

声学海流计多普勒信号的采集与处理

付少雁 邱树松

(中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

收稿日期 1991年6月21日

关键词 声学海流计, 多普勒信号, 信号处理

提要 本文对超声波多普勒信号的噪音作了初步分析, 探讨了在背景噪音污染严重的情况下采集多普勒信号的方法, 并经实践验证了多普勒信号的采集与处理方案。

以多普勒原理工作的矢量海流计是声学海流计中具有代表性的一种, 它量程宽, 迟滞小, 无可动部件, 可长期工作于含泥沙杂质的环境中。能进行矢量测量特别适合在浮标及平台上使用, 由于背景噪音污染严重, 多普勒信号的采集问题一直未能很好解决。在研究水下机器人运动传感器过程中我们对此进行了研究, 取得了较满意的结果。

I. 多普勒海流计的工作原理

根据多普勒原理, 当波源和观察者作相对运动时, 观察者接收到的频率就会和波源频率不同。因此, 声波在水中传播时, 相对于探头随水而移动的那些悬浮于水中的小颗粒、小气泡也会使探头发出的频率改变, 并且随水中悬浮物运动速度的增加而增加, 即,

$$\Delta f = 2V_o f_0 \cos \theta / c \quad (1)$$

式中, f 为多普勒频移; V_c 为水的流速; f_0 为探头发出的超声波频率; C 为水中的声速; θ 为水流方向和接收声束间的夹角。因此, 当 f_0 和 C 一定时, 测出了多普勒频移也就测出了水的流速。

II. 影响多普勒信号采集的因素和解决措施

多普勒效应不仅有频率变化, 还有强度变化。当探头发出的等频等幅的发射频率 f_0 经运动的悬浮体反射回探头时, 探头接收到的载有多普勒频移的信号实际上是一个幅度与频率都随流速变化的信号。其增量的大小随流速而变, 增减由流向确定。

造成幅度变化的原因还有水中悬浮体对声波的吸收和散射。这一过程是随机的, 它对信号幅度的调制将作为白噪音迭加在信号上。经聚焦处理后, 虽然超声波的入射波和反射波的指向性可做得很好, 波束很窄, 使处于入射波和反射波交叉区的水体很小, 但在水流动时, 尤其在有涡动时, 很难保证其各部分的运动完全一致, 散射水体的随机抖动将造成各散射部分的多普勒频移略有差异, 使回波不再是单一的多普勒谱线, 而是连续的多普勒频带。其峰值虽仍在平均流速所确定的多普勒回波处, 但这种多普勒调制现象使波形进一步劣化。

由于测量区有空间, 水流方向和接收声束间存有夹角(图1), 对于S点和N点, 若散射体是沿交会区的中线向接收点以速度 V_c 移动, 其水流方向与接收声束间的夹角 θ 就会不同, 其多普勒信号将由(1)式扩展为:

$$\Delta f' = 4f_0 V_c \left(\sin \theta \sin \frac{\alpha}{2} \right) / C \quad (2)$$

若测量区内流速 V 并非沿交会区的中线向接收点运动, 而含有垂直分量时, 则(2)式应为:

$$\Delta f'' = 4f_0 \left[V_c \left(\sin \theta \sin \frac{\alpha}{2} \right) + V_p \left(\cos \theta \cos \frac{\alpha}{2} \right) \right] / C \quad (3)$$

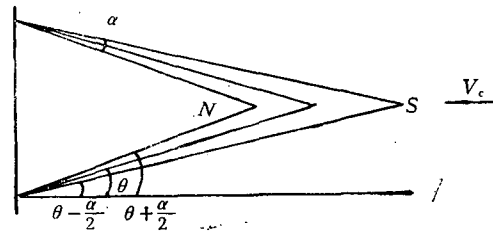


图1 两束声波交会示意图
Fig. 1 Geometric figure of points of intersection of two acoustic signals

对于水平分量 V_c , 与垂直分量有关的第二项 $V_p \left(\cos \theta \cos \frac{\alpha}{2} \right)$ 将被视为噪音, 但幅度远小于 V_c 。

噪音还来自海洋自然噪音, 运动中的舰船产生的噪声以及生物噪声和生物对流场的破坏等。式(3)前两项属于宽带噪音, 后两项属脉冲噪音。

为避免发射波激起水流改变流场影响测量的真实性, 发射功率是被严格控制的。这就限制了发射信号强度, 不利于提高接收信噪比。实用中接收端的信号幅度只有几个到几十个 μV , 由于发射频率 f_0 为 7MHz, 因此对高频小信号前置放大器而言电子噪音也是不可忽视的因素。这主要来自电子元器件的热运动造成的白噪音、雷电、电机、电弧等造成的脉冲噪音, 线路前后级间的耦合干扰以及电台、电视台等信号干扰造成的宽带随机噪音等。

在噪音的干扰下, 接收到的多普勒信号波形严重畸变, 有时甚至中断。在水质较清, 流速较小时信号脱落更严重。其波形见图2, 这是经过前置高放、混频和中放后的混有噪音的信号。

从上面的分析可看出, 噪音以多种方式从多个环节进入系统迭加在信号上, 有的与信号频谱相重叠; 有的是与信号完全无关的随机信号, 也有的与信号存有程度不等的相关性。

从公式(1)可看出, 在发射频率 f_0 , 声速 C 及角 θ 一定的情况下, 流速仅与多普勒频移

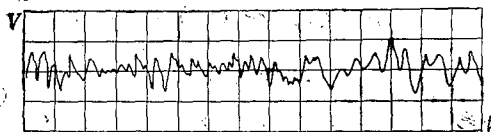


图2 接收到的多普勒信号
Fig. 2 Dopplar signals received

有关,也就是说对流速测量而言可不考虑多普勒信号的幅值与相位。

由公式(3)及图2可看出,对波形畸变的多普勒信号,只需测出那些功率最大的、能反映平均流速的频率的基波的周期就可测出流速。

由于所用的发射频率使对应于 $10 \sim 4000$ mm/s 时的多普勒频移为 $0.1 \sim 40$ kHz,所以对多普勒信号的脱落部分可暂不作处理,能测时再测。这样即使信噪比十分差,在时间域内波形严重畸变和脱落比率高达80%以上,用周期法测量,仍可保证仪器有小于1s的动态响应,而这对于流速测量已足够了。

基于上述分析我们采用了如下措施:

(1) 首先对中放后的多普勒信号通过施密特触发器做过零检测后整形为方波。触发器的阈值电平可调,以提高信噪比。

(2) 利用自相关分析提取多普勒频移的周期信号。通过软件控制,不断地检测相邻的每一组周期量,并做如下判定:

$$\left| \frac{t_i - t_{i+1}}{t_i} \right| < \Delta$$

则判为有效信号,即 t_i 和 t_{i+1} 为反映流速的多普勒频移的周期,存贮并参与下一步运算,否则重采。

这样考虑的依据是在数 ms 的瞬间内流速不可能突变,而且流速越大采样周期也越短,流速达 4000 mm/s 时采样周期仅 $25 \mu\text{s}$ 。只有干扰才能使相邻的两个周期有突变。

噪音具有的随机性决定了它在时间域内相关性很差,相互间不仅频率相似性差,幅度变化也很大。信号总有从噪音中浮现出来的机会。

我们设计的系统只要连续出现2个基波分量未失真的周期就可捕捉到。

(3) 采集到的有效信号每3个分为一组,取其中间值。选中的信号再做第2轮同样选择。这样做对克服脉冲干扰十分有效,其收敛性优于算术平均。尤其在突发性干扰出现频繁、采样量较少时更是如此。这是利用了流速信号的相关性,在误差服从正态分布时对测量值进行优选。

(4) 对流速进行多次算术平均,求最佳值。平均次数是键入的,可根据需要设定。

由于采取了上述措施,保证了信号采集的质量,使我们为国家“七五攻关”项目水下机器人研制的运动传感器达到了 3.5 mm/s 的分辨率和在 $10 \sim 3000$ mm/s 的量程内优于1%的精度。

III. 工作程序

微处理器选用8位的80C39,采用了双字节无符号运算。为便于处理,对公式(1)做了如下整理:

$$\begin{aligned} V_0 &= \frac{C}{2f_0 \cos \theta} \cdot \Delta f \\ &= \frac{C}{2f_0 \cos \theta} \cdot \frac{1}{T} \\ &= k \frac{2}{t_1 + t_2} \end{aligned} \quad (5)$$

式中, T 为多普勒频移周期; t_1, t_2 为任意一组两个相邻周期的量化值。

$$k = \frac{C}{2f_0 \cos \theta} \quad (6)$$

K 为系数。因声速是盐度、温度和压力的函数,所以当所用单位为 Hz, mm/s, $^{\circ}\text{C}$ 时, K 的取值范围为:

$$0.01 < K < 0.110$$

在发射频率 $f_0 = 7$ MHz, 夹角 $\theta = 10^{\circ}$ 时,对应流速 $10 \sim 4000$ mm/s 的多普勒频移为 $0.1 \sim 40$ kHz, 即 t_1, t_2 的范围为:

$$25 \mu\text{s} \leq t_1, (t_2) \leq 10^4 \mu\text{s}$$

若 t_1, t_2 的量化充填频率为 2 MHz, 则

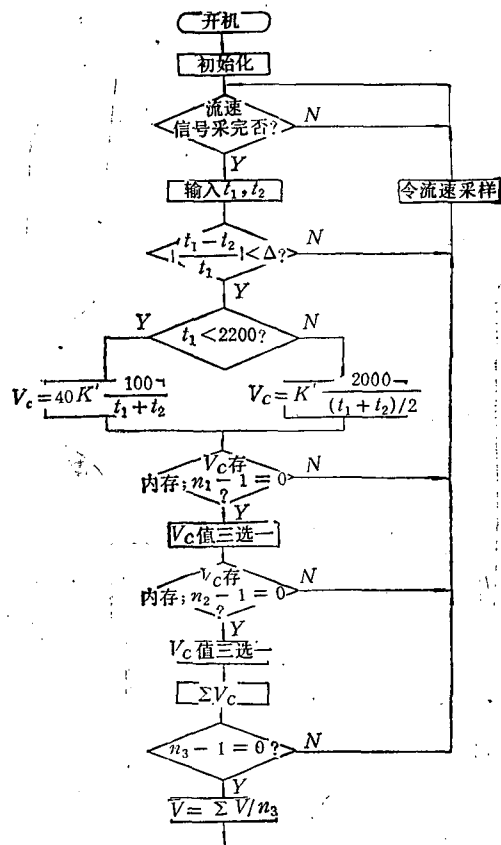


图3 程序流程

Fig. 3 Programming flowchart

$$V_c = (101 \sim 110) \frac{4000}{t_1 + t_2} = K' \frac{4000}{t_1 + t_2} \quad (7)$$

从字长,分辨率及所用子程序的特点考虑,运算分两部分进行。当 $t_1 < 2200$ 时运算采用下式:

$$V_c = 40K' \frac{100}{t_1 + t_2} \quad (8)$$

因此,降低了高流速时的量化误差,且采用商小于1的除法子程序,可处理的最大流速为4000 mm/s。

当 $t_1 > 2200$ 时,

$$V_c = K' \frac{2000}{(t_1 + t_2)/2} \quad (9)$$

可处理的最低流速约3.5 mm/s。

程序流程见图3。

参考文献

- [1] 孔德裕等, 1982。声学多普勒原理在测量海流中的某些问题。海洋与湖沼 13(5): 24。
- [2] 沈兰荪, 1990。智能仪器与信号处理。科学出版社, 1~28。
- [3] 高远等, 1983。信号数字处理技术及其应用。黑龙江科学技术出版社, 1~50。

THE DOPPLER SIGNAL ACQUISITION AND PROCESSING OF AN ACOUSTIC CURRENT METER

Fu Shaoyan and Qiu Shusong

(Institute of Oceanology, Academia Sinica, Qingdao 266071)

Received: Jun. 21, 1991

Key Words: Acoustic current meter, Doppler signal, Signal processing

Abstract

This paper deals with the primary analysis of the noise which affects Doppler signal measurements and acquisition method of Doppler signal in the condition of a serious noise pollution background. The measurements have proved that the scheme of the Doppler signal acquisition and process is correct.