

# 宽带声学多普勒流速剖面仪作用距离估计

张维全<sup>1</sup>, 王小宁<sup>1</sup>, 彭东立<sup>2</sup>

(1. 广东湛江 91388 部队, 广东湛江 524002, 2. 中国科学院声学研究所东海研究站, 上海 200032)

**摘要:** 宽带声学多普勒流速剖面仪, 由于其具有很高的空间分辨率和时间分辨率, 所以在水文、运输、测控等方面都有很广泛的应用, 而其最大作用距离对于其应用范围具有重要意义。根据主动声纳方程各项的意义, 分析了深度单元厚度、温度和频率等条件因素对宽带声学多普勒流速剖面仪作用距离的影响, 从而对宽带声学多普勒流速剖面仪的最大作用距离进行估计, 得到理论计算值。将理论计算值与 RDI 公司的宽带声学多普勒流速剖面仪作用距离进行比较, 作用距离范围吻合性很好。对 BBADCP 以及具有相同工作原理的声相关计程仪、多普勒计程仪和 NBADCP 进行对比分析, 指出它们在作用距离上的区别。

**关键词:** BBADCP; 多普勒测速; 作用距离; 声纳方程

中图分类号: O427.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2010)-04-0442-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2010.04.020

## Working range estimation of broadband ADCP

ZHANG Wei-quan<sup>1</sup>, WANG Xiao-ning<sup>1</sup>, PENG Dong-li<sup>2</sup>

(1. Unit 91388, PLA, Zhanjiang 524002, Guangdong, China;

2. Shanghai Acoustic Laboratory, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200032, China)

**Abstract:** Due to the high spatial and time resolution, Broadband Acoustic Doppler Current Profile (BBADCP) has a comprehensive application in hydrology, transportation, measurement controlling etc. The maximum working range is significant for the application. According to Active sonar equation, the influence of depth cell size, temperature and frequency on the working range of BBADCP is analyzed. The theoretical calculation of the maximum working range of BBADCP is made. Comparing the calculated results with the datasheet of RDI BBADCP shows that the working ranges are identical. In addition, the differences of working range between Acoustic Correlation Log, Doppler Velocity Log, Narrowband ADCP and Broadband ADCP are also compared.

**Key words:** BBADCP; Doppler measurement; working range; sonar equation

## 1 引言

声学多普勒流速剖面仪(Acoustic Doppler Current Profile, ADCP)<sup>[1]</sup>是一种利用声学换能器所发射的声脉冲在随水流运动的悬浮物质中所产生的多普勒频移而进行流速测量的仪器。其突出特点是能够测量不同水层的三维流速和流向, 且对流场不产生任何扰动, 可以真实地反映流场。具有测速时间短、测速精度高、回波信息丰富的特点, 通过实验可以测量一个剖面上数十至上百层水流速度, 具有极高的测量效率, 特别适合于流态复杂条件下的测量。然而在浅水池和一些自然河流中, 由于反射物的密度太低, 或者流速很小的情况下, 传统窄带声学多普勒流速剖面仪(NBADCP)就不适用了。

90 年代初发展起来的宽带声学多普勒流速剖面仪(Broadband Acoustic Doppler Current Profile, BBADCP)<sup>[2,3]</sup>克服了 NBADCP 空间分辨力与时间分辨力之间矛盾的缺点, 解决了低速浅水河流流速精确测量的问题, 也增大了 ADCP 的探测距离。在限定波束开角的情况下, 换能器基阵尺寸与载波频率成反比, 而载波频率又与 BBADCP 的最大作用距离是密切相关的。在限定的基阵尺寸下, 得到最大的作用距离对确定 BBADCP 的使用范围很有意义。

本文从 BBADCP 的工作原理出发, 通过主动声纳方程, 分析了与 BBADCP 特性相关的深度单元厚度以及海水温度、工作频率等因素对作用距离的影响。理论计算结果与 RDI 公司的宽带声学多普勒流速剖面仪作用距离进行比较, 作用距离范围吻合性很好。分析了 BBADCP 的误差影响因素, 计算了深度单元厚度对测速精度的影响。对 BBADCP 以及相关计程仪<sup>[4]</sup>、多普勒计程仪<sup>[5]</sup>和 NBADCP<sup>[6]</sup>的作用距离进行对比分析, 得知在相同的工作频率

收稿日期: 2010-04-24; 修回日期: 2010-07-25

作者简介: 张维全(1969-), 男, 湖北松滋人, 硕士, 研究方向为水声信号处理。

通讯作者: 张维全, E-mail: bernou@163.com

下, 相关计程仪的作用距离大于多普勒计程仪的作用距离, 而 BBADCP 由于受本身发射信号脉宽的限制及回波信号散射对象的不同, 作用距离小于多普勒计程仪, 但大于 NBADCP 作用距离。

## 2 ADCP 工作原理

当频率为  $f_0$  的声波在海水中传播时, 遇到海水中随海流一起运动的悬浮物质后散射回来, 这些回波信号经换能器接收处理后可以测得其频率为  $f_r$ 。根据多普勒频移原理, 只要声源(或接收器)与散射体之间有相对运动, 就有多普勒频移,  $f_0 \neq f_r$ , 其差值  $f_d$  为:

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

式中:  $\alpha$  为波束的掠射角,  $v$  为声源(或接收器)的水平相对速度,  $c$  为水中声速。

通过准确地测定多普勒频移  $f_d$ , 就能测定声源(或接收器)相对于海流的水平相对速度  $v$ 。虽然声波发射以后散射返回的声信号是连续的, 但从不同深度的水团返回的回波时间是不同的, 通过时间门的划分就可以让声信号与某些水层(深度单元)相对应, ADCP 的分层示意图如图 1 所示, 这也是其与常规的机械式流速仪的不同之处, 其关系式为:

$$D_e = \frac{t}{2} \cdot c \cdot \sin \alpha \quad (2)$$

式中:  $D_e$  为水层深度,  $t$  为发射后的延迟时间。

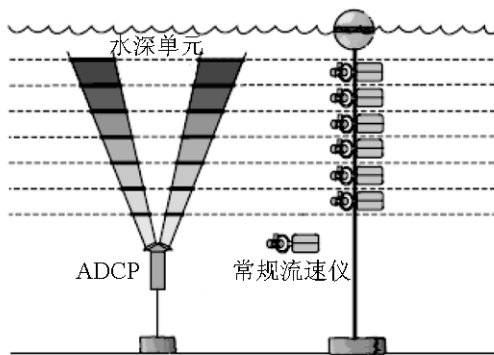


图 1 ADCP 测量原理示意图  
Fig.1 The schematic diagram of ADCP measurement

BBADCP 利用伪随机码对声脉冲进行编码, 深度单元的大小一般与编码脉冲的长度一致, 而在每个深度单元中, 又按照码元长度将其分为若干小的深度层, 每个小层得到一个速度值。这样, 在一个深度单元上测得速度值的个数等于码元的个数。将这些速度值进行统计平均, 就可以得到某个深度单元上的最终速度值。由于这个值是多个速度进行统计平均的结果, 减小了随机误差, 所以其更接近

于真实值。这也是脉冲编码宽带技术测速性能优良的最主要体现。随机误差与统计平均的关系为:

$$\sigma_N = \frac{\sigma_1}{\sqrt{N}} \quad (3)$$

式中:  $\sigma_1$  为单次测量得到的水流速度标准方差,  $N$  为平均次数,  $\sigma_N$  为  $N$  次平均后得到的水流速度标准方差。

## 3 作用距离估计模型

BBADCP 在流速测量过程中发射两组或多组脉冲波序列, 每个脉冲波序列由许多子脉冲(编码单元)组成。BBADCP 计算回波序列自相关函数, 并确定相位差, 然后根据相位差计算流速。在 BBADCP 测量中, 反射回波的强度大小与深度、频率、脉冲宽度和水体对声波的衰减特性密切相关。

BBADCP 的最大作用距离, 指能够有效测量分层海流速度矢量的最大海流深度。由于实际工作中, 影响 BBADCP 作用距离的因素较多, 根据声纳方程, 主要有声源级、回波强度、载体和 BBADCP 的自噪声、传播损失以及指向性等, 这些因素不但与声纳本身的参数有关, 同时还与 BBADCP 的载体运动速度、姿态的变化等因素相关, 另外还有一些不可忽视的因素如温度、盐度以及海况等, 而这部分因素很难准确地数学建模, 因此本文不讨论载体的运动速度、姿态的变化以及自噪声、盐度以及海况等因素对作用距离的影响, 主要讨论分层厚度、温度、频率等因素对作用距离的影响。

BBADCP 是以海水体积混响为目标的主动工作方式, 所以声纳方程为<sup>[7]</sup>:

$$SL - 2TL + TS - (NL - DI) = DT \quad (4)$$

声源级  $SL$  可以表示为:

$$SL = 170.8 + 10 \log(Pe \times \eta) + DI \quad (5)$$

式中:  $Pe$  代表换能器的电功率,  $\eta$  代表换能器的电声转换效率,  $DI$  为发射波束的指向性指数, 对于收发共用换能器, 接收指向性和发射指向性相同。

对于 BBADCP 的圆盘形换能器, 其指向性指数  $DI$  可表示为:

$$DI = 20 \times \log(\pi D / \lambda) \quad (6)$$

式中:  $D$  为圆盘形换能器直径,  $\lambda$  为海水中声波波长。

圆板型换能器的 -3dB 束宽(波束开角)为:

$$\theta_{-3dB} = 59.4 \frac{\lambda}{D} \quad (7)$$

单程传播损失  $TL$  可以表示为:

$$TL = 20 \times \log(R) + \alpha \times R \quad (8)$$

式中： $R$  为斜距， $\alpha$  为海水介质的吸收系数。

式(8)中第一项为球面扩散损失，由于 BBADCP 所发射的声波以很大的掠射角(大约在  $60^\circ\sim 70^\circ$  的范围内)射向海底，此时声速垂直分布对声波的扩散损失不会有什么影响，因此可以用球面扩散损失来代表声波的扩散损失。式中的第二项为海水介质的吸收损失，吸收系数  $\alpha$  可以表示为<sup>[8]</sup>：

$$\alpha = \alpha_M + \alpha_B + \alpha_C + \alpha_W \quad (9)$$

其中， $\alpha_M$ 、 $\alpha_B$ 、 $\alpha_C$ 、 $\alpha_W$  分别代表海水中  $MgSO_4$ 、硼酸盐、碳酸盐和纯水对声波的吸收系数。

当工作频率为  $f=300kHz$  时，海水温度  $T$  在  $4\sim 20^\circ C$  范围内时的吸收系数  $\alpha$  如表 1 所示。

表 1 频率为 300kHz 的海水吸收系数表  
Table 1 Absorption coefficient of sea water at 300kHz

|                  |       |       |       |       |       |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $T/^\circ C$     | 4     | 6     | 8     | 10    | 12    |
| $\alpha/(dB/km)$ | 65.57 | 66.77 | 68.66 | 71.23 | 74.45 |
| $T/^\circ C$     | 14    | 16    | 18    | 20    |       |
| $\alpha/(dB/km)$ | 78.26 | 82.61 | 87.39 | 92.49 |       |

吸收系数  $\alpha$  的取值范围是  $65.6\sim 92.5dB/km$ 。海水表面层的温度接近于空气中的温度，随着海水深度的增加，水温趋近于  $4^\circ C$  的低温。

海水体积反向散射强度  $TS$  可表示为：

$$TS = S_v + 10 \times \log V \quad (10)$$

其中：体积散射强度  $S_v$  反映了海洋中的散射体对声波的散射本领。体积散射强度范围大约为  $-90\sim -70dB$ (不考虑存在深海散射层的情况)。文献[9]讨论了季节变化以及一天中的时间变化对 ADCP 的作用距离的影响。在春秋两季，由于水中的浮游生物增多，提高了体积散射强度，从而使 ADCP 作用距离增大；在一昼夜的夜晚时间，由于水中的浮游动物增多，也会使 ADCP 作用距离增大。相反，在其它时间里，ADCP 作用距离减小。

散射体积可表示为：

$$V = \frac{1}{2} c T \times R^2 \times \psi \quad (11)$$

式中： $c$  为海水中的声速， $T$  为伪随机码调制正弦波的脉宽， $R$  为斜距， $\psi$  为体积混响时的等效束宽，其表达式为：

$$\psi = \left( 2.43 \frac{\lambda}{\pi D} \right)^2 \quad (12)$$

对 BBADCP 来说，噪声主要包括海洋环境噪声和自噪声。海洋环境噪声级可表示为：

$$NL = NSL + 10 \times \log(BW) \quad (13)$$

式中， $NSL$  为深海环境噪声的谱级，由文献[7]可知，在  $300kHz$  时噪声谱级为  $37dB$ 。 $BW$  为接收机的工作带宽(BBADCP 的接收机带宽应该覆盖两

部分，一部分是伪随机码调制后正弦信号的频谱拓展，另外一部分是多普勒效应引起的频谱偏移)。

自噪声主要包括 BBADCP 的电路噪声和载体辐射噪声，分别用  $NEL$  和  $NML$  来表示电噪声谱级和因载体运动而产生的自噪声谱级。用  $MO$  和  $IL$  来表示换能器的接收灵敏度和接收机输入端的插入损失。假设接收机输入端的自噪声电压为  $U$ ，则

$$NEL = 20 \log U - MO - IL, \quad NML = NSL + KL$$

其中： $KL$  是载体运动所产生的自噪声谱级与深海环境噪声的谱级差。载体运动速度越大， $KL$  也越大。

随着载体航速的增大，载体的自噪声增大，ADCP 接收信噪比减小，作用距离随之减小。通过采取一些措施来减小载体的自噪声，可以增加 ADCP 的最大工作距离。

在实际测量中，回波信号必须达到一定的信噪比才能从噪声背景中检测出信号。BBADCP 由于采用了自相关特性很强的伪随机码对声脉冲进行编码，降低了对回波信号的信噪比要求。假定当信噪比大于  $10dB$  时能很好地检测到信号，则检测阈：

$$DT \geq 10dB \quad (14)$$

只要将式(5)~(14)中相应的值代入式(4)中，可以得到不同中心频率、不同发射功率，在特定海洋环境下的 BBADCP 最大作用距离。

## 4 BBADCP 短时误差分析

随机误差包括短时随机误差和系统误差。系统误差由系统本身的固定偏差所决定的，只能在校准后通过误差系数进行校正，一般系统误差相对较小。短时随机误差可以通过多次平均来减小，如公式(3)所示。设定 ADCP 能达到某作用距离，通过仿真计算，可以得到单次信号发射在某所用距离下的速度方差。如果要把短时随机误差降低到所期望的测量精度，则必须通过多次的数据平均。

正因为 NBADCP 的短时随机误差比较大，需要长时间的数据平均来减小，造成了空间分辨率和时间分辨率的矛盾。BBADCP 的时间带宽积为码元数，远大于 NBADCP 的时间带宽积，所以 BBADCP 的优点表现在：(1) 速度方差减小(精度提高)；(2) 平均时间减小(时间分辨率提高)；(3) 分层厚度变小(空间分辨率提高)；(4) 作用距离增大(性能提高)。单波束的 BBADCP 波束方向速度方差存在如下关系<sup>[2]</sup>：

$$\text{var}(\pi U_r / U_a) = \frac{C^2}{2M_a} [\rho^{-2} - 1 + 2 \max(0, 1 - T_0 / T_a)] \quad (15)$$

其中:  $U_r$  为波束方向速度,  $U_a = \lambda/4T_0$  为模糊速度,  $C$  为脉冲编码的等效系数,  $M_a$  为码元数,  $\rho$  为自相关函数幅值,  $T_0$  为脉冲时间间隔,  $T_a$  为脉冲宽度。

假设回波信号的信噪比较大, 且一般情况下,  $T_a \leq T_0$ , 则 BBADCP 波束方向速度的标准方差为:

$$\sigma(U_r) = \frac{c\lambda}{8\pi L} \sqrt{\frac{C^2}{2M_a}(\rho^{-2}-1)} \quad (16)$$

其中:  $L$  为深度单元厚度。

由式(16)可以得出, 深度单元厚度与标准方差成反比, 深度单元厚度越大, 标准方差越小, 测量精度越高。

当 ADCP 为四阵元的 Janus 配置时, 系统水平方向上的速度标准方差与单波束波束方向上的速度标准方差的关系为:

$$\sigma_{Janus}(U_r) = \frac{\sigma(U_r)}{\sqrt{2}\cos\alpha} \quad (17)$$

ADCP 的测量标准方差必须小于流速的 1%, 测量数据才是准确可信的。对于固定的编码方式, 标准方差由深度单元厚度所决定。由表 2 可知, 深度单元厚度又决定着 BBADCP 的作用距离, 所以 ADCP 的短时误差与其作用距离是密切相关的。

## 5 作用距离计算和分析

本文以 300kHz 的 BBADCP 有关参数作为分析模型, 计算温度、深度单元厚度、频率等参数对 BBADCP 最大作用距离的影响。BBADCP 发射信号的中心频率为 300kHz, 掠射角为  $\theta=70^\circ$ , 圆盘换能器的直径  $D=0.135\text{m}$ , 发射电功率为 160W, 换能器声电转换效率  $\eta=50\%$ , 则发射声功率为 80W。海水温度的取值范围为  $5\sim 20^\circ\text{C}$ , 则海水吸声系数的取值范围为  $65.6\sim 92.5\text{dB/km}$ 。假设宽带换能器的工作带宽为  $BW=57\text{kHz}$ , 码元数为 80。海水的体积反向散射强度  $S_r=-90\text{dB}$ (即 BBADCP 工作在最恶劣的条件情况下), 环境噪声谱级  $NL=37\text{dB}$ , 检测阈  $DT \geq 10\text{dB}$ 。

计算 300kHz BBADCP 对应于不同深度单元厚度情况下的码元宽度、作用距离以及标准方差, 结果如表 2 所示。美国 RDI 公司开发的商用多普勒计程仪系统处于世界领先水平, 对比 RDI 公司的商用产品骏马监测型系列参数<sup>[10]</sup>, 与表 2 的仿真结果非常接近, 结果中细微的差别可能是由于仿真过程中的参数并非完全一致造成的。

对于 300kHz 的 BBADCP 来说, 典型的作用距离为 110m。随着深度单元厚度的增加, BBADCP

表 2 300kHz 的 BBADCP 作用距离及标准方差

Table 2 Working range and Standard deviation of BBADCP at 300kHz

| 深度单元厚度/m | 码元宽度/ $\mu\text{s}$ | 作用距离范围/m<br>( $5^\circ\text{C}\sim 20^\circ\text{C}$ ) | 标准方差/(cm/s) |
|----------|---------------------|--|-------------|
| 1        | 17                  | 87-71  | 12.7        |
| 2        | 33                  | 100-81   | 6.3         |
| 4        | 67                  | 113-91   | 3.2         |
| 8        | 133                 | 127-101  | 1.6         |

的作用距离增大, 深度单元厚度加倍, 作用距离范围大约提高 10%; 随着海水温度的升高, 海水的吸声系数增大, BBADCP 的作用距离减小, 海水温度从  $5^\circ\text{C}$  上升到  $20^\circ\text{C}$ , 作用距离范围大约减小 20%。对声波的传递介质来说, 由于冷水和新鲜水的吸收系数相对要小, 所以 BBADCP 在此类介质中的作用距离要大。

改变 BBADCP 的工作频率, 其作用距离也会随之发生改变。当工作频率增大时, BBADCP 空间分辨率的精度提高, 但是作用范围缩小; 当工作频率减小时, BBADCP 的作用范围扩大, 但是空间分辨率的精度降低, 且换能器的直径变大, 当换能器为四阵元 Janus 配置, 频率低到一定情况下, 换能器阵会大得无法承受。所以一般低频的 ADCP 换能器选择相控阵。按照以上计算方法, 得到如表 3 所示的在不同频率下 BBADCP 的典型作用距离, 大致符合频率降低一半, 作用距离提高一倍的规律。这与 RDI 公司各频段产品的作用距离是相当的。

表 3 不同频率下 BBADCP 的典型作用距离

Table 3 Standard working range of BBADCP at different frequency

| 频率/kHz   | 150 | 300 | 600 | 1200 |
|----------|-----|-----|-----|------|
| 典型作用距离/m | 300 | 110 | 60  | 12   |

## 6 对比分析

声纳系统作用距离对比示意图如图 2 所示。声相关计程仪、多普勒计程仪、BBADCP 和 NBADCP 从本质上说都是利用多普勒频移的工作原理, 但是由于采用的发射脉冲类型、掠射角和回波类型不同, 所以作用距离也不同。声相关计程仪垂直水面入射, 声波入射路径与深度方向重合, 回波类型为海底反射回波, 所以在相同的工作频率下, 声相关计程仪的作用距离最远; 多普勒计程仪<sup>[11,12]</sup>只需要得到对底的速度, 发射脉冲宽度可以比较宽, 但由于掠射角一般在  $60^\circ\sim 80^\circ$ , 回波类型为海底散射回波, 所以作用深度距离要次于声相关计程仪; BBADCP 由于采用二进制伪随机相位编码调制的

正弦脉冲信号, 脉冲宽度与水层分层厚度成正比, 如果空间分辨率要达到一定精度, 则脉冲宽度就不可能很宽, 这就限制了单次发射的信号功率, 也就限制了接收信号的信噪比, 而且海水体积散射回波强度远远小于海底散射回波强度, 幸好宽带声学多普勒流速剖面仪采用了伪随机相位编码和相关接收的技术, 降低了对回波信号信噪比的要求, 使它的作用深度距离有了一定提高, 所以它的作用深度距离虽然小于采用底回波的多普勒计程仪, 但大于没有采用伪随机编码的技术的 NBADCP。

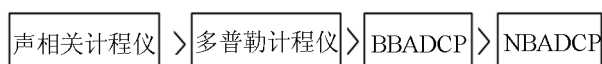


图2 声纳系统作用距离对比示意图

Fig.2 Comparison of working range between different sonar systems

## 7 结 论

通过以上对比分析, 可以得到关于 BBADCP 作用距离的以下几点结论:

(1) 由主动声纳方程, 宽带 ADCP 的作用距离受声源级、伪随机码、脉宽宽度、海水吸声系数、环境噪声及自噪声的影响;

(2) 深度单元厚度越大, 作用距离就越大。深度单元厚度加倍, 作用距离范围大约提高 10%。为了保证分辨率, 单元厚度必须控制在一定范围内;

(3) 在相同频率下, 海水温度越高, 海水吸收系数越大, 声波在来回的途中损失的也越大, BBADCP 的作用距离就越小。海水温度从 5℃ 上升到 20℃, 作用距离范围大约减小 20%;

(4) 不同频率的 BBADCP, 工作频率越低, 作用距离越远, 大致符合频率降低一半, 作用距离提高一倍的规律。

(5) 声相关计程仪、多普勒计程仪、BBADCP 和 NBADCP 的作用距离依次减小, 这与它们的发射脉冲类型、掠射角和回波类型有关。

利用文献[13]的理论, 确定某声纳系统的作用距离  $R$ , 是与检测概率和虚警概率相联系的, 否则作用距离没有意义, 所以作用距离是指能够满足给定虚警概率和检测概率条件下的最大作用距离。本文所给出的 BBADCP 的理论作用距离, 是指在文中所给出的环境条件下, BBADCP 能达到很高的检测概率。特殊情况下, 对于水体特别浑浊的区域, 由于水的吸声系数增大, 声波信号在传播过程中的衰减增大, 必然使作用距离减小; 若载体的纵倾横摇幅度比较大, 或者船速比较快, 会降低接收信号

的信噪比, 甚至丢失信号, 也会使作用距离减小; 若环境噪声或自噪声比较大, 则信噪比会相应减小, 作用距离也会减小。在实际使用中, 为了提高 BBADCP 的作用距离, 须尽量做到选择水体中气泡和浮游动植物适中的区域进行速度测量; 船体的外部环境比较平稳, 没有大风浪; 船体的速度不要太快; 在进行流速测量时, 尽量关闭船体本身的噪声源。这样才能保证所测量的流速数据真实可靠。

## 参 考 文 献

- [1] Simpson M R. Discharge measurements using a broad-band acoustic Doppler current profiler[R]. United States Geological Survey, Open-File Report 01-1, 2001.
- [2] Blair H. Brumley, Ramon G. Cabrera, Kent L. Deines, Eugene A. Terray. Performance of a broad-band acoustic Doppler current profiler[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1991, 16(4): 402-407.
- [3] Blair H. Brumley, Kent L. Deines, Ramon G. Cabrera, Eugene A. Terray. Broadband acoustic Doppler current profiler[P]. United States Patent No. 5615173, Mar. 1997.
- [4] 王会立, 陈希信. 声相关计程仪作用距离估计[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2000, 17(1): 58-60.  
WANG Lihui, CHEN Xixin. Working range estimation of acoustical correlation log[J]. Journal of Natural Science of Heilongjiang University, 2000, 17(1): 8-60.
- [5] 黄雄飞, 周徐昌, 苑秉成. 多普勒计程仪作用距离估计[J]. 应用声学, 2009, 28(5): 362-366.  
HUANG Xiongfei, ZHOU Xuchang, YUAN Bingcheng. Working range estimation of Doppler velocity log[J]. Applied Acoustics, 2009, 28(5): 362-366.
- [6] Len Zedel, Alex E. Hay, Ramon Cabrera, Atle Lohrmann. Performance of a single-beam pulse-to-pulse coherent Doppler profiler[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1996, 21(3): 290-297.
- [7] R. J. Urick 著. 水声原理[M]. 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1990.  
Urlick R. J. Principles of Underwater Sound[M]. 3<sup>rd</sup> edition, Harbin Engineering University Press, 1990.
- [8] 裘辛方. 一个预报海水声吸收的公式[J]. 声学技术, 1989, 8(2): 1-4.  
QIU Xinfang, Prediction Formula of Absorption of sea water. Technical Acoustics, 1989, 8(2): 1-4.
- [9] Hands Olav Nyb, Torgeir Jakobsen. A Study on the Range Performance of Acoustic Doppler Current Profilers[C]. Proceeding of the IEEE/OES Eighth Working Conference on Current Measurement Technology.
- [10] Teledyne RD Instruments, Datasheet of Workhorse Monitor.
- [11] 邹洪, 向大威. 多普勒计程仪速度参照系统的误差分析[J]. 声学技术, 2003, 22(3): 162-168.  
ZOU Hong, XIANG Dawei. Speed-precision measurement for ADL[J]. Technical Acoustics, 2003, 22(3): 162-168.
- [12] 向大威, 邹洪. 提高多普勒计程仪性能的矩阵算法[J]. 声学技术, 2007, 26(4): 545-550.  
XIANG Dawei, ZOU Hong. Matrix algorithm for enhancing the performance of DVL[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(4): 545-550.
- [13] 郑兆宁, 向大威. 水声信号被动检测与参数估计理论[M]. 科学出版社, 1983.  
ZHENG Zhaoning, XIANG Dawei. Passive Detection and Parameter Estimation of Underwater Signal[M]. Science Press, 1983.