流速剖面测量中的发射波形设计

陈允锋[1]，方 衍[2]
(1. 海军驻无锡地区军事代表室，江苏无锡 214061；
2. 南京世海声学科技有限公司，江苏南京 211199)

摘要：在水体剖面的流速测量过程中，深度分辨率和速度分辨率是重要的性能指标。为了满足日益提高的测量分辨率要求，文章从模糊度函数出发，设计组合波形作为流速剖面测量的发射信号，并根据其测速原理提出相应的信号处理方法，最后通过数值仿真验证该方法的有效性。理论分析和仿真结果表明：与脉宽相同的单频发射信号相比，组合波形具有更好的深度分辨率；与其中的子波形相比，组合波形在具有相同深度分辨率的前提下，获得了更好的速度分辨率和输出信噪比。

关键词：流速剖面；组合波形；径向流速；分辨率
中图分类号：TB559 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-3630(2016)-06-0522-05
DOI 编码：10.16300/j.cnki.1000-3630.2016.06.007

Velocity measurement based on combined waveform in acoustic Doppler current profiler

CHEN Yun-feng[1], FANG Yan[2]
(1. *Navy Military Representative Office in Wuxi Area*, *Wuxi* 214061, *Jiangsu*, *China*;
2. *Nanjing ShiHai Acoustic Technology Co., LTD*, *Nanjing* 211199, *Jiangsu*, *China*)

Abstract: In the measurement of current velocity profile, the depth resolution and velocity resolution are the important performance criteria. In order to satisfy the increasing requirement of high resolution measurement, this paper proposes taking the combined waveform as the emitted signal based on the ambiguous function, and further provides the corresponding signal processing method. Theoretical analysis and numerical simulation results show the effectiveness of the combined waveform, and it is seen that: 1. compared with the sinusoidal signal of the same length, the combined waveform provides much higher depth resolution; 2. compared with one of sub-waves, the combined waveform achieves better velocity resolution and better signal-noise ratio under the premise of providing the same depth resolution.

Key words: current velocity profile; combined waveform; radial velocity

0 引 言

海流流速和流量测量是水文测验的主要项目之一，不稳定流和多变复杂的海洋环境一直是水文测量所面临的难题。目前常用的测流设备有声学多普勒流速剖面仪，它是根据水声多普勒原理进行工作的测速声呐[1]。相比于以往的机械式或电磁式测量设备，声学多普勒流速剖面测量能直接获得流速剖面，具有不扰动流场、测验历时短、测速范围大等特点，可节省大量的人力和时间，目前被广泛用于海洋、河口的流场结构调查、流速测验等。

发射信号设计及其相应的信号处理技术是多普勒测流研究的一个重要方面。窄带为主的测流系统[2]以单频宽脉冲作为发射信号，测速深度可达几百米量级，但分层精度较低。使用单频窄脉冲信号会使测流的分层精度提高，但损失了测量精度和作用距离。为解决此问题，利用编码相干脉冲信号的宽带测流技术[3]兼顾了高分辨、高精度和大距离的要求，其具体的编码形式和参数选择是目前信号处理研究的一个重点问题。针对不同的发射信号形式，也会有不同的信号处理算法。单频宽脉冲利用脉冲之间的非相干性质进行测流[4-5]，即窄带测流方式；相干测流方式[6-7]则是对相干脉冲串信号进行收发和处理，能提高分层精度，但该方式作用距离较小；利用编码相干脉冲信号的宽带多普勒测流方式，主要基于时域相位思想的复自相关算法[8-9]，该方法快速灵活，但也存在相位模糊等问题。为了增加测流的实时性和鲁棒性，需进一步探讨更适合的算法[10-11]。

收稿日期：2016-09-12；**修回日期**：2016-11-20
作者简介：陈允锋(1976－)，男，江苏盐城人，工程师，研究方向为数字信号处理。
通讯作者：方衍，E-mail: tears232@163.com

深度分辨率和速度分辨率是流速剖面测量的重要性能指标。为了满足日益提高的测量分辨率的要求，本文将从模糊度函数出发，设计组合波形作为发射信号，并提出相应的信号处理方法，最后通过数值仿真验证该方法的有效性。

1　发射波形设计

1.1　流速剖面测量原理

对于换能器接收的回波信号，声学多普勒流速测量常采用分段处理的思想，将回波信号等间隔分段。根据多普勒原理，由每段信号计算得到一个确定的流速 v_i：

$$v_i=\frac{cF_i}{2f} \tag{1}$$

v_i 即为某一层的流速，式中 f 代表发射信号的中心频率，c 是水中的声速，F_i 代表该层的多普勒频移。

如图 1 所示，在 0 时刻换能器发射声波信号，T 时刻发射完成。任何时刻的接收回波都是深度范围大小为 $cT/2$ 的水体中散射体对回波散射作用的总和，并且不同时刻对应着不同的深度范围。故在接收端可以用时间窗对信号进行划分，时间窗的位置对应空间的深度位置，时间窗的长度决定测流单元的大小。

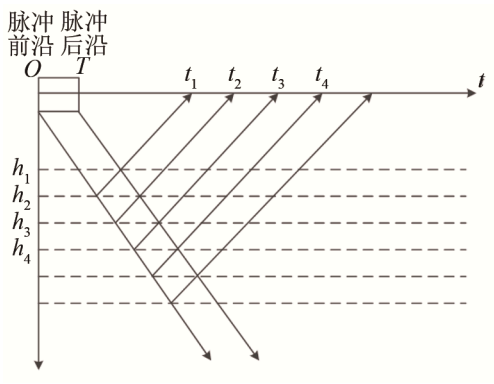


图 1　流速剖面测速原理

Fig.1　Measurement principle of current velocity profile

1.2　发射信号设计

模糊度函数[12]是重要的信号理论工具，在主动声呐波形设计方面应用广泛，用于分析波形的时间分辨率和频率分辨率：

$$\chi(\tau,\xi)=\int_{-\infty}^{\infty}s(t)s^*(t+\tau)e^{-\mathrm{j}2\pi\xi t}\mathrm{d}t \tag{2}$$

式(2)中：s 代表发射信号，τ 为信号的时间延迟，ξ 为信号的多普勒频移。由流速剖面测量原理可知，其发射信号需同时具备较好的深度分辨率(即时间分辨率)和速度分辨率(即频率分辨率)，对应于流速剖面测量的分层精度和测速精度。

深度分辨率是能将相邻深度的水体中的散射体在深度上区分开来的能力，即令公式(2)中 $\xi=0$ 进行分析：

$$\chi(\tau,0)=\int_{-\infty}^{\infty}s(t)s^*(t+\tau)\mathrm{d}t \tag{3}$$

深度分辨率取决于信号的频谱结构。因此为提高深度分辨率，发射信号在频域内要占有大的频带宽度，且信号频域幅度谱的形状决定了匹配滤波器输出响应中主瓣和旁瓣的大小。而当模糊函数式中的时延 $\tau=0$ 时，可得到目标的速度模糊度函数：

$$\chi(0,\xi)=\int_{-\infty}^{\infty}S(f-\xi)S^*(f)\mathrm{d}f \tag{4}$$

速度测量精度和分辨能力取决于发射信号的时域特性，它的性能提升要求信号在时域占有足够长的时间宽度。

对常用信号(CW、LFM)的模糊度函数进行分析，如图 2 所示，它们均具有刀刃型的模糊度函数。其频率轴 $f=0$ 切面可用于判断信号的深度分辨率，其时间轴 $t=0$ 切面可用于判断信号的速度分辨率。对模糊度函数的等高线进行分析，可见 CW 信号的等高线在频率轴较窄，具有较好的速度分辨率。LFM 信号的等高线可视为 CW 信号等高线的旋转，其深度分辨率与速度分辨率存在耦合，仅能得到联合值。

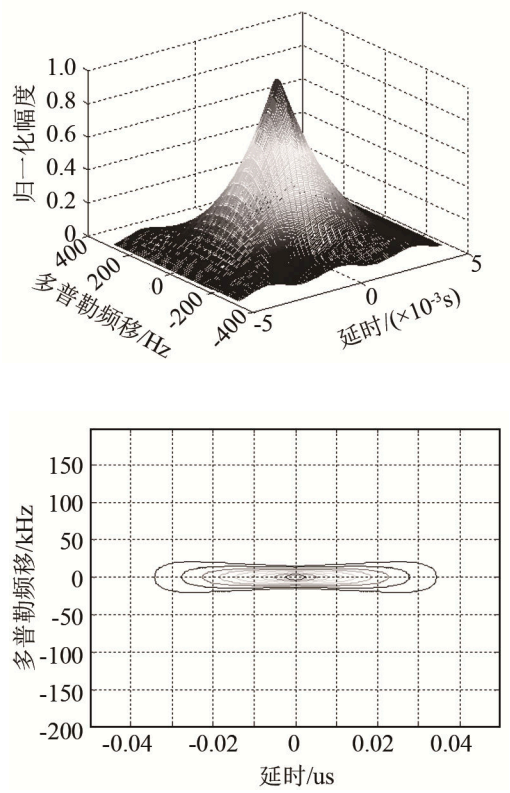
为同时获得较好的深度分辨率和速度分辨率，考虑使用由 N 个子波形组成的组合波形

$$s(t)=\sum_{n=0}^{N-1}\mathrm{rect}\left(\frac{t-nT_r}{T/N}\right)\sin(2\pi f_n t) \tag{5}$$

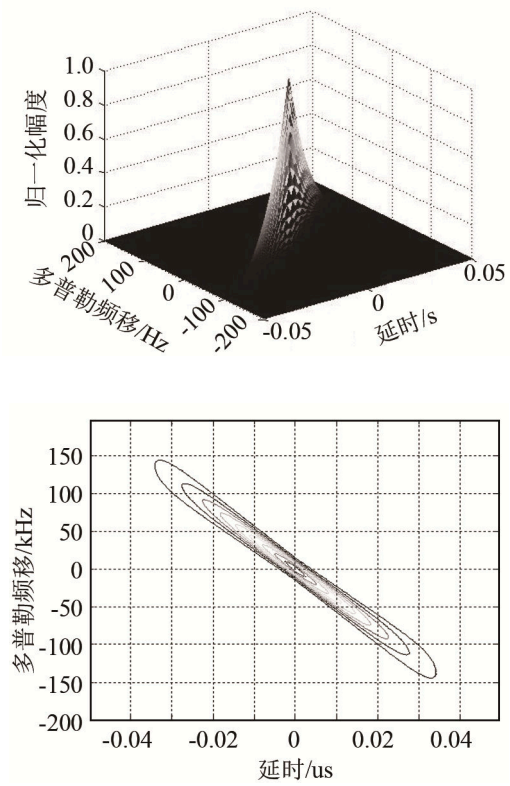
式(5)中，子波形宽度为 T_r，波形总宽度为 T，rect 代表时间宽度为 T_r 的矩形窗，$f_n=f_0+n\Delta f$ 是第 n 个子波形的频率，且 Δf 是每两个子波形间的频率间隔。当 N 从 1 至 3 变化时，逐一进行模糊度函数的分析，可见其深度分辨率逐渐提高，而速度分辨率基本不变，如图 3 所示。因此选择合适的组合波形个数 N，就可以在保证速度分辨率一定的条件下，获得所需的深度分辨率。

本文采用该组合波形作为流速剖面测量的发射信号，设计如下：

组合波形 $x=[x_1,x_2,...,x_N]$ 由 N 个子波形 x_i 组成，$n=0,1,\cdots,N-1$，各子波形 x_i 分别是宽度为 W、频率为 $f_n=f_0+n\Delta f$ 的正弦波，则 x 是长度为 NWf_s 的向量，其中 f_s 是发射信号的采样频率。在组合波形总宽度一定的情况下，N 取值越大，则 W 越小，流



(a) CW 信号的模糊度函数图和等高线图



(b) LFM 信号的模糊度函数图和等高线图

图 2 CW 信号和 LFM 信号的模糊度函数图和等高线图

Fig.2 Ambiguous diagrams and contour maps of CW signal (a) and LFM signal (b)

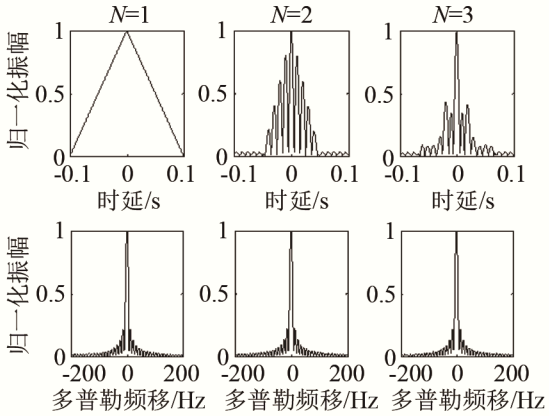


图 3 组合波形的时间分辨率与多普勒分辨率

Fig.3 Time resolution and Doppler resolution of the combined waveform

速剖面测量的深度分辨率越高；f_0 和 Δf 决定了组合波形的带宽 $f_0 \sim f_0+\Delta f(N-1)$，需根据流速剖面测量的发射和接收换能器的性能来选择，一般 $\Delta f / f_0$ 取 10^{-2} 量级，且 Δf 需大于待测环境中最大多普勒频移的 2 倍。

2 组合波形测速分辨率与测速方法

2.1 组合波形的深度分辨率

与波形宽度为 T 的单频信号相比，相同宽度的组合波形具有接近的速度分辨率。因此以下仅重点分析组合波形在流速剖面测量中的深度分辨率。

以组合波形 $x=[x_0, x_1, x_2, \cdots, x_{N-1}]$ 作为流速剖面测量的发射信号，如图 4 所示，其中各子波形的频率为 $f_n=f_0+n\Delta f$，$n=0, 1, \cdots, N-1$。测量深度为 h_1 的径向流速时，换能器接收的回波信号 $y=[y_0, y_1, y_2, \cdots, y_{N-1}]$ 由回波子波形 y_i 组成。测量深度为 h_2 的径向流速时，x_i 的回波 y_i 与测量 h_1 时 x_{i+1} 的回波 y_{i+1} 出现重合；测量其余各深度的径向流速时，均存在同样的重合现象。尽管如此，在对应于

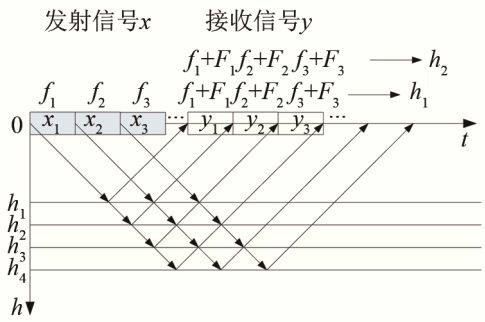


图 4 组合波形的深度分辨率示意图

Fig.4 Schematic diagram of depth resolution achieved by the combined waveform

待测深度的时间窗内对回波信号与发射信号进行差频操作，并经过截止频率为 $\Delta f/2$ 的低通滤波处理，相邻深度的回波重合并不会影响对各测量深度的多普勒频移的估计。因此采用组合波形作为流速剖面测量的发射信号，可在保证速度分辨率以及作用距离的基础上，获得更好的深度分辨率 $\Delta h=c\cdot W/2$，而对于传统的流速剖面测量而言，其深度分辨率约为 $\Delta h=c\cdot N\cdot W/2$。

2.2　回波信号处理方法

根据以上的分析，可获得基于组合波形的回波信号处理方法：

(1) 接收换能器与发射换能器采用相同的采样频率，则回波信号 y 中的子波形 y_i 与发射子波形 x_i 一一对应；

(2) 用时间窗对信号进行划分，其中时间窗宽度为组合波形的总宽度，步进为子波形的宽度，时间窗的位置对应水流剖面的深度位置；

(3) 将发射信号 x 与接收信号 y 进行差频操作，并通过截止频率为 $\Delta f/2$ 的低通滤波器；

(4) 对输出信号进行频谱分析，其峰值所对应的频率为 F，则径向流速可计算为 $v=cF/(2\bar{f})$，其中 f 是发射信号的平均频率。

3　仿真验证

本节将通过数值仿真，验证组合波形测速的有效性。设水流径向流速为 2.5 m/s，声速 c=1500 m/s，采样频率 f_s=400 kHz。设计组合波形 x 作为流速剖面测量的发射信号，其子波形个数 N=3，子波形宽度为 W=0.02 s，频率为 f_0=39 kHz，Δf=1 kHz，则各子波形的频率为 f_0=39 kHz，f_1=40 kHz，f_2=41 kHz。流速剖面测量的接收信号为 y，将发射信号 x 与接收信号 y 进行向量相乘，经过截止频率为 500 Hz 的低通滤波器，并做 FFT 得 $Z(f)$。结果如图 5 所示，峰值对应的频率 F=134 Hz，由此计算待测的径向流速 v=2.51 m/s，其中发射信号的平均频率 $\bar{f}$=40 kHz。

图 6 为相同条件下采用长正弦信号(波形宽度 W=0.06 s，频率 f=40 kHz)作为发射信号的 $Z(f)$ 结果，计算得到径向流速 v=2.51 m/s。对比可见，组合波形和长正弦信号具有相同的速度分辨率，但由 2.1 节的分析可知，前者的深度分辨率将是后者的 3 倍。

图 7 所示为相同条件下采用一个子波形(波形宽度 W=0.02 s，频率 f=40 kHz)作为发射信号的 $Z(f)$ 结果，计算得到径向流速 v=2.51 m/s。对比可见，在具有相同深度分辨率的情况下，组合波形获得了较高的速度分辨率和输出信噪比，进而扩大了作用范围。

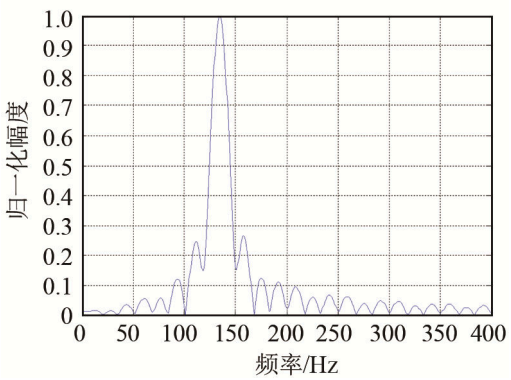


图 5　组合波形作为发射信号的频谱图

Fig.5　Spectrum of taking the combined waveform as emitting signal

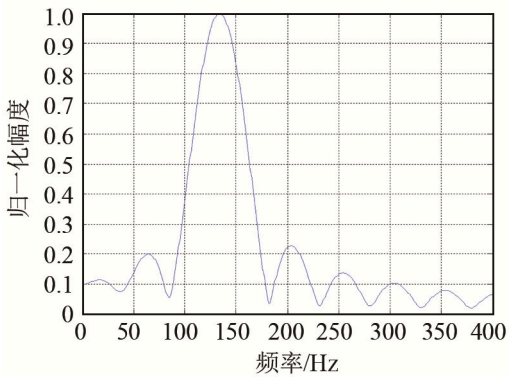


图 6　长正弦信号作为发射信号的频谱图

Fig.6　Spectrum of taking a long sine wave as emitting signal

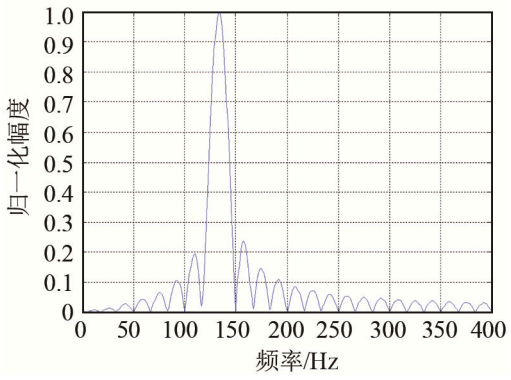


图 7　子波形作为发射信号的频谱图

Fig.7　Spectrum of taking one of sub-waveforms as emitting signal

4　结 论

为了满足日益提高的流速剖面测量的分辨率要求，本文设计组合波形(包含若干个正弦波信号)作为发射信号，并提出了相应的信号处理方法。理

论分析和数值仿真验证了该方法的有效性，获得了以下两点结论：与脉宽相同的单频发射信号相比，组合波形具有更好的深度分辨率；与其中的子波形相比，组合波形在具有相同深度分辨率的前提下，获得了更好的速度分辨率和输出信噪比。

参 考 文 献

[1] 刘德铸. 声学多普勒流速测量关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
LIU Dezhu. Research on key techniques of acoustic doppler velocity measurement[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010.

[2] Rowe F, Young J. An ocean current profiler using Doppler sonar [C]// Oceans'79, 1979: 292-297.

[3] Pinkel R, Smith J A. Repeat-sequence coding for improved precision of Doppler Sonar and sodar[J]. Journal of atmospheric and Oceanic Technology, 1992, **9**(2): 149-163.

[4] Hansen D. Oceanic incoherent Doppler sonar spectral analysis by conventional and finite-parameter modeling methods[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1986, **11**(1): 26-41.

[5] Theriault K B. Incoherent multibeam Doppler current profiler performance: Part II-Spatial response[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1986, **11**(1): 16-25.

[6] Zedel L, Cabrera R, Lohrmann A, et al. Single beam, high resolution pulse-to-pulse coherent Doppler profiler[C]//IEEE Fifth Working Conference on Current Measurement, 1995: 199-204.

[7] Haus B K, Lhermitte R M. Coherent sonar measurements of water motion and turbulence in a tidal inlet [C]//Oceans 96 MTS/IEEE Prospects for the Century Conference, 1996, **1**: 436-441.

[8] 孙星亮, 孙钢锋. 一种基于复相关技术的频率估计方法[J]. 电子科技, 2005(7): 36-39.
SUN Xingliang, SUN Gangfeng. A frequency estimate method based on complex-correlation[J]. Electronic Science and Technology, 2005(7): 36-39.

[9] 朱维庆, 王长红, 潘锋, 等. 宽带运动介质反向散射声信号的谱矩估计[J]. 声学学报, 1996, **21**(4): 731-738.
ZHU Weiqing, WANG Zhanghong, PAN Feng, et al. Spectral moment estimation of the inverse scattering acoustic signal of wide band moving medium[J]. Acta Acustica, 1996, **21**(4): 731-738.

[10] 范铮华. ADCP 瞬时径向流速测量技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
FÀN Zhenghua. Study on ADCP instantaneous radial velocity measurement technology[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.

[11] 徐祥, 方世良, 安良. 脉冲压缩方法在 ADCP 测底中的应用及实现[C]//中国声学学会第十一届青年学术会议, 2015.
XÚ Xiang , FĀNG Shìliang, AN Liang. Application and Realization of pulse compression method in ADCP measurement[C]// Conference of the young academic conference of the Acoustical Society of China, 2015.

[12] Joao M, Rendas D. Ambiguity in Radar and Sonar[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1998, **46(2)**: 294-305.