

水下被动定位系统的校准子系统

钱进 毛卫宁

(东南大学 南京·210018)

减小水下被动定位系统的定位误差是多年来人们一直关注的一个问题。对于一个实际定位系统,定位误差通常由随机误差和系统误差两部分组成,予以分别对待,可提高定位精度。其中系统误差可对采用系统校准进行消除。本文介绍一个可对实际定位系统实施校准的校准子系统。海上试验的结果表明,定位系统经过校准可有效地减小定位误差,提高定位精度。

关键词:校准,被动定位,时延差

Calibration subsystem for underwater passive location system

QIAN Jin MAO Weining

(Southeast University Nanjing, 210018)

Reducing location errors of underwater passive location system has been an attractive problem for many years. Usually, location errors are composed of systematic errors and random errors for a practical location system. Handling them respectively can improve location precision. Systematic errors can be eliminated by system calibration. In this paper, a calibration subsystem used for a practical location system is presented. Test results at sea show that location precision can be improved through calibration.

Key words: calibration, passive location, time-delay difference

1 系统误差的产生

常用的被动定位方法是借助若干个按一定方式布放的水听器,通过测量目标辐射噪声到水听器间的时延差来解算目标的距离和方位等参量。除了人所共知的海洋环境的复杂性外,一个实际的被动定位系统还会遇到如下一些问题。首先,基阵虽经过精心设计、加工和安装,但工程实现时仍不可避免地存在误差,使水听器的位置偏离理论设计值,再则水听器的声中心与几何中心不一定完全一致;其次电路上各处理通道间也有不一致性;此外安放基阵的测量船船底及基阵架本身会产生声反射。这些因素都会导致定位误差,但这种误差不同于海洋信道变化所产生的定位误差,而是系统本身所固有的误差。这种固有误差表现在时延测量值上有一偏量,大小与方位和频率有关,但很难从理论上进行定量

描述,只能通过系统海上校准予以消除。本文介绍一个可对实际系统实施校准的校准子系统,它由硬件和软件两部分组成。硬件用以提供目标与基阵之间的精确距离,软件用以完成校准系数的计算。下面分别给予介绍。

2. 校准子系统硬件的工作原理

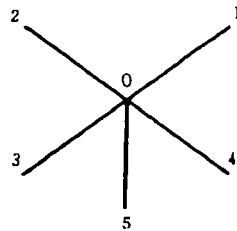


图1 半正交阵结构示意图

图1为被动定位系统所采用的基阵结构,它是一个半正交阵(图中0、1、2、3、4、5代表各基元的位置)。由于其本身的对称性,使得测距与测向之间无耦合,联合测距测向时

的方位、距离方差与单纯测距、测向时的方差相等^[1],故可分别加以考虑。对于我们这个定位系统,方位测量精度容易保证,提高定位精度的关键是减小测距误差,因而校准主要是针对距离进行的。校准子系统硬件部分的任务是提供精度高于被动定位系统的距离测量值。为此采用准同步钟单程测距原理。原理框图如图2所示。在目标船上用无线电设备和水声设备同时发射一脉冲信号,在装有基阵的测量船上接收无线电脉冲信号和水声脉冲信号。由于无线电波的传播速度为光速,等于 3×10^8 m/s,在几百米的校准距离范围内其传播时间可忽略不计,而声波在水中的传播速度一般为1500 m/s左右,比无线电波的速度慢得多,由此可测得水声信号的单程传播时间,再由声速仪实测出声速,即可得到目标的精确距离。为提高系统的抗干扰性,无线电信号采用脉冲调频信号。所测得的数据由接口电路送出,一方面可以在终端屏幕上显示,一方面存放到计算机中供计算校准系数用。由于校准子系统硬件的脉冲前沿延迟在微秒量级,故其测距精度理论上可达到厘米量级。实际测量中,由于各种干扰信号的影响,测距精度会有所下降,但仍可完全满足被动定位系统校准的要求。

3. 校准子系统软件的功能

校准软件根据校准子系统硬件测得的标准距离值和被动定位系统给出的距离测量值,经过数据处理和计算,找到系统误差所产生的时延偏量,亦即校准系数,供系统补偿用。编制校准软件时,要考虑海试时拟将采用的校准路径及被动定位算法。由于我们所用的测量船无动力,故校准路径选定为目标船在不同的距离上绕测量船走圆。另考虑到被动系统的时延测量值中既有系统误差又有随机误差,因此为了找到系统误差,要尽量减小随机误差的影响,亦即在同一方位不同距离处的测量值要尽可能的多,以便能找到真正的系统误差,进行有效的补偿。至于补偿时延一次差,还是补偿时延二次差由定位算法决定。对于如图1所示的基阵结构,可以采用球面内插法^[2]定位,也可以采用两线阵加权的方法^[3],对前者需要补偿的是5个时延一次差,而对后者需要补偿的是两个时延二次差。计算一次差补偿量时,需要知道目标的X、Y、Z坐标,之后根据两点间的距离公式计算出时延一次差,由下式计算补偿量:

$$\vec{P} = \vec{\tau}_{\text{标}} - \vec{\tau}_{\text{测}}$$

其中 \vec{P} 为5个时延一次差补偿量, $\vec{\tau}_{\text{标}}$ 是由已知的目标位置换算出的5个时延一次差, $\vec{\tau}_{\text{测}}$ 是被动系统所提供的5个时延一次差测量值。若需要补偿时延二次差,则补偿量由下式计算:

$$\vec{P} = (1/R_{\text{测}} - 1/R_{\text{标}}) \begin{bmatrix} d^2 \cos^2 \alpha / c \\ d^2 \sin^2 \alpha / c \end{bmatrix}$$

其中 \vec{P} 为两个时延二次差的补偿量, $R_{\text{标}}$ 是校准子系统硬件所提供的标准距离值, $R_{\text{测}}$ 是被动系统测得的两个时延二次差按方位加权后计算出的距离值^[3], c 为声速, d 为两线阵的基元间距, α 为1-3线阵与阵法线方向的夹角。在 360° 范围内,每隔 5° 给出一组补偿量,存放在计算机中,供被动系统调用。

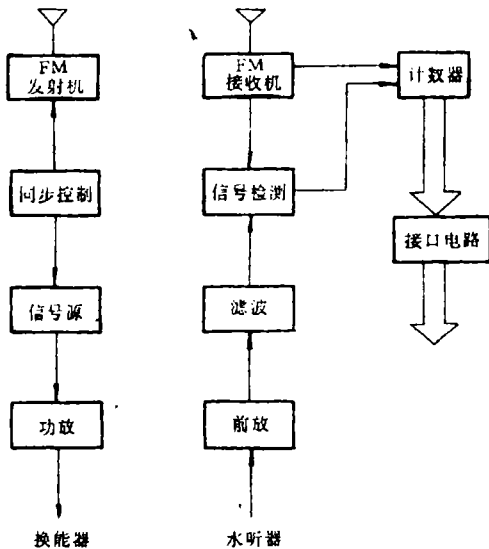


图2 准同步钟单程测量原理框图

4. 海试结果及其讨论

为了得到校准系数,我们进行了如下的海上测量。如图 1 所示,接收基阵位于测量船上,目标船上有两个发射换能器,一个用于发射有一定带宽的噪声信号,另一个用于发射脉冲信号。两船间的精确距离由校准子系统硬件提供。声速由声速仪实测。接收阵位于水下 4m,发射换能与接收阵基本上在同一水平面上。测量船到达指定海域后,在某一位置抛锚,目标船按事先选定的路径运动。为减小自噪声的影响,目标船应低速运行。测量船上的测量设备负责数据的接收、采集和实时显示,数据还同时由通信系统送到岸上的中心处理计算机。计算机收到数据后,运行事先编制好的软件,即可得到校准系数。之后校准系数以数据文件的形式存放在计算机中,后置处理软件可随时调用之。

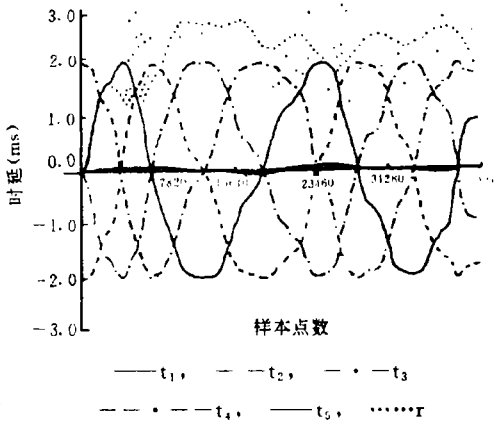


图 3 海上实测得的时延值和标准距离值

$t_1 \sim t_5$ 代表 5 个时延一次差, r 为标准距离。

图 3 是目标船绕测量船运动时海上实测出的 5 个时延一次差和标准距离。为作图方便,距离值以 200m 进行了归一化。图 4 给出了校准前后测距精度的变化情况。由图可见,校准前最大测距误差达 90%,且测距精度随目标方位的变化无任何规律。这表明实际系统在不同方位的测距误差已不单纯是由基阵安装误差和目标方位变化造成的^{[1],[4]},确有系统误差存在。为了对比,图 5 给出了理论上半正交阵测距精度随目标方位变化的方向性

因子。从理论上讲这种阵形结构决定了其在 45° 、 135° 、 225° 、 315° 方向测距误差最大。另由图 4 可见校准后测距误差减小到 6% 以下,说明经过校准系统误差的影响减小到了最低限度,因而可提高定位精度。若再配之以有效的后置处理方法,定位精度还可进一步提高。

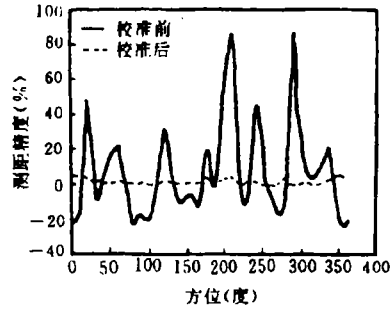


图 4 测距精度随目标方位的变化
(海上实测结果)

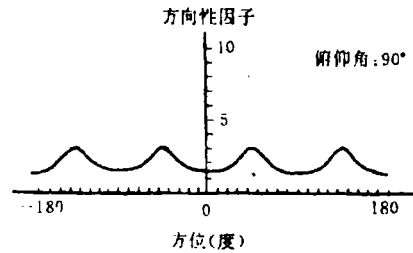


图 5 理论上半正交阵测距精度随
目标方位变化的方向性因子

事实表明校准试验成功与否直接关系到定位系统整体性能的好坏。而校准软件除具备上述功能外,还要能够自动判断系统误差的存在,通常若同一方位不同距离处的距离测量值全部偏大或偏小,则表明有系统误差存在。原则上,系统误差只随频率、方位变化,而与距离无关,但由于声波传播过程中海面、海底反射等诸多因素的影响,系统误差可能会随距离略有变化,不过在某一测试距离范围内可认为其基本不变。可能的情况下,为提高定位精度,对方位也应进行校准。

(下转第 138 页)

能器结构,分别给出自由振动情况下换能器的扭转振动共振频率方程。

其中 $L_{b1} + L_{b2} = L_b$ 。

4.3 扭转角位移节点位于陶瓷晶堆中

在这种情况下,节点把晶堆分为长为 L_{cf} 及 L_{cb} 的两部分,很显然, $L_{cb} + L_{cf} = ph$, 此时,换能器可看为两个 1/4 波长振子,共振频率方程分别为

$$\operatorname{tg}(k_r L_{cf}) \operatorname{tg}(K_f L_f) = \rho c_e I_p / (\rho_f c_f I_{pf}) \quad (32)$$

$$\operatorname{tg}(k_r L_{cb}) \operatorname{tg}(k_b L_b) = \rho c_e I_p / (\rho_b c_b I_{pb}) \quad (33)$$

5 结论

本文研究了由两段金属圆棒与切向极化晶堆构成的复合结构扭转振动换能器的振动特性,推出了换能器的共振频率方程,得出了换能器各部分的等效电路,以及机电耦合系数和截面扭转系数的具体表达式,当换能器的频率给定后,就可以得出其长度,因此就可以对换能器进行不同频率及不同尺寸的设计,以适合各种不同的应用场合。为此类换能器的工程设计提供了理论依据。

参考文献

- 1 陈桂生. 超声换能器设计. 北京:海洋出版社,1984.
- 2 栾桂冬等. 压电换能器和换能器阵. 北京:北京出版社,1990
- 3 袁易全. 超声换能器. 南京:南京大学出版社. 1992.
- 4 姜健等译. 超声波焊接. 北京:国防工业出版社,1963.
- 5 L. D. Rozenberg. Sources of high-intensity ultrasound. New York: Plenum Press, 1969.

35 (12):1661~1669

3. 袁易全、雷家煜、姚治国. 近代声学基阵原理及其应用. 南京大学出版社,1994
4. G. L. Carter. Passive ranging errors due to receiving hydrophone position uncertainty. J. Acoust. Soc. Am. 1979, 65(2):528~530

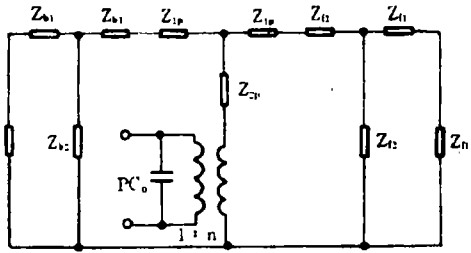


图3 复合结构扭转振动换能器的等效电路

4.1 扭转角位移节点位于金属直棒与陶瓷晶堆的交界面处。

此时,换能器由一个 1/4 波长的金属直棒与一个 1/4 波长的换能器振子组成,对于扭转振动的 1/4 波长金属直棒,其共振频率方程为

$$L_b = \lambda_b / 4 \quad (28)$$

式中 λ_b 为金属直棒中扭转波的波长。对于另外 1/4 波长的扭转振子,其共振频率方程为,

$$\operatorname{tg}(k_r ph) \cdot \operatorname{tg}(k_f L_f) = \rho c_e I_p / (\rho_f c_f I_{pf}) \quad (29)$$

4.2 扭转角位移节点位于金属直棒中

此时,半波扭转变换器也可看成两个 1/4 波长振子,其一是 1/4 波长的金属直棒,另一个是由两段金属棒及陶瓷晶堆组成的 1/4 波长振子。其共振频率方程分别为

$$L_{b1} = \lambda_b / 4 \quad (30)$$

$$\frac{Z_f}{Z_b} \operatorname{tg}(k_f L_f) \cdot \operatorname{tg}(k_b L_{b2}) + \frac{Z_f}{Z_0} \operatorname{tg}(k_f L_f)$$

$$\cdot \operatorname{tg}(k_r ph) \frac{Z_0}{Z_b} \operatorname{tg}(k_r ph) \cdot \operatorname{tg}(k_b L_{b2}) = 1$$

(31)

(上接第 104 页)

参考文献

1. 郑兆宁、向大威. 水声信号被动检测与参数估计理论. 科学出版社,1983
2. J. O. Smith and J. S. Abel. Closed-form least - squares source location estimation from range-difference measurements IEEE Tran. ASSP