

适用于 MAUV 的变基线定位系统^①

俞佳男^② 徐文滔 刘祖斌^③ 卢奂采

(浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室 杭州 310014)

摘 要 为了满足多关节潜器(MAUV)在深海进行精细化探测的需要,实现其在基线长度实时变化的情况下仍能进行高精度定位,设计并实现了一种适用于 MAUV 的变基线定位系统。该定位系统通过水听器阵列获得潜标发射的线性调频(LFM)水声信号,利用同步时延估计算法得到时延信息;辅助以光纤陀螺仪、关节转角传感器数据,通过基线解算算法更新基线长度及姿态参数;结合温盐深仪、多普勒计程仪数据,利用变基线定位算法计算得到 MAUV 的三维位置坐标。通过基于 Bellhop 的定位仿真及消声水池实验验证,结果表明该定位系统具有稳定性强、定位精度高的优点,其定位精度优于斜距的 1%,能满足 MAUV 在深海工作的定位要求。

关键词 多关节潜器(MAUV);变基线;水下定位;时延估计;Bellhop 仿真

0 引 言

多关节潜器(multi-joint autonomous underwater vehicle, MAUV)主要工作在深海区域,利用自身在竖直方向上灵活折返和转向特性,能够实现快速的垂直三维剖面运动。同时,通过自身搭载的仪器,实现对深海区域的精细化自主探测。为了提供海洋数据观测的准确空间坐标,同时,为 MAUV 的路径规划、运动轨迹校正、避障、回收和紧急自救等任务提供 MAUV 自身的精确位置信息,需要对其进行水下定位。

超短基线和长基线水下定位技术是目前常用的深海定位技术^[1]。超短基线定位系统多采用接收孔径很小的多元基阵,将其安装在水面母船上。利用各个基元接收来自无人潜器(autonomous underwater vehicle, AUV)的信号,通过计算接收信号间的相位差确定目标方位及距离^[2-3]。其定位误差受海水声速测定误差、全球定位系统(global positioning system, GPS)定位误差、载体姿态误差及基阵安装误差影响,导致其定位精度不高,另外受温跃层和多

途干涉影响,往往接收不到其发射信号,导致其实际定位效果差,无法满足 MAUV 在深海区域的精确定位^[4]。长基线定位系统采用在海底布置多个应答器的方式,各应答器之间相距上百米乃至几千米,构成长基线,通过测量 AUV 上的收发器与海底已知位置的应答器之间的距离进行定位。由于其基阵接收孔径大,可以得到相对较高的定位精度。但是,长基线定位技术需要多个应答器,价格昂贵,且需要对海底基阵进行测量定位,回收及布放也相对困难^[5-6]。因此,也不适用 MAUV 在深海区域的定位。

国内外学者通过在 MAUV 这类仿蛇形机器人上搭建以三轴加速度计、三轴陀螺仪、三轴磁力计为基础元件的惯性导航系统实现对其导航及定位^[7-8]。但由于惯性导航系统具有完全自主性,其导航定位误差随时间的推移而逐渐积累,最终导致定位结果发散。随着组合导航技术的发展,“惯性导航技术+声学定位技术”的组合导航方式克服了传统惯性导航系统定位结果发散的问题,保证了定位导航精度^[9-10]。在此类组合导航技术中,常采用

① 国家重点研发计划(2017YFC0306202),国家自然科学基金(51975525)和浙江“一带一路”俄罗斯科学院-浙江工业大学联合研究实验室基金(ZJ 20170919)资助项目。

② 男,1994 年生,硕士;研究方向:水声定位;E-mail: yujianan_svlab@163.com

③ 通信作者,E-mail: liuzb@zjut.edu.cn

(收稿日期:2020-01-21)

倒置超短基线来纠正惯性导航系统随时间推移产生的定位发散,但是,倒置超短基线定位精度受姿态误差影响较大,MAUV 在转向运动中,变化的姿态容易引起定位结果出错^[11-12]。

MAUV 依靠各舱段间的关节转角实现灵活转向,在转向过程中,其姿态不断变化,搭载在首尾舱段的水听器形成的基线也会不断变化。超短基线与长基线定位技术仅适用于基线恒定的情况,对于基线可变的 MAUV 来说,无法进行精确定位。

针对上述问题,本文提出并设计了一种适用于 MAUV 的变基线定位系统。该系统相比传统超短基线和长基线定位系统,能够实现其基线变化的情况下,利用变基线解算算法,实时更新 MAUV 的基线长度及姿态参数,减少 MAUV 转向过程中带来的基线误差与姿态误差,从而达到对 MAUV 进行精确定位的目的。通过基于 Bellhop 的定位仿真及消声水池实验,验证了该定位方法的可靠性与准确性。

1 变基线定位原理

MAUV 变基线定位系统主要由单个潜标和 MAUV 上搭载的水听器阵列及其他传感器组成。其中,单潜标作为信标提供 MAUV 坐标定位的参考点或原点。定位系统采用同步信标方式,通过水听器阵列获取潜标发射的声信号,利用时延估计算法得到时延信息,进而完成水听器测量点与潜标的斜距测量;根据搭载的光纤陀螺仪得到姿态信息,结合首舱、中舱、尾舱之间的关节转角数据,利用变基线解算算法可以得到当前基线长度、俯仰角和横摇角;通过 MAUV 自身搭载的温盐深仪获取当前深度数据,利用变基线定位算法,获得 MAUV 的三维位置坐标。

变基线定位系统定位几何原理如图 1 所示。其数学表达式如式(1)所示。

$$\begin{aligned} z_2 - z_1 &= L \sin \alpha \\ y_1 - y_2 &= L \cos \alpha \sin \gamma \\ x_1 - x_2 &= L \cos \alpha \cos \gamma \\ (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2 &= R_1^2 = (ct_1)^2 \\ (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (z_2 - z_0)^2 &= R_2^2 = (ct_2)^2 \end{aligned} \tag{1}$$

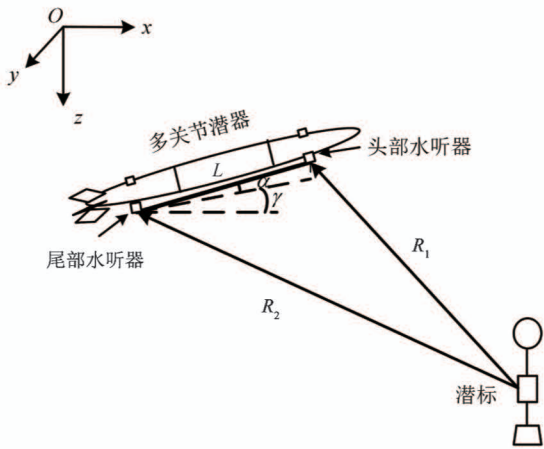


图 1 变基线定位系统原理图

式中, (x_0, y_0, z_0) 为潜标在大地坐标系下的位置坐标,为已知量;首部水听器深度 z_1 可由温盐深仪测得; L 为首部水听器与尾部水听器之间的直线距离,定义为基线长度; α 为基线俯仰角,朝上为正, $\alpha \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$; γ 为基线横摇角,基线在水平面上的投影沿 x 正方向时为 0° ,向 y 正方向偏为正, $\gamma \in [-\pi, \pi]$;其中,基线长度、基线俯仰角和横摇角随 MAUV 的姿态和关节转角变化而变化,通过变基线解算,可得对应数据; c 为信号从潜标到水听器阵列的有效声速,根据实际声速剖面而定; t_1, t_2 分别为首部水听器、尾部水听器接收到潜标信号的时延信息,根据有效声速和时延,可得斜距 R_1, R_2 。

对式(1)进行求解,可得首部水听器坐标两组解 (x_{11}, y_{11}, z_1) 和 (x_{12}, y_{12}, z_1) ;尾部水听器坐标两组解为 (x_{21}, y_{21}, z_2) 和 (x_{22}, y_{22}, z_2) ,其解的形式如下:

$$\begin{cases} x_{1i} = x_0 + A \cos^2 \gamma + (-1)^i \cdot \sin \gamma \sqrt{c^2 t_1^2 - H_1^2 - A^2 \cos^2 \gamma} \\ y_{1i} = y_0 + A \sin \gamma \cos \gamma + (-1)^{i-1} \cdot \cos \gamma \sqrt{c^2 t_1^2 - H_1^2 - A^2 \cos^2 \gamma} \\ x_{2i} = x_0 + A \cos^2 \gamma + (-1)^i \cdot \sin \gamma \sqrt{c^2 t_1^2 - H_1^2 - A^2 \cos^2 \gamma} - L \cos \alpha \cos \gamma \\ y_{2i} = y_0 + A \sin \gamma \cos \gamma + (-1)^{i-1} \cdot \cos \gamma \sqrt{c^2 t_1^2 - H_1^2 - A^2 \cos^2 \gamma} - L \cos \alpha \sin \gamma \\ z_2 = z_1 + L \sin \alpha \end{cases} \tag{2}$$

$$i = 1, 2$$

其中,

$$H_1 = z_0 - z_1$$
$$A = \frac{c^2(t_1^2 - t_2^2) + L^2 - 2LH_1 \sin\alpha}{2L\cos\alpha\cos\gamma} \tag{3}$$

下一步,结合多普勒计程仪速度、位移信息与 MAUV 航姿信息,对 MAUV 位置进行预测。定位结果中与预测值接近的判定为真解,最终得到 MAUV 定位坐标。

2 变基线定位系统软硬件设计

根据 MAUV 变基线定位系统各部分硬件组成,将其分为发射单元和接收单元。发射单元是布放于作业海域近海底的潜标,配备具有同步时钟功能的发射换能器,用于实现同步信号的周期性发射;接收单元是 MUAV 上搭载的数据处理平台,采用先进的数字信号处理(digital signal processing, DSP)硬件电路及相应软件算法,对接收信号进行分析处理,从而完成高精度定位。

2.1 定位系统硬件设计

发射单元(潜标)主要由发射换能器、水密电子舱和标架以及声学释放器三部分组成。如图 2 所示为发射单元的组成结构图。

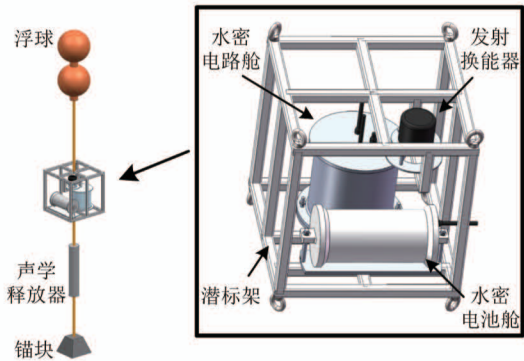


图 2 发射单元组成结构图

发射换能器作为信号发射源,发射周期性的同步信号,其性能优劣直接影响定位系统的定位精度。由于 MAUV 在水域中进行水平、垂直方向的剖面运动,要求水声发射换能器指向性在竖直方向上尽可能大角度,同时,由于工作水深、垂直波束的要求和尺寸限制,因此选用杭州应用声学研究所研制的

CT10 型深水换能器^[13]。发射单元发射的同步信号采用 7~11 kHz 的正线性调频信号,以提高定位精度。

水密电子舱分为水密电路舱和水密电池舱。由于潜标长期工作在水下,主要靠电池供电,因此考虑到其功耗问题,水密电池舱搭载 4000 Wh 锂电池,单次充电可为发射换能器及发射电路提供约 24 h 的连续工作时长,满足水下长时间工作要求。水密电路舱载有信号发射电路,组成框图如图 3 所示。其主要功能是通过 STM32 单片机读取预定波形文件,周期性地产生发射信号源,发射信号经 D/A 转换后进行功率放大、阻抗匹配,最后由发射换能器发射预定水声信号。

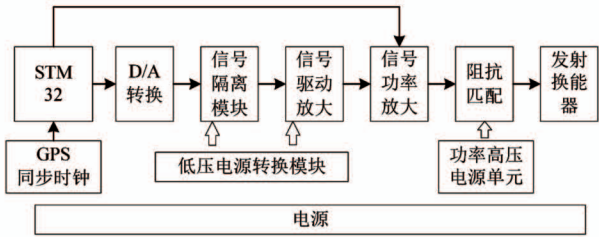


图 3 潜标信号发射电路结构图

由于变基线定位系统采用同步信标模式,因此潜标搭载 GPS 同步时钟模块。通过 GPS 同步设备对潜标上的同步时钟模块进行驯服,实现潜标与 MAUV 上的时钟同步。

潜标标体为框架式结构,整体焊接而成。水密电子舱与发射换能器固定于潜标架内。声学释放器用于潜标的布放与回收。

接收单元主要由水听器阵列、DSP 定位计算电路以及各类传感器三部分构成,具体组成结构如图 4 所示。

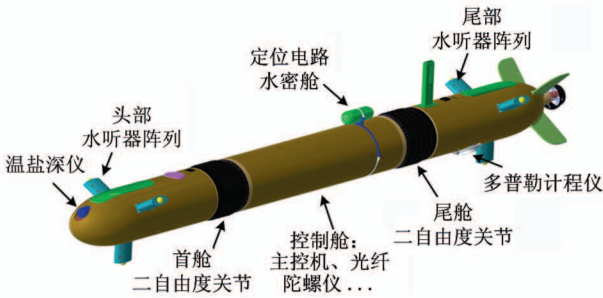


图 4 接收单元组成结构图

水听器阵列是实现水声测距的关键传感器,其由两个环绕 MAUV 舱体的等圆心角三单元水听器阵组合而成,分别安装在首尾两节舱段的外部。环形水听器阵列的设计,增大了信号接收角度,避免了传统接收阵元因被潜器本体所遮挡而接收不到信号这一问题,有效提高了信号连续性和信噪比。水听器阵列经水密电缆连入定位电路水密舱获得供电,同时输入采集的水声信号。

定位电路水密舱内载有 DSP 定位计算电路,其结构如图 5 所示。头部水听器阵列与尾部水听器阵列信号经调理模块放大、整形、滤波后,输入至模数(analog digital, AD)转换芯片。由于本系统需要对多路水听器信号进行高精度高速同步采集,因此选用 TI 公司的 ADS8556 芯片。考虑到定位计算要进行大量数据的复杂运算,且硬件电路由电池供电,所以在处理器芯片的选择上把运算性能放在第一位,同时兼顾芯片功耗。本系统采用 TI 公司的中低功耗 TMS320C6748 作为主处理器^[14]。

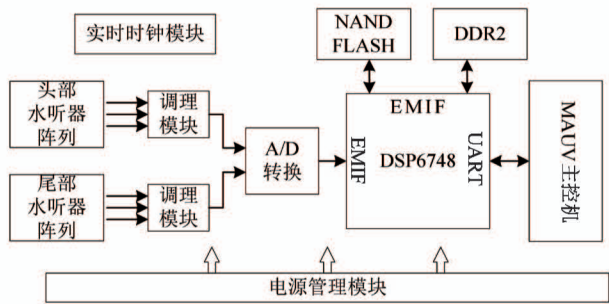


图 5 DSP 定位计算电路结构图

MAUV 上搭载的各类传感器,如温盐深仪、多普勒计程仪、光纤陀螺仪等,由主控机负责数据采集存储。DSP6748 通过内置的全双工 UART 实现与主控机之间的 RS422 通信,主控机向 C6748 发送所需传感器数据,C6748 把计算得到的位置信息返回给主控机。

2.2 定位系统软件设计

发射单元的信号产生与发射是基于 STM32 实现的,其整个信号处理软件流程是通过 STM32 单片机读取存储于 TF 卡中的发射信号配置文件,产生源信号,同时,控制功率放大模块,进行源信号的放大与发射。通过修改信号配置文件,可以实现多种

水下通信信号制式的发射,例如正弦填充矩形包络连续波(continue wave, CW)脉冲、线性调频(linear frequency modulation, LFM)脉冲等,提高了潜标的利用率。

接收单元的信号处理软件算法部分是基于 DSP6748 实现的。整个信号处理软件实现了水声信号的采集与处理、各类传感器数据的处理以及最终的定位解算。其软件流程如图 6 所示。

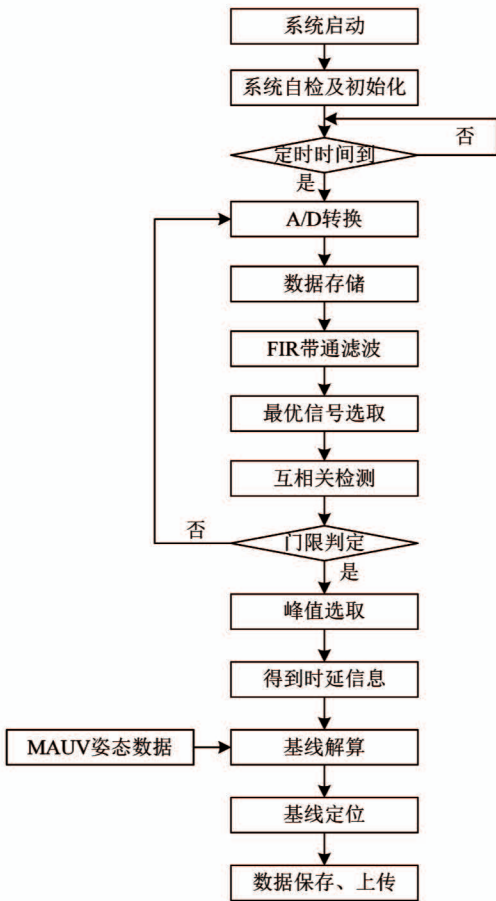


图 6 接收单元信号处理软件流程图

定位系统工作前,接收单元与 GPS 需进行时钟同步,同时设定定时时间。定时时间对标潜标发射信号时刻,当定时时间到时,发射单元发射周期性既定信号,C6748 进行信号的同步采集与 AD 转换。信号的采集存储采用 Ping-Pong 存储机制,实现数据存储与处理同步进行;下一步对采集完的缓存块数据,进行对应频段的有限长单位冲激响应滤波器(finite impulse response, FIR)带通滤波,滤除非频段范围内的噪声信号;利用能量检测法,选取头部与

尾部水听器阵列中信噪比最高的最优信号;将最优信号与存储的本地参考信号做互相关检测;通过门限判定,峰值选取得到时延信息,如果相关峰包络未过检测门限,则继续采集数据;得到时延信息后,整合 MAUV 姿态数据,进行基线解算,确定基线长度、横摇角、俯仰角;最后进行 MAUV 基线定位,确定其三维位置坐标,将定位数据保存并上传。

3 变基线定位系统算法实现

针对 MAUV 变基线定位算法中所需时延数据,本文引入同步时延估计算法,对接收信号进行时延估计;通过基线解算算法实时更新基线长度、横摇角与俯仰角,从而实现最终的变基线定位。

3.1 线性调频(LFM)信号时延估计

传统水下声学定位技术常采用单频 CW 窄带信号作为应答信号,但由于水下信道的时变空变性,该信号常受到相位模糊、多途干扰等问题的困扰^[15]。由于 LFM 信号有着优良的分辨及抗多途干扰能力,因此采用该信号作为主动声呐信号。

对于 LFM 信号的时延估计,相关法作为经典的时延估计方法被广泛应用^[16-17]。其原理是通过自相关函数的滞后峰值估计相关信号之间的时延差。

MAUV 变基线定位系统在实际工作中,头尾水听器阵列不断接收水下信号,DSP 将接收信号与本地参考信号进行相关运算。由于采集的接收信号为长序列,本地参考信号为短序列,如果采用传统乘累加的相关运算方式,其运算量大,所需计算时间长,无法在一个定位周期内完成解算,导致下个定位周期的数据丢失。因此,为了满足系统要求,采用基于重叠保留的快速相关算法来进行相关运算。

因为时域上两个序列的互相关结果等于频域上一个序列的共轭和另一个序列的乘积的傅里叶逆变换,所以可以将时域上的相关计算转换到频域求快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)与 FFT 逆变换(IFFT)^[18]。利用基于 FFT 的快速相关算法,可以大大减少线性乘累加的过程,提高运算速度。

如图 7 所示,为基于重叠保留的快速相关算法

流程,其具体计算步骤如下。

(1) 设定参考信号 $h(n)$ 为 $N = 2048$ 点序列,将采集信号 $x(n)$ 以 $N = 2048$ 点为分段长度,进行分段。

(2) 由于此快速相关算法是基于重叠保留法的相关思想,因此需在首段前补 $N - 1$ 个零点,后续每段都引用前一段的后 $N - 1$ 个点,也就是第 $x_i(k)$ 段的前 $N - 1$ 点取成第 $x_{i-1}(k)$ 段最后 $N - 1$ 个点。

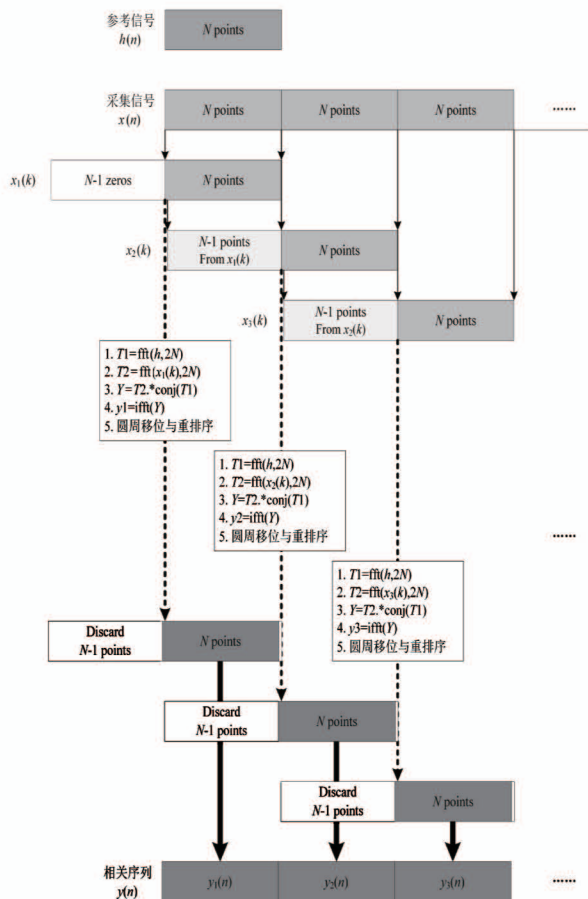


图 7 基于重叠保留的快速相关算法

(3) 如此重叠拼接而成每一段 $x_i(k)$ 的数据长度为 $2N - 1$ 个点,应用 FFT 快速相关算法,对参考信号 $h(n)$ 和每一段 $x_i(k)$ 进行 $2N$ 点 FFT,然后进行共轭相乘、IFFT,以及最终相关序列的圆周移位与重排序,得到每一段的相关序列。

(4) 基于重叠保留的思想,需要舍去每一段前 $N - 1$ 个点。又因为 FFT 求快速相关算法,补零导致计算出来的序列比真正的线性相关序列多了一个零值点,因此要舍去那个零值点。最后,连接每段,可

得整体相关序列 $y(n)$ 。

根据计算量和相应的处理运行时间效率, 设定 LFM 信号脉冲时长为 10 ms, 信号采样频率为 200 kHz。利用此基于重叠保留的快速相关算法, 可以保证 DSP6748 在一段处理时间窗内 (10 ms) 完成头尾两路最优水听器信号的 2048 点相关处理。

在实际的水声信道中, 由于水底和水面的反射, 存在比较严重的多途干扰^[19]。水声信号沿多条声线路径到达水听器接收阵列, 被其接收, 经信号处理后, 信号的互相关序列 $y(n)$ 会因而叠加出多个相关峰。如果直接判断互相关峰最大值, 可能会引起误判。如图 8 中, 第 1 个互相关峰是由直达声引起的, 所以, 第 1 个互相关峰对应的横坐标才是真正的时延值, 第 2 个互相关峰是由于信号多途叠加引起的, 此互相关峰值虽然是最大的, 但不是真正的时延值。在信标与水听器接收阵列开角较大时, 多途叠加出来的相关峰反而可能会比直达声的相关峰还要大。

因此, 不能通过寻找相关序列最大值的方法来确定直达声的相关峰, 这里引入基于包络检波的相关峰选取算法, 来确定真正的直达声时延。

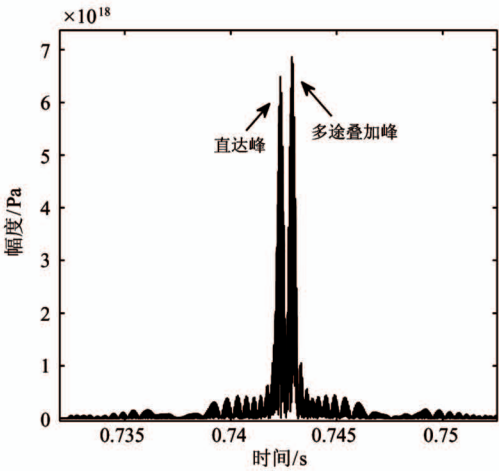


图 8 互相关序列波形

设 LFM 信号脉宽为 T , 最低频率 f_L , 最高频率 f_H , 其信号表达式如下:

$$s(t) = \begin{cases} A\cos(2\pi f_L t + \pi k t^2) & 0 \leq t \leq T \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中, A 为信号幅度; k 为调频斜率, $k = (f_H - f_L)/T$ 。带宽 $B = f_H - f_L$, 其自相关函数绝对值的包

络^[20]为:

$$R_s(\tau) = \begin{cases} \frac{A^2}{2} \left| \frac{\sin[\pi k \tau (T - |\tau|)]}{\pi k \tau} \right| & |\tau| \leq T \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

从式(5)中可以看出其自相关函数绝对值包络形式为 sinc 函数, 其包络截止频率为其带宽 B , 相关峰包络主瓣宽度约为 $\frac{2}{B}$ 。

如图 9 所示为基于包络检波的相关峰选取算法流程, 其具体步骤如下。

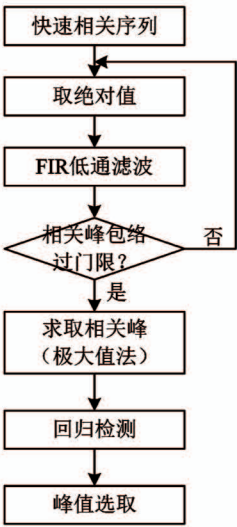


图 9 基于包络检波的相关峰选取算法

- (1) 对快速相关序列取绝对值。
- (2) 将整流后的相关序列通过截止频率为 $s(t)$ 带宽的低通滤波, 得到互相关序列包络, 如图 10 所示。

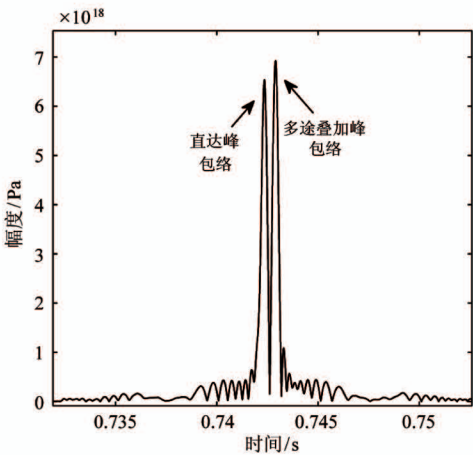


图 10 相关峰包络

(3) 判断相关峰是否过判决门限。实际情况中,判决门限可以选取噪声和参考信号相关峰值的 5 倍左右,也可选取实测信号和参考信号相关峰值即主瓣峰值的一半,门限的选取受到外部环境和作用距离等因素的影响较大。

(4) 通过极大值法,求取第一个互相关峰位置。

(5) 由于取包络有平滑作用,其最值点是不准确的,因此需回归检测。以第一个互相关峰位置为基点,回归到原互相关序列相应位置,根据包络宽度,在基点附近的若干点范围内寻找最值,认为此最值即为直达声的相关峰,计算对应时延值,得到真正的直达声时延。

考虑到利用时延信息进行定位,还可能会出现距离模糊的问题^[21]。本文设计的定位周期为 3 s,而 MAUV 作业的最大距离为 3 km,因此定位周期满足了抗距离模糊的条件,避免了这一问题。该周期同时也满足了接收单元进行定位计算所需时间。

3.2 变基线解算

MAUV 在进行精细化探测的运动过程中,存在转弯、扭动、摇摆、俯仰等姿态变形。为了减少 MAUV 姿态变化带来的基线误差与姿态误差,在每次基线定位前,需要根据最优信号对应的水听器相对位置,通过坐标转换的方式实时更新当前基线长度 L 、俯仰角 α 与横摇角 γ ,从而实现在其基线变化的情况下对 MAUV 进行精确定位。

如图 11 所示,在 MAUV 每一舱段中轴线末端设置机体坐标系 P_1 、 P_2 、 P_3 。在首舱坐标系 P_1 中,头部环形水听器阵列三基元坐标记为 $r(1)_{p_1} = (d_1, 0, -R)$, $r(2)_{p_1} = (d_1, -\frac{\sqrt{2}}{2}R, \frac{\sqrt{2}}{2}R)$, $r(3)_{p_1} = (d_1, \frac{\sqrt{2}}{2}R, \frac{\sqrt{2}}{2}R)$;在尾舱坐标系 P_3 中,尾部环形水听器阵列三基元坐标记为 $r(4)_{p_3} = (d_3, 0, -R)$, $r(5)_{p_3} = (d_3, -\frac{\sqrt{2}}{2}R, \frac{\sqrt{2}}{2}R)$, $r(6)_{p_3} = (d_3, \frac{\sqrt{2}}{2}R, \frac{\sqrt{2}}{2}R)$ 。其中, R 为环形水听器阵列半径, d_1 、 d_3 为头、尾水听器阵距首舱、尾舱末端长度。已知首舱、中舱、尾舱各舱段长度为 l_1 、 l_2 、 l_3 。中舱相对于大地坐标系 P 的俯仰角 α_0 ,横摇角 γ_0 与翻滚角 β_0 由

安置在内的光纤陀螺仪给出。首舱二自由度关节转角提供首舱相对于中舱的俯仰角 α_1 、横摇角 γ_1 数据;尾舱二自由度关节转角提供尾舱相对于中舱的俯仰角 α_3 、横摇角 γ_3 数据。

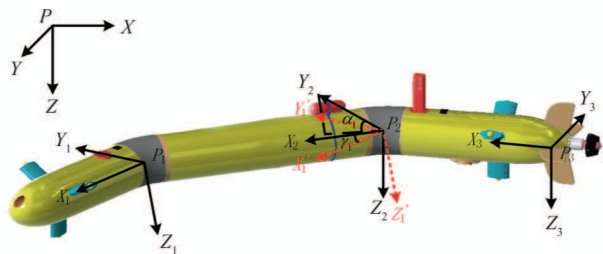


图 11 坐标转换示意图

将首舱坐标系 P_1 中三基元坐标转换到中舱坐标系 P_2 中,转化后的坐标分别记为 $r(1)_{p_2}$ 、 $r(2)_{p_2}$ 、 $r(3)_{p_2}$ 。

转换公式如下:

$$r(i)_{p_2} = \mathbf{p}_{p_2p_1} + \mathbf{R}_{p_2p_1} \cdot r(i)_{p_1} \quad i = 1, 2, 3$$

$$\mathbf{p}_{p_2p_1} = [l_2 \quad 0 \quad 0]^T$$

$$\mathbf{R}_{p_2p_1} = \begin{bmatrix} \cos\gamma_1 \cos\alpha_1 & -\sin\gamma_1 & \cos\gamma_1 \sin\alpha_1 \\ \sin\gamma_1 \cos\alpha_1 & \cos\gamma_1 & \sin\gamma_1 \sin\alpha_1 \\ -\sin\alpha_1 & 0 & \cos\alpha_1 \end{bmatrix}$$

(6)

其中, $\mathbf{p}_{p_2p_1}$ 为首舱坐标系 P_1 到中舱坐标系 P_2 的平移变换矩阵, $\mathbf{R}_{p_2p_1}$ 为首舱坐标系 P_1 到中舱坐标系 P_2 的旋转变换矩阵。

同理,将尾舱坐标系 P_3 中三基元坐标转换到中舱坐标系 P_2 中,转化后的坐标分别记为 $r(4)_{p_2}$ 、 $r(5)_{p_2}$ 、 $r(6)_{p_2}$ 。转换公式如下:

$$r(i)_{p_2} = \mathbf{p}_{p_2p_3} + \mathbf{R}_{p_2p_3} \cdot r(i)_{p_3} \quad i = 4, 5, 6$$

$$\mathbf{p}_{p_2p_3} = [-l_3 \cos\alpha_3 \cos\gamma_3 \quad -l_3 \cos\alpha_3 \sin\gamma_3 \quad l_3 \sin\alpha_3]^T$$

$$\mathbf{R}_{p_2p_3} = \begin{bmatrix} \cos\gamma_3 \cos\alpha_3 & -\sin\gamma_3 & \cos\gamma_3 \sin\alpha_3 \\ \sin\gamma_3 \cos\alpha_3 & \cos\gamma_3 & \sin\gamma_3 \sin\alpha_3 \\ -\sin\alpha_3 & 0 & \cos\alpha_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, $\mathbf{p}_{p_2p_3}$ 为尾舱坐标系 P_3 到中舱坐标系 P_2 的平移变换矩阵, $\mathbf{R}_{p_2p_3}$ 为尾舱坐标系 P_3 到中舱坐标系 P_2 的旋转变换矩阵。

最后,将中舱坐标系 P_2 下的各水听器坐标转移到大地坐标系 P 下,转化后的坐标记为 $r(i)_p$ 。转换

公式如下:

$$\begin{aligned} r(i)_p &= p_{pp_2} + R_{pp_2} \cdot r(i)_{p_2} \quad i = 1, 2, \dots, 6 \\ p_{pp_2} &= [x \ y \ z]^T \quad R_{pp_2} = MNQ \\ M &= \begin{bmatrix} \cos\gamma_0 & -\sin\gamma_0 & 0 \\ \sin\gamma_0 & \cos\gamma_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ N &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta_0 & -\sin\beta_0 \\ 0 & \sin\beta_0 & \cos\beta_0 \end{bmatrix} \\ Q &= \begin{bmatrix} \cos\alpha_0 & 0 & \sin\alpha_0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\alpha_0 & 0 & \cos\alpha_0 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{8}$$

其中, p_{pp_2} 为中舱坐标系 P_2 到大地坐标系 P 的平移变换矩阵, R_{pp_2} 为中舱坐标系 P_2 到大地坐标系 P 的旋转变换矩阵, M 、 N 、 Q 分别为绕 Z 轴、 X 轴、 Y 轴旋转 γ_0 、 β_0 、 α_0 的旋转变换矩阵。

设最优信号对应的头和尾水听器位置坐标为 $r_{1P} = (x_{1P}, y_{1P}, z_{1P})$ 和 $r_{2P} = (x_{2P}, y_{2P}, z_{2P})$, 则:

$$\begin{aligned} L &= \| r_{1P} - r_{2P} \| \\ \alpha &= \arcsin \frac{z_{1P} - z_{2P}}{L} \\ \gamma &= \arccos \frac{y_{1P} - y_{2P}}{x_{1P} - x_{2P}} \end{aligned} \tag{9}$$

4 系统仿真与实验验证

4.1 基于 Bellhop 的定位系统仿真

本文针对新提出的变基线定位系统进行了基于 Bellhop 模型的原理性仿真验证。Bellhop 模型是由 Porter 和 Bueker 采用射线跟踪理论建立的水声信道建模仿真工具包^[22]。在 Bellhop 模型中,通过编写扩展名为 .env 的水声信道环境文件^[23],可以对海洋水声环境中的声速剖面、海底及海面结构、各界面反射及折射损失等相关参数进行设置,同时定义发射单元与接收单元的位置坐标,由此可以得到从发射单元到接收单元处的传递函数 $h(t)$, 即对应水声信道的冲激响应函数。将其与发射信号做卷积,即可得到接收单元处的接收信号。

Bellhop 模型仿真参数如下,海面环境为真空,

水深 1001 m;声速剖面如图 12 所示,为我国南海某海域 2019 年 5 月实测数据^[24]。海底环境为纵波声速 1679.44 m/s,横波声速 0 m/s,海底密度 1.628 g/cm³。发射单元深度 1000 m;接收单元深度 550 m,水平距离根据实际位置而定;声线条数 500,声线发射角度为 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 。

定义发射单元为坐标原点,发射信号形式为 7 ~ 11 kHz 正线性调频信号,脉冲时长 10 ms。

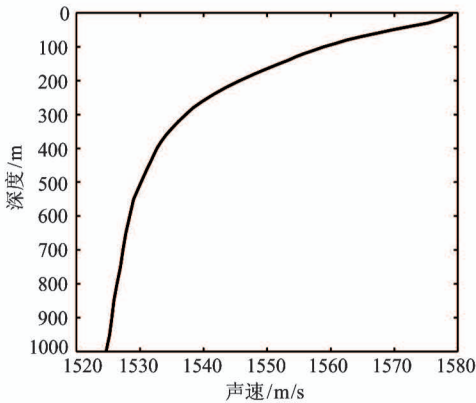


图 12 南海某海域声速剖面曲线

接收单元为 MAUV 上头部与尾部水听器,信号采样频率为 200 kHz。定义其头部水听器起始位置坐标 (308.6 m, 510 m, 550 m),尾部水听器位置由头部水听器位置根据当前基线长度、俯仰角、横摇角计算得到。MAUV 直线运动速度为 3 节航速 (1.543 m/s),转弯速度为 2 节航速 (1.286 m/s),转弯半径为 10 m。如图 13 所示,图中直线为 MAUV 仿真运动路径图。

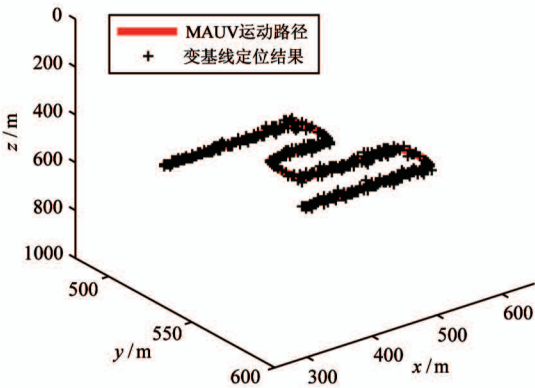


图 13 MAUV 仿真运动路径与变基线定位结果

已知某时刻发射单元与接收单元位置,基于

Bellhop 模型可得其水声信道冲激响应,与发射信号相卷积,可得当前接收信号。由于真实水声环境中存在一定程度的噪声,因此在接收信号上加入信噪比(SNR)为 20 dB 的高斯白噪声,以模拟真实情况,如图 14 所示。

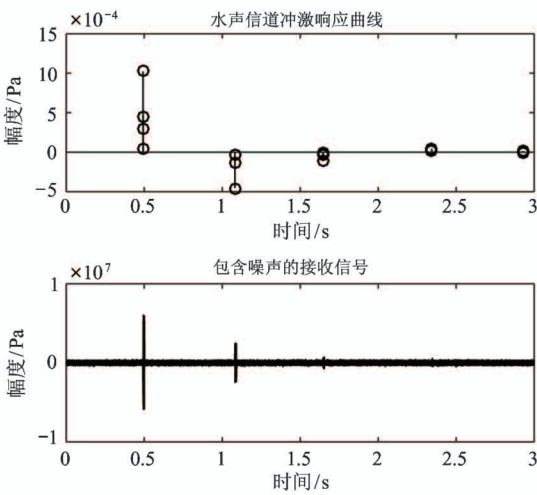


图 14 某时刻接收信号信道冲激响应与时域波形图

对 MAUV 各时刻所在位置求其接收信号,同时对该仿真接收信号进行时延估计;结合各时刻对应基线长度、俯仰角和横摇角,通过变基线定位算法,解算得到各时刻 MAUV 定位结果,如图 13 所示。可以发现,变基线定位结果基本吻合运动路径。

由于 z 方向深度数据来源于温盐深仪,其误差很小,可忽略不计,因此这里仅考虑由测距误差引起的 x 与 y 方向的定位误差。其定位误差分析如图 15 所示。 x 方向上整体定位误差(测量值 - 真值)在 10 m 以内,绝对误差平均值为 1.45 m; y 方向上整体定位误差优于 10 m,其绝对误差平均值为 1.25 m。

定位精度表达式如下式所示。

$$\text{定位精度}(\%) = \frac{\sqrt{\text{error}_x^2 + \text{error}_y^2}}{R} \times 100\% \quad (8)$$

其中, error_x 代表 x 方向上定位误差, error_y 代表 y 方向上定位误差, R 代表斜距。

通过基于 Bellhop 的定位仿真,可以得出结论, MAUV 变基线定位系统满足定位误差要求在 1% 以内,其定位误差主要来源于有效声速估计误差。

4.2 水池实验精度验证

为了验证变基线定位系统在真实环境中的可行

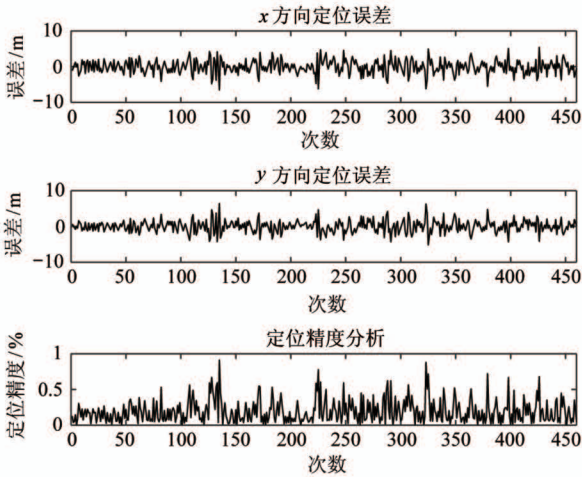


图 15 定位误差分析

性以及分析其定位误差水平,在浙江大学海洋学院消声水池中进行了变基线定位系统精度测试。消声水池长 50 m,宽 10 m,水深 15 m,室内温度为 20 ℃,实验设备包括可移动平台、潜标、接收水听器、信号处理系统等。实验包含静态定位与动态定位两部分。

静态定位实验方案为保持水听器阵列(水听器 1 与水听器 2)位置不变,潜标按如图 16 所示的路径在同一深度上进行移动,移动步长 1 m。通过移动潜标位置,改变斜距,以验证在不同斜距下的定位精度。由于水听器阵列位置不变,因此,当前基线长度 $L = 3$ m,基线俯仰角 $\alpha = 0$,基线横摇角 $\gamma = \frac{\pi}{2}$ 。受实验条件、环境、设备等因素的影响,测量不可能完

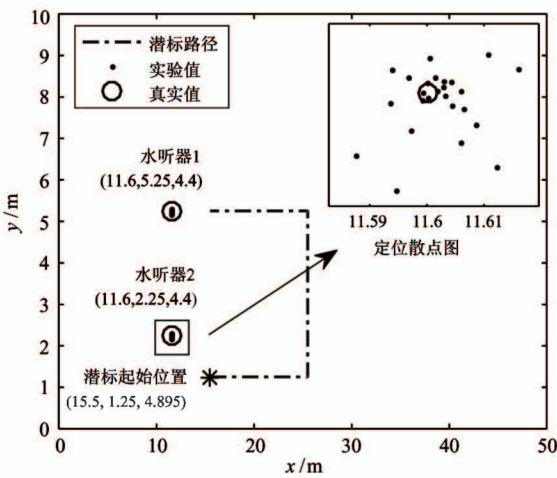


图 16 静态定位

全准确,测量值与真实值之间一定会存在着误差。由于水听器 1 与水听器 2 的定位结果由变基线定位算法给出,其定位误差是一致的,这里仅分析水听器 2 的定位散点图。实验测得的定位点基本均匀分布在真值位置附近,说明定位结果稳定可靠。

分析其定位误差及定位精度如图 17 所示。 x 方向上整体定位误差在 0.02 m 内,绝对误差平均值为 0.005 m。 y 方向上整体定位误差在 0.10 m 内,绝对误差平均值为 0.024 m。 y 方向上定位误差比 x 方向上定位误差大是因为 y 方向距离短,导致测量引起的误差大。静态定位实验结果表明,在不同斜距下,变基线定位系统定位误差在 1% 以内,定位结果准确。

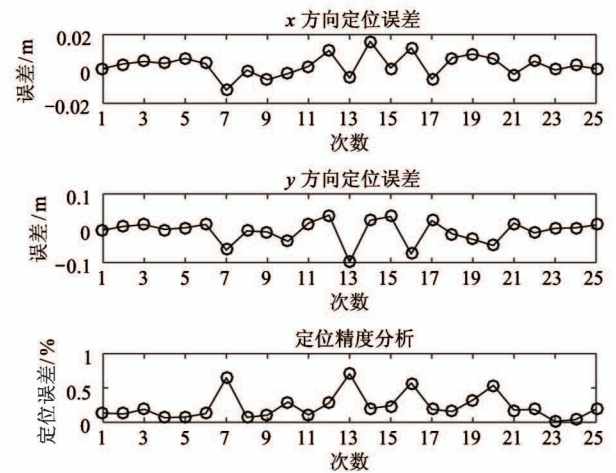


图 17 静态定位误差分析

为了验证变基线定位系统在水听器阵列运动时的定位性能,进行了动态定位实验,如图 18 所示。实验过程中,保持潜标位置不变,水听器阵列按图示轨迹进行移动,移动步长 1 m,其他参数与静态定位一致。分析其定位散点图及误差分析,如图 19 所示,可以得出结论,在水听器阵列移动过程中,变基线定位系统定位结果与真实位置基本吻合, x 方向上整体定位误差在 1×10^{-3} m 内,绝对误差平均值仅为 0.39×10^{-3} m;由于 y 方向上距离短,其整体定位误差在 0.1 m 内,绝对误差平均值为 0.056 m;定位误差来源于位置测量引起的误差以及有效声速估计引起的误差。

综上,静态定位与动态定位实验结果均满足项目要求的系统定位误差在 1% 内,实验结果稳定可

靠。

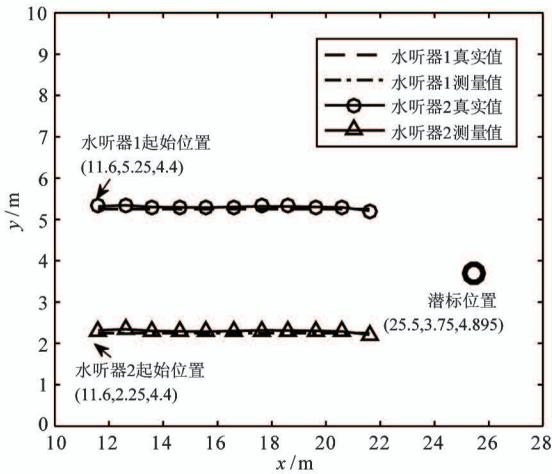


图 18 动态定位

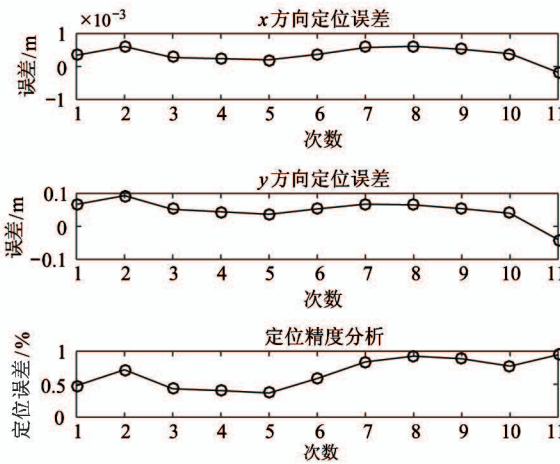


图 19 动态定位误差分析

5 结 论

针对 MAUV 在深海区域的定位问题,提出了基于变基线的定位原理,设计并研制了一套适用于 MAUV 的变基线定位系统软硬件,利用基于重叠保留的快速相关算法,对线性调频信号进行了高精度时延估计;针对 MAUV 姿态变形情况下,基线长度发生变化这一问题,设计了更新基线长度、基线横摇角与俯仰角的变基线解算算法。利用 Bellhop 模型建立水声信道,仿真得到接收信号,通过时延估计算法,对接收信号进行信号处理,结合变基线解算结果,最终通过变基线定位算法完成了深海变基线定位仿真。仿真结果表明,变基线定位系统定位结果

准确可靠,其定位精度优于斜距的 1%。同时,通过消声水池实验实际验证了变基线定位系统的定位准确性。在静态实验及动态实验中,定位精度均优于斜距的 1%,满足项目要求。

本文提出的基于变基线的 MAUV 定位系统为 MAUV 的深海定位研究奠定了基础。提出的同步时延估计算法与变基线解算算法具有一定的通用性,可用于其他基线定位系统。基于 Bellhop 的定位仿真研究对深海水声信道仿真及定位仿真具有一定借鉴意义。但在其定位精度上还可以进一步提升。未来将在后续研究中,采用高精度声速剖面仪测定海水声速曲线,作业时多次测量声速剖面提供实时声速剖面数据,从而减小由声速引起的测距误差以提高定位精度;在后置数据处理上,将引入卡尔曼滤波算法,通过对时延数据及定位数据进行滤波处理,以提高定位精度。

参考文献

- [1] Kebkal K G, Mashoshin A I. AUV acoustic positioning methods[J]. *Gyroscopy and Navigation*, 2017, 8(1): 80-89
- [2] 喻敏,惠俊英,冯海泓,等. 超短基线系统定位精度改进方法[J]. *海洋工程*, 2006, 24(1): 86-91
- [3] 冯守珍,吴永亨,唐秋华. 超短基线声学定位原理及其应用[J]. *海岸工程*, 2002, 21(4): 13-18
- [4] 姜婷. 超短基线定位系统定位误差的分析及仿真[J]. *水雷战与舰船防护*, 2012, 20(4): 14-17
- [5] 吴永亨,周兴华,杨龙. 水下声学定位系统及其应用[J]. *海洋测绘*, 2003, 23(4): 18-21
- [6] Han Y, Zheng C, Sun D. A high precision calibration method for long baseline acoustic positioning systems[J]. *Chinese Journal of Acoustics*, 2017, 36(4): 489-500
- [7] 王新怀,李小双,何伟键,等. 水下蛇形环境勘测机器人[J]. *电子产品世界*, 2015, 22(10): 67-70
- [8] Yang W, Bajenov A, Shen Y. Improving low-cost inertial-measurement-unit (IMU)-based motion tracking accuracy for a biomorphic hyper-redundant snake robot[J]. *Robotics and Biomimetics* 2017, 4(16): 1-9
- [9] Liu P, Wang B, Deng Z, et al. INS/DVL/PS tightly coupled underwater navigation method with limited DVL

- measurements[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(7): 2994-3002
- [10] 张亚文,莫明岗,马小艳,等. 一种基于集中滤波的 SINS/DVL/USBL 水下组合导航算法[J]. *导航定位与授时*, 2017, 4(1): 25-31
- [11] Rypkema N R, Fischell E M, Schmidt H. One-way travel-time inverted ultra-short baseline localization for low-cost autonomous underwater vehicles[C]//2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Singapore, 2017: 1-6
- [12] 白金磊. INS/USBL 组合导航技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学自动化学院, 2016: 26-28
- [13] 杭州应用声学研究所. CT10 型深水换能器[EB/OL]. <http://www.715.com.cn>; 中国船舶第七一五研究所, 2012
- [14] Texas Instruments. TMS320C6748TM 定点和浮点 DSP [EB/OL]. <http://www.ti.com.cn>; TI Inc, 2017
- [15] 李壮,乔钢,孙宗鑫. 基于短基线的 ROV 实时高精度定位系统[J]. *高技术通讯*, 2013, 23(12): 1230-1235
- [16] 李想,张殿伦,孙大军,等. 高精度超短基线定位系统的实现[J]. *计算机工程与应用*, 2007, 43(24): 176-178
- [17] 苗锦,刘志强,张跟鹏. 基于互相关的时延估计方法及其精度分析[J]. *舰船电子工程*, 2008, 28(6): 98-100
- [18] 虞湘宾,毕光国. 长序列信号快速相关及卷积的算法研究[J]. *电路与系统学报*, 2001, 6(4): 78-83
- [19] 乔钢,李壮,孙宗鑫. 堤坝检测水下机器人水声定位抗多途干扰方案研究[J]. *高技术通讯*, 2013, 23(4): 331-336
- [20] 张学森,郭霖,孔繁慧,等. 宽带信号检测中自适应门限设定方法[J]. *声学技术*, 2011, 30(2): 183-187
- [21] 惠娟,梁国龙. 时延/时延差组合定位模型抗距离模糊技术研究[J]. *声学技术*, 2007, 26(3): 385-388
- [22] Porter M B, Bucker H P. Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic fields[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1987, 82(4): 1349-1359
- [23] 李孟,周荣艳. 基于 BELLHOP 模型的水下信道仿真方法研究[J]. *舰船电子工程*, 2018, 38(8): 166-169
- [24] 卢少磊,刘增宏,李宏,等. 全球海洋 Argo 网格资料集 (BOA _ Argo) 用户手册[S]. 中国 Argo 实时资料中心, 2019: 1-29

Variable baseline positioning system for MAUV

Yu Jianan, Xu Wentao, Liu Zubin, Lu Huancai

(Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Manufacturing Technology, Ministry of Education
& Zhejiang Province, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014)

Abstract

In order to meet the need of refined detection of multi-joint autonomous underwater vehicle (MAUV) in deep sea and to realize its high-precision positioning under the real-time change of baseline length, a variable baseline positioning system for MAUV is designed and developed. The variable baseline positioning system includes a beacon located near the sea bed which emits linear frequency modulation (LFM) acoustic signal, and a hydrophone array mounts on MAUV to receive the signal. The time delay of the signal is calculated by a synchronous time delay estimation algorithm; added data from fiber optic gyroscope and turning angle sensor, the baseline length and attitude angle are updated by a baseline calculation algorithm; in the end, combined with the data of a conductivity-temperature-depth system and a doppler velocity log, the three-dimensional coordinates of the MAUV are obtained by the variable baseline positioning algorithm. Results of simulations based on Bellhop and experiments in an anechoic water tank show that the variable baseline positioning system has advantages of strong stability and high positioning accuracy, and its positioning accuracy is better than 1% of the slant distance, which meets the positioning requirements of MAUV in the deep sea.

Key words: multi-joint autonomous underwater vehicle(MAUV), variable baseline, underwater positioning, time delay estimation, Bellhop simulation