

宽带声学多普勒流速剖面仪回波信号模型分析

周亦军¹, 彭东立²

(1. 海军驻武汉 438 厂军事代表室, 武汉 430060; 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(Broadband Acoustic Doppler Current Profile, BBADCP)通过接收海洋体积混响信号进行频偏估计, 体积散射模型的准确性决定了理论仿真的正确性。针对 BBADCP 的信号模型特点, 建立了散射体单元散射叠加效应的海洋体积回波时空特性及散射模型, 推导了叠加噪声后散射回波的具体表达式。通过散射回波的离散化, 把各参数(幅度、频率、调制)分离开来, 单独考虑各参数对测速精度的影响。利用复协方差算法对水流流速进行估计, 分析了信噪比、水流流速、紊流效应等因素对 BBADCP 流速估计的影响, 验证了体积散射模型的正确性。

关键词: 声学多普勒流速剖面仪; 伪随机编码; 体积散射模型; 复协方差算法

中图分类号: O427.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2012)-02-0179-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2012.02.012

The model analysis of volume reverberation for broadband Acoustic Doppler Current Profile

ZHOU Yi-jun¹, PENG Dong-li²

(1. Office of Military Delegation at 438 Factory, Wuhan 430060, China

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

Abstract: By receiving ocean volume reverberation, the broadband Acoustic Doppler Current Profile estimates the Doppler shift of ocean current. The correctness of volume reverberation model decides the correctness of theoretical simulation. From the signal model of BBADCP and the superposition effect of reverberation cell, the spatio-temporal characteristics of ocean volume reverberation and the model of volume reverberation are created, and the formula of reverberation signal, added with noise, is deduced. According to the dispersion of volume reverberation, the parameters split from each other, and the effects of amplitude, frequency and modulation on speed estimation are severally considered. Also the effects of SNR, current velocity, and turbulence on BBADCP are analyzed. The results validate that the volume reverberation model is correct.

Key words: acoustic Doppler current profile; pseudo random coding; volume reverberation model; complex covariance approach

0 引言

声学多普勒流速剖面仪(Acoustic Doppler Current Profile, ADCP)是一种利用声学换能器发射声脉冲, 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。具有测验时间短、测验精度高、资料完整丰富的特点。通过实验可以测量一个剖面上数十至上百层水流的速度, 特别适合于流态复杂条件下的测验, 可以真实反映流场, 具有极高的测量效率。

随着 ADCP 测流技术的发展, 从发射信号的种类, ADCP 可以划分为脉冲非相干(窄带 ADCP)、脉冲相干和宽带 ADCP 三种。由于窄带 ADCP 存在空间和时间分辨率的矛盾, 限制了其在分层测流上的使用; 脉冲相干 ADCP 的精度高, 但其作用距离小, 只能在浅水中使用; 宽带 ADCP 采用编码脉冲信号, 解决了空间和时间分辨率的矛盾, 提高了分层测流的精度^[1]。文献[2]利用空间散射的模型, 通过矢量叠加原理对宽带回波进行建模, 构造了散射锥体模型。本文针对 BBADCP 的信号模型特点, 建立了散射体单元散射叠加效应的海洋体积回波时空特性及散射模型, 推导了叠加噪声后散射回波的具体表达式, 利用复协方差算法对水流流速进行估计, 分析了信噪比、水流流速、紊流效应等因素对 BBADCP 流速估计的影响, 验证了体积散射模型的正确性。

收稿日期: 2011-12-11; 修回日期: 2012-03-04

作者简介: 周亦军(1969—), 男, 广东五华人, 工程师, 研究方向为舰船导航。

通讯作者: 彭东立, E-mail: bernou2000@gmail.com

1 BBADCP 工作原理及回波信号的时空特性

宽带 ADCP 发射由伪随机编码调制的脉冲信号,声脉冲照射在随水流运动的悬浮物质(如浮游生物、气泡等)中,接收来自不同水层的散射回波信号(如图 1 所示),利用伪随机码信号的尖锐相关峰及散射回波的多普勒频移,可准确测定各特定水层的流速 v :

$$v = \frac{\lambda}{2 \cos \alpha} f_d \tag{1}$$

式中: λ 为发射信号波长; f_d 为回波多普勒频移; α 为波束掠射角。通过重复的伪随机编码信号,采用复协方差频偏估计方法, BBADCP 的测速精度 Δv 存在如下关系^[3]:

$$\Delta v \geq \sqrt{\frac{3}{2PL} \frac{c\lambda}{8\pi\Delta R}} \tag{2}$$

其中: P 为重复发射次数; L 为码元数; c 为声速; ΔR 为分层单元厚度。

ADCP 要分层测流,就要对来自不同深度水层的回波进行处理,这涉及到空间积分及分层问题。利用图 1,通过回波的时空特性分析,可以理解 ADCP 在测量流速剖面中使用的空间分层方法。发射脉冲的前沿先到达 A 点,经由 A 点的散射体散射,散射回波信号到达 B 点时,发射脉冲的后沿也到达 B 点,则 AB 段的散射回波在同一时刻 C 到达接收换能器。发射脉冲的前沿到达 E 点的散射与发射脉冲后沿在 F 点的散射于时刻 G 同时到达接收换能器。ABFE 范围内的散射回波构成了对水层 1 进行测速的散射回波信号,它们在 CG 时间范围内到达接收换能器。回波信号既包括水层 1 的散射回波,也包括水层 1 相邻范围的散射回波。A 点、F 点同为深度水层 1 的中点,但是 B 点、E 点在水层

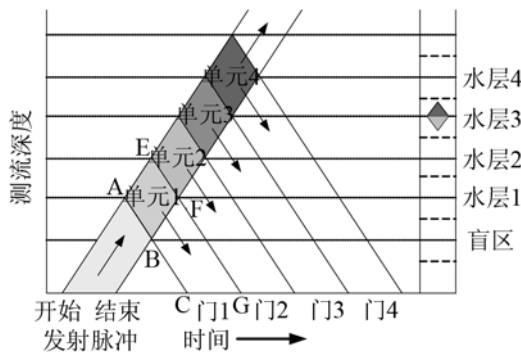


图 1 BBADCP 测流时间门限示意图
Fig.1 The schematic diagram of time thresholds in BBADCP measurement

1 的范围之外。分层模型假设介质的水平层能够精确地代表速度结构,同层的速度都是一样的,并且每层的厚度与相关积分时间是一致的。

由以上的 ADCP 回波信号时空特性分析可知:

(1) 回波信号的时间先后与深度单元的距离远近相对应,由此对回波信号进行分层选通。

(2) ADCP 在某一时刻接收到的回波是发射脉冲在不同深度处散射体散射回波信号的叠加。

(3) ADCP 时间门内的回波信号包含了深度单元范围内所有深度的回波,通过信号平均,减小了空间混叠效应,提高了流速测量精度。

(4) 水层各位置对回波信号的贡献各不相同。中间位置的贡献最大;越到两端,贡献越小,水层外散射回波的贡献为 15%^[4]。

2 海水体积散射模型

BBADCP 发射波束开角为 ψ , 立体角为 Ω 的伪随机编码脉冲信号,伪随机码码元数为 L ,码元宽度为 τ ,编码信号宽度为 $L\tau$,重复编码次数为 M ,信号总长为 $T=ML\tau$ 。声波束照射海水区域为一圆台,其中近端对应的圆台上面面积为 $r^2\Omega$,远端对应的圆台下面面积为 $(r+cT/2)^2\Omega$,如图 2 所示,时间差为 T ,一般情况下, $\psi = 1.5^\circ \sim 4^\circ$ 。

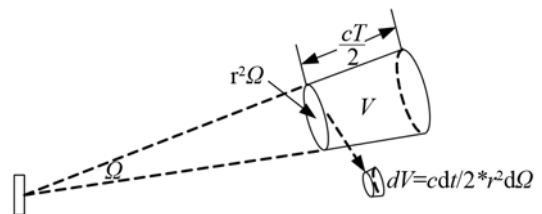


图 2 BBADCP 波束照射示意图
Fig.2 The schematic diagram of irradiated volume of a BBADCP beam

假设海水的体积散射模型可以离散成由许多个小区域组成,每个区域回波的多普勒频移各不相同(大小由声线掠射角决定),回波到达接收器的时刻由传播路径决定,整个体积内的散射体对脉冲编码信号的散射响应表现为所有小区域散射的叠加,通过将这些信号在有效的回波接收时间内叠加形成较为合理的回波信号。也就是将圆台型海水水域抽象化为许多散射点,这样抽象的前提是^[5]:

(1) 离散后的散射单元区域很小,每一区域的体积与信号传播的距离相比可简化为一个点;

(2) 任一瞬间,位于某一体积内的散射体是随机均匀的,并且随水流一起运动;

(3) 海水介质均匀,信号只沿直线传播,在一

次信号收发时间内忽略海洋环境的时变性;

(4) 波束区域内无多次反射现象, 忽略二次散射;

(5) 在波束宽度照射内的所有体积散射回波对水听器都有贡献。

将圆台区域按照海水的体积散射模型划分为 N 个小区域, 标号分别为 dV_1, dV_2, \dots, dV_N , 一个小区域对应体积为 $dV = cd t / 2 * r^2 d\Omega$ 。考虑收发合置的换能器, 圆台区域的散射回波信号同一时刻回到换能器, 对应图 1 中, AB 段的散射回波信号在同一时刻 C 到达接收换能器。

对于脉冲声纳来说, 当声脉冲入射到圆台体积内散射时, 脉冲“头”部对应圆台远端的散射体回到接收换能器的时间和脉冲“尾”部对应圆台近端的散射体回到接收换能器的时间一样, 对应长度为 $cT/2$, 如图 2 所示, T 为脉冲宽度。接收换能器在某时刻接收回波散射信号为整个圆台体积内所有体积散射回波之和, 也就是说从换能器接收的体积散射回波是波束宽度内的一个圆台型海水区域所有散射点的回波叠加。

3 BBADCP 信号模型

记发射换能器发射的二进制伪随机编码信号的解析形式为^[6]

$$\tilde{f}_1(t) = a(t) e^{j\phi(t)} e^{j2\pi f_d t} \quad (3)$$

式中: $\phi(t)$ 为相位调制函数, 对伪随机编码来说, 只能取 0 或 π 两个值, $a(t)$ 为幅度调制函数, 取二进制伪随机编码信号的包络为矩形, 则

$$a(t) = \begin{cases} \sqrt{\frac{E}{T}} & 0 < t < T \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

其中: E 为信号的能量。

对重复二相伪随机编码信号来说, 重复次数为 M 的发射信号可表示为

$$\tilde{f}_2(t) = \sum_{n=0}^{M-1} \tilde{f}_1(t - nL\tau) \quad (5)$$

换能器发射重复伪随机编码信号, 经由 r 处单元 ΔV 范围内散射体散射, 假设单元 ΔV 范围内散射体的回波信号相同, 再由收发合置的换能器所接收, 则回波信号的时延为 $\Delta t = 2r/c$, 产生多普勒频移的时间尺度压缩因子为 $k = \frac{c+v}{c-v}$, v 为散射体相对于声源的运动速度, 取相向运动为正。考虑声波传播的球面扩散及传播损失^[7], 衰减因子为 $\tilde{b}(r)$, 则回波信号可以表示为 $\tilde{b}(r) \tilde{f}_2 \left[k \left(t - \frac{2r}{c} \right) \right]$ 。

体积散射回波包括水中空气气泡的共振散射, 共振散射的空气气泡的尺度为 $10 \sim 12 \mu\text{m}$, 还包括浮游生物、微生物、热力层、水中的鱼以及其它大的物体也会产生比较强的回波, 所有这些物体反射的和构成了回波的主体。假设中小气泡的散射回波在回波中占主体作用, 由于声波波长要比小气泡的尺度大很多, 利用平面波模型, 则所有气泡回波的回波强度符合瑞利分布, 假设相位在 $(0, 2\pi)$ 间符合均匀分布, 最后所有的气泡回波符合高斯分布。

考虑换能器波束角宽度对信号的影响。由于波束角有一定宽度, 对同一海水层流来说, 先到达的波束声线掠射角大, 多普勒频移较小; 而后到达的波束声线掠射角小, 多普勒频移较大。对应于回波信号表现为由波束角宽度引起的频谱展宽。

利用上述的体积散射回波模型, 回波信号就可以表示为

$$\tilde{s}(t) = \int_{\frac{1}{2}c(t-T)}^{\frac{1}{2}ct} \tilde{b}(r) \tilde{f}_2 \left[k \left(t - \frac{2r}{c} \right) \right] dr \quad (6)$$

假设 $t' = \frac{2r}{c}$, 且 $v \ll c$, 则 $k \approx 1 + \frac{2v}{c} = 1 + \frac{f_d}{f_0}$, 式(6)可以表示为

$$\tilde{s}(t) = \int_{t-T}^t \tilde{b}(t') \tilde{f}_2 \left[(1 + f_d(t')/f_0)(t-t') \right] dt' \quad (7)$$

假设 $\tilde{b}(t') = \tilde{B}(t') e^{j\phi(t')}$, 其中: \tilde{B} 符合瑞利分布, ϕ 符合随机均匀分布。

$$\tilde{s}(t) = \int_{t-T}^t \tilde{B}(t') \tilde{f}_2 \left[(1 + f_d(t')/f_0)(t-t') + \phi(t')/\omega_0 \right] dt' \quad (8)$$

考虑回波的离散化:

$$\tilde{s}(t) = \sum_i^N \tilde{s}_i(t) = \sum_i^N b_i \tilde{f}_2 \left[(1 + f_{di}/f_0)(t-t_i) + \phi_i/\omega_0 \right] \quad (9)$$

其中, b_i 为第 i 个散射单元散射回波的幅度, 不同散射单元的散射回波幅度呈随机高斯分布; f_{di} 为第 i 个散射单元散射回波的多普勒频偏, 不同散射单元的多普勒频偏呈随机高斯分布; t_i 为第 i 个散射单元散射回波的时延, 不同的散射区的回波时延与斜距相关; ϕ_i 为第 i 个散射单元散射回波的附加相位, 用一个 $(0, 2\pi)$ 间随机相位表示。

叠加噪声后的散射回波可以表示为

$$\tilde{r}(t) = \tilde{s}(t) + \tilde{n}(t) \quad (10)$$

其中 $\tilde{n}(t)$ 为零均值复高斯随机过程, 即:

$$E[\tilde{n}(t) \tilde{n}(t')] = N_0 \delta(t-t') \quad (11)$$

通过散射回波的离散化, 可以把各变量(幅度、频率、调制)分离开来。保持任意两个变量不变, 改变第三个, 可以观察感兴趣的参数对系统精度的影响。例如, 改变幅度可以观察信噪比对系统测量精度的影响; 改变频移变化量可以观察海水速度结构

对系统测量精度的影响, 改变频移方差可以观察散射体统计回波对计算精度的影响。虽然简化的回波系统模型不能精确地反映海水的散射回波环境, 但是该模型能够充分地考虑各参数的影响情况。

4 宽带信号回波仿真

假设发射信号的中心频率为 300 kHz, 采样频率为 2 MHz, 波束宽度为 4.2°, 发射信号的掠射角为 70°, 宽带信号采用 6 阶的 m 序列调制, 码元数为 63 位, 编码重复次数为 4, 每个码元宽度包含 4 个信号周期, 得到回波信号的时域波形和频谱如图 3 所示。

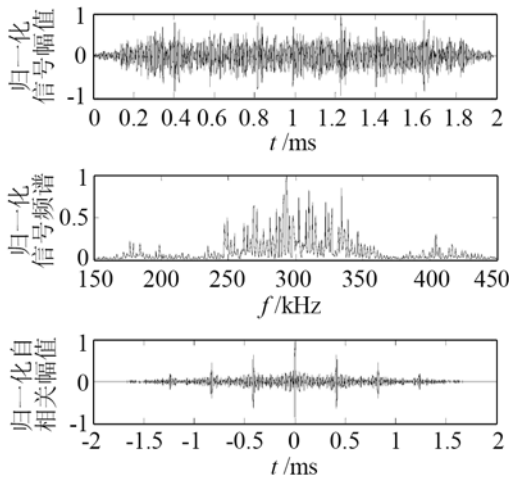


图 3 回波模拟信号的时域波形及频谱

Fig.3 Waveform, spectra and autocorrelation of simulated volume reverberation signal

4.1 信噪比影响

假设水流的平均流速为 1 m/s, 均方误差为 0.25m/s, 信噪比的变化范围为-10~30 dB, 则仿真得到的平均流速和流速标准偏差如图 4 所示。对平均流速来说, 在整个信噪比变化范围内, 流速计算结果都在设计值周围波动, 说明 BBADCP 的宽带回波信号有稳定的测流计算结果。对流速标准偏差来说, 当信噪比小于 5 dB 时, 测流标准误差随着信噪比的增大而减小; 当信噪比大于 5 dB 时, 测流标准误差保持在 0.05 m/s 左右不再减小, 符合宽带 ADCP 的 Cramer-Rao 下限的定义。

4.2 水流流速的影响

假设信噪比为 20dB, 模拟 BBADCP 与水层之间的相对速度为 0.5~2.5 m/s, 计算流速均值和标准方差随水流流速的变化关系。由表 1 可以看出, 随着流速的增大, 流速测量的标准方差也不断增大。这是由于随着流速的增大, 使多普勒频偏值增大,

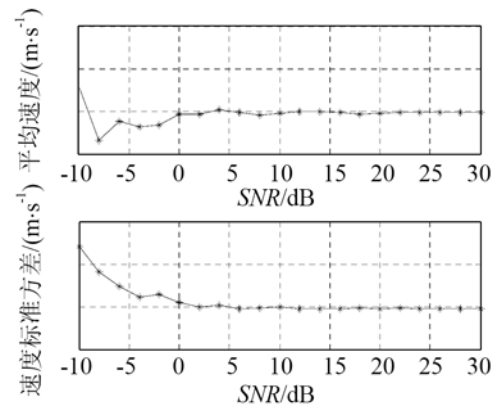


图 4 平均速度和速度标准方差随信噪比的变化规律

Fig.4 The variation of mean velocity and standard deviation with SNR

表 1 流速对流速均值和标准方差的影响

Table 1 The influence of current velocity on mean velocity and standard deviation

流速/(m·s ⁻¹)	0.5	1	1.5	2	2.5
流速均值/(m·s ⁻¹)	0.5000	1.0075	1.4890	2.0069	2.4969
标准方差/(m·s ⁻¹)	0.0243	0.0471	0.0606	0.0881	0.1060

多普勒效应对载频的调制作用也随之增大, 从而造成标准方差的增大。

4.3 水流紊流的影响

假设信噪比为 20 dB, 流速为 $v=1\text{ m/s}$, 改变统计回波频移方差, 计算流速均值和标准方差随水流紊流流速的变化关系。由表 2 可以看出, 随着紊流流速的增大, 流速测量的标准方差也不断增大。这是由于随着紊流流速的增大, 对应多普勒频偏的模糊程度增大, 从而造成标准方差的增大。

表 2 水流紊流对流速均值和标准方差的影响

Table 2 The influence of turbulent flow on mean velocity and standard deviation

紊流流速/(m·s ⁻¹)	0.25v	0.5v	0.75v	1.0v
流速均值/(m·s ⁻¹)	1.0028	0.9935	0.9794	1.0256
标准方差/(m·s ⁻¹)	0.0411	0.0779	0.1189	0.1560

5 结论

本文主要完成了宽带 ADCP 回波信号的理论建模, 并在此基础上, 结合回波信号随信噪比、流速、水体紊流程度对回波模型进行了仿真和分析。分析结果证明宽带 ADCP 回波信号理论模型的正确性。并得到如下结论:

- (1) 宽带回波信号瞬时值的概率密度分布服从高斯分布, 包络服从瑞利分布;
- (2) 宽带回波信号的多普勒频偏符合高斯分布, 回波时延由斜距所决定, 回波的附加相位在 $(0, 2\pi)$ 内符合均匀分布;

(3) 复相关测量得到的宽带 ADCP 的速度均值随着信噪比的增大而趋于设定值, 标准方差在 $SNR=5$ dB 时趋于固定值, 说明宽带 ADCP 能降低对信噪比的要求;

(4) 随着水流流速和水流紊流的增大, 流速测量的标准方差也增大。

参 考 文 献

- [1] Blair H Brumley, Ramon G Cabrera, Kent L Deines, Eugene A. Terray. Performance of a broad-band acoustic doppler current pProfile[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1991, 16(4): 402-407.
- [2] 刘德铸, 孙大军, 张殿伦. 利用波束散射模型分析 BBADCP 的性能[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(3): 307-311.
LIU Dezhu, SUN Dajun, ZHANG Dianlun. Performance of a broadband acoustic Doppler current profiler that uses a beam scattering model[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2010, 31(3): 307-311.
- [3] Pintel R, Smith J A. Repeat-sequence coding for improved precision of doppler sonar and radar[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1992, 9(2): 149-163.
- [4] Acoustic Doppler current profiler—Principles of Operation A Practical Primer, RD Instruments, 1996.
- [5] Urick R J 著, 洪申译. 水声原理[M]. 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1990.
Urick R J. Principles of underwater sound[M]. 3rd edition, Harbin Engineering University Press, 1990.
- [6] 黄雄飞, 苑秉成, 陈喜. 一种解决 BBADCP 测速模糊的方法[J]. 声学技术, 2008, 27(3):323-327.
HUANG Xiongfei, YUAN Bingcheng, CHEN Xi. A solution to velocity ambiguity of broad band acoustic Doppler current profile [J]. Technical Acoustics, 2008, 27(3):323-327.
- [7] 张维全, 王小宁, 彭东立. 宽带声学多普勒流速剖面仪作用距离估计[J]. 声学技术, 2010, 29(4): 442-446.
ZHANG Weiquan, WANG Xiaoning, PENG Dongli. Working range estimation of broadband ADCP[J]. Technical Acoustics, 2010, 29(4): 442-446.