

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412369

# 基于信号重采样频移处理的宽带 ADCP 分层校准方法\*

随超楼<sup>1,2</sup>, 王敏<sup>2</sup>, 何龙标<sup>2</sup>, 杨平<sup>2</sup>, 郑慧峰<sup>1</sup>

(1. 中国计量大学计量测试与仪器学院 杭州 310018; 2. 中国计量科学研究院 北京 100029)

**摘要:**针对宽带声学多普勒流速剖面仪(ADCP)现有校准方法无法有效实现流速分层校准的问题,提出基于信号重采样频移处理的声波应答校准方法,通过应答换能器组分别接收 ADCP 各波束换能器发射信号,经分段重采样、时间窗补偿等处理,产生包含多普勒频移信息的模拟回波信号,实现对宽带 ADCP 流速分层校准。为更符合真实水体散射情况,基于主动声呐方程建立了回波信号幅度计算模型。搭建了可适用于陆上和水的宽带 ADCP 分层快速校准装置,对两个 ADCP 样机开展了校准实验,流速范围在 0.01~10 m/s,测量不确定度优于 0.3% $v$ +5 mm/s( $v$ 为流速测量值)( $k=2$ ),并与水槽拖车法进行了对比验证。

**关键词:** 声波应答法校准;信号重采样处理;流速分层;时间窗补偿;不确定度评定

中图分类号: TH71 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 410.55

## Calibration of broadband ADCP for multi-cell based on frequency shift processing by signal resampling

Sui Chaolou<sup>1,2</sup>, Wang Min<sup>2</sup>, He Longbiao<sup>2</sup>, Yang Ping<sup>2</sup>, Zheng Huifeng<sup>1</sup>

(1. College of Metrology Measurement and Instrument, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The current calibration methods of broadband ADCP cannot effectively realize the measurement of flow rate stratification. An acoustic response calibration method based on frequency shift processing by signal resampling is proposed in this paper. This method utilizes a group of response transducers to receive the signals transmitted by each transducer of the ADCP to be calibrated, then some simulated echo signals which contain Doppler shift information are generated by the process of signal segmentation and time-window compensation. In order to be consistent with the real water scattering situation, a calculation model of the echo signal amplitude is given based on the active sonar equation. A broadband ADCP calibration system for multi-cell is established, which could be applied in on-land and underwater, and two ADCP devices are calibrated by designing some experiments. The measurement uncertainty of the calibration system is less than 0.3% $v$ +5 mm/s ( $v$  denotes the flow velocity) ( $k=2$ ) in the flow velocity range of 0.01~10 m/s. The proposed method and calibration system are also verified by comparing to the flume towing method through experiment.

**Keywords:** acoustic response calibration method; signal resampling; flow rate stratification; time window compensation; uncertainty assessment

## 0 引言

声学多普勒流速剖面仪(acoustic doppler current profiler, ADCP)是一种基于多普勒原理的水体流速测量设备<sup>[1-2]</sup>,通过发射信号并接收水中散射体回波得到延时

和多普勒频移等信息,测量水流剖面中不同深度水层的流速。相较于机械式流速仪等传统流速测量设备,ADCP具有测速范围大、分辨率高、可分层且干扰流场的优点,被广泛应用在水文监测、海洋探测监测、定位导航等领域<sup>[3-5]</sup>。

ADCP作为测流仪器,通常工作在河流、海洋等复杂

收稿日期:2024-01-09 Received Date: 2024-01-09

\*基金项目:国家重点研发计划(2022YFF0607503)、国家自然科学基金(51805506)、中央科研院所基本科研业务费(AKYZD2112-2, AKYTC1601)项目资助

水体环境,长时间受水体压力、温度、盐度等因素影响其性能可能发生变化<sup>[6]</sup>,导致流速测量结果出现漂移或偏差。为保证 ADCP 测量结果的准确可靠,需定期对其进行校准<sup>[7]</sup>。

根据国内外已发布的 ADCP 标准和规范<sup>[8-11]</sup>,ADCP 主要有 3 种校准方法,水槽拖车法、自身航行试验法和同步比测法。水槽拖车法可方便地控制拖车速度,但校准流速范围依赖拖车车速,一般小于 ADCP 的流速量程,且水中散射体分布不易控制,影响回波信号强度和测量准确性;后两种方法要求较为开阔的水域环境,对硬件要求高、实施难度大,校准结果依赖所采用的 GPS 仪、流速计等速度比测设备性能,并且容易受环境影响。同时,现有方法均无法在各深度剖面产生不同标准流速,以实现 ADCP 分层性能的校准评价。针对上述方法成本高、操作难度较大等问题,Ma 等<sup>[12]</sup>提出通过应答器模拟回波信号的 ADCP 校准思路;申连洋等<sup>[13]</sup>提出通过控制回波信号相对发射信号的多普勒频移以模拟任意的速度矢量;郭世旭等<sup>[14]</sup>开发了一套 ADCP 单波束校准系统,通过应答器阵列回发频移信号实现流速的校准,但受限于 ADCP 多换能器发射信号在水下的相互干扰,无法实现对 ADCP 多个波束的同步校准;Zhou 等<sup>[15]</sup>设计了宽带 ADCP 对接装置并通过波束坐标系到仪器坐标系的转换,实现了对多波束合成流速校准,由于信号处理过程没有考虑不同流速信号与 ADCP 所划分时间窗间的关系,其校准结果误差较大,且只针对全水层单一流速作校准,未研究多个波束在不同水层下不同流速的校准。

针对现有 ADCP 校准方法未考虑水体流速分层校准的问题,本文提出基于信号重采样频移处理的声波应答法宽带 ADCP 分层校准方法,通过对不同水层回波信号设置不同频移,实现流速分层模拟;针对多普勒信号时域压缩与扩展导致的流速测量偏差,通过自适应时间窗补偿降低了测量偏差;同时,为更符合真实水体散射环境,利用主动声呐方程进行了回波信号幅度建模以控制回波信号的幅度。基于上述方法,搭建了一套宽带 ADCP 多波束分层校准装置,可实现 0.01~10 m/s 分层流速校准,并与水槽拖车法进行了对比实验与分析。

## 1 ADCP 工作原理

### 1.1 ADCP 径向测流原理

宽带 ADCP 结合了窄带测速范围大和脉冲相干测速精度高的优点,具有更好的测流性能<sup>[16]</sup>。ADCP 发射的宽带信号一般为两组或多组相位编码的脉冲波<sup>[17]</sup>,常用的编码方式有 Barker 码、M 序列、L 序列等,典型二进制 M 序列相位编码信号如图 1 所示。

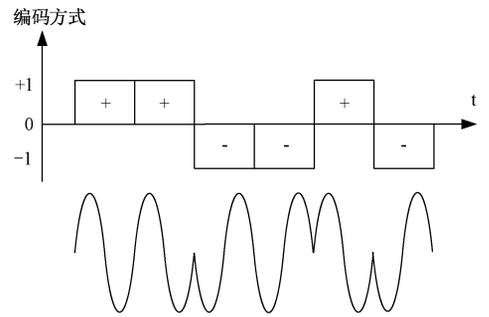


图 1 二进制 M 序列相位编码信号

Fig. 1 Binary M-sequence phase-encoded signals

ADCP 测速基于声学多普勒效应<sup>[18]</sup>,原理如图 2 所示,ADCP 发射信号遇到水中散射体发生反射,反射信号相比发射信号产生了频率偏移,即多普勒频移,假定水体流速的方向和大小与微小散射体相同,则多普勒频移与水体流速值一一对应。

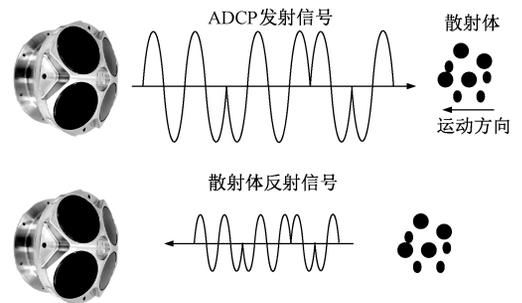


图 2 ADCP 径向测速示意图

Fig. 2 Radial velocimetry of ADCP

考虑到水中声速远大于水体流速,根据多普勒测速原理可得 ADCP 所测径向水流速度与多普勒频移的关系式<sup>[19]</sup>:

$$v = \frac{c}{2f_0}(f_r - f_0) = \frac{\lambda}{2}f_d \quad (1)$$

式中: $c$ 为水下声速; $f_0$ 为 ADCP 发射信号频率; $f_r$ 为发生多普勒频移后的反射信号频率; $\lambda$ 为发射信号的波长。其中 $f_d = f_r - f_0$ 为多普勒频移。

### 1.2 ADCP 流速分层原理

ADCP 分层测流示意图如图 3 所示,根据时间窗  $T$  划分不同水层并接收来自不同深度水层的反射信号,波束传播方向与纵轴夹角用  $\alpha$  表示,在  $t_0$  时刻发射长度为  $T$  的脉冲信号,信号在水中不同深度反射后被 ADCP 接收,不同深度的流速值对应到不同时间窗,即图 3 中每个菱形区域对应一个水层。

对 ADCP 分层流速校准时,应根据 ADCP 所设置的分层数、层厚、盲区等参数,确定各层在水下的深度,结合声速计算各层起始位置对应的信号时延。第  $i$  个分层相

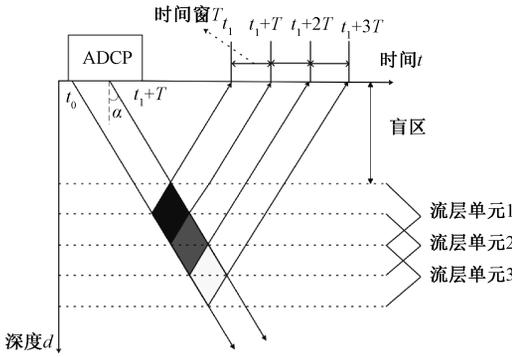


图3 ADCP 分层测流原理

Fig. 3 Flow rate stratification measurement of ADCP

比  $t_0$  时刻的信号时延与层厚、盲区满足式(2)。

$$t_i = \frac{2[d_b + (i-1) \times D]}{c \times \cos \alpha} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

式中:  $d_b$  为 ADCP 盲区;  $D$  为分层层厚;  $c$  为水下声速;  $N$  为分层数。

### 1.3 ADCP 流速合成与分解

开展 ADCP 多波束合成流速校准需进行坐标转换, 以实现不同波束流速的分解与合成。ADCP 通常有不同阵型结构, 为获得水域的三维流场, 至少需要 3 个不同方向且相互独立的换能器<sup>[20]</sup>。

典型 4 波束 Janus 结构的 ADCP 如图 4 所示,  $v_x$ 、 $v_y$  分别为仪器坐标系下的流速分量。对 ADCP 流速沿垂直方向  $z$  分层时, 假设各水层流速分量分布在  $xy$  平面中, 即流速分解与合成不考虑垂直分量  $v_z$ 。ADCP 各波束的径向流速分别为  $v_1$ 、 $v_2$ 、 $v_3$ 、 $v_4$ ,  $\alpha$  为波束角,  $\beta$  为径向流速在  $xy$  平面投影与  $v_x$  的夹角, 推导可得波束坐标系与仪器坐标系的速度对应关系式为:

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{v_1 - v_3 + v_2 - v_4}{2 \sin \alpha} \cos \beta \\ \frac{v_2 - v_4 - v_1 + v_3}{2 \sin \alpha} \cos \beta \end{pmatrix} \quad (3)$$

合成流速与  $v_x$ 、 $v_y$  间关系满足:

$$v_{\text{合}} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (4)$$

校准时, 可对待校准的合成流速值依据式(3)、(4)进行速度分解, 得到各波束对应的径向流速值, 进而依据式(1)计算各波束对应的多普勒频移。其中增加多普勒频移通过后续的重采样方法实现。

## 2 基于信号重采样频移处理的 ADCP 校准

### 2.1 多普勒频移信号的产生与分段

根据声波应答法 ADCP 流速校准原理, 模拟回波信号的频率准确性是影响校准性能的重要因素。对模拟

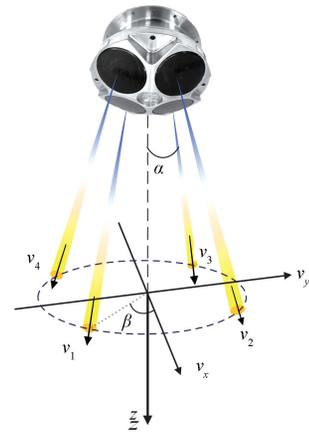


图4 4波束 Janus ADCP 结构示意图

Fig. 4 4-beam Janus ADCP structure

ADCP 回波信号频移处理的方法通常有数字变频法<sup>[21]</sup>和间隔缩放大法<sup>[15]</sup>, 前者基于希尔伯特变换进行相位调制, 仅适用于单频或窄带信号; 后者根据标准流速值设置与原始信号采样率成一定关系的回发速率, 通过改变采样点的间隔实现变频, 处理后的信号在时域上表现为压缩或展宽, 与 ADCP 发射测流信号在水中反射导致的压缩或展宽类似, 因此间隔缩放大法可适用宽带信号和窄带信号, 且不依赖 ADCP 发射信号的形式。文献[15]通过对信号设置不同回发速率实现变频, 但由于各分段信号的脉宽很短, 且需要在回发信号时根据不同分层连续切换发射速率, 对硬件要求很高, 容易出现较大误差, 故只实现了对各层流速都相同情况下的校准, 无法对不同水层设置不同流速进行校准。

对此, 本文提出基于分段重采样的间隔缩放大法, 原理如图 5 所示。首先利用声学应答换能器接收 ADCP 发射信号, 与应答换能器连接的采集卡以固定速率  $f_s$  进行采集, 得到的原始信号如图 5(a) 所示; 根据 ADCP 所设分层及各层待校准流速的标准值  $\tilde{v}_i$ , 对原始信号进行分段重采样, 不同重采样速率的信号如图 5(b) 所示; 将其拼接后以  $f_h$  的回发速率进行回发, 回发信号如图 5(c) 所示, 可以看到不同层信号对应了不同的流速值。假设各层重采样率为  $f_{ri}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), 回发至 ADCP 的速率固定为  $f_h$ , 则回发到 ADCP 的信号频率将变为:

$$f_i = \frac{f_h}{f_{ri}} \times f_0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

即多普勒频移变为  $f_d = f_i - f_0$ , 由式(5)和(1)可得信号重采样率与流速标准值的关系式为:

$$f_{ri} = \frac{c}{2v_i + c} f_h \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

开展分层流速校准时, 首先由式(6)得到各分层对应的信号重采样率, 对采集的 ADCP 信号进行重采样, 并

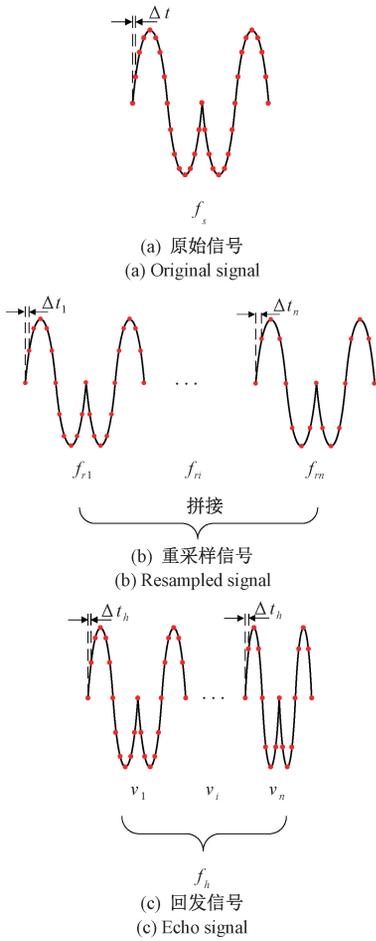


图 5 重采样法原理示意图

Fig. 5 The principle of the resampling method

对各段拼接后组成包含了所有水层不同流速信息的回发信号,以固定发射速率 $f_h$ 回发至 ADCP,将 ADCP 各层流速值分别与标准流速 $\tilde{v}_i$ 对比,即可完成对 ADCP 的分层流速校准。

### 2.2 多普勒频移信号的时间窗补偿

多普勒效应会导致信号在时域上发生压缩或展宽,对应到重采样信号以固定速率回发时,信号长度与水层对应的时窗长度不同而错位,进而导致 ADCP 流速解算发生偏差,因此需根据时窗长度对不同大小的流速信号进行时域补 0,不同水层单元下时窗补偿如图 6 所示。

对 ADCP 发射信号采集得到的原始信号长度  $T$  与信号点数  $x$  满足关系式  $T = x/f_s$ 。当以采样率  $f_{ri}$  进行重采样时,采样率  $f_{ri}$  与重采样点数  $x_i$  同样满足式(7)。

$$T = \frac{x}{f_s} = \frac{x_i}{f_{ri}} \quad (7)$$

当对重采样的信号以固定速率  $f_h$  回发时,信号长度将变为:

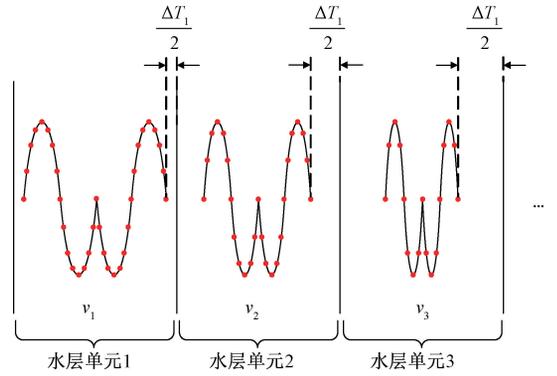


图 6 不同水层单元的时间窗补偿

Fig. 6 Compensation of time-windows for different flow rate stratification

$$T_i = \frac{x_i}{f_h} \quad (8)$$

由于重采样率与回发速率不相等,应对发回前的各段重采样信号按长度  $\Delta T_i = T - T_i$  进行补 0,由式(7)可得补 0 长度与待校流速满足式(9):

$$\Delta T_i = T \left( 1 - \frac{c}{2v_i + c} \right) \quad (9)$$

由式(9)可得,  $\Delta T_i$  随模拟流速  $v_i$  增大而变大,符合多普勒频移越大信号压缩程度越大的现象。

### 2.3 回发信号的幅度建模

由于 ADCP 在水下环境工作,接收到水中散射体的反射信号的信噪比一般较小。为使声波应答法校准与 ADCP 实际工况较为接近,依据主动声呐方程(式(10))对回发的模拟信号幅度进行建模。

$$SL - 2TL + TS + (DI - NL) = DT \quad (10)$$

式中:  $SL$  为 ADCP 换能器发射声源级;  $TL$  为传播损失;  $TS$  为目标强度;  $DI$  为接收换能器的指向性指数;  $NL$  为噪声级;  $DT$  为检测阈。

声源级可参考文献[22]测量得到。传播损失主要受传播距离  $r$  和水中吸收系数  $\alpha$  影响:

$$TL = 20\lg r + \alpha r \quad (11)$$

其中,吸收系数  $\alpha$  可参考文献[23]计算。

目标强度表示目标对 ADCP 发射信号的反射能力大小,如下式<sup>[24]</sup>:

$$TS = S_v + 10\lg \left( \frac{c\tau\theta_b r^2}{2} \right) \quad (12)$$

式中:  $S_v$  为体积散射强度;  $\theta_b$  为立体角;  $\tau$  为 ADCP 发射信号时间宽度。

ADCP 为收发合置的换能器,指向性指数  $DI$  如下式:

$$DI = 20\lg \left( \frac{\pi D}{\lambda} \right) \quad (13)$$

式中： $D$ 为 ADCP 换能器的直径。

噪声级  $NL$  可表示为：

$$NL = NL_0 + NL_s + 10\lg W \tag{14}$$

式中： $NL_0$ 为环境噪声； $NL_s$ 为自噪声； $W$ 为换能器的接收频率带宽。

声波在水下经过反射和传播衰减后最终被 ADCP 换能器接收并转换为电信号，该电信号的信噪比即  $DT$ ，大于等于接收机的检测阈  $DT$  时系统可检测到目标信号，小于  $DT$  则系统无法检测到目标信号，即无法进行流速测量。

根据上述分析建模，确定校准装置中应答器回发的模拟多普勒信号的幅度。针对本文所采用的 ADCP 样机与应答换能器，施加到应答换能器两端的激励电压随深度变化的幅值曲线如图 7 所示，使得 ADCP 校准流程和结果更符合实际工作环境与状况。

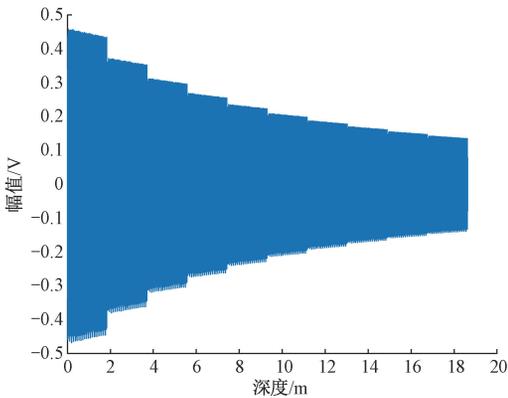


图 7 应答换能器激励电压随深度变化曲线

Fig. 7 Response transducer excitation voltage versus depth curve

### 3 ADCP 校准装置与实验

#### 3.1 基于信号重采样频移处理的 ADCP 校准装置

基于信号重采样频移处理的 ADCP 校准装置结构如图 8 所示，主要由应答换能器组、信号采集卡、信号分段重采样处理模块、信号回发模块等组成。其中，应答换能器组采用 4 个相同参数的宽带收发合置换能器；信号采集卡使用最大采样率为 250 MS/s 的 8 通道 NI 5170R；信号分段重采样处理模块在上位机系统中通过软件实现；信号回发模块采用两个具有深度存储功能的双通道信号发生器。

ADCP 校准时首先设置其分层数、层厚等参数，再利用应答换能器分别接收 ADCP 不同波束的发射信号。与应答换能器相连的采集卡以固定采样率对发射信号进行采集；根据待校流速值对不同通道信号计算对应的多普

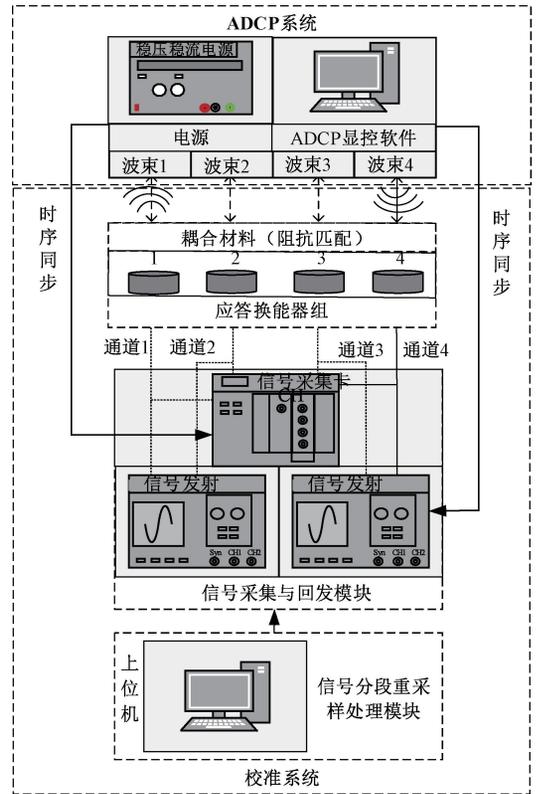


图 8 ADCP 校准装置结构

Fig. 8 ADCP calibration device structure

勒频移值；通过信号截取、分段、重采样、信号拼接、时间窗补偿、幅度计算等处理，以某一固定速率对各通道处理后的信号分别回发至 ADCP 对应波束换能器。ADCP 根据各波束接收信号解算得到流速值，将该流速值与预设标准流速值对比，即可实现对 ADCP 流速的校准。

ADCP 陆上多波束校准装置实物如图 9 所示，待校 ADCP 样机的各波束与应答换能器组通过对接支架进行耦合。



图 9 ADCP 陆上多波束校准装置实物

Fig. 9 Physical of ADCP calibration device

本文校准方法还适用于水下 ADCP 校准, 由于水下无法单独处理 ADCP 不同波束的发射信号, 故水下装置主要适用于对 ADCP 单个换能器波束的校准。消声水槽中的水下校准部分实物如图 10 所示, 校准装置其他部分与前述陆上装置相同。

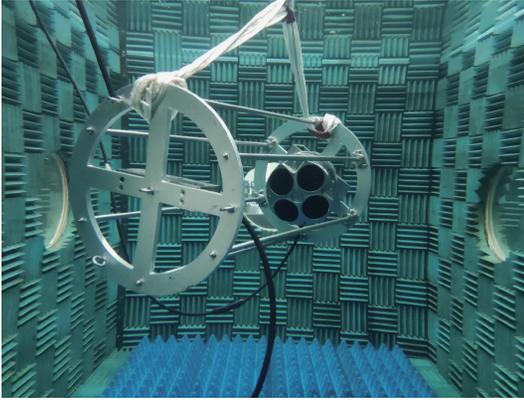


图 10 ADCP 水下对接装置

Fig. 10 ADCP underwater docking device

### 3.2 校准实验与结果分析

为验证本文方法及校准装置的性能, 对两台不同波束的 ADCP 样机开展了校准实验, 并与水槽拖车法进行了对比验证。

首先, 以 4 波束 ADCP, 验证时间窗补偿处理对 ADCP 校准结果的性能改进。在合成流速 10~10 000 mm/s, 选取 10、20、50、100、200、500、1 000、2 000、3 000、4 000、5 000、6 000、7 000、8 000、9 000、10 000 mm/s 作为待校流速值 (即标准流速值), 并设置校准层数为 10 层, 且各层流速相同。分别对重采样得到的频移信号进行时间窗补偿处理后回发和直接回发, ADCP 输出流速示值取平均值作为流速测量值, 校准结果如图 11 所示。可以看到, 在不

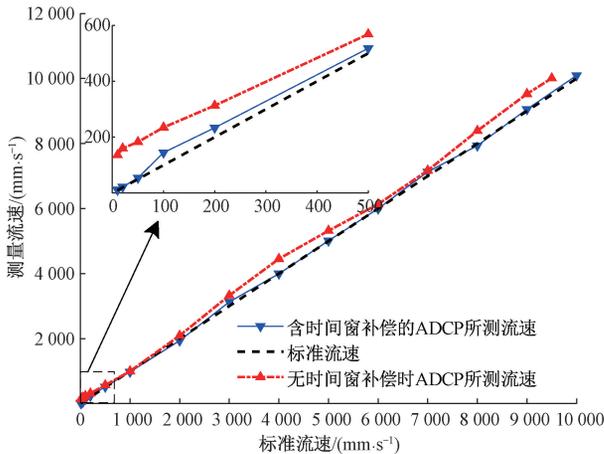


图 11 4 波束 ADCP 的时间窗补偿处理与无补偿的校准结果

Fig. 11 Calibration results of 4-beam ADCP with time-window compensated processing and without compensation

同流速下, 无时间窗补偿时 ADCP 所测流速与标准流速的偏差较大, 主要因为重采样后直接回发时 ADCP 接收信号与各水层单元会发生时间错位。说明时间窗补偿可使得校准装置所产生的多普勒频移信号更接近 ADCP 的接收散射信号, 有效减小了分段重采样等信号处理对校准结果的影响。

将 4 波束 ADCP 用 2 波束代替, 在不同流速下重复上述对比实验, 校准结果如图 12 所示, 可以得到与 4 波束相同的结论, 表明时间窗补偿处理适用于不同型号和波束的 ADCP。

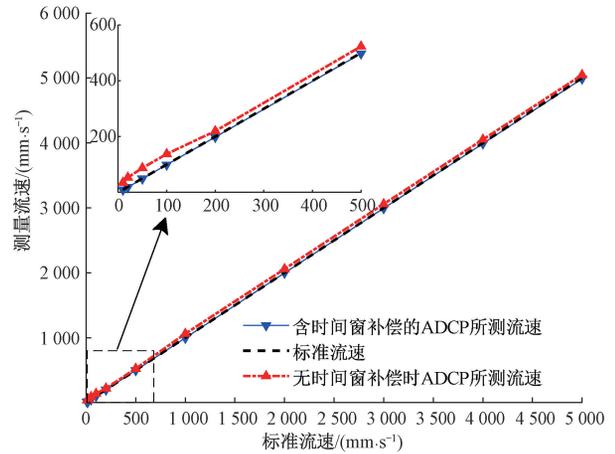


图 12 2 波束 ADCP 的时间窗补偿处理与无补偿的校准结果

Fig. 12 Calibration results of 2-beam ADCP with time-window compensated processing and without compensation

对 2 波束 ADCP 流量程在 10~5 000 mm/s 范围进行流速分层校准实验。设置分层数 11, 1~11 层的合成流速值  $v$  分别为 5 000、4 000、3 000、2 000、1 000、500、200、100、50、20、10 mm/s, 采用时间窗补偿处理, ADCP 不同水层的校准结果如图 13 所示, 可以得出, ADCP 各层所测流速与设置的标准流速值吻合良好, 不同流速下测量偏差均在  $\pm(0.5\%v + 10 \text{ mm/s})$  (测量偏差大小与校准系统、被校 ADCP 样机均相关), 表明本文方法及校准装置可实现对 ADCP 不同水层流速的分层校准。

对 4 波束 ADCP 某一换能器在消声水槽进行校准, 并与水槽拖车法对比验证。水槽拖车实验装置如图 14 所示。

拖曳水槽尺寸为 8 m×1.2 m×1.2 m, ADCP 水平固定在水槽拖车上, ADCP 被校准换能器波束方向与拖车移动方向相同, 即以拖车速度为标准流速。设置校准流速点分别为 10、20、50、100、200、500、1 000、2 000 mm/s, 校准结果如图 15 所示。从图 15 可以看出, 声波应答法在不同流速下的校准结果更接近标准流速, 最大偏差在  $\pm(1\%v + 5 \text{ mm/s})$ ; 而水槽拖车法校准结果相比标准流速

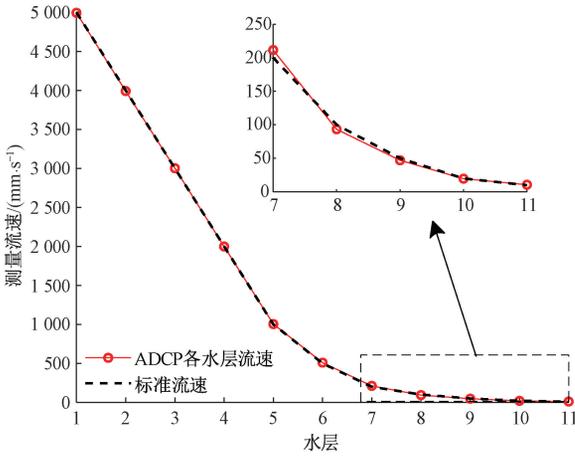


图 13 2 波束 ADCP 分水层流速校准结果

Fig. 13 2-beam ADCP stratified flow calibration results

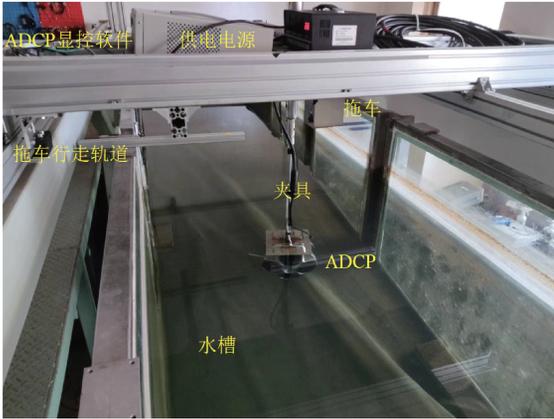


图 14 水槽拖车法校准装置

Fig. 14 Flume towing method calibration device

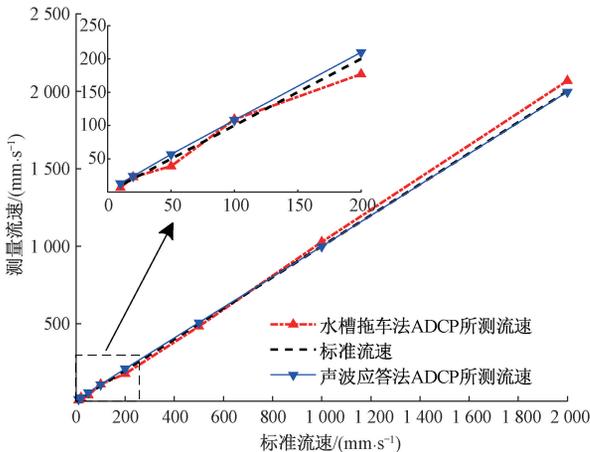


图 15 声波应答法与水槽拖车法对比实验结果

Fig. 15 Experimental results comparing the acoustic response method with the flume towing method

偏差较大,多数流速点的偏差超过 $\pm(2\%v+5 \text{ mm/s})$ 。同时,校准时发现本文所提校准方法相比水槽拖车法的测量重复性更好。

### 3.3 流速测量不确定度评定

依据流速测量模型式(6)可得:

$$\Delta \bar{v}_i = \frac{f_h - f_{ri}}{2f_{ri}} \Delta c + \frac{c}{2f_{ri}} \Delta f_h - \frac{cf_h}{2f_{ri}^2} \Delta f_{ri} \quad (15)$$

由式(15)可得,影响 ADCP 流速校准的主要不确定度来源包括信号重采样率、信号回发模块(信号发生器)的回发速率、水中声速。

#### 1) 测量重复性引入的不确定度分量 $u_1$

测量重复性由统计方法获得,采用贝塞尔公式计算流速测量的标准偏差,在测速范围内选取代表性流速值进行多次重复测量,各流速下的测量重复性测试结果如表 1 所示。

#### 2) 信号重采样率引入的不确定度分量 $u_2$

当信号采样率较高时(本文 $>30 \text{ MHz}$ ),信号重采样算法引入的采样误差基本可忽略,因此信号重采样率引入的不确定度主要取决于采集卡的采样误差。本文所用采集卡的采样率最大允许误差 $\pm 0.0000005 \text{ Hz}$ ,服从均匀分布,代入式(15)可得由信号采样引入的流速不确定度为 $1.38 \times 10^{-8} \text{ mm/s}$ ,与流速无关,基本可忽略。

#### 3) 信号回发速率引入的不确定度分量 $u_3$

由信号回发采用的双通道信号发生器校准证书可得,输出信号频率误差不超过 $\pm 0.00001\%$ ,即 $\pm 3.125 \text{ Hz}$ ,服从均匀分布,代入式(15)可得由信号回发速率引入的流速不确定度为 $0.043 \text{ mm/s}$ ,与流速无关。

#### 4) 水中声速测量引入的不确定度分量 $u_4$

水中声速主要受温度影响,压力对声速影响基本可忽略,ADCP 温度计的温度测量最大允许误差 $\pm 0.05^\circ\text{C}$ ,代入纯水经验公式得到声速的最大允许误差 $\pm 0.14 \text{ m/s}$ ,服从均匀分布,代入式(15)可得由声速测量引入的流速不确定度。

#### 5) 数据修约引入的不确定度分量 $u_5$

ADCP 样机流速校准的修约间隔为 $1 \text{ mm/s}$ ,服从均匀分布,半区间宽度为 $0.5 \text{ mm/s}$ ,故数据修约引入的不确定度分量为 $0.29 \text{ mm/s}$ 。

上述各标准不确定度分量互不相关,得到合成标准不确定度和扩展不确定度如表 1 所示,可得在流速范围为 $0.01 \sim 10 \text{ m/s}$ ,扩展不确定度优于 $0.3\%v+5 \text{ mm/s}$ ( $v$ 为流速测量值)( $k=2$ )。

表1 ADCP 校准装置的测量不确定度

Table 1 Measurement uncertainty of ADCP calibration system

流速值/(mm·s <sup>-1</sup> )	10	20	50	100	200	500	1 000	5 000	10 000
测量重复性 $u_1$	1.31	0.71	0.61	1.73	1.86	1.84	1.07	1.40	1.07
重采样率 $u_2$	$1.38 \times 10^{-8}$								
回发速率 $u_3$	0.043	0.043	0.043	0.043	0.043	0.043	0.043	0.043	0.043
水中声速 $u_4$	$1.11 \times 10^{-4}$	$2.23 \times 10^{-4}$	$6.68 \times 10^{-4}$	$1.34 \times 10^{-3}$	$2.67 \times 10^{-3}$	$6.74 \times 10^{-3}$	$1.35 \times 10^{-2}$	0.07	0.13
数据修约 $u_5$	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
合成标准不确定度	1.34	0.77	0.67	1.76	1.88	1.86	1.11	1.43	1.12
扩展不确定度 ( $k=2$ )	<b>2.68</b>	<b>1.54</b>	<b>1.35</b>	<b>3.52</b>	<b>3.76</b>	<b>3.73</b>	<b>2.23</b>	<b>2.86</b>	<b>2.24</b>

## 4 结 论

本文提出一种基于声波应答的宽带 ADCP 分层校准方法,通过信号重采样处理得到包含多普勒频移的模拟流速信号,经信号分段与时间窗补偿实现对 ADCP 仪器的多波束分层校准,并基于主动声呐方程给出回波信号幅度计算模型,使校准过程更符合 ADCP 实际工作环境。搭建了适用于陆上和水的 ADCP 校准装置,设计了不同实验对方法和系统进行了验证,并与水槽拖车法开展了对比实验,结果表明本文方法具有更宽的流速校准范围和更小流速偏差。然而,由于声波应答法校准的环境较为理想,主要适用于 ADCP 的实验室校准,后续还应进一步考虑 ADCP 在实际工作环境中的性能评价方法。

## 参考文献

- [1] 朱昌平,张红苹,王森. 新的 BBADCP 数字信号处理算法设计[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(S2): 1386-1387, 112.  
ZHU CH P, ZHANG H P, WANG S. Novel arithmetic design of dsp for BBADCP [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(S2): 1386-1387, 112.
- [2] KOSTASCHUK R, BEST J, VILLARD P, et al. Measuring flow velocity and sediment transport with an acoustic doppler current profiler [J]. Geomorphology, 2005, 68(1-2): 25-37.
- [3] HUANG H N. The importance of adcp alignment with GPS in moving-boat streamflow measurements [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2019, 67: 33-40.
- [4] 刘彦祥. ADCP 技术发展及其应用综述[J]. 海洋测绘, 2016, 36(2): 45-49.  
LIU Y X. Review on development of ADCP technology and its application [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2016, 36(2): 45-49.
- [5] 邓锴,张兆伟,俞建林,等. 声学多普勒流速剖面仪(ADCP)国内外进展[J]. 海洋信息, 2019, 34(4):

8-11.

DENG K, ZHANG ZH W, YU J L, et al. Development of acoustic doppler current profiler at home and aboard [J]. Marine Information, 2019, 34(4): 8-11.

- [6] 周营英,王敏,何龙标,等. ADCP 压电换能器及其校准方法研究进展[J]. 压电与声光, 2022, 44(3): 381-386, 391.  
ZHOU Y Y, WANG M, HE L B, et al. Progress of ADCP piezoelectric transducer and calibration methods [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2022, 44(3): 381-386, 391.
- [7] ARMSTRONG B, FULFORD J, THIBODEAUX K. Quality assurance testing of acoustic doppler current profiler transform matrices [C]. 2015 IEEE/OES Eleventh Current, Waves and Turbulence Measurement, 2015.
- [8] 国家海洋局. 声学多普勒流速剖面仪检测方法: HY/T 102-2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 3-8.  
State Oceanic Administration. Test method of acoustic doppler current profiler: HY/T 102-2007 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008: 3-8.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 多普勒流速剖面仪: GB/T 24558-2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010: 1-10.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of The People's Republic of China. Acoustic doppler current profiler: GB/T 24558-2009 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010: 1-10.
- [10] 中华人民共和国交通运输部. 声学多普勒流速剖面仪检定规程: JJG(交通)138-2017 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2017: 2-9.  
Ministry of Transport of The People's Republic of China. Acoustic doppler current: JJG138-2017 [S]. Beijing: China Communications Press, 2017: 2-9.
- [11] YORKE T H, OBERG K A. Measuring river velocity and discharge with acoustic doppler profilers [J]. Flow

- Measurement & Instrumentation, 2002, 13(5-6): 191-195.
- [12] MA L, ZHANG X J, DENG K, et al. An acoustic simulation approach for testing ADCP[C]. 2013 Oceans-San Diego. IEEE, 2013: 1-4.
- [13] 申连洋, 匡锐. ADCP 陆上检测装置的设计与实现[J]. 应用科技, 2009, 36(8): 39-43.  
SHEN L Y, KUANG R. Design of ADCP land-measuring device[J]. Applied Science and Technology, 2009, 36(8): 39-43.
- [14] 郭世旭, 杨泉杰, 王月兵, 等. 基于频偏应答的 ADCP 流速现场校准方法研究[J]. 计量学报, 2021, 42(1): 53-58.  
GUO SH X, YANG X J, WANG Y B, et al. Research on field calibration method of ADCP velocity based on frequency offset response[J]. Acta Metrologica Sinica, 2021, 42(1): 53-58.
- [15] ZHOU Y Y, WANG M, HE L B, et al. Preliminary study on fast calibration of acoustic Doppler current[C]. 29th International Congress on Sound and Vibration, 2023.
- [16] CHI C, VISHNU H, BENG K T, et al. Utilizing orthogonal coprime signals for improving broadband acoustic doppler current profilers[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2019, 45(4): 1516-1526.
- [17] 齐本胜, 范新南, 王森, 等. 宽带声学多普勒测流仪设计[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(S2): 233-234. 1.  
QI B SH, FAN X N, WANG S, et al. Design of broadband acoustic current profiler[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003, 24(S2): 233-234.
- [18] YAN Y, CHEN S L, ZENG Z M. Broadband adcp digital signal processing based on cic filter banks[J]. Journal of Measurement Science & Instrumentation, 2019, 10(2): 116-117.
- [19] LE MENN M, MORVAN S. Velocity calibration of Doppler current profiler transducers[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2020, 8(11): 847.
- [20] PAN X F, WU Y X. Underwater doppler navigation with self-calibration[J]. The Journal of Navigation, 2016, 69(2): 295-312.
- [21] 周昂锋, 郭世旭, 何龙标, 等. 宽带 ADCP 流速现场校准方法实验研究[J]. 中国测试, 2023, 49(9): 16-22.  
ZHOU A F, GUO SH X, HE L B, et al. Experimental study on field calibration method of broadband adcp flow velocity[J]. China Measurement & Test, 2023, 49(9): 16-22.
- [22] 国家市场监督管理总局. 1 kHz~200 kHz 水声换能器校准规范: JJF 1861-2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020: 1-9.  
State Administration for Market Regulation. Calibration specification for underwater sound transducers in 1 kHz to 200 kHz: JJF 1861-2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020: 1-9.
- [23] 刘永伟, 李琪, 商德江, 等. 混浊海水声吸收与温度、盐度、压强关系[J]. 声学技术, 2012, 31(2): 156-161.  
LIU Y W, LI Q, SHANG D J, et al. The correlation of sound absorption in turbid seawater with temperature, salinity and pressure[J]. Technical Acoustics, 2012, 31(2): 156-161.
- [24] 刘伯胜, 黄益旺, 陈文剑, 等. 水声学原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006: 72-75.  
LIU B SH, HUANG Y W, CHEN W J, et al. Principles of Underwater Acoustics[M]. Harbin: Barbin Institute of Technology Press, 2006: 72-75.

### 作者简介



**随超楼**, 2021 年于河南理工大学获得学士学位, 现为中国计量大学硕士研究生, 主要研究方向为水声计量、ADCP 校准。

E-mail: suichaolou@163.com

**Sui Chaolou** received his B. Sc. degree from Henan Polytechnic University in 2021.

Now he is a M. Sc. candidate at China Jiliang University. His main research interests include underwater acoustic metrology and Calibration of ADCP.



**王敏** (通信作者), 2010 年于北京邮电大学获得学士学位, 2016 年于中国科学院大学(中国科学院声学研究所)获得博士学位, 现为中国计量科学研究院副研究员, 主要研究方向为水声计量、声学信号处理等。

E-mail: wangmin@nim.ac.cn

**Wang Min** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Beijing University of Posts and Telecommunications in 2010, Ph. D. degree from University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences) in 2016. Now he is an associate research fellow at National Institute of Metrology. His main research interests include underwater acoustic metrology and acoustic signal processing.