

# 声学多普勒流速剖面仪近底有效流速数据处理初步研究

王元叶, 何 青

(华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

**摘要:** 通过分析声学多普勒流速剖面仪 (Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP) 的声强垂向剖面分布特征, 利用数学极值定理, 确定床面边界位置, 进而确定出 ADCP 记录的所有在水中的流速单元, 将 ADCP 处理软件“丢弃”的部分近底流速数据或由于底跟踪丢失而损失的流速数据确定出来。利用“六点法”同时、同高度的电磁海流计流速数据对提取出来的 ADCP 近底流速数据进行验证。验证结果表明, 提取出来的 ADCP 近底流速数据可信、可用。

**关 键 词:** 声学多普勒流速剖面仪; 近底流速; 有效单元; 长江口

**中图分类号:** P335.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2008)03-0394-06

声学多普勒流速剖面仪 (Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP), 如 NorTek Aquadopp, RDI ADCP 和 SonTek ADCP, 是目前测量流速剖面最有效的仪器。它具有多种用途, 除了进行流速剖面测量外, 还可以根据水中颗粒物对入射声波的后向散射强度和悬浮颗粒物的关系, 建立声强和悬浮颗粒物特性的关系, 进行悬浮泥沙浓度剖面 and 粒径的测量。自 20 世纪 70 年代末以来, ADCP 的观测技术得到迅速发展, 并得到了广泛的应用<sup>[1-6]</sup>。不同发射频率的 ADCP 具有不同的特性, 如不同的空间分辨率 (最小垂向单元分层)、最大测量剖面范围和盲区距离等。以 SonTek ADCP 为例, 不同频率 ADCP 的技术参数见表 1<sup>[7]</sup>。

近年来, ADCP 的发展为流速剖面测量提供了更加有效的观测手段<sup>[8]</sup>。它克服了传统流速仪难以获得整个水层连续、高频的流速数据的缺陷, 可以同时测定多个单元层的流速<sup>[9]</sup>。然而, 由于近底区域受到旁瓣干扰 (side-lobe) 的影响, ADCP 附带的处理软件将丢弃这部分数据, 不提供给用户使用。如果 ADCP 探头与垂直方向夹角为 25°, 这部分近底盲区大约为总水深的 10%。另外, 当床面发生运动, 如沙波运动, 或者床面层泥沙发生液化导致垂向密度梯度较小时, 底跟踪将出错或丢失<sup>[10,11]</sup>。由于这个原因, ADCP 处理软件给出的有效流速数据将大大损失。图 1 中那些锯齿型黑色区域的单元数据均被 ADCP 处理软件视为无效流速数据。

王爱军等<sup>[12]</sup>基于边界层理论, 在估算 ADCP 水表和底部的观测盲区流速作了初步探索。他们利用卡门-普朗特公式外插, 计算 ADCP 盲区的流速。王爱军等的工作为减少 ADCP 盲区提出了一种比较有效的手段。然而该方法的应用有一定的局限性。它要求流速垂向分布符合对数分布。对于那些不符合对数流速分布的时段, 又如何尽可能地减小 ADCP 的盲区呢?

基于这些原因, 进一步分析 ADCP 数据, 有效可靠地分辨出被 ADCP 软件“丢弃”的和因底跟踪出错而丢失的近底数据, 减少 ADCP 的近底盲区。由于近底层水流流速在河口悬沙的水平输送及底部再悬浮过程的研究中非常重要<sup>[13]</sup>, 所以这项研究工作不仅补充了近底流速数据, 更为动力场中垂线流速分布的完整深入研究及近底泥沙运动临界过程的发生机制研究提供了宝贵的基础数据。这样, 可以充分有效地挖掘仪器 ADCP 流速数

表 1 不同频率 SonTek ADCP 的剖面参数  
Table 1 Frequency-based Profiling Parameters of SonTek ADCP

频率/MHz	最大剖面范围/m	最大分辨率/m	盲区距离/m
3.00	3~6	0.15	0.2
1.50	15~25	0.25	0.4
1.00	25~35	0.40	0.5
0.50	70~110	1.00	1.0
0.25	110~160	2.00	2.0

收稿日期: 2007-04-23

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目 (2002CB412403; 2004CB720505); 华东师范大学 2006 年优秀博士生培养基金资助

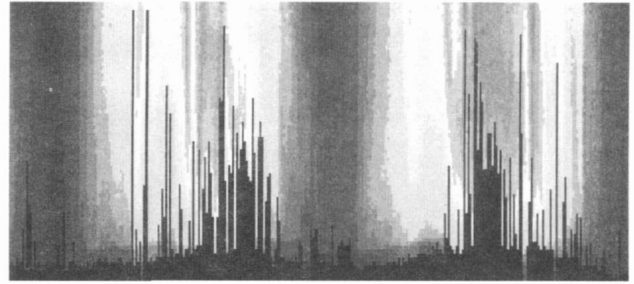
作者简介: 王元叶 (1979-), 男, 江西永丰人, 博士, 主要从事河口海岸水动力及泥沙研究。E-mail: benyywang@163.com

通讯作者: 何 青, E-mail: qinghe@sklec.ecnu.edu.cn

据, 延伸重要区域流速分布值, 为动力场中重要内容、垂线流速分布的完整深入研究和与之密切相关的近底泥沙运动临界过程的发生机制开拓新的途径。

## 1 现场流速观测

2003年7月使用 SonTek 公司生产的 1.5 MHz ADCP, 在长江口的徐六泾(120°58'01"E, 31°47'48"N)和七丫口(121°16'49"E, 31°37'52"N)两个站位进行了定点观测。观测中, ADCP 悬挂在船舷一侧, 探头位于水下 0.5 m 处。SonTek 1.5 MHz ADCP 仪器主要参数为: 垂线最小单元分层 0.25 m, 盲区 0.4 m, 最大测量剖面水深 15~25 m(表 1)。测量时设置 ADCP 单元分层为 0.25 m, 盲区 0.5 m, 采样间隔平均为 5 min。



七丫口站

图 1 ADCP 流速测量中由于底跟踪出错造成的数据丢失(锯齿型黑色区域处)

Fig. 1 Losing of data due to the error of BTA at Qiyakou

## 2 ADCP 近底流速数据处理

### 2.1 底跟踪算法简介

底跟踪算法(Bottom Tracking Algorithm, BTA)可以给出海底床面相对于 ADCP 的运动速度。通过发射一种特殊的声波束(这种声波的波长比为测量水流速度的声波波长更短), 并测量反射回来的回声强度来确定 ADCP 探头到底部的距离, 进而为用户提供有效或无效的流速单元数据(不讨论其它影响流速有效与否的因素, 如信噪比、流速标准偏差等)。其中, 反射波信号中那部分后散射信号的多普勒频移就可以用来确定海底床面相对于 ADCP 的运动速度<sup>[7]</sup>。

当声波在介质中传播时, 因声波能量被吸收而导致强度随其传播距离而减弱。这种能量的吸收与介质的密度、粘滞性、导热性及声波的频率等有关, 即不同介质的衰减系数是不同的。声波在气体中被吸收最大, 液体中被吸收较小, 固体中吸收最小, 在空气中的吸收系数比在水中约大 1000 倍。且介质的吸收系数又与声波频率的平方成正比, 高频声波的衰减异常剧烈。水面和海底是两个发射和散射界面, 因声波在水中传播时, 被水中悬浮颗粒物反射回来的声强和遇到水表面或床面时被界面反射回来的声强会有很大的差异<sup>[14,15]</sup>, BTA 就是通过寻找声强剖面的这个差异或尖锐变化来确定 ADCP 探头到界面的位置。声学流速剖面仪都是根据底跟踪算法来确定界面的位置, 并为用户提供有效单元数, 即有效水深内的流速值。

### 2.2 ADCP 近底流速数据处理

图 2(a) 是 ADCP 给出的整个流速剖面示意图, 其中包含了 ADCP 给出的有效单元数据和被认为无效的单元数据(近底盲区部分数据)。可看到近底盲区约 1.2 m 的流速数据被认为是无效的流速数据。同时, 从图 2(b) 中可以看出, 声强剖面分布有一个明显的拐点(横线, 即底床位置)。这个拐点实际上反映了两种不同介质的界面(水和固体床面, 包括可动或不动床面, 或水和空气界面)。为确定出近底盲区, 关键问题是要通过一定的方法寻找到该拐点的位置(横线位置), 然后将 ADCP 处理软件没有给出的那部分近底数据提取出来。

函数极值定理告诉我们, 当一条曲线在某一点  $x_0$  处具有导数, 且在该点  $x_0$  处取得极值时, 那么这条曲线在点  $x_0$  处的导数等于 0。根据这一定理, 可对 ADCP 测量得到的声强剖面信号数据(图 2(b)) 求一阶导数, 找出一阶导数为零的点的位置, 并结合声强剖面垂向分布的特征, 找出声强剖面的尖锐变化位置。图 2(c) 是声强剖面的一阶导数分布图。图中横线所在位置即是寻找到的拐点位置。这样可将该拐点以上的流速单元视为有效单元(不包含该位置处的那一个最近底单元)。

以 2003 年 7 月在长江口的徐六泾和七丫口两个站位进行定点观测得到的 1.5 MHz ADCP 数据为例, 得到了图 3

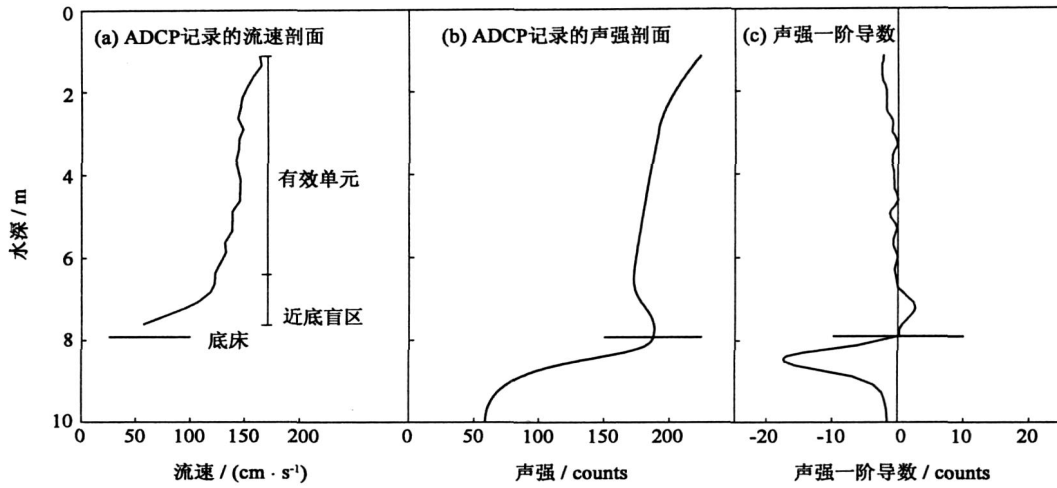


图2 流速、声强及声强一阶导数剖面分布图(声强剖面是 ADCP 3 个探头接受的声强的平均值)

Fig.2 Profiles of velocity , signal amplitude and its corresponding first order differential coefficient

所示的 ADCP 处理软件给出的原始有效单元数和利用本文中所介绍的方法得到有效单元数对比图。由图 3 可看出，处理后的有效单元数目要比 ADCP 处理软件给出的原始有效单元数目大，也就是说通过该方法将近底盲区部分的流速数据寻找出来了。统计结果表明，徐六泾提取了近底有效单元数目为 3~7 个，平均为 4.7 个。从图 3(b) 可看到，当底跟踪出错或丢失时，原始 ADCP 给出的有效单元数波动范围很大，而这些数据几乎是不能用，而处理后的有效单元数比较稳定地、有规律地随潮周期的波动而波动，实际上是反映了水深或潮位的波动。

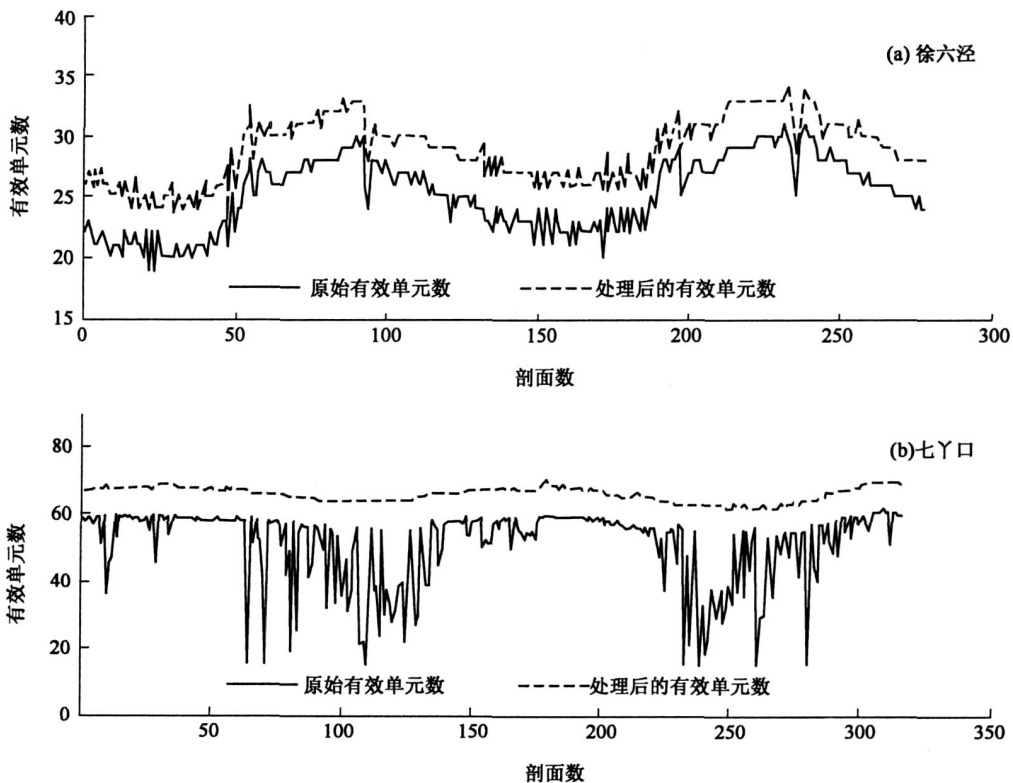


图3 ADCP 原始有效单元数和处理后的有效单元数对比

Fig.3 Valid cells comparison between the original numbers and the processed numbers

### 2.3 ADCP 近底有效流速数据验证

对近底有效流速的提取和床面位置的确定进行分析，并提取得到近底流速数据，这部分数据是否可用，将对其进行验证。验证资料使用电磁海流计 (electromagnetic current meter, ECM) 的同时、同高度的整点观测资料。电磁海流计得到的底层流速数据为距离床面 0.5 m。由于 ADCP 单元分层为 0.25 m，所以取 ADCP 距离床面的第三个单元的流速数据进行验证比较。图 4 和图 5 分别是徐六泾和七丫口使用 ADCP 得到的近底流速和使用电磁海流计得到的“六点法”底层流速的比较结果。从图中可以看出，ADCP 测量得到的近底流速和电磁海流计测量得到的同时、同高度的流速数据符合良好。它们在徐六泾和七丫口的相关系数 ( $R^2$ ) 分别达到 0.96 和 0.98 (图 6)。表明 ADCP 测量得到的近底流速数据是可用的。然而，用来进行验证的那部分 ADCP 近底流速数据已被 ADCP 处理软件“丢弃”，有时候由于底跟踪丢失也会损失部分近底数据，将它们再提取出来，并证明了这部分近底流速数据的可用性，这是该项工作的意义所在。

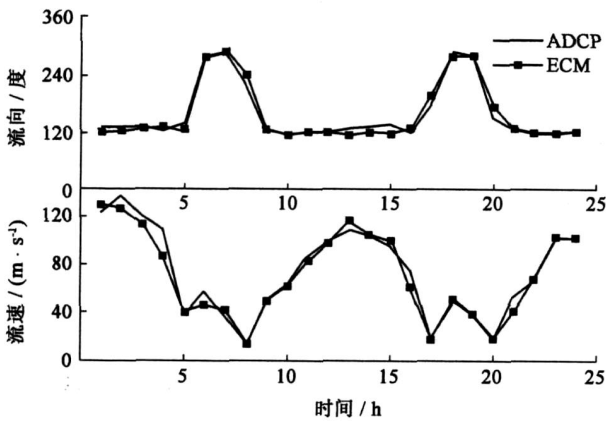


图 4 2003 年 7 月徐六泾近底流速验证 (ADCP 和 ECM)

Fig. 4 Velocity verification of ADCP and ECM near bottom in July, 2003 of XLJ

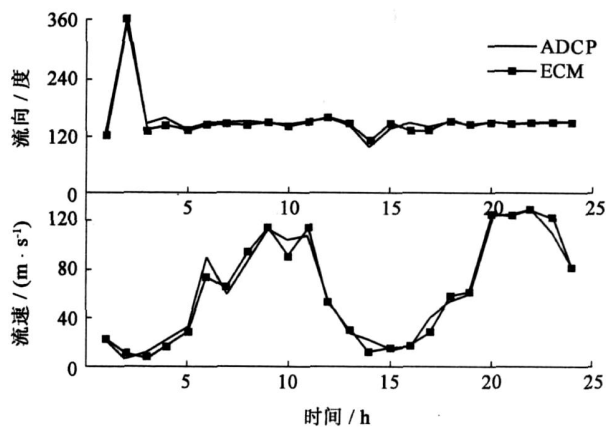


图 5 2003 年 7 月七丫口近底流速验证 (ADCP 和 ECM)

Fig. 5 Velocity verification of ADCP and ECM near bottom in July, 2003 of QYK

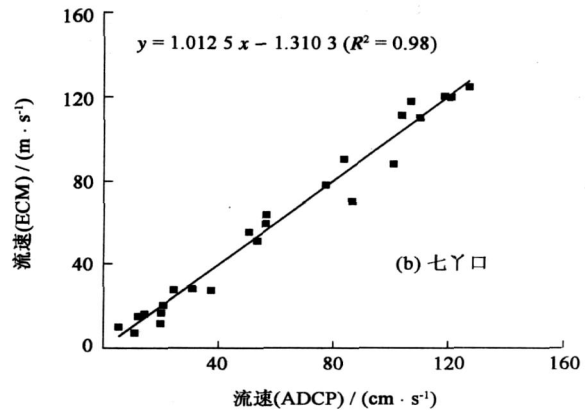
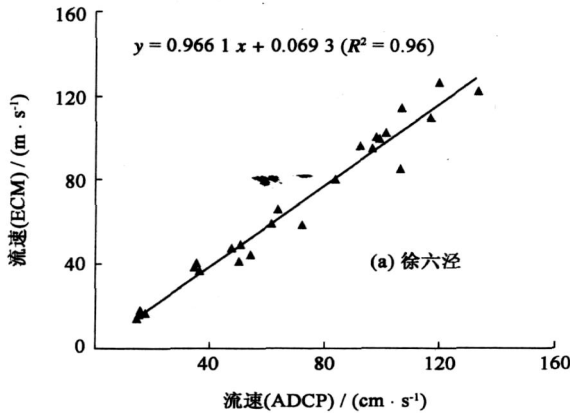


图 6 同步、同高度的 ADCP 近底流速和电磁海流计流速数据相关图

Fig. 6 Velocity comparison between the ADCP and ECM

### 3 讨 论

ADCP 近底盲区数据的利用需小心。虽然 ADCP 特意设计成将发射能量尽量集中,但还是有部分能量会向各个不同的方向发射。那部分以更短的路径进入边界的能量被反射回来就形成了干扰源。这样 ADCP 发射的声波频率靠近边界时,包括水表面或床面,潜在地存在两种干扰源:边界的直接反射和旁瓣能量的反射。尽管旁瓣能量要远小于主能量,然而边界发射却要比水体中的颗粒物反射更强。因此旁瓣反射潜在地影响着流速的测量。对于探头垂向夹角为 25° 的标准 ADCP,旁瓣干扰可能影响到流速剖面最后 10% 的测量。旁瓣能量对流速测量的影响受到多种因素的影响,如边界条件、水体的散射回声强度和传感器的声学属性等。同时, SonTek 公司综合考虑多种因素对传感器进行专门设计以求尽量减小旁瓣能量。这样就为用户利用近底部分流速数据提供了一定的空间。这也是本文之所以可以进行研究的基础。

王爱军等<sup>[12]</sup>基于边界层理论,对估算声学多普勒流速仪水面和底部的观测盲区流速作了初步探索。他们利用卡门-普朗特公式外插,计算 ADCP 盲区的流速,为减少 ADCP 盲区提出了一种比较有效的手段。然而该方法的应用有一定的局限性,它要求流速垂向分布符合对数分布。事实上,长江口实测观测资料表明对数流速分布仅在部分时段内符合,而对于非恒定流的憩流时刻,流速分布不符合对数流速分布<sup>[16]</sup>。所以,对于那些不符合对数流速分布公式的时间段内,为了获取近底流速数据,最终还是要回到仪器测量得到的数据上来。

尽管验证结果相当理想,然而所用来验证的资料只有一点,不能说明 ADCP 得到的所有近底流速数据可靠。如果认为越靠近床面的数据越不可靠,这样验证结果只能表明 ADCP 得到的近底流速数据从第三个单元开始有效,而下面两个单元,即离床面 12.5 ~ 37.5 cm 和 37.5 ~ 62.5 cm 这两个流速单元是否有效还需要进一步的验证。另外,系统误差也是影响因素之一。电磁海流计与 ADCP 都有各自的观测精度和误差范围,利用电磁海流计来验证 ADCP 盲区流速的可靠性,这本身就会产生一定的系统误差。

### 4 结 论

(1) 本文利用数学极值定理,确定边界位置(床面或水表面),进而确定出 ADCP 记录的所有在水中的流速单元,将 ADCP 处理软件“丢弃”的部分近底流速数据或由于底跟踪丢失而损失的流速数据确定出来。

(2) 利用“六点法”同时、同高度的电磁海流计得到的流速数据对提取出来的 ADCP 近底流速数据进行验证。验证结果表明,提取出来的 ADCP 近底流速数据可信、可用。近底流速数据的再提取不仅补充丰富了近底流速数据结构本身,更为动力场中垂线流速分布的完整深入研究及近底泥沙运动临界过程的发生机制研究提供了宝贵的基础数据支撑。

#### 参考文献:

- [1] HAYA E, SHENGJ. Vertical profiles of suspended sand concentration and size from multifrequency acoustic backscatter[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(C10): 15 661 - 15 677.
- [2] THORNE P D, HARDCASTLE P J, SOULSBY R L. Analysis of acoustic measurements of suspended sediments[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98 (C1): 899 - 910.
- [3] 郭纪捷, 任来法, 李允武. 声学悬浮泥沙观测数据现场定标研究[J]. *海洋学报*, 1998, 20(5): 120 - 125. (GUO Ji-jie, REN Lai-fa, LI Yun-wu. In-situ calibration of acoustic measurement of suspended sediment[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1998, 20(5): 120 - 125. (in Chinese))
- [4] 汪亚平, 高 抒, 李坤业. 用 ADCP 进行走航式悬沙浓度测量的初步研究[J]. *海洋与湖沼*, 1999, 30(6): 758 - 763. (WANG Ya-ping, GAO Shu, LI Kun-ye. A preliminary study on suspended sediment concentration measurements using an ADCP mounted on a moving vessel. *Oceanologia ET Limnologia Sinica*, 1999, 30(6): 758 - 763. (in Chinese))

- [5] 程鹏,高抒. ADCP测量悬沙浓度的可行性分析与现场标定[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(2):168 - 176. (CHENG Peng, GAO Shu. Suspend sediment concentration measurements with ADCP: feasibility analysis and in situ calibration[J]. Oceanologia ETLimnologia Sinica, 2001, 32(2):168 - 176. (in Chinese))
- [6] 张锁平,周长兴. 60m船用多功能ADCP悬浮泥沙浓度测量及比测数据分析[J]. 海洋技术, 2001, 20(1):83 - 87. (ZHANG Suoping, ZHOU Chang-xing. Suspended sediment measuring with 60m shipboard multipurpose ADCP and the constant test data analysis[J]. Ocean Technology, 2001, 20(1):83 - 87. (in Chinese))
- [7] SonTek. SonTek ADP™ Acoustic doppler profiler technical documentation[M]. California:Published by Sontek, 1998.
- [8] HOWARTH M J. The effect of stratification on tidal current profiles[J]. Continental Shelf Research, 1998, 18:1235 - 1254.
- [9] WOODWARD W E, APPELL G F. Current velocity measurements using acoustic doppler backscatter:a review[J]. Journal of Ocean Engineering, 1986, 11:3 - 6.
- [10] RENNIE C D, MILLAR R G, CHURCH M A. Measurement of bedload velocity using an acoustic doppler current profiler[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 128(5):473 - 483.
- [11] RENNIE C D. Non-invasive measurement of fluvial bedload transport velocity using an acoustic doppler current profiler[D]. Ph D Thesis, University of British Columbia, 2002. 232.
- [12] 王爱军,汪亚平,高抒. 声学多普勒流速仪盲区数据处理及其在长江河口区的应用[J]. 水利学报, 2004(10):77 - 82. (WANG Ai-jun, WANG Ya-ping, GAO Shu. Determination of current velocity in blank layer of ADCP[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(10):77 - 82. (in Chinese))
- [13] 时钟,周洪强. 长江口深水航道北槽口外悬沙浓度垂向分布[J]. 上海交通大学学报, 1997, 31(11):30 - 35. (SHI Zhong, ZHOU Hong-qiang. Vertical profile of suspended sediment concentration in the Changjiang Estuary[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1997, 31(11):30 - 35. (in Chinese))
- [14] 申罗杰夫,何祚镛,赵晋英,译. 水声学波动问题[M]. 北京:国防工业出版社, 1983. (E, HE Zuo-yong, ZHAO Jir-ying. Questions about underwater acoustics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1983. (in Chinese))
- [15] 杨殿荣. 海洋学[M]. 北京:高等教育出版社, 1986. 141 - 151. (YANG Dian-rong. Oceanography[M]. Beijing: Higher Education Press, 1986, 141 - 151. (in Chinese))
- [16] 王元叶. 长江口近底边界层观测研究[D]. 上海:华东师范大学, 2004. (WANG Yuan-ye. The observations of bottom boundary layer in Changjiang Estuary[D]. Shanghai: East China Normal University, 2004. (in Chinese))

## Near bed velocity treatment of Acoustic Doppler Current Profiler<sup>\*</sup>

WANG Yuan-ye, HE Qing

(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** The paper gives the detailed instruction on the data acquirement of the valid cells of Acoustic Doppler Current Profiler(ADCP) near bed. According to the analysis of the vertical distribution of the signal amplitude with the extremum theorem, the location of the bed is fixed and the velocity data are extracted which was once lost due to the disadvantage of ADCP software and the errors of the bottom track algorithm. The validity of the extracted data is verified by using the synchronous data with the same depth of electric current meter. The data acquirement of valid cells of ADCP near bed provides a kind of convenient and effective measurement of the velocity near bed and enriches the vertical velocity data, too.

**Key words:** Acoustic Doppler Current Profiler; near bed velocity; valid cells; Changjiang Estuary

\* The study is financially supported by the National Key Project for Basic Research(2002CB412403; 2004CB720505).