

SINS/DVL/AST 水下组合导航中的鲁棒信息融合方法*

朱兵^{1,3},常国宾²,何泓洋³,许江宁³

(1. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094; 2. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116;
3. 海军工程大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要:捷联式惯导系统由于自主性强等优势成为自主式水下航行器长航时、长航程导航的主要手段。针对水下环境中外部多导航传感器如多普勒计程仪提供的测速信息和水声单应答器提供的位置信息容易受到非高斯噪声污染的问题,提出基于马氏距离算法的联邦鲁棒卡尔曼滤波算法。在联邦鲁棒卡尔曼滤波算法中,通过马氏距离算法引入膨胀因子,对量测噪声协方差阵进行膨胀,以实现非高斯条件下水下组合导航系统鲁棒性的提升。同时基于子滤波器的滤波性能对信息分配系数进行自适应调整以确保水下组合导航系统的高精度。基于江试试验实测数据进行水下组合导航半物理仿真试验,试验结果表明:相比于传统的联邦卡尔曼滤波算法,联邦鲁棒卡尔曼滤波算法可在非高斯条件下实现更高精度、更加稳定的组合导航;能够满足水下组合导航系统对容错性和鲁棒性的要求。

关键词:捷联式惯导系统;组合导航;非高斯;联邦滤波;鲁棒

中图分类号:TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2020)05-107-08

Robust information fusion method in SINS/DVL/AST underwater integrated navigation

ZHU Bing^{1,3}, CHANG Guobin², HE Hongyang³, XU Jiangning³

(1. Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China;
2. School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
3. College of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Strapdown inertial navigation system has been the main navigation and positioning method for long voyage and long-endurance underwater navigation. In order to solve the problem that velocity information provided by Doppler velocity log and position information provided by acoustic single transponder are easily contaminated by non-Gaussian noise, a federated robust Kalman filter algorithm was proposed. In the proposed method, the Mahalanobis distance algorithm was used to introduce an inflated factor to inflate the measurement noise covariance, which can improve the robustness of integrated navigation system. At the same time, the information distribution coefficient was adaptively tuned based on the performance of the sub-filter, which can guarantee the accuracy of integrated navigation system. The semi-physical simulation test for underwater integrated navigation was carried out by the federated robust Kalman filter algorithm and traditional federated Kalman filter algorithm based on measured data of the river test. The experiment results demonstrate that the federated robust Kalman filter algorithm has better performance in underwater integrated navigation compared with the traditional federated Kalman filter algorithm under the non-Gaussian condition and it can meet the requirements of fault tolerance and robustness for underwater integrated navigation system.

Keywords: strapdown inertial navigation system; integrated navigation; non-Gaussian; federated Kalman filter; robust

捷联式惯导系统(Strapdown Inertial Navigation System, SINS)由于隐蔽性高、自主性和抗干扰能力强、结构简单和成本低等诸多优势,在航空、航天、航海等领域受到广泛关注和应
用^[1-4],已成为现代惯性导航技术研究和发展的主流^[5],并成为自主式水下航行器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)长航时、长航程、高精度

导航的主要手段。但是, SINS 导航误差随着时间不断积累,借助外部导航传感器辅助 SINS 以实现
对导航误差的补偿是实现 AUV 水下长周期精确导航的关键^[6]。深水环境对电磁波、无线电等信号有拒止屏蔽作用,致使无线电导航、卫星导航等
手段无法正常使用^[7]。多普勒计程仪(Doppler Velocity Log, DVL)测速精度稳定,可为 SINS 提供

* 收稿日期:2019-04-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41774005, 41804076, 42004067)

作者简介:朱兵(1992—),男,安徽萧县人,助理研究员,博士, E-mail: zhubingtq@163.com;

何泓洋(通信作者),男,讲师,博士, E-mail: xjn_dh@163.com

外部速度辅助信息;水下声学定位单应答器成本低、布设灵活以及局部水域定位精度高,可在局部水域为 SINS 提供外部位置辅助信息^[8-9]。

AUV 在深水环境中航行时,主要手段是以 DVL 的测速信息、水下声学定位系统 (Acoustic Positioning System, APS) 或声学单应答器 (Acoustic Single-Transponder, AST) 的定位信息辅助 SINS 进行导航。但是, SINS/DVL 组合导航方式得到的定位误差随着时间是发散的^[10],这就需要适时地利用 AST 的定位信息来限制 SINS/DVL 导航误差的发散以提高 AUV 纵深航行的能力。对于水下多导航传感器的信息,需利用有效、可靠的信息融合方法以提高导航系统的导航精度和容错能力。相比于集中式卡尔曼滤波 (Centralized Kalman Filter, CKF) 算法,联邦卡尔曼滤波 (Federated Kalman Filter, FKF) 算法^[11-13]具有结构灵活、计算量小、容错能力强等优势,使其在组合导航系统中受到广泛研究和应用^[14-17]。信息分配系数是决定 FKF 结构和性能的重要因素^[17],传统的 FKF (Traditional FKF, TFKF) 在子滤波器之间按固定比例分配信息^[13],即选取信息分配系数 β_i 为固定常值。在此种分配方式下,某个子滤波器性能下降可能会对 TFKF 的全局滤波性能造成较大影响。同时,水下环境的复杂性致使 AST 的定位信息及 DVL 的测速信息易受到诸如野值等非高斯噪声的污染,这会导致 TFKF 滤波性能下降,甚至滤波发散。

针对上述问题,本文提出基于马氏距离 (Mahalanobis Distance, MD) 算法的联邦鲁棒卡尔曼滤波 (Federated Robust Kalman Filter, FRKF) 算法。FRKF 利用 MD 算法对观测量进行辨识,若判断观测量异常,则通过引入膨胀因子对量测噪声协方差阵进行膨胀以减小卡尔曼滤波增益,从而提高组合导航系统的鲁棒性。在 FRKF 中,基于子滤波器滤波性能自适应地确定信息分配系数,进而确保 FRKF 整体的滤波精度。

1 SINS/DVL/AST 组合导航滤波模型

SINS/DVL/AST 组合导航系统的结构如图 1 所示。由图 1 可看出,AUV 水下组合导航系统主要由 SINS、DVL 和 AST 等导航传感器组成。各个导航传感器提供相应的导航信息,利用 FKF 将这些导航信息进行融合,进而得到更高精度、更加可靠的导航信息。SINS/DVL/AST 组合导航原理如图 2 所示。

由图 2 可以看出,当 AUV 在水下机动航行

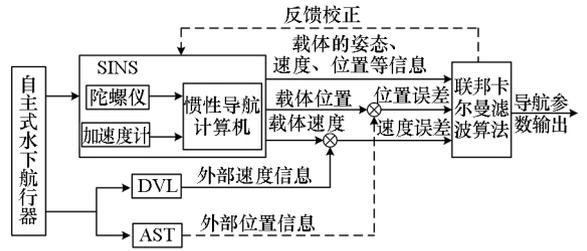


图 1 水下组合导航系统结构

Fig. 1 Structure of underwater integrated navigation system

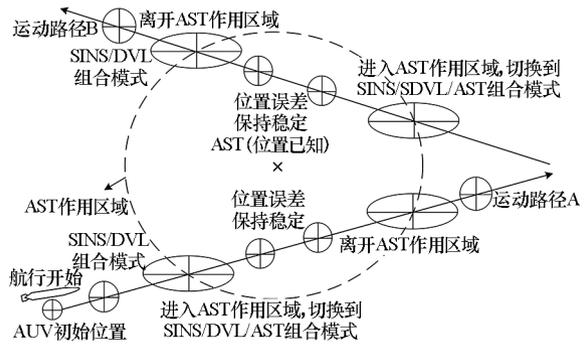


图 2 SINS/DVL/AST 组合导航原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of SINS/DVL/AST integrated navigation

时,为了抑制 SINS 位置误差的持续发散可设计以下组合导航方案:当 AUV 进入 AST 的作用区域时,采用 SINS/DVL/AST 组合导航模式,此时 SINS 的导航误差保持稳定;当 AUV 离开 AST 的作用区域时,采用 SINS/DVL 组合导航模式,此时 AUV 在 DVL 测速辅助条件下导航误差缓慢发散,在即将达到误差上限时,使得 AUV 能够再次进入 AST 作用区域。以上方案可最大限度地保证 AUV 水下导航的精度。

在 FKF 中,由于 SINS 能够全面给出 AUV 的姿态、速度和位置信息,因此选取 SINS 作为公共参考系统。SINS 的高度通道是独立、发散的,其高度通道信息可借助外部传感器如水压计等准确获得。记导航坐标系为 n 系,载体坐标系为 b 系,惯性坐标系为 i 系,地球坐标系为 e 系,计算坐标系为 n' 系。因此不考虑高度通道的速度、位置信息,选取 SINS 状态量为:

$$X_{SINS} = [\delta L, \delta \lambda, \delta v_E, \delta v_N, \alpha_x, \alpha_y, \alpha_z, \varepsilon_x^b, \varepsilon_y^b, \varepsilon_z^b, \nabla_x^b, \nabla_y^b, \nabla_z^b] \quad (1)$$

式中: $\delta L, \delta \lambda$ 分别为纬度误差、经度误差; $\delta v_E, \delta v_N$ 分别为东向速度误差、北向速度误差; $\alpha = [\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z]$ 为欧拉平台误差角; $\varepsilon^b = [\varepsilon_x^b, \varepsilon_y^b, \varepsilon_z^b]$ 为陀螺仪常值漂移; $\nabla^b = [\nabla_x^b, \nabla_y^b, \nabla_z^b]$ 为加速度计零偏。基于 SINS 误差模型,SINS 状态方程具体表达式可参看文献[6,18],此处不再赘述。

基于 DVL 测速信息 $\mathbf{v}_{\text{DVL}}^b$ 选取东向速度误差 δv_E 和北向速度误差 δv_N 作为 SINS/DVL 组合导航子系统的观测量,则有:

$$\mathbf{z}_v = \begin{bmatrix} \delta v_E \\ \delta v_N \end{bmatrix} = [\tilde{\mathbf{v}}_{\text{SINS}}^n - (\mathbf{I} - \boldsymbol{\alpha} \times) \mathbf{C}_b^n \mathbf{v}_{\text{DVL}}^b]_{2 \times 3} \quad (2)$$

式中:速度量测噪声 $\mathbf{V}_v \sim N(0, \mathbf{R}_v)$; \mathbf{R}_v 为速度量测噪声阵; $\mathbf{C}_b^n = \mathbf{C}_b^{n'} \mathbf{C}_b^{n'}$ 为姿态矩阵, \mathbf{C}_b^n 为 b 系到 n' 系的方向余弦阵;在实际应用中,用 $\mathbf{C}_b^{n'}$ 代替 \mathbf{C}_b^n 可得量测矩阵 $\mathbf{H}_v = [\mathbf{0}_{2 \times 2}, \mathbf{I}_{2 \times 2}, [-\mathbf{C}_b^{n'} \mathbf{v}_{\text{DVL}}^b \times]_{2 \times 3}, \mathbf{0}_{2 \times 6}]$, $[-\mathbf{C}_b^{n'} \mathbf{v}_{\text{DVL}}^b \times]_{2 \times 3}$ 表示矩阵 $[-\mathbf{C}_b^{n'} \mathbf{v}_{\text{DVL}}^b \times]$ 的前两行。

假设 AST 定位系统已经过校准修正,此时系统误差源可以忽略不计,可认为由噪声引起的误差是整个定位系统水声定位误差的主要来源^[18]。也就是说,若定位系统已通过校准补偿,定位系统误差的主要来源可认为是随机误差。基于 AST 的定位信息 $\mathbf{p}_{\text{AST}} = [L_{\text{AST}}, \lambda_{\text{AST}}, h_{\text{AST}}]$, 选取纬度误差 δL 和经度误差 $\delta \lambda$ 作为 SINS/AST 组合导航子系统的观测量,则有:

$$\mathbf{z}_p = \begin{bmatrix} \delta L \\ \delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{\text{SINS}} - L_{\text{AST}} \\ \lambda_{\text{SINS}} - \lambda_{\text{AST}} \end{bmatrix} = \mathbf{H}_p \mathbf{X} + \mathbf{V}_p \quad (3)$$

式中,位置量测噪声 $\mathbf{V}_p \sim N(0, \mathbf{R}_p)$, \mathbf{R}_p 为位置量测噪声阵;量测矩阵 $\mathbf{H}_p = [\mathbf{I}_{2 \times 2}, \mathbf{0}_{2 \times 11}]$ 。

2 FRKF 算法

2.1 FKF 鲁棒化

记 SINS/DVL 组合导航系统对应的子滤波器为“子滤波器 1”;SINS/AST 组合导航系统对应的子滤波器为“子滤波器 2”。由于各个观测源相互独立, k 时刻 FKF 的量测更新方程^[19]为:

$$\boldsymbol{\mu}_{i,k} = \mathbf{z}_{i,k} - \hat{\mathbf{z}}_{i,k|k-1} = \mathbf{z}_{i,k} - \mathbf{H}_{i,k} \hat{\mathbf{X}}_{i,k|k-1} \quad (4)$$

$$\mathbf{K}_{i,k} = \mathbf{P}_{i,k|k-1} \mathbf{H}_{i,k}^T (\mathbf{H}_{i,k} \mathbf{P}_{i,k|k-1} \mathbf{H}_{i,k}^T + \mathbf{R}_{i,k})^{-1} \quad (5)$$

$$\hat{\mathbf{X}}_{i,k|k} = \hat{\mathbf{X}}_{i,k|k-1} + \mathbf{K}_{i,k} (\mathbf{z}_{i,k} - \mathbf{H}_{i,k} \hat{\mathbf{X}}_{i,k|k-1}) \quad (6)$$

$$\mathbf{P}_{i,k} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_{i,k} \mathbf{H}_{i,k}) \mathbf{P}_{i,k|k-1} \quad (7)$$

其中: $\boldsymbol{\mu}_{i,k}$ 为 k 时刻第 i 个子滤波器的观测新息向量, $i=1,2$ 。水下复杂环境导致 DVL 测速信息、AST 定位信息易受野值等非高斯噪声的干扰,这会导致基于高斯分布假设的 FKF 滤波性能变差甚至滤波发散。通过对子滤波器分别鲁棒化的方式实现 FKF 的鲁棒化,具体过程如下。

选择 k 时刻第 i 个子滤波器观测量 $\mathbf{z}_{i,k}$ 与观测量的先验估计 $\hat{\mathbf{z}}_{i,k|k-1}$ 之间的马氏距离作为评

判指标,则 k 时刻评判指标 $\vartheta_{i,k}$ 的定义^[20]为:

$$\vartheta_{i,k} = M_{i,k}^2 = (\sqrt{(\tilde{\mathbf{z}}_{i,k} - \hat{\mathbf{z}}_{i,k|k-1})^T (\mathbf{H}_{i,k} \mathbf{P}_{i,k|k-1} \mathbf{H}_{i,k}^T + \mathbf{R}_{i,k})^{-1} (\tilde{\mathbf{z}}_{i,k} - \hat{\mathbf{z}}_{i,k|k-1})})^2 \quad (8)$$

式中, $M_{i,k}$ 为马氏距离。对于真实的观测量 $\tilde{\mathbf{z}}_{i,k}$, 若其评判指标 $\vartheta_{i,k}$ 满足 $\vartheta_{i,k} \leq \chi_{n,\alpha}^2$, 则 $\tilde{\mathbf{z}}_{i,k}$ 将被标记为正常观测量;若其评判指标 $\vartheta_{i,k}$ 满足 $\vartheta_{i,k} > \chi_{n,\alpha}^2$, 则 $\tilde{\mathbf{z}}_{i,k}$ 将被标记为异常观测量。此时通过引入膨胀因子 $\lambda_{i,k}$ 用以膨胀量测噪声协方差阵 $\mathbf{R}_{i,k}$ 。

$$\tilde{\mathbf{R}}_{i,k} = \lambda_{i,k} \mathbf{R}_{i,k} \quad (9)$$

为了从理论上推导并确定膨胀因子 $\lambda_{i,k}$ 的值,将式(9)带入式(8)可得:

$$\begin{aligned} \vartheta_{i,k} &= \boldsymbol{\mu}_{i,k}^T (\mathbf{H}_{i,k} \mathbf{P}_{i,k|k-1} \mathbf{H}_{i,k}^T + \tilde{\mathbf{R}}_{i,k})^{-1} \boldsymbol{\mu}_{i,k} \\ &= \boldsymbol{\mu}_{i,k}^T (\mathbf{H}_{i,k} \mathbf{P}_{i,k|k-1} \mathbf{H}_{i,k}^T + \lambda_{i,k} \mathbf{R}_{i,k})^{-1} \boldsymbol{\mu}_{i,k} \\ &= \chi_{n,\alpha}^2 \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)可以转化为求解 $\lambda_{i,k}$ 的非线性问题,如式(11)所示。

$$f(\lambda_{i,k}) = \boldsymbol{\mu}_{i,k}^T (\mathbf{H}_{i,k} \mathbf{P}_{i,k|k-1} \mathbf{H}_{i,k}^T + \lambda_{i,k} \mathbf{R}_{i,k})^{-1} \boldsymbol{\mu}_{i,k} - \chi_{n,\alpha}^2 \quad (11)$$

式中, $\lambda_{i,k}$ 可以通过牛顿迭代法求解^[21-22]。因此 $\lambda_k(j+1)$ 与 $\lambda_k(j)$ 的关系可表示为:

$$\begin{aligned} \lambda_{i,k}(j+1) &= \lambda_{i,k}(j) + \\ &= \frac{\boldsymbol{\mu}_{i,k}^T (\tilde{\mathbf{P}}_{\tilde{\mathbf{z}}_{i,k|k-1}}(j))^{-1} \mathbf{R}_{i,k} (\tilde{\mathbf{P}}_{\tilde{\mathbf{z}}_{i,k|k-1}}(j))^{-1} \boldsymbol{\mu}_{i,k}}{\vartheta_{i,k}(j) - \chi_{n,\alpha}^2} \end{aligned} \quad (12)$$

式中, $\tilde{\mathbf{P}}_{\tilde{\mathbf{z}}_{i,k|k-1}}(j) = \mathbf{H}_{i,k} \mathbf{P}_{i,k|k-1} \mathbf{H}_{i,k}^T + \lambda_{i,k}(j) \mathbf{R}_{i,k}$, 且 $\lambda_{i,k}(j)$ 初始值为 $\lambda_{i,k}(0) = 1$; $\chi_{n,\alpha}^2$ 服从自由度为 n 的卡方分布即 $\chi_{n,\alpha}^2 \sim \chi^2(n)$ 。当评判指标满足 $\vartheta_{i,k}(i) \leq \chi_{n,\alpha}^2$ 时,迭代终止。在求解出 $\lambda_{i,k}$ 后,通过式(9)对量测噪声阵 $\mathbf{R}_{i,k}$ 进行膨胀,得到新的量测噪声阵 $\lambda_{i,k} \mathbf{R}_{i,k}$ 。用膨胀后的量测噪声阵 $\tilde{\mathbf{R}}_{i,k}$ 替代 $\mathbf{R}_{i,k}$ 进行标准 KF 的量测更新过程即可实现标准 KF 的鲁棒化,得到 RKF。同理,用 $\tilde{\mathbf{R}}_{i,k}$ 替代 $\mathbf{R}_{i,k}$ 进行 FKF 的量测更新过程即可实现 FKF 的鲁棒化,得到 FRKF。将概率参数 α 设置为 0.99, 即 FRKF 的效率为 99%, 2 自由度卡方分布值 $\chi_{2,0.99}^2 = 9.2$ 。

2.2 信息分配系数自适应方法

由图 2 可知,AST 作用范围有限致使 AUV 不能持续获取位置辅助信息,即 AUV 驶出 AST 作用范围导致定位信息丢失,此时可认为 AST 发生故障。TFKF 在子滤波器之间按固定比例分配信息^[13], 即选取信息分配系数 β_i 为固定的常值。

在此种分配方式下,某个子滤波器性能下降可能会对 FKF 的全局滤波性能造成较大影响^[17-18]。因此根据各子滤波器的滤波性能自适应地调整 β_i 对提升 FKF 的整体性能具有重要意义。子滤波器的状态估计误差协方差 $\mathbf{P}_{i,k}$ 是衡量子滤波器估计精度的重要指标,子滤波器的估计精度越高, $\mathbf{P}_{i,k}$ 越小;子滤波器的估计精度越低, $\mathbf{P}_{i,k}$ 越大。因此,定义 β_i 为:

$$\beta_i = \frac{\|\text{diag}(\mathbf{P}_{i,k}^{-1} \cdot (\mathbf{P}_{i,k}^{-1})^T)\|_F}{\sum \|\text{diag}(\mathbf{P}_{i,k}^{-1} \cdot (\mathbf{P}_{i,k}^{-1})^T)\|_F} \quad (13)$$

式中: $\text{diag}(\mathbf{P}_{i,k}^{-1} \cdot (\mathbf{P}_{i,k}^{-1})^T)$ 表示矩阵 $\mathbf{P}_{i,k}^{-1} \cdot (\mathbf{P}_{i,k}^{-1})^T$ 的对角线元素组成的一个新的对角矩阵; $\|\cdot\|_F$ 表示 Frobenius 范数。由式(13)可看出,子滤波器估计精度越高,即 $\mathbf{P}_{i,k}^{-1}$ 越大, β_i 越大,因此估计精度高的子滤波器应分配更大的信息分配系数;子滤波器估计精度越低,即 $\mathbf{P}_{i,k}^{-1}$ 越小,从而 β_i 越小,因此估计精度低的子滤波器应分配更小的信息分配系数。根据式(13),重新定义主滤波器融合状态 $\hat{\mathbf{X}}_{g,k|k}$ 。

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{X}}_{g,k|k} &= \sum \beta_i \hat{\mathbf{X}}_{i,k|k} \\ &= \sum \frac{\|\text{diag}(\mathbf{P}_{i,k}^{-1} \cdot (\mathbf{P}_{i,k}^{-1})^T)\|_F}{\sum \|\text{diag}(\mathbf{P}_{i,k}^{-1} \cdot (\mathbf{P}_{i,k}^{-1})^T)\|_F} \hat{\mathbf{X}}_{i,k|k} \end{aligned} \quad (14)$$

由式(14)可知,第 i 个子滤波器估计精度越高,即 $\mathbf{P}_{i,k}$ 越小, $\|\text{diag}(\mathbf{P}_{i,k}^{-1} \cdot (\mathbf{P}_{i,k}^{-1})^T)\|_F$ 越大, β_i 越大,从而第 i 个子滤波器分配较大的权值;若第 i 个子滤波器估计精度越低,即 $\mathbf{P}_{i,k}$ 越大, $\|\text{diag}(\mathbf{P}_{i,k}^{-1} \cdot (\mathbf{P}_{i,k}^{-1})^T)\|_F$ 越小, β_i 越小,从而第 i 个子滤波器分配较小的权值。因此式(14)可使 FRKF 始终保证精度较高的子滤波器获取更大的信息分配系数,即性能较好的子滤波器将被赋予更大的权重。

3 半物理仿真试验验证

3.1 数据获取

试验数据是从一套船载实验系统中采集得到的。实验系统使用的惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)和 DVL 主要性能指标分别见表 1 和表 2^[23]。

试验船上同时安装了一个单天线的 GPS 接收机,输出速度和位置信息,其数据更新率为 1 Hz。利用 GPS 输出数据与 IMU 输出数据进行组合导航,生成参考姿态、速度和位置信息,分别作为实验中的姿态、速度和位置基准。船载试验

在长江内进行,试验过程设计为:当实验系统开机时,试验船保持系泊状态,时长大约 15 min;然后试验船驶出,运动大约 6 h。记录整个运动过程中的 IMU 和 DVL 输出的原始数据、GPS 输出的速度和位置数据。

表 1 IMU 性能指标

Tab. 1 Specifications of the inertial sensors

	陀螺仪	加速度计
测量范围	± 200 ($^\circ$)/s	$\pm 15g$
更新频率	200 Hz	200 Hz
精度等级	< 0.02 ($^\circ$)/h(1σ)	$< 50 \mu g(1\sigma)$
标度因数	$\leq 5 \times 10^{-6}$	$\leq 5 \times 10^{-6}$
重复性	$\leq 5 \times 10^{-6}$	$\leq 5 \times 10^{-6}$

表 2 DVL 性能指标

Tab. 2 Specification of the DVL

测速精度	0.5% V \pm 0.5 cm/s
测速范围	-5.14 ~ 10.28 m/s
更新频率	1 Hz
发射频率	300 kHz
底跟踪深度	300 m

选取 3600 s 船载实测数据用于水下组合导航半物理仿真试验,选取的数据包含:陀螺仪和加速度计的原始数据、DVL 输出的速度数据、GPS 输出的位置数据,以及对应的姿态、速度和位置基准。3600 s 数据对应的 DVL 输出如图 3 所示。文献[18]指出,若 AST 定位系统已经过校准修正,AST 定位误差的主要来源可认为是噪声引起的随机误差。因此,根据文献[9]的青岛胶州湾浅海(海深约 30 m,三级海况)AST 导航试验结果可知,AST 浅海导航误差最大不超过 15 m。由此,仿真试验在模拟生成 AST 定位信息时,基于降频后(0.1 Hz)的 GPS 位置信息人为地引入幅值为 20 m 的随机定位误差。考虑到水下环境的复杂性,AST 输出易受野值等非高斯噪声污染,每隔 150 s 人为地引入幅值为 500 m 的位置误差。

3.2 试验结果与分析

在 SINS/DVL/AST 组合导航系统中,各个子滤波器状态向量相同,因此设计主滤波器状态量和协方差阵不进行时间更新。设计 TFKF、FRKF 均为无反馈模式,即各个子滤波器进行独立滤波。

3.2.1 鲁棒性检验

复杂的外部环境对于水下 SINS 组合导航来说是不可避免的,也就是说 DVL 测速信息和 AST

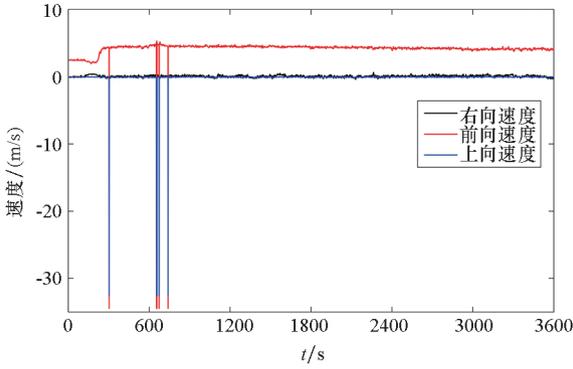


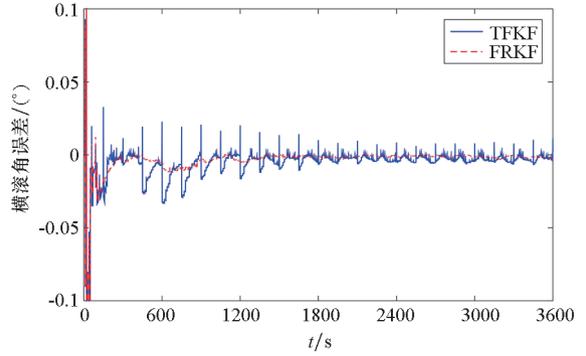
图3 DVL输出

Fig. 3 Output of DVL

定位信息不可避免地会受到野值等非高斯噪声的干扰。本节在 3.1 节 DVL 输出数据以及模拟生成的 AST 定位数据的基础上,分别利用 TFKF、FRKF 进行组合导航试验。DVL 属于主动声呐设备,在特殊环境下频繁使用 DVL 发射声呐信号容易降低 AUV 的隐蔽性。为此,模拟 AUV 在进入 AST 作用范围后降低 DVL 使用频率的情形:对 DVL 的输出进行人为地阻隔,使 AUV 每隔 30 s 获取一个速度观测信号。

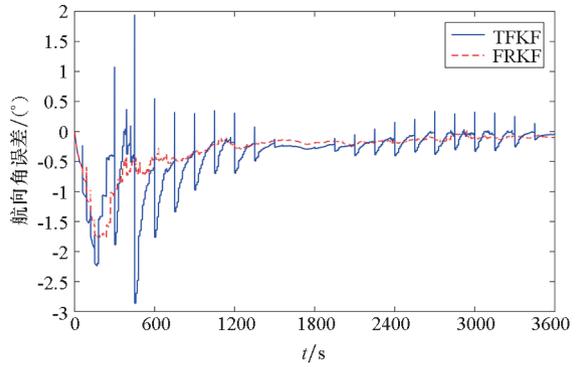
图 4(a) ~ (c) 分别为利用不同方法进行组合导航的俯仰角误差、横滚角误差和航向角误差。由图 4 可以看出,当 AST 定位信息受到野值污染时,TFKF 的组合导航姿态误差曲线在野值出现的时刻发生了突变,而 FRKF 的组合导航姿态误差曲线在整个组合导航过程中都是平稳的。通过试验可知,当组合导航收敛后,FRKF 得到的俯仰角误差、横滚角误差收敛到 0.01° 以内,航向角误差收敛到 0.2° 以内。

图 5 和图 6 分别为利用不同方法进行组合导航的速度误差和位置误差。图 5 和图 6 中,蓝色实线为利用 TFKF 进行组合导航的速度、位置误差曲线,红色虚线为利用 FRKF 进行组合导航的速度、位置误差曲线。



(b) 横滚角误差

(b) Roll angle errors



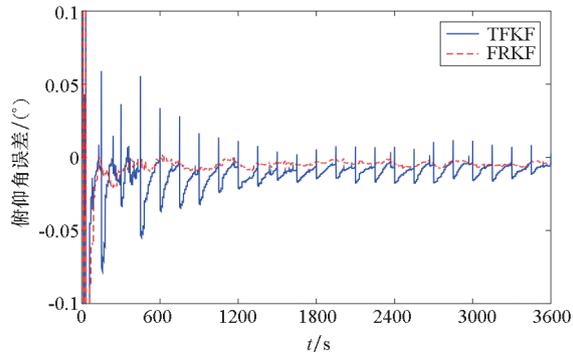
(c) 航向角误差

(c) Yaw angle errors

图4 不同方法的组合导航姿态误差

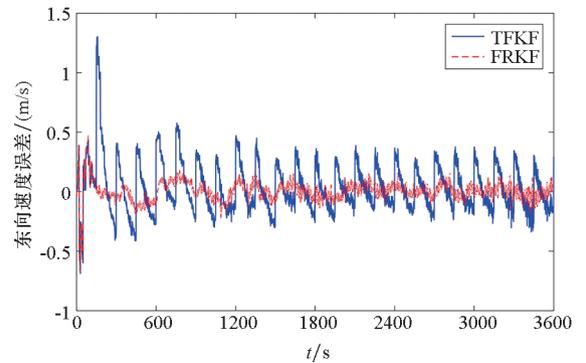
Fig. 4 Attitude errors of integrated navigation by using different methods

通过试验可知,当组合导航收敛后,利用 FRKF 组合导航的东向速度误差收敛到 0.2 m/s 以内,北向速度误差收敛到 0.3 m/s 以内;纬度误差收敛到 21 m 以内,经度误差收敛到 16 m 以内。由图 5 和图 6 可以明显看出,当观测信息受到野值污染时,FRKF 的组合导航精度和稳定性明显优于 TFKF。通过试验及计算得到利用 TFKF 和 FRKF 进行组合导航的速度误差标准差和位置误差标准差,如表 3 所示。



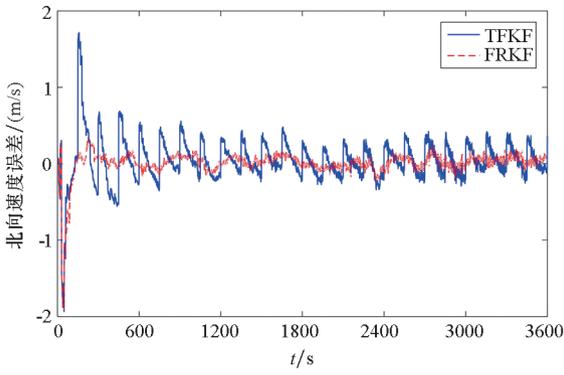
(a) 俯仰角误差

(a) Pitch angle errors



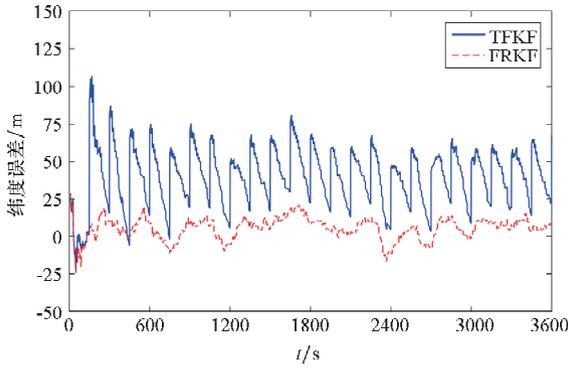
(a) 东向速度误差

(a) East velocity errors

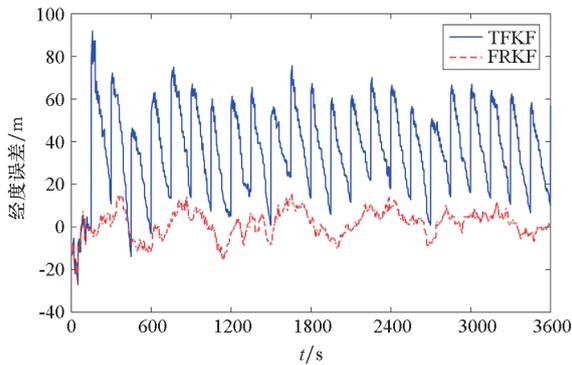


(b) 北向速度误差
(b) North velocity errors

图 5 不同方法组合导航的速度误差
Fig. 5 Velocity errors of integrated navigation by using different methods



(a) 纬度误差
(a) Latitude errors



(b) 经度误差
(b) Longitude errors

图 6 不同方法组合导航的位置误差
Fig. 6 Position errors of integrated navigation by using different methods

由图 4 ~ 6 及表 3 可以看出,相比于 TFKF, FRKF 可有效抑制野值对滤波结果的影响,且 FRKF 具有更好的数据平稳性。试验结果初步表明:相比于 TFKF, FRKF 在非高斯条件下具有更高的组合导航精度和稳定性。

表 3 不同方法得到的组合导航速度、位置误差标准差
Tab. 3 Standard deviation of velocity errors and position errors of integrated navigation by using different methods

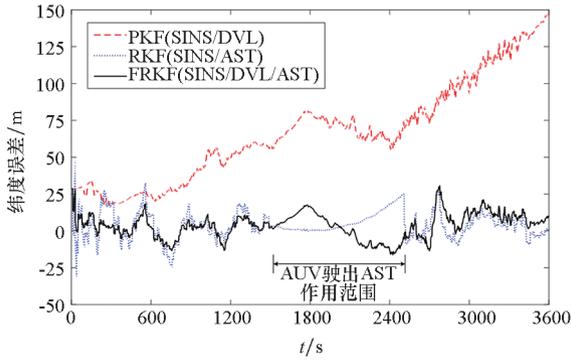
	TFKF	FRKF
东向速度误差标准差/(m/s)	0. 215 4	0. 087 4
北向速度误差标准差/(m/s)	0. 294 8	0. 180 4
纬度误差标准差/m	19. 300 0	7. 191 0
经度误差标准差/m	19. 840 0	6. 330 0

3. 2. 2 信息分配系数自适应方法有效性验证

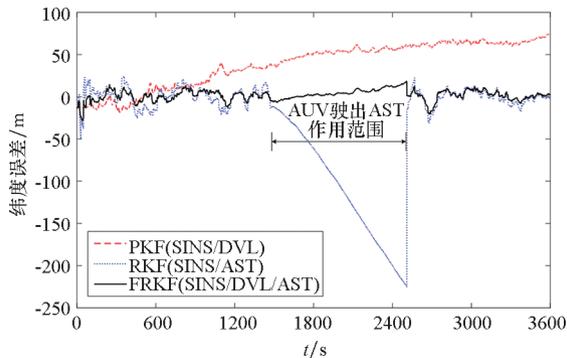
初始时刻组合导航子系统无信息,信息分配系数初始值设置为 $\beta_1 = \beta_2 = 0.5$ 。结合在 AUV 水下航行的实际情况(如图 2 所示),即 AUV 会驶出 AST 作用范围的情况,设置从第 1500 s 开始 AUV 驶出 AST 的作用范围,从第 2500 s 开始 AUV 重新进入 AST 的作用范围。在 1500 ~ 2500 s 期间 AST 定位信号丢失,可认为 AST 发生故障。分别利用 RKF(SINS/DVL)、RKF(SINS/AST)和 FRKF(SINS/DVL/AST)进行组合导航试验,得到的纬度误差、经度误差结果分别如图 7(a)和图 7(b)所示。其中,红色虚线为 RKF(SINS/DVL)得到的位置误差,蓝色虚线为 RKF(SINS/AST)得到的位置误差,黑色实线为 FRKF(SINS/DVL/AST)得到的位置误差。

由图 7 可明显看出,FRKF 的组合导航精度和稳定性明显优于 RKF。另外,当 AUV 驶出 AST 作用范围时,RKF(SINS/AST)对位置的估计误差曲线呈发散趋势。通过试验可知,在此期间,RKF(SINS/DVL)得到的纬度、经度误差最大值为 81.53 m 和 62.27 m,RKF(SINS/AST)得到的纬度、经度误差最大值为 25.13 m 和 -225.30 m,FRKF(SINS/DVL/AST)得到的纬度、经度误差最大值为 17.57 m 和 18.68 m。这是因为 FRKF 主滤波器的输出是通过式(14)进行加权融合得到的,且 FRKF 采用闭环修正模式实时地修正公共参考系统 SINS 的解算误差,使得 AUV 在驶出 AST 作用范围之前子滤波器 1 与子滤波器 2 对位置的估计精度相当。在 AUV 离开 AST 作用范围后,子滤波器 2 无位置观测信息,导致子滤波器 2 滤波性能逐渐降低,即 $P_{2,k}$ 逐渐增大。由式(14)可看出, $P_{2,k}$ 增大将使子滤波器 1 融合输出 \hat{X}_1 的权值高于子滤波器 2 融合输出 \hat{X}_2 的权值。因此 AUV 离开 AST 作用范围后,子滤波器 1 起主要作用使得 FRKF 对位置的估计精度相比于 RKF(SINS/AST)更加稳定。试验结果初步验证了信

息分配系数自适应选取方法的有效性以及 FRKF 相比于 RKF 具有更好的容错性。



(a) 纬度误差
(a) Latitude errors



(b) 经度误差
(b) Longitude errors

图 7 位置信息短期丢失时不同方法组合导航的位置误差

Fig. 7 Position errors of integrated navigation by using different methods with loss of position information in short term

4 结论

借助多个导航传感器辅助 SINS 导航是实现 AUV 水下精确导航的重要途径。FKF 是解决多传感器信息融合的有效手段,信息分配系数是决定 FKF 滤波性能的重要因素。AUV 在水下航行的过程中,针对水下复杂环境中 AST、DVL 输出的观测信息易伴随非高斯噪声,提出基于马氏距离算法的 FRKF 算法。同时,针对 AUV 不能持续获取 AST 提供的定位信息,信息分配系数为常值将会降低 FKF 滤波性能的问题,设计了基于子滤波器滤波性能的信息分配系数自适应方法。利用船载实测数据进行水下组合导航半物理仿真试验,仿真试验模拟了 AST 出现故障以及观测信息受到野值干扰的情形。试验结果初步表明:相比于 TFKF,FRKF 在非高斯环境中具有更高的组合导航精度和稳定性;相比于 RKF,FRKF 具有更优

的容错性能。FRKF 能够满足基于 SINS/DVL/AST 的水下组合导航系统对鲁棒性和容错性的要求。

参考文献 (References)

- [1] 赵小华,曹勇,乔凤卫.航空导航技术的发展方向[J].火力与指挥控制,2013,38(6):6-7,15.
ZHAO Xiaohua, CAO Yong, QIAO Fengwei. Development of aero navigation technology [J]. Fire Control & Command Control, 2013, 38(6): 6-7, 15. (in Chinese)
- [2] Tooley M, Wyatt D. Aircraft communications and navigation systems[M]. UK: Routledge, 2017.
- [3] Lager M, Topp E A, Malec J. Underwater terrain navigation using standard sea charts and magnetic field maps [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, 2017: 78-84.
- [4] 朱兵,许江宁,何泓洋,等.载体姿态角与 SINS 位置误差的关系研究[J].海军工程大学学报,2017,29(6):24-27.
ZHU Bing, XU Jiangning, HE Hongyang, et al. Relationship between carrier attitude angular and SINS position error[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2017, 29(6): 24-27. (in Chinese)
- [5] 王巍.惯性技术研究现状及发展趋势[J].自动化学报,2013,39(6):723-729.
WANG Wei. Status and development trend of inertial technology[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(6): 723-729. (in Chinese)
- [6] 秦永元,张洪钺,汪叔华.卡尔曼滤波与组合导航原理[M].3版.西安:西北工业大学出版社,2015.
QIN Yongyuan, ZHANG Hongyue, WANG Shuhua. Kalman filter and principle of integrated navigation[M]. 3rd ed. Xi'an: Northwest Polytechnic University Press, 2015. (in Chinese)
- [7] 孙大军,郑翠娥.水声导航定位技术发展趋势探讨[J].海洋技术学报,2015,34(3):64-68.
SUN Dajun, ZHENG Cuie. Study on the development trend of underwater acoustic navigation and positioning technologies[J]. Journal of Ocean Technology, 2015, 34(3): 64-68. (in Chinese)
- [8] 王彬,翁海娜,梁瑾,等.一种惯性/水声单应答器距离组合导航方法[J].中国惯性技术学报,2017,25(1):86-90.
WANG Bin, WENG Haina, LIANG Jin, et al. Inertial/acoustic range integrated navigation with single transponder[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2017, 25(1): 86-90. (in Chinese)
- [9] 兰华林.深海水声应答器定位导航技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2008.
LAN Hualin. Research on positioning and navigation technique with underwater acoustic transponder in deep sea[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008. (in Chinese)
- [10] Li W L, Zhang L D, Sun F P, et al. Alignment calibration of IMU and Doppler sensors for precision INS/DVL integrated navigation[J]. Optik, 2015, 126(23): 3872-3876.
- [11] Carlson N A. Federated filter for fault-tolerant integrated navigation systems[C]//Proceedings of IEEE Plans Position

- Location and Navigation Symposium, 1988: 110 – 119.
- [12] Carlson N A. Federated square root filter for decentralized parallel processors[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1990, 26(3): 517 – 525.
- [13] Carlson N A, Berarducci M P. Federated Kalman filter simulation results [J]. Navigation, 1994, 41(3): 297 – 322.
- [14] Wang Q Y, Cui X F, Li Y B, et al. Performance enhancement of a USV INS/CNS/DVL integration navigation system based on an adaptive information sharing factor federated filter[J]. Sensors, 2017, 17(2): 239.
- [15] Li Z K, Jian W, Gao J X, et al. The application of adaptive federated filter in GPS-INS-Odometer integrated navigation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(2): 157 – 163.
- [16] Li K, Zhao J X, Wang X Y, et al. Federated ultra-tightly coupled GPS/INS integrated navigation system based on vector tracking for severe jamming environment [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2016, 10(6): 1030 – 1037.
- [17] 段睿, 张小红, 朱锋. 多源信息融合的组合导航自适应联邦滤波算法[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(2): 267 – 272.
DUAN Rui, ZHANG Xiaohong, ZHU Feng. Adaptive federated filter for multi-sources information fusion in integrated navigation system [J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(2): 267 – 272. (in Chinese)
- [18] 喻敏. 长程超短基线定位系统研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005.
YU Min. Research on long range ultra short baseline system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005. (in Chinese)
- [19] 金红新, 杨涛, 王小刚, 等. 多传感器信息融合理论在无人机相对导航中的应用[J]. 国防科技大学学报, 2017, 39(5): 90 – 95.
JIN Hongxin, YANG Tao, WANG Xiaogang, et al. Application of multi-sensor information fusion in UAV relative navigation method [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2017, 39(5): 90 – 95. (in Chinese)
- [20] Karlgaard C D, Schaub H, Chair C D, et al. Robust adaptive estimation for autonomous rendezvous in elliptical orbit[D]. USA: Virginia Tech, 2010.
- [21] Dennis J E, Schnabel R B. Numerical methods for unconstrained optimization and nonlinear equations [M]. USA: SIAM, 1996.
- [22] Zhu B, Wu M, Xu J N, et al. Robust adaptive unscented Kalman filter and its application in initial alignment for body frame velocity aided strapdown inertial navigation system[J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(11): 115102.
- [23] 李万里. 惯性/多普勒组合导航回溯算法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2013.
LI Wanli. INS/DVL integrated navigation by using backtracking scheme[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013. (in Chinese)