

基于矢量水听器的水下战武器二维弹道测量研究

马锦垠, 张 臣, 薛 飞, 王雪松

中国人民解放军 91439 部队, 大连 116041

摘要 水下弹道测量是水下战武器试验的重要内容。本文基于矢量水听器测量水中目标航行噪声, 利用矢量水听器测向原理, 经过数字信号处理器对矢量信号进行分析处理, 得出武器水下航行的二维弹道轨迹。介绍矢量水听器测量原理和矢量浮标阵纯方位定位原理。通过实验室消声水池测试对矢量水听器声压与振速相位差进行修正, 利用湖上试验对矢量水听器的测向误差进行修正。采用 DGPS 水面定位与水下水声定位相结合的方法, 研制了水下战武器二维弹道测量系统, 介绍测量系统的 3 个主要组成部分及其主要功能, 并在海上实际试验中验证了基于矢量水听器的水下武器弹道测量方法先进可行、实时性强、测量精度高、使用方便, 可以满足实际使用要求。

关键词 矢量水听器; 水声定位; 二维弹道

中图分类号 TB565, TN967

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.14.007

The Two-dimension Trajectory Measurement Method for the Underwater Warfare Weapon Based on Vector Hydrophone

MA Jinyin, ZHANG Chen, XUE Fei, WANG Xuesong

Unit 91439, People's Liberation Army, Dalian 116041, China

Abstract The underwater trajectory measurement is an important part of the underwater warfare weapon test. First, the underwater trajectory is obtained by utilizing the target navigation noise measured by vector hydrophones, based on the principle of the vector hydrophone, with the digital signal processors to analyze and process the vector signal. The principle of the vector hydrophone and the pure location positioning principle of the vector buoy are discussed. Then, the pressure and the particle velocity phase difference of the vector hydrophone are corrected through the anechoic tank test in the laboratory, and the error in direction is rectified in the lake experiment. Using a combination of the DGPS surface orientation and the acoustic positioning, a measurement system is developed, and the three main components of the measurement system and their functions are presented. Finally, in the actual sea test, the two-dimension trajectory measurement method for the underwater warfare weapon based on vector hydrophone is shown to feature good real-time capability, high accuracy, easiness to use, and it can meet the practical requirements in operations.

Keywords vector hydrophone; hydrolocation; two-dimension trajectory

0 引言

鱼雷、火箭助推水雷等水下战武器的水中弹道是武器海上定型试验考核的重要内容。以往对水中弹道测量通常采用弹道内记仪^[1-3], 或者在试验海区建立固定阵测试系统等方式。采用弹道内记仪虽然实施简单, 但不能给出实时弹道, 需要试验后数据进行处理才能得到测量结果; 采用固定式阵测试系统, 需要在试验海区布设固定测量基阵和装备, 测量基阵

和装备通过水下电缆与测量船或岸基的数据处理设备相连来测量水下武器弹道, 这种测量方式存在建设复杂、海上实施困难、投资强度大等问题。本文采用矢量水听器测量技术, 利用差分全球定位系统(DGPS)水面定位与水下水声定位相结合的方法, 建立了水下战武器二维弹道测量系统, 实现了对水下战武器水中弹道的高精度测量, 具有海上实施方便、实时性强等特点, 解决了水下武器水中弹道测量难题, 并经

收稿日期: 2011-03-09; 修回日期: 2012-04-27

作者简介: 马锦垠, 高级工程师, 研究方向为水声工程, 电子邮箱: mjyhbe@163.com

海上试验进行验证。

1 矢量水听器对目标测量方法

1.1 矢量水听器测量原理

在传统的水下目标探测系统中^[4-5],水声探测系统所使用的大多是声压水听器,仅处理声场中的声压信息,而声压是标量,单个声压水听器无指向性,不能用来测定目标的方位。矢量水听器可以同时、同点测量声场的声压 p 与振速 v_x, v_y ,与传统的声压水听器相比,能够获得更多的声场信息,因而它的应用越来越多地受到重视。

利用矢量传感器声压、振速联合处理的方位估计算法,获取目标真实方位。对信号的每个采样区间内的一定采样点数的瞬时方位估计值进行统计,统计出该采样区间内的方位值集中数目,方位值集中数目最多的方向则表明声能流最大的方向,即为目标方向。根据二维矢量水听器同点输出声压 p 和二维质点振速 (v_x, v_y) ,测量目标方位角^[6-7]。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{pv_y}{pv_x} \quad (1)$$

$$\theta(f) = \tan^{-1} \frac{PV_y(f)}{PV_x(f)} \quad (2)$$

$$\begin{cases} P(f) \xrightarrow{F} p(t) \\ V_x(f) \xrightarrow{F} v_x(t) \\ V_y(f) \xrightarrow{F} v_y(t) \end{cases} \quad (3)$$

$$\theta = \langle \theta(f) \rangle_f \quad (4)$$

其中, P, V 分别为频域的振速和声压, $\langle \cdot \rangle_f$ 表示在频域取加权平均, F 为时域到频域的傅里叶变换。

式(1)是时域的平均声强流算法,式(2)~(4)是频域算法,在理想条件下频域算法和时域算法是等价的,频域算法虽然运算量较大,但容易补偿工程误差,也容易按各频率的信噪比加权,所以本文采用频域算法。

1.2 矢量浮标阵纯方位定位原理

一般在海上测量中,需要布设4个测量基阵。定义基线坐标系为:以阵元 i 为坐标原点,阵元 i 和阵元 j 构成的基线为 $\hat{x}_{ij}$, $\hat{x}$ 轴的正方向为由阵元 i 指向阵元 j ,该坐标系称为基线坐标系 $[\hat{x}_{ij}, \hat{y}_{ij}]$, $i, j=1, 2, 3, 4, i \neq j, \beta_i$ 为目标 T 和阵元 i 与正北方向的夹角, β_j 为目标 T 和阵元 j 与正北方向的夹角。如图1所示。

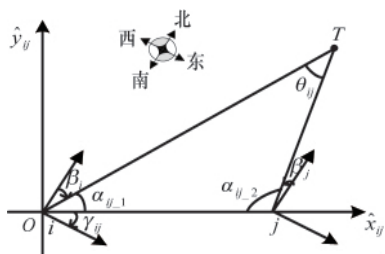


图1 浮标阵测量定位原理图

Fig. 1 Principle of buoy array position

在阵元 i, j 和目标 T 组成的三角形中,令 $\alpha_{ij,1}$ 是以阵元 i 为顶点的内角, $\alpha_{ij,2}$ 是以阵元 j 为顶点的内角, d_{ij} 为基线长度,它可以由浮标上的DGPS数据计算得到。

大地坐标取“北东地”坐标,矢量水听器的 X 轴方向在安装时校正为与正北方向一致, Y 轴方向校正为正西方向,大地坐标系与基线坐标系 $[\hat{x}_{ij}, \hat{y}_{ij}]$ 的夹角 γ_{ij} 可由二阵元DGPS位置得到,阵元 i, j 测得的目标方位角分别为 β_i 和 β_j (顺时针为正), $ij=12, 23, 34, 13, 24$ 。则有:

$$\begin{cases} \alpha_{ij,1} = \pi/2 - \beta_i - \gamma_{ij} \\ \alpha_{ij,2} = \pi/2 + \beta_j + \gamma_{ij} \end{cases} \quad (5)$$

目标在基线坐标系的坐标为:

$$\begin{cases} x_{ij} = \frac{d_{ij} \cos \alpha_{ij,1} \sin \alpha_{ij,2}}{\sin(\alpha_{ij,1} + \alpha_{ij,2})} \\ y_{ij} = \frac{d_{ij} \sin \alpha_{ij,1} \sin \alpha_{ij,2}}{\sin(\alpha_{ij,1} + \alpha_{ij,2})} \end{cases} \quad (6)$$

设:

$$\theta_{ij} = \pi - (\alpha_{ij,1} + \alpha_{ij,2}) \quad (7)$$

将式(7)代入式(6),得:

$$\begin{cases} x_{ij} = \frac{d_{ij} \cos \alpha_{ij,1} \sin \alpha_{ij,2}}{\sin \theta_{ij}} \\ y_{ij} = \frac{d_{ij} \sin \alpha_{ij,1} \sin \alpha_{ij,2}}{\sin \theta_{ij}} \end{cases} \quad (8)$$

4个阵元组合成6条基线,它们分别与目标 T 构成6个三角形,形成12个方位角。为提高定位精度,须对解进行误差分析,得到权函数,用权函数来综合测量阵所有基线对目标的定位结果。

权函数:

$$\begin{cases} W_{x_{ij}} = \frac{2 \sin^2 \theta_{ij}}{d_{ij} \sqrt{\sin^2 2\alpha_{ij,2} + \sin^2 2\alpha_{ij,1}}} \\ W_{y_{ij}} = \frac{\sin^2 \theta_{ij}}{d_{ij} \sqrt{\sin^4 \alpha_{ij,2} + \sin^4 \alpha_{ij,1}}} \end{cases} \quad (9)$$

对目标位置的精确定位结果应为所有基线定位结果的加权综合,为:

$$\begin{cases} x = \frac{\sum_{i \neq j} \sum_j W_{x_{ij}} x_{ij}}{\sum_{i \neq j} \sum_j W_{x_{ij}}} \\ y = \frac{\sum_{i \neq j} \sum_j W_{y_{ij}} y_{ij}}{\sum_{i \neq j} \sum_j W_{y_{ij}}} \end{cases} \quad ij=12, 23, 34, 13, 24 \quad (10)$$

2 测量精度修正

提高矢量水听器的测向精度是保证二维轨迹测量精度的关键问题。除了优化信号处理方法,还需要对矢量水听器的频域特性和测向精度进行修正。

2.1 实验室水池修正

由于每一个矢量水听器的声压和振速灵敏度是不同的,

水听器的振速灵敏度随频率而变化,需要对矢量信号进行预处理。海上试验前利用实验室消声水池对每个矢量水听器声压与振速相位差的频域特性进行测量修正,并在软件中补偿。同时优化测向信号处理算法,采用平均周期图加权互谱算法,对方位序列 $\theta(k)$ 进行平均。

对工作频段为 500—5000Hz 的矢量水听器,选择 10 个频点在消声水池中进行测量,主要测量内容有:(1) p, v_x, v_y 的指向性,指向性零点深度及指向性正交性;(2) p, v_x, v_y 的灵敏度频率特性;(3) 声压与振速相位差的变化特性。

2.2 湖上试验修正

由于湖上试验条件较海上优越,利用湖上试验对矢量水听器的测向误差进行修正,以提高海上试验测量精度。图 2 是矢量水听器测向工程误差修正补偿图,图 3 显示的是角度补偿前后 v_x 和 v_y 的指向性对比。

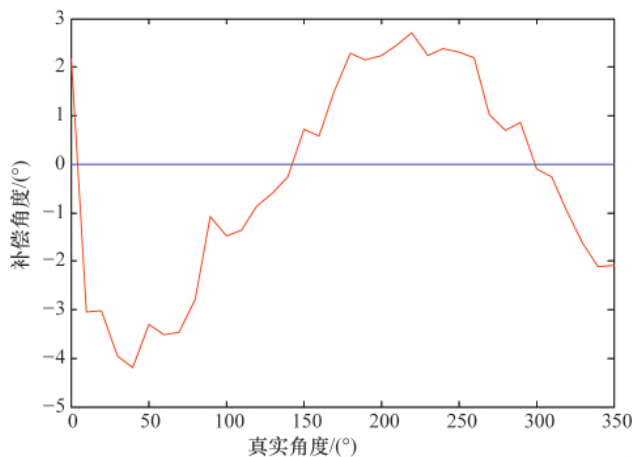
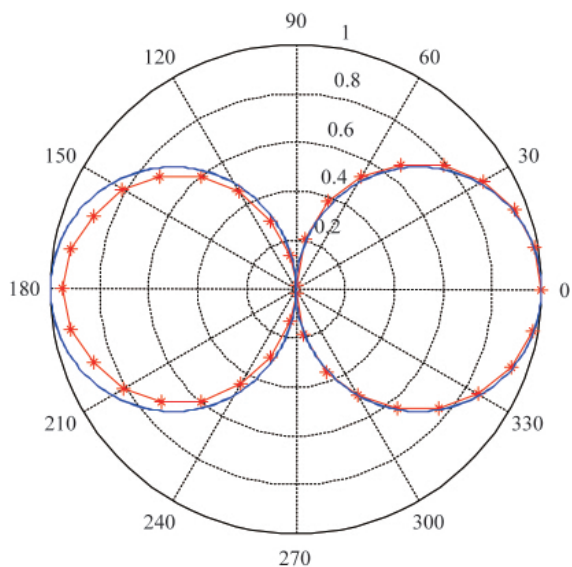


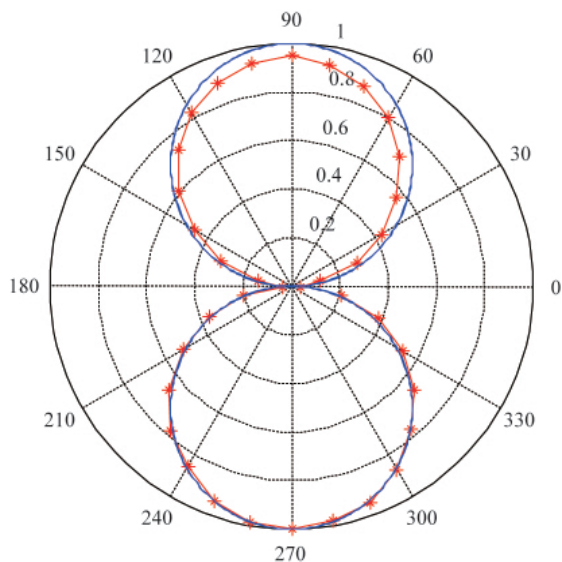
图 2 矢量水听器测向工程误差修正补偿图

Fig. 2 Modification and compensation figure of direction measurement project with vector sensors



(a) v_x 角度补偿前后的指向性对比

(a) Comparison of directivity v_x pattern before and after angle compensation



(b) v_y 角度补偿前后的指向性对比

(b) Comparison of directivity v_y pattern before and after angle compensation

图 3 角度补偿前后的指向性对比

(* 测量指向性, — 补偿后指向性)

Fig. 3 Comparison of directivity pattern before and after angle compensation

(*Measurement directivity, — Compensation of directivity)

3 水下战武器二维弹道测量系统

为了对水下武器的水中弹道进行测量,研制了水下战武器二维弹道测量系统,系统由 3 部分组成:船载显控分系统、浮标测量阵分系统、无线电遥控及数据传输分系统。

3.1 船载显控分系统

船载显控分系统由显控计算机和无线电通信基站组成,主要完成系统的参数设置、对浮标工作状态的控制和自检、实时定位解算、信息存储和显示。

3.2 浮标测量阵分系统

浮标测量阵系统由 4 个水声浮标组成,用于被动接收水中兵器航行噪声,并完成信号检测和方位估计功能。浮标上加装 DGPS 和方位姿态仪,可实时记录浮标当前时刻的位置和方位姿态信息。

每个浮标共有两个水声传感器:声压传感器和矢量水听器。声压传感器输出一路声压信号;矢量水听器输出两路矢量信号和一路声压信号。矢量水听器信号经电路放大后,转为差分信号传送接收板,在接收板放大和滤波,光耦隔离及模拟信号转换成数字信号(AD)采样后进入信号处理板。信号处理板负责水声信号处理工作,处理后的结果传送到通信板。通信板是系统的数据交换中心,它完成以下任务:通过以太网和无线电台与基站通信,上传数据和结果,下传命令;通过接收压力传感器 RS232 和方位姿态仪数据;通过 RS232 与 GPS 相连,接收定位数据和同步定时;负责电源的管理和电池

电量的监控;负责值班,定时与基站联系。

3.3 无线电遥控及数据传输分系统

无线电遥控及数据传输分系统由船载无线电遥控设备、浮标上无线电遥控设备组成。主要任务是将浮标上水声信号处理机测得的信号参数信息及浮标的位置、方位姿态信息实时传送到测量母船,以供船载显控分系统解算显示,同时将船上的控制命令及初始化参数信息传送至浮标。

4 海上试验验证

为了验证系统测量性能,在海上进行实际测量试验,采用低频噪声声源来模拟水下战武器的航行噪声。在噪声源上方安装 DGPS 记录声源的实时位置,作为被测目标的位置真值。通过比较测量系统数据与 DGPS 记录数据,得到测量系统的精度。试验共进行 10min,目标航行 412m,数据测量间隔为 10s,共获得 900 个测点数据。测量结果如图 4 所示。

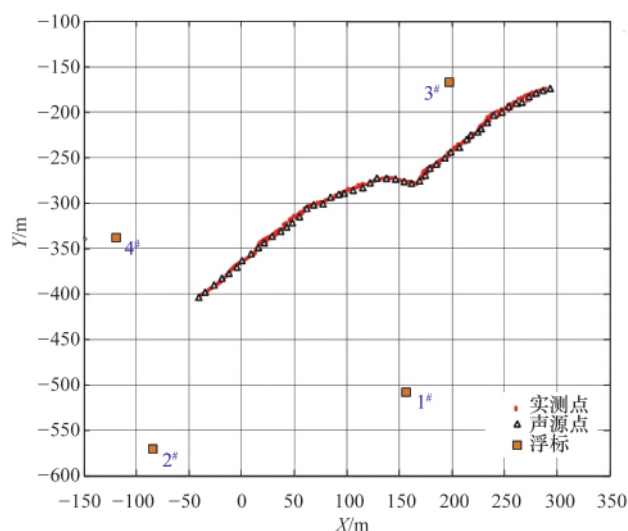


图 4 弹道轨迹

Fig. 4 Two-dimensional trace

通过试验数据可以看出采用矢量水听器浮标阵测量出

的噪声源轨迹与 DGPS 轨迹吻合非常好,验证了系统测量方法具有合理性。

5 结论

本文基于矢量水听器测试技术,利用实验室消声水池和湖上试验分别对矢量水听器的频域特性、测向误差进行修正。采用 DGPS 水面定位与水下水声定位相结合的方法,实现对水下战武器二维弹道被动式测量,解决了传统试验时需要被测目标安装合作信标的问题,提高了测量精度;同时这种方法具有海上实施方便、实时性强等特点,并在海上实际试验中进行了验证,具有较好的工程应用价值。

参考文献 (References)

- [1] 石杰, 张京平. 水下固定单站对水面舰船的纯方位目标运动分析[J]. 计算机测量与控制, 2011, 19(2): 429-431.
Shi Jie, Zhang Jingping. *Computer Measurement & Control*, 2011, 19(2): 429-431.
- [2] Hwakes M, Arye N. Effect of sensor placement on acoustic vector-sensor array performance [J]. *IEEE Journal Oceanic Engineering*, 1999, 24(1): 33-40.
- [3] Nehorai A, Paldi E. Acoustic vector sensor array processing [J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 1994, 42(9): 2481-2491.
- [4] 张李方, 程锦房, 何希盈. 单矢量水听器信号处理方位估计[J]. 舰船科学技术, 2009, 31(3): 104-107.
Zhang Lifang, Cheng Jinfang, He Xiyang. *Ship Science and Technology*, 2009, 31(3): 104-107.
- [5] 宋新见, 殷冬梅, 惠俊英. 基于矢量信号处理的水声定位系统[J]. 海洋工程, 2003, 21(3): 100-114.
Song Xinjian, Yin Dongmei, Hui Junying. *The Ocean Engineering*, 2003, 21(3): 100-114.
- [6] 惠俊英, 惠娟. 矢量信号处理基础[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
Hui Junying, Hui Juan. *Fundamentals of vector signal processing* [M]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008.
- [7] 王逸林. 应用希尔伯特黄变换的单矢量传感器多目标分辨研究[J]. 声学技术, 2006(4): 376-380.
Wang Yilin. *Technical Acoustics*, 2006(4): 376-380.

(责任编辑 丁佐奇, 岳臣)

· 科学共同体介绍 ·

中国岩石力学与工程学会

中国岩石力学与工程学会 (Chinese Society for Rock Mechanics & Engineering) 前身是 1978 年由中国科学院、外交部联合报请国务院批准成立的国际岩石力学学会中国小组。1981 年成立学会筹备组, 1985 年 6 月中国岩石力学与工程学会正式成立。陈宗基、潘家铮、孙钧、王恩敦、冯夏庭、钱七虎等历任学会理事长。

中国岩石力学与工程学会是全国岩石力学与工程科技工作者的学术性群众团体,

是中国科协的组成部分, 对外为国际岩石力学学会中国国家小组。

学会接受业务主管单位中国科协和社会登记管理机关国家民政部的业务指导和监督管理, 受挂靠单位中国科学院地质与地球物理研究所、中国科学院武汉岩土力学研究所的领导。学会建立有岩石力学专业委员会, 会员从成立时的 2000 余名发展到 15000 名有余。

中国岩石力学与工程学会积极开展国

际科技交流, 活跃在国际岩石力学大会上, 全面介入国际岩石力学学会二级机构的工作; 理事长钱七虎当选国际岩石力学学会副主席; 在中国成立国际岩石力学学会工程实例委员会等。学会主办《岩石力学与工程学报》、《地下空间与工程学报》、《岩石力学与工程动态》等学术刊物。

中国岩石力学与工程学会现任 (第 6 届) 理事长为钱七虎, 副理事长何满潮, 副理事长兼秘书长伍法权。(责任编辑 秦政)