

【引用格式】张志鑫, 韩云峰, 李超. 水下多平台协同定位技术研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2024, 7(5): 494-500.

水下多平台协同定位技术研究

张志鑫¹, 韩云峰^{2, 3, 4, *}, 李超⁵

- 海装沈阳局, 黑龙江 哈尔滨 150001;
- 哈尔滨工程大学 水声技术全国重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;
- 海洋信息获取与安全工业和信息化部重点实验室(哈尔滨工程大学), 黑龙江 哈尔滨 150001;
- 哈尔滨工程大学 水声工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
- 中国船舶集团有限公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003)

摘要 随着人类对海洋的逐渐深入开发, 水下多平台作业的需求日益显著, 而平台间的相互位置关系是确保作业效能的重要信息。为此, 介绍了基于声学超短基线定位技术的位置测量方法, 讨论了声传播特性、定位工作原理、误差源及主要误差模型, 通过历史环境参数和仿真分析的方式开展了定位精度和作用距离分析。在此基础上, 以水下作业的典型应用场景, 在不同接收发射深度下, 分析后给出了最优的协同定位策略, 有助于指导水下协同作业。

关键词 多平台; 协同定位; 超短基线

中图分类号 TP399

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2024)05-0494-07

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2024.05.005

Research on Underwater Multi-platform Collaborative Positioning Technology

ZHANG Zhixin¹, HAN Yunfeng^{2, 3, 4, *}, LI Chao⁵

(1. Shenyang Bureau of the Naval Equipment Department, Harbin 150001, China; 2. National Key Laboratory of Underwater Acoustic Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 3. Key Laboratory of Marine Information Acquisition and Security, Ministry of Industry and Information Technology (Harbin Engineering University), Harbin 150001, China; 4. College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 5. No. 710 R&D Institute, CSSC, Yichang 443003, China)

Abstract With further development of the ocean, the demand for underwater multi-platform operation is more and more significant, and the mutual position relationship between different platforms is important to ensure the effectiveness of the operation. In this paper, the position measurement methods based on acoustic ultra-short baseline positioning technology are introduced. The acoustic propagation characteristics, positioning principle, error sources and main error models are discussed. The positioning accuracy and distance are analyzed by means of historical environmental parameters and simulation analysis. Based on the above analysis, in typical application scenarios of underwater operation with different receiving and transmitting depths, the optimal co-positioning strategy is given after analysis, which is helpful to guide underwater cooperative operation.

Key words multi-platform; collaborative positioning; ultra-short baseline

收稿日期: 2024-07-30

作者简介: 张志鑫(1984-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事水下航行器研究。

*通信作者: 韩云峰(1988-), 男, 博士, 副教授, 主要从事水下定位导航技术研究。

基金项目: 国家重点研发计划项目“水下航行器验证与研究”(2021YFC280130)。

0 引言

20世纪90年代初,日本学者 KURAZUME RYO 提出了协同定位的概念^[1]。该概念首先应用在多机器人定位之中,随后的发展中也出现在了陆地上的无线网络定位和卫星定位中,成为了定位导航领域较为热门的关注点^[2-4]。目前主流的定位可以通过合作法和非合作2种方法实现。非合作定位法是指仅利用目标节点与已知位置锚点之间的测量来估计目标节点的位置。相比之下,合作定位法是指一组节点使用相对于锚点和彼此的相对测量来共同估计所有成员的位置,这可以提高定位覆盖范围和定位精度^[5-6]。由多个水下航行器组成的系统编队通过水声通信技术实现相互之间的位置信息交互,使得系统中的每个航行器的定位偏差均可被限定在一定范围内,这即为多水下航行器的协同定位技术^[7-8]。当航行器编队在水下执行任务时,复杂的水下环境和航行器内部传感器的性能会影响航行器的定位精度,可以通过2种方式来提高系统定位精度:1)使用更高精度的传感器,但这会使协同定位系统的成本大幅提高;2)根据AUV的实际运动设计不同的编队方案或设计出性能更好的算法来尽可能地提高定位精度,也是现今水下协同定位技术的主要研究方向。

1 国内外研究现状

协作自主的分布式侦察与探测系统(CADRE)是由美国Bluefin Robotics公司提出的用于解决美国海军水下自主作战中探测与侦察问题的系统,是典型的主从式多AUV协同定位系统。2004年,麻省理工学院的WILLCOX等人提出了移动长基线定位的概念,使用了2艘搭载Sonardyne AvTrack声学通信设备的水面舰在海试实验中应用了水下AUV的协同定位技术^[9]。CADRE系统正是以此移动长基线定位概念作为基础设计出来的。其配置方案中采用了双领航者形式,使不同AUV的性能可以实现互补。同年,美国Idaho大学的EDWARDS等人首次提出了主从式多AUV协同定位导航方法,并进行了相关编队算法的仿真和海试实验^[10]。之后11月,REEDER等人又提出了一种在同一领航艇上搭载2个相距1m

的水听器的单领航艇模式协同定位方法^[11],解决了双领航艇配置较为复杂的问题。2007年,为了减小定位过程中的误差积累并提高定位精度和定位效率,PAULL等人初次提出了一种并行式水下协同定位方法^[12],即在系统中的每个水下航行器都配备高精度导航设备,但此方法由于成本过高等因素,后续的相关研究并不多。2010年,新加坡国立大学的CHITRE等人提出了一种基于水面单信标的多AUV协同定位技术,信标的存在使AUV在航行中可以保持定位误差有界,解决了定位误差积累的问题^[13]。

国内对水下航行器协同定位技术的研究于近十几年间兴起。同时,为了提高系统的隐蔽性,水面舰也逐渐完全被水下航行器所取代。2014年,哈尔滨工程大学高伟等人针对单领航系统观测信息不足、系统可观测性弱的问题,提出了一种由2个AUV交替领航的多AUV协同导航方法并设计出了最优队形。该方法只需要领航AUV与跟随AUV保持一定的几何位置关系,并不需要整个编队队形进行复杂机动的航路变化,增强了主AUV在协同导航时的机动性,其可观测性高于单领航式协同定位方法^[14]。2018年,西北工业大学张福斌等人,针对多AUV协同定位编队影响协同定位性能的问题,创新性地提出了一种基于距离量测的双领航多AUV协同定位编队队形优化方案。方案采取FIM行列式的对数及梯度下降算法仿真分析了多个跟随AUV情况下的最优定位编队队形,非常有效地提高了整个AUV编队的定位精度^[15]。2020年,西北工业大学张立川等人基于后验信息椭圆面积与Fisher信息矩阵,推导出了AUV集群协同导航定位性能评价函数,在此基础上经过仿真分析构建了不同领航情况下具有更高定位精度的最佳编队构型,并验证三主AUV集群编队的特殊编队构型的有效性^[16]。为了解决当前在主从式AUV协同导航解决方案中对其测试结论例如定位能力及编队构型评价方法不一致、不全面的问题,2023年哈尔滨工程大学李倩等人在不简化量测方程的情况下利用矩阵条件数推导得出了一种新的系统定位性能评价函数,并按照从优至劣的顺序依次设计出3领航艇协同定位导航方案下的3种编队方式^[17]。

2 协同定位基本原理及误差分析

2.1 协同定位策略分析

在集群网络协同作业时，大平台通常是一个稳定的、具有较强动力和通信能力的载体，如大型船舶或浮动平台。它可以携带高精度的 USBL 系统，具备更高的定位导航精度和更广的覆盖范围，可以为小平台提供初始位置参考和全局导航信息。而小平台则可以通过自身的灵活性和机动性，在局部环境中进行精细的定位和导航。通过数据共享和信息融合，小平台可以利用大平台提供的全局信息进行路径规划和位置校正，而大平台则可以通过小平台的反馈信息进行动态调整和优化。大平台与小平台之间的协同导航不仅提升了定位精度和导航效率，还增强了系统的适应性和可靠性。

在协同定位过程中，大平台向外广播自身的速度、方位等信息，同时通过超短基线定位系统与小平台间的通信测算两者的相对位置及小平台的速度信息并进行广播，从而使得小平台可以根据其与大平台间的相对关系明确自身的精确方位并进行适当修正。

2.2 超短基线定位基本原理

超短基线水下定位系统通过声学手段测量目标的距离与方位得到目标相对于基阵的坐标，再结合罗经、GPS 等外接定位设备的测量结果，通过整体解算后即可得到目标的大地绝对坐标。

宽带信号体制的超短基线利用各基元测量时延解算目标相对于基阵的坐标，其定位原理示意图如图 1 所示，取 NED (North East Down) 坐标系 (x, y, z)。

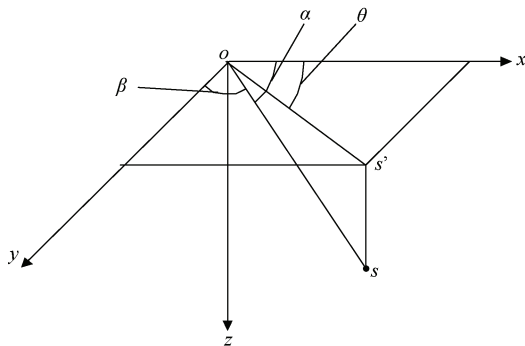


图 1 定位原理几何图
Fig. 1 Geometry of positioning principle

设待定位目标 S ，坐标为 (x, y, z) 。2 个正交的直线阵分别置于 x 轴和 y 轴上，阵的中心为坐标原点。

目标径矢为 \overline{OS} ，它的方向余弦为

$$\cos\alpha = \frac{x}{R} \quad (1)$$

$$\cos\beta = \frac{y}{R} \quad (2)$$

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (3)$$

式中： α 为径矢 \overline{OS} 与 x 轴夹角； β 为径矢 \overline{OS} 与 y 轴夹角； R 为目标斜距。

S' 为 S 在 xoy 平面上的投影，它与 x 轴形成的夹角 θ 即目标水平方位角。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{y}{x} = \tan^{-1} \frac{\cos\beta}{\cos\alpha} \quad (4)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (5)$$

$$z = \sqrt{R^2 - r^2} \quad (6)$$

式中： r 为目标水平斜距； z 为目标深度； α 、 β 和 R 为测量值。测得 α 和 β 值即可按上述诸式计算目标的位置参数。

基阵的尺寸很小，在平面波近似下，如图 2 所示。

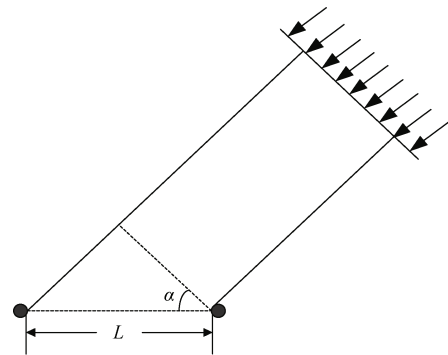


图 2 同轴上 2 个基元的定位原理
Fig. 2 Positioning principle of 2 primitives on the same axis

有：

$$\tau_x = L\cos\alpha/c \quad (7)$$

同理：

$$\tau_y = L\cos\beta/c \quad (8)$$

式中： c 为水中声速； L 为阵元间距； τ_x 为 x 轴 2 阵元接收信号的时延差； τ_y 为 y 轴 2 阵元接收信号的时延差。

可得:

$$x = R \cos \alpha = \frac{c \tau_x R}{L} \quad (9)$$

$$y = R \cos \beta = \frac{c \tau_y R}{L} \quad (10)$$

2.3 超短基线的精度影响因素及误差分析

由上述推导可知, 与定位精度有关的参数为时延 τ_x 和 τ_y 、测量角度 α 和 β 、声速 c 和阵元间距 L 。

2.3.1 时延误差分析

针对水下目标高精度定位有 2 种模式: 同步模式和应答模式。

同步模式是指超短基线和信标接收一致的同步信号, 由统一的同步信号进行触发和控制。信标在入水前通过同步器进行授时同步, 声信标通过内部的高精度时钟守时, 与超短基线系统的时钟保持一致。同步模式的时延估计主要取决于钟差, 引起的定位误差为 $c(\Delta\tau)$ 。

应答模式是指超短基线按照设定的周期向信标发射询问信号, 声信标检测到询问信号后, 回复固定编码的定位脉冲, 超短基线检测信号完成定位。应答模式下时延估计为 μs 级, 可以忽略不计^[18-19]。

2.3.2 基阵开角误差分析

结合超短基线技术参数, 按照声呐方程可知:

$$\text{SNR}_R = \text{SL} - \text{TL} - (\text{NL} - \text{DI}) \quad (11)$$

式中: SL 为声信标声源级, $\text{SL} = 185 \text{ dB}$; NL 为平台背景噪声谱级, $\text{NL} = 55 \text{ dB}/\sqrt{\text{Hz}}$; DI 为指向性指数, $\text{DI} = 0$ (无指向性)。TL 为声传播损失, 为介质传播损失与扩展损失叠加(扩展损失以标准球面扩展损失计算), 得到在斜距 6 km 时, 声传播损失为

$$\text{TL} = 20 \lg(R) + \alpha * R \approx 85 \text{ dB} \quad (12)$$

SNR_R 为超短基线系统输入信噪比, 可知超短基线定位系统在远距离时, 可获得 1 dB 左右的输入信噪比。

时延估计误差 σ_D 与超短基线工作频率等参数有关, 计算方式如下:

$$\sigma_D = \left(\frac{1}{4\pi^2}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{\sqrt{\text{SNR}}} \frac{1}{\sqrt{T}w} \frac{1}{f_0} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{w^2}{12f_0^2}}} \quad (13)$$

式中: SNR 为信噪比比值; T 为信号脉宽; w 为信号带宽; f_0 为信号中心频率。

时延估计误差 $\sigma_\tau = \sqrt{2}\sigma_D$, 系统角度测量是通过阵元输出信号间的时延差测量得到的, 在假定 x 、 y 轴夹角测量误差相同时(设为 σ_θ), 超短基线定位系统声学定位误差 ε_s 如下:

$$\varepsilon_s / R \approx \sqrt{2} \frac{1}{\cos \theta} \frac{c}{L} \sigma_\tau \quad (14)$$

式中: c 为声速; L 为阵元间距; σ_τ 为时延差检测精度; θ 为目标与坐标轴法线夹角^[20]。

定位信号采用 24 ms, 带宽为 8 kHz~16 kHz 的 LFM 信号得到最终超短基线定位误差, 如表 1 所示。

表 1 不同开角下超短基线声学定位精度
(1 dB 输入信噪比)

Table 1 Accuracy of ultra-short baseline acoustic positioning at different opening angles
(with input SNR of 1 dB)

开角/(°)	超短定位误差 (RMS)
30	2.5%R
60	4.3%R
80	12.5%R
86.5	35.5%R

由表 1 可知, 通过理论仿真分析, 工作频率为超短基线在保证定位系统输入信噪比在 1 dB 以上时, 在与声学基阵面垂直开角 $\pm 60^\circ$ 范围内, 超短基线定位精度能够达到 4.3%R。

2.3.3 声速剖面误差分析

由

$$x = \frac{c \tau_x R}{L} \quad (15)$$

$$y = \frac{c \tau_y R}{L} \quad (16)$$

可知, 当计算声速与实际声速存在误差时, 定位也存在误差。

取声速为 1 500 m/s, 每 1 m/s 声速误差为 $\varepsilon = \Delta c / c$, 即引起约 0.066 7%R 定位误差。

2.3.4 安装误差和姿态角误差分析

基阵各阵元与结构间为刚性连接, 但在长时间使用或运输后仍会存在一定形变, 从而在定位解算过程中造成一定偏差, 因此需要在使用前对各部分进行重新校准。由分析可知: 安装偏差每 0.1° 引起 0.2%R 定位误差; 姿态传感器偏差每 0.1° 引起 0.2%R 定位误差^[21]。

2.3.5 整体定位误差分析

由上述分析可知，主要在以下 5 个方面可以对定位精度造成影响。

1) 时延导致的定位误差。

$$\varepsilon_1 = \frac{c(\Delta\tau)}{R} \times 100\%R$$

2) 基阵开角导致的定位误差 ε_2 。

3) 声速剖面误差导致的定位误差。

$$\varepsilon_3 = \Delta c \times 0.0649\%R$$

4) 安装角度精度导致的定位误差。

$$\varepsilon_4 = \theta_1 \times 0.2\%R$$

5) 姿态角精度导致的定位误差。

$$\varepsilon_5 = \theta_2 \times 0.2\%R$$

标准误差为

$$\sigma = \sqrt{(\varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_4)^2 + (\varepsilon_5)^2}$$

3 典型场景精度及作用距离分析

3.1 场景精度分析

若 3 个水听器位于 2 个互相垂直的基线上（即在 x 和 y 轴上），声信标发出的信号到基阵原点的声线与 x 轴及 y 轴的夹角分别为 θ_{mx} 和 θ_{my} 。

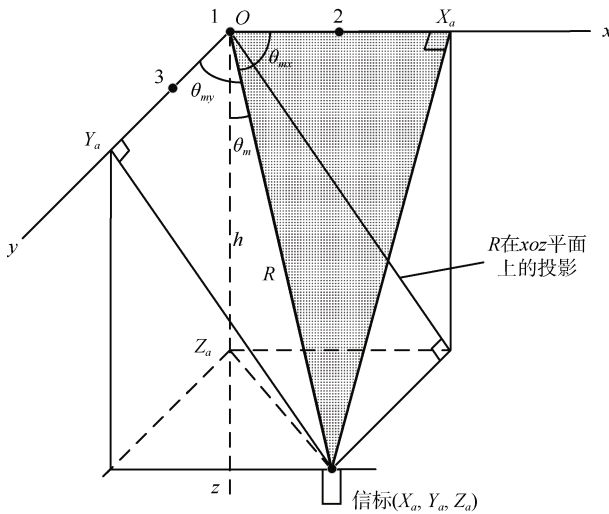


图 3 超短基线定位系统解算图

Fig. 3 Resolving diagram of ultra-short baseline positioning system

则有：

$$X_a = R \cos \theta_{mx} = R \frac{\lambda \phi_{12}}{2\pi d} = R \frac{\lambda f \tau_x}{d} \quad (17)$$

$$Y_a = R \cos \theta_{my} = R \frac{\lambda \phi_{13}}{2\pi d} = R \frac{\lambda f \tau_y}{d} \quad (18)$$

式中： θ_{mx} 和 θ_{my} 是由相位差 ϕ 测量得到的，进而可推导出与时延 τ 的关系； λ 为波长； d 为阵元间距。

以 X_a 斜距相对定位精度为

$$\frac{\Delta X_a}{R} = \frac{\lambda f \tau_x}{d} \left(2 \frac{\Delta c}{c} + \frac{\Delta T}{T} + 2\pi f \frac{\Delta \tau_x}{\tau_x} - \frac{\Delta d}{d} \right)$$

一个分量的斜距相对均方误差记为

$$\delta_x^2 = \sigma_x^2 / R^2$$

即

$$\delta_x^2 = \left(\frac{\lambda f \tau_x}{d} \right)^2 + \left[\left(2 \frac{\Delta c}{c} \right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T} \right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d} \right)^2 \right] \left(\frac{\lambda f \Delta \tau_x}{d} \right)^2$$

同理，有：

$$\delta_y^2 = \left(\frac{\lambda f \tau_y}{d} \right)^2 \left[\left(2 \frac{\Delta c}{c} \right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T} \right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d} \right)^2 \right] + \left(\frac{\lambda f \Delta \tau_y}{d} \right)^2$$

可以认为 2 个位置分量是相互独立的，因而斜距相对位置均方根误差记为 $\delta = \sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2}$ 。通常情况下，时间测量误差和声速测量误差都可以被控制在极低的水平，两者相对误差均可以达到 10^{-3} 量级。阵元间距误差水平主要由安装精度决定，相对误差也在 10^{-3} 量级。因此，相位测量误差是导致定位误差的主要因素。

由上述分析可知阵元间的相位差与 θ_{mx} 和 θ_{my} 有关。在只考虑相位差测量误差时，以典型场景 $f_0=20$ kHz、 $d=0.04$ m、 $c=1500$ m/s、应答器深度 $h=4000$ m、相位差测量误差 $\Delta\phi_{12}=1^\circ$ ，即以时延 $\tau_x=0.14$ μ s 为例，在不同的 θ_m 值下计算的 2 种相对定位误差如表 2 所列。表 2 也列出了 x 维的定位误差绝对值。

表 2 不同时延差测量误差下的时延差测量相对误差
Table 2 Relative errors of time delay difference measurement under different time delay difference measurement errors

$\theta_{mx} / (^\circ)$	τ_x / μ s	$\delta_x / R / \%$	$\delta_x / x / \%$	$\delta_x /$ m
85	2.32	0.52	5.98	21.0
80	4.63	0.52	3.003	21.4
70	9.13	0.52	1.522	22.4
60	13.33	0.52	1.0417	24.7
50	17.14	0.52	0.8103	28.5
40	20.43	0.52	0.6799	34.0
30	23.10	0.52	0.6014	45.0
20	25.06	0.52	0.5543	65.9

由表2可见, 随 θ_{mx} 的增大, 水平位置误差的绝对数值增大, 斜距相对定位误差 δ_x/R 不变, 而位置相对定位误差 δ_x/x 则随 θ_{mx} 减小而减小。在小角度时两者比较接近。这是因为在大 θ_{mx} 值时, 阵元间接收到信号的时延差接近于0, 此时时延差测量的相对误差很大, 因而 δ_x/x 也很大。而随着 θ_{mx} 的减小, 水平位置 x 增大, 基阵与应答器的斜距随之增大。此时因时延差测量的相对误差减小, 因而 δ_x/x 减小, 最终与 δ_x/R 趋于一致。

3.2 作用距离分析

针对夏季南海海域条件下的协同定位场景, 分析发射平台与接收平台使用超短基线系统的作用距离, 设置超短基线的工作频率为8 kHz~16 kHz。采用Bellhop声场仿真的方式进行作用距离分析。以8 kHz~16 kHz声信标作为发射声源, 设置发射声源级为185 dB, 工作深度为2~1 000 m, 水温10℃时的吸收损失系数为1.5 dB/km, 接收端自噪声谱级为55 dB。深海噪声谱级如图4所示, 由图中数据可知, 在8 kHz~16 kHz的工作频率下, 海水背景噪声谱级在40 dB以下, 远小于自噪声谱级。

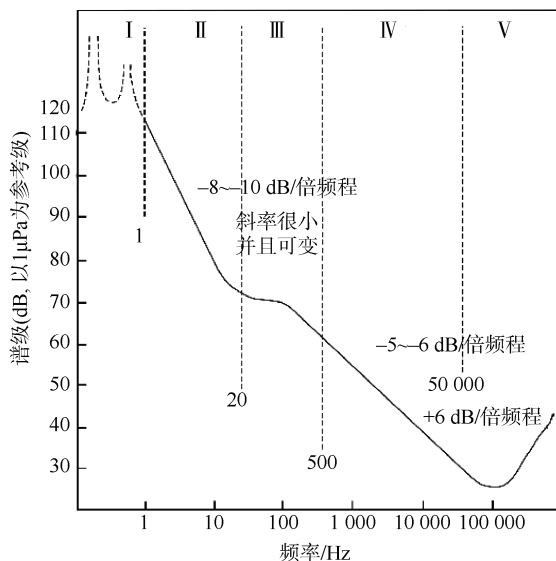


图4 深海背景噪声谱级^[22]

Fig. 4 Background noise spectrum level^[22]

以1 dB信噪比作为声信标能够高精度定位的信噪比门限, 根据被动声呐方程可知, 传播损失门限为90 dB。为了保证定位精度, 仅使用直达声线论证作用范围。仿真所使用的声速剖面数据为夏季南海

的声速剖面。

接收平台在300 m定深航行, 发射平台工作深度为1 000 m, 信标为全指向性, 声源深度为1 000 m时, 传播损失随传播距离变化的仿真结果如图5所示, 以传播损失门限90 dB进行观测, 最远传播距离约为10 km。

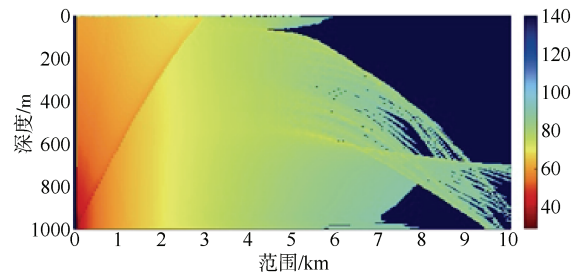


图5 声源深度为1 000 m

Fig. 5 Source depth of 1 000 m

4 结束语

综上所述, 斜距相对定位精度主要受相位差测量误差的影响, 而在实际情况中相位差的实际大小与其测量误差并无直接联系, 从而使定位相对误差保持在一个较小的数值上。随着 θ_{mx} 和 θ_{my} 的减小, 阵元间的相位差增大, 声速、时间以及阵元间距的误差的影响愈来愈大。特别是测时误差和声速误差受声线弯曲的影响而加大。因此, 超短基线系统只在基阵下方一个锥度范围内斜距相对定位精度较高。

为此, 在有人无人协同场景中, 根据典型的作业场景和环境, 在不同接收发射深度下, 论文给出了最优的协同定位策略, 有助于指导水下协同作业。

参考文献

- [1] 刘亚龙. 多水下航行器协同定位算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
- [2] WYMEERSCH H, LIEN J, WIN M Z. Cooperative localization in wireless networks[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97 (2): 427-450.
- [3] 田世伟, 戴卫恒, 李广侠, 等. 协同定位研究综述[C]// 第四届中国卫星导航学术年会. 北京: 中国卫星导航系统管理办公室, 2013.
- [4] KIA S S, ROUNDS S, MARTINEZ S. Cooperative localization for mobile agents[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2016, 36 (2): 86-101.
- [5] KURAZUME R, NAGATA S, HIROSE S. Cooperative

- positioning with multiple robots[C]// 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Diego: IEEE, 1994.
- [6] 武长兴, 陈军. 非合作水下目标定位的解析方法[J]. 全球定位系统, 2007, 32(4): 18-20, 25.
- [7] PAPADOPOULOS G, FALLON M F, LEONARD J J, et al. Cooperative localization of marine vehicles using nonlinear state estimation[C]// 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Taipei: IEEE, 2010.
- [8] WEBSTER S E, EUSTICE R M, SINGH H. Advances in single-beacon one-way-travel-time acoustic navigation for underwater vehicles[J]. The International Journal of Robotics Research, 2012, 31(8): 935-950.
- [9] VAGANAY J, LEONARD J J, CURCIO J A, et al. Experimental validation of the moving long base-line navigation concept[C]// 2004 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles. Sebasco: IEEE, 2004.
- [10] EDWARDS D, BEAN T A, ODELL D L, et al. A leader-follower algorithm for multiple AUV formations [C]// 2004 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles. Sebasco: IEEE, 2004.
- [11] REEDER C A, ODELL D L, OKAMOTO A, et al. Two-hydrophone heading and range sensor applied to formation-flying for AUVs[C]// Oceans '04 MTS/IEEE Techno-Ocean '04. Kobe: IEEE, 2004.
- [12] PAULL L, SAEEDI S, SETO M, et al. AUV navigation and localization: a review[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2014, 39(1): 131-149.
- [13] CHITRE M. Path planning for cooperative underwater range-only navigation using a single beacon[C]// 2010 International Conference on Autonomous and Intelligent Systems. Povo de Varzim: IEEE, 2010.
- [14] 高伟, 刘亚龙, 徐博, 等. 基于双主交替领航的多 AUV 协同导航方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014(6): 735-740.
- [15] 马朋, 张福斌, 徐德民. 基于距离量测的双领航多 AUV 协同定位队形优化分析[J]. 控制与决策, 2018, 33(2): 256-262.
- [16] 张立川, 屈俊琪, 潘光, 等. 基于几何解释的集群 AUV 协同定位误差及编队构型分析[J]. 西北工业大学学报, 2020, 38(4): 755-765.
- [17] 李倩, 黄鸿殿, 徐贵鹏, 等. AUV 协同定位性能与编队构型分析[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(7): 203-213.
- [18] 李萍. 高刷新率超短基线数据后处理技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
- [19] 李丹丹. 超短基线数字信号处理平台设计及多标定位算法的实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
- [20] 田坦. 水下定位与导航技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [21] 郑翠娥. 超短基线定位技术在水下潜器对接中的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
- [22] 刘伯胜, 雷家煜. 水声学原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010.

(责任编辑: 曹晓霖)