



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110389318 B

(45) 授权公告日 2021.06.08

(21) 申请号 201810347801.3

G01C 21/20 (2006.01)

(22) 申请日 2018.04.18

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 110389318 A

CN 105182390 A, 2015.12.23

CN 106199519 A, 2016.12.07

CN 105891781 A, 2016.08.24

(43) 申请公布日 2019.10.29

CN 107748352 A, 2018.03.02

(73) 专利权人 中国科学院声学研究所  
地址 100190 北京市海淀区北四环西路21号

CN 106556837 A, 2017.04.05

CN 107505597 A, 2017.12.22

CN 104765017 A, 2015.07.08

CN 105823480 A, 2016.08.03

(72) 发明人 尹胜明 尹力 张扬帆 李更祥  
罗俊杰

审查员 白璇

(74) 专利代理机构 北京方安思达知识产权代理有限公司 11472  
代理人 陈琳琳 刘振

(51) Int. Cl.

G01S 5/22 (2006.01)

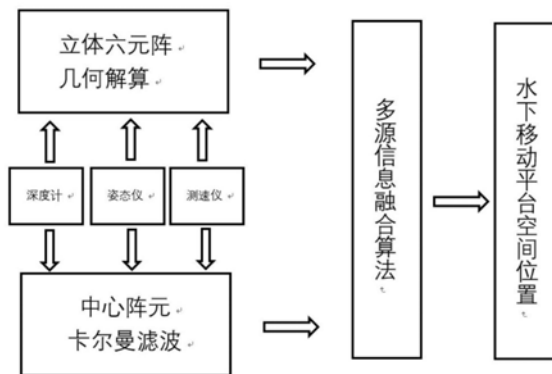
权利要求书3页 说明书8页 附图2页

(54) 发明名称

一种基于立体六元阵的水下移动平台定位系统及方法

(57) 摘要

本发明提供了一种基于立体六元阵的水下移动平台定位系统和方法,该系统包括水面信标、立体六元阵、姿态仪、深度计和测速仪;所述水面信标用于按预先设定的时间间隔发射声学信号;所述立体六元阵安装在水下移动平台上;包括五个接收水听器与一个中心换能器,接收所述水面信标发送的声学信号。所述方法包括:立体六元阵获取相对时间延迟数据,结合水下移动平台的深度数据、姿态数据经过几何解算、坐标转换得到水下移动平台空间位置的第一估计值;然后在以水面信标为原点的测量坐标系下,建立水下移动平台的状态方程,计算得到水下移动平台的空间位置的第二估计值;将第一估计值和第二估计值进行数据融合得到所述水下移动平台空间位置的最终估计值。



1. 一种基于立体六元阵的水下移动平台定位方法, 基于一种基于立体六元阵的水下移动平台定位系统实现, 该系统包括水面信标、姿态仪、深度计、测速仪和立体六元阵;

所述水面信标安装在母船船底或者水面浮标底部, 用于发送一次声学唤醒信号激活立体六元阵然后按预先设定的时间间隔发射声学信号;

所述立体六元阵安装在水下移动平台的顶部或者前部; 包括五个接收水听器与一个收发合置的中心换能器, 用于接收所述水面信标发送的声学信号;

所述姿态仪安装在水下移动平台上, 用于获取水下移动平台的加速度和姿态数据;

所述深度计安装在水下移动平台上, 用于获取水下移动平台的深度信息;

所述测速仪安装在水下移动平台上, 用于获得水下移动平台相对于海底的速度信息;

所述方法包括:

步骤1) 所述立体六元阵接收水面信标发送的声学信号, 获取相对时间延迟数据; 结合水下移动平台的深度数据、姿态数据经过几何解算、坐标转换得到所述水下移动平台空间位置的第一估计值;

步骤2) 在以水面信标为原点的测量坐标系下, 建立水下移动平台的运动方程, 从而建立状态方程; 通过状态方程离散与线性化、卡尔曼滤波后计算得到所述水下移动平台的空间位置的第二估计值;

步骤3) 采用多源信息融合算法将所述水下移动平台的空间位置的第一估计值和第二估计值进行数据融合得到所述水下移动平台空间位置的最终估计值;

所述步骤1) 具体包括以下步骤:

步骤1-1) 所述水面信标先发送一次声学唤醒信号激活水下移动平台立体六元阵, 然后按预先设定的时间间隔发射信号;

步骤1-2) 所述立体六元阵的六个阵元依次接收发射信号, 得到水面信标到立体六元阵的六个阵元的绝对时延 $t_0$ 、 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 、 $t_4$ 和 $t_5$ , 由此得到各接收水听器与中心阵元的相对时延差 $t_{01}$ 、 $t_{02}$ 、 $t_{03}$ 、 $t_{04}$ 、 $t_{05}$ ;

步骤1-3) 在所述立体六元阵坐标系中, 设水面信标表示为P点, 其位置为 $(x, y, z)$ , 根据时延解算 $(x, y, z)$ , 其中 $z$ 通过深度计获取:

令:  $AX=B$

$$\text{其中, } A = \begin{bmatrix} 2d & 0 & -2c^2t_{01} \\ 0 & 2d & -2c^2t_{02} \\ -2d & 0 & -2c^2t_{03} \\ 0 & -2d & -2c^2t_{04} \\ 0 & 0 & -2c^2t_{05} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} c^2t_{01}^2 + d^2 \\ c^2t_{02}^2 + d^2 \\ c^2t_{03}^2 + d^2 \\ c^2t_{04}^2 + d^2 \\ c^2t_{05}^2 + d^2 + 2dz \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} x \\ y \\ t_0 \end{bmatrix},$$

其中,  $d$ 为接收水听器到中心换能器的距离;

利用最小二乘法求取近似解:  $X = \begin{bmatrix} x \\ y \\ t_0 \end{bmatrix} = QB,$

其中 $Q$ 为 $A$ 的伪逆, 即 $Q = (A'A)^{-1}A'$ ;

步骤1-4) 通过坐标变换将 $(x, y, z)$ 转换到以水面信标为原点的测量坐标系下, 获得水下移动平台相对于水面信标的空间坐标位置 $(x_1, y_1, z_1)$ , 水面信标到水下移动平台的距离为:

$$r1 = \sqrt{x1^2 + y1^2 + z1^2}$$

所述水下移动平台空间位置的第一估计值为:  $(x1, y1, z1)$  和  $r1$ ;

所述步骤2) 具体包括以下步骤:

步骤2-1) 建立水下移动平台的运动数学模型为:

$$\begin{cases} \dot{x}2 = V\sin\theta\cos\varphi + V_{cx} \\ \dot{y}2 = V\cos\theta\cos\varphi + V_{cy} \\ \dot{z}2 = V\sin\varphi + V_{cz} \\ \dot{V}_{cz} = 0 \end{cases}$$

其中,  $x2, y2, z2$  分别为以水面信标为原点的测量坐标系下的  $x$  轴、 $y$  轴和  $z$  轴的状态分量,  $V$  为水下移动平台的航速,  $V_{cx}, V_{cy}$  和  $V_{cz}$  洋流的三个方向的速度;  $\theta$  为水下移动平台的航向角,  $\varphi$  为水下移动平台的俯仰角;

步骤2-2) 建立状态方程:

$$\begin{cases} \dot{X}1 = CX1 + DU \\ Z = [r2, z2]^T \end{cases}$$

$$\text{其中, } C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \text{状态量 } X1 = \begin{bmatrix} x2 \\ y2 \\ z2 \\ V_{cx} \\ V_{cy} \\ V_{cz} \end{bmatrix},$$

$$\text{控制量 } U = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V\sin\theta\cos\varphi \\ V\cos\theta\cos\varphi \\ V\sin\varphi \end{bmatrix}$$

水下移动平台与水面信标之间的距离值  $r2 = \sqrt{x2^2 + y2^2 + z2^2}$ ;

步骤2-3) 将步骤2-2) 的状态方程离散化, 利用卡尔曼滤波算法进行求解, 由此得到所述水下移动平台空间位置的第二估计值:  $(x2, y2, z2)$  和  $r2$ ;

所述步骤3) 具体包括以下步骤:

步骤3-1) 根据海洋环境效应分析结果, 利用自适应处理进行动态定位调整, 对步骤1) 得到的第一估计值和步骤2) 得到的第二估计值分别进行后置滤波;

步骤3-2) 根据步骤3-1) 得到滤波后的两个空间位置的估计值, 利用相关处理对其进行融合得到所述水下移动平台空间位置的最终估计值。

2. 根据权利要求1所述的基于立体六元阵的水下移动平台定位方法, 其特征在于, 所述水面信标发送的声学信号包括用于多普勒频偏补偿、时延估计的宽带导频信号和用于与水下移动平台通信的宽带编码信号。

3. 根据权利要求1所述的基于立体六元阵的水下移动平台定位方法, 其特征在于, 所述中心换能器为中心阵元, 以中心阵元为原点建立立体六元阵坐标系:  $X$  轴指向水下移动平台艏部,  $Y$  轴指向水下移动平台右舷,  $Z$  轴正方向指向水下移动平台的垂直上方; 在所述立体六元阵坐标系中, 以原点为中心在  $X$  轴上对称安装两个接收水听器, 以原点为中心在  $Y$  轴上对

称安装两个接收水听器,在Z轴正方向上安装一个接收水听器;所有接收水听器到中心阵元的距离相等。

4.根据权利要求1所述的基于立体六元阵的水下移动平台定位方法,其特征在于,通过调整所述接收水听器到中心阵元的距离能够实现接收不同频率的信号。

## 一种基于立体六元阵的水下移动平台定位系统及方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及水声导航定位技术领域,具体涉及一种基于立体六元阵的水下移动平台定位系统及方法。

### 背景技术

[0002] 水下移动平台是海洋科学考察、海洋资源勘探、海洋资源开发等工程的必备平台,而水下电磁波信号衰减快,卫星导航系统无法直接应用于水下移动平台定位,所以水声定位技术是目前水下定位系统的主要研究方向。

[0003] 水声传感器阵列可分为线阵、面阵和立体阵。对于固定式阵列来说,线阵只能对阵列所在直线为界的半个平面进行定向;面阵可以在整个平面对目标进行定向,也可以对阵列所在平面为界的半个空间进行定向;立体阵可以对整个空间定向。

[0004] 现有的水下声学定位系统主要有长基线定位系统、短基线定位系统、超短基线定位系统三种。长基线和短基线定位系统相对于超短基线定位系统来说,虽然定位精度高,但是布放和校正复杂、耗时多、缺乏灵活性。超短基线定位系统的特点则是安装方便、操作简单、成本低廉,适用于水下移动平台的定位、导航和通信。

[0005] 传统超短基线一般采用平面四元阵用于水下定位,但由于平面阵本身阵元较少且缺乏垂直方向上的时延信息,因此在大俯仰角时定位性能急剧下降,同时传统超短基线定位方法中其询问应答的工作方式使得位置信息更新率低,并且往返时间的测量也会给定位精度带来一定的误差。整体而言,基于几何关系解算的超短基线平面阵应用于水下移动平台定位的探测范围与探测精度受到很大的限制。

### 发明内容

[0006] 本发明的目的在于克服上述技术缺陷,提供了一种探测范围大、定位精度高的基于立体六元阵的水下移动平台定位系统及方法。

[0007] 为了实现上述目的,本发明提出了一种基于立体六元阵的水下移动平台定位系统,该系统包括水面信标、姿态仪、深度计和测速仪;所述系统还包括立体六元阵;

[0008] 所述水面信标安装在母船船底或者水面浮标底部,用于发送一次声学唤醒信号激活立体六元阵然后按预先设定的时间间隔发射声学信号;

[0009] 所述立体六元阵安装在水下移动平台的顶部或者前部;包括五个接收水听器与一个收发合置的中心换能器,用于接收所述水面信标发送的声学信号;

[0010] 所述姿态仪安装在水下移动平台上,用于获取水下移动平台的加速度和姿态数据;

[0011] 所述深度仪安装在水下移动平台上,用于获取水下移动平台的深度信息;

[0012] 所述测速仪安装在水下移动平台上,用于获得水下移动平台相对于海底的速度信息。

[0013] 作为上述系统的一种改进,所述水面信标发送的声学信号包括用于多普勒频偏补

偿、时延估计的宽带导频信号和用于与水下移动平台通信的宽带编码信号。

[0014] 作为上述系统的一种改进,所述中心换能器为中心阵元,以中心阵元为原点建立立体六元阵坐标系:X轴指向水下移动平台艏部,Y轴指向水下移动平台右舷,Z轴正方向指向水下移动平台的垂直上方;在所述立体六元阵坐标系中,以原点为中心在X轴上对称安装两个接收水听器,以原点为中心在Y轴上对称安装两个接收水听器,在Z轴正方向上安装一个接收水听器;所有接收水听器到中心阵元的距离相等。

[0015] 作为上述系统的一种改进,通过调整所述接收水听器到中心阵元的距离能够实现接收不同频率的信号。

[0016] 基于上述系统,本发明还提供了一种基于立体六元阵的水下移动平台定位方法,所述方法包括:

[0017] 步骤1)所述立体六元阵接收水面信标发送的声学信号,获取相对时间延迟数据;结合水下移动平台的深度数据、姿态数据经过几何解算、坐标转换得到所述水下移动平台空间位置的第一估计值;

[0018] 步骤2)在以水面信标为原点的测量坐标系下,建立水下移动平台的运动方程,从而建立状态方程;通过状态方程离散与线性化、卡尔曼滤波后计算得到所述水下移动平台的空间位置的第二估计值;

[0019] 步骤3)采用多源信息融合算法将所述水下移动平台的空间位置的第一估计值和第二估计值进行数据融合得到所述水下移动平台空间位置的最终估计值。

[0020] 作为上述方法的一种改进,所述步骤1)具体包括以下步骤:

[0021] 步骤1-1)所述水面信标先发送一次声学唤醒信号激活水下移动平台立体六元阵,然后按预先设定的时间间隔发射信号;

[0022] 步骤1-2)所述立体六元阵的六个阵元依次接收发射信号,得到水下移动平台到立体六元阵的六个阵元的绝对时延 $t_0$ 、 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 、 $t_4$ 和 $t_5$ ,由此得到各接收水听器与中心阵元的相对时延差 $t_{01}$ 、 $t_{02}$ 、 $t_{03}$ 、 $t_{04}$ 、 $t_{05}$ ;

[0023] 步骤1-3)在所述立体六元阵坐标系中,设水面信标表示为P点,其位置为 $(x, y, z)$ ,根据时延解算 $(x, y, z)$ ,其中 $z$ 通过深度计获取:

[0024] 令: $AX=B$

$$[0025] \quad \text{其中, } A = \begin{bmatrix} 2d & 0 & -2c^2t_{01} \\ 0 & 2d & -2c^2t_{02} \\ -2d & 0 & -2c^2t_{03} \\ 0 & -2d & -2c^2t_{04} \\ 0 & 0 & -2c^2t_{05} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} c^2t_{01}^2 + d^2 \\ c^2t_{02}^2 + d^2 \\ c^2t_{03}^2 + d^2 \\ c^2t_{04}^2 + d^2 \\ c^2t_{05}^2 + d^2 + 2dz \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} x \\ y \\ t_0 \end{bmatrix},$$

[0026] 其中, $d$ 为接收水听器到中心换能器的距离;

[0027] 利用最小二乘法求取近似解: $X = \begin{bmatrix} x \\ y \\ t_0 \end{bmatrix} = QB,$

[0028] 其中 $Q$ 为 $A$ 的伪逆,即 $Q = (A'A)^{-1}A'$ ;

[0029] 步骤1-4)通过坐标变换将 $(x, y, z)$ 转换到以水面信标为原点的测量坐标系下,获得水下移动平台相对于水面信标的空间坐标位置 $(x_1, y_1, z_1)$ ,水面信标到水下移动平台的距离为:

[0030]  $r1 = \sqrt{x1^2 + y1^2 + z1^2}$

[0031] 所述水下移动平台空间位置的第一估计值为:  $(x1, y1, z1)$  和  $r1$ 。

[0032] 作为上述方法的一种改进,所述步骤2)具体包括以下步骤:

[0033] 步骤2-1)建立水下移动平台的运动数学模型为:

[0034] 
$$\begin{cases} \dot{x}2 = V\sin\theta\cos\varphi + V_{cx} \\ \dot{y}2 = V\cos\theta\cos\varphi + V_{cy} \\ \dot{z}2 = V\sin\varphi + V_{cz} \\ \dot{V}_{cz} = 0 \end{cases}$$

[0035] 其中,  $x2, y2, z2$  分别为以水面信标为原点的测量坐标系下的  $x$  轴、 $y$  轴和  $z$  轴的状态分量,  $V$  为水下移动平台的航速,  $V_{cx}, V_{cy}$  和  $V_{cz}$  洋流的三个方向的速度;  $\theta$  为水下移动平台的航向角,  $\varphi$  为水下移动平台的俯仰角;

[0036] 步骤2-2)建立状态方程:

[0037] 
$$\begin{cases} \dot{X}1 = CX1 + DU \\ Z = [r2, z2]^T \end{cases}$$

[0038] 其中,  $C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ ,  $D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ , 状态量  $X1 = \begin{bmatrix} x2 \\ y2 \\ z2 \\ V_{cx} \\ V_{cy} \\ V_{cz} \end{bmatrix}$ ,

[0039] 控制量  $U = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V\sin\theta\cos\varphi \\ V\cos\theta\cos\varphi \\ V\sin\varphi \end{bmatrix}$

[0040] 水下移动平台与水面信标之间的距离值  $r2 = \sqrt{x2^2 + y2^2 + z2^2}$ ;

[0041] 步骤2-3)将步骤2-2)的状态方程离散化,利用卡尔曼滤波算法进行求解,由此得到所述水下移动平台空间位置的第二估计值:  $(x2, y2, z2)$  和  $r2$ 。

[0042] 作为上述方法的一种改进,所述步骤3)具体包括以下步骤:

[0043] 步骤3-1)根据海洋环境效应分析结果,利用自适应处理进行动态定位调整,对步骤1)得到的第一估计值和步骤2)得到的第二估计值分别进行后置滤波;

[0044] 步骤3-2)根据步骤3-1)得到滤波后的两个空间位置的估计值,利用相关处理对其进行融合得到所述水下移动平台空间位置的最终估计值。

[0045] 本发明的有益效果在于:

[0046] 1、本发明在超短基线平面阵的基础上,设计了一种立体六元阵用于水下移动平台定位的系统,该阵型利用富余的时延信息与辅助传感器测量数据,消除俯仰探测盲区的同时还提高了距离、方位探测精度;

[0047] 2、本发明的系统结合了宽带信号的多普勒补偿与高精度时延估计技术、结合了水面信标地理坐标的水声通信技术、基于多传感器协同的免校准技术、自适应后置滤波技术,使得该定位系统在工作过程中无需时间同步,无需询问,简化了水下移动平台的定位过程,

可以满足水下定位系统宽范围、高精度、低功耗、小型化的要求；

[0048] 3、本发明还提供了一种与航位推算类似的水下移动平台定位方法，该方法通过立体阵中心阵元建立系统运动模型、状态可观性分析、状态方程离散化与线性化、卡尔曼滤波等步骤获得水下移动平台位置估计值，由于充分考虑了实时运动状态模型，该方法非常适用于水下运动平台定位；并对两种不同算法得到的两个相对独立的位置信息，利用相关处理技术进行数据融合，从而取得比单一算法性能更精确、可靠的水下移动平台位置估计值。

#### 附图说明

[0049] 图1为本发明的实施例2提供的基于立体六元阵的水下移动平台定位方法的示意图；

[0050] 图2为本发明的解算水下移动平台的空间位置的第一估计值的示意图；

[0051] 图3为本发明的x轴距离差解算示意图；

[0052] 图4为本发明的水下移动平台运动模型图。

#### 具体实施方式

[0053] 下面结合附图和具体实施例对本发明作进一步详细说明。

[0054] 实施1

[0055] 本发明的实施1提供了一种基于立体六元阵的水下移动平台定位系统，该系统包括立体六元阵、水面信标、姿态仪、深度计和测速仪；

[0056] 所述水面信标安装在母船船底或者水面浮标底部，并配备卫星定位系统与深度计。

[0057] 所述立体六元阵为超短基线阵列，安装在水下移动平台（包括水下AUV、UUV等）的顶部或者前部，由五个接收水听器和一个收发合置的换能器组成，以收发合置的换能器作为中心阵元建立三维坐标系，以中心阵元为立体六元阵的原点，X轴指向水下移动平台艏部，Y轴指向右舷，Z轴正方向指向平台垂直上方，在X轴与Y轴上以原点为中心对称各安装两个接收水听器；Z轴正方向上安装一个接收水听器，所有接收水听器到中心阵元的距离相等；所述五个接收水听器到原点的位置可任意扩展，以满足不同频率的接收信号。

[0058] 所述姿态仪安装在水下移动平台上，获取水下移动平台加速度、姿态角（含航向角、纵倾角、横摇角）等信息；所述深度计安装在水下移动平台上，用于获取水下移动平台的深度信息；所述测速仪安装在水下移动平台上，获得水下移动平台相对于海底的速度信息。

[0059] 实施例2

[0060] 如图1所示，本实施例提供了一种与航位推算类似的水下移动平台定位方法，该方法采用立体六元阵的超短基线阵列并结合深度计测得的水面信标与水下移动平台的深度差信息、测速仪得到的水下移动平台相对于海底的速度信息以及姿态仪测得的航向角、纵倾角、横摇角等信息，通过几何关系解算得到水面信标相对水下移动平台的相位位置，再结合解码自水面信标发送的来自于卫星定位系统的地理坐标信息并通过坐标变换得到最终的水下移动平台的地理位置信息。然后通过立体阵中心阵元建立系统运动模型，结合状态可观性分析、状态方程离散化与线性化、卡尔曼滤波等步骤获得水下移动平台位置估计值，最后对两种不同方法得到的两个相对独立的位置信息，利用相关处理技术进行数据融合，



从而取得比单一算法性能更精确、可靠的水下移动平台位置估计值。除此之外,在本实施例中,系统还结合了宽带信号的多普勒补偿与高精度时延估计技术、编码了水面信标地理坐标的水声通信技术、基于多传感器协同的免校准技术以及自适应后置滤波技术。

[0061] 如图2和图3所示,在本实施例中,建立水下移动平台的几何位置模型,以立体阵中心阵元为原点,X轴指向水下移动平台艏部,Y轴指向右舷,Z轴正方向指向平台垂直上方,设水面信标在直角坐标系中表示为P点,其位置表示为 $(x, y, z)$ 。立体阵中心0号阵元为收发合置换能器,阵元1-5号为接收水器阵且距离中心原点的距离相等都为 $d$ 。由于采用免问询被动定位,因此无法直接获得水面信标到水下移动平台的绝对时延,只能依赖于各阵元之间的时延差间接求取。

[0062] 设P点到六元立体阵阵元 $i$ 的绝对时延为 $t_0, t_1, t_2, t_3, t_4$ 和 $t_5$ ;假定水下声速为恒定值 $c$ ,则根据距离公式:

$$[0063] \begin{cases} x^2 + y^2 + z^2 = (c \times t_0)^2 \\ (x - d)^2 + y^2 + z^2 = (c \times t_1)^2 \\ x^2 + (y - d)^2 + z^2 = (c \times t_2)^2 \\ (x + d)^2 + y^2 + z^2 = (c \times t_3)^2 \\ x^2 + (y + d)^2 + z^2 = (c \times t_4)^2 \\ x^2 + y^2 + (z - d)^2 = (c \times t_5)^2 \end{cases}$$

[0064] 公式依次相减消去 $x^2 + y^2 + z^2$ ,有:

$$[0065] \begin{cases} 2dx - d^2 = c^2(t_0^2 - t_1^2) \\ 2dy - d^2 = c^2(t_0^2 - t_2^2) \\ -2dx - d^2 = c^2(t_0^2 - t_3^2) \\ -2dy - d^2 = c^2(t_0^2 - t_4^2) \\ 2dz - d^2 = c^2(t_0^2 - t_5^2) \end{cases}$$

[0066] 利用高精度时延估计算法求得各接收水听器与中心阵元的相对时延差 $t_{01}, t_{02}, t_{03}, t_{04}, t_{05}$ 为:

$$[0067] \begin{cases} t_{01} = t_0 - t_1 \\ t_{02} = t_0 - t_2 \\ t_{03} = t_0 - t_3 \\ t_{04} = t_0 - t_4 \\ t_{05} = t_0 - t_5 \end{cases}$$

[0068] 进一步化解得到:

$$[0069] \begin{cases} 2dx + 0y - 2c^2 t_{01} t_0 = c^2 t_{01}^2 + d^2 \\ 0x + 2dy - 2c^2 t_{02} t_0 = c^2 t_{02}^2 + d^2 \\ -2dx + 0y - 2c^2 t_{03} t_0 = c^2 t_{03}^2 + d^2 \\ 0x - 2dy - 2c^2 t_{04} t_0 = c^2 t_{04}^2 + d^2 \\ 0x + 0y - 2c^2 t_{05} t_0 = c^2 t_{05}^2 + d^2 + 2dz \end{cases}$$

[0070] 其中, $z$ 可以由深度计测量得到,即未知数包括 $x, y, t_0$ ,将上式改写成矩阵形式:

$$[0071] \quad \begin{bmatrix} 2d & 0 & -2c^2t01 \\ 0 & 2d & -2c^2t02 \\ -2d & 0 & -2c^2t03 \\ 0 & -2d & -2c^2t04 \\ 0 & 0 & -2c^2t05 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ t0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2t01^2 + d^2 \\ c^2t02^2 + d^2 \\ c^2t03^2 + d^2 \\ c^2t04^2 + d^2 \\ c^2t05^2 + d^2 + 2dz \end{bmatrix}$$

$$[0072] \quad \text{令 } A = \begin{bmatrix} 2d & 0 & -2c^2t01 \\ 0 & 2d & -2c^2t02 \\ -2d & 0 & -2c^2t03 \\ 0 & -2d & -2c^2t04 \\ 0 & 0 & -2c^2t05 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} c^2t01^2 + d^2 \\ c^2t02^2 + d^2 \\ c^2t03^2 + d^2 \\ c^2t04^2 + d^2 \\ c^2t05^2 + d^2 + 2dz \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} x \\ y \\ t0 \end{bmatrix},$$

[0073] 则位置解算即是求取矩阵方程 $AX=B$ 的解,由于 $A$ 并不是方阵,因此利用最小二乘法求取近似解, $X = \begin{bmatrix} x \\ y \\ t0 \end{bmatrix} = QB$ ,其中 $Q$ 为 $A$ 的伪逆,即 $Q = (A'A)^{-1}A'$ ,到此,求得水面信标在 $P$

点的位置,最后,通过坐标变换将 $(x, y, z)$ 转换到以水面信标为原点的测量坐标系下,获得水下移动平台相对于水面信标的空间坐标位置 $(x1, y1, z1)$ ,水面信标到水下移动平台的距离为:

$$[0074] \quad r1 = \sqrt{x1^2 + y1^2 + z1^2}$$

[0075] 所述水下移动平台空间位置的第一估计值为: $(x1, y1, z1)$ 和 $r1$ 。

[0076] 如图4所示,水下移动平台的运动数学模型为:

$$[0077] \quad \begin{cases} \dot{x}2 = V \sin\theta \cos\varphi + V_{cx} \\ \dot{y}2 = V \cos\theta \cos\varphi + V_{cy} \\ \dot{z}2 = V \sin\varphi + V_{cz} \\ \dot{V}_{cz} = 0 \end{cases}$$

[0078] 其中, $x2, y2, z2$ 分别为水下移动平台在以水面信标为原点的测量坐标系下的 $x$ 轴、 $y$ 轴和 $z$ 轴的状态分量, $V$ 为水下移动平台的航速, $V_{cx}, V_{cy}$ 和 $V_{cz}$ 洋流的三个方向的速度; $\theta$ 为水下移动平台的航向角, $\varphi$ 为水下移动平台的俯仰角(都可通过姿态仪得到),水下移动平台的初始位置以及后续处理的位置信息由超短基线立体六元阵实时提供。

[0079] 建立水下移动平台的状态模型,并定义观测模型,其中需要估计的量是,水下移动平台的当前位置 $(x2, y2, z2)$ 。并做如下假设:航向角 $\theta$ 和航速 $V$ 的滤波误差为零;水下移动平台与水面信标之间的距离值 $r$ 的测量噪声为高斯白噪声;洋流的流速 $Vc$ 为恒定值;水面信标位置已知且固定。

[0080] 由于 $V_{cx}, V_{cy}$ 和 $V_{cz}$ 为恒定值,因此 $\dot{V}_{cx}, \dot{V}_{cy}, \dot{V}_{cz}$ 均为0;由上式可得:

$$[0081] \quad \dot{X}1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x2 \\ y2 \\ z2 \\ V_{cx} \\ V_{cy} \\ V_{cz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix},$$

$$[0082] \quad \text{令 } C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$[0083] \quad \text{令状态量 } X1 = \begin{bmatrix} x2 \\ y2 \\ z2 \\ V_{cx} \\ V_{cy} \\ V_{cz} \end{bmatrix}, \text{控制量: } U = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \sin \theta \cos \varphi \\ V \cos \theta \cos \varphi \\ V \sin \varphi \end{bmatrix}$$

[0084] 水下移动平台与水面信标之间的距离值:  $r2 = \sqrt{x2^2 + y2^2 + z2^2}$ ;

[0085] 由此,定义观测模型  $Z = \begin{bmatrix} r2 \\ z \end{bmatrix}$ ,

[0086] 因此得到状态方程,  $\begin{cases} \dot{X}1 = CX1 + DU \\ Z = [r2, z]^T \end{cases}$

[0087] 由于该算法是基于卡尔曼滤波的,因此需要对系统模型进行状态可观性分析,同时又由于卡尔曼滤波针对的是线性系统,因此还需要对系统进行非线性处理。对于一个非线性系统,进行可观性分析的方法是李导数法,结果表明,(1)水下移动平台在过Z轴平面上运动时,系统不可观;(2)水下移动平台的航向过水下移动平台与水面信标之间连线时,系统不可观,除此之外,系统一般可观;

[0088] 由于前面分析都是基于连续系统,因此还需要对系统模型进行离散化处理得到,

[0089]  $X_k = CX_{k-1} + DU_{k-1} + w_{k-1}$ ,最后一项是过程噪声项,对观测模型离散化(采用泰勒展开线性化)得到,

$$[0090] \quad Z_k = H_k X_k + v_k$$

$$[0091] \quad \text{其中, } H_k = \begin{bmatrix} a & b & c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$[0092] \quad a = \frac{x_{k-1}}{\sqrt{x_{k-1}^2 + y_{k-1}^2 + z_{k-1}^2}},$$

$$[0093] \quad b = \frac{y_{k-1}}{\sqrt{x_{k-1}^2 + y_{k-1}^2 + z_{k-1}^2}},$$

$$[0094] \quad c = \frac{z_{k-1}}{\sqrt{x_{k-1}^2 + y_{k-1}^2 + z_{k-1}^2}}$$

[0095] 在对系统进行可观性分析以及离散化处理,便可以进行卡尔曼滤波,使得状态向量X中的各项值逐渐逼近真实值,步骤如下:

[0096] ①先验估计:

$$[0097] \quad \hat{X}_k^- = A \hat{X}_{k-1}^- + B U_k$$

[0098] ②更新协方差矩阵P:

$$[0099] \quad P_k^- = A P_{k-1}^- A' + Q, \text{其中 } Q \text{ 为 } w_k \text{ 的协方差矩};$$

[0100] ③计算先验估计对应的距离:

$$[0101] \quad l_k^- = \sqrt{x_k^{-2} + y_k^{-2} + z_k^{-2}}$$

[0102] ④计算H矩阵:

$$[0103] \quad H_k = \begin{bmatrix} a & b & c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

[0104] ⑤计算卡尔曼增益kg:

$$[0105] \quad kg = \frac{P_k^- H_k^{-'}}{H_k^- P_k^- H_k^{-'} + R}$$

[0106] 其中,R是vk的协方差矩阵

[0107] ⑥后验估计:

$$[0108] \quad X_k = X_k^- + kg \left( \begin{bmatrix} r_k \\ z_k \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} l_k^- \\ z_k^- \end{bmatrix} \right)$$

[0109] ⑦更新协方差:

$$[0110] \quad P_k^- = (I - kg H_k^-) P_k^-$$

[0111]  $X_k$ 即为估计的水下移动平台的运动轨迹(状态量的离散化形式), $X_k$ 中包括所要估计的水下移动平台的位置坐标(x2,y2,z2)。所述水下移动平台空间位置的第二估计值:(x2,y2,z2)和r2

[0112] 根据上述独立得到水下移动平台的第一估计值和第二估计值后,进行多源信息融合,以提高立体六元阵对水下移动平台的定位精度:

[0113] a) 根据海洋环境效应分析结果,利用自适应处理技术进行动态定位调整,对两个独立得到的第一估计值和第二估计值分别进行后置滤波,以剔除野值,减少定位误差;

[0114] b) 根据步骤a)得到滤波后的第一估计值和第二估计值,利用相关处理技术对其进行数据融合,坐标转换后得到更精确的水下移动平台地理位置信息。

[0115] 最后所应说明的是,以上实施例仅用以说明本发明的技术方案而非限制。尽管参照实施例对本发明进行了详细说明,本领域的普通技术人员应当理解,对本发明的技术方案进行修改或者等同替换,都不脱离本发明技术方案的精神和范围,其均应涵盖在本发明的权利要求范围当中。

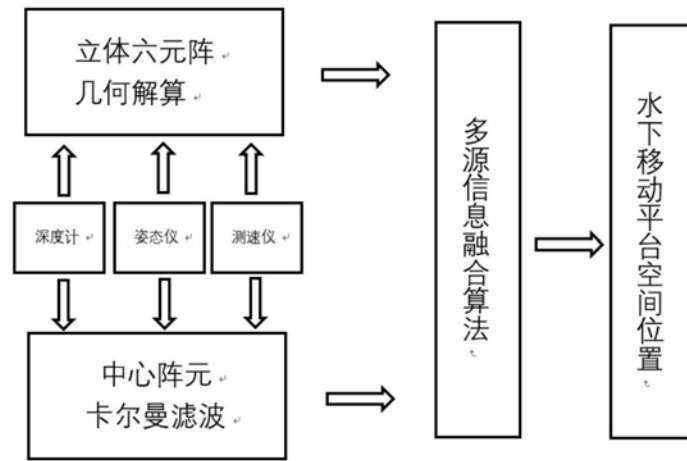


图1

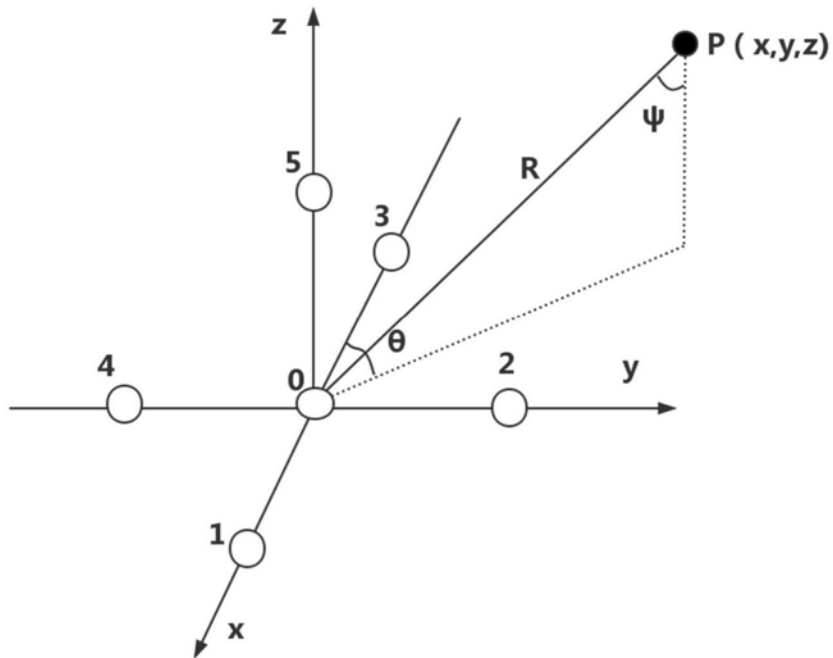


图2

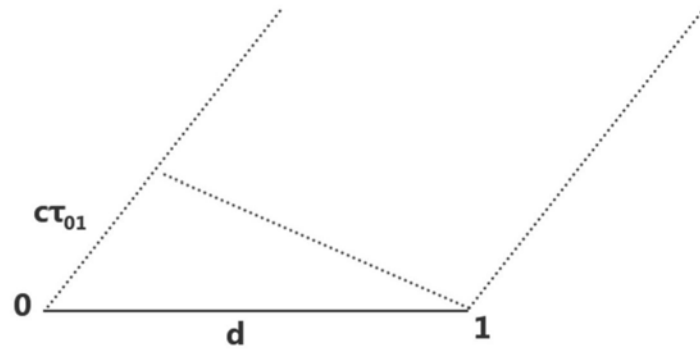


图3

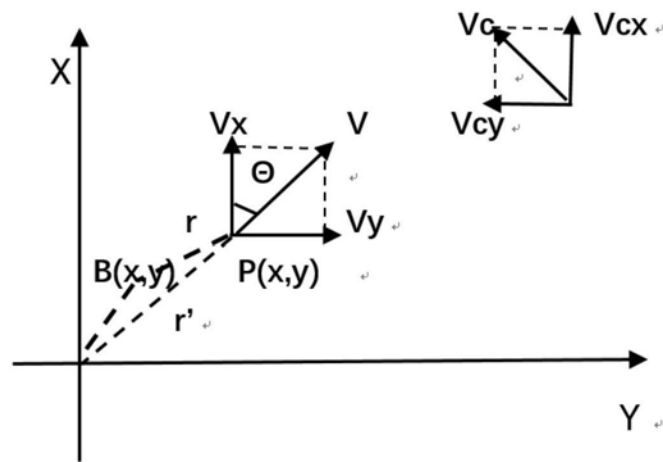


图4