

# 基于扩频通信的深海水声定位技术研究

温韶娟, 李雨桐, 张国恒, 查品德

(北京长城电子装备有限责任公司, 北京 100082)

**摘要** 深海空间站在母船伴随保障时面对恶劣天气存在安全风险及水下多平台作业低效的问题, 传统的单一的保障船模式仅依靠超短基线等水下定位方法, 水下平台定位速度慢、误差大、相互感知协作困难, 已无法满足要求。提出了一种基于通信信标的深海水声定位方法, 采用宽带扩频通信进行时延估计, 然后利用已建立的等效声速表查找等效声速, 完成声线修正, 从而提高了深海水声定位精度。并在实验室进行了深海水文条件下估计目标运动轨迹仿真, 仿真结果表明该方法能够有效的提高水声定位精度。

**关键词** 深海水声定位; 直扩测时; 声线修正

中图分类号 TB568

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2021)03-0206-05

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2021.03.007

## Deep Sea Underwater Acoustic Positioning Technology Based on Spread Spectrum Communication

WEN Shaojuan, LI Yutong, ZHANG Guoheng, CHA Pinde

(Beijing Great Wall Electronic Equipment Co., Ltd, Beijing 100082, China)

**Abstract** The deep sea space station is faced with safety risks in severe weather and low efficiency of underwater multi-platform operation when accompanied by the mother ship for support. The traditional single support ship mode only relies on the underwater positioning methods such as ultra-short baseline, etc. The slow positioning speed, big error and difficult mutual awareness and collaboration of the underwater platform can no longer meet the requirements. A deep sea underwater acoustic positioning method based on communication beacon is proposed in this paper. The time delay estimation is carried out by using the broadband spread spectrum communication, and then the equivalent sound velocity is found by using the established equivalent sound velocity table to correct the sound velocity. In this way, the deep sea underwater acoustic positioning accuracy is improved. Besides, the simulation of estimation target motion trajectory in deep sea hydrological conditions is conducted, and the simulation results show that this method can effectively improve the underwater acoustic positioning accuracy.

**Key words** deep sea underwater acoustic positioning; direct-sequence spread-spectrum time measurement; correction of sound velocity

## 0 引言

深海空间站可利用站载(物理、化学、生物检测系统及光、声学)观察系统, 直接操控所携带的无缆自治潜器、水下吊车、有缆遥控作业潜器及其

配套的作业工具, 可满足不同应用对象的具体作业要求, 长周期、高效率开发深海资源, 开展深海原位科学研究等作业任务。研究确定包括水下定位导航系统服务保障在内的深海空间站服务保障模式, 是确保深海空间站国家重大科技项目实施的重要

基础,也是确保未来深海空间站工程应用可靠、高效开展的关键所在。传统单一的保障船模式仅依靠超短基线等水下定位方法,水下平台定位速度慢、误差大、相互感知协作困难,已无法满足要求,需要探索水下多平台协同作业保障方案。

深海空间站在母船伴随保障时面对恶劣天气存在安全风险及水下多平台作业低效的问题,构建深海环境中百平方千米级的水下定位、导航和通信一体化组网系统,研究其对“深海空间站”的服务保障模式,服务国家深海战略、填补深海一体化水下通信导航产品空白。

深海水声定位<sup>[1-3]</sup>一直以来都是各国研究的重点和难点。随着水声通信在军事上、战略上越来越普遍的应用,对深海水声定位稳定性、准确性、实时性也提出了更高的要求。传统的水声定位系统采用的是 CW 脉冲测时,测时误差为脉宽长度。扩频测时采用伪随机码测时算法,伪随机码抗干扰、抗多途和抗多普勒的能力强,尤其是在低信噪比下测时精度好。当采用 1 个周期的伪随机码序列作为发射信号,接收机接收到伪随机码后获取发射时间和读取本地时间,这个时间差就是发射端与接收端的时间。不难看出把码片选得很窄,就可以实现高精度的测时,时间的分辨率即为 1 个码片<sup>[4-5]</sup>。

海洋环境特性中海水声速度是不均匀分布的,由射线声学可知,声音在海洋信道中的传播声线是弯曲行进的,且声速沿垂直深度变化越快,声线就越弯曲。声线弯曲意味着声信号从发射点到接收点的传播时延大于声信号直线传播的传播时延,而且在空间中不同位置声线弯曲影响的程度也是不一样的。声线弯曲使得水声定位解算时不能选用某个恒定声速,而应该是与各点对应的等效声速。因此在定位解算中采用等效声速代替恒定声速对弯曲的声线进行声线修正计算,提升水下定位精度<sup>[6-9]</sup>。

### 1 水声定位原理

深海水声定位系统在水中布放 4 个信标,信标定位系统模型如图 1 所示。每个信标完成自身差分

GPS 定位和计算目标到信标的时间信息,并通过无线扩频通信链加密传输到船载分系统,再解算出目标的位置<sup>[2]</sup>。

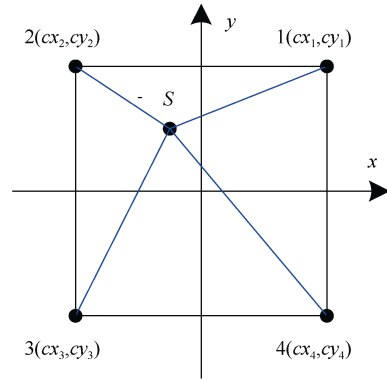


图 1 深海水声定位模型

Fig. 1 Deep sea underwater acoustic positioning model

距离测量水声定位系统是通过测量水下声源(目标)所发射的声信号从发射到接收所经历的时延来确定声源到各接收点的距离,从而实现对目标进行定位的。每一组时间测量确定声源所在的一个球面,即

$$(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2 + (z_i - z_s)^2 = c^2 t_s^2 \quad i=1,2,K,N \quad (1)$$

式中:  $(x_i, y_i, z_i)$  和  $t_i$  分别是第  $i$  个基元的空间位置和接收到信号时刻相对于接收机时钟的时间;  $(x_s, y_s, z_s)$  和  $t_s$  为声源(目标)空间坐标和信号发射时刻相对于接收机时钟的时间;  $c$  为声波在水中的传播速度。

深海水声定位系统的有效作用范围如图 2 所示。

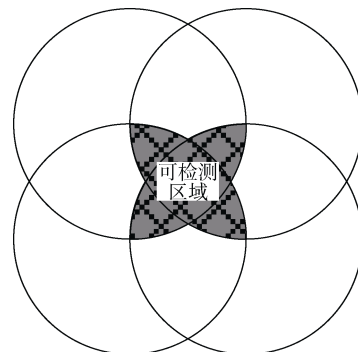


图 2 深海水声定位系统的有效作用范围图

Fig. 2 Effective range of deep sea underwater acoustic positioning system

当通信信标和目标的深度已知时,只需要 3 个独立的方程即可得到目标位置信息。水下声源(目标)所发射的声信号,利用最先接收到声信号的 3 个通信信标对目标进行水下定位。

## 2 基于扩频的时延估计技术

深海水声定位系统采用脉冲测距方式,通过测量目标到达通信信标的时间延迟计算出距离,进而解算出目标的位置。水声换能器所接收到的水声信号的时延估计精度直接影响系统的定位精度,因此采用宽带扩频信号来进行精准的时延估计。

在对宽带扩频信号起始位置的测量中采用了初步粗估和精细搜索相结合的方法。首先用本地的同步信号和接收信号进行相关,估计多普勒的同时确定信号的起始位置;在对信号进行多普勒补偿后,利用和本地同步信号的相关,通过时间戳再次进行位置的精确估计。

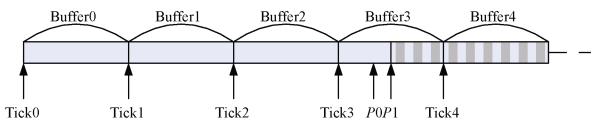


图 3 时间戳估计时间时域图

Fig. 3 Time-domain diagram of timestamp estimated time

在接收的时候为每个信号段依次打上时间戳 Tick0、Tick1、...、Tick4,相邻时间戳点数为  $N_p$ 。初步粗估时判断的信号到达位置为  $P_0$ ,所在时间戳为 Tick,经过多普勒补偿和信道均衡后,再次精细估计得到的位置为  $P_1$ ,其中  $P_0$ 、 $P_1$  代表缓存中位置的点数。此时信号真正抵达的时间  $T$  为

$$T = \text{Tick} + \frac{P1}{N_p} \quad (2)$$

在信号处理中,宽带扩频信号能够有效地衰减系统中的非相关噪声,如水声环境噪声、系统电噪声等,抗多径干扰能力强,可以在复杂声学环境下完成对水下目标到声通信信标间精确测时,测时精度为 1 个码片的宽度。

图 4 给出随着目标运动距离的变化的时延估计的曲线,扩频信号的中心频率为 7 kHz,节拍为 3,码元个数是 1 023,1 个码片的宽度为 0.426 ms。由

图可知没有多径时最大时延估计误差为 0.050 ms;简单多径时最大时延估计误差为 0.124 ms;中等多径时最大时延估计误差为 0.198 ms;复杂多径时最大时延估计误差为 0.366 ms,小于 0.426 ms。由此可见,时延误差受多径影响大,多径越复杂时延误差越大,小于 1 个码片的宽度。

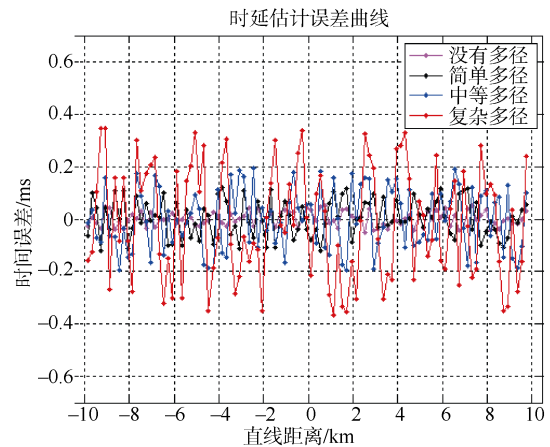


图 4 时延估计误差曲线

Fig. 4 Curve of time delay estimation error

## 3 基于有效声速的声线修正技术

海洋中介质不均匀性导致海水中各点声速的不一致,按照射线声学的观点,声线是弯曲行进的,因此为保证海洋中声学测距的准确性必须要给出一个准确的声速。因此,声速极大地影响着水下定位系统的准确性。声线弯曲使水声定位解算时不能选用一个恒定声速,而应该是与各深度对应的等效声速。在定位解算中用等效声速代替恒定声速就能够将声线弯曲进行修正,从而降低声速误差引起的定位误差。常用的声线修正方法包括迭代法和等效声速法。深海水声定位若采用迭代法会比较复杂,故采用等效声速法进行声线修正。

等效声速的概念是 2002 年由 Vincent H.T和 Hu S.L.提出,指由目标到应答器的直线距离与目标到应答器的传播时间的比值。在等效声速的基础上,同时还提出了建立等效声速表的方法,假设深海水下声速多层分布,设目标深度为  $H_S$ ,海底应答深度为  $H_R$ ,初始掠射角为  $a_0$ ,进行声线跟踪,计算其传播时间  $t_i$  和水平距离  $r_i$ ,累积求和,最终

得到总传播时间  $T$  和总水平距离  $R$ , 再由深度差计算求得斜距。

$$D = \sqrt{(H_S - H_R)^2 + R^2} \quad (3)$$

对于给定掠射角, 其俯仰角  $\beta$  和等效声速  $c$  可由下式计算得到:

$$\beta = \tan^{-1} \frac{R}{H_R - H_S} \quad (4)$$

$$c = \frac{D}{T} \quad (5)$$

对于给定的  $H_S$  和  $H_R$ , 不断改变初始掠射角  $\alpha_0$ , 可计算得到对应的水平距离和等效声速, 对此查表即可得到此声速剖面下的等效声速表。但由于海底的反射, 使用  $\alpha_0$  来表征时有可能出现多值。

所以, 利用最早到达声线时延来建立等效声速表。具体方法使用水平距离  $R$ , 将等效声速表示为水平距离和深度的函数, 即  $c(H_S, H_R, R)$ 。设定作用范围  $R$  及步长  $\Delta t$ , 给定  $H_S$ 、 $H_R$  和  $R_i$  条件下, 通过射线声学原理计算最早到达声线传播时延  $T$ , 再计算等效声速  $c$ , 改变  $R_i = R_i + \Delta r$ , 重新计算等效声速值, 然后可得到与时延相关的等效声速表。

等效声速表的利用可使用局部线性内插法。其主要思想是: 将两水平距离间的声速分布假设为线性的, 根据线性插值获取等效声速值。假设与到达时间差值最小的时间分别为  $T_i$  和  $T_j$ , 其对应的两等效声速点为  $c_i$  和  $c_j$ , 则其线性内插公式如下:

$$c = \frac{c_i - c_j}{T_i - T_j} (T - T_j) + c_j \quad (6)$$

### 4 仿真结果

在实验室进行深海水声定位仿真。仿真条件: 通信信标深度 1 km、目标深度 1 km; 通信信标水平布放坐标分别为 [2 000 m, 2 000 m], [2 000 m, -2 000 m], [-2 000 m, 2 000 m] 和 [-2 000 m, -2 000 m]。目标从 [10 km, -10 km] 水平位置运动到 [-10 km, 10 km] 水平位置, 运动状态为 20 m/s 的匀速直线运动。仿真深海冬季水文声速剖面, 如图 5 所示。海底底质为粗砂条件下, 目标深度 1 km、通信信标深度 1 km 下扩频测时加声线修正、扩频

测时加非声线修正的定位结果。

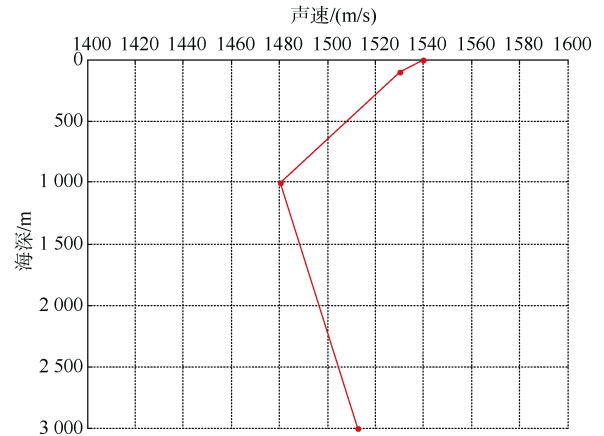


图 5 深海冬季水文声速剖面图

Fig. 5 Deep sea hydrological sound velocity profile in winter

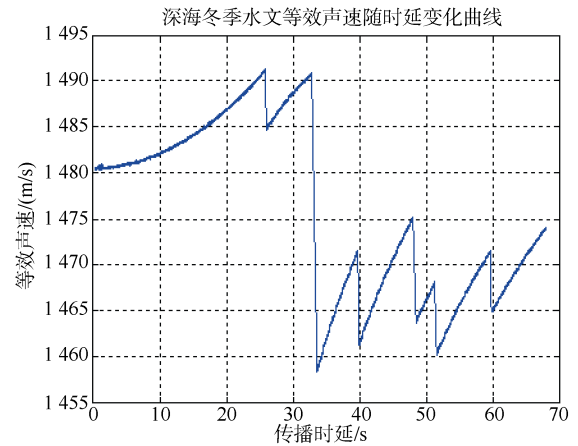


图 6 传播时延与等效声速的对应图

Fig. 6 Reciprocal diagram of propagation delay and equivalent sound velocity

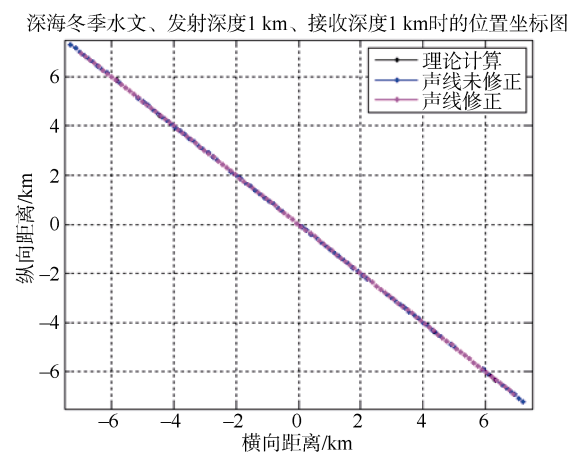


图 7 深海冬季水文目标轨迹图

Fig. 7 Trajectory of deep sea hydrological target in winter

结合图 5 中的深海冬季声速剖面、海底底质以及发射接收深度，建立传播时间与等效声速的对应关系，如图 6 所示。仿真采用扩频通信测时和脉冲测时，以及未声线修正和声线修正后的目标定位结果，目标轨迹仿真结果如图 7 所示。目标定位误差如图 8 所示。声线未修正的定位误差最大值为 3.274%，声线修正后的定位误差最大值为 0.168%。测试结果表明在相同条件下，声线修正会提高深海声定位的精度。

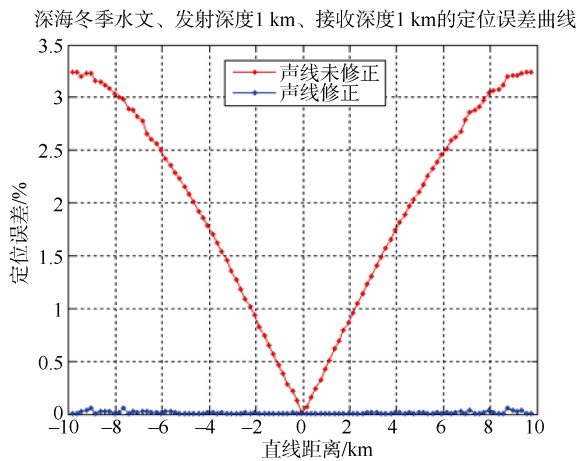


图 8 深海冬季水文目标定位误差曲线

Fig. 8 Curve of deep sea hydrological target positioning error in winter

### 5 结束语

本文主要是研究基于等效声速的深海水声定位技术。海洋中的声速存在梯度，声线传播会发生

弯曲，利用声线声学理论建立一个最早到达时延与等效声速的表格。然后，利用宽带扩频信号来获得目标与通信信标之间时延，通过查表的方式获得等效声速，从而获得目标与通信信标之间的距离，然后利用双曲线交汇技术估计出目标的方位。本文仿真了在深海复杂水文条件下，利用宽带扩频信号估计目标运动轨迹路线，表明该方法能够有效的提高水声定位精度。

### 参考文献

- [1] 黄如龙. 主被动水声定位系统显控软件设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
- [2] 孙微. 分布式水下定位网中的时延差定位算法研究与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
- [3] 宋磊, 王大成, 梁珊珊, 等. 扩频技术在水声定位系统中的应用研究[J]. 水声信号处理技术, 2007, 26(5): 102-104.
- [4] 梁民赞, 余毅, 王黎明, 等. 一种声线修正的查表方法[J]. 声学技术, 2009, 28(4): 556-559.
- [5] 林旺生. 水声信道仿真与声线修正技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
- [6] 梁国龙, 林旺生, 王燕. 浅海信道有效声速估计及其在水声定位中的应用[J]. 声学技术, 2012, 31(1): 42-47.
- [7] 张旭. LBL 基阵阵型性能预估软件设计实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
- [8] 姜婷, 张吟. 声线弯曲对水下目标定位的影响及修正方法[D]. 水雷战与舰船防护, 2015, 23(1): 36-40.

(责任编辑: 张曼莉)