

## 基于极大后验估计和模糊控制的水下无源定位技术

李佩娟<sup>1</sup>, 徐晓苏<sup>1</sup>, 张小飞<sup>2</sup>, 蔡 玮<sup>3</sup>

(1. 东南大学 a. 微惯性仪表与先进导航技术教育部重点实验室, b. 仪器科学与工程学院, 南京 210096;  
2. 国网电力科学研究院 实验验证中心, 南京 210061; 3. 南京工程学院 计算机工程学院, 南京 211167)

**摘 要:** 针对高海况条件下因海流扰动的影响导致观测噪声方差未知时变的特点, 基于模糊控制技术提出一种基于FCMAP-UKF滤波技术的水下无源组合导航系统状态估计方法. 该方法在滤波迭代过程中引入模糊自适应因子, 对未知观测噪声方差阵进行动态调节, 提高了系统的自适应能力和鲁棒性. 滤波结果表明, 该系统在达到传统方法精度的同时, 能够克服自主导航过程中不确定的噪声和随机干扰的影响而进行有效的定位导航.

**关键词:** 捷联惯性导航系统; 水下地形组合导航; 模糊控制加权因子; 极大后验估计; 无迹滤波

**中图分类号:** TP202.7

**文献标志码:** A

## Underwater passive location technology based on MAP and fuzzy control

LI Pei-juan<sup>1</sup>, XU Xiao-su<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-fei<sup>2</sup>, CAI Wei<sup>3</sup>

(1a. Key Laboratory of Micro-inertial Instrument and Advanced Navigation Technology of Ministry of Education, 1b. School of Instrument Science & Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Testing and Verification Center, China State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210061, China; 3. School of Computer Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China. Correspondent: LI Pei-juan, E-mail: lpj4444@126.com)

**Abstract:** Under the high sea state conditions, considering ocean current disturbance can lead to uncertain covariance statistic of the measurement noise. Therefore, a state estimation method of underwater passive integrated navigation with FCMAP-UKF based on the fuzzy control method is presented. In this method, fuzzy adaptive factor is adopted to improve the adaptive ability and robustness of the filter by adjusting the uncertain covariance of measurement noise dynamically during the filtering process. Filter results show that the accuracy of the proposed method can achieve the traditional method and in the same time can overcome uncertain noise and disturbance in autonomous navigation system and provide reliable and effective positioning services.

**Key words:** strapdown inertial navigation system; underwater terrain integrated navigation; fuzzy control weighting factor; maximum a posterior estimation; unscented filter

### 0 引 言

水下航行器(AUV)因其活动范围广、隐蔽性高、搭载方便等特点, 已在水下探测、海洋资源调查和水下设施检查等领域得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>. 在AUV执行任务的过程中, 导航系统的精度至关重要, 常用的基于Kalman方法的水下惯性导航方法需建立准确的系统模型, 且惯性导航系统误差随时间积累. 水下地形辅助导航系统(TAN)属于自主导航系统, 隐蔽性好, 在地形匹配区有较高的导航精度, 因此本文通过采用

TAN的观测信息对惯性导航系统输出进行修正<sup>[3-5]</sup>.

AUV惯性导航系统误差模型的本质是非线性的, 当其航行在复杂的高海况环境下时, 该非线性更不能忽略. 工程上常采用EKF和UKF算法解决此问题, UKF的计算量与EKF同阶, 且具有二阶甚至更高阶的精度<sup>[6]</sup>. 传统UKF算法需精确知道系统噪声和观测噪声的统计特性, 但由于海流扰动等海洋环境干扰因素的影响, 导致水下无源定位系统观测噪声方差不能准确定量. 文献[7]针对噪声先验统计未知或

收稿日期: 2012-10-24; 修回日期: 2013-04-16.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61203192, 51175082); 江苏省博士后科研基金项目(1202007C); 东南大学基本科研业务费基金项目(210203); 东南大学微惯性仪表与先进导航技术教育部重点实验室(B类)开放基金项目(3222002301).

作者简介: 李佩娟(1982-), 女, 博士后, 从事水下组合导航系统滤波技术、故障诊断技术的研究; 徐晓苏(1961-), 男, 教授, 从事惯性组合导航技术等研究.

不准确导致的滤波精度下降甚至发散的问题, 基于极大后验 (MAP) 估计原理, 设计了一种带噪声估计器的 UKF 算法, 该算法在进行状态估计的同时实时估计噪声均值和协方差, 滤波稳定性和收敛性得到一定的提高. 文献 [8] 将模糊逻辑方法与 UKF 算法相结合, 利用协方差匹配技术与模糊控制方法逐步调整观测噪声协方差阵  $R$ , 从而动态跟踪观测噪声方差的变化情况以实现自适应控制. 文献 [9] 针对上述模糊自适应模块通用性不强的问题对其进行改进, 在模糊自适应 UKF 算法中将残差的协方差估计值与真实值之比作为系统的输入.

本文针对应用对象和其特殊的航行环境, 设计了应用于水下航行环境的模糊控制加权法的自适应 UKF 滤波方法. 该方法通过递推方式动态调整系统观测噪声阵, 使其尽量逼近真值, 并设定常值参数来寻求自适应过程中速度与稳态的最佳平衡点.

## 1 模糊控制加权自适应噪声估计器

### 1.1 基于 MAP 估计准则的噪声估计器

MAP 估计准则是以使条件概率密度函数  $p(X|Z)$  达到最大的那个值作为状态估计值. 基于 MAP 估计准则的时变噪声统计估计器递推公式<sup>[10]</sup>为

$$\hat{q}_{k+1} = \frac{k\hat{q}_k + \hat{X}_{k+1} - f_k(X_k, k)|_{X_k = \hat{X}_k}}{k+1}, \quad (1)$$

$$\hat{Q}_{k+1} = [k\hat{Q}_k + K_{k+1}\varepsilon_{k+1}\varepsilon_{k+1}^T K_{k+1}^T + P_{k+1} - E(A_k A_k^T)] / (k+1), \quad (2)$$

$$\hat{r}_{k+1} = \frac{k\hat{r}_k + Z_{k+1} - h_{k+1}(X_{k+1}, k+1)|_{X_{k+1} = \hat{X}_{(k+1)|k}}}{k+1}, \quad (3)$$

$$\hat{R}_{k+1} = \frac{k\hat{R}_k + \varepsilon_{k+1}\varepsilon_{k+1}^T - E(\Theta_{k+1}\Theta_{k+1}^T)}{k+1}, \quad (4)$$

$$A_k = f_k(X_k, k) - f_k(X_k, k)|_{X_k = \hat{X}_k}, \quad (5)$$

$$\Theta_{k+1} = h_{k+1}(X_{k+1}, k+1) - h_{k+1}(X_{k+1}, k+1)|_{X_{k+1} = \hat{X}_{(k+1)|k}}. \quad (6)$$

其中:  $h_{k+1}(X_{k+1}, k+1)|_{X_{k+1} = \hat{X}_{(k+1)|k}}$  为状态一步预测值  $\hat{X}_{(k+1)|k}$  经观测函数传递后的后验均值,  $f_k(X_k, k)|_{X_k = \hat{X}_k}$  为  $k$  时刻状态估计值  $\hat{X}_k$  经状态函数传递后的后验均值,  $\varepsilon_{k+1}$  为滤波输出残差序列.

### 1.2 模糊控制加权法

模糊控制加权法通过监测理论残差与实际残差是否一致, 应用模糊控制器 (FC) 调整观测噪声方差阵的加权系数. 通过分析残差统计特性可知, 如果系统模型建立准确, 理论残差方差与实际残差方差比值应接近于 1.

选择加权系数  $\beta_{k+1}^b$  使之满足

$$\hat{R}_{k+1} = \beta_{k+1}^b \hat{R}_k, \quad \beta_{k+1}^b = \text{FC}[\alpha_{k+1}]. \quad (7)$$

其中:  $\hat{R}_{k+1}$  为第  $k+1$  步观测噪声矩阵估计值;  $\beta_{k+1}^b$  为对  $\hat{R}_{k+1}$  的加权调整系数;  $\alpha_{k+1}$  为残差实际方差和理论方差之间的比值;  $b$  为大于零的常数, 表示对  $\beta_{k+1}^b$  的放大程度. 其意义如下: 若  $b > 1$  表示放大  $\beta_{k+1}^b$  对  $\hat{R}_{k+1}$  的调节作用, 则可快速调节  $\hat{R}_{k+1}$  使其逼近真实值, 但如果  $b$  选取太大, 则可能导致  $\hat{R}_{k+1}$  在真实值附近做小幅振荡; 若  $b < 1$ , 则作用相反, 可提高  $\hat{R}_{k+1}$  的稳定性, 但同时会增加  $\hat{R}_{k+1}$  的自适应调节过渡时间.

$\beta_{k+1}^b$  由模糊控制系统得到, 控制系统的输入为  $\alpha_{k+1}$ <sup>[11]</sup>. 由滤波过程可知残差方差理论值  $P_{z_{k+1}}$ .

系统实际残差方差阵为

$$\bar{C}_{k+1} = \frac{\sum_{i=k-M+1}^k (Z_{i+1} - \hat{Z}_{(i+1)|i})(Z_{i+1} - \hat{Z}_{(i+1)|i})^T}{M}, \quad (8)$$

其中  $M$  表示对最近得到的  $M$  个残差向量求平均, 它的值根据实际情况由经验确定<sup>[12]</sup>.

定义残差实际方差和理论方差两者的比值为

$$\alpha_{k+1} = \text{tr}(\bar{C}_{k+1}) / \text{tr}(P_{z_{k+1}}), \quad (9)$$

当观测噪声统计特性准确时, 比值应接近于 1. 如果观测噪声增大, 则实际残差方差阵增大, 同时比值增大, 应通过模糊控制系统调节增大观测噪声协方差阵, 使其接近真实值; 如果观测噪声减小, 则实际残差方差阵减小, 同时比值减小, 应通过模糊控制系统调节减小观测噪声协方差阵使其接近真实值.

### 1.3 模糊推理系统

模糊控制器的输入输出变量都是语言变量, 通过语言值集合描述, 每个语言值都有其隶属函数, 将确定的隶属函数曲线离散化, 得到有限个点上的隶属函数, 这样便构成了一个相应的语言值的模糊子集. 在本系统中, 设输入的语言变量为  $E$ , 输出控制量的语言变量为  $u$ , 定义模糊子集 **equal 1** 表示接近 1, **more 1** 表示大于 1, **less 1** 表示小于 1. 模糊控制调节系数  $\beta_{k+1}$  的模糊规则如下:

If  $E \in \text{equal 1}$ , Then  $u \in \text{equal 1}$ ;

If  $E \in \text{more 1}$ , Then  $u \in \text{more 1}$ ;

If  $E \in \text{less 1}$ , Then  $u \in \text{less 1}$ .

输入输出隶属度函数选择三角隶属函数, 分别如图 1 和图 2 所示.

模糊控制系统决策出的控制量是一个模糊子集, 不能直接应用于被控对象, 仍需将其转化为精确量. 本系统选择重心法进行非模糊化, 即输出为隶属度函数曲线包含区域的重心. 此 FC 为单输入单输出系统,

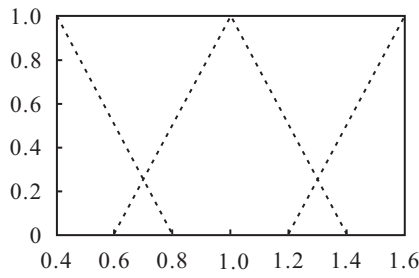


图1 输入变量的隶属函数

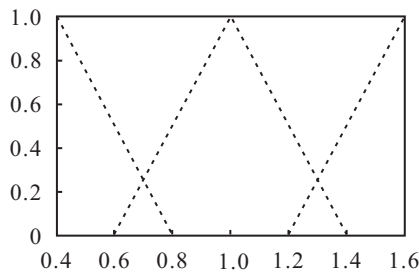


图2 输出变量的隶属函数

有3条模糊控制规则, 将每次FC运算获得的加权系数代入式(7), 对观测噪声协方差进行动态调节。

## 2 基于FCMAP-UKF水下无源定位系统

SINS/TAN水下无源定位系统按有无反馈分为闭环和开环两种方案<sup>[13]</sup>。本文根据应用对象及仪表精度选择闭环反馈校正方法, 其原理如图3所示。

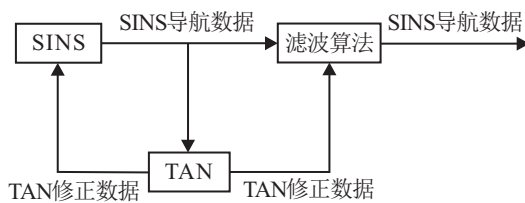


图3 SINS/TAN组合导航系统原理

### 2.1 水下无源定位系统数学模型

TAN的经纬度位置信息是以地理坐标系下SINS的经纬度信息作为基准, 并通过软件计算得到的经纬度信息, 所以SINS/TAN位置组合子滤波器状态方程为惯导误差状态方程和测深测潜仪提供的高度误差状态方程。

组合系统状态变量为

$$X = [\delta V_E, \delta V_N, \delta V_U, \delta \phi_E, \delta \phi_N, \delta \phi_U, \delta L, \delta \lambda, \delta h, \nabla_{bx}, \nabla_{by}, \nabla_{bz}, \varepsilon_{bx}, \varepsilon_{by}, \varepsilon_{bz}, \delta h_c].$$

其中:  $\delta V_E, \delta V_N, \delta V_U$  为东向、北向和天向速度误差;  $\delta \phi_E, \delta \phi_N, \delta \phi_U$  为东向、北向和天向失准角误差;  $\delta L, \delta \lambda, \delta h$  为纬度、经度和高度误差;  $\nabla_{bx}, \nabla_{by}, \nabla_{bz}$  为  $x, y, z$  三个轴的加速度计零偏;  $\varepsilon_{bx}, \varepsilon_{by}, \varepsilon_{bz}$  为  $x, y, z$  三个轴的陀螺漂移, 以上15个变量为SINS的状态变量。  $\delta h_c$  为测深测潜仪测得的高度误差, 是TAN系统状态变量。

SINS 状态空间形式的状态误差方程为

$$\dot{\phi} = \delta \omega_{ie}^n + \delta \omega_{en}^n + (I - C_n^P)(\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) + \varepsilon^P, \quad (10)$$

$$\delta \dot{V}^n = C_n^P \hat{f}^b - (2\delta \omega_{ie}^n + \delta \omega_{en}^n)V^n - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n)\delta V^n + C_n^P \nabla^n, \quad (11)$$

$$\begin{cases} \delta \dot{L} = \frac{\delta V_N}{Rn+h} - \frac{V_N}{(Rn+h)^2} \delta h, \\ \delta \dot{\lambda} = \frac{\delta V_E}{Re+h} \sec L - \frac{V_E}{Re+h} \sec L \tan L \delta L - \frac{V_E}{(Re+h)^2} \sec L \delta h, \\ \delta \dot{h} = \delta V_U. \end{cases} \quad (12)$$

TAN 系统中测深测潜仪的误差一般可认为是一个随机过程, 采用一阶马尔科夫过程近似表示为

$$\delta \dot{h}_c = -\frac{1}{\tau_c} \delta h_c + W_{hc}. \quad (13)$$

将SINS和TAN的位置差值作为位置观测值, 观测方程为

$$Z = \begin{bmatrix} L_S - L_T \\ \lambda_S - \lambda_T \\ h_S - h_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta L - \delta L_T + \eta_L \\ \delta \lambda - \delta \lambda_T + \eta_\lambda \\ \delta h_S - \delta h_c + \eta_h \end{bmatrix}. \quad (14)$$

### 2.2 FCMAP-UKF滤波算法

针对以上分析, 水下SINS/TAN组合导航系统算法流程可表示如下:

1) 初始状态统计特性为

$$\begin{cases} \hat{X}_0 = E(X_0), \\ P_0 = \text{Cov}(X_0) = E(X_0 - \hat{X}_0)(X_0 - \hat{X}_0)^T. \end{cases} \quad (15)$$

2) 构造Sigma采样点及其一阶和二阶统计特性权系数, 即

$$\begin{cases} \xi_0 = \bar{X}, \\ \xi_i = \bar{X} + (\sqrt{(n+\mu)P_k})_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \\ \xi_{i+n} = \bar{X} - (\sqrt{(n+\mu)P_k})_i, \\ W_i^m = \mu/(n+\mu), \quad i = 0; \\ W_i^c = 1/2(n+\mu), \quad i \neq 0. \end{cases} \quad (17)$$

其中:  $\mu$  为比例系数, 可用于调节Sigma点和  $X$  的距离, 仅影响二阶之后的高阶矩带来的偏差;  $n$  为系统状态位数,  $(\sqrt{(n+\mu)P_k})_i$  为  $(n+\mu)P_k$  的平方根矩阵的第  $i$  行或列。

3) 求状态一步预测  $\hat{X}_{(k+1)|k}$ , 以及预测误差的协方差矩阵  $P_{(k+1)|k}$ 。本系统的观测方程为线性方程, 因此观测预测值可简化表示, 具体如下:

$$\chi_{i,(k+1)|k} = f_k(\xi_{i,k}, k), \quad i = 0, 1, \dots, 2n; \quad (18)$$

$$\hat{X}_{(k+1)|k} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^m \chi_{i,(k+1)|k} + \hat{q}_k; \quad (19)$$

$$P_{(k+1)|k} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^c (\chi_{i,(k+1)|k} - \hat{X}_{(k+1)|k}) \times (\chi_{i,(k+1)|k} - \hat{X}_{(k+1)|k})^T + \hat{Q}_k; \quad (20)$$

$$\hat{Z}_{(k+1)|k} = H_{k+1} \hat{X}_{(k+1)|k} + \hat{r}_{k+1}; \quad (21)$$

$$P_{\hat{Z}_{k+1}} = H_{k+1} P_{(k+1)|k} H_{k+1}^T + \hat{R}_{k+1}; \quad (22)$$

$$P_{\hat{X}_{k+1} \hat{Z}_{k+1}} = P_{(k+1)|k} H_{k+1}^T. \quad (23)$$

4) 观察更新, 有

$$\hat{X}_{k+1} = \hat{X}_{(k+1)|k} + K_{k+1} (Z_{k+1} - \hat{Z}_{(k+1)|k}), \quad (24)$$

$$K_{k+1} = P_{\hat{X}_{k+1} \hat{Z}_{k+1}} P_{\hat{Z}_{k+1}}^{-1}, \quad (25)$$

$$P_{k+1} = P_{(k+1)|k} - K_{k+1} P_{\hat{Z}_{k+1}}^{-1} K_{k+1}^T. \quad (26)$$

5) 利用模糊控制自适应估计器进行观测噪声统计特性更新, 有

$$\hat{q}_{k+1} = \frac{k \hat{q}_k + \hat{X}_{(k+1)|k} - \sum_{i=0}^{2n} W_i^m \chi_{i,(k+1)|k}}{k+1},$$

$$\hat{Q}_{k+1} = \frac{1}{k+1} \left[ k \hat{Q}_k + K_{k+1} \varepsilon_{k+1} \varepsilon_{k+1}^T K_{k+1}^T + P_{k+1} - \sum_{i=0}^{2n} W_i^c (\chi_{i,(k+1)|k} - \hat{X}_{(k+1)|k}) \times (\chi_{i,(k+1)|k} - \hat{X}_{(k+1)|k})^T \right],$$

$$\hat{r}_{k+1} = \frac{k \hat{r}_k + Z_{k+1} - E(H_{k+1} \hat{X}_{(k+1)|k})}{k+1},$$

$$\hat{R}_{k+1} = \text{FC}[\alpha_{k+1}] \hat{R}_k. \quad (27)$$

### 3 仿真分析

仿真环境下, AUV 进行水下匀速直线运动, 航行器沿横滚轴和纵摇轴方向的导航传感器因受到海流干扰, 模拟航行状态. AUV 摇摆幅度 (航向、纵摇和横摇):  $10^\circ, 7^\circ, 8^\circ$ ; 摇摆周期: 6s, 8s, 10s; 初始姿态角:  $45^\circ, 0^\circ, 0^\circ$ ; 航行器初始经度、纬度、高度:  $120^\circ, 38^\circ, -100\text{m}$ ; 初始东向、北向、天向速度:  $5\text{m/s}, 5\text{m/s}, 0$ ; 3个加速度计常值偏差、随机漂移:  $50\mu\text{g}, 50\mu\text{g}$ ; 3个陀螺常值漂移、随机漂移:  $0.1^\circ/\text{h}, 0.1^\circ/\text{h}$ . TAN 位置误差  $50\text{m}$ , 相关时间为  $300\text{s}$ . 考虑到海洋环境干扰较为复杂 (如海流、季风效应、海水盐度、温度的影响等), 对观测噪声的影响较大, 因此其方差阵  $R_k$  具有时变特性, 本文视其为未知统计量且具有如下初值:  $R_0 = \text{diag}[(15\text{m})^2, (20\text{m})^2, (30\text{m})^2]$ , 并假定  $R_k$  具有时变特性  $R_k = (1.55)^{\sigma_k} R_0$ , 其中  $\sigma_k$  表示  $k$  时刻均匀分布于  $(0,1)$  区间内的随机数. 初始系统滤波方差及系统方差如下:

$$P_0 = \text{diag}[(0.1\text{m/s})_{3 \times 1}^2, (0.05^\circ)_{3 \times 1}^2, (0.05^\circ)^2, (0.0025^\circ)^2, (0.0045^\circ)^2, (0.0022^\circ)^2, (50\mu\text{g})_{3 \times 1}^2, (0.1^\circ/\text{h})_{3 \times 1}^2, (50\text{m})^2],$$

$$Q = \text{diag}[(50\mu\text{g})_{3 \times 1}^2, (0.1^\circ/\text{h})_{6 \times 1}^2, 0_{6 \times 1}, (30\text{m})^2].$$

根据上述参数及 FCMAP-UKF 滤波器模型设计, 仿真实验采用 VC++6.0 与 Matlab 6.5 工具箱完成, 估计误差如图 4~图 6 所示, 虚线为带 MAP 时变噪声估计器的自适应 UKF 滤波算法结果, 直线为 FCMAP-UKF 滤波算法结果. 表 1 是仿真得出的部分导航参数误差的均值和方差.

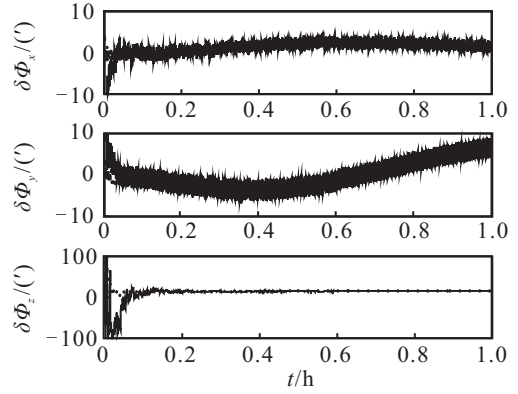


图 4 姿态估计误差曲线

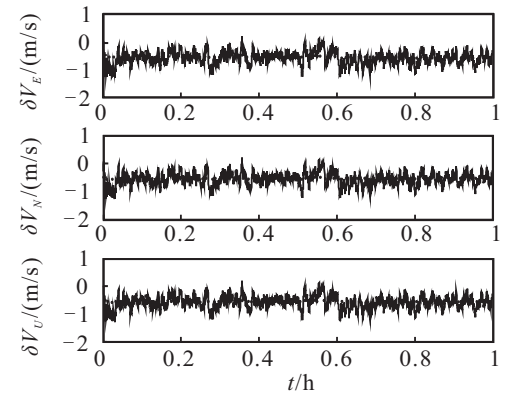


图 5 速度估计误差曲线

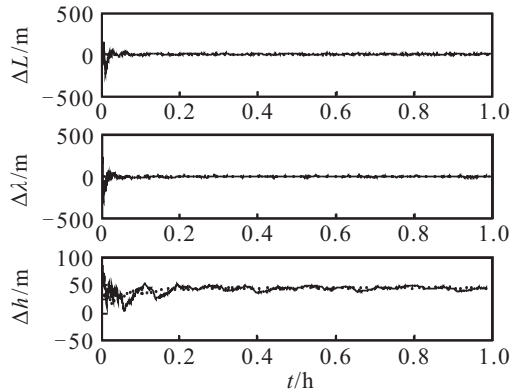


图 6 位置估计误差曲线

从仿真结果可以看出: 在设置的仿真条件下传统自适应 UKF 滤波算法可以有效估计各导航参数, 但收敛速度相对较慢, 且速度和位置误差的震动幅度相对较大; FCMAP-UKF 滤波算法将模糊控制自适应因子引入自适应 UKF 算法中, 能够抑制初始值偏差和

表1 FCMAP-UKF与AUKF滤波算法仿真结果分析

导航参数	AUKF		FCMAP-UKF	
	均值	方差	均值	方差
纵摇角/(°)	1.239	2.183	1.351	1.340
航向角/(°)	10.791	42.444	-4.065	17.972
东向速度/(m/s)	-0.143	-0.302	-0.096	0.101
天向速度/(m/s)	-0.119	-0.302	-0.118	0.194
纬度/m	22.720	72.914	-20.703	17.404
高度/m	47.629	20.579	47.631	13.099

环境扰动误差对导航解的影响,减小滤波误差,使结果更接近真实值,收敛速度和估计精度方面均明显优于传统的自适应UKF。由表1结果可见,两种方法均值相当,但FCMAP-UKF方差效果明显好于传统自适应UKF算法。仿真结果表明,FCMAP-UKF滤波算法在受未知噪声和扰动因素的影响时,可以很好地适应观测噪声方差阵的动态变化,有效抑制滤波的发散,减小系统方程状态误差,加快收敛速度,增强了水下无源组合导航系统应对外部恶劣环境变化的鲁棒性。

#### 4 结 论

本文考虑水下无源组合导航系统航行的具体环境,给出了无源组合导航系统的非线性模型及相关参数,针对时变的观测噪声方差统计特性,提出了一种基于模糊控制方法的FCMAP-UKF算法。在模糊控制系统的设计过程中,以残差的实际方差与理论方差之间的比值作为模糊控制器的输入,利用输出参数作为未知观测噪声方差阵的附加系数进行动态调节,使算法具有实时自适应能力。通过算法设计和仿真实验,验证了算法的有效性,仿真结果表明该方法对于水下环境的变化具有较强的适应性,能有效提高导航精度。

#### 参考文献(References)

- [1] Goodman L, Wang Z K. Turbulence observations in the northern bight of monterey bay from a small AUV[J]. J of Marine Systems, 2009, 77(4): 441-458.
- [2] Xu Hongli, Kang Xiaodong. Plume source localization based on multi-AUV system[J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2012, 135: 377-383.
- [3] Anonsen Kjetil Bergh, Hagen Ove Kent. Terrain aided underwater navigation using pockmarks[C]. IEEE Ocean Conf. Biloxi, 2009: 2216-2221.
- [4] Martin Scott M, Dawkins Jeremy J, Travis William E, et al. Terrain characterization and feature extraction for automated convoys[C]. The 23rd Int Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute-of-Navigation. Portland, 2010: 256-265.
- [5] Anonsen Kjetil Bergh, Hagen Ove Kent. An analysis of real-time terrain aided avigation results from a HUGIN

AUV[C]. Washington State Conf and Trade Center (WSCTC). Seattle WA, 2010: 1-9.

- [6] Julier S, Uhlmann J K. Unscented filter and nonlinear estimation[J]. Proc of the IEEE, 2004, 92(3): 401-422.
- [7] 赵琳, 王小旭, 薛红香, 等. 带噪声统计估计器的 Unscented 卡尔曼滤波器设计[J]. 控制与决策, 2009, 24(10): 1483-1488.  
(Zhao L, Wang X X, Xue H X, et al. Design of Unscented Kalman filter with noise statistic estimator[J]. Control and Decision, 2009, 24(10): 1483-1488.)
- [8] Escamilla P J, Mort N. A hybrid Kalman filter-fuzzy logic architecture for multisensor data fusion[C]. Proc of the 2001 IEEE Int Symposium on Intelligent Control. Mexico, 2001: 364-369.
- [9] 李建文, 郝顺义, 黄国荣. 基于通用FLAC的模糊自适应UKF算法及其应用[J]. 传感技术学报, 2009, 22(12): 1732-1736.  
(Li J W, Hao S Y, Huang G R. A fussy adaptive UKF algorithm based on the generic FLAC and its application[J]. Chinese J of Sensors and Actuator, 2009, 22(12): 1732-1736.)
- [10] 王小旭. 非线性SPKF算法研究及其在组合导航系统中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学自动化学院, 2010: 65-72.  
(Wang X X. Research on nonlinear SPKF filtering algorithm and its application for integrated navigation[D]. Harbin: College of Automation, Harbin Engineering University, 2010: 65-72.)
- [11] Kwang-Hoon K. The stability analysis of the adaptive fading extended Kalman filter using the innovation covariance[J]. Int J of Control Automation and Systems, 2009, 7(1): 49-56.
- [12] 李璟璟, 张迎春, 李葆华. 基于AE-UKF的航天器自主导航方法[J]. 宇航学报, 2011, 32(3): 482-488.  
(Li J J, Zhang Y C, Li B H. Spacecraft autonomous navigation method based on AE-UKF[J]. J of Astronautics, 2011, 32(3): 482-488.)
- [13] 冯庆堂. 地形匹配新方法及其环境适应性研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学控制科学与工程学院, 2004: 21-25.  
(Feng Q T. The research on new terrain elevation matching approaches and their applicability[D]. Changsha: School of Control Science and Engineering, Engineering National University of Defense Technology, 2004: 21-25.)

(责任编辑: 孙艺红)