



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110567454 B

(45) 授权公告日 2023. 03. 24

(21) 申请号 201910847266.2

审查员 杨华荣

(22) 申请日 2019.09.08

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 110567454 A

(43) 申请公布日 2019.12.13

(73) 专利权人 东南大学  
地址 210096 江苏省南京市玄武区四牌楼2号

(72) 发明人 徐晓苏 王迪 姚逸卿 朱永云

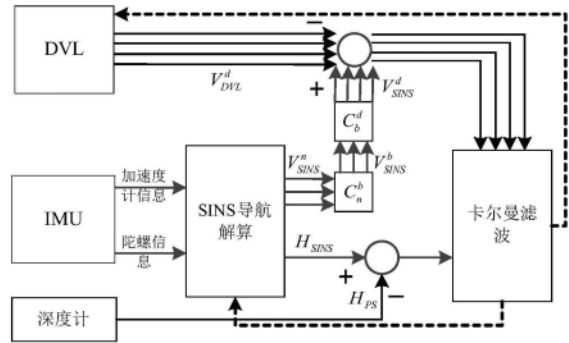
(74) 专利代理机构 南京众联专利代理有限公司  
32206  
专利代理师 许小莉

(51) Int. Cl.  
G01C 21/16 (2006.01)  
G01C 21/20 (2006.01)

权利要求书5页 说明书10页 附图1页

(54) 发明名称  
一种复杂环境下SINS/DVL紧组合导航方法

(57) 摘要  
本发明公开了一种基于SINS/DVL紧组合的水下航行器导航方法,具体包括以下步骤:步骤1:根据SINS/DVL系统的采集数据,建立状态方程;步骤2:根据步骤1中的状态方程建立量测方程;步骤3:对DVL波束信息缺失处理;步骤4:DVL波束信息受到洋流影响处理;步骤5:基于卡尔曼滤波的数据融合处理:根据步骤1和步骤2中的状态方程和量测方程,建立卡尔曼递推估计,将卡尔曼递推估计得到的状态向量反馈到SINS结果中便得到了最终的位置和速度信息。本发明能够在复杂的环境下抑制组合导航误差发散,为未来SINS/DVL紧组合方向的研究提供参考价值。



1. 一种基于SINS/DVL紧组合的水下航行器导航方法,其特征在于,具体包括以下步骤:

步骤1:根据SINS/DVL系统的采集数据,建立状态方程;

步骤2:根据步骤1中的状态方程建立量测方程;

步骤3:对DVL波束信息缺失处理;

步骤4:DVL波束信息受到洋流影响处理;

步骤5:基于卡尔曼滤波的数据融合处理:根据步骤1和步骤2中的状态方程和量测方程,建立卡尔曼递推估计,将卡尔曼递推估计得到的状态向量反馈到SINS结果中便得到了最终的位置和速度信息;

步骤1中所述的SINS/DVL系统的采集数据,包括:IMU采集的光纤陀螺数据; $\omega_{ibx}^b, \omega_{iby}^b, \omega_{ibz}^b$ , 其中: $\omega_{ibx}^b$ 表示载体坐标系下x轴的角速度; $\omega_{iby}^b$ 表示载体坐标系下y轴的角速度; $\omega_{ibz}^b$ 表示载体坐标系下z轴的角速度;IMU采集的加速度计数据 $f_x^b, f_y^b, f_z^b$ ,其中: $f_x^b$ 表示载体系下x轴的加速度值; $f_y^b$ 表示载体系下y轴的加速度值; $f_z^b$ 表示载体系下z轴的加速度值;DVL采集的四个波束通道的数据: $V_{DVL\_1}^d, V_{DVL\_2}^d, V_{DVL\_3}^d, V_{DVL\_4}^d$ ,其中: $V_{DVL\_1}^d$ 表示DVL波束通道1输出的速度信息; $V_{DVL\_2}^d$ 表示DVL波束通道2输出的速度信息; $V_{DVL\_3}^d$ 表示DVL波束通道3输出的速度信息; $V_{DVL\_4}^d$ 表示DVL波束通道4输出的速度信息;

输出量:载体的速度信息: $V_x^n, V_y^n, V_z^n$ ,其中: $V_x^n$ 表示导航系下载体x轴的速度值; $V_y^n$ 表示导航系下载体y轴的速度值; $V_z^n$ 表示导航系下载体z轴的速度值;

载体的位置信息: $\lambda, L, h$ ,其中: $\lambda$ 表示地理经度值; $L$ 表示地理纬度值; $h$ 表示高度值;

步骤1中所述的建立状态方程,具体包括如下步骤;

定义建立的状态方程如下:

$$\dot{X} = FX + GW$$

其中,F表示状态转移矩阵;X表示状态向量;G表示系统噪声矩阵;W表示系统噪声矢量,状态向量为21维,表示如下:

$$X = [\phi_x \quad \phi_y \quad \phi_z \quad \delta V_E^n \quad \delta V_N^n \quad \delta V_U^n \quad \delta \lambda \quad \delta L \quad \delta h \quad \nabla_x \quad \nabla_y \quad \nabla_z \quad \varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad b_{D1} \quad b_{D2} \quad b_{D3} \quad b_{D4} \quad K_D \quad b_{PS}]^T$$

其中, $[\phi_x \quad \phi_y \quad \phi_z]^T$ 表示俯仰、横滚、航向姿态角误差; $[\delta V_E^n \quad \delta V_N^n \quad \delta V_U^n]^T$ 表示东向、北向、天向速度误差; $[\delta \lambda \quad \delta L \quad \delta h]^T$ 表示经度误差、纬度误差、高度误差; $[\nabla_x \quad \nabla_y \quad \nabla_z]^T$ 表示加速度计零偏; $[\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z]^T$ 表示陀螺零偏; $[b_{D1} \quad b_{D2} \quad b_{D3} \quad b_{D4}]^T$ 表示DVL四个波束零偏; $K_D$ 表示DVL刻度因子; $b_{PS}$ 表示深度计零偏;状态转移矩阵F表示为:

$$F = \begin{bmatrix} M_{aa} & M_{av} & M_{ap} & -C_b^n & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ M_{va} & M_{vv} & M_{vp} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & C_b^n & \mathbf{0}_{3 \times 6} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & M_{pv} & M_{pp} & C_b^n & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{12 \times 15} \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} C_b^n & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & C_b^n \\ \mathbf{0}_{15 \times 1} & \mathbf{0}_{15 \times 1} \end{bmatrix}, \quad W = \begin{bmatrix} w_g^b \\ w_a^b \end{bmatrix}$$

其中,

$$M_{aa} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_{ie} \sin L + \frac{V_E \tan L}{R_N + h} & -\omega_{ie} \cos L - \frac{V_E}{R_N + h} \\ -\omega_{ie} \sin L - \frac{V_E \tan L}{R_N + h} & 0 & -\frac{V_N}{R_M + h} \\ \omega_{ie} \cos L + \frac{V_E}{R_N + h} & \frac{V_E}{R_M + h} & 0 \end{bmatrix}$$

$$M_{av} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{R_M + h} & 0 \\ \frac{1}{R_N + h} & 0 & 0 \\ \frac{\tan L}{R_N + h} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad M_{ap} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{V_N}{(R_M + h)^2} \\ -\omega_{ie} \sin L & 0 & -\frac{V_E}{(R_N + h)^2} \\ \omega_{ie} \cos L + \frac{V_E \sec^2 L}{R_N} & 0 & -\frac{V_E \tan L}{(R_N + h)^2} \end{bmatrix}$$

$$M_{va} = \begin{bmatrix} 0 & f_U^n & f_N^n \\ f_U^n & 0 & f_E^n \\ f_N^n & f_E^n & 0 \end{bmatrix}, \quad M_{vv} = \begin{bmatrix} \frac{V_N \tan L - V_U}{R_N + h} & 2\omega_{ie} \sin L + \frac{V_E \tan L}{R_N + h} & -2\omega_{ie} \cos L - \frac{V_E}{R_N + h} \\ -2\omega_{ie} \sin L - \frac{2V_E \tan L}{R_N + h} & \frac{V_U}{R_M + h} & -\frac{V_E}{R_M + h} \\ 2\omega_{ie} \cos L + \frac{2V_N}{R_N + h} & \frac{2V_N}{R_M + h} & 0 \end{bmatrix}$$

$$M_{pv} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{R_M + h} & 0 \\ \frac{\sec L}{R_N + h} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad M_{pp} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{V_N}{(R_M + h)^2} \\ \frac{V_E \sec L \tan L}{R_N + h} & 0 & -\frac{V_E \sec L}{(R_N + h)^2} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$M_{vp} = \left( \mathbf{V}^n \times \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{V_N}{(R_M + h)^2} \\ -2\omega_{ie} \sin L & 0 & -\frac{V_E}{(R_N + h)^2} \\ 2\omega_{ie} \cos L + \frac{V_E \sec^2 L}{R_N} & 0 & -\frac{V_E \tan L}{(R_N + h)^2} \end{bmatrix} + M_4 \right)$$

$$M_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -g_e \sin 2L(\beta - 4\beta_1 \cos 2L) & 0 & \beta_2 \end{bmatrix}$$

其中： $C_b^n$ 表示b系到n系的姿态转移矩阵； $\beta$ 表示重力扁率； $w_g^b$ 表示加速度计噪声； $w_a^b$ 表示陀螺噪声； $\omega_{ie}$ 表示地球自转角速率； $V_E$ 表示东向速度； $V_N$ 表示北向速度； $V_U$ 表示天向速度； $f_U^n$ 表示导航系下天向加速度； $f_E^n$ 表示导航系下东向加速度； $f_N^n$ 表示导航系下北向加速度； $L$ 表示地理纬度； $h$ 表示高度； $\beta_1 = (1/8)(2\beta f + f^2)$ ， $\beta_2 = 3.08 \times 10^{-6} \text{s}^{-2}$ ； $f$ 表示椭球扁率；

2. 根据权利要求1所述的基于SINS/DVL紧组合的水下航行器导航方法，其特征在于，步骤2中所述的建立量测方程，具体包括如下步骤：

定义建立的量测方程如下：

$$Z=HX+V$$

其中,H为量测方程转移矩阵,X表示状态向量;V表示量测噪声;具体计算流程如下:

DVL坐标系定义为d系;载体坐标系定义为b系;导航坐标系定位为n系,在忽略杆臂误差情况下,以水下航行器为研究对象;

在忽略传感器误差情况下,定义载体坐标系下SINS的速度为 $V_{SINS}^b = [V_x^b \ V_y^b \ V_z^b]^T$ ;导航系下SINS的速度为 $V_{SINS}^n = [V_x^n \ V_y^n \ V_z^n]^T$ ;DVL坐标系下SINS的速度为 $V_{SINS}^d = [V_{SINS\_1}^d \ V_{SINS\_2}^d \ V_{SINS\_3}^d \ V_{SINS\_4}^d]^T$ ;DVL的输出速度为 $V_{DVL}^d = [V_{DVL\_1}^d \ V_{DVL\_2}^d \ V_{DVL\_3}^d \ V_{DVL\_4}^d]^T$ ,则可以得到如下式子:

$$V_{DVL}^d = V_{SINS}^d = C_b^d C_n^b V_{SINS}^n$$

其中, $C_n^b$ 表示导航系到载体系的转移矩阵; $C_b^d$ 表示载体系到DVL坐标系的转移矩阵可表示为:

$$C_b^d = \begin{bmatrix} 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & -\cos \alpha & -\sin \alpha \\ -\cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \end{bmatrix}, \alpha = 70^\circ$$

其中, $\alpha$ 表示波束与水下航行器的水平夹角;

定义深度计误差模型为:

$$\tilde{H}_{PS} = H_{PS} + \delta b_{PS} + w_{PS}$$

其中, $\tilde{H}_{PS}$ 为传感器测量值; $H_{PS}$ 为真实值; $\delta b_{PS}$ 为深度计零偏; $w_{PS}$ 为测量噪声;

DVL测量误差模型定义为:

$$\tilde{V}_{DVL}^d = (1 + K_D) V_{DVL}^d + \delta b_D + w_D$$

其中, $\tilde{V}_{DVL}^d$ 为DVL波束测量值; $K_D$ 为刻度因子; $V_{DVL}^d$ 为波束真值; $\delta b_D$ 为波束零偏; $w_D$ 为波束噪声;

考虑到IMU和DVL之间存在安装角误差,假设经过标定补偿后的安装角误差为:

$$\phi = [\phi_x \ \phi_y \ \phi_z]^T$$

其中, $\phi_x$ 表示x轴安装角误差; $\phi_y$ 表示y轴安装角误差; $\phi_z$ 表示z轴安装角误差;则载体坐标系到DVL坐标系的计算值为:

$$\tilde{C}_b^d = C_b^d (I_{3 \times 3} + \phi \times)$$

根据以上分析,SINS解算得到的速度转换到DVL坐标系下的计算公式为:

$$\begin{aligned} \tilde{V}_{SINS}^d &= \tilde{C}_b^d \tilde{C}_n^b \tilde{V}_{SINS}^n = \tilde{C}_b^d C_n^b (I_{3 \times 3} + \phi \times) (V_{SINS}^n + \delta V_{SINS}^n) \\ &\approx \tilde{C}_b^d C_n^b V_{SINS}^n + \tilde{C}_b^d C_n^b \delta V_{SINS}^n + \tilde{C}_b^d C_n^b \phi \times V_{SINS}^n \end{aligned}$$

进一步可以得到:

$$\tilde{V}_{SINS}^d = V_{DVL}^d + \tilde{C}_b^d C_n^b \delta V_{SINS}^n - \tilde{C}_b^d C_n^b V_{SINS}^n \times \phi$$

则量测信息的误差方程为:

$$\begin{aligned}
\tilde{V}_{DVL}^d - \tilde{V}_{SINS}^d &= (1 + K_D) V_{DVL}^d + \delta b_D + w_D - V_{DVL}^d - \tilde{C}_b^d C_n^b \delta V_{SINS}^n + \tilde{C}_b^d C_n^b V_{SINS}^n \times \phi \\
&= V_{DVL}^d K_D + \delta b_D + w_D - \tilde{C}_b^d C_n^b \delta V_{SINS}^n + \tilde{C}_b^d C_n^b V_{SINS}^n \times \phi \\
&= V_{DVL}^d K_D + \delta b_D + w_D - C_b^d (I_{3 \times 3} + \varphi \times) C_n^b \delta V_{SINS}^n + C_b^d (I_{3 \times 3} + \varphi \times) C_n^b V_{SINS}^n \times \phi
\end{aligned}$$

根据以上分析,量测方程中的量测值Z、转移矩阵H、和噪声V分别为:

$$Z = \begin{bmatrix} \tilde{V}_{DVL\_1}^d - \tilde{V}_{SINS\_1}^d \\ \tilde{V}_{DVL\_2}^d - \tilde{V}_{SINS\_2}^d \\ \tilde{V}_{DVL\_3}^d - \tilde{V}_{SINS\_3}^d \\ \tilde{V}_{DVL\_4}^d - \tilde{V}_{SINS\_4}^d \\ \tilde{H}_{PS} - H_{PS} \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} 0_{4 \times 3} & -C_b^d (I_{3 \times 3} + \varphi \times) C_n^b & C_b^d (I_{3 \times 3} + \varphi \times) C_n^b V_{SINS}^n \times & 0_{4 \times 6} & I_{4 \times 4} & V_{DVL}^d & 0_{4 \times 1} \\ 0_{1 \times 8} & & & -1 & & 0_{1 \times 11} & 1 \end{bmatrix}$$

$$V = [w_D \ w_{PS}]^T.$$

3. 根据权利要求2所述的基于SINS/DVL紧组合的水下航行器导航方法,其特征在于,步骤3中所述的DVL波束信息缺失处理,具体包括以下步骤:

首先引入流速固有误差公式,评估数据质量是否有效,具体为:

$$V_{error} = V_{DVL\_1}^d - V_{DVL\_2}^d + V_{DVL\_3}^d - V_{DVL\_4}^d$$

通过分析可知,只要所测水底均匀,则无论系统怎样摇摆 $V_{error}$ 都基本趋近于零,且四路回波认为是有效数据;如果所测流场不均匀,也要看 $V_{error}$ 来确定不均匀的程度,用于判断四路回波数据的有效性;

对于四通道DVL波束配置的DVL设备其波束信息存在以下特点:

$$\begin{cases} V_{DVL\_1}^d = -V_{DVL\_3}^d \\ V_{DVL\_2}^d = V_{DVL\_4}^d \end{cases}$$

因此,当DVL某个通道信息缺失时采用对角线方向的数据取反来替代,定义为虚拟波束法;当DVL信息缺失情况下采用虚拟波束法进行处理。

4. 根据权利要求3所述的基于SINS/DVL紧组合的水下航行器导航方法,其特征在于,步骤4中所述的DVL波束信息受到洋流影响处理,具体包括如下步骤:

步骤4.1: 在d系下计算SINS和DVL之间的速度差;

$$\begin{cases} \tilde{V}_{DVL\_1}^d - \tilde{V}_{SINS\_1}^d = V_{error\_1}^d \\ \tilde{V}_{DVL\_2}^d - \tilde{V}_{SINS\_2}^d = V_{error\_2}^d \\ \tilde{V}_{DVL\_3}^d - \tilde{V}_{SINS\_3}^d = V_{error\_3}^d \\ \tilde{V}_{DVL\_4}^d - \tilde{V}_{SINS\_4}^d = V_{error\_4}^d \end{cases}$$

步骤4.2: 判断波束是否受到洋流影响,当光束测量不受水流影响时,该光束的波束测量值服从零均值高斯分布;当存在洋流时,波束测量值将发生很大变化,但SINS的速度精度保持不变,因此,不再满足零均值高斯分布,设定阈值用于确定光束测量是否受洋流影响:

$$\begin{cases} V_{error\_1}^d < \beta, normal \\ V_{error\_1}^d \geq \beta, abnormal \end{cases}$$

步骤4.3: 用虚拟波束法处理受到洋流影响的波束测量信息,如果无法使用虚拟波束

法,则将隔离波束测量。

5.根据权利要求4所述的基于SINS/DVL紧组合的水下航行器导航方法,其特征在于,步骤5中所述的卡尔曼递推估计具体是:

$$X_{k,k-1} = FX_{k-1}$$

$$P_{k,k-1} = FP_{k-1}F^T + GWG^T$$

$$K_k = P_{k,k-1}H^T (HP_{k,k-1}H + R)^{-1}$$

$$X_k = X_{k,k-1} + K_k (Z_k - HX_{k,k-1})$$

$$P_k = (I - K_k)P_{k,k-1}。$$

## 一种复杂环境下SINS/DVL紧组合导航方法

### 技术领域：

[0001] 本发明属于水下航行器组合导航技术，具体涉及一种复杂环境下SINS/DVL紧组合导航方法。

### 背景技术：

[0002] 自主水下航行器 (AUV) 作为人类探索和发展海洋的重要工具，在海洋发展战略中发挥着重要作用。AUV导航系统提供诸如位置，速度和姿态之类的信息。导航信息的准确性和可靠性是AUV成功执行的保证之一。在水下组合导航系统中，辅助传感器通常包括多普勒计程仪 (DVL)，测斜仪，压力传感器 (PS)，捷联惯性导航系统 (SINS)，陀螺罗经。IMU，即惯性测量单元，包括三轴陀螺仪和三轴加速度计，是完成SINS捷联惯性导航系统的传感器。尽管辅助传感器长时间以高精度测量，但它们在独立应用中存在若干问题。基于SINS/DVL的组合导航具有高自主性和隐蔽性，是未来AUV组合导航的发展方向之一。

[0003] 目前，研究人员对SINS/DVL组合导航方法进行了大量研究。已经提出了许多数据融合算法以提高组合导航的精度。针对SINS/DVL组合系统设计了一些自适应卡尔曼滤波 (AKF)，如异步自适应直接卡尔曼滤波算法，具有递归噪声估计的自适应卡尔曼滤波，以及自适应联邦强跟踪滤波算法。考虑到系统模型非线性特点。一些学者比较了用于SINS/DVL组合导航问题的EKF和UKF算法，这些算法表明EKF具有更高的估计精度。为了解决SINS/DVL组合导航中常规滤波算法精度低的问题，研究者介绍了平方根无迹信息滤波器 (SR-UIF)。同时结合高斯混合密度模型和Cubature卡尔曼滤波器 (CKF)，设计了基于高斯混合立方卡尔曼滤波器 (GM-CKF) 的导航定位算法，并通过湖试验证明了GM-CKF方法优于EKF，UKF和CKF。研究人员还将交互式多模型滤波算法引入SINS/DVL组合导航，并通过仿真验证了其优越性。根据上述研究，在较好的水下环境中，数据融合算法可以在一定程度上提高SINS/DVL组合导航的精度。目前，该领域的研究相对成熟，并成功应用于实际系统。但是针对复杂环境下的SINS/DVL组合导航问题研究较少。

### 发明内容：

[0004] 针对提高复杂环境下的容错性，本发明从系统模型角度出发，提出一种基于SINS/DVL紧组合的水下航行器导航方法。该方法利用DVL四通道波束测量信息，能够在非完整性波束测量情况下提供连续、准确的导航信息。该方法能够在复杂的环境下抑制组合导航误差发散，为未来SINS/DVL紧组合方向的研究提供参考价值。

[0005] 本发明的上述目的可通过以下技术方案来实现：

[0006] 一种基于SINS/DVL紧组合的水下航行器导航方法，具体包括以下步骤：

[0007] 步骤1：根据SINS/DVL系统的采集数据，建立状态方程；

[0008] 步骤2：根据步骤1中的状态方程建立量测方程；

[0009] 步骤3：对DVL波束信息缺失处理；

[0010] 步骤4：DVL波束信息受到洋流影响处理；

[0011] 步骤5:基于卡尔曼滤波的数据融合处理:根据步骤1和步骤2中的状态方程和量测方程,建立卡尔曼递推估计,将卡尔曼递推估计得到的状态向量反馈到SINS结果中便得到了最终的位置和速度信息。

[0012] 所述的基于SINS/DVL紧组合的水下航行器导航方法,步骤1中所述的SINS/DVL系统的采集数据,包括:IMU采集的光纤陀螺数据; $\omega_{ibx}^b, \omega_{iby}^b, \omega_{ibz}^b$ ,其中: $\omega_{ibx}^b$ 表示载体坐标系下x轴的角速度值; $\omega_{iby}^b$ 表示载体坐标系下y轴的角速度值; $\omega_{ibz}^b$ 表示载体坐标系下z轴的角速度值;

[0013] IMU采集的加速度计数据 $f_x^b, f_y^b, f_z^b$ ,其中: $f_x^b$ 表示载体系下x轴的加速度值; $f_y^b$ 表示载体系下y轴的加速度值; $f_z^b$ 表示载体系下z轴的加速度值。

[0014] DVL采集的四个波束通道的数据: $V_{DVL\_1}^d, V_{DVL\_2}^d, V_{DVL\_3}^d, V_{DVL\_4}^d$ ,其中: $V_{DVL\_1}^d$ 表示DVL波束通道1输出的速度信息; $V_{DVL\_2}^d$ 表示DVL波束通道2输出的速度信息; $V_{DVL\_3}^d$ 表示DVL波束通道3输出的速度信息; $V_{DVL\_4}^d$ 表示DVL波束通道4输出的速度信息;输出量:载体的速度信息: $V_x^n, V_y^n, V_z^n$ ,其中: $V_x^n$ 表示导航系下x轴的速度信息; $V_y^n$ 表示导航系下y轴的速度信息; $V_z^n$ 表示导航系下z轴的速度信息;

[0015] 载体的位置信息: $\lambda, L, h$ ,其中: $\lambda$ 表示地理经度; $L$ 表示地理纬度; $h$ 表示高度;

[0016] 所述的基于SINS/DVL紧组合的水下航行器导航方法,步骤1中所述的建立状态方程,具体包括如下步骤:

[0017] 定义建立的状态方程如下:

$$[0018] \quad \dot{X} = FX + GW$$

[0019] 其中,F表示状态转移矩阵;X表示状态向量;G表示系统噪声矩阵;W表示系统噪声矢量,状态向量为21维,表示如下:

$$[0020] \quad X = \begin{bmatrix} \phi_x & \phi_y & \phi_z & \delta V_E^n & \delta V_N^n & \delta V_U^n & \delta \lambda & \delta L & \delta h & \nabla_x & \nabla_y & \nabla_z & \varepsilon_x & \varepsilon_y & \varepsilon_z \\ b_{D1} & b_{D2} & b_{D3} & b_{D4} & K_D & b_{PS} \end{bmatrix}^T$$

[0021] 其中, $[\phi_x \ \phi_y \ \phi_z]^T$ 表示俯仰、横滚、航向姿态角误差; $[\delta V_E^n \ \delta V_N^n \ \delta V_U^n]^T$ 表示东向、北向、天向速度误差; $[\delta \lambda \ \delta L \ \delta h]^T$ 表示经度、纬度、高度误差; $[\nabla_x \ \nabla_y \ \nabla_z]^T$ 表示加速度计零偏; $[\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z]^T$ 表示陀螺零偏; $[b_{D1} \ b_{D2} \ b_{D3} \ b_{D4}]^T$ 表示DVL四个波束零偏; $K_D$ 表示DVL刻度因子; $b_{PS}$ 表示深度计零偏;状态转移矩阵F表示为:

$$[0022] \quad F = \begin{bmatrix} M_{aa} & M_{av} & M_{ap} & -C_b^n & 0_{3 \times 3} \\ M_{va} & M_{vv} & M_{vp} & 0_{3 \times 3} & C_b^n & 0_{3 \times 6} \\ 0_{3 \times 3} & M_{pv} & M_{pp} & C_b^n & 0_{3 \times 3} \\ & & & 0_{12 \times 15} \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} C_b^n & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & C_b^n \\ 0_{15 \times 1} & 0_{15 \times 1} \end{bmatrix}, \quad W = \begin{bmatrix} W_g^b \\ W_a^b \end{bmatrix}$$

[0023] 其中,



$$[0024] \quad M_{aa} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_{ie} \sin L + \frac{V_E \tan L}{R_N + h} & -\omega_{ie} \cos L - \frac{V_E}{R_N + h} \\ -\omega_{ie} \sin L - \frac{V_E \tan L}{R_N + h} & 0 & -\frac{V_N}{R_M + h} \\ \omega_{ie} \cos L + \frac{V_E}{R_N + h} & \frac{V_E}{R_M + h} & 0 \end{bmatrix}$$

$$[0025] \quad M_{av} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{R_M + h} & 0 \\ \frac{1}{R_N + h} & 0 & 0 \\ \frac{\tan L}{R_N + h} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad M_{ap} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{V_N}{(R_M + h)^2} \\ -\omega_{ie} \sin L & 0 & -\frac{V_E}{(R_N + h)^2} \\ \omega_{ie} \cos L + \frac{V_E \sec^2 L}{R_N} & 0 & -\frac{V_E \tan L}{(R_N + h)^2} \end{bmatrix}$$

$$[0026] \quad M_{va} = \begin{bmatrix} 0 & f_U^n & f_N^n \\ f_U^n & 0 & f_E^n \\ f_N^n & f_E^n & 0 \end{bmatrix}, \quad M_{vv} = \begin{bmatrix} \frac{V_N \tan L - V_U}{R_N + h} & 2\omega_{ie} \sin L + \frac{V_E \tan L}{R_N + h} & -2\omega_{ie} \cos L - \frac{V_E}{R_N + h} \\ -2\omega_{ie} \sin L - \frac{2V_E \tan L}{R_N + h} & \frac{V_U}{R_M + h} & -\frac{V_E}{R_M + h} \\ 2\omega_{ie} \cos L + \frac{2V_N}{R_N + h} & \frac{2V_N}{R_M + h} & 0 \end{bmatrix}$$

$$[0027] \quad M_{pv} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{R_M + h} & 0 \\ \frac{\sec L}{R_N + h} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad M_{pp} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{V_N}{(R_M + h)^2} \\ \frac{V_E \sec L \tan L}{R_N + h} & 0 & -\frac{V_E \sec L}{(R_N + h)^2} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[0028] \quad M_{vp} = \left( \mathbf{V}^n \times \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{V_N}{(R_M + h)^2} \\ -2\omega_{ie} \sin L & 0 & -\frac{V_E}{(R_N + h)^2} \\ 2\omega_{ie} \cos L + \frac{V_E \sec^2 L}{R_N} & 0 & -\frac{V_E \tan L}{(R_N + h)^2} \end{bmatrix} + M_4 \right)$$

$$[0029] \quad M_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -g_e \sin 2L(\beta - 4\beta_1 \cos 2L) & 0 & \beta_2 \end{bmatrix}$$

[0030] 其中： $C_b^n$ 表示b系到n系的姿态转移矩阵； $\beta$ 表示重力扁率； $w_g^b$ 表示加速度计噪声； $w_a^b$ 表示陀螺噪声； $\omega_{ie}$ 表示地球自转角速率； $V_E$ 表示东向速度； $V_N$ 表示北向速度； $V_U$ 表示天向速度； $f_U^n$ 表示导航系下天向加速度； $f_E^n$ 表示导航系下东向加速度； $f_N^n$ 表示导航系下北向加速度； $L$ 表示地理纬度； $h$ 表示高度； $\beta_1 = (1/8)(2\beta f + f^2)$ ， $\beta_2 = 3.08 \times 10^{-6} \text{s}^{-2}$ ； $f$ 表示椭球扁率；

[0031] 所述的基于SINS/DVL紧组合的水下航行器导航方法，步骤2中所述的建立量测方程，具体包括如下步骤：

[0032] 定义建立的量测方程如下：

[0033]  $Z=HX+V$

[0034] 其中,H为量测方程转移矩阵,X为状态向量;V为量测噪声,具体计算流程如下:

[0035] DVL坐标系定义为d系;载体坐标系定义为b系;导航坐标系定位为n系,在忽略杆臂误差情况下,以水下航行器为研究对象;

[0036] 在忽略传感器误差情况下,定义载体坐标系下SINS的速度为 $V_{SINS}^b = [V_x^b \ V_y^b \ V_z^b]^T$ ;

导航系下SINS的速度为 $V_{SINS}^n = [V_x^n \ V_y^n \ V_z^n]^T$ ;DVL坐标系下SINS的速度为

$V_{SINS}^d = [V_{SINS\_1}^d \ V_{SINS\_2}^d \ V_{SINS\_3}^d \ V_{SINS\_4}^d]^T$ ;DVL的输出速度为 $V_{DVL}^d = [V_{DVL\_1}^d \ V_{DVL\_2}^d \ V_{DVL\_3}^d \ V_{DVL\_4}^d]^T$ ,则

可以得到如下式子:

[0037]  $V_{DVL}^d = V_{SINS}^d = C_b^d C_n^b V_{SINS}^n$

[0038] 其中, $C_n^b$ 表示导航系到载体系的转移矩阵; $C_b^d$ 表示载体系到DVL坐标系的转移矩阵可表示为:

$$[0039] \quad C_b^d = \begin{bmatrix} 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & -\cos \alpha & -\sin \alpha \\ -\cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \end{bmatrix}, \quad \alpha = 70^\circ$$

[0040] 其中, $\alpha$ 表示波束与水下航行器的水平夹角;

[0041] 定义深度计误差模型为:

[0042]  $\tilde{H}_{PS} = H_{PS} + \delta b_{PS} + w_{PS}$

[0043] 其中, $\tilde{H}_{PS}$ 为传感器测量值; $H_{PS}$ 为真实值; $\delta b_{PS}$ 为深度计零偏; $w_{PS}$ 为测量噪声;

[0044] DVL测量误差模型定义为:

[0045]  $\tilde{V}_{DVL}^d = (1 + K_D) V_{DVL}^d + \delta b_D + w_D$

[0046] 其中, $\tilde{V}_{DVL}^d$ 为DVL波束测量值; $K_D$ 为刻度因子; $V_{DVL}^d$ 为波束真值; $\delta b_D$ 为波束零偏; $w_D$ 为波束噪声;

[0047] 考虑到IMU和DVL之间存在安装角误差,假设经过标定补偿后的安装角误差为:

[0048]  $\varphi = [\varphi_x \ \varphi_y \ \varphi_z]^T$

[0049] 则载体坐标系到DVL坐标系的计算值为:

[0050]  $\tilde{C}_b^d = C_b^d (I_{3 \times 3} + \varphi \times)$

[0051] 根据以上分析,SINS解算得到的速度转换到DVL坐标系下的计算公式为:

[0052] 
$$\begin{aligned} \tilde{V}_{SINS}^d &= \tilde{C}_b^d \tilde{C}_n^b \tilde{V}_{SINS}^n = \tilde{C}_b^d C_n^b (I_{3 \times 3} + \varphi \times) (V_{SINS}^n + \delta V_{SINS}^n) \\ &\approx \tilde{C}_b^d C_n^b V_{SINS}^n + \tilde{C}_b^d C_n^b \delta V_{SINS}^n + \tilde{C}_b^d C_n^b \varphi \times V_{SINS}^n \end{aligned}$$

[0053] 进一步可以得到:

[0054]  $\tilde{V}_{SINS}^d = V_{DVL}^d + \tilde{C}_b^d C_n^b \delta V_{SINS}^n - \tilde{C}_b^d C_n^b V_{SINS}^n \times \varphi$

[0055] 则量测信息的误差方程为:

$$\begin{aligned}
\tilde{V}_{DVL}^d - \tilde{V}_{SINS}^d &= (1 + K_D) V_{DVL}^d + \delta b_D + w_D - V_{DVL}^d - \tilde{C}_b^d C_n^b \delta V_{SINS}^n + \tilde{C}_b^d C_n^b V_{SINS}^n \times \phi \\
[0056] \quad &= V_{DVL}^d K_D + \delta b_D + w_D - \tilde{C}_b^d C_n^b \delta V_{SINS}^n + \tilde{C}_b^d C_n^b V_{SINS}^n \times \phi \\
&= V_{DVL}^d K_D + \delta b_D + w_D - C_b^d (I_{3 \times 3} + \varphi \times) C_n^b \delta V_{SINS}^n + C_b^d (I_{3 \times 3} + \varphi \times) C_n^b V_{SINS}^n \times \phi
\end{aligned}$$

[0057] 根据以上分析,量测方程中的量测值Z、转移矩阵H、和噪声V分别为:

$$[0058] \quad Z = \begin{bmatrix} \tilde{V}_{DVL\_1}^d - \tilde{V}_{SINS\_1}^d \\ \tilde{V}_{DVL\_2}^d - \tilde{V}_{SINS\_2}^d \\ \tilde{V}_{DVL\_3}^d - \tilde{V}_{SINS\_3}^d \\ \tilde{V}_{DVL\_4}^d - \tilde{V}_{SINS\_4}^d \\ \tilde{H}_{PS} - H_{PS} \end{bmatrix}$$

$$[0059] \quad H = \begin{bmatrix} 0_{4 \times 3} & -C_b^d (I_{3 \times 3} + \varphi \times) C_n^b & C_b^d (I_{3 \times 3} + \varphi \times) C_n^b V_{SINS}^n \times & 0_{4 \times 6} & I_{4 \times 4} & V_{DVL}^d & 0_{4 \times 1} \\ & & & -1 & & 0_{1 \times 1} & 1 \end{bmatrix}$$

$$[0060] \quad V = [w_D \quad w_{PS}]^T.$$

[0061] 所述的基于SINS/DVL紧组合的水下航行器导航方法,步骤3中所述的DVL波束信息缺失处理,具体包括以下步骤:

[0062] 首先引入流速固有误差公式,评估数据质量是否有效,具体为:

$$[0063] \quad V_{error} = V_{DVL\_1}^d - V_{DVL\_2}^d + V_{DVL\_3}^d - V_{DVL\_4}^d$$

[0064] 通过分析可知,只要所测水底均匀,则无论系统怎样摇摆 $V_{error}$ 都基本趋近于零,且四路回波认为是有效数据;如果所测流场不均匀,也要看 $V_{error}$ 来确定不均匀的程度,用于判断四路回波数据的有效性;

[0065] 对于四通道DVL波束配置的DVL设备其波束信息存在以下特点:

$$[0066] \quad \begin{cases} V_{DVL\_1}^d = -V_{DVL\_3}^d \\ V_{DVL\_2}^d = V_{DVL\_4}^d \end{cases}$$

[0067] 因此,当DVL某个通道信息缺失时采用对角线方向的数据取反来替代,定义为虚拟波束法;当DVL信息缺失情况下采用虚拟波束法进行处理。

[0068] 所述的基于SINS/DVL紧组合的水下航行器导航方法,步骤4中所述的DVL波束信息受到洋流影响处理,具体包括如下步骤:

[0069] 步骤4.1:在d系下计算SINS和DVL之间的速度差:

$$[0070] \quad \begin{cases} \tilde{V}_{DVL\_1}^d - \tilde{V}_{SINS\_1}^d = V_{error\_1}^d \\ \tilde{V}_{DVL\_2}^d - \tilde{V}_{SINS\_2}^d = V_{error\_2}^d \\ \tilde{V}_{DVL\_3}^d - \tilde{V}_{SINS\_3}^d = V_{error\_3}^d \\ \tilde{V}_{DVL\_4}^d - \tilde{V}_{SINS\_4}^d = V_{error\_4}^d \end{cases}$$

[0071] 步骤4.2:判断波束是否受到洋流影响,当光束测量不受水流影响时,该光束的波束测量值服从零均值高斯分布;当存在洋流时,波束测量值将发生很大变化,但SINS的速度精度保持不变,因此,不再满足零均值高斯分布,设定阈值用于确定光束测量是否受洋流影响:

$$[0072] \quad \begin{cases} V_{error\_1}^d < \beta, normal \\ V_{error\_1}^d \geq \beta, abnormal \end{cases}$$

[0073] 步骤4.3:用虚拟波束法处理受到洋流影响的波束测量信息,如果无法使用虚拟波束法,则将隔离波束测量。

[0074] 所述的基于SINS/DVL紧组合的水下航行器导航方法,步骤5中所述的卡尔曼递推估计具体是:

$$[0075] \quad X_{k,k-1} = FX_{k-1}$$

$$[0076] \quad P_{k,k-1} = FP_{k-1}F^T + GWG^T$$

$$[0077] \quad K_k = P_{k,k-1}H^T(H P_{k,k-1}H + R)^{-1}$$

$$[0078] \quad X_k = X_{k,k-1} + K_k(Z_k - HX_{k,k-1})$$

$$[0079] \quad P_k = (I - K_k)P_{k,k-1}$$

[0080] 有益效果:

[0081] 与现有技术相比,本发明具有如下优点:

[0082] (1) 本发明充分利用了DVL四个波束测量信息,将量测值扩展到5维,当DVL波束少于3个情况下仍能够完成组合导航功能。

[0083] (2) 本发明提出针对DVL波束信息缺失和DVL信息受到影响下的容错处理机制。同时引入虚拟波束方法,提高了系统的抗干扰能力。

[0084] (3) 本发明将DVL和PS等辅助传感器引入建模中,实现了传感器误差参数的估计与补偿,进一步提高了组合导航精度。

[0085] (4) 目前关于SINS/DVL紧组合的研究相对较少,本发明为紧组合的研究方向提供了理论参考价值。

## 附图说明

[0086] 图1为本发明所描述的复杂环境下SINS/DVL紧组合导航方法原理图;

[0087] 图2为本发明实现流程图。

## 具体实施方式

[0088] 以下将结合具体实施例对本发明提供的技术方案进行详细说明,应理解下述具体实施方式仅用于说明本发明而并不用于限制本发明的范围。

[0089] 下面对本发明技术方案进行详细说明,但是本发明的保护范围不局限于所述实施例。

[0090] 1、一种复杂环境下SINS/DVL紧组合导航方法,其特征为:

[0091] 已知量:IMU采集的光纤陀螺数据; $\omega_{ibx}^b, \omega_{iby}^b, \omega_{ibz}^b$

[0092] IMU采集的加速度计数据 $f_x^b, f_y^b, f_z^b$ ;

[0093] DVL采集的四个波束通道的数据: $V_{DVL\_1}^d, V_{DVL\_2}^d, V_{DVL\_3}^d, V_{DVL\_4}^d$  输出量:载体的速度信息:

$$V_x^n, V_y^n, V_z^n。$$

[0094] 载体的位置信息: $\lambda, L, h$

[0095] 步骤1:状态方程建立。

[0096] 定义建立的状态方程如下:

$$[0097] \quad \dot{X} = FX + GW$$

[0098] 其中,F表示状态转移矩阵;X表示状态向量;G表示系统噪声矩阵;W表示系统噪声矢量。状态向量为21维,可表示如下:

$$[0099] \quad X = [\phi_x \quad \phi_y \quad \phi_z \quad \delta V_E^n \quad \delta V_N^n \quad \delta V_U^n \quad \delta \lambda \quad \delta L \quad \delta h \quad \nabla_x \quad \nabla_y \quad \nabla_z \quad \varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \\ b_{D1} \quad b_{D2} \quad b_{D3} \quad b_{D4} \quad K_D \quad b_{PS}]^T$$

[0100] 其中,  $[\phi_x \quad \phi_y \quad \phi_z]^T$ 表示俯仰、横滚、航向姿态角误差;  $[\delta V_E^n \quad \delta V_N^n \quad \delta V_U^n]^T$ 表示东向、北向、天向速度误差;  $[\delta \lambda \quad \delta L \quad \delta h]^T$ 表示经度、纬度、高度误差;  $[\nabla_x \quad \nabla_y \quad \nabla_z]^T$ 表示加速度计零偏;  $[\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z]^T$ 表示陀螺零偏;  $[b_{D1} \quad b_{D2} \quad b_{D3} \quad b_{D4}]^T$ 表示DVL四个波束零偏;  $K_D$ 表示DVL刻度因子;  $b_{PS}$ 表示深度计零偏。状态转移矩阵F可表示为:

$$[0101] \quad F = \begin{bmatrix} M_{aa} & M_{av} & M_{ap} & -C_b^n & 0_{3 \times 3} \\ M_{va} & M_{vv} & M_{vp} & 0_{3 \times 3} & C_b^n & 0_{3 \times 6} \\ 0_{3 \times 3} & M_{pv} & M_{pp} & C_b^n & 0_{3 \times 3} \\ & & & & & 0_{12 \times 15} \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} C_b^n & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & C_b^n \\ 0_{15 \times 1} & 0_{15 \times 1} \end{bmatrix}, \quad W = \begin{bmatrix} W_g^b \\ W_a^b \end{bmatrix}$$

[0102] 其中,

$$[0103] \quad M_{aa} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_{ie} \sin L + \frac{V_E \tan L}{R_N + h} & -\omega_{ie} \cos L - \frac{V_E}{R_N + h} \\ -\omega_{ie} \sin L - \frac{V_E \tan L}{R_N + h} & 0 & -\frac{V_N}{R_M + h} \\ \omega_{ie} \cos L + \frac{V_E}{R_N + h} & \frac{V_E}{R_M + h} & 0 \end{bmatrix}$$

$$[0104] \quad M_{av} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{R_M + h} & 0 \\ \frac{1}{R_N + h} & 0 & 0 \\ \frac{\tan L}{R_N + h} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad M_{ap} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{V_N}{(R_M + h)^2} \\ -\omega_{ie} \sin L & 0 & -\frac{V_E}{(R_N + h)^2} \\ \omega_{ie} \cos L + \frac{V_E \sec^2 L}{R_N} & 0 & -\frac{V_E \tan L}{(R_N + h)^2} \end{bmatrix}$$

$$[0105] \quad M_{va} = \begin{bmatrix} 0 & f_U^n & f_N^n \\ f_U^n & 0 & f_E^n \\ f_N^n & f_E^n & 0 \end{bmatrix}, \quad M_{vv} = \begin{bmatrix} \frac{V_N \tan L - V_U}{R_N + h} & 2\omega_{ie} \sin L + \frac{V_E \tan L}{R_N + h} & -2\omega_{ie} \cos L - \frac{V_E}{R_N + h} \\ -2\omega_{ie} \sin L - \frac{2V_E \tan L}{R_N + h} & \frac{V_U}{R_M + h} & -\frac{V_E}{R_M + h} \\ 2\omega_{ie} \cos L + \frac{2V_N}{R_N + h} & \frac{2V_N}{R_M + h} & 0 \end{bmatrix}$$

$$[0106] \quad M_{pv} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{R_M + h} & 0 \\ \frac{\sec L}{R_N + h} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad M_{pp} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{V_N}{(R_M + h)^2} \\ \frac{V_E \sec L \tan L}{R_N + h} & 0 & -\frac{V_E \sec L}{(R_N + h)^2} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[0107] \quad M_{vp} = (\mathbf{V}^n \times) \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{V_N}{(R_M + h)^2} \\ -2\omega_{ie} \sin L & 0 & -\frac{V_E}{(R_N + h)^2} \\ 2\omega_{ie} \cos L + \frac{V_E \sec^2 L}{R_N} & 0 & -\frac{V_E \tan L}{(R_N + h)^2} \end{pmatrix} + M_4$$

$$[0108] \quad M_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -g_e \sin 2L(\beta - 4\beta_1 \cos 2L) & 0 & \beta_2 \end{bmatrix}$$

[0109] 步骤2:量测方程建立。

[0110] 定义建立的量测方程如下:

$$[0111] \quad Z = HX + V$$

[0112] 其中,H为量测方程转移矩阵,具体计算流程如下:

[0113] DVL坐标系定义为d系;载体坐标系定义为b系;导航坐标系定位为n系。在忽略杆臂误差情况下,以水下航行器为研究对象。

[0114] 在忽略传感器误差情况下,我们定义载体坐标系下SINS的速度为  $V_{SINS}^b = [V_x^b \ V_y^b \ V_z^b]^T$ ; 导航系下SINS的速度为  $V_{SINS}^n = [V_x^n \ V_y^n \ V_z^n]^T$ ; DVL坐标系下SINS的速度为  $V_{SINS}^d = [V_{SINS\_1}^d \ V_{SINS\_2}^d \ V_{SINS\_3}^d \ V_{SINS\_4}^d]^T$ ; DVL的输出速度为  $V_{DVL}^d = [V_{DVL\_1}^d \ V_{DVL\_2}^d \ V_{DVL\_3}^d \ V_{DVL\_4}^d]^T$ , 则可以得到如下式子:

$$[0115] \quad V_{DVL}^d = V_{SINS}^d = C_b^d C_n^b V_{SINS}^n$$

[0116] 其中,  $C_n^b$  表示导航系到载体系的转移矩阵;  $C_b^d$  表示载体系到DVL坐标系的转移矩阵可表示为:

$$[0117] \quad C_b^d = \begin{bmatrix} 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & -\cos \alpha & -\sin \alpha \\ -\cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \end{bmatrix}, \quad \alpha = 70^\circ$$

[0118] 其中, $\alpha$ 表示波束与水下航行器的水平夹角。

[0119] 我们定义深度计误差模型为:

$$[0120] \quad \tilde{H}_{PS} = H_{PS} + \delta b_{PS} + w_{PS}$$

[0121] 其中,  $\tilde{H}_{PS}$  为传感器测量值;  $H_{PS}$  为真实值;  $\delta b_{PS}$  为深度计零偏;  $w_{PS}$  为测量噪声。

[0122] DVL测量误差模型定义为:

$$[0123] \quad \tilde{V}_{DVL}^d = (1 + K_D) V_{DVL}^d + \delta b_D + w_D$$

[0124] 其中,  $\tilde{V}_{DVL}^d$  为DVL波束测量值;  $K_D$  为刻度因子;  $V_{DVL}^d$  为波束真值;  $\delta b_D$  为波束零偏;  $w_D$  为波束噪声。

[0125] 考虑到IMU和DVL之间存在安装角误差,假设经过标定补偿后的安装角误差为:

$$[0126] \quad \varphi = [\varphi_x \ \varphi_y \ \varphi_z]^T$$

[0127] 则载体坐标系到DVL坐标系的计算值为:

$$[0128] \quad \tilde{C}_b^d = C_b^d (I_{3 \times 3} + \varphi \times)$$

[0129] 根据以上分析,SINS解算得到的速度转换到DVL坐标系下的计算公式为:

$$[0130] \quad \begin{aligned} \tilde{V}_{SINS}^d &= \tilde{C}_b^d \tilde{C}_n^b \tilde{V}_{SINS}^n = \tilde{C}_b^d C_n^b (I_{3 \times 3} + \varphi \times) (V_{SINS}^n + \delta V_{SINS}^n) \\ &\approx \tilde{C}_b^d C_n^b V_{SINS}^n + \tilde{C}_b^d C_n^b \delta V_{SINS}^n + \tilde{C}_b^d C_n^b \varphi \times V_{SINS}^n \end{aligned}$$

[0131] 进一步可以得到:

$$[0132] \quad \tilde{V}_{SINS}^d = V_{DVL}^d + \tilde{C}_b^d C_n^b \delta V_{SINS}^n - \tilde{C}_b^d C_n^b V_{SINS}^n \times \varphi$$

[0133] 则量测信息的误差方程为:

$$[0134] \quad \begin{aligned} \tilde{V}_{DVL}^d - \tilde{V}_{SINS}^d &= (1 + K_D) V_{DVL}^d + \delta b_D + w_D - V_{DVL}^d - \tilde{C}_b^d C_n^b \delta V_{SINS}^n + \tilde{C}_b^d C_n^b V_{SINS}^n \times \varphi \\ &= V_{DVL}^d K_D + \delta b_D + w_D - \tilde{C}_b^d C_n^b \delta V_{SINS}^n + \tilde{C}_b^d C_n^b V_{SINS}^n \times \varphi \\ &= V_{DVL}^d K_D + \delta b_D + w_D - C_b^d (I_{3 \times 3} + \varphi \times) C_n^b \delta V_{SINS}^n + C_b^d (I_{3 \times 3} + \varphi \times) C_n^b V_{SINS}^n \times \varphi \end{aligned}$$

[0135] 根据以上分析,量测方程中的量测值Z、转移矩阵H、和噪声V分别为:

$$[0136] \quad Z = \begin{bmatrix} \tilde{V}_{DVL\_1}^d - \tilde{V}_{SINS\_1}^d \\ \tilde{V}_{DVL\_2}^d - \tilde{V}_{SINS\_2}^d \\ \tilde{V}_{DVL\_3}^d - \tilde{V}_{SINS\_3}^d \\ \tilde{V}_{DVL\_4}^d - \tilde{V}_{SINS\_4}^d \\ \tilde{H}_{PS} - H_{PS} \end{bmatrix}$$

$$[0137] \quad H = \begin{bmatrix} 0_{4 \times 3} & -C_b^d (I_{3 \times 3} + \varphi \times) C_n^b & C_b^d (I_{3 \times 3} + \varphi \times) C_n^b V_{SINS}^n \times & 0_{4 \times 6} & I_{4 \times 4} & V_{DVL}^d & 0_{4 \times 1} \\ 0_{1 \times 8} & & & -1 & & 0_{1 \times 1} & 1 \end{bmatrix}$$

$$[0138] \quad V = [w_D \ w_{PS}]^T$$

[0139] 步骤3:DVL波束信息缺失处理。

[0140] DVL一般有两种工作模式:低跟踪模式和水跟踪模式。当工作在低跟踪模式下,由于复杂水下环境会导致DVL存在波束信息缺失问题。当工作在对水模式下,由于海洋洋流的影响,DVL波束信息容易受到干扰,因此针对这两种情况,基于SINS/DVL紧组合导航方法解决如下:

[0141] 实际上,所测水底很少是完全均匀的,即DVL在同一深度上所测相对水底的速度大小与方向往往不同。水底的不均匀性会引入不同程度的速度固有误差。四波束Janus阵型结构可以验证水底的均匀性情况。为了量化水底不均匀性造成的影响,可以引入流速固有误差公式,这是评估数据质量是否有效的因素。具体为:

$$[0142] \quad V_{error} = V_{DVL\_1}^d - V_{DVL\_2}^d + V_{DVL\_3}^d - V_{DVL\_4}^d$$

[0143] 通过分析可知,只要所测水底均匀,则无论系统怎样摇摆 $V_{error}$ 都基本趋近于零,且四路回波认为是有效数据;如果所测流场不均匀,也要看 $V_{error}$ 来确定不均匀的程度,用于判断四路回波数据的有效性。

[0144] 对于四通道DVL波束配置的DVL设备其波束信息存在以下特点:

$$[0145] \quad \begin{cases} V_{DVL\_1}^d = -V_{DVL\_3}^d \\ V_{DVL\_2}^d = V_{DVL\_4}^d \end{cases}$$

[0146] 因此,当DVL某个通道信息缺失时可以采用对角线方向的数据取反来替代。如当

DVL波束通道1的信息缺失时可以用过通道3的信息取反来替代通道1的信息,从而提高了组合导航的容错性。定义这种方法为虚拟波束法。当DVL信息缺失情况下采用虚拟波束法进行处理。

[0147] 步骤4:DVL波束信息受到洋流影响处理。

[0148] ①在d系下计算SINS和DVL之间的速度差;

$$[0149] \begin{cases} \tilde{V}_{DVL\_1}^d - \tilde{V}_{SINS\_1}^d = V_{error\_1}^d \\ \tilde{V}_{DVL\_2}^d - \tilde{V}_{SINS\_2}^d = V_{error\_2}^d \\ \tilde{V}_{DVL\_3}^d - \tilde{V}_{SINS\_3}^d = V_{error\_3}^d \\ \tilde{V}_{DVL\_4}^d - \tilde{V}_{SINS\_4}^d = V_{error\_4}^d \end{cases}$$

[0150] ②判断波束是否受到洋流影响。以波束1测量为例,当光束测量不受水流影响时,该值服从零均值高斯分布。当存在洋流时,波束测量值将发生很大变化(误差变大),但SINS的速度精度保持不变。因此,不再满足零均值高斯分布。设定阈值可用于确定光束测量是否受洋流影响。

$$[0151] \begin{cases} V_{error\_1}^d < \beta, normal \\ V_{error\_1}^d \geq \beta, abnormal \end{cases}$$

[0152] ③用虚拟波束法处理受到洋流影响的波束测量信息。如果无法使用虚拟波束法,则将隔离波束测量。

[0153] 步骤5:基于卡尔曼滤波的数据融合处理。

[0154] 根据步骤1和步骤2中的状态方程和量测方程,建立卡尔曼递推估计如下:

$$[0155] X_{k,k-1} = FX_{k-1}$$

$$[0156] P_{k,k-1} = FP_{k-1}F^T + GWG^T$$

$$[0157] K_k = P_{k,k-1}H^T (HP_{k,k-1}H + R)^{-1}$$

$$[0158] X_k = X_{k,k-1} + K_k (Z_k - HX_{k,k-1})$$

$$[0159] P_k = (I - K_k)P_{k,k-1}$$

[0160] 将卡尔曼估计得到的状态向量反馈到SINS结果中便得到了最终的位置和速度信息。



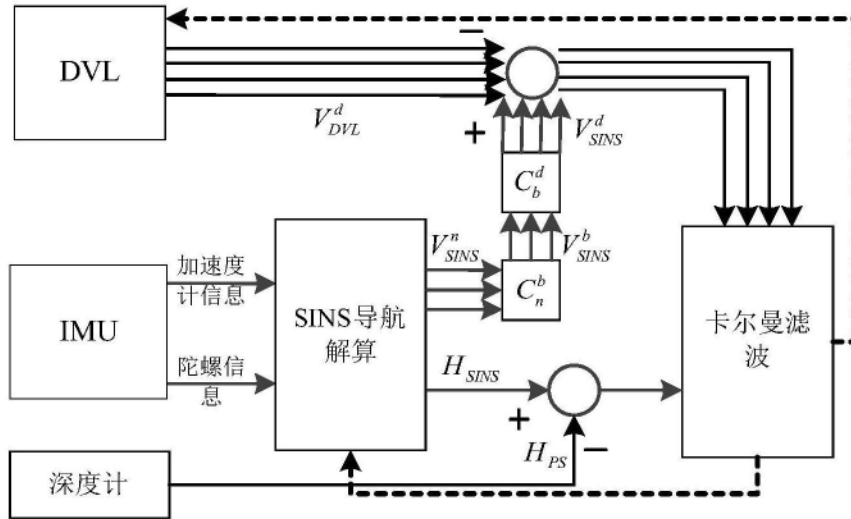


图1

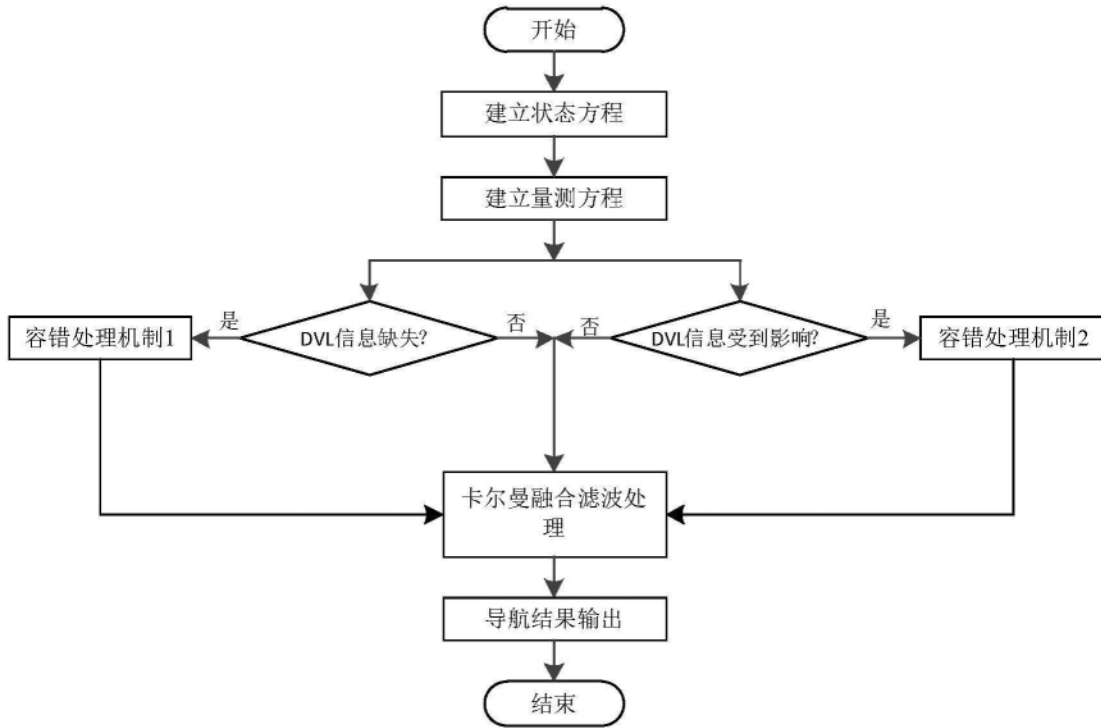


图2