

文章编号 1004-924X(2017)09-2508-08

水下潜航器的惯导/超短基线/多普勒测速 信息融合及容错验证

徐 博*, 郝 芮, 王 超, 张 勋, 张 娇
(哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:针对水下潜航器惯导系统的定位误差积累和容错性差等问题,分析了水声超短基线的相位差定位方法,推导了基于惯导提供实时位置、姿态误差角信息的惯导/超短基线(INS/USBL)导航解算过程及其坐标转换。结合惯导/多普勒测速(INS/DVL)滤波器,给出INS/USBL/DVL组合导航联邦滤波在3种信息融合算法下的应用。通过MATLAB仿真对导航算法进行了验证,结果表明该导航算法能够抑制惯导系统误差随时间发散的问题,能充分利用了3种导航系统提供的参数信息,且状态维数低,滤波收敛速度快,其中基于精度因子信息分配方法的导航系统误差最小。容错性验证结果显示,当超短基线出现故障时,重构后的组合导航系统在较高航速情况下依旧能提供有效的导航参数。所提出的INS/USBL/DVL组合导航联邦滤波方法能够精确地提供水下潜航器的各位导航参数信息,且具有较高的容错性和稳定性。

关键词:组合导航算法;惯性导航系统;超短基线定位系统;多普勒测速;联邦滤波

中图分类号:U666.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172509.2508

INS/USBL/DVL information fusion and fault-tolerant verification for underwater vehicles

XU Bo*, HAO Rui, WANG Chao, ZHANG Xun, ZHANG Jiao

(College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

* Corresponding author, E-mail: xubocarter@sina.com

Abstract: This paper focuses on the accumulated positioning errors and poorer fault tolerance of Inertial Navigation System (INS) in an underwater vehicle. The phase difference position of the underwater acoustic Ultra Short Base Line (USBL) was analyzed and the solution process and coordinate transformation of INS / USBL navigation was deduced based on real time positioning and attitude error angle information obtained by the INS. Finally, in combination of a INS / Doppler Velocity Log (INS/DVL) filter, the applications of the INS/USBL/DVL integrated navigation federation filtering in three kinds of information fusion algorithms. The fusion algorithm was verified by MATLAB simulation. The results demonstrate that algorithm is able to inhibit filtering divergence

收稿日期:2017-04-21;**修订日期:**2017-05-18.

基金项目:黑龙江省自然科学基金资助项目(No. QC2014C069);中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(No. HEUCF041702);国家自然科学基金资助项目(No. 61203225);黑龙江省博士后科研启动资金资助项目(No. LBH-Q15032);海洋工程国家重点实验室开放课题资助项目(No. 1616)

of INS. It makes the best of the parameter information obtained from three navigation system, and shows low state dimension and fast convergence speed. Among them, the navigation system based on precision factor has minimum system error. The fault tolerance verifies that the INS/USBL/DVL integrated navigation system still can provide effective navigation parameters at a higher navigation speed when the USBL was broken. It concludes that the proposed INS/USBL/DVL integrated navigation federation filtering algorithm is able to provide navigation parameter information with high fault tolerance and stability for underwater vehicles effectively.

Key words: integrated navigation algorithm; inertial navigation system; Ultra Short Base Line(USBL) system; Doppler Velocity Log(DVL); federated filtering

1 引言

海洋探测与开发具有极高的经济价值和战略意义,其中不容忽视的是水下潜航器的导航定位问题^[1]。实际工程时,常用惯导(Inertial Navigation System,INS)作为主参考系统来辅助其它传感器对水下潜航器进行组合导航定位。由于这种组合导航存在水下全球定位系统(GPS)无信号、电磁波传播途径能量衰减等问题,近些年水声基线定位成为了各国海洋军事研究的重要方向。超短基线(USBL)以其基阵尺寸小、使用灵活和机动范围较大等优点更契合水下及深海定位对导航系统的严苛需求^[2-4];惯导能提供给载体完备的姿态、速度和位置等导航信息,短时间、精度高且隐蔽性好,但长航时其位置误差会随时间积累;声学多普勒测速仪(DVL)能提供给载体准确的速度信息,但其定位误差也随航程积累^[5],而三者构成的组合导航系统,能够充分利用各传感器的特点,提高系统外界观测的完整性。另外,提高了导航系统的容错性和可靠性,采用联邦滤波并行运算来增加了系统的余度和稳定性。

目前,联邦滤波器的固定比例信息分配原则已经不能满足复杂导航系统的各方面要求,对于特定的导航系统合理地选择各子滤波器的动态信息分配系数对提高系统的容错性和可靠性具有重要意义。张亚文提出了一种INS/USBL/DVL水下组合导航集中滤波算法,该算法需要实时更新量测方程及维数且收敛速度慢,故障时对导航参数误差影响剧烈,由此可知,对于高精度水下潜

航器而言,提高系统的容错性更为重要^[6]。张涛推导了INS、DVL、USBL和磁罗经导航(MCP)的基本耦合原理,建立了它们的状态方程和量测方程,但没有给出具体信息分配方法,对提高AUV系统容错性的联邦滤波方法也没有具体说明^[7]。

本文针对高自主性的水下潜航器,介绍超短基线定位原理,辅助INS提供的导航参数信息,推导了基于位置量测坐标转换的INS/USBL量测方程,根据INS、USBL、DVL子导航系统各自的特点,提出了基于联邦滤波的组合导航系统,建立了INS/USBL/DVL组合系统滤波模型、给出了联邦滤波器结构,对比基于3种不同信息分配方法的组合导航系统,通过仿真验证了该算法的可行性。

2 超短基线定位系统原理

超短基线定位技术是近年来水下定位的热门研究方向。其主要由发射换能器、应答器和声学基阵组成,换能器一般由几个水听器构成。船底的换能器发射询问信号至水下已知位置的应答器,然后应答器发射的应答信号被声学基阵的各个水听器接收,从而得到目标的定位信息。

2.1 USBL基于相位差的定位原理

建立基阵坐标系 $oxyz$,设定基阵阵元的间距为 d ,其坐标为 $(\pm d/2, \pm d/2)$,4个水听器分别位于2条相互垂直的基线上(即 x 轴和 y 轴),其中心位于坐标原点。目标位于坐标 $T(x_a, y_a, z_a)$

处, l 为斜距, m 为斜距 l 在水平面的投影, θ 为水平方位角, 即 m 与 x 轴的夹角, USBL 的定位原理如图 1 所示。

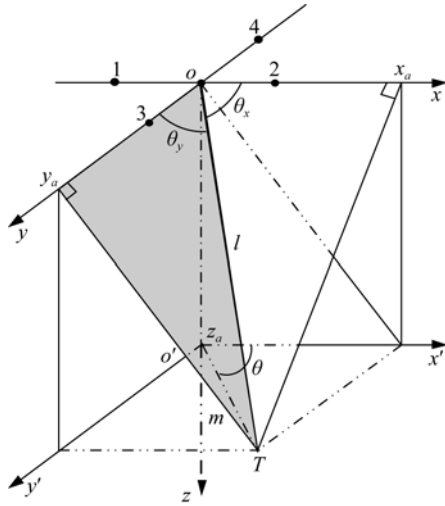


图 1 超短基线定位系统的定位原理
Fig. 1 Principle of USBL positioning system

由图 1 可知:

$$\begin{aligned} \theta &= \arctan\left(\frac{y_a}{x_a}\right) = \arctan\left(\frac{\cos \theta_y}{\sin \theta_x}\right), \\ m &= \sqrt{x_a^2 + y_a^2}, \\ z_a &= \sqrt{l^2 - m^2}. \end{aligned} \quad (1)$$

假设已知声波的波长为 λ , φ_x 和 φ_y 为位于 x 轴和 y 轴上水听器接收信号的相位差, 则有:

$$\begin{aligned} \varphi_x &= \frac{2\pi d}{\lambda} \cos \theta_x, \quad x_a = \frac{\lambda l}{2\pi d} \varphi_x, \\ \varphi_y &= \frac{2\pi d}{\lambda} \cos \theta_y, \quad y_a = \frac{\lambda l}{2\pi d} \varphi_y, \end{aligned} \quad (2)$$

式中: 斜距 $l = c \cdot T_n / 2$, c 为水中声波的传播速度, T_n 为换能器发射询问信号到接收到目标应答信号的时间。测量 USBL 的 φ_x , φ_y , c , T_n 等参数值后, 可解算出目标相对基阵坐标系的水平位置 (x_a, y_a) 、声波入射角 (θ_x, θ_y) 、水平方位角 θ 和斜距 l 等^[5]。

以 x 轴为例, 分析超短基线定位误差, 对 $x_a = \frac{\lambda l}{2\pi d} \varphi_x$ 方程两边求全微分得:

$$\Delta x_a = \frac{\lambda \varphi_x}{2\pi d} \Delta l + \frac{\lambda l}{2\pi d} \Delta \varphi_x + \frac{l \varphi_x}{2\pi d} \Delta \lambda - \frac{\lambda l \varphi_x \Delta d}{2\pi d^2}. \quad (3)$$

x 轴上位置测量相对误差为:

$$\frac{\Delta x_a}{x_a} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta \varphi_x}{\varphi_x} + \frac{\Delta \lambda}{\lambda} - \frac{\Delta d}{d}. \quad (4)$$

对 $l = cT$, $c = \lambda f$ 两边同时求全微分得:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta l}{l} &= \frac{\Delta T}{T} + \frac{\Delta c}{c}, \\ \Delta \lambda &= \frac{\Delta c}{f}. \end{aligned} \quad (5)$$

将上式代入式(4)得到位置相对定位精度:

$$\frac{\Delta x_a}{x_a} = \frac{\Delta T}{T} + \frac{\Delta \varphi_x}{\varphi_x} + 2 \frac{\Delta c}{c} - \frac{\Delta d}{d}. \quad (6)$$

同理易求得斜距相对定位精度:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta x_a}{l} &= \frac{\lambda \varphi_x}{2\pi d} \left[\frac{\Delta T}{T} + \frac{\Delta \varphi_x}{\varphi_x} + 2 \frac{\Delta c}{c} - \frac{\Delta d}{d} \right] = \\ & \left[\frac{\Delta T}{T} + \frac{\Delta \varphi_x}{\varphi_x} + 2 \frac{\Delta c}{c} - \frac{\Delta d}{d} \right] \cos \theta_x. \end{aligned} \quad (7)$$

装配过程中, 声学基阵的几何形状和尺寸被精确固定, 忽略误差 Δd ; 假定各项误差相互独立, 则斜距相对定位均方差为:

$$\begin{aligned} \delta_x^2 &= \left[\frac{\lambda \varphi_x}{2\pi d} \right]^2 \left[\left(\frac{\Delta T}{T} \right)^2 + 2 \left(\frac{\Delta c}{c} \right)^2 \right] + \\ & \left[\frac{\lambda}{2\pi d} \right]^2 (\Delta \varphi_x)^2 = \left[\frac{\Delta x_a}{l} \right]^2. \end{aligned} \quad (8)$$

时间测量误差 ΔT 和声速误差 Δc 并不大, 其相对误差在 10^{-3} 量级, 相位差测量误差 $\Delta \varphi_x$ 是影响定位精度的最重要因素, 此外, 声学基阵的偏移、声线曲率、安装误差角和姿态误差角等因素也很大程度上影响到超短基线定位系统的定位误差。国内外超短基线定位精度如表 1 所示:

表 1 国内外 USBL 定位精度

Tab. 1 USBL positioning accuracy at home and abroad

USBL 产品	国内超短基线定位系统	法国 IXSEA 公司 GAPS 型全球声学定位系统	美国 ORE 公司 TrackPoint3 型超短基线声学定位系统	美国 ORE 公司多功能水下声学应答器
定位精度	0.5% 斜距	0.2% 斜距	0.5% 斜距	0.5% 斜距

2.2 USBL 导航解算方程的坐标转换

取声学基阵中水听器的几何中心为超短基线定位系统坐标系(u 系)的原点,取 o_x, y, z 为东北天坐标系, u 系的 x, y, z 三坐标轴分别与载体坐标系(b 系)的坐标轴平行(若声学基阵的偏移和安装误差角等误差项为零时, u 系与 b 系完全重合)^[4]。 u 系(b 系)、 t 系和 e 系三者之间的关系如图3所示,则应答器的位置矢量为:

$$\mathbf{r} = \mathbf{R}^T(\mathbf{s} - \mathbf{p}), \quad (9)$$

式中: \mathbf{r} 为应答器在载体坐标系中的位置矢量,矩阵 $\mathbf{R} = \mathbf{C}_b^e$ 表示载体坐标系到地球坐标系的转换矩阵, \mathbf{s} 为应答器在地球坐标系中的已知位置矢量, \mathbf{p} 为载体在地球坐标系中的位置矢量。

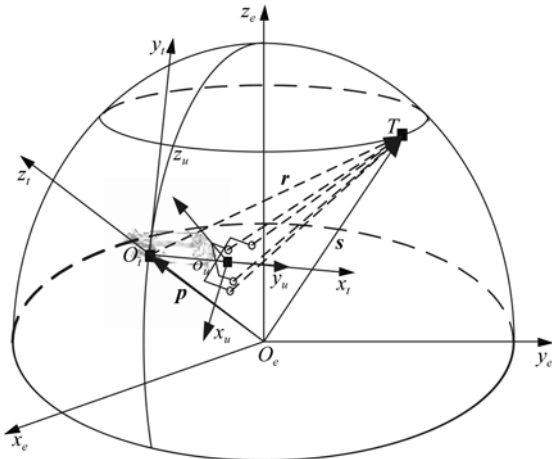


图2 USBL 系统坐标框图

Fig. 2 Diagram of system coordinate

3 INS/USBL 组合导航系统的数学模型

3.1 INS/USBL 组合导航系统状态方程

组合导航系统的状态方程为 $\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{F}\mathbf{X} + \mathbf{W}$ 。选取位置误差 ($\delta L, \delta \lambda, \delta h$)、东北天方向上的速度误差 ($\delta V_E, \delta V_N, \delta V_U$)、东北天方向上的平台误差角 ($\varphi_E, \varphi_N, \varphi_U$)、沿载体坐标系 x, y, z 轴上的陀螺仪的随机漂移 ($\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$) 和加速度计的零偏 ($\nabla_x, \nabla_y, \nabla_z$) 作为状态量, \mathbf{F}, \mathbf{W} 分别为 INS 系统矩阵和系统噪声。

3.2 INS/USBL 组合导航系统量测方程

地球坐标系(e 系)中,载体位置信息表示为

$\mathbf{p} = [L \ \lambda \ h]^T$, 其与地球直角坐标 (x, y, z) 的关系为:

$$\begin{aligned} x &= (R_N + h) \cos L \cos \lambda, \\ y &= (R_N + h) \cos L \sin \lambda, \\ z &= [R_N(1 - e^2) + h] \sin L. \end{aligned} \quad (10)$$

将式(10)求解全微分得:

$$\begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \delta L \\ \delta \lambda \\ \delta h \end{bmatrix}. \quad (11)$$

取 INS 与 USBL 的位置之差作为外部观测量,由式(9)得超短基线定位系统估计应答器的解算位置,在载体坐标系中可表示为:

$$\mathbf{B}_r = \mathbf{R}^T(\mathbf{s} - \mathbf{p}) + \mathbf{n}_r, \quad (12)$$

其向量形式为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B}_{rx} \\ \mathbf{B}_{ry} \\ \mathbf{B}_{rz} \end{bmatrix} = (\mathbf{C}_b^u \mathbf{C}_u^e)^T \begin{bmatrix} s_x - p_x \\ s_y - p_y \\ s_z - p_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{rx} \\ n_{ry} \\ n_{rz} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

式中 \mathbf{n}_r 表示 USBL 系统的位置测量噪声。

在导航解算过程中,INS 能够估算出载体在地球坐标系中的位置 $\hat{\mathbf{p}}$ 和旋转矩阵 $\hat{\mathbf{R}}$, 满足:

$$\hat{\mathbf{p}} = [\hat{p}_x \ \hat{p}_y \ \hat{p}_z]^T, \quad (14)$$

$$\hat{\mathbf{R}} = \mathbf{C}_b^e. \quad (15)$$

INS 估算出的应答器的位置信息在载体坐标系中表示为:

$$\mathbf{B}_r = \hat{\mathbf{R}}^T(\mathbf{s} - \hat{\mathbf{p}}), \quad (16)$$

其向量形式为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B}_{rx} \\ \mathbf{B}_{ry} \\ \mathbf{B}_{rz} \end{bmatrix} = \mathbf{C}_b^u \mathbf{C}_e^b \begin{bmatrix} s_x - \hat{p}_x \\ s_y - \hat{p}_y \\ s_z - \hat{p}_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{rx} \\ n_{ry} \\ n_{rz} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

由惯性导航系统的误差方程得 $\delta \mathbf{p}$ 和 $\hat{\mathbf{R}} \mathbf{R}^T$ 。

$$\delta \mathbf{p} = \hat{\mathbf{p}} - \mathbf{p}, \quad (18)$$

$$\hat{\mathbf{R}} \mathbf{R}^T = \mathbf{C}_b^e = \mathbf{I}_3 + [\boldsymbol{\varphi} \times], \quad (19)$$

其中 $[\boldsymbol{\varphi} \times]$ 为姿态误差角 3 个分量构成的反对称矩阵。将上式代入到式(12), 忽略二阶小量 $[\boldsymbol{\varphi} \times] \delta \mathbf{p}$ 得:

$$\mathbf{B}_r = \mathbf{B}_r = \hat{\mathbf{R}}^T \delta \mathbf{p} - [\mathbf{B}_r \times] \hat{\mathbf{R}}^T \boldsymbol{\varphi} + \mathbf{n}_r. \quad (20)$$

由式(16)和式(19)可得 USBL 与惯性导航系统解算的位置信息差值为:

$$\delta \mathbf{r} = \mathbf{B}_r - \mathbf{B}_r = \hat{\mathbf{R}}^T \delta \mathbf{p} - [\mathbf{B}_r \times] \hat{\mathbf{R}}^T \boldsymbol{\varphi} + \mathbf{n}_r. \quad (21)$$

将地球坐标系中的直角坐标转换为经纬度和

高度坐标,其向量形式为:

$$\begin{bmatrix} \delta r_x \\ \delta r_y \\ \delta r_z \end{bmatrix} = C_p^b C_e^p A \begin{bmatrix} \delta L \\ \delta \lambda \\ \delta h \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -B_{rz} & B_{ry} \\ B_{rz} & 0 & -B_{rx} \\ -B_{ry} & B_{rx} & 0 \end{bmatrix} C_p^b C_e^p \begin{bmatrix} \varphi_E \\ \varphi_N \\ \varphi_U \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{n}_{rx} \\ \mathbf{n}_{ry} \\ \mathbf{n}_{rz} \end{bmatrix}.$$

$$\text{外部量测位置误差定义为 } \mathbf{Z}(t) = \delta r = \begin{bmatrix} \delta r_x \\ \delta r_y \\ \delta r_z \end{bmatrix},$$

其矩阵等式如式(22):

$$\mathbf{Z}(t) = [C_p^b C_e^p A \quad -[B_r \times] \hat{\mathbf{R}}^T] \begin{bmatrix} \delta p \\ \varphi \end{bmatrix} + \mathbf{n}_r. \quad (22)$$

建立量测方程如式(23):

$$\mathbf{Z}(t) = \mathbf{H}(t) \mathbf{X}(t) + \mathbf{V}(t), \quad (23)$$

观测矩阵如下,式中 $\hat{\mathbf{R}}^T = C_p^b C_e^p$.

$$\mathbf{H}(t) = [C_p^b C_e^p A \quad \mathbf{0}_{3 \times 3} \quad -[B_r \times] \hat{\mathbf{R}}^T \quad \mathbf{0}_{3 \times 6}] \in \mathbf{R}^3, \quad (24)$$

$$-[B_r \times] \hat{\mathbf{R}}^T = \begin{bmatrix} 0 & -B_{rz} & B_{ry} \\ B_{rz} & 0 & -B_{rx} \\ -B_{ry} & B_{rx} & 0 \end{bmatrix} C_p^b C_e^p \in \mathbf{R}^{3 \times 3}. \quad (25)$$

4 INS/DVL 组合导航系统的数学模型

$\mathbf{X}_{DVL} = [\delta V_{Dx} \delta V_{Dy} \delta V_{Dz} \delta K_{Dx} \delta K_{Dy} \delta K_{Dz}]$ 为新增状态量。

其中 $\delta V_{Dx} \delta V_{Dy} \delta V_{Dz} \delta K_{Dx} \delta K_{Dy} \delta K_{Dz}$ 为测速误差和多普勒测速仪的刻度系数误差。状态方程和量测方程如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{X}}_{INS} \\ \dot{\mathbf{X}}_{DVL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{INS} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{F}_{DVL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{INS} \\ \mathbf{X}_{DVL} \end{bmatrix} + \mathbf{W}, \quad (26)$$

$$\mathbf{Z} = [\mathbf{H}_{INS} \mathbf{H}_{DVL}] \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{INS} \\ \mathbf{X}_{DVL} \end{bmatrix} + \mathbf{V}. \quad (27)$$

\mathbf{F}_{INS} 、 \mathbf{H}_{INS} 和 \mathbf{F}_{DVL} 、 \mathbf{H}_{DVL} 分别为 INS 和 DVL 系统矩阵、量测矩阵, \mathbf{W} 和 \mathbf{V} 分别为系统噪声和量测噪声。

5 联邦滤波

联邦滤波器的理念是先分散处理之后再全局融合,每个子滤波器并行工作,通过动态信息分配系数优化了各子系统的导航信息,全局滤波器进行最终的分析融合,增强了系统的稳定性和容错性等。基于 INS/USBL/DVL 组合导航系统,给

出三种信息分配方式及联邦滤波器结构如图 3 所示。

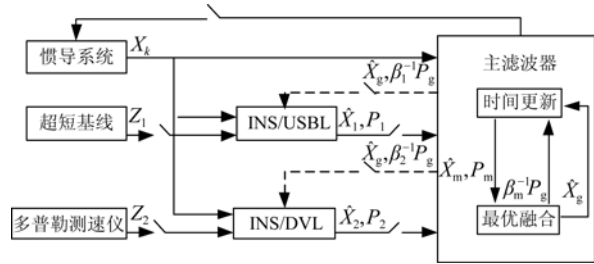


图 3 INS/USBL/DVL 联邦滤波结构图

Fig. 3 Diagram of federated filter based on INS/USBL/DVL

5.1 基于估计误差协方差阵特征值分解的信息分配方法

子滤波器的估计误差协方差阵 \mathbf{P}_i ($i=1, 2, m$) 是反映各子滤波器估计精度的高低指标矩阵。因此考虑根据 \mathbf{P}_i 的特征值分解来在线地确定信息分配系数 β_i 。

$\mathbf{P}_i = \mathbf{L} \Lambda_i \mathbf{L}^T$, $\Lambda_i = \text{diag}\{\lambda_{i1}, \lambda_{i2}, \dots, \lambda_{in}\}$, 信息分配系数为^[8]:

$$\beta_i = \frac{\text{tr} \Lambda_i}{\text{tr} \Lambda_1 + \text{tr} \Lambda_2 + \dots + \text{tr} \Lambda_n + \text{tr} \Lambda_m} = \frac{\text{tr} \Lambda_i}{\sum_{i=1}^{n+m} \text{tr} \Lambda_i}. \quad (28)$$

5.2 对角矩阵型信息分配方法

将信息分配系数 β_i 取为对角矩阵形式,其中 $\mathbf{P}_1(k/k)_{ii}$, $\mathbf{P}_2(k/k)_{ii}$ 分别代表 $\mathbf{P}_1(k/k)$, $\mathbf{P}_2(k/k)$ 第 i 行第 i 列元素。由该式可知当局部滤波器对某个状态的估计方差减小时,相应的 a_i 或 b_i 变小,则对 $\mathbf{P}_g(k/k-1)$ 的放大倍数增大,使局部滤波器下一步对该状态的估计方差增大。这样就不会出现因局部滤波器的方差阵过小而使全局滤波器无法对其求逆的情况,从而保证了全局滤波器在数值计算上的稳定性^[9]。

$$\begin{cases} \beta_1 = \text{diag}\{a_1, \dots, a_i, \dots\} \\ a_i = \frac{\mathbf{P}_1(k/k)_{ii}}{\mathbf{P}_1(k/k)_{ii} + \mathbf{P}_2(k/k)_{ii}} \\ \beta_2 = \text{diag}\{b_1, \dots, b_i, \dots\} \\ b_i = \frac{\mathbf{P}_2(k/k)_{ii}}{\mathbf{P}_1(k/k)_{ii} + \mathbf{P}_2(k/k)_{ii}} \end{cases}. \quad (29)$$

5.3 基于精度因子的信息分配方法

滤波精度主要取决于子系统 i 的观测信息质量,联合滤波模型对融合信息的分配,实质上就是将融合后的估计方差协方差阵 \mathbf{P}_f 扩大 $1/\beta_i$ 倍后,分配给不同的子滤波器,由于卡尔曼滤波器能自动根据信息质量的优劣作权重不同的处理,所以 β_i 越小,对融合信息的利用权重就越低。定量描述第 i 个子滤波器对状态估计的精度,定义第 i 个子系统估计精度因子 $EDOP_i = \sqrt{tr(\mathbf{P}_i \mathbf{P}_i^T)}$,根据 $EDOP_i$ 的大小,确定信息分配因子 $\beta_i(k)$ 的大小,使 $EDOP_i$ 与 $\beta_i(k)$ 成反比^[10], $\beta_1(k)$ 、 $\beta_2(k)$ 如下:

$$\beta_1(k) = \frac{EDOP_2}{\sum_{K=1}^2 EDOP_K}, \beta_2(k) = \frac{EDOP_1}{\sum_{K=1}^2 EDOP_K}$$

6 数值仿真与分析

为验证算法有效性进行相应的仿真,具体导航误差参数如表 2 所示。航行轨迹的初始位置为纬度 45.7816° ,东经 126.6725° ,以大航速 10 kn 沿北偏东 45° 匀速直航,超短基线定位误差为斜距的 0.5%,角度误差为 0.1° ,多普勒测速仪刻度因子误差 0.1。设定滤波解算周期为 0.1 s,仿真时间为 1 000 s,分别对 INS 与 INS/USBL/DVL 组合导航基于 3 种信息分配算法进行仿真,如图 4~5 所示。

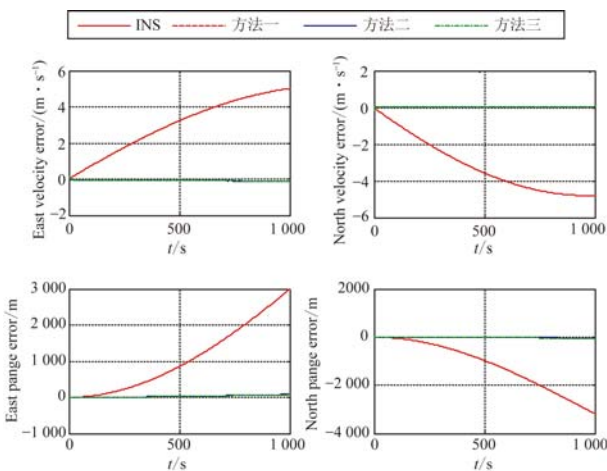


图 4 INS 与 INS/USBL/DVL 速度、位置误差对比图

Fig. 4 Comparison of velocity errors and positions error for INS and INS/USBL/DVL

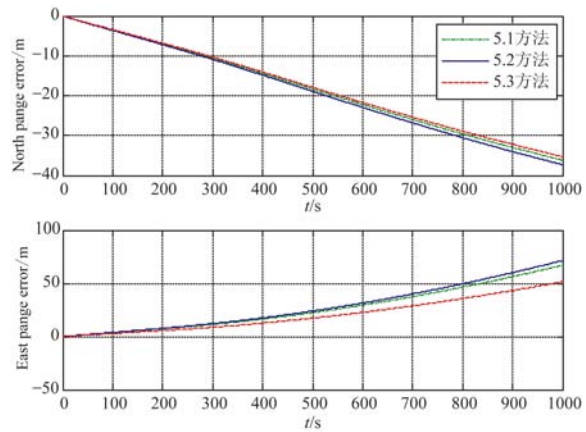


图 5 3 种信息分配方法东向、北向距离对比图

Fig. 5 Comparison of east position errors and north position errors with three methods

联邦滤波不仅具有运用灵活、计算量小、降低系统维数优点外,还能对子滤波器实时进行故障检测必要时进行系统重构从而提高系统容错性。假设水下潜航器巡航过程中突然故障,模拟超短基线由于水下信号传播时多径效应导致量测信息变为 10%,联邦滤波采用 χ^2 残差检测法检测故障,对系统进行重构 INS/DVL,集中式与联邦式故障仿真图如图 6~7 所示。

表 2 导航系统的参数值

Tab. 2 Parameter values of navigation systems

传感器	偏移量	噪声方差	输出频率
INS	陀螺仪	$0.1^\circ/\text{h}$	$0.001^\circ/\text{h}$
	加速度计	$1 \times 10^{-4} g_0$	$10^{-6} g_0$
USBL	—	5 m	1 Hz
DVL	0.4 m/s	0.016 m/s	1 Hz

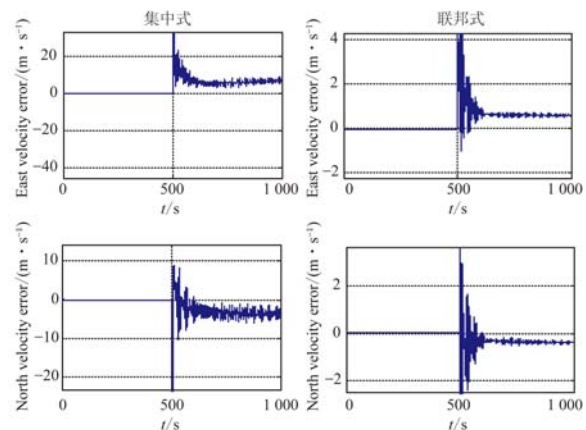


图 6 故障时集中式与联邦式速度误差对比

Fig. 6 Comparison of velocity errors for centralized filter and federated filter in faults

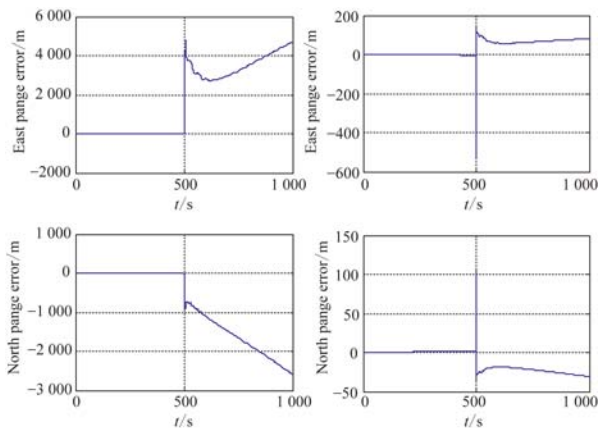


图 7 故障时集中式与联邦式位置误差对比

Fig. 7 Comparison of position errors for centralized filter and federated filter in faults

从仿真结果图 4、图 5 可以看出：

(1) 由于噪声和各种误差因素的影响, 水下潜航器在长航时条件下纯 INS 的速度、位置误差会随时间积累逐渐增大发散; 基于联邦滤波 3 种信息分配方法的 INS/USBL/DVL 组合导航方法均能够有效抑制陀螺漂移引起的误差, 验证了子系统模型 INS/USBL、INS/DVL 及该滤波方法的可行性。

(2) 对比 3 种联邦滤波信息分配方法, 其中基于精度因子的信息分配方法组合导航效果最好, 仿真结束速度误差为 0.11 m/s, 位置误差在 55 m 以内, 更切合该系统的状态模型。

发生故障时集中式与联邦式导航参数误差如表 3 所示。

表 3 故障时集中式与联邦式导航参数误差

Tab. 3 Comparison of velocity errors and position errors of centralized filter and federated filter in faults

导航参数误差	仿真结束 集中式	仿真结束 联邦式	故障后集 中式(RMS)	故障后联 邦式(RMS)
东速误差/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	7.8	0.39	8.9	0.64
北速误差/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	-4.2	-0.28	-5.3	-0.33
东向距离误差/m	4 968	73	3 921	62
北向距离误差/m	-2 652	-27	-1 947	-31

从图 6、图 7 及表 3 可以看出：

(3) 当水下声波传播途径中的多径效应产生误差导致超短基线定位故障时, 集中式滤波已经出现导航参数误差发散的情况, 北向距离误差已经达到 -2 652 m, 东向距离误差已经达到 4 968 m, 东速和北速分别达到了 7.8 m/s 和 -4.2 m/s。

(4) 联邦滤波故障后采用 χ^2 残差检测法检测, 重构后系统仿真结束时速度误差均在 0.4 m/s 以内, 位置误差相对稳定在 80 m 以内, 故障后系统的速度和位置误差(RMS)也稳定在允许的导航误差范围内, 远小于集中式各项导航参数误差, 说明基于信息分配方法三的系统相对于集中式滤波具有较好的冗余度及容错性。

7 结 论

针对水下载体高精度导航定位问题, 本文基于倒置的超短基线声学基阵和水声定位技术, 准确地建立了系统动力学模型, 构造了基于坐标转换后的伪观测量 B_r , 建立了 INS/USBL 量测方程, 并基于两个子系统 INS/USBL、INS/DVL 模型对比了 3 种联邦滤波信息分配方法的优劣。计算机仿真结果验证了子系统模型 INS/USBL 的有效性, INS/USBL/DVL 组合导航系统能充分利用 3 个导航系统的优点, 提高了系统导航信息的完整性。其中基于精度因子的信息分配方法效果更适用于该系统模型, 故障检测重构后的导航系统明显优于普通集中式系统, 能够为水下潜航器提供有效的导航参数信息, 具有较高的容错性和稳定性。对于进一步提高水下潜航器导航定位精度, 该算法具有重要的工程应用意义和价值。下一部分工作中会在该算法基础上, 研究基于残差 χ^2 检测法并增加卡尔曼滤波模型的速度微分器来提高系统对缓变故障的灵敏度, 以及应用基于 Huber 的 M 估计理论构造伪观测量来提高系统鲁棒性及稳定性。

参考文献:

- [1] 惠俊英, 生雪莉. 水下声信道[M]. 北京:国防工业出版社, 1992.
HUI J Y, SHENG X L. *Underwater Acoustic Channel* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1992. (in Chinese)
- [2] VICKERYK. Acoustic positioning systems. New concepts-the future [C]. *Proceedings of the 1998 Workshop on Autonomous Underwater Vehicles*, IEEE, 1998:103-110.
- [3] JALVING B, GADE K, HAGEN O K, *et al.*. A toolbox of aiding techniques for the HUGIN AUV integrated inertial navigation system [C]. *Proceedings of the OCEANS'03*, IEEE, 2003, 2:1146-1153.
- [4] MORGADO M, OLIVEIRA P, SILVESTRE C. Tightly coupled ultrashort baseline and inertial navigation system for underwater vehicles: an experimental validation [J]. *Journal of Field Robotics*, 2013, 30(1):142-170.
- [5] MORGADO M, OLIVEIRA P, SILVESTRE C, *et al.*. Embedded vehicle dynamics aiding for USBL/INS underwater navigation system [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2014, 22(1):322-330.
- [6] 张亚文, 莫明岗, 马小艳, 等. 一种基于集中滤波的 SINS/DVL/USBL 水下组合导航算法[J]. *导航定位与授时*, 2017, 4(1):25-31.
ZHANG Y W, MO M G, MA X Y, *et al.*. An algorithm of underwater SINS/DVL/USBL integrated navigation based on concentrated filtering [J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2017, 4(1):25-31. (in Chinese)
- [7] 张涛, 徐晓苏, 李瑶, 等. 基于惯导及水下声学辅助系统的 AUV 容错导航技术[J]. *中国惯性技术学报*, 2013, 21(4):512-516.
ZHANG T, XU X S, LI Y, *et al.*. AUV Fault-tolerant technology based on inertial navigation and underwater acoustics assisted navigation system [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2013, 21(4):512-516. (in Chinese)
- [8] 王宇飞, 黄显林, 胡恒章. 组合导航系统中一种基于特征值分解的自适应信息融合滤波算法[J]. *航空学报*, 2001, 21(3):274-276.
WANG Y F, HUANG X L, HU H ZH. Eigenvalue-decomposition-based adaptive information fusion filter algorithm for integrated navigation systems [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2001, 21(3):274-276. (in Chinese)
- [9] 陶俊勇, 邱静, 温熙森, 等. 自适应联合滤波模型及其在车载 SINS/GPS 组合导航系统中的应用[J]. *信息与控制*, 2000, 29(2):168-172.
TAO J Y, QIU J, WEN X S, *et al.*. Adaptive federated filter model and its application in SINS/GPS integrated navigation system for vehicle [J]. *Information and Control*, 2000, 29(2):168-172. (in Chinese)
- [10] 周哲, 翁海娜, 庄良杰. 联合卡尔曼滤波及其在舰船综合导航系统中的应用[J]. *控制与决策*, 2000, 15(4):501-503, 506.
ZHOU ZH, WENG H N, ZHUANG L J. Federated Kalman filtering and its application to ship integrated navigation system [J]. *Control and Decision*, 2000, 15(4):501-503, 506. (in Chinese)

作者简介:



徐博(1982—),男,河北邢台人,副教授,主要从事惯性导航、组合导航、初始对准、信息融合研究,以及多运动平台协同导航传递对准的理论算法研究、仿真验证以及试验研究。E-mail: xubocarter@sina.com



郝苒(1993—),男,黑龙江肇东人,硕士研究生,2015年于哈尔滨工程大学获得学士学位,主要从事惯性导航系统、组合导航、信息融合算法方面研究。E-mail:1009886903@qq.com