

宽带声学多普勒流量剖面仪的系统仿真*

王 森, 林善明, 张秀萍, 朱昌平

(河海大学计信学院, 江苏常州, 213022)

王耀俊

(南京大学近代声学国家重点实验室, 江苏南京, 210093)

摘要: 90 年代初发展起来的宽带声学多普勒流量剖面仪克服了传统窄带 ADCP 存在距离分辨力与速度分辨力之间的矛盾, 从而解决了低速浅水河流流量(流速)精确测量的问题, 是一种有着广泛应用前景的先进水文遥测仪器。文章中着重分析了 BBADCP(宽带声学多普勒流量剖面仪)如何通过时间选通采样从河流不同深度返回的后向散射回波, 实现测距离的目的; 如何测量回波的多普勒频移, 实现测流速的目的。文中从二维信号矢量的角度分析了多普勒频移调制和解调的过程, 推导出提取速度信息的信号处理方法。文中最后采取等效基带仿真方法, 运用匹配滤波器理论设计了一个 BBADCP 系统模型, 通过仿真手段验证了文中对 BBADCP 的分析结果。

关键词: 流量剖面仪; 计算机仿真; 流量; 多普勒

中图分类号: TB551 文献标识码: A 文章编号: 1000-3630(2004)02-0113-04

Simulation of broad-band acoustic Doppler current profile

WANG Sen, LIN Shan-min, ZHANG Xi-ping, ZHU Chang-ping,

(Department of Computer & Information Engineering, Hehai University, Jiangsu Changzhou 210032, China)

WANG Yao-jun

(State Key Laboratory of Modern Acoustics, Nanjing University, Jiangsu Nanjing 210093, China)

Abstract: Broad-band ADCP invented in the early 1990s has improved both distance resolution and speed resolution in contrast to narrow-band ADCP, making it possible to obtain precise measurements of discharge in a shallow river with a low flow speed. This paper focuses on how BBADCP profiles the river by time gating and sampling the received echo from different depths, and how it measures flow speed based on Doppler shift. Using two-dimensional signal vectors, the process of Doppler shift modulation and demodulation is analyzed, and a signal processing method for extracting flow speed information is derived. A BBADCP system model based on base-band simulation and the matched-filter theory is established and the theory is tested with simulation.

Key words: ADCP; computer simulation; current; Doppler

1 引言

90 年代初发展起来的宽带声学多普勒流量剖面仪(BBADCP)克服了传统窄带声学多普勒剖面仪(ADCP)存在的距离分辨力与速度分辨力之间的矛盾, 从而解决了低速浅水河流流量(流速)精确测量

的问题, 是一种有着广泛应用前景的先进水文遥测仪器^[1]。本文通过时间选通方法来确定测试点的位置, 测量回波的多普勒频移来测定流速为重点对 BBADCP 的工作原理进行分析, 并采取等效基带法, 通过计算机仿真了 BBADCP 系统的工作原理。

2 BBADCP 工作原理分析

在自然河流中存在着大量悬浮微粒, 如泥粒、浮游生物等。当超声换能器向水中发射超声波时, 声

波遇到水中这些微粒会产生后向散射。ADCP 接收的回波的多普勒频移与散射体和换能器相对速度的关系是^[1]:

$$v = f_d \times \frac{c}{2f_c \cos(\theta)} \quad (1)$$

其中 f_d 是多普勒频移, c 是水中的声速, f_c 是发射的声波频率, θ 是相对速度与换能器轴线的夹角。

由于不同深度水域的回波信号返回时间不同, ADCP 通过时间选通接收回声信号来实现对不同深度水流的流速测量。例如, 发射脉冲后, τ 时刻选通接收信号, 这时测量距换能器 $c\tau/2$ 深处深度单元的流速。实际上 ADCP 发射的是脉冲信号, 接收到的回波却是由水中一团散射体后向散射形成的连续波信号。散射信号相互重叠, 对 ADCP 识别特定水层的回波信号而言, 增加了干扰。BBADCP 使用具有随机噪声统计特性的伪随机码对宽脉冲进行相位调制^[2]。接收回波信号时, 使用同样的伪随机码进行相干解调。利用伪随机码尖锐的相关峰可准确测定特定水层的流速。可推证如下^[3]:

设 $e(t)$ 是伪随机码二相相移键控信号, $c(t)$ 是伪随机码, $\cos(2\pi f_c t)$ 是载波, f_d 是多普勒频移。发射信号 $e(t) = c(t)\cos(2\pi f_c t)$, 等效于 $e(t) = \text{Re}[c(t)e^{j2\pi f_c t}]$; 回波信号为 $r(t) = \text{Re}[A_k \sum_{i=1}^n [A_i c(t - \tau_i)] e^{j2\pi(f_c + f_{di})(t - \tau_i)}]$; 设本地参考伪随机码波形为 $c(t - \tau_k)$, 当伪随机码长度 $P \gg 1$ 时, 经相关解调和滤波后的信号是 $r_b(t) = \text{Re}[A_k e^{j2\pi(f_c + f_{dk})(t - \tau_k)}]$, 正是从 $c\tau_k/2$ 深处返回的回波。

由于声波在水中的传播速度约为 1500m/s, 远大于水流的速度, 所以水速引起的多普勒频移非常小, 例如, 对 1MHz 的声波, 1m/s 的水速仅能引起约 0.13% 的微弱频率变化。因而不易直接测量信号功率谱的频移。BBADCP 采用脉冲——脉冲相关技术, 它连续发射数个同相位的相位编码脉冲, 然后接收回波, 测量前后相关脉冲的相位差, 大大提高了测量精度。对 BBADCP 从回波信号中提取速度信息的过程分析如下:

多普勒效应可看作是频率为多普勒频移的正弦信号对 $\cos(2\pi f_c t)$ 和 $\sin(2\pi f_c t)$ 两个正交载波进行幅度调制, 令 $\tau_{kt} = \varphi$, 为研究方便, 归一化处理后有:

$$r_b(t) = \cos(2\pi f_c t + \varphi)\cos(2\pi f_d t) - \sin(2\pi f_c t + \varphi)\sin(2\pi f_d t) \quad (2)$$

解调是调制的逆过程。在接收机下变频器(如图 1), 多普勒调制信号分别与 $\cos(2\pi f_c t)$ 和 \sin

$(2\pi f_c t)$ 互相干解调, 经低通滤波后, 解调器输出的两个分量可以用复数量表示为:

$$s(t) = \frac{1}{2} A'_k [\cos(2\pi f_c t + \varphi) - i\sin(2\pi f_c t + \varphi)] \quad (3)$$

设前一脉冲前端与后一脉冲前端相隔时间为 t_b , 则后一脉冲可表示为:

$$s'(t) = \frac{1}{2} A'_k [\cos(2\pi f_c t + 2\pi f_c t_b + \varphi) - i\sin(2\pi f_c t + 2\pi f_c t_b + \varphi)] \quad (4)$$

为求 f_d , 将 $s(t)$ 映射到 $s'(t)$ 上, 消去 φ :

$$s(t) * s'(t)^* = \cos(2\pi f_c t_b) + i\sin(2\pi f_c t_b)$$

因为这个相关运算是在 DSP 或 MCU 中完成的, $s(t)$ 和 $s'(t)$ 已经经过采样和模数转换后被离散化和量化, 求 f_d 的公式如下^[2]:

$$f_d = \frac{\tan^{-1}(I/Q)}{2\pi h T} \quad (5)$$

I 和 Q 分别对应前式中等号右边复数量的虚部和实部, T 是采样周期, h 等于 t_b/T 。

可见 $|f_d| \leq 1/(4hT) = 1/(4t_b)$ 。当 t_b 一定时, 可以测量的流速大小有范围限制, 超过限制范围会出现速度混叠现象。对应于 $|\tan^{-1}(I/Q)| = \pi/2$ 的速度称为最大模糊速度 V_{MAX} ^[4], BBADCP 的测量范围应该限制在最大模糊速度以内。

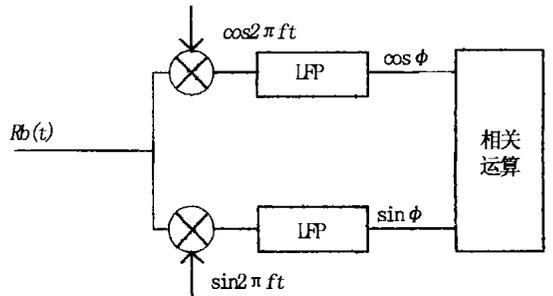


图 1 接收机下变频器

3 计算机仿真^[5-7]

由 Nyquist 抽样定理知, 在仿真中抽样频率至少应为信号带宽的两倍。由于 BBADCP 的工作频率比较高, 需要进行大量计算。为降低采样频率, 本文采用了等效复基带仿真的方法, 基带仿真只仿真复基带波形信号^[5]。考虑到换能器有一定带宽, 本文为模型设计了匹配滤波器。考虑研究的需要, 用有限个目标代表水中无数个散射体。一个单目标的模型见图 2 和图 3。

这个 BBADCP 模型的基本参数有: 载波频率 1MHz; 声波在水中的速度为 1500m/s; 伪随机码元

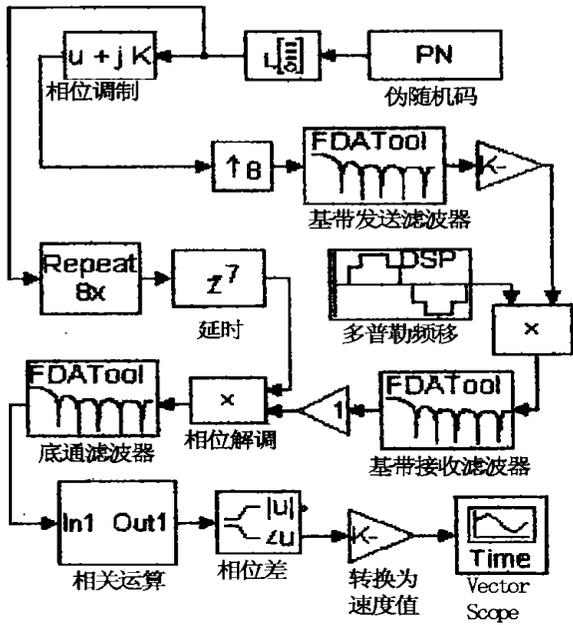


图 2 BBADCP 的 Simulink 模型

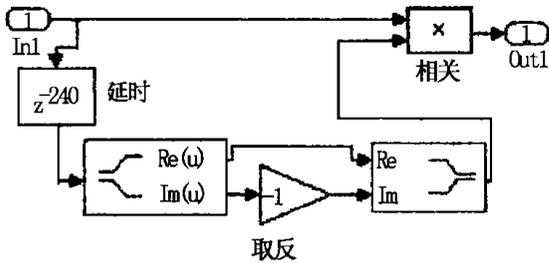


图 3 相关运算模块

数目为 15 个, 码元宽度为 $4 \mu\text{s}$; 双脉冲, 脉冲与脉冲间隔为一个脉冲长度。图 4 为发送滤波器发送的波形, 注意它是调制波的复包络。所用伪随机序列的自相关函数如图 5。

为了研究 BBADCP 测距测速的效果, 仿真时假设了两种情况: 一种情况下只有一个目标, 速度为 0.3m/s , 解扩与散射回来的波形匹配, 这种情况没有干扰; 第二种情况下有两个目标, 速度分别为 0.3m/s 和 0.4m/s , 速度为 0.4m/s 的目标散射回来的波形滞后 $20\mu\text{s}$, 干扰了前一个波形。将这两种情况

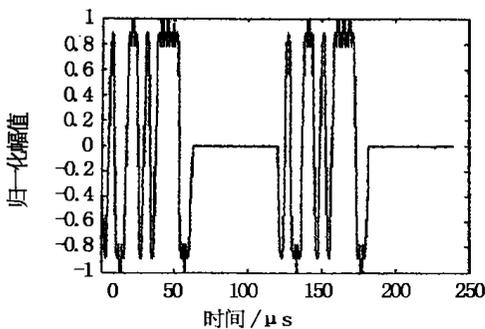


图 4 发送脉冲的复包络

下的仿真结果进行对比。图 6,7 是第一种情况: 处理结果刚好等于目标的速度值 0.3m/s 。图 8,9 是第二种情况: 由于干扰的存在, 测量结果产生了误差。调节目标速度, 当增加到超过最大模糊速度约 1.56m/s 时, 出现速度混叠现象。目标速度值同仿真结果的关系如图 10, 这是同本文的分析结果一致的。

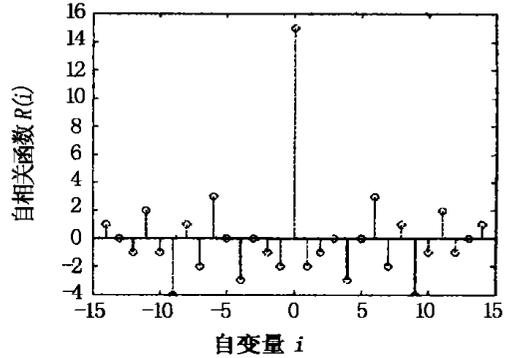


图 5 伪随机序列的自相关函数

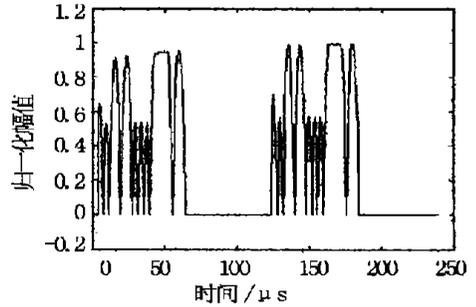


图 6 解扩后波形(情形一)

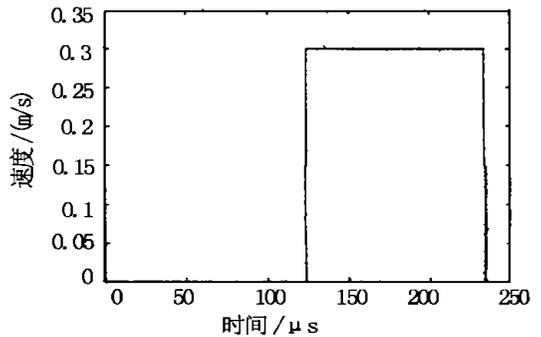


图 7 速度测量结果(情形一)

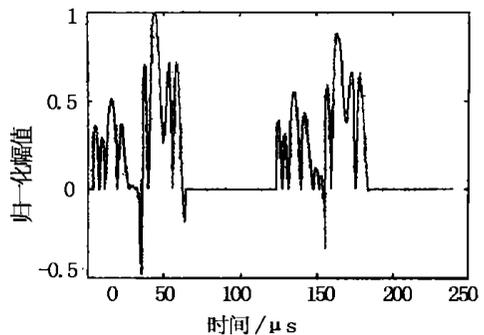


图 8 解扩后波形(情形二)

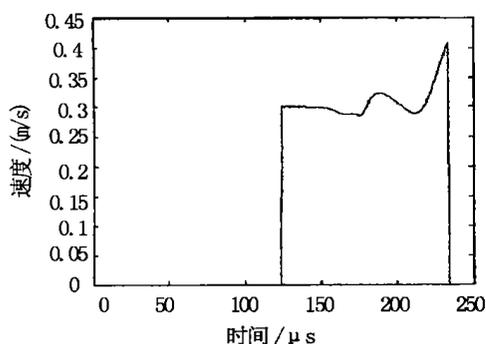


图9 速度测量结果(情形二)

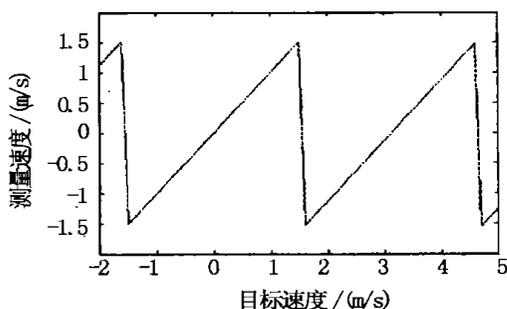


图10 测量速度曲线

4 结束语

(上接 108 页)

以上的区域却呈现分离知觉。同样在实验 1 中, $O_{\text{H-set}}$ 偏离量是 10ms 时, 应该呈现融和知觉, 但在 v_2 为 -0.03 以下或 0.04 以上的部分却呈现分离知觉。总之, 时间的偏离和谐波的偏移共同作用时, 比各自单独作用对分离知觉的影响要大。

4 讨论

根据听觉心理学的研究结果, 不同频率成分的时间关系和谐波关系是产生分离知觉的主要特征。本文通过听觉辨别实验定量地分析了它们对分离知觉的影响。

首先, 单从不同频率成分的时间关系来看, 两种频率成分的 $O_{\text{H-set}}$ 和 $O_{\text{F-set}}$ 的偏离是产生分离知觉的主要原因之一, 当偏离超过一定阈值以后, 基本上呈现分离知觉, 而且 $O_{\text{H-set}}$ 的偏离对分离知觉的影响比 $O_{\text{F-set}}$ 偏离的影响要大。在我们的实验中, 没有考虑 $O_{\text{H-set}}$ 和 $O_{\text{F-set}}$ 的倾斜对分离知觉的产生的影响, 而且只考虑了一种 $O_{\text{H-set}}$ 和 $O_{\text{F-set}}$ 的偏离方向, 这些因素对分离知觉的影响将成为我们今后的研究课题之一。同时, 谐波频率成分之间频率

计算机仿真的结果较好地验证了本文对 BBA-DCP 的分析研究。但这个模型尚未考虑散射信号的统计特性, 还不能进行 BBADCP 测量误差的分析, 不少问题有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Michael R Simpson. Discharge measurements using a broadband acoustic doppler current profiler [R]. Open-file report OF-1, California: United States: Geological Survey: 2001. 1-33.
- [2] Brumley. Broadband acoustic doppler current profiler [P]. United States Patent Number: 5,208,785, May 4, 1993
- [3] 沈允春. 扩谱技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995. 1-54, 284-288.
- [4] 张道平. 宽带多普勒测流仪信号特性分析 [J]. 海洋技术, 2001, 20(1): 78-82.
- [5] James Tsui 著, 杨小牛, 陆安南译. 宽带数字接收机 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002. 165-240.
- [6] 李建新, 刘乃安, 刘继平. 现代通信系统分析与仿真 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000. 86-115.
- [7] 鄢社锋, 马远良, 倪继平, 等. 一种海洋宽带噪声场数值模拟方法 [J]. 声学技术, 2003, 22(1): 30-32.

发生的偏移也是产生分离知觉的要因之一。频率的偏移量以及偏移的方向都是影响分离知觉的特征。各种分离知觉特征同时作用时, 比各自单独作用时对分离知觉影响要大。在一种特征作用下讨论另一种特征的作用阈值时, 往往要比单独作用时的阈值减小或降低许多。所以, 要实现实际环境下的知觉性声源分离系统, 必须研究各个特征量相互作用时产生的综合结果, 确定合理的分离规则, 这也是我们今后要着重研究的课题之一。另外在听觉辨别实验中, 实验环境、受试者的精神状态和判断标准等都会对实验结果产生影响。

参 考 文 献

- [1] Bregman A S. Auditory Scene Analysis [M]. USA: MIT Press, 1990
- [2] 吴锡扬, 张子喻, 李想, 赵力. 听觉场景分析的研究进展 [J]. 电路与系统学报, 2001, 6(2): 68-73.
- [3] Abe M, Ando S. Auditory scene analysis based on time-frequency integration of shared FM and AM [C]. ICASSP'98 (Vol. 4), 1998. 1580-1591.
- [4] XU J. Basic Investigation for Scene Analysis by Acoustic Signals [M]. Kyoto: Kyoto Institute of Technology, Japan, 2000.