

基于置信椭圆的双基地声呐定位误差统计方法

刘海燕, 姜大伟, 王彬, 丁烽

(杭州应用声学研究所, 浙江 杭州 310023)

摘要:为了解决双基地声呐系统定位误差的存在严重制约性能提升问题,本文研究其误差统计特性,利用蒙特卡罗方法验证了基于误差函数的置信椭圆是一种有效的误差分析方法,并仿真分析时延误差、接收阵测向误差以及收发节点位置误差等主要误差源对多基地定位性能的影响。结果表明:时延和测向误差对定位精度影响显著,收发节点位置误差影响较小;分置距离超出特定阈值时定位误差显著增加,目标靠近发射节点特定接收角度时误差较大。本文分析结果可为系统定位精度分析及工程应用提供参考。

关键词:双基地声呐系统; 定位误差; 置信椭圆; 误差函数法; 蒙特卡罗法; 时延误差; 测向误差; 收发节点位置误差

DOI: 10.11990/jheu.202503021

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1390.U.20250627.1134.003>

中图分类号: TN911.72 文献标志码: A 文章编号: 1006-7043(2025)08-1601-08

Statistical method for bistatic sonar positioning error based on confidence ellipse

LIU Haiyan, JIANG Dawei, WANG Bin, DING Feng

(Hangzhou Applied Acoustics Research Institute, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Localization errors severely constrain enhancing the performance of bistatic sonar systems. To address this problem, this study investigated the statistical characteristics of these errors using Monte Carlo simulations, confirming that the confidence ellipse based on the error function is effective for error analysis. Through simulations, the impact of major error sources, including time-delay errors, receiving array bearing measurement errors, and transceiver node position errors, on the multistatic localization performance was further analyzed. The results indicate that: 1) Time-delay and bearing measurement errors significantly affect the localization accuracy, whereas the transceiver position errors have a minimal impact; 2) localization errors will increase substantially when the separation distance exceeds a specific threshold; 3) larger errors will occur when targets approach specific receiving angles relative to the transmitting node. These findings provide critical references for the analysis of the system accuracy and engineering applications.

Keywords: bistatic sonar system; localization error; confidence ellipse; error function method; Monte Carlo method; time-delay error; bearing measurement error; transceiver node position error

随着海洋探测技术的进步,双基地声呐技术在 水下目标探测与识别领域日益重要。作为一种先进探测手段,双基地声呐系统凭借其隐蔽性强、覆盖范围广等显著优势受到广泛关注^[1]。相比于传统单基地声呐,其将发射源和接收器分置,能在复杂海洋环境中提供更丰富的目标信息,显著提升定位和跟踪能力^[2]。

然而,双基地声呐系统虽具诸多优点,其探测过程中的误差问题却是制约性能进一步提升的关键因素。误差来源多样,主要包括声速误差、收发节点位置误差、测向误差及测距误差等^[3]。这些误差直接影响探测结果的准确性,特定条件下甚至导致较大定位偏差,削弱系统整体效能。因此,深入探究双基地声呐探测误差的统计特性及其实际应用表现,对提高探测效率与精度、指导系统优化设计与应用具有重要意义。

双基地声呐探测的理论基础涉及水下声波传播特性及定位跟踪算法,致力于分析解决误差问

收稿日期: 2025-03-17. 网络出版日期: 2025-06-27.
作者简介: 刘海燕, 男, 高级工程师;
王彬, 男, 工程师.
通信作者: 王彬, E-mail: jasonwang1218@163.com.

题。例如,Stefano 探讨了误差统计特性及其对定位误差的影响^[4];张小凤^[5]基于 TOL 算法研究了时间测量误差对定位精度的影响。尽管已有研究取得成果,仍存不足:现有工作多聚焦单一误差源分析,缺乏对多种误差源综合作用下定位精度的系统性研究。

本文研究双基地声呐定位误差特性及其影响因素。首先分析定位原理及主要误差来源(时延误差、测向误差、收发节点位置误差等);其次,采用蒙特卡罗方法验证基于误差函数的置信椭圆在一定条件下作为有效误差分析工具的可行性;进而通过仿真分析不同误差源对定位误差的影响,并评估不同分置距离下的定位误差分布。

1 置信椭圆与定位误差统计方法

1.1 双基地声呐定位原理

双基地声呐因收发分置,定位较单基地复杂。根据定位参数的处理方法不同,几何定位法和统计定位法是常用的确定目标位置方法,^[6]本文以几何定位法为基础展开讨论分析。双基地声呐探测典型发射节点-目标-接收节点几何关系如图 1 所示。

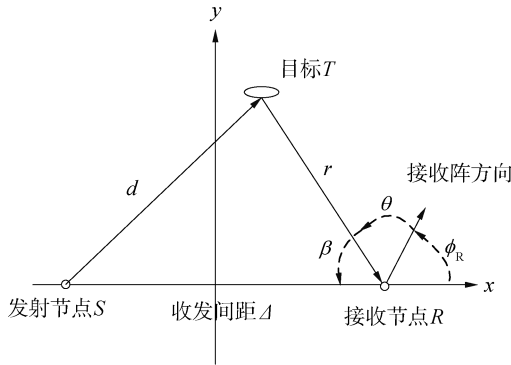


图 1 双基地节点几何示意

Fig. 1 Geometric schematic of bistatic nodes

其定位基于发射节点 S、接收节点 R 和目标 T 构成的三角形几何关系^[7]。其中,声脉冲经目标发射后到达接收节点的时间为:

$$\tau_1 + \tau_2 = (d + r)/\nu \quad (1)$$

发射节点发射声脉冲,声脉冲不经目标反射,直接到达接收节点的直达波时间为:

$$\tau_3 = \Delta/\nu \quad (2)$$

式中: d 为发射节点与目标之间的距离; r 为目标与接收节点之间的距离; τ_1 和 τ_2 分别为声波从发射节点到目标以及目标到接收节点的传播时间; τ_3 为直达声传播时间; Δ 为发射节点与接收节点之间的距离; ν 为水中声速。

则回波与直达波之间的时间差为:

$$\Delta\tau = \tau_1 + \tau_2 - \tau_3 = (d + r - \Delta)/\nu \quad (3)$$

当发射节点与接收节点之间的分置距离 d 确定时,产生相同时延的目标可能位置的轨迹是以发射节点 S 和接收节点 R 为焦点的椭圆^[8](等时到达椭圆)。

令发射节点、目标、接收节点位置分别为 (x_S, y_S) 、 (x_T, y_T) 、 (x_R, y_R) 。图 1 中, β 为目标-接收-发射之间的测向角度, θ 为目标-接收连线与接收阵方向之间夹角, ϕ_R 为接收阵与 x 轴之间夹角。

根据图 1 几何关系,已知目标-接收节点-发射节点之间的角度 β 为:

$$\beta = \arctan\left(\frac{y_S - y_R}{x_S - x_R}\right) - \theta - \phi_R \quad (4)$$

发射节点和接收节点之间的距离为:

$$\Delta = [(x_S - x_R)^2 + (y_S - y_R)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

并且接收节点与目标之间距离为:

$$\begin{cases} r + d = c\tau \\ d^2 = r^2 + \Delta^2 - 2r\Delta\cos\beta \end{cases} \quad (6)$$

式中 τ 为声波从发射节点到目标再从目标到接收节点的传播时间,结式(4)~(6)可求解得:

$$r = \frac{c^2\tau^2 - \Delta^2}{2(c\tau - \Delta\cos\beta)} \quad (7)$$

故目标位置为:

$$\begin{cases} x_T = x_R + r\cos(\theta + \phi_R) \\ y_T = y_R + r\sin(\theta + \phi_R) \end{cases} \quad (8)$$

1.2 双基地声呐定位误差来源

由式(4)~(8)可知,在双基地声呐定位过程中需要测量出以下量才能对目标进行定位^[9]:

- 1) 声脉冲从发射节点经目标反射后到达接收节点的时间,即时延 τ ;
- 2) 目标-接收连线与接收阵方向之间夹角 θ ;
- 3) 接收阵与 x 轴之间夹角 ϕ_R ;
- 4) 收发节点位置 (x_S, y_S) 、 (x_R, y_R) ;
- 5) 声速 c 。

将双基地声呐探测目标方位-距离误差看成是关于发射节点与接收节点的位置误差、声速误差、接收节点测距和测向误差以及接收阵自身测向误差等若干误差的函数。

为了分析双基地声呐探测过程中各个测量误差对多基地定位误差的影响,假设各个测量的误差之间不相关且符合均值为 m 、方差为 σ^2 的高斯分布 $N(m, \sigma^2)$ ^[4],故各个测量的误差为:

- 1) 声脉冲从发射节点经目标反射后到达接收节点的时间延迟 τ 误差: $\tau \sim N(0, \sigma_\tau^2)$;
- 2) 接收节点接收阵测向 θ 误差: $\theta \sim N(0, \sigma_\theta^2)$;
- 3) 接收阵阵向 ϕ_R 传感器误差: $\phi_R \sim N(0,$

$\sigma_{\phi_R}^2$);

4) 发射节点位置 (x_S, y_S) 误差:

$$\begin{bmatrix} x_S \\ y_S \end{bmatrix} \sim N\left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \sigma_{x_S}^2 & \sigma_{x_S} \sigma_{y_S} \\ \sigma_{x_S} \sigma_{y_S} & \sigma_{y_S}^2 \end{bmatrix}\right);$$

5) 接收节点位置 (x_R, y_R) 误差:

$$\begin{bmatrix} x_R \\ y_R \end{bmatrix} \sim N\left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \sigma_{x_R}^2 & \sigma_{x_R} \sigma_{y_R} \\ \sigma_{x_R} \sigma_{y_R} & \sigma_{y_R}^2 \end{bmatrix}\right);$$

6) 声路径上平均声速 c 误差: $c \sim N(0, \sigma_c^2)$ 。

基于小误差假设,使用一阶线性化表达式对双基地声呐探测目标的测向误差 σ_β 、测距误差 σ_r 进行了计算^[4],根据几何关系,双基地测向误差 σ_β 为:

$$\sigma_\beta^2 = \frac{1}{\Delta^4} [(x_S - x_R)^2(\sigma_{y_S}^2 + \sigma_{y_R}^2) + (y_S - y_R)^2(\sigma_{x_S}^2 + \sigma_{x_R}^2) - 2(x_S - x_R)(y_S - y_R) \cdot (\sigma_{x_S y_S} + \sigma_{x_R y_R})] + \sigma_\theta^2 + \sigma_{\phi_R}^2 \quad (9)$$

测距误差 σ_r 为:

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{b^2 \sigma_a^2 + a^2 \sigma_b^2 - 2ab\sigma_{ab}}{b^4}} \quad (10)$$

其中:

$$\begin{aligned} a &= c^2 t^2 - \Delta^2 \\ b &= 2(ct - \Delta \cos \beta) \\ \sigma_a^2 &= 4t^4 c^2 \sigma_c^2 + 4t^2 c^4 \sigma_t^2 + 4\Delta^2 \sigma_\Delta^2 \\ \sigma_b^2 &= 4(t^2 \sigma_c^2 + c^2 \sigma_t^2 + \cos^2 \beta \sigma_\Delta^2 + \Delta^2 \sin^2 \beta \sigma_\beta^2 - 2\cos \beta \sin \beta \Delta \sigma_{\beta \Delta}) \\ \sigma_{ab} &= 4(t^3 c \sigma_c^2 + c^3 t \sigma_t^2 + \Delta \cos \beta \sigma_\Delta^2 - \Delta^2 \sin \beta \sigma_{\beta \Delta}) \\ \sigma_\Delta^2 &= \frac{1}{\Delta^2} [(x_S - x_R)^2(\sigma_{x_S}^2 + \sigma_{x_R}^2) + (y_S - y_R)^2(\sigma_{y_S}^2 + \sigma_{y_R}^2)] + \frac{2}{\Delta^2} (x_S - x_R)(y_S - y_R)(\sigma_{x_S y_S} + \sigma_{x_R y_R}) \\ \sigma_{\beta \Delta} &= \frac{1}{\Delta^3} [((x_S - x_R)^2 - (y_S - y_R)^2)(\sigma_{x_S y_S} + \sigma_{x_R y_R}) + (x_S - x_R)(y_S - y_R)((\sigma_{y_S}^2 + \sigma_{y_R}^2) - (\sigma_{x_S}^2 + \sigma_{x_R}^2))] \end{aligned}$$

为计算方便,假设接收节点位置 $\begin{bmatrix} x_R \\ y_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta}{2} \\ 0 \end{bmatrix}$,

发射节点位置 $\begin{bmatrix} x_S \\ y_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\Delta}{2} \\ 0 \end{bmatrix}$ 。同时,将声速误差统一放入时延误差中考虑,化简双基地测距误差 σ_r 为:

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{b^2 \sigma_a^2 + a^2 \sigma_b^2 - 2ab\sigma_{ab}}{b^4}} \quad (11)$$

其中,

$$\begin{cases} a = c^2 t^2 - \Delta^2 \\ b = 2(ct - \Delta \cos \beta) \\ \sigma_a^2 = 4t^2 c^4 \sigma_t^2 + 4\Delta^2 (\sigma_{x_S}^2 + \sigma_{x_R}^2) \\ \sigma_b^2 = 4(c^2 \sigma_t^2 + \cos^2 \beta (\sigma_{x_S}^2 + \sigma_{x_R}^2) + \Delta^2 \sin^2 \beta \sigma_\beta^2) \\ \sigma_{ab} = 4(c^3 t \sigma_t^2 + \Delta \cos \beta (\sigma_{x_S}^2 + \sigma_{x_R}^2)) \end{cases}$$

结合式可得双基地声呐探测目标位置误差为:

$$\begin{cases} \sigma_{x_T}^2 = \sigma_{x_R}^2 + \cos^2(\theta + \phi_R) \sigma_r^2 + r^2 \sin^2(\theta + \phi_R) (\sigma_\theta^2 + \sigma_{\phi_R}^2) + 2\cos(\theta + \phi_R) \sigma_{x_{R'}} - 2r\cos(\theta + \phi_R) \sin(\theta + \phi_R) (\sigma_{\theta r} + \sigma_{\phi_R r}) \\ \sigma_{y_T}^2 = \sigma_{y_R}^2 + \sin^2(\theta + \phi_R) \sigma_r^2 + r^2 \cos^2(\theta + \phi_R) (\sigma_\theta^2 + \sigma_{\phi_R}^2) + 2\sin(\theta + \phi_R) \sigma_{y_{R'}} + 2r\sin(\theta + \phi_R) \cos(\theta + \phi_R) (\sigma_{\theta r} + \sigma_{\phi_R r}) \\ \sigma_{x_T y_T} = \sigma_{x_{R'} y_{R'}} + \sin(\theta + \phi_R) \sigma_{x_{R'}} + \cos(\theta + \phi_R) \sigma_{y_{R'}} + \cos(\theta + \phi_R) \sin(\theta + \phi_R) \sigma_r^2 + r\cos^2(\theta + \phi_R) (\sigma_{\theta r} + \sigma_{\phi_R r}) - r\sin^2(\theta + \phi_R) (\sigma_{\theta r} + \sigma_{\phi_R r}) - r^2 \sin(\theta + \phi_R) \cos(\theta + \phi_R) (\sigma_\theta^2 + \sigma_{\phi_R}^2) \end{cases} \quad (12)$$

其中:

$$\begin{cases} \sigma_{\phi_{R'}} = \frac{2a}{b} \Delta \sin \beta \sigma_{\phi_R}^2 \\ \sigma_{\theta r} = \frac{2a\Delta}{b^2} \sin \beta \sigma_\theta^2 \\ \sigma_{x_{R'}} = \frac{2(-b\Delta + a\cos \beta)}{b^2} \sigma_{x_{R\Delta}} - \frac{2a\Delta \sin \beta}{b^2} \sigma_{x_{R\beta}} \\ \sigma_{y_{R'}} = \frac{2(-b\Delta + a\cos \beta)}{b^2} \sigma_{y_{R\Delta}} - \frac{2a\Delta \sin \beta}{b^2} \sigma_{y_{R\beta}} \\ \sigma_{x_{R\Delta}} = -\frac{1}{\Delta} ((x_S - x_R) \sigma_{x_R}^2 + (y_S - y_R) \sigma_{x_{R'} y_{R'}}) \\ \sigma_{y_{R\Delta}} = -\frac{1}{\Delta} ((x_S - x_R) \sigma_{x_{R'} y_{R'}} + (y_S - y_R) \sigma_{y_R}^2) \\ \sigma_{x_{R\beta}} = \frac{1}{\Delta^2} (- (x_S - x_R) \sigma_{x_{R'} y_{R'}} + (y_S - y_R) \sigma_{x_R}^2) \\ \sigma_{y_{R\beta}} = \frac{1}{\Delta^2} (- (x_S - x_R) \sigma_{y_R}^2 + (y_S - y_R) \sigma_{x_{R'} y_{R'}}) \end{cases}$$

由此可以得到双基地声呐目标定位 (x_T, y_T) 误差

服从均值为 $\begin{bmatrix} x_{T, \text{true}} \\ y_{T, \text{true}} \end{bmatrix}$ 、方差为 $\begin{bmatrix} \sigma_{x_T}^2 & \sigma_{x_T} \sigma_{y_T} \\ \sigma_{x_T} \sigma_{y_T} & \sigma_{y_T}^2 \end{bmatrix}$ 的高斯

分布,即 $\begin{bmatrix} x_T \\ y_T \end{bmatrix} \sim N\left(\begin{bmatrix} x_{T,true} \\ y_{T,true} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \sigma_{x_T}^2 & \sigma_{x_T} \sigma_{y_T} \\ \sigma_{x_T} \sigma_{y_T} & \sigma_{y_T}^2 \end{bmatrix}\right)$, 其

中 $\begin{bmatrix} x_{T,true} \\ y_{T,true} \end{bmatrix}$ 为目标真实的位置。

1.3 置信椭圆在定位误差分析中的应用

置信椭圆是统计学中用于多变量数据分析的一种图形工具,它主要用于表示 2 个连续变量之间的关系,并且提供了一种可视化置信区间的手段。置信椭圆可以用来描述一组数据点在二维平面上的分布情况,特别是这些数据点围绕其均值向量的散布程度^[10]。在双变量正态分布的情况下,置信椭圆给出了一个区域,该区域内包含了给定置信水平下(如 90%、95%、99%)的预期比例的数据点。

假设一个二元数据集,其均值向量为 $\boldsymbol{\mu} = (\mu_x, \mu_y)$,协方差矩阵为 $\boldsymbol{\Sigma}$,求解对应的置信椭圆的步骤为:

1) 计算特征值和特征向量。

首先计算协方差矩阵 $\boldsymbol{\Sigma}$ 的特征值 λ_1 和 λ_2 以及其对应的特征向量 $\boldsymbol{\nu}_1$ 和 $\boldsymbol{\nu}_2$ 。特征值和特征向量将帮助确定置信椭圆的形状、大小和方向。特征值代表了椭圆主轴长度,特征向量指示了椭圆主轴的方向。

2) 确定置信水平。

选择一个置信水平,例如 95%,并查找相应的卡方分布临界值 χ_{α, d_f}^2 ,其中 α 是显著性水平(对于 95% 的置信水平, $\alpha = 0.05$), d_f 是自由度,对于二维情况,自由度 $d_f = 2$ 。

3) 确定半轴长度。

利用卡方分布临界值计算置信椭圆的半轴长度:

$$\begin{cases} a_0 = \sqrt{\lambda_1 \cdot \chi_{\alpha, d_f}^2} \\ b_0 = \sqrt{\lambda_2 \cdot \chi_{\alpha, d_f}^2} \end{cases} \quad (13)$$

式中 a_0 和 b_0 分别是沿着 2 个主成分方向的半轴长度。

4) 构建置信椭圆方程。

假设椭圆上任意点的位置为向量 $\boldsymbol{x} = (x_1, x_2)$,协方差矩阵的逆矩阵为 $\boldsymbol{\Sigma}^{-1}$,置信椭圆方程为:

$$(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{\mu})^T \boldsymbol{\Sigma}^{-1} (\boldsymbol{x} - \boldsymbol{\mu}) = \chi_{\alpha, d_f}^2 \quad (14)$$

在双基地声呐定位误差分析中,本文利用置信椭圆来描述目标位置量测点在二维平面上的分布情况,将基于高斯误差假设的双基地定位误差分布估计方法称为误差函数法。通过计算目标定位误差协方差矩阵的特征值和特征向量,确定置信椭圆的形状、大小和方向,更直观地理解定位误

差的分布特性^[11]。

2 双基地声呐定位误差特性仿真分析

2.1 不同置信水平下双基地声呐定位误差分析

本文以接收声呐测向误差 $\sigma_\beta = 2^\circ$ 、声呐测距误差系数 0.02、收发分置距离 $\Delta = 15$ km 以及发射接收节点位置误差 200 m 这个固定的发射节点-目标-接收节点场景为例,分析不同的置信水平下,落在基于误差函数与蒙特卡罗统计方法得到的置信椭圆内的概率。选择置信水平分别为 90%、95%、99%,其对应的卡方分布临界值分别为 $\chi_{\alpha, d_f}^2 = 4.605$, $\chi_{\alpha, d_f}^2 = 5.991$ 以及 $\chi_{\alpha, d_f}^2 = 9.210$ ^[11]。设定仿真次数 $N = 10\,000$,统计模拟目标位置点落在相应置信椭圆内的概率。

在上述给定的发射节点-目标-接收节点场景中,假设声波从发射节点经目标到达接收节点的时间为 15 s,且目标与接收节点连线和 x 轴的夹角为 $\alpha = 30^\circ$ 。基于不同置信水平,运用误差函数及蒙特卡罗统计方法所得到的置信椭圆和模拟目标位置点分布情况分别如图 2 所示。

从图 2 可以看出,在不同置信水平下,蒙特卡罗估计位置(叉号)与目标实际位置(加号)基本重合,2 类置信椭圆也基本重合。统计结果显示,当置信水平为 90% 时,分别落在误差函数法和蒙特卡罗法得到的 2 类置信椭圆内的目标位置点概率分别为 89.97% 和 90.05%;当置信水平为 95% 时,分别为 94.59% 和 94.78%;当置信水平为 99% 时,分别为 98.75% 和 98.96%。2 种方法得到的概率值与置信水平之间的偏差均控制在 0.5% 以内,验证了对各项来源误差进行高斯误差假设的合理性。

此外,图 2 的统计结果表明,在发射节点-目标-接收节点场景中,误差函数法与蒙特卡罗法生成的置信椭圆在几何参数(中心坐标、主轴方位、半轴长度)及统计覆盖率指标上均呈现强一致性。这充分验证了误差函数法在统计双基地定位误差方面的有效性,为工程实践中基于误差函数的快速置信水平计算提供了可靠的理论支持。

2.2 不同目标位置下双基地定位误差分析

对于给定的发射节点-目标-接收节点场景下初步验证了误差函数法的有效性。本文进一步探讨了目标位于不同位置时误差函数法和蒙特卡罗法在统计特性上的差异。假设目标分布在等时到达椭圆上,时延误差、发射接收节点位置误差、声速误差、测向误差设置为一定值的情况下,统计置信水平为 95% 时分别落在误差函数法和蒙特卡罗法的置信椭圆内的目标量测位置

点的概率值,进一步验证基于误差函数的置信椭圆的准确性。

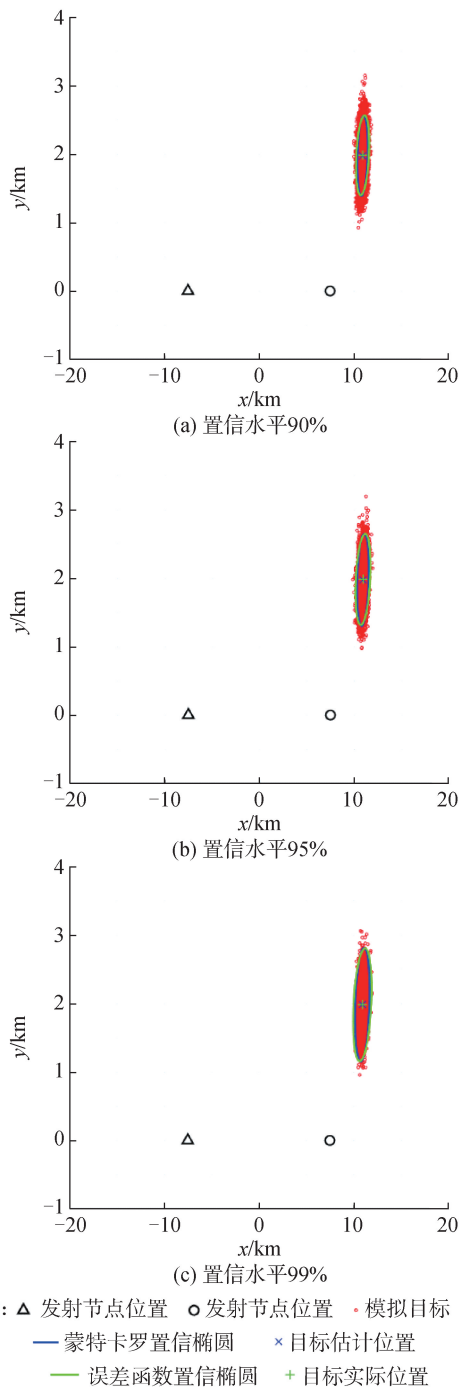


图 2 置信椭圆与目标量测位置点分布情况
 Fig. 2 Distribution of confidence ellipse and target measurement points

设置分置距离为 15 km, 声波从发射节点-目标-接收节点的时间为 15 s, 发射接收节点位置误差 200 m, 时延误差为 0.3 s, 测向误差 2° 。

当置信水平为 95% 时分别落在误差函数法和蒙特卡罗法的置信椭圆内的目标量测位置点的概率值随目标与收发节点连线夹角 α 的变化, 对比曲线如图 3 所示。

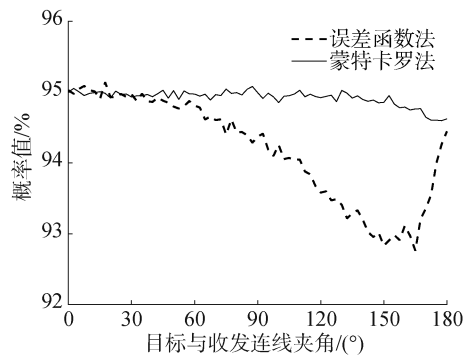


图 3 概率值随收发连线角变化对比曲线

Fig. 3 Comparative curves of probability values changing with the angle between the transmitting and receiving connection line

从图 3 可以看出, 当目标与收发节点连线夹角 α 在 $0^\circ \sim 50^\circ$ 范围内变化时, 误差函数和蒙特卡罗方法得出的概率值基本一致, 且均接近 95% 的置信水平。当夹角 α 在 $50^\circ \sim 160^\circ$ 变化时, 概率值逐渐从 95% 下降至 93% 左右; 而在 $160^\circ \sim 180^\circ$ 变化时, 概率值又从 93% 左右逐渐上升至 94.3% 左右。当目标与收发节点连线夹角超过 50° 时, 2 种方法得出的概率值开始出现衰减趋势, 原因为随着目标位置的变化, 发射节点、接收节点与目标之间的几何关系发生改变, 当目标远离发射节点和接收节点的最佳定位区域时, 定位误差对测量误差的敏感性增加, 导致概率值逐渐偏离置信水平。此外, 夹角变化还会影响置信椭圆的主轴方向和长短轴比例, 进一步影响概率值的分布。但无论目标处于何种位置, 2 种方法得出的概率值与置信水平之间的偏差均控制在 2% 以内。这表明在不同夹角范围内, 误差函数法均能较为准确地反映系统的置信水平, 且误差控制在可接受范围内, 验证了方法的可靠性。

为了进一步分析当目标在声呐可探测区域内误差函数法评估定位误差的有效性, 设置目标分布在若干个等时到达椭圆上的, 统计置信水平为 95% 时落在基于误差函数的置信椭圆内的目标量测位置点的概率值, 得到概率平面。时延误差、发射接收节点位置误差、声速误差、测向误差与上述一致, 得到落在相应置信椭圆内的目标量测位置点的概率图如图 4 所示。其中由于声呐实际探测中, 收发平台之间存在一个椭圆区域的探测盲区, 该区域由于发射平台发射信号到达接收平台的直达波能量大, 容易掩盖目标回波, 导致双基地声呐无法对目标实现探测以及定位^[12]。当直达波到达接收平台的时间 t_1 、目标回波到达接收平台的时间 t_2 以及信号脉宽 t_p 满足 $t_2 - t_1 < t_p$ 时, 目标位于双基地声呐直达波探测盲区, 本节仿真中假设信号脉宽为 2 s。

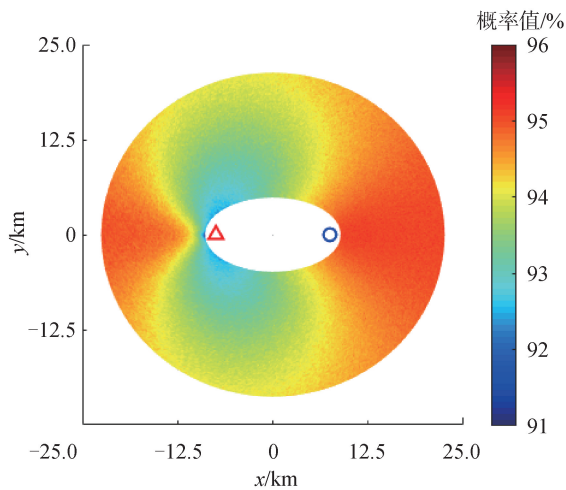


图 4 双基地声呐探测区域内不同位置点模拟目标落在置信椭圆内的概率值

Fig. 4 Probability values of simulated targets falling within the confidence ellipse in different positions of the bistatic sonar detection area

图 4 中色柱颜色由蓝到红代表模拟目标落在置信椭圆内的概率值由低到高,可以看出,当 α 在一定范围内变化或位于发射节点和接收节点的两侧区域时,基于误差函数得出的置信椭圆内的概率值与设定的置信水平值基本一致,表明双基地声呐系统的定位误差较小。但在接近发射节点的某些角度范围内,概率值与设定的置信水平值略有偏离,此时双基地声呐系统的定位误差相对较大。

2.3 不同的误差来源对双基地声呐定位误差的影响

基于上述的仿真验证试验,为了准确评估双基地声呐系统在其作用范围内各个误差因素对目标定位误差的影响,本文设置了 4 组对比仿真,统计分析给定的发射节点-目标-接收节点场景,目标量测位置点落在置信水平为 95% 的置信椭圆内的概率。假设声波从发射节点-目标-接收节点的时延为 15 s, $\alpha = 30^\circ$ 。

1) 发射节点位置误差对目标定位误差的影响。

分置距离 15 km,接收节点位置误差 200 m,时延误差 0.3 s,测向误差 2° ,发射节点误差测量值设定为 200 m,随着发射节点位置误差在 0~100% 范围内变化时,分别统计目标量测位置点落在置信椭圆内的概率值,得到概率值随发射节点位置误差曲线如图 5 所示。

由图 5 可知,其他双基地探测误差确定时,假设一个发射节点位置误差测量值,当实际误差在 0~100% 范围内波动时,目标量测位置点落在置信椭圆内的概率值基本保持稳定。

2) 接收节点位置误差对目标定位误差的影响。

设置分置距离 15 km,发射节点位置误差 20 m,时延误差 0.3 s,角度误差 2° ,接收节点误差测量值

设定为 200 m,随着接收节点位置误差在 0~100% 范围内变化时,分别统计目标量测位置点落在置信椭圆内的概率值,得到概率值随接收节点位置误差变化曲线如图 6 所示。

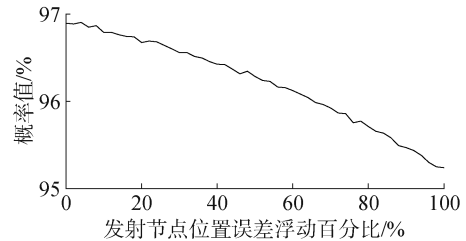


图 5 概率值随发射节点位置误差变化曲线

Fig. 5 Curve of probability values changing with the position error of the transmitting node

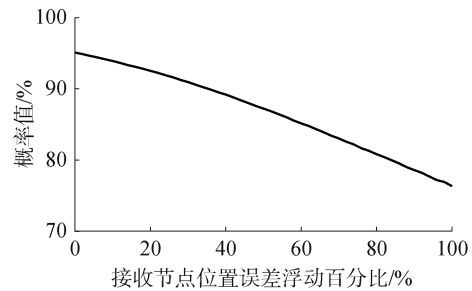


图 6 概率值随接收节点位置误差变化曲线

Fig. 6 Curve of probability values changing with the position error of the receiving node

由图 6 可知,其他双基地探测误差确定时,假设一个接收节点位置误差测量值,当实际误差在 0~100% 范围内波动时,目标量测位置点落在置信椭圆内的概率值从 95% 平缓下降至 76% 左右。

3) 时延误差对目标定位误差的影响。

分置距离 15 km,发射接收节点位置误差 200 m,角度误差 2° ,时延误差测量值设定为 0.3 s,随着时延误差在 0~100% 范围内变化时,分别统计目标量测位置点落在置信椭圆内的概率值,得到概率值随测距误差变化曲线如图 7 所示。

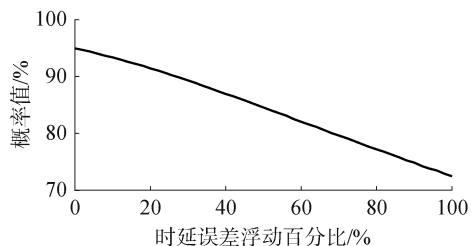


图 7 概率值随时延误差变化曲线

Fig. 7 Curve of probability values changing with time-delay error

由图 7 可知,其他双基地探测误差确定时,假设一个时延误差测量值,当实际误差在 0~100% 范围内波动时,目标量测位置点落在置信椭圆内的概率值从 95% 平缓下降至 72% 左右。

4) 测向误差对目标定位误差的影响。

分置距离 15 km, 发射接收节点位置误差 200 m, 时延误差 0.3 s, 测向误差测量值设定为 2° , 随着测向误差在 0~100% 范围内变化时, 分别统计目标量测位置点落在置信椭圆内的概率值, 得到概率值随测向误差变化曲线如图 8 所示。

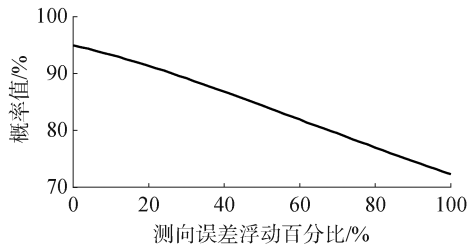


图 8 概率值随测向误差变化曲线

Fig. 8 Curve of probability values changing with direction-finding error

由图 8 可知, 其他双基地探测误差确定时, 假设一个角度误差测量值, 当实际误差在 0~100% 范围内波动时, 目标量测位置点落在置信椭圆内的概率值从 95% 平缓下降至 72% 左右。

从图 6~8 的仿真结果可以看出, 当分置距离为 15 km, 发射和接收节点的位置基础误差为 200 m, 时延基础误差为 0.3 s, 测向基础误差为 2° 时, 时延和方位测量误差的增加均会导致定位精度下降。此外, 双基地声呐探测系统对时延测量误差和方位测量误差较为敏感, 对接收节点位置测量误差的敏感度次之, 而对发射节点位置测量误差的敏感度最低。

2.4 不同的收发分置距离对双基地定位误差的影响

设定发射接收节点位置误差 200 m, 时延误差 0.3 s, 角度误差 2° , 假设声波从发射节点-目标-接收节点的时间为 15 s, $\alpha = 30^\circ$ 。随着收发分置距离在 2~30 km 范围内变化, 分别统计目标量测位置点落在置信椭圆内的概率值, 得到概率值随分置距离变化曲线如图 9 所示。

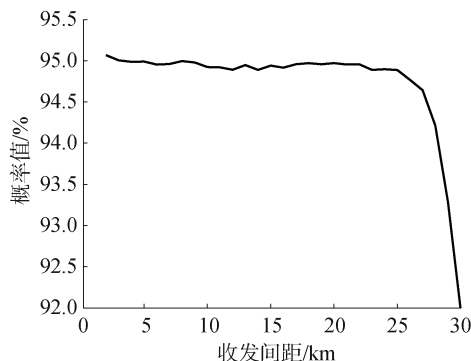


图 9 概率值随收发间距变化曲线

Fig. 9 Curve of probability values changing with the transmitting-receiving spacing

从图 9 中可以看出, 当分置距离处于一定范围内时, 概率值基本维持稳定。然而, 一旦分置距离超出特定阈值, 概率值便会显著下降, 进而双基地声呐探测系统的定位误差显著增大。影响特定阈值的因素可能与时延测量误差以及发射接收节点的位置误差相关: 分置距离越大, 相同绝对时延误差所对应的相对误差会增大, 导致定位精度下降。因此, 当分置距离达到一定程度, 使得时延误差对定位的影响超出系统可承受范围时, 概率值就会显著下降; 发射节点和接收节点的位置误差对定位精度有直接影响。较大的分置距离会放大位置误差的影响, 当分置距离超过特定阈值时, 这种放大效应使得位置误差对定位结果的主导作用增强, 导致概率值降低。这一现象为在确保声呐系统定位精度的前提下, 合理选择收发节点间距提供了重要参考。

3 结论

1) 本文通过蒙特卡罗方法验证了在特定条件下基于误差函数构建置信椭圆的分析方法有效。

2) 误差函数法与蒙特卡罗法在置信椭圆的几何参数及置信区域覆盖率上表现高度一致, 本文误差函数法可靠。

3) 当目标与收发节点连线夹角变化时, 2 种方法计算得到的置信概率与预设置信水平之间的偏差均能控制在 2% 以内, 误差函数法能够在不同夹角范围内准确表征系统的置信水平。

4) 定位精度对时延和方位测量误差高度敏感, 其增大将导致定位精度显著下降。当收发分置距离超出特定阈值时, 系统定位误差会显著增大。在接近发射节点位置附近的特定接收角度上, 系统呈现出较大的定位误差。

5) 本文结论为双基地声呐系统的定位精度分析、误差控制及工程应用提供了重要的理论依据和实践指导。

参考文献:

- [1] 赵宝庆, 车永刚. 双/多基地声纳技术发展综述[C]//2009 年全国水声学学术交流暨水声学分会换届改选会议论文集. 大连, 2009: 7-9.
ZHAO Baoqing, CHE Yonggang. Overview of the Development of Dual/Multi Base Sonar Technology [C]//Proceedings of the 2009 National Academic Exchange and Selection Conference of the Hydroacoustics Branch. Dalian, 2009: 7-9.
- [2] 刘威. 组网声纳目标跟踪技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
LIU Wei. Network sonar target tracking technology [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.
- [3] ZHANG Yi, ZHANG Xiaomin, YU Yang, et al. The posi-

- tioning accuracy analysis of mobile multi-base sonar range information based on clusters of UUVs [C]//2022 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). Piscataway, NJ, 2022: 1-6.
- [4] CORALUPPI S. Multistatic sonar localization [J]. IEEE journal of oceanic engineering, 2006, 31(4): 964-974.
- [5] 张小凤, 赵俊渭, 王荣庆, 等. 双基地声纳定位精度和算法研究[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(10): 1471-1473.
ZHANG Xiaofeng, ZHAO Junwei, WANG Rongqing, et al. Research on accuracy of localization algorithm for bistatic sonar[J]. Acta simulata systematica sinica, 2003, 15(10): 1471-1473.
- [6] 张敬宜. 多基地水声目标定位跟踪技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
ZHANG Jingyi. Research on location and tracking technology of multi-base underwater acoustic target[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2023.
- [7] 王永丰, 林晋美, 董雷, 等. 基于跨域信息同步的多基地主动定位方法[J]. 水下无人系统学报, 2024, 32(4): 713-717.
WANG Yongfeng, LIN Jinmei, DONG Lei, et al. Multi-base active location based on cross-domain information synchronization[J]. Journal of unmanned undersea systems, 2024, 32(4): 713-717.
- [8] 徐海信. 海洋环境中双基地声纳探测范围研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.
XU Haixin. Study on detection range of bistatic sonar in marine environment[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018.
- [9] 张小凤. 双/多基地声纳定位及目标特性研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2003.
ZHANG Xiaofeng. Research on bistatic/multistatic sonar localization and target characteristics[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003.
- [10] 徐景峰, 韩树平, 舒象兰, 等. T-R 型双基地声纳定位算法及系统精度研究[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(10): 2234-2238.
XU Jingfeng, HAN Shuping, SHU Xianglan, et al. Research on systemic accuracy of localization algorithm for the type of T-R bistatic sonar[J]. Systems engineering and electronics, 2015, 37(10): 2234-2238.
- [11] 王鼎. 基于加权多维标度的无线信号定位理论与方法[M]. 北京: 电子工业出版社, 2020.
WANG Ding. Theory and method of wireless signal localization based on weighted multidimensional scaling[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2020.
- [12] 张遥. 强直达波干扰下双基地声纳检测与定位方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2020.
ZHANG Yao. Research on detection and location method of bistatic sonar under strong direct wave interference[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2020.

本文引用格式:

- 刘海燕, 姜大伟, 王彬, 等. 基于置信椭圆的双基地声纳定位误差统计方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2025, 46(8): 1601-1608.
LIU Haiyan, JIANG Dawei, WANG Bin, et al. Statistical method for bistatic sonar positioning error based on confidence ellipse[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2025, 46(8): 1601-1608.