

[引用格式] 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.

基于跨域信息同步的多基地主动定位方法

王永丰¹, 林晋美¹, 董雷², 邱赛³

(1. 中航航空电子有限公司, 北京, 100086; 2. 中国电子科技集团公司第十五研究所, 北京, 100083; 3. 中国海洋大学信息科学与工程学部, 山东 青岛, 266100)

摘要: 信息同步问题是多基地主动声呐系统应用的难点之一。现有研究和应用中通常假设接收站已知发射站脉冲发射时刻、声源空间位置信息以及发射波形参数, 能够据此计算回波声程并对目标进行定位, 同时获得回波信号时间处理增益, 但这些条件在实际中并不一定能满足。文中讨论了不同应用场景中信息同步面临的障碍和可能采取的方案; 然后针对收发站之间存在外部通信链路, 但链路不可靠或时延不确定的情况, 提出了一种利用跨域信息同步实现多基地主动定位的方法; 该方法利用直达波先于目标回波到达接收站这一基本物理规律, 接收站先通过外部链路获得发射站位置和波形参数信息, 并利用直达波到达时刻和站间距离估计发射时刻, 具有较高的工程可行性; 最后, 对影响时间和位置同步精度的因素以及由时空信息误差所引起的目标定位误差进行讨论和仿真分析。

关键词: 跨域; 信息同步; 多基地; 主动声呐

中图分类号: TJ6; U675.7

文献标识码: A

文章编号: 2096-3920(2024)04-0713-05

DOI: 10.11993/j.issn.2096-3920.2024-0085

Multi-Base Active Location Based on Cross-Domain Information Synchronization

WANG Yongfeng¹, LIN Jinmei¹, DONG Lei², QIU Sai³

(1. AVIC Avionics Co, Ltd, Beijing 100086, China; 2. North China Institute of Computing Technology, Beijing 100083, China; 3. Faculty of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The information synchronization problem is one of the difficulties in the application of multi-base active sonar systems. In existing research and application, it is usually assumed that the receiving station knows the pulse transmission time of the transmitting station, the spatial location information of the sound source, and the transmission waveform parameters, thus can calculate the echo sound path, locate the target, and obtain the time processing gain of the echo signal. However, these conditions may not be met in practice. The obstacles and possible solutions for information synchronization in different application scenarios were first discussed. A multi-base active location method based on cross-domain information synchronization was then proposed for the situation where there is an external communication link between the receiving and transmitting stations, but the link is unreliable, or the delay is uncertain. This method used the basic physical law that the direct wave arrives at the receiving station before the target echo. The receiving station first obtained the position and waveform parameter information of the transmitting station through the external link and then estimated the transmission time according to the direct wave arrival time and the distance between stations. It had high engineering feasibility. Finally, the factors affecting the accuracy of time and position synchronization and the target positioning error caused by the time and space information error were discussed and simulated.

Keywords: cross-domain; information synchronization; multi-base; active sonar

收稿日期: 2024-05-23; 修回日期: 2024-07-19; 录用日期: 2024-08-06.

作者简介: 王永丰(1978-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为水声探测.

OPEN ACCESS

0 引言

传统单基地主动声呐系统中,发射站与接收站在同一位置,通过接收和处理目标在声波入射方向上的回波进行探测。潜艇呈长条形,单基地目标反射强度随声波入射舷角大幅度变化^[1-2]。目标潜艇利用这一特性,在侦听到主动声呐探测脉冲后调整航向,可使回波信号强度降低,导致单基地主动声呐作用距离下降,从而降低被探测到的概率^[3]。同时,由于水声信道的多途效应,传播损失不是随距离单调增加的平滑曲线,而是存在较大起伏,特别是在浅海环境下,单基地主动声呐在实际应用中探测性能不稳定^[4]。

多基地主动声呐系统中,发射站与接收站位于不同空间位置,通常处于目标的不同方位上。此时目标反射强度不但与入射角有关,还与接收机和声源之间的分置角有关^[5-6]。由于接收站工作在被动状态,目标潜艇无法获取其位置,因此无法实施有效的机动规避。探测方通过组合使用不同方位和距离上的多个接收机,能够避开目标反射强度极小方位,同时克服信道起伏的影响,从而提高目标探测概率。

鉴于多基地主动声呐系统的潜在优势,近20年来,学术界针对多基地主动声呐关键技术和效能分析开展了大量研究工作^[7-8],相关理论已经逐渐完善和成熟。然而,几乎所有多基地相关的研究工作都默认收发之间已经实现了信息同步,但实际工程中,接收站与发射站之间的时空信息同步往往存在困难^[9]。文中针对这一问题,首先讨论不同应用场景中信息同步面临的障碍和可能采取的方案;然后针对收发站之间存在外部通信链路、但链路不可靠或时延不确定的情况,提出一种利用跨境信息同步实现多基地主动定位的方法;最后对时空同步误差所引起的目标定位误差进行分析。

1 多基地主动定位模型

就收发之间信息同步问题而言,可以将多基地主动声呐系统简化为收发分置的双基地情形进行讨论。如图1所示,发射声源 S 、目标 T 和接收机 R 在几何上构成1个三角形。收发之间的距离为 d ,目标与声源之间的距离为 r_S ,目标与接收机之间的距离为 r_R ,目标回波与直达波之间的夹角 $\theta = \angle SRT$ 。

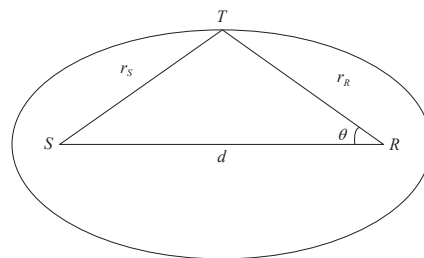


图1 双基地主动声呐定位示意图

Fig. 1 Target location of bistatic active sonar

考虑接收机 R 对目标 T 定位:当 S 、 R 的位置、波形发射时刻和到达接收机时刻已知,则能够根据声速计算出总声程 r_S+r_R ,目标位置被约束到以 S 和 R 为焦点的外接等时椭圆上;在此基础上,若接收机 R 本身能够测向,利用 θ 估计值可对目标进行定位;如果接收机 R 不具备测向能力,则需要通过多个接收机和声源形成的等时椭圆进行交叉定位,典型例子如多个被动全向声呐浮标和主动声源浮标配合组成的多基地探测系统。

上述定位过程中,为计算回波声程并对目标进行测距定位,接收站需知道发射站的探测脉冲发射时刻和声源空间位置信息;同时为得到回波信号时间处理增益,接收站还需获得发射波形参数,即接收站需要实现与发射站之间的信息同步。

2 完全信息同步

当接收站与发射站之间存在可靠且实时的链路时,可以做到二者之间完全信息同步,实现多基地主动探测。目前已经在工程上使用的系统大多属于这种情形,主要包括以下场景。

1) 固定式声呐系统。接收站和发射站在建设完成后不再改变位置,二者之间可以通过有线连接或由同一岸基声呐站干端系统进行处理,共用时间基准;发射站脉冲发射时刻和波形参数可以实时地发送给接收站,实现高精度和可靠的信息同步^[10]。

2) 同平台声呐系统。例如,舰壳声呐与拖曳声呐组成的双基地系统、反潜直升机吊放声呐与声呐浮标组成的多基地系统以及主动声源浮标和被动声呐浮标组成的多基地系统等。此时接收站与发射站之间能够通过平台设备间的总线网络进行通信,实现时间和参数同步。需要指出的是,在这类系统中,接收站和发射站的空间位置仍然存在较大误差,如采用无线电定位体制的航空

声呐浮标系统^[11-12]。

3 跨域信息同步

对于大部分应用场景而言,接收机与发射机之间的通信无法保证实时性和可靠性,包括水面舰艇编队不同舰艇声呐之间、水面舰艇声呐与舰载反潜直升机吊放声呐之间、多架反潜直升机吊放声呐之间、反潜直升机吊放声呐与固定翼反潜机浮标系统接收机之间,以及水面舰艇声呐与航空声呐浮标系统接收机之间。上述场景中,发射站和接收站之间通常可以通过无线指挥数据链路通信。这类链路能够相互交换平台位置等区域态势信息,但它们不是专门为实时信息同步所设计的,信号链路延迟不确定,且通常采用校验和重传等传输控制策略,难以用于精确时间同步^[13]。此外,声呐属于任务系统中的传感器子系统,在信息网络中通常位于指挥控制系统的下一级,与数据链和导航系统之间通常没有直连接口。声呐系统对外通信通常需要通过指挥控制系统转发,改变数据流和接口关系往往涉及平台不同专业系统主管部门和厂商之间的协调工作,实践中困难重重。

较为现实的做法是,声呐接收站通过指挥系统中转获得发射站的位置和波形参数信息,同时通过直达波到达时刻反推脉冲发射时刻,在此基础上进行目标定位解算,如图2所示。

该方法利用无线电链路实现对延迟和传输可

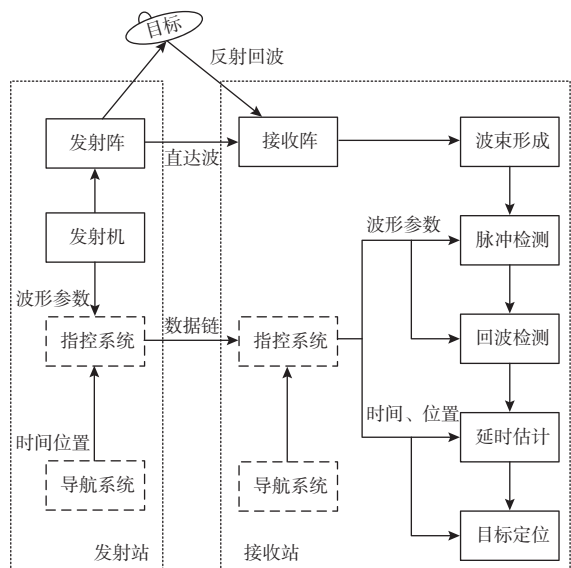


图2 跨域信息同步处理流程

Fig. 2 Synchronization process of cross-domain information

靠性相对不敏感的收发站空间位置和波形参数的信息同步;利用水声信道实现延迟敏感的时间同步。其最大优点是无需改变现有的平台指控和通信系统架构,在现有硬件基础上修改软件即可实现。

其中,发送站位置精度取决于其自身定位误差和接收站态势刷新率。水面和空中平台在卫星导航系统支持下已可实现米级甚至亚米级定位。考虑到水面舰艇正常航行和直升机悬停漂移运动速度,秒级更新间隔可满足要求。时间同步方面,可借鉴雷达领域的一些方法^[14],同时必须考虑水声信道和无线电信道的不同之处。相较于空气中的电磁波,海洋中声波传播规律复杂,时间同步误差除与收发站位置精度有关外,还与声速和声传播路径有关。多基地声呐系统可在接收站测量现场声速,以便更准确地计算发射站距离。对于深海远程的情况(如汇聚区),还需要进一步测量声速剖面,进行海区声场建模,对声线弯曲情况进行补偿^[15]。

提高时间精度的另外一种方法是将声源发射时刻与导航系统时间对齐,接收站和发射站之间约定发射时刻间隔,例如仅在每10s的整数倍时刻发射,接收机大致估计延时后即可得到精确发射时刻。

上述几种应用场景中,除被动浮标外,接收站可能同时具备发射能力。各部声呐位置和波形参数可以通过区域数据链网络广播,从而组成多发多收的多基地主动声呐系统。异型主动声呐一般工作在不同频段,相互影响较小。同型主动声呐也可以设置为不同频点,同时为了消除直达波掩蔽可能导致的盲区,各部声呐脉冲重复周期不能完全固定,可在量程时间基础上加入随机延时。

4 定位误差分析

同步精度及其对最终探测性能的影响取决于具体场景和实现。若约束条件能够明确,就可以确定主要工作参数的误差范围,然后采用数值仿真方法来分析同步误差对目标定位精度的影响。

假设反潜直升机吊放声呐与固定翼反潜机所投放的被动全向声呐浮标组成多基地探测系统。其中直升机吊放为声呐发射端,3枚被动全向浮标为接收端。反潜直升机通过数据链将其位置和主动脉冲参数发送给固定翼反潜机,后者处理声呐浮标接收到的吊放声呐主动信号,利用直达波检测,

结合直升机位置信息计算脉冲发射时刻,然后根据多枚浮标接收到的回波传播时间计算目标位置。

将各浮标回波到达时刻记作 $t_{\Sigma i}$,其中 $i=1, 2, \dots, n$ 为接收站编号,可得目标交叉定位误差方程为

$$\begin{cases} c_0 t_{\Sigma i} = \sqrt{(x-x_s)^2 + (y-y_s)^2} + \sqrt{(x-x_{Ri})^2 + (y-y_{Ri})^2} \\ G = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: (x, y) 为目标位置; (x_s, y_s) 为声源位置; (x_{Ri}, y_{Ri}) 为浮标位置; c_0 为水中声速; (σ_x, σ_y) 为定位误差, G 为几何精度因子。

仿真计算参数设定为水下声速1500 m/s,声速测量误差0.5 m/s;3枚被动全向浮标的发射-接收基线长度分别为2、2和1.6 km,波达时间测量误差 σ_t 分别为1、5和10 ms,接收站位置测量误差 $\sigma_s=5$ m,目标定位误差仿真结果如图3所示。

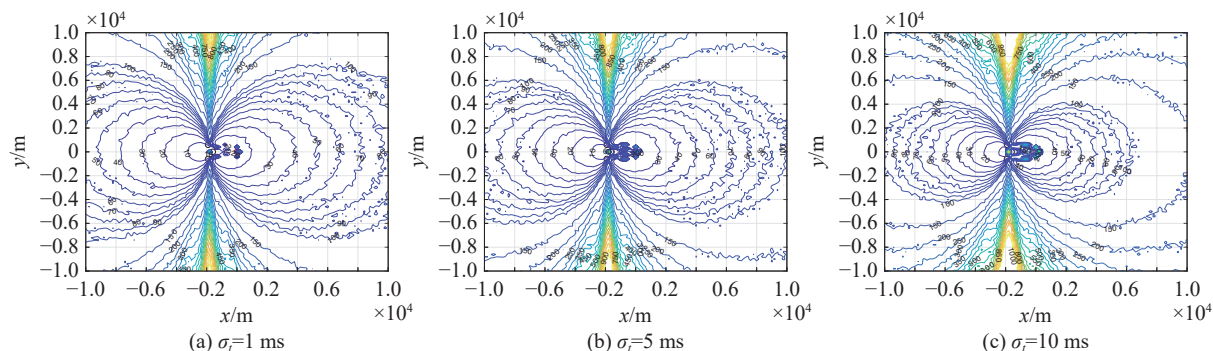


图3 不同时间测量误差情况下3枚被动浮标目标定位GDOP分布曲线

Fig. 3 GDOP distribution curves of target position for three passive sonobuoys under different timing errors

声速值和测量误差不变,接收站布放位置不变,取波达时间测量误差 $\sigma_t=1$ ms,接收站位置测量

误差 σ_s 分别为10、20和30 m,目标定位误差仿真结果如图4所示。

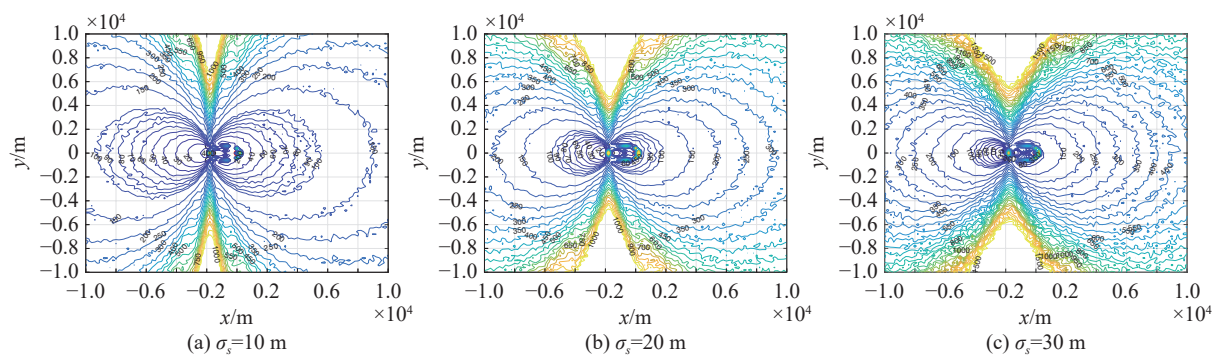


图4 不同位置测量误差情况下3枚被动浮标目标定位GDOP分布曲线

Fig. 4 GDOP distribution curves of target position for three passive sonobuoys under different position errors

由仿真结果可见,当目标位于吊放声呐(声源)附近、3枚浮标围成的三角形内部或声源-接收站连线垂线远端时,通过浮标接收回波延时对目标定位的误差较大。相比于时间同步误差,接收站位置误差引起的定位误差更大。由于吊放声呐本身具有测向测距能力,对于近距离目标有较高的探测概率和定位精度,可以补偿浮标接收目标定位的不足。对于远离吊放声呐的区域,可以通过优化接收浮标位置分布、增加接收浮标数量,

或者采用被动定向浮标进一步提高目标定位精度。

5 结束语

文中提出的跨域信息同步方法利用现有硬件资源实现,不需要建立收发站间专门的同步链路,具有较好的工程可实现性。该方法的目标定位精度受到收发站空间分布配置、收发站自身定位精度及直达波延时估计精度等多重因素影响。文中仅针对一种假设的航空声呐应用场景进行了仿真

分析。未来还需要针对不同场景进行建模仿真并开展试验验证工作。

参考文献:

- [1] KUMAR S, CHINTHAGINJALA R, ANBAZHAGAN R, et al. Submarine acoustic target strength modeling at high-frequency asymptotic scattering[J]. *IEEE Access*, 2024(12): 4859-4870.
- [2] ZHAO S, LI L R, ZHANG X H, et al. Simulation of backscatter signal of submarine target based on spatial distribution characteristics of target intensity[C]/2021 OES China Ocean Acoustics(COA), Harbin, China: COA, 2021: 234-239.
- [3] 罗光成, 张丹, 杨日杰. 潜艇规避运动模型建模与仿真[J]. *舰船电子工程*, 2011, 31(9): 97-99.
LUO G C, ZHANG D, YANG R J. Modeling and simulation of the submarine evade movement[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2011, 31(9): 97-99.
- [4] 朱堃. 主动声呐检测信息原理(下册): 主动声呐信道特性和系统优化原理[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [5] 张小凤. 双/多基地声呐定位及目标特性研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2003.
- [6] KIM K, PARK S J, LEE K, et al. Submarine bistatic target strength analysis based on bistatic-to-monostatic conversion[J]. *The Journal of the Acoustical Society of Korea*, 2024, 43(1): 138-144.
- [7] 邹吉武. 多基地声呐关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [8] 鞠建波, 祝超, 胡胜林. 反潜巡逻机应召布放多基地声呐拦截阵搜潜效能研究[J]. *指挥控制与仿真*, 2017, 39(3): 55-59.
JU J B, ZHU C, HU S L. Efficiency research for on-call anti-submarine by anti-submarine patrol aircraft dropping interception of multistatic sonar array[J]. *Command Control & Simulation*, 2017, 39(3): 55-59.
- [9] 张浩宇, 韩一娜, 赵伟康, 等. 多基地声呐融合探测关键技术研究[J]. *水下无人系统学报*, 2018, 26(5): 456-464.
ZHANG H Y, HAN Y N, ZHAO W K, et al. Key technologies of multistatic sonar fusion detection[J]. *Journal of Unmanned Undersea Systems*, 2018, 26(5): 456-464.
- [10] 许乔, 张元凯, 蔡惠智. 基于 IEEE 1588 的多基地声呐湿端时钟同步技术研究[J]. *计算机测量与控制*, 2014, 22(7): 2223-2225.
XU Q, ZHANG Y K, CAI H Z. Research on clock synchronization of underwater part of multistatic sonar based on IEEE 1588[J]. *Computer Measurement & Control*, 2014, 22(7): 2223-2225.
- [11] 芦俊. 一种浮标位置修正算法[J]. *舰船电子工程*, 2021, 41(5): 143-145.
LU J. A buoy position correction algorithm[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2021, 41(5): 143-145.
- [12] GWAK S Y. Target localization for difar sonobuoy compensated bearing estimation and sonobuoy position error[J]. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 2020, 21(2): 221-228.
- [13] LASASSMEH S M, CONRAD J M. Time synchronization in wireless sensor networks: A survey[C]/IEEE SoutheastCon 2010 (SoutheastCon), Concord, NC, USA: IEEE, 2010: 242-245.
- [14] SONG H B, WEN G J, LIANG Y Y, et al. Target localization and clock refinement in distributed MIMO radar systems with time synchronization errors[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2021, 69: 3088-3103.
- [15] ZHANG T W, YAN L, HAN G J, et al. Fast and accurate underwater acoustic horizontal ranging algorithm for an arbitrary sound-speed profile in the deep sea[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 9(1): 755-769.

(责任编辑: 靳潇倩)