



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105021843 A

(43) 申请公布日 2015. 11. 04

(21) 申请号 201510452819. 6

(22) 申请日 2015. 07. 28

(71) 申请人 江苏中海达海洋信息技术有限公司

地址 210032 江苏省南京市高新区惠达路六
号北斗大厦 16 楼

(72) 发明人 仇付鹏 文冷冷 罗宇

(51) Int. Cl.

G01P 5/24(2006. 01)

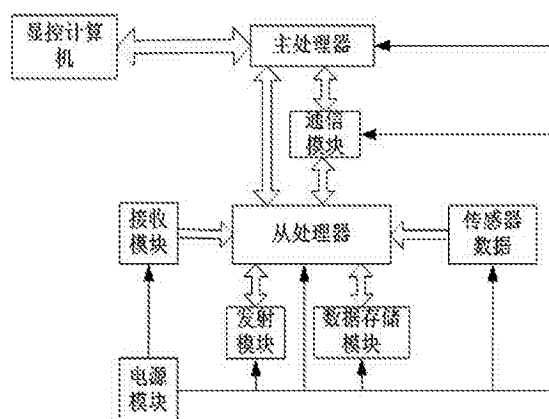
权利要求书2页 说明书7页 附图5页

(54) 发明名称

600kHz 宽带声学多普勒流速剖面仪及其实现
方法

(57) 摘要

本发明公开了一种 600kHz 宽带声学多普勒流速剖面仪及其实现方法,包括发射模块,接收模块,数据存储模块,显控计算机,传感器模块,电源模块,以及互连的主、从处理器。宽带声学多普勒流速剖面仪 BBADCP 采用 M 序列编码的正弦信号作为发射信号,有较大的距离-速度精度,较大的探测距离和较小的速度平均时间;采用复相关测频与时延测频相结合的测频方法,即得到了相关测频的高精度,又解决了相关测频的速度模糊问题;通过温度和压力等数据实时计算声速,实时进行声速补偿,提高了测流的精度。



1. 一种 600kHz 宽带声学多普勒流速剖面仪,其特征在于:包括发射模块,接收模块,数据存储模块,显控计算机,传感器模块,电源模块,以及互连的主、从处理器;

主处理器与显控计算机连接,通过显控计算机与上位机通信、解析上位机配置参数,下发控制命令给从处理器;以及接收从处理器上传的解调后的信号,进行速度解算、合成,将结果通过显控计算机显示;

从处理器作为声信号的前期处理单元,分别与发射模块,接收模块,数据存储模块以及传感器模块连接,控制以上各模块工作,并与主处理器进行数据通信,将解调后数据上传给主处理器;

发射模块用于发射由 M 序列编码的 600kHz 正弦宽带声信号;

接收模块用于接收四通道的回波声信号,并发送给从处理器;

显控计算机用于显示数据处理结果和上位机的配置参数;

数据存储模块用于存储从处理器产生的发射数据、中间数据、及原始数据;

传感器模块能为从处理器提供传感器数据用于声速补偿以及速度修正;

电源模块与上述各模块连接,提供各模块工作所需的电源。

2. 根据权利要求 1 所述的一种 600kHz 宽带声学多普勒流速剖面仪,其特征在于:所述主处理器包括依次连接的复相关运算单元、速度合成单元和声速补偿单元,以及包括与显控计算机、从处理器模块连接的数据端口。

3. 根据权利要求 2 所述的一种 600kHz 宽带声学多普勒流速剖面仪,其特征在于:所述复相关运算单元采用脉冲对测频与时延测频相结合的方法进行多普勒频偏运算。

4. 根据权利要求 3 所述的一种 600kHz 宽带声学多普勒流速剖面仪,其特征在于:所述脉冲对测频与时延测频相结合的方法具体包括以下步骤:

(1)由主处理器将解调后的信号合成复信号,并利用该复信号的前 11 个周期和后 11 个周期做互相关,求出相位差;

(2)由相位差求出存在速度模糊的多普勒频偏;

(3)利用复信号的自相关函数得出多普勒频偏的范围,去除速度模糊,求得准确的多普勒频偏。

5. 根据权利要求 2 所述的一种 600kHz 宽带声学多普勒流速剖面仪,其特征在于:所述声速补偿单元实时进行声速补偿。

6. 根据权利要求 1 所述的一种 600kHz 宽带声学多普勒流速剖面仪,其特征在于:所述从处理器包括依次连接的正交解调单元和复降采样滤波单元,其中正交解调单元与接收模块连接,复降采样滤波单元与主处理器连接;还包括与发射模块、数据存储模块、传感器模块连接的数据端口。

7. 根据权利要求 1-6 任一所述的一种 600kHz 宽带声学多普勒流速剖面仪,其特征在于:所述主、从处理器之间还设有通信模块,用于实现主、从处理器之间的高速数据通信,该通信模块分别与主、从处理器的 RS232 协议通信、UPP 协议通信单元连接。

8. 根据权利要求 1 所述的一种 600kHz 宽带声学多普勒流速剖面仪,其特征在于:所述发射声信号为 3 阶、码元数为 7 位、编码重复次数为 12 的声信号,其中每个码元宽度包含 4 个载波周期长度。

9. 根据权利要求 1 所述的一种 600kHz 宽带声学多普勒流速剖面仪,其特征在于:所述

传感器模块包括压力传感器和温度传感器。

10. 一种 600kHz 宽带声学多普勒流速剖面仪的实现方法, 其特征在于, 包括以下步骤:

(1) 主处理器与显控计算机通信, 解析上位机的配置参数并下发指令给从处理器, 启动从处理器工作;

(2) 从处理器控制发射模块发射由 M 序列编码的 600kHz 正弦宽带声信号, 控制接收模块接收四通道回波信号并发送给从处理器, 由从处理器对接收的信号进行解调; 控制传感器模块接收传感器数据; 最后将解调后的信号及传感器数据通过通信模块发送给主处理器; 从处理器工作期间由其驱动数据存储模块存储中间数据、发射数据以及原始数据; 期间若从处理器未接收到回波信号, 则返回上述步骤(1)继续进行;

(3) 主处理器对接收的数据进行速度解算、合成, 并将结果通过显控计算机显示; 期间若未得到合成结果, 则返回上述步骤(2)继续进行。

600kHz 宽带声学多普勒流速剖面仪及其实现方法

技术领域

[0001] 本发明属于深海探测技术领域,涉及用于海洋流速测量的多普勒流速剖面仪,具体指一种 600kHz 宽带声学多普勒流速剖面仪及其实现方法。

背景技术

[0002] 海流计是传统的海洋流速测量仪器,然而其在广泛的应用中所凸显出的缺点也是显而易见的,即流速计一般多为接触式的且只能测量安置位置处的海流流速,因此使用海流计测量一片海域的海水流速时,则需要耗费大量的时间及精力。多普勒流速剖面仪 ADCP 是一种根据多普勒效应原理测量载体相对于底 / 流的测速声呐仪器,因其具有对海水流场不产生任何扰动,不存在机械惯性,能够真实反应海水流场的情况等优势而被广泛应用;包括窄带多普勒流速剖面仪 NBADCP 和宽带多普勒流速剖面仪 BBADCP。其中,窄带多普勒流速剖面仪 NBADCP 发射声波为一个正弦填充的脉冲,采用自协方差法测量回波信号的频偏。而 NBADCP 存在的局限性有:首先,单次测量值的精度不高,为了达到较高的测量精度,要长时间多次测量后进行平均运算;其次,NBADCP 深度单元的层厚要选取较大值,否则测量该深度上的速度估计方差过大,不准确;最后,NBADCP 不具备观测小规模海流在短时间内变化的能力,使用范围受限,不能广泛应用。

发明内容

[0003] 针对上述技术问题,本发明提供了一种 600kHz 宽带声学多普勒流速剖面仪及其实现方法,由 M 序列编码的宽带声信号作为发射信号,采用脉冲对测频与时延测频相结合的测频方法,并实时进行声补偿,能有效达到高精度测量的目的。

[0004] 本发明通过以下技术方案来实现上述目的:

[0005] 一种 600kHz 宽带声学多普勒流速剖面仪,包括发射模块,接收模块,数据存储模块,显控计算机,传感器模块,电源模块,以及互连的主、从处理器;

[0006] 主处理器与显控计算机连接,通过显控计算机与上位机通信、解析上位机配置参数,下发控制命令给从处理器;以及接收从处理器上传的解调后的信号,进行速度解算、合成,将结果通过显控计算机显示;

[0007] 从处理器作为声信号的前期处理单元,分别与发射模块,接收模块,数据存储模块以及传感器模块连接,控制以上各模块工作,并与主处理器进行数据通信,将解调后数据上传给主处理器;

[0008] 发射模块用于发射由 M 序列编码的 600kHz 正弦宽带声信号;

[0009] 接收模块用于接收四通道的回波声信号,并发送给从处理器;

[0010] 显控计算机用于显示数据处理结果和上位机的配置参数;

[0011] 数据存储模块用于存储从处理器产生的发射数据、中间数据、及原始数据;

[0012] 传感器模块能为从处理器提供传感器数据用于声速补偿以及速度修正;

[0013] 电源模块与上述各模块连接,提供各模块工作所需的电源。

[0014] 进一步地,所述主处理器包括依次连接的复相关运算单元、速度合成单元和声速补偿单元,以及包括与显控计算机、从处理器模块连接的数据端口。

[0015] 作为本发明的优化方案,所述复相关运算单元采用脉冲对测频与时延测频相结合的方法进行多普勒频偏运算;

[0016] 进一步地,所述脉冲对测频与时延测频相结合的方法具体包括以下步骤:

[0017] (1) 由主处理器将解调后的信号合成复信号,并利用该复信号的前 11 个周期和后 11 个周期做互相关,求出相位差;

[0018] (2) 由相位差求出存在速度模糊的多普勒频偏;

[0019] (3) 利用复信号的自相关函数得出多普勒频偏的范围,去除速度模糊,求得准确的多普勒频偏。

[0020] 作为本发明的优化方案,所述声速补偿单元实时进行声速补偿。

[0021] 进一步地,所述从处理器包括依次连接的正交解调单元和复降采样滤波单元,其中正交解调单元与接收模块连接,复降采样滤波单元与主处理器连接;还包括与发射模块、数据存储模块、传感器模块连接的数据端口。

[0022] 作为本发明的优化方案,所述主、从处理器之间还设有通信模块,用于实现主、从处理器之间的高速数据通信,该通信模块分别与主、从处理器的 RS232 协议通信、UPP 协议通信单元连接。

[0023] 进一步地,所述发射声信号为 3 阶、码元数为 7 位、编码重复次数为 12 的声信号,其中每个码元宽度包含 4 个信号周期。8、根据权利要求 1 所述的一种 600kHz 宽带声学多普勒流速剖面仪,其特征在于:所述传感器模块包括压力传感器和温度传感器。

[0024] 一种 600kHz 宽带声学多普勒流速剖面仪的实现方法,其特征在于,包括以下步骤:

[0025] (1) 主处理器与显控计算机通信,解析上位机的配置参数并下发指令给从处理器,启动从处理器工作;

[0026] (2) 从处理器控制发射模块发射由 M 序列编码的 600kHz 正弦宽带声信号,控制接收模块接收四通道回波信号并发送给从处理器,由从处理器对接收的信号进行解调;控制传感器模块接收传感器数据;最后将解调后的信号及传感器数据通过通信模块发送给主处理器;从处理器工作期间由其驱动数据存储模块存储中间数据、发射数据以及原始数据;期间若从处理器未接收到回波信号,则返回上述步骤 (1) 继续进行;

[0027] (3) 主处理器对接收的数据进行速度解算、合成,并将结果通过显控计算机显示;期间若未得到合成结果,则返回上述步骤 (2) 继续进行。

[0028] 本发明的有益效果是:

[0029] (1) 宽带声学多普勒流速剖面仪 (BBADCP) 采用 M 序列编码的正弦信号作为发射信号,有较大的距离-速度精度,较大的探测距离和较小的速度平均时间;

[0030] (2) 采用复相关测频与时延测频相结合的测频方法,即得到了相关测频的高精度,又解决了相关测频的速度模糊问题;

[0031] (3) 通过温度和压力等数据实时计算声速,实时进行声速补偿,提高了测流的精度。

附图说明

- [0032] 图 1 为本发明的系统结构框图；
- [0033] 图 2 为本发明中主处理器的结构框图；
- [0034] 图 3 为本发明中从处理器的结构框图；
- [0035] 图 4 为本发明的系统工作流程框图；
- [0036] 图 5 为实施例中正交解调信号的原理框图；
- [0037] 图 6 为实施例中脉冲对选取示意图；
- [0038] 图 7 为实施例中 ADCP 四波束在基阵坐标系下的结构示意图；
- [0039] 图 8 为实施例中 ADCP 四波束在基阵坐标系下 XOY 平面的投影示意图。

具体实施方式

[0040] 如图 1 所示,一种 600kHz 宽带声学多普勒流速剖面仪,包括发射模块,接收模块,数据存储模块,显控计算机,传感器模块,电源模块,以及互连的主、从处理器；

[0041] 主处理器与显控计算机连接,通过显控计算机与上位机通信、解析上位机配置命令,下发控制命令给从处理器；以及接收从处理器上传的解调后的信号,进行速度解算、合成,将结果通过显控计算机显示；

[0042] 从处理器作为声信号的前期处理单元,分别与发射模块,接收模块,数据存储模块以及传感器模块连接,控制以上各模块工作,并与主处理器进行数据通信,将解调后数据上传给主处理器；

[0043] 发射模块用于发射由 M 序列编码的 600kHz 正弦宽带声信号；发射声信号为 3 阶、码元数为 7 位、编码重复次数为 12 的声信号,其中每个码元宽度包含 4 个信号周期。

[0044] 接收模块用于接收四通道的回波声信号,并发送给从处理器；

[0045] 显控计算机用于显示数据处理结果和上位机的配置参数；

[0046] 数据存储模块用于存储从处理器产生的发射数据、中间数据、及原始数据；

[0047] 传感器模块包括压力传感器和温度传感器,能为从处理器提供姿态仪、罗经、GPS、温度、压力等传感器数据用于声速补偿以及速度修正；

[0048] 电源模块与上述各模块连接,提供各模块工作所需的电源。

[0049] 如图 2 所示,所述主处理器包括依次连接的复相关运算单元、速度合成单元和声速补偿单元,以及包括与显控计算机、从处理器模块连接的数据端口；声速补偿单元实时进行声速补偿。

[0050] 所述复相关运算单元采用脉冲对测频与时延测频相结合的方法进行多普勒频偏运算；脉冲对测频与时延测频相结合的方法具体包括以下步骤：

[0051] (1) 由主处理器将解调后的信号合成复信号,并利用该复信号的前 11 个周期和后 11 个周期做互相关,求出相位差；

[0052] (2) 由相位差求出存在速度模糊的多普勒频偏；

[0053] (3) 利用复信号的自相关函数得出多普勒频偏的范围,去除速度模糊,求得准确的多普勒频偏。

[0054] 如图 3 所示,所述从处理器包括依次连接的正交解调单元和复降采样滤波单元,其中正交解调单元与接收模块连接,复降采样滤波单元与主处理器连接；还包括与发射模

块、数据存储模块、传感器模块连接的数据端口。

[0055] 作为本发明的优化方案,所述主、从处理器之间还设有通信模块,用于实现主、从处理器之间的高速数据通信,该通信模块分别与主、从处理器的 RS232 协议通信、UPP 协议通信单元连接。

[0056] 如图 4 所示,一种 600kHz 宽带声学多普勒流速剖面仪的实现方法具体包括以下步骤:

[0057] (1) 主处理器与显控计算机通信,解析上位机的配置参数并下发指令给从处理器,启动从处理器工作;

[0058] (2) 从处理器控制发射模块发射由 M 序列编码的 600kHz 正弦宽带声信号,控制接收模块接收四通道回波信号并发送给从处理器,由从处理器对接收的信号进行解调;控制传感器模块接收传感器数据;最后将解调后的信号及传感器数据通过通信模块发送给主处理器;从处理器工作期间由其驱动数据存储模块存储中间数据、存储发射数据以及原始数据;期间若从处理器未接收到回波信号,则返回上述步骤 (1) 继续进行;

[0059] (3) 主处理器对接收的数据进行速度解算、合成,并将结果通过显控计算机显示;期间若未得到合成结果,则返回上述步骤 (2) 继续进行。

[0060] 下面将结合附图及具体实施例对本发明及其效果作进一步阐述,以下实施例仅是示例性的,并不会局限本发明,应当指出对于本领域的技术人员来说,在本发明所提供的技术启示下,所做出的其它等同变型和改进,均应视为本发明的保护范围。

[0061] (1) 由 M 序列编码发射信号

[0062] 选取 M 序列作为二进制相位伪随机编码信号;当 M 序列的阶数 r,选取 r 次本原多项式为初始状态,则一个周期为 T 的二进制相位编码信号数学表达式为:

$$[0063] \quad f(t) = A \sum_{n=0}^{N-1} \text{rect}\left(\frac{t-n \times \Delta t}{\Delta t}\right) e^{j\Phi_n} \quad (1)$$

[0064] 其中:A 为信号的幅度;

[0065] Δt 为一个码元的宽度;

[0066] $N = 2^r - 1$ 为一个周期内码元的个数;

[0067] 当 M 序列值为 0 时, $\Phi_n = \pi$, 当 M 序列值为 1 时, $\Phi_n = 0$;

[0068] r 为 M 序列的阶数;

[0069] 则 M 序列编码发射信号的形式为:

$$[0070] \quad s(t) = f(t) \times \cos(2\pi f_0 t) \quad (2)$$

[0071] 式中, $f(t)$ 是 M 序列编码信号数学表达式,

[0072] 中心频率 $f_0 = 600\text{kHz}$ 。

[0073] (2) 从处理器控制接收模块接收声信号,并通过正交解调单元对声信号进行正交解调。

[0074] M 序列编码发射信号的底回波信号形式表示为:

$$[0075] \quad r(t) = \sum_{n=1}^m A_n \times f(t/a) \times \cos[2\pi f_0 t/a + 2\pi f_0 \Delta \tau + \Psi_n] \quad (3)$$

[0076] 式中: A_n 为散射体的附加幅度,采用的是高斯分布的随机数;

[0077] $f(t/a)$ 是压缩或者拉伸后的 M 序列编码信号数学表达式；

[0078] $a = \frac{c+v}{c-v}$ 是脉冲压缩系数；

[0079] $\Delta\tau = \frac{2r_n}{c}$ 是回波信号时延, r_n 是散射体到换能器的距离；

[0080] Ψ_n 是散射体的附加相位, 采用 $(0, 2\pi)$ 的均匀分布的随机信号；

[0081] m 为有贡献的散射体的数目。

[0082] 如图 5 所示为回波信号解调的原理图, 先用相互正交的两路信号分别与回波信号做乘法运算, 得到两路混频信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 。

$$\begin{aligned} x(t) &= f(t/a) \times \sin(2\pi f_0 t) \\ [0083] \quad &= \frac{1}{2} A_n [\sin(2\pi(f_0 + f_d)t + \Psi_n) - \sin(2\pi f_d t + \Psi_n)] \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} y(t) &= f(t/a) \times \cos(2\pi f_0 t) \\ [0084] \quad &= \frac{1}{2} A_n [\cos(2\pi(f_0 + f_d)t + \Psi_n) + \cos(2\pi f_d t + \Psi_n)] \end{aligned} \quad (5)$$

[0085] 使用低通滤波器对两路混频信号进行滤波, 滤除 $x(t)$ 和 $y(t)$ 中的高频部分, 这样就得到了：

$$[0086] \quad x_1(t) = -\frac{1}{2} A_n \sin(2\pi f_d t + \Psi_n) \quad (6)$$

$$[0087] \quad x_2(t) = \frac{1}{2} A_n \cos(2\pi f_d t + \Psi_n) \quad (7)$$

[0088] 从上式可以看出 $x_2(t)$ 是 $x_1(t)$ 的希尔伯特变换, 故可以通过正交解调低通滤波的结果来合成复信号 $S(t)$ ：

$$[0089] \quad S(t) = x_2(t) + jx_1(t) = \frac{A_n}{2} e^{-j2\pi f_d t} e^{-j\Psi_n} \quad (8)$$

[0090] (3) 主处理器采用脉冲对测频与时延测频相结合的方法进行多普勒频偏运算

[0091] 如图 6 所示： S 是合成的复信号； S_1, S_2 是一对时延为 $k\tau_1$ 的复信号组成的相关脉冲对；因为 S_1, S_2 是一对时延为 $k\tau_1$ 的信号, 我们对 S_1, S_2 分别采样得到一对复脉冲对 $S_1(n), S_2(n)$ 其中： $n = 1, \dots, N$, N 为采样的点数, 假设我们发射的是 M 个周期的宽带编码信号, 其中 $\tau_1 = m\Delta t$ 是一个周期的编码信号的长度, 其中 m 和 Δt 分别为编码信号的比特数和一个码元的码长, 那么时间间隔为 $k\tau_1$ 的信号的相位都是相干的, 因此在宽带编码信号的处理中做脉冲对算法的时候脉冲时延都取 $k\tau_1$, 其中 $k = 1, \dots, M-1$ 。

[0092] 则时延为 $k\tau$ 的两个信号的相关函数值为：

$$[0093] \quad R(k\tau_1) = \sum_{n=1}^N S_1(n) \times S_2^*(n) \quad (9)$$

[0094] 有了相关函数值 $R(k\tau_1)$, 我们就可以求出其相角值 $g_s(k\tau_1)$ 从而得到多普勒频偏。

[0095] 由脉冲对算法可知, 脉冲对算法测频范围为 $[-1/2\tau, 1/2\tau]$, $\tau = N \times T_p$, 其中 τ

为脉冲对算法测频时延,其中 N 为编码的周期数, T_p 为一个编码周期的时间长度,当测量的多普勒频偏 f_d 超过上述范围时就会出现频率模糊问题。

[0096] 复信号自相关函数:

$$[0097] \quad R(\tau) = \sum_{n=1}^N S1(n) \times S1^*(n) \quad (10)$$

[0098] 延时测频测量的是信号自相关函数侧峰移位所对应的延迟值,不存在模糊速度,则延时测频的频偏为:

$$[0099] \quad fd_1 = \frac{1}{2\pi\Delta\tau} \quad (11)$$

[0100] 式中, $\Delta\tau$ 是侧峰移位的延迟值。

[0101] 则相关脉冲对测频的频偏为:

$$[0102] \quad fd_2 = \frac{1}{2\pi\tau_2} \tan^{-1} \frac{\text{Im}(R(\tau_2))}{\text{Re}(R(\tau_2))} \quad (12)$$

[0103] 两者的关系为:

$$[0104] \quad fd_1 = fd_2 + K / \tau_2 \quad (13)$$

[0105] 式中, K 为相位模糊的正周期数,其值为:

$$[0106] \quad K = \text{round}\{[fd_1 - fd_2] \tau_2\} \quad (14)$$

[0107] 式中, round 代表四舍五入取整,去模糊后的频偏为:

$$[0108] \quad fd = fd_2 + K / \tau_2 \quad (15)$$

[0109] (4) 主处理器进行声速补偿并进行流速计算

[0110] 径向流速为:

$$[0111] \quad v_r = \frac{c}{2f_0} fd \quad (16)$$

[0112] 式中, f_0 为发射信号中心频率, fd 为多普勒频偏, c 为声速,

[0113] 如图 7 所示为基阵坐标系下 ADCP 的四波束 Janus 阵型结构,该基阵坐标系为右手坐标系,原点位于 Janus 阵型结构的中心 O ,它的三个轴 x_d , y_d 和 z_d 分别指向测量系统规定的前、右和下的方向。图中波束方向与基阵坐标系的 z 轴夹角为 α ,如图 8 所示,ADCP 四个波束在水平面的投影与 x 轴的夹角为 β ,根据式 (16) 可以求出波束 1,2,3,4 的径向速度,则径向流速的列矢径为 $v_b = [v_1, v_2, v_3, v_4]^T$,基阵坐标系下的流速矢量 $v_d = [v_{dx}, v_{dy}, v_{dz}]^T$,两者的关系为:

$$[0114] \quad v_b = B v_d \quad (17)$$

[0115] 则有:

$$[0116] \quad v_d = (B^T B)^{-1} B^T v_b \quad (18)$$

$$[0117] \quad \text{式中, } B = \begin{bmatrix} \sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta & \cos \alpha \\ -\sin \alpha \sin \beta & \sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \\ -\sin \alpha \cos \beta & -\sin \alpha \sin \beta & \cos \alpha \\ \sin \alpha \sin \beta & -\sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \end{bmatrix}.$$

[0118] 大地坐标系的定义,大地坐标系为右手坐标系,原点位于测量系统的等效中心 0,它的三个轴 x_g , y_g 和 z_g 分别纸箱测量系统规定的北、东和垂直的向下。大地坐标系下流速矢量为 $v_g = [v_{gx}, v_{gy}, v_{gz}]^T$, 则有:

$$[0119] \quad v_g = R v_d \quad (19)$$

$$[0120] \quad R = \Psi \Theta \Phi \quad (20)$$

$$[0121] \quad \Psi = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$[0122] \quad \Theta = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (22)$$

[0123]

$$\Psi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (23)$$

[0124] 式中, ψ, θ, φ 分别为航向角、纵摇、横摇。

[0125] 声速不准确将直接带来速度测量误差,因此要得到更高精度的流速,必须对声速进行补偿,我们采用主处理器与表面声速计相结合实时为 BBADCP 输入声速,进行声速补偿,得到更高精度的流速。由压力传感器、温度传感器数据计算声速 c :

$$[0126] \quad c = 1449.22 + \Delta c_T + \Delta c_S + \Delta c_p + \Delta c_{STP} \quad (24)$$

$$[0127] \quad \Delta c_T = 4.6233T - 5.4585 \times 10^{-2} T^2 + 2.822 \times 10^{-4} T^3 + 5.07 \times 10^{-7} T^4 \quad (25)$$

$$[0128] \quad \Delta c_p = 0.160518P + 1.0279 \times 10^{-5} P^2 + 3.451 \times 10^{-9} P^3 - 3.503 \times 10^{-12} P^4 \quad (26)$$

$$[0129] \quad \Delta c_S = 1.391 \times (S - 35) - 7.8 \times 10^{-2} (S - 35)^2 \quad (27)$$

[0130] 流速 v 为:

$$[0131] \quad v = v_{uncorrected} * \frac{c}{c_{ADCP}} \quad (28)$$

[0132] 式中, $v_{uncorrected}$ 为未修正的速度, c 为由压力、温度计算的声速, c_{ADCP} 是计算流速时用的声速。

[0133] 上述大地坐标系下的流速为所求流速,并由主处理器上传流速计算结果到显控计算机进行显示。

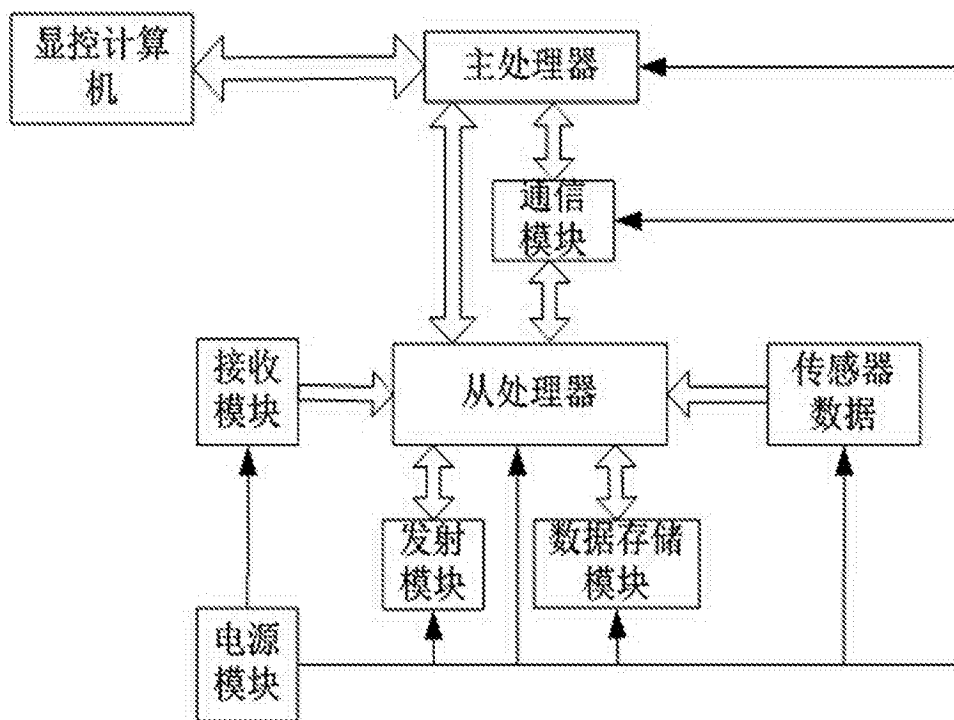


图 1

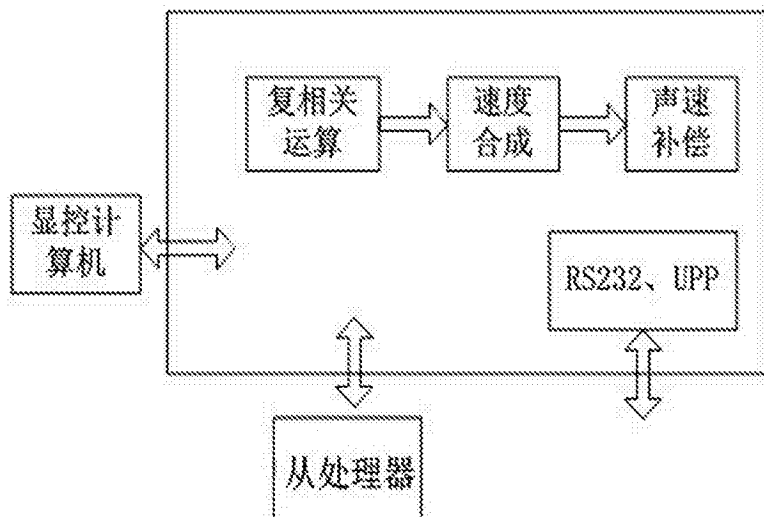


图 2

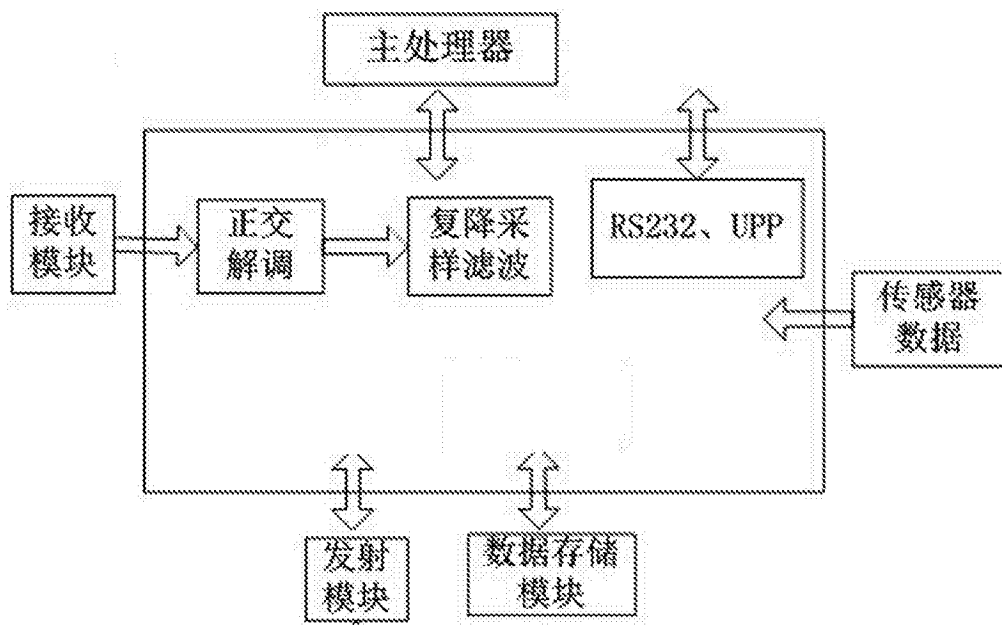


图 3

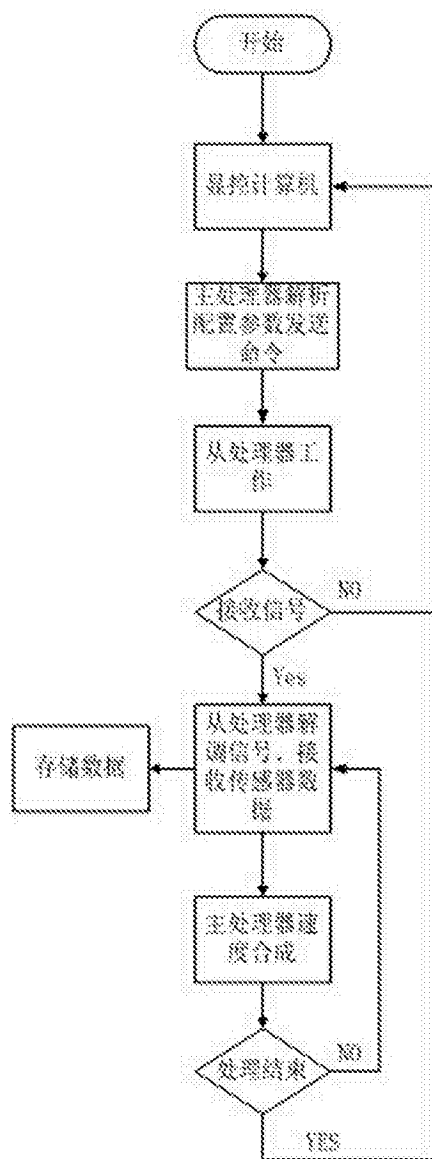


图 4

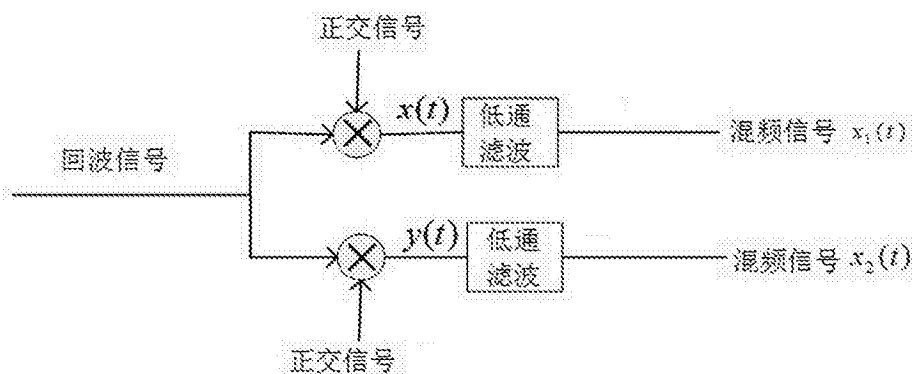


图 5

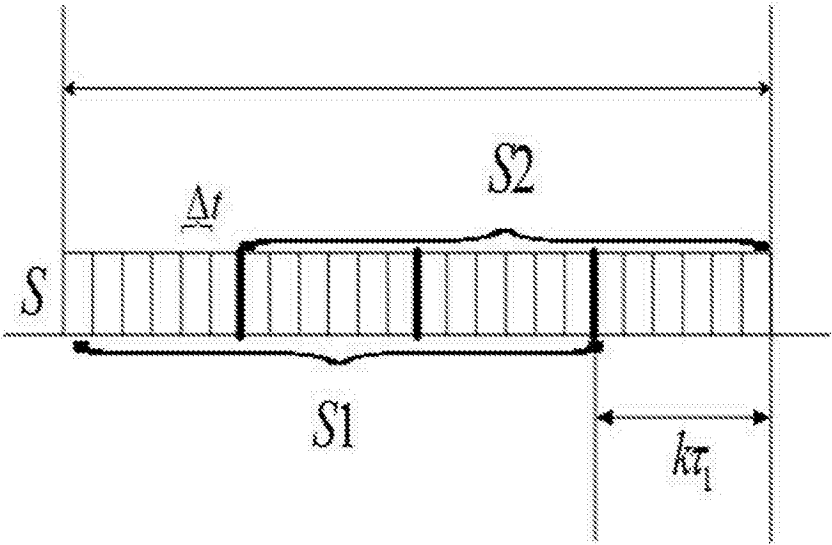


图 6

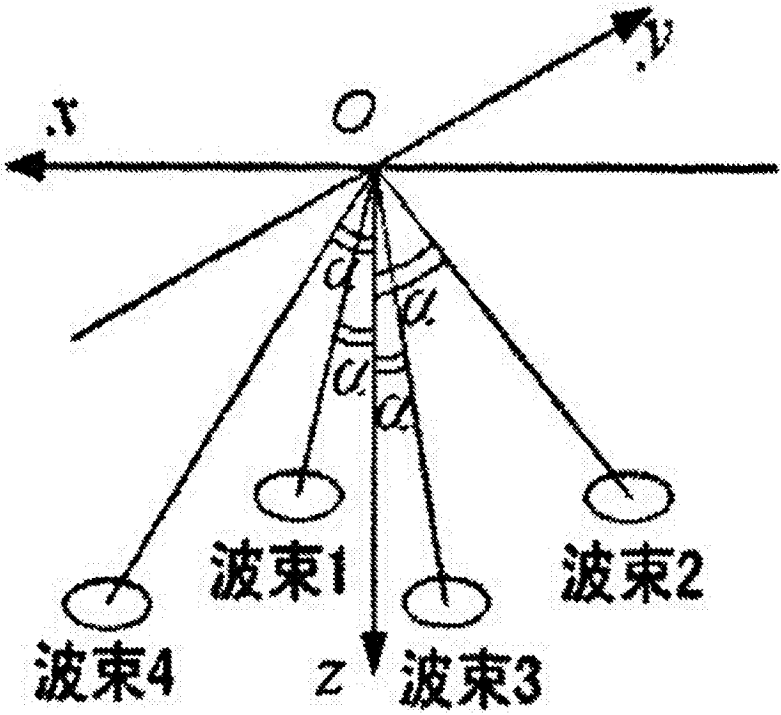


图 7

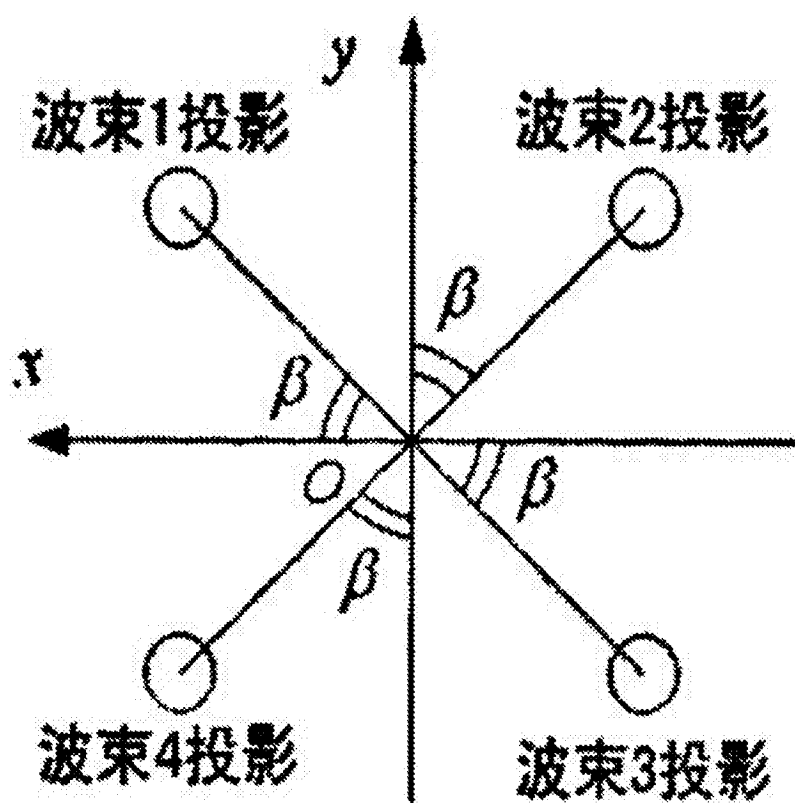


图 8