

文章编号:1004-9037(2013)06-0000-00

垂直长基线阵被动目标定位的缩比试验

付学志¹ 刘 忠² 崔麦会¹

(1. 91635 部队,北京,102249; 2. 海军工程大学电子工程学院,武汉,430033)

摘要:在水文条件优良的深海中垂直布放长基线阵实施被动目标定位具有重大意义,但限于现有设备的结构耐压性、布放难度等条件的限制,海试难以实施。消声水池具有与深海类似的声场环境,可以在消声水池中利用短基线阵实施缩比模拟试验。首先分析论证了影响目标定位精度的两个关键参数(时延估计精度和阵元间距)的设置,为深海垂直长基线阵和水池缩比试验平台的设计提供参考;然后给出了试验平台设计、试验步骤及试验数据处理分析方法;最后利用消声水池试验数据对深海中垂直长基线阵的目标定位精度、作用距离等指标做出了性能预报。

关键词:被动目标定位;长基线阵;时延估计;消声水池

中图分类号:TN911

文献标志码:A

Scaling Experimental Design of Deep-sea Passive Localization Based on Vertical Linear Array in Anechoic Tank

Fu Xuezhi¹, Liu Zhong², Cui Maihui¹

(1. Unit 91635, Beijing, 102249, China;

2. Electronics Engineering College, Naval University of Engineering, Wuhan, 430033, China)

Abstract: Deploying vertical linear array in deep-sea being of excellent hydrological conditions has great significance for passive localization. But existing equipment's structural pressure resistance and deployment difficulties make the sea trial impossible. Deep-sea behaviors in the same acoustic environments with anechoic tank, which makes it's feasible for similar experiments using shorter linear array in anechoic tank. Firstly, the setting of two crucial parameters, precision of time delay estimation and array aperture, are demonstrated to provide reference for designing vertical linear array and tank similar experiment platform. Secondly, experiment approach and the method of processing experiment data are presented. Lastly, using experiment data, this paper forecasted localization precision and effective distance performance of vertical linear array deployed in deep-sea.

Key words: passive localization; linear array; time delay estimation(TDE); anechoic tank

Target Motion Analysis

Matched Field Processing

引 言

迄今为止,对水下目标的远程被动定位主要有3种方法:长基线阵定位、目标运动分析(TMA)^[1-2]和匹配场处理(MFP)^[3]。TMA和MFP是正在发展中的远程被动测距技术,测距性能对海深、海底声学参数及水文条件极为敏感,对海洋声学环境参数的预估精度要求高,而且运算量较大^[4]。而长基线阵定位法作为一种传统的被动

定位方法,理论成熟结果可靠,应用方式灵活^[5-6]。

长基线阵定位法常见于水平布阵,利用球面波或柱面波波前曲率的变化,通过测量各基元的相对时延,估计目标的距离和方位^[4,7]。限于基阵孔径和安装精度等因素的限制,长基线垂直阵在被动声纳中的应用并不多见^[5]。另外,由于浅海海洋环境的复杂性^[8],以及被动测距声纳使用水深的限制,水下目标被动定位还受到表面声道“声影区”、浅海声道多途干扰和衰减强等局限^[9-10],从而使得浅海中基于水平或垂直长基线阵的目标被动定位距离

和精度受很大限制^[11]。

研究表明,2 000 米以下的深海水域具有安静优良的水文环境,多径传播影响较小^[9]。如果能够结合水下载体的自动沉浮^[12]和定深控制技术^[13]实现在深海中垂直布阵,则可以完成对远程被动声目标的隐蔽探测与定位,应用前景广阔。但受限于现有设备的结构耐压性、布放难度等因素,难以在深海环境下实施垂直长基线阵被动目标定位的海上试验,而消声水池六面都覆盖有吸声材料,能够大大消除水声信道多径效应,声场环境与深海具有一定的相似性,可以在消声水池中利用短基线阵实施模拟摸底试验,为深海原理样机的研制提供参考。

1 垂直长基线阵水下目标被动定位的基本原理

垂直长基线阵通过时延估计的途径实现对目标的距离 r 、高低角 φ 的间接测量,进而完成目标运动状态分析与目标类型识别。以最简单的垂直三阵元水下目标定位为例,其目标被动定位的示意和坐标系如图 1 所示,其中 S 为目标声源, H_1, H_2, H_3 为水听器,有 $H_1H_2 = H_2H_3 = d$ 。设 $SH_1 = r_1, SH_2 = r_2 = r, SH_3 = r_3$,其中 r 是要测定的目标距离, φ 是 SH_2 与水平面的夹角,即目标高低角。设水中声速为 c ,通过估计声信号到达 H_1, H_2 的时延 τ_{12} ,以及到达 H_2, H_3 的时延 τ_{23} ,可由下面的公式求解声源(目标)的距离 R 与高低角 φ ^[14]。

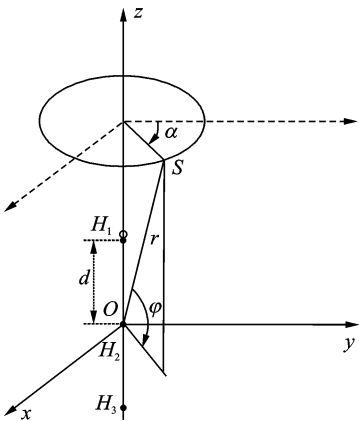


图 1 垂直线阵被动目标定位原理示意图

$$R = \frac{2d^2 - c^2(\hat{\tau}_{12}^2 + \hat{\tau}_{23}^2)}{2c(\hat{\tau}_{12} - \hat{\tau}_{23})} \quad (1)$$

$$\varphi = \sin^{-1} \left[\frac{c(\hat{\tau}_{12} + \hat{\tau}_{23})}{2d} \right] \quad (2)$$

当目标定位完成后,可以利用成熟的跟踪滤波

算法实现对目标状态的估计,并依据估计得到的目标深度信息,进一步完成水面目标或水下目标的判别。

2 时延估计精度和阵元间距

垂直长基线阵依靠时延估计的方法实现对目标的远程被动定位,定位精度受声速测量、阵元安装精度和时延估计等误差源的综合影响,其中时延估计误差是主要误差源^[15]。对于目标定位误差的仿真分析可以为阵元间距配置和插值处理前的时延估计精度提供设计参考。在假设声速测量误差与阵元位置误差不计的情况下,下面的公式给出了目标距离和高低角观测值方差与系统时延估计方差之间的关系。

距离估计量的方差

$$\text{Var}(\hat{r}) = c^2 \text{Var}(\hat{\tau}_{23} - \hat{\tau}_{12})(r/L_e)^4 \quad (3)$$

高低角估计量的方差

$$\text{Var}(\hat{\varphi}) = \frac{c^2 \text{Var}(\hat{\tau}_{12} + \hat{\tau}_{23})}{12L_e^2} \quad (4)$$

首先分析垂直长基线阵在深海中的时延估计精度和阵元间距对目标定位精度的影响。设 $L_e = d \cos \varphi \approx d$, $\text{Var}(\hat{\tau}) = \text{Var}(\hat{\tau}_{12}) = \text{Var}(\hat{\tau}_{23})$,则分别由式(3)和式(4)可得

$$\sigma_r = \sqrt{\text{Var}(\hat{r})} = \sqrt{2c^2 \text{Var}(\hat{\tau})(r/d)^4} \quad (5)$$

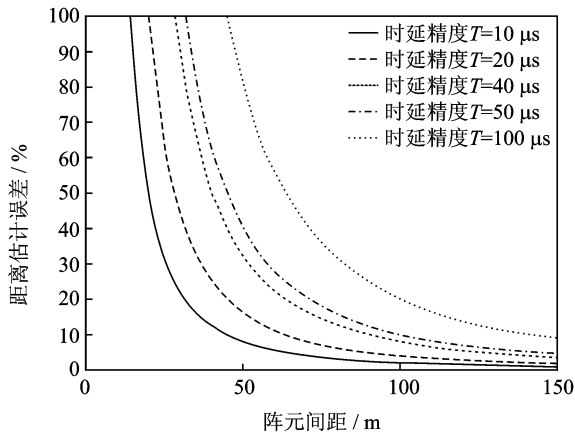
$$\sigma_\varphi = \sqrt{\text{Var}(\hat{\varphi})} = \sqrt{\frac{c^2 \text{Var}(\hat{\tau})}{6L_e^2}} \quad (6)$$

设目标测距相对误差 $y = \sigma_r/r \times 100\%$,令 $\sigma_r = \sqrt{\text{Var}(\hat{\tau})}$,则当深海垂直长基线阵距离目标 $r = 10^4$ m,时延估计精度 $\sigma_r \in (10^{-5} \sim 10^{-4})$ s、阵元间距 $d \in (10 \sim 150)$ m时,被动目标定位误差的数值仿真结果如图 2 所示。

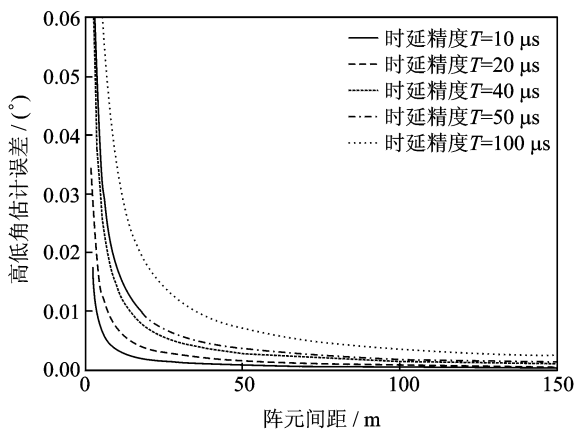
从上图中可以看出,当 $\sigma_r = 50 \mu\text{s}$ 、阵元间基线长在 100 m 左右时;或当 $\sigma_r = 10 \mu\text{s}$ 、基线长在 50 m 左右时,目标测距误差优于 30%,目标高低角的估计精度优于 0.04° 。

作为对比,在消声水池缩比试验中,当目标噪声源距三阵元 $r = 10$ m,时延估计精度 $\sigma_r \in (10^{-6} \sim 10^{-5})$ s,阵元间距 $d \in (0.2 \sim 1.5)$ m时,时延估计精度和基线长对目标定位误差的数值仿真结果如图 3 所示。

从图中可以看出,当试验装置的时延分辨率 $\sigma_r = 5 \mu\text{s}$ 、阵元间距在 0.8 m 左右时;或当 $\sigma_r = 10 \mu\text{s}$ 、阵元间距在 1 m 左右时,目标测距精度可优于

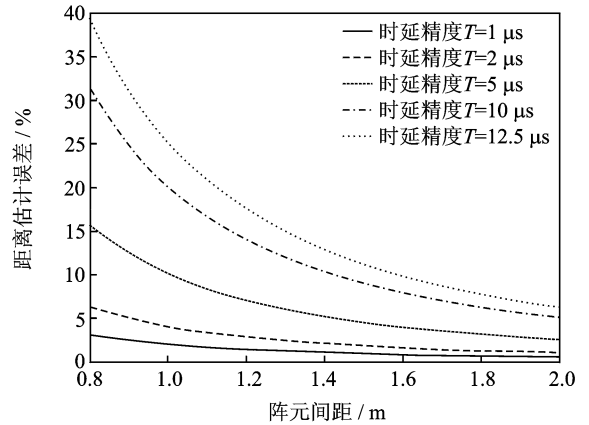


(a) 时延估计精度和基线长对目标距离估计误差的影响

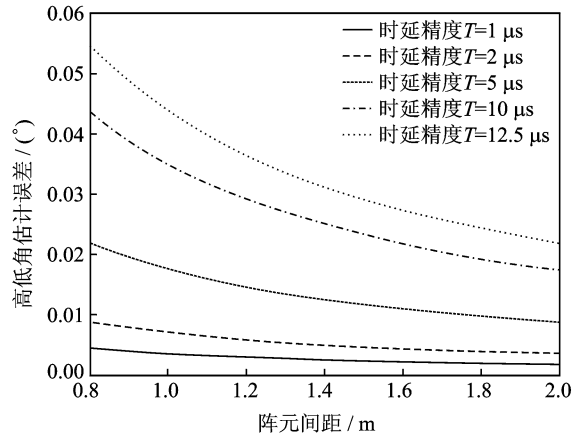


(b) 时延估计精度和基线长对高低角估计误差的影响

图 2 深海中垂直长基线阵的时延估计精度和基线长与被动定位误差的关系



(a) 时延估计精度和基线长对目标距离估计误差的影响



(b) 时延估计精度和基线长对高低角估计误差的影响

图 3 消声水池中时延估计精度和基线长与被动定位误差的关系

30%，目标高低角的估计精度优于 0.04° 。

由数值仿真结果可见，深海中长基线阵被动目标定位精度指标需求对应一定的时延估计精度和阵元间距配置，其对应关系可以在消声水池试验中找到相似性映射。

3 试验平台

试验平台主要由模拟目标噪声源、声探测垂直三阵元、目标信息综合处理装置和显控终端等单元组成(如图 4 所示),能够在水池中缩比实现深海垂直长基线阵的噪声数据采集、目标定位和跟踪等功能。

3.1 模拟目标噪声源

由低功率的数字信号发生器经功率放大后驱动发射换能器产生模拟目标噪声点声源。噪声源为数据采集器采集到的行船噪声或其他噪声,功率谱能量集中分布在 10 kHz 以下的低频段。功率放大器的输出增益手动可调,最大输出声源级可达

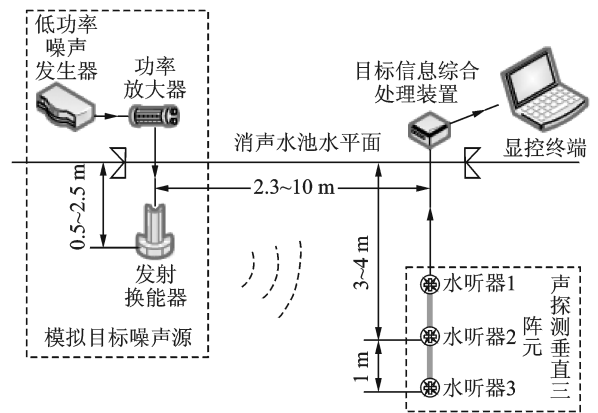


图 4 试验平台组成示意图

195 dB。功放与水声发射换能器的匹配谐振点为 4 kHz,带内最大衰减为 5 dB,最大限度地还原原始噪声功率谱分布特征。

3.2 声探测垂直三阵元

由等间隔排列的水听器组成垂直短基线阵(也

可以加装矢量水听器实现目标方位估计),阵元间距可调,单个水听器的接收灵敏度为 -196 dB,前置放大倍数为 26 dB。垂直三阵元线列阵采用时延估计方法实现对目标的被动声测距,因此在论证其最大声探测距离时,不考虑线阵的空间增益,即认为空间增益值 $G_s=0$ dB。

3.3 目标信息综合处理装置

目标信息综合处理装置是实现目标信号检测和定位的核心,其组成结构如图5所示。它通过高速单片机和数字信号处理器的协同集成实现了三阵元水听器数据采集、信号检测、目标识别、定位和跟踪滤波等算法功能。采用虚拟仪器的设计思想,数据采集和定位结果传送到PC上位机端,上位机也可以对目标检测和定位所需参数在线设置。

在目标信息综合处理装置的软硬件设计中采用了可重配置结构思想,通过单片机和FPGA的

下的多种算法功能验证。

另外,采用时延估计的途径求解目标距离和高低角方位信息至少需要3个水声传感器输出的2个时延值,有时为增加目标观测方程的有效解个数或得到更多的目标信息也会将基阵的个数增大到十几或数十,这对多通道同步采样前端的体积、功耗、可扩展性等要求较高,因此在芯片选型和软件设计上注重了功耗控制和结构化设计,如水听器信号采样选用低功耗、串行SPI接口的AD转换器;控制核心为16位RISC、超低功耗MSP430单片机;而且MSP430本身内置有ADC12多通道AD转换核心,在软件设计上使MSP430长期处于对信号检测的待机值更状态,并通过DSP的HOLD和HOLDA引脚使其进入低功耗挂起状态,当需要做时延解算时再唤醒DSP,实现了智能节电工作。经实际测试,该装置的静默值更电流为 8 mA左右,最大突发工作电流为 32 mA~ 40 mA。

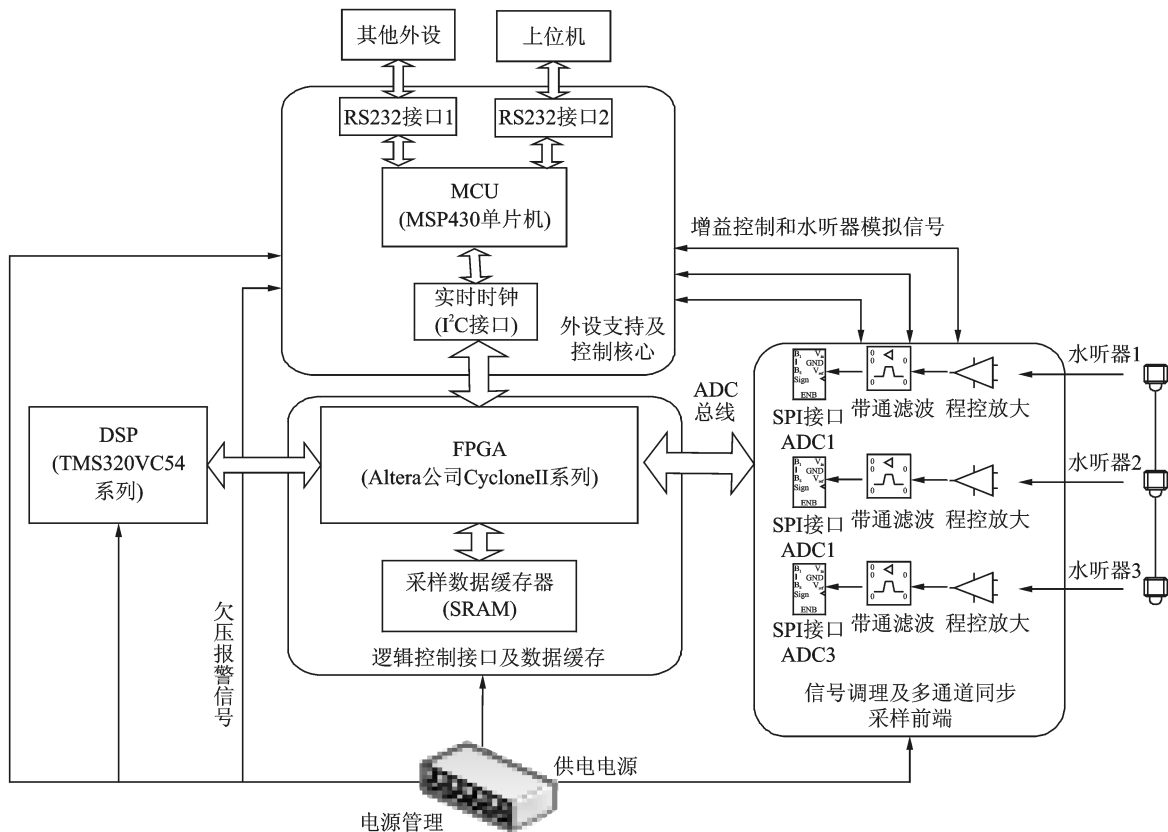


图5 目标信息综合处理装置组成结构图

4 试验方法及步骤

以上述试验平台组成如图4所示的缩比试验系统,三阵元目标定位端深于噪声源发送端,形

成向上探测的阵形,仰角在 $(8^\circ, 21^\circ)$ 之间,与深海垂直长基线阵被动目标定位态势相似。试验采用实物现场试验和后期数据计算机分析相结合的方式。

步骤1 利用试验平台在水湖中同步并行采

集一定时长的环境噪声数据,设采样环境噪声信号序列为 $Nh_i(k)$, $i=1,2,3$,其中 i 代表三阵元水听器编号。

步骤 2 在消声水池中利用模拟目标噪声源产生强度为 SL 的目标辐射噪声,此时目标定位结果和误差在试验平台的显控终端实时可观测。

步骤 3 在目标定位精度指标满足要求的前提下改变 SL 的噪声强度,每个 SL 强度点重复多次试验,并保存三阵元的输入信号采样序列,设为 $S_i(k)$, $i=1,2,3$ 。

步骤 4 忽略消声水池的环境噪声和试验平台系统自噪声,在 $S_i(k)$ 中根据信噪比 NL_n 叠加相应增益的信号序列 $Nh_i(k)$,生成新的含有环境噪声的信号序列 $SN_i(k)$,对 $SN_i(k)$ 做时延估计和目标定位,则 $SN_i(k)$ 所对应的垂直三阵元输入信噪比为 $SNR_{in} = SL - TL - NL_n$ 。

步骤 5 首先确定目标定位误差指标的期望值,然后逐渐增加 $Nh_i(k)$ 的信号强度直至定位误差指标超出要求,得到临界信噪比 NL_n 和 $\min(SNR_{in})$,由 $\min(SNR_{in})$ 可对深海中垂直三阵元的作用范围做出性能预报(如图 11 所示)。

另外, $\min(SNR_{in})$ 与所采用的时延估计算法有关,使用高精度、抗干扰能力强的时延估计算法可以提高长基线阵的作用距离。

5 试验数据处理及分析

利用接收换能器垂直长基线阵接收目标发出的噪声信号来实施目标定位。ROTH 为人名,建议不需中文注释。其技术指标受被动声纳方程^[5]的制约,因此被动声纳方程($SL - NL - TL + GS + GT = DT$)是展开水池缩比试验数据分析的主线和依据。

(1) 已如上述,垂直线阵的空间处理增益 $GS = 0$ dB。

(2) 消声水池试验平台是深海垂直长基线阵的相似性缩比,两者基于相同的时延估计算法和目标定位处理流程,因此时间处理增益 GT 相同。

(3) 声波在海洋中传播时,随着传播距离的增加,声强将逐渐减弱,由于声基阵所接收到的目标信号属于深海声传播环境。因此在估计声信号传播损失时,主要考虑海水的声吸收和几何扩展损失,经验公式如下^[5]

$$TL' = 10 \lg R^{1.9} + \alpha R \quad (7)$$

声吸收系数 α 与信号频率满足以下试验公式

$$\alpha = \frac{\left(\frac{0.1f^2}{1+f^2} + \frac{40f^2}{4100+f^2} + 0.000275f^2 + 0.003 \right)}{0.914} \quad (8)$$

式中: α 单位为 dB/km,且 $f \leq 10$ kHz,消声水池中的传播衰减损失 TL 合并计算到输入信噪比 SNR_{in} 中,对应于叠加上环境噪声的输入信号序列 $SN_i(k)$ 。

(4) 目标信息综合处理装置和深海垂直长基线阵基于同样的被动声纳信号检测原理,即采用信号后置处理后直流跳变的概念来判断信号是否出现,因此在相同的检测概率指标要求下两者也具有相等的识别指数 DT , DT 满足下式

$$DT = SL - NL - TL + GS + GT = SNR_{in} + GS + GT \quad (9)$$

同样,在深海中有 $DT' = SNR'_{in} + GS' + GT'$,又由 $GS = GS' = 0$ dB、 $GT = GT'$ 得

$$SNR_{in} = SNR'_{in} = SL' - NL' - TL' \quad (10)$$

上式中 SL' 为深海中的目标声源级, NL' 为海洋环境噪声级,而消声水池试验装置在给定定位误差指标要求下所能达到的 SNR_{in} (即 $\min(SNR_{in})$) 可由试验数据近似得到。图 6 所示为多组 $SN_i(k)$ 序列的时延估计和目标定位相对误差的统计平均随信噪比的变化曲线。图 6 中信噪比以 0.5 dB 递增,并给出了广义互相关^[16] 和一种 LMS 自适应^[17] 时延估计算法的性能对比。

由图 6 可见,输入信噪比越小,时延估计和目标定位误差越大,且随着信噪比的增大两种时延估计的误差性能逐渐接近。若相对定位误差指标的期望值为 30%,广义互相关时延估计算法则所对应的 $\min(SNR_{in})$ 在 (-14 dB, -13 dB) 之间,自适应时延估计算法所对应的 $\min(SNR_{in})$ 在 (-15 dB, -14 dB) 之间。由于 LMS-TDE 算法原理本质上是广义相关 ROTH 处理器的自适应实现^[17],因此在低信噪比处 LMS-TDE 算法仅比 GCC-TDE 算法高出大约 1 dB 的处理增益。

(5) 假设目标源信噪比(即目标声源级与深海海洋环境噪声的差值 $SL' - NL'$,是一个与目标类型和海况有关的变量)为经验已知,则根据式(7~10),可以由消声水池缩比试验中获得的最小输入信噪比 $\min(SNR_{in})$,得到不同源信噪比下深海垂直线阵对被动声源目标的作用距离(如图 7)。

由图 7 可见,当输入信噪比 $\min(SNR_{in}) = -14$ dB 时,对于源信噪比为 20 dB 的目标,垂直长

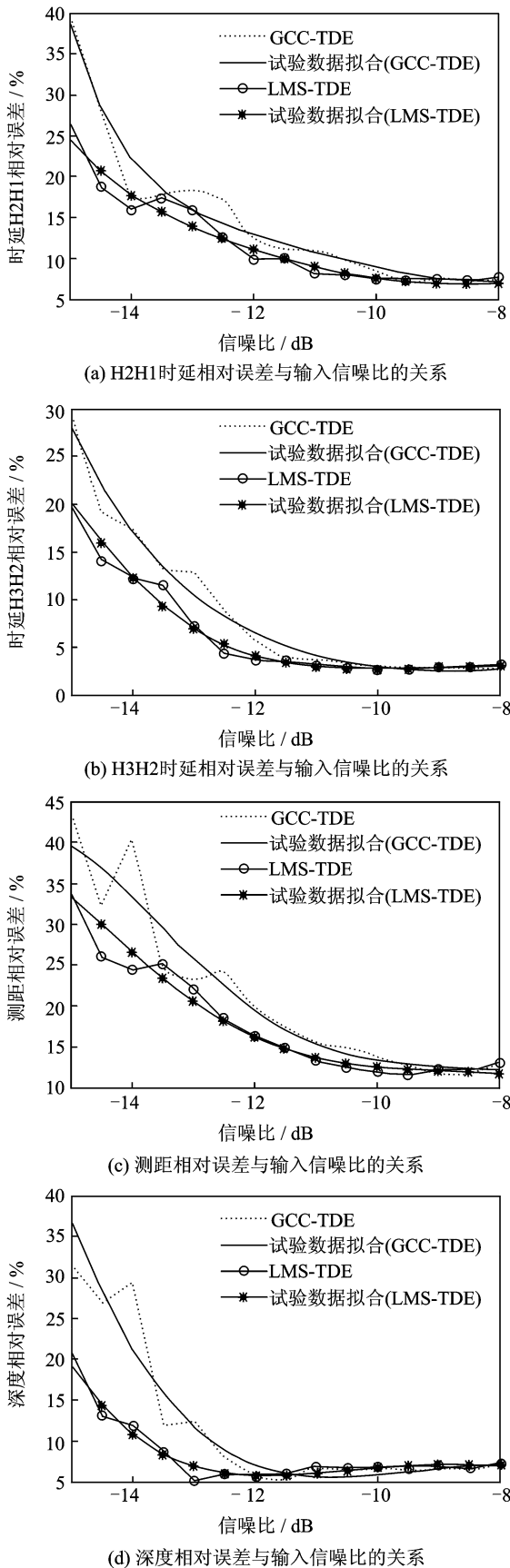


图6 试验数据的时延估计和目标定位相对误差随信噪比的统计平均变化曲线

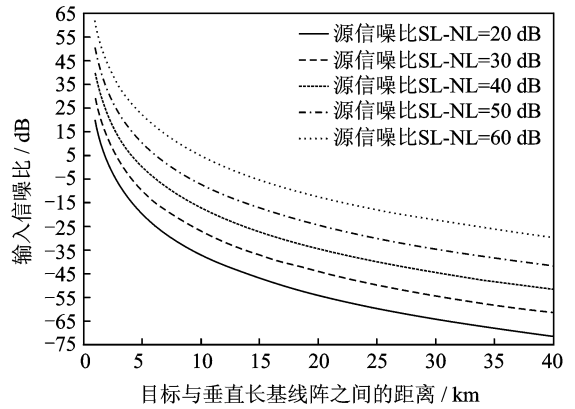


图7 输入信噪比与垂直长基线阵作用距离的对应关系

基线阵能够实现4~5 km的远程被动定位与跟踪。若能够改进目标定位方法以获得更低输入信噪比,则可以使长基线阵在同等级定位误差指标要求下得到更远的对目标作用距离。

6 结束语

限于现有设备技术条件下开展深海垂直长基线阵被动目标定位海上试验的复杂性,本文在消声水池中利用短基线阵对这一问题开展了缩比模拟试验。以被动声纳方程为依据,通过试验获得了目标定位精度与基阵的输入信噪比等参数之间的初步关系,仿真分析和试验结果印证了实现深海垂直长基线阵远程被动目标定位的可行性,并对深海垂直长基线阵的有效作用距离做出了性能预报。缩比试验支撑了深海长基线阵被动目标定位理论研究的相关结论,并给后续研究提供了有价值的借鉴。

需要说明的是,深海环境下的垂直长基线阵被动目标定位精度并不仅仅由上述参数决定,它还面临声线弯曲、海洋噪声干扰等诸多问题,文中并未涉及相关理论研究。而且水下声信道具有典型的非高斯、非平稳特征^[10],因此消声水池缩比试验只是对这一问题的简化模型。

参考文献:

- [1] 安良,陈励军,陆信人,等. 船载柔性阵基元坐标实时获取技术研究[J]. 数据采集与处理,2009,25(1):86-92.
An Liang, Chen Lijun, Lu Jiren, et al. Element coordinate measurement of ship-based flexible hydrophone array[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2009,25(1):86-92.
- [2] 吴艳群,倪明,胡永明. 一种平面阵定位的改进算法[J]. 数据采集与处理,2009,24(2):198-202.

- Wu Yanqun, Ni Ming, Hu Yongming. Improved localization algorithm based on planar array[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2009, 24(2): 198-202.
- [3] 李建龙,潘翔.不确实海洋环境下的贝叶斯匹配场处理[J].声学学报,2008,33(3):205-211.
Li Jianlong, Pan Xiang. A Bayesian approach to matched field processing in uncertain ocean environments[J]. Acta Acustica, 2008, 33(3):205-211.
- [4] 周伟,门丽杰,梅继丹,等.浅海三元阵近程被动定位实验研究[J],哈尔滨工程大学学报,2009,30(5):547-551.
Zhou Wei, Men Lijie, Mei Jidan, et al. Experimental research on passive near field ranging of a three-sensor array in shallow water[J], Journal of Harbin Engineering University, 2009, 30(5):547-551.
- [5] 李启虎.数字式声纳设计原理[M].合肥:安徽教育出版社,2003:67-72.
Li Qihu. Principles of digital sonar design [M]. Hefei: Publishing House of Anhui Education, 2003: 67-72.
- [6] 侯云山,黄建国,张立杰,等.一种新的浅海目标方位估计方法[J],西安交通大学学报,2008,42(10):1295-1299.
Hou Yunshan, Huang Jianguo, Zhang Lijie, et al. A novel bearing estimation method for shallow water targets[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(10):1295-1299.
- [7] 宋新见,惠俊英,殷冬梅,等.水下噪声目标被动测距技术研究[J].应用声学,2005,24(3):133-139.
Song Xinjian, Hui Junying, Yin Dongmei. Research on underwater noise target passive ranging technology[J]. Applied Acoustics, 2005, 24(3):133-139.
- [8] Song H C, Roux P, Kuperman W A. Multiple-input-multiple-output coherent time reversal communications in a shallow-water acoustic channel[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2006, 31(1): 170-178.
- [9] 杨娟.水下动目标被动跟踪关键技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2008:6-12.
Yang Juan. The studies on passive tracking of underwater moving target[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008:6-12.
- [10] 惠俊英.水下声信道[M].2版.北京:国防工业出版社,2007:102-112.
Hui Junying. Channels of underwater sound [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007:102-112.
- [11] 马树青,杨士莪,朴胜春,等.浅海孤立子内波对海洋声传播损失与声源定位的影响研究[J].振动与冲击,2009,28(11):73-78.
- Ma Shuqing, Yang Shie, Piao Shengchun, et al. Influence of shallow water internal solitary waves on ocean sound propagation and source allocation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(11):73-78.
- [12] 李明,史金飞,宋春峰,等.一种摆动式柔性尾部的仿生机器鱼[J].东南大学学报(自然科学版),2008,38(1):32-36.
Li Ming, Shi Jinfei, Song Chunfeng, et al. A kind of bionic robofish with swaying flexible tail fin [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2008, 38(1):32-36.
- [13] 苏玉民,万磊,李晔,等.舵浆联合操纵微小型水下机器人的开发[J].机器人,2007,29(2):151-154.
Su Yumin, Wan Lei, Li Ye, et al. Development of a small autonomous underwater vehicle controlled by thrusters and fins[J]. Robot, 2007, 29(2):151-154.
- [14] 彭鹏菲,刘忠,陈显尧.柔性三元垂直线阵在水下目标被动定位中的应用[J].探测与控制学报,2008,30(2):27-34.
Peng Pengfei, Liu Zhong, Chen Xianyao. The application research of flexible three-point vertical array in target passive localization[J]. Journal of Detection & Control, 2008, 30(2):27-34.
- [15] 邢军,刘忠,彭鹏菲.深海水声探测特性研究[J].舰船科学技术,2009,31(6):67-72.
Xing Jun, Liu Zhong, Peng Pengfei. Research for characteristics of underwater acoustic detection in deep sea[J]. Ship Science And Technology, 2009, 31(6):67-72.
- [16] 崔玮玮,曹志刚,魏建强.声源定位中的时延估计技术[J].数据采集与处理,2007,22(1):90-99.
Cui Weiwei, Cao Zhigang, Wei Jianqiang. Time delay estimation techniques in source location[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2007, 22(1): 90-99.
- [17] 马远良,赵俊渭,张全.用FIR数字滤波器实现高精度时延的一种新方法[J].声学学报,1995,20(2):121-126.
Ma Yuanliang, Zhao Junwei, Zhang Quan. A method for high precision time delay implementation by a FIR digital filter[J]. Acta Acustica, 1995, 20(2): 121-126.

作者简介:付学志(1982-),男,工程师,研究方向:被动目标定位、水声信号处理, E-mail: ddfxz2008@sina.com;刘忠(1963-),男,教授,博士生导师,研究方向:目标定位、信号处理;崔麦会(1977-),男,高工,研究方向:水下探测。