394).
- [7] 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): 86–91.  
ZHANG Xu, HAN Xu, and XIN Jian. Underwater vertical vehicle measuring accuracy simulation based on seabed multielement array[J]. *Journal of Detection & Control*, 2017, 39(3): 86–91.
- [8] 李敏, 孙贵青, 李启虎. 分布式浮标阵水下高速运动声源三维被动定位[J]. 声学学报, 2009, 34(4): 289–295. doi: [10.3321/j.issn:0371-0025.2009.04.001](https://doi.org/10.3321/j.issn:0371-0025.2009.04.001).  
LI Min, SUN Guiqing, and LI Qihu. Three dimensional passive localization based on distributed buoy array for underwater moving sound source with high speed[J]. *Acta Acustica*, 2009, 34(4): 289–295. doi: [10.3321/j.issn:0371-0025.2009.04.001](https://doi.org/10.3321/j.issn:0371-0025.2009.04.001).
- [9] 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): 84–90. doi: [10.11759/hyxx20190109004](https://doi.org/10.11759/hyxx20190109004).  
MENG Qingbo, WANG Zhenjie, WANG Boyang, et al. An improved underwater acoustic localization algorithm[J]. *Marine Sciences*, 2019, 43(11): 84–90. doi: [10.11759/hyxx20190109004](https://doi.org/10.11759/hyxx20190109004).
- [10] 张旭, 孙翱, 韩旭, 等. 一种适用于水下垂向运动目标的长基线水声定位方法[J]. 南京大学学报:自然科学版, 2017, 53(4): 629–637. doi: [10.13232/j.cnki.jnju.2017.04.002](https://doi.org/10.13232/j.cnki.jnju.2017.04.002).  
ZHANG Xu, SUN Ao, HAN Xu, et al. A method of long baseline acoustic positioning for underwater vertical moving target[J]. *Journal of Nanjing University: Natural Science*, 2017, 53(4): 629–637. doi: [10.13232/j.cnki.jnju.2017.04.002](https://doi.org/10.13232/j.cnki.jnju.2017.04.002).
- [11] CHENG Xiuzhen, SHU Haining, LIANG Qilian, et al. Silent positioning in underwater acoustic sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(3): 1756–1766. doi: [10.1109/TVT.2007.912142](https://doi.org/10.1109/TVT.2007.912142).
- [12] 刘杰. 水下垂向运动目标长基线测量方法研究[D]. [硕士学位论文], 哈尔滨工程大学, 2016. doi: [10.7666/d.D01105130](https://doi.org/10.7666/d.D01105130).  
LIU Jie. Study on the vertical motion target of long baseline underwater measurement method[D]. [Master dissertation], Harbin Engineering University, 2016. doi: [10.7666/d.D01105130](https://doi.org/10.7666/d.D01105130).
- [13] 张旭, 孙翱, 韩旭, 等. 水下垂向运动目标的海底多基站声定位

- 方法及精度分析[J]. 声学学报, 2019, 44(2): 155–169. doi: [10.15949/j.cnki.0371-0025.2019.02.002](https://doi.org/10.15949/j.cnki.0371-0025.2019.02.002).
- ZHANG Xu, SUN Ao, HAN Xu, *et al.* Acoustic localization scheme and accuracy analysis for underwater vertical motion target using multi-stations in the seabed[J]. *Acta Acustica*, 2019, 44(2): 155–169. doi: [10.15949/j.cnki.0371-0025.2019.02.002](https://doi.org/10.15949/j.cnki.0371-0025.2019.02.002).
- [14] ZHAO Jianhu, ZOU Yajing, ZHANG Hongmei, *et al.* A new method for absolute datum transfer in seafloor control network measurement[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2016, 21(2): 216–226. doi: [10.1007/s00773-015-0344-z](https://doi.org/10.1007/s00773-015-0344-z).
- [15] SUN Dajun, DING Jie, ZHENG Cui'e, *et al.* An underwater acoustic positioning algorithm for compact arrays with arbitrary configuration[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2019, 13(1): 120–130. doi: [10.1109/JSTSP.2019.2899732](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2019.2899732).
- 孙大军：男，教授，研究方向为新体制深海水下高精度定位。  
李宗晏：男，博士生，研究方向为水声定位与导航。  
郑翠娥：女，教授，研究方向为高精度深海声定位技术。
- 责任编辑：余 蓉