

文章编号 1004-924X(2001)04-0348-05

# 水面多传感器组合导航系统技术研究

程 莉, 颜国正, 颜德田

(上海交通大学电子信息学院精密机械及仪器研究所, 上海 200030)

**摘要:**研究了 INS、GPS、Doppler 计程仪组成的水面多传感器组合导航技术, 给出了设计方案; 介绍了一种修正的自适应卡尔曼滤波算法, 并应用于组合导航系统。仿真结果表明, 该算法可以有效的抑制滤波发散, 提高了组合导航系统的精度。

**关键词:**惯性导航系统; 全球定位系统; 组合导航系统; 自适应卡尔曼滤波; 传感器

**中图分类号:** V241.6 **文献标识码:** A

## 1 引 言

目前各种不同形式的导航设备和系统中具有这样或那样的缺点, 单一的导航系统难以满足现代航行和战斗的需要, 为满足舰船各种先进武器发展、编队、综合作战能力的需要, 以及舰船导航系统高精度、高可靠性、低成本的要求, 准确、迅速、高性能的组合导航系统的产生是客观和必然的。

由于组合导航系统广泛的包容性, 它能有效的利用各子系统的信息, 相互取长补短, 使导航精度提高, 系统可靠性提高, 通过计算机控制可实现在几种组合模式下的自动切换, 使系统具有一定容错性。系统具有多功能, 除提供导航信息外, 还可与其它系统配合, 实现全船自动化。

本文研究了由 INS、GPS、Doppler 计程仪组成的水面多传感器组合导航技术, 介绍了一种修正的自适应卡尔曼滤波算法, 并应用于组合导航系统, 以提高组合导航系统精度。

## 2 水面多传感器组合导航系统的数学模型

### 2.1 系统状态方程

水面多传感器组合导航系统的系统状态方程为:

$$X(t) = A(t)X(t) + W(t)$$

式中  $X(t)$  是系统的状态变量, 19 维,

包括:

7 个 INS 导航误差状态

$$X_{INS} = [\alpha \beta \gamma \delta V_x \delta V_y \delta \varphi_{INS} \delta \lambda_{INS}]$$

3 个陀螺常值漂移状态

$$X_{ec} = [\epsilon_{cx} \epsilon_{cy} \epsilon_{cz}]$$

3 个陀螺一阶马尔可夫过程随机漂移

$$X_{er} = [\epsilon_{rx} \epsilon_{ry} \epsilon_{rz}]$$

2 个加速度计零位偏差  $X_{\Delta A} = [\Delta A_x \Delta A_y]$

2 个一阶马尔可夫过程 GPS 位置误差状态

$$X_{GPS} = [\delta \varphi_{GPS} \delta \lambda_{GPS}]$$

2 个水流状态  $X_c = [C_x \ C_y]$  即

$$X = [X_{INS} \ X_{ec} \ X_{er} \ X_{\Delta A} \ X_{GPS} \ X_c]$$

$W(t)$  是均值为零的高斯白噪声矢量。

包括 3 个陀螺随机噪声漂移

$$\epsilon_w = [\epsilon_{wx} \ \epsilon_{wy} \ \epsilon_{wz}]$$

3 个陀螺马尔可夫过程的驱动白噪声

$$\eta_e = [\eta_{ex} \ \eta_{ey} \ \eta_{ez}]$$

2 个 GPS 时钟偏差和时钟漂移率白噪声

$$\eta_{GPS} = [\eta_{GPSc} \ \eta_{GPSr}]$$

2 个水流漂移白噪声

$\eta_c = [\eta_c \ \eta_c]$  即  $W(t) = [\epsilon_w \ 0 \ \eta_c \ 0 \ \eta_{GPS} \ \eta_c]$ , 其中,  $0_7 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ ,  $0_2 = [0 \ 0]$  为零向量。

$A(t)$  为系统矩阵,  $19 \times 19$  维。

### 2.2 系统观测方程

水面多传感器组合导航系统的系统观测方程为:

$$Z(t) = H(t)X(t) + \xi(t)$$

观测方程的观测量为 4 个, 其中 INS 与 GPS 的定位差观测量 2 个, INS 与计程仪速度的差 2 个。 $\xi(t)$  为  $4 \times 1$  的观测噪声向量, 计程仪的测速误差被包括在内。

### 3 一种修正的自适应 Kalman 滤波算法

由于噪声均值  $q(k)$ 、 $r(k)$ , 斜方差阵  $Q(k)$ 、 $R(k)$  均为未知值, 自适应滤波的问题是基于观测值  $Z(k)$  求噪声统计  $q(k)$ 、 $r(k)$ 、 $Q(k)$ 、 $R(k)$  和状态  $X(k)$  的 Kalman 滤波器。

对于数学模型

$$\begin{cases} X(k) = A(k, k-1)X(k-1) + \\ \quad B(k-1)W(k-1) \\ Z(k) = H(k)X(k) + V(k) \end{cases}$$

在噪声统计规律已知时, 上式的 Kalman 滤波为:

$$\begin{cases} X(k/k) = X(k/k-1) + K(k)\epsilon(k) \\ \epsilon(k) = Z(k) - H(k)X(k/k-1) + q(k-1) \\ X(k/k-1) = A(k/k-1)X(k-1/k-1) + \\ \quad q(k-1) \\ K(k) = p(k/k-1)H(k) \cdot \\ \quad [H(k)P(k/k-1) \cdot H^T(k) + R(k-1)]^{-1} \\ P(k/k-1) = A(k, k-1)P(k-1/k-1) \cdot \\ \quad A^T(k, k-1) + B(k-1)Q(k-1)B^T(k-1) \\ P(k/k) = [I - K(k)H(k)]P(k/k-1) \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$X(0/0) = E[(0)] = X_0,$$

$$P(0/0) = D[(0)] = P_0$$

假设  $q(k)$ 、 $r(k)$ 、 $Q(k)$ 、 $R(k)$  相互独立且服从均匀分布, 则可通过极大化后验概率密度函数

求得极大化后验噪声估计为:

$$\begin{cases} q(K) = \\ \quad 1/K \sum_{j=1}^k [X(j/k) - A(j, j-1)X(j-1/k)] \\ Q(k) = 1/k \sum_{j=1}^k [X(j/k) - A(j, j-1) \cdot \\ \quad X(j-1/k) - q(k)]^T \cdot \\ r(k) = 1/k \sum_{j=1}^k [Z(j) - H(j)X(j/k)] \\ R(k) = 1/k \sum_{j=1}^k [Z(j) - H(j)X(j/k) - r(k)] \cdot \\ \quad [Z(j) - H(j)X(j/k) - r(k)]^T \end{cases}$$

上式中可以用滤波估计值  $X(j/j)$  或预测值  $X(j/j-1)$  近似代替  $X(j/k)$ , 并减去有偏估计项, 就可得到次优无偏极大后验估计。

当未知噪声的均值和方差为时变时, 为了强调新数据, 逐渐忘掉过去的旧数据的作用, 采用渐消记忆指数加权法, 加入加权系数  $\beta_i$  来实现。

$$\begin{cases} \beta_i = d_k \cdot b^i \\ d_k = (1-b)/(1-b^{k-1}) \end{cases}$$

$b$  为遗忘因子。由此得到时变噪声下  $q(k)$ 、 $r(k)$ 、 $Q(k)$ 、 $R(k)$  的估计:

$$\begin{cases} q(k) = (1-d_k)q(k-1) + d_k \cdot \\ \quad [X(k/k) - A(k, k-1)X(k-1/k-1)] \\ Q(k) = (1-d_k)Q(k-1) + d_k \cdot \\ \quad [K(k)\epsilon(k)\epsilon^T(k) \cdot K^T(k) + P(k/k) - \\ \quad A(k, k-1) \cdot P(k-1/k-1)A^T(k, k-1)] \\ r(k) = (1-d_k)r(k) + d_k \cdot \\ \quad [Z(k) - H(k)X(k/k-1)] \\ R(k) = (1-d_k)R(k-1) + d_k \cdot \\ \quad [\epsilon(k)\epsilon^T(k) - H(k)P(k/k-1)H^T(k)] \end{cases} \quad (2)$$

交替应用(1)、(2)式, 即实现了模型噪声和观测噪声均未知的自适应 Kalman 滤波。

### 4 系统仿真与结果分析

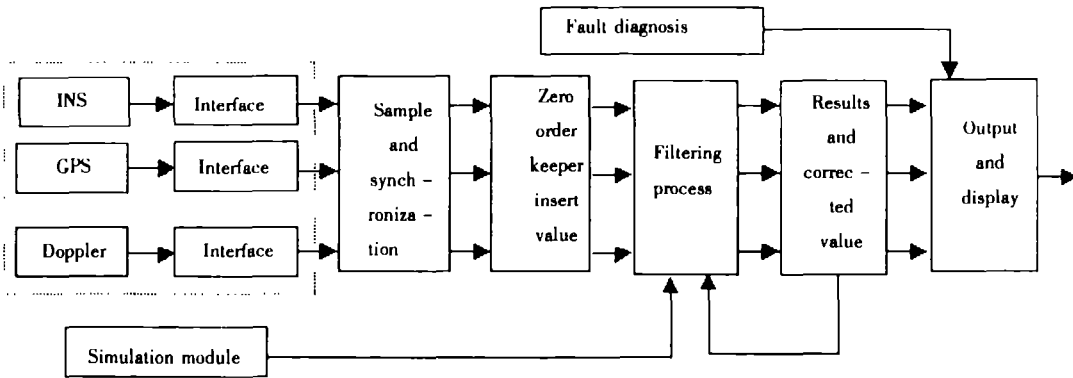


Fig.1 Simulation principle chart of the multisensor integrated navigation system

从图 1 可看出,该系统由两部分组成,一是整个系统的传感器部分(包括 INS、GPS、Doppler 计程仪);二是组合导航系统计算机,即软件部分,分别仿真传感器部分和组合导航系统的算法实现。从传感器获得的原始信息通过故障诊断,判断传感器是否正常工作,原始信息经采样、保持及滤波处理后,经故障诊断判断滤波是否发散,校正后输出结果。

本设计在仿真中所取参数为:

加速度计的零值漂移  $A_x = A_y = 10^{-4}g$ ,

$$\alpha_0 = \beta_0 = 0.017^\circ \quad \gamma_0 = 0.083^\circ$$

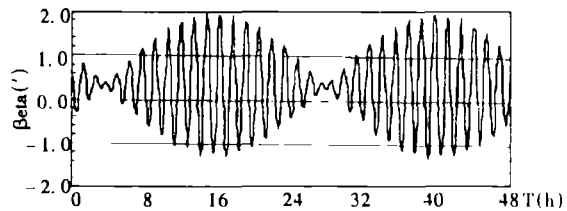
$$\delta\varphi_{INS} = 0.034^\circ \quad \delta\lambda_{INS} = 0$$

$$\delta V_x = 1m/s \quad \delta V_y = 1m/s$$

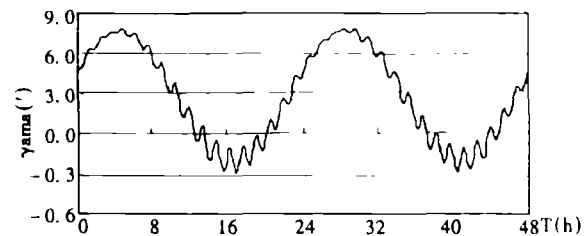
设东、北、天方向上的陀螺误差特性相同,取  $\epsilon_c = 0.01^\circ/h$ ,  $\epsilon_w$  的标准差为  $0.005^\circ/h$ , 一阶马尔可夫过程相关时间为  $3h$ , 标准差为  $0.005^\circ/h$ 。

$$\delta\varphi_{GPS} = 120^\circ \quad \delta\lambda_{GPS} = 30^\circ$$

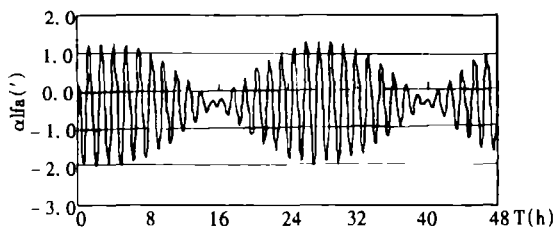
仿真结果如图 2、3 所示:



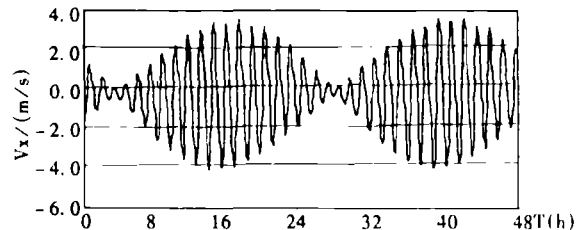
(b)



(c)



(a)



(d)

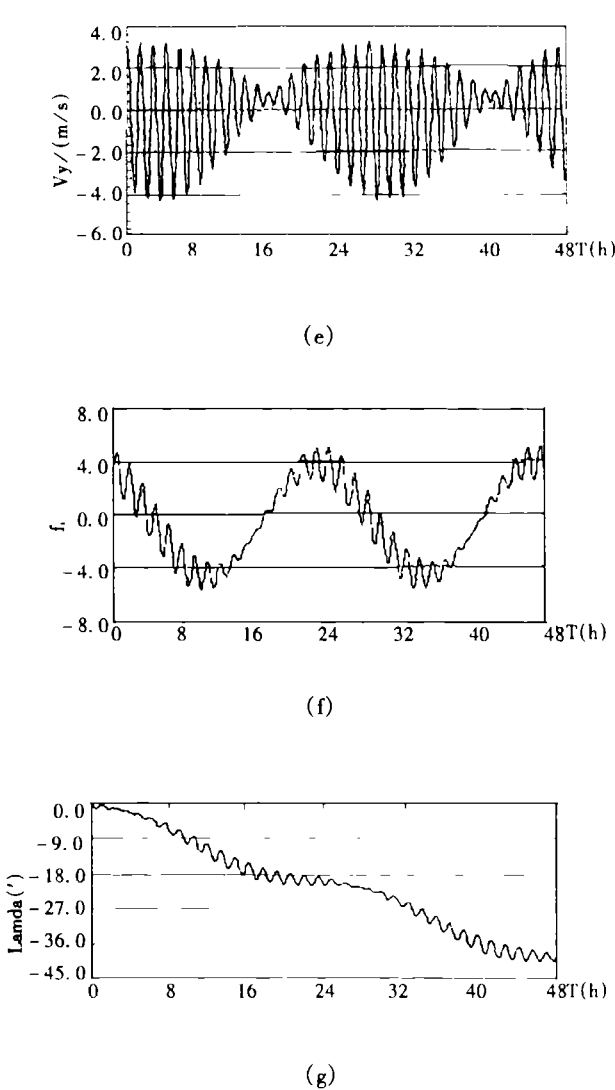


Fig.2 Results of INS simulation

由图 2 可以看出,在 INS 系统中,数学平台失准角 ( $\Phi_x, \Phi_y, \Phi_z$ )、速度误差 ( $\delta V_x, \delta V_y$ ) 和位置误差 ( $\delta \varphi, \delta \lambda$ ) 均是振荡的,振荡频率为舒勒频率和地球频率。而加速度计的常值偏差只会引起舒勒振荡,不会引起地球振荡,所以也说明了陀螺漂移中具有常值分量;另一方面由图可以看出,有随时间增长而发散的现象,可见陀螺漂移中还含有严重的随机分量,造成了 INS 的误差随时间积累而增长。由于该随机分量具有慢衰减、强惯性和长记忆的特性,对 INS 产生非常有害的影响,且造成 INS 精度很低,必须给予补偿和校正。

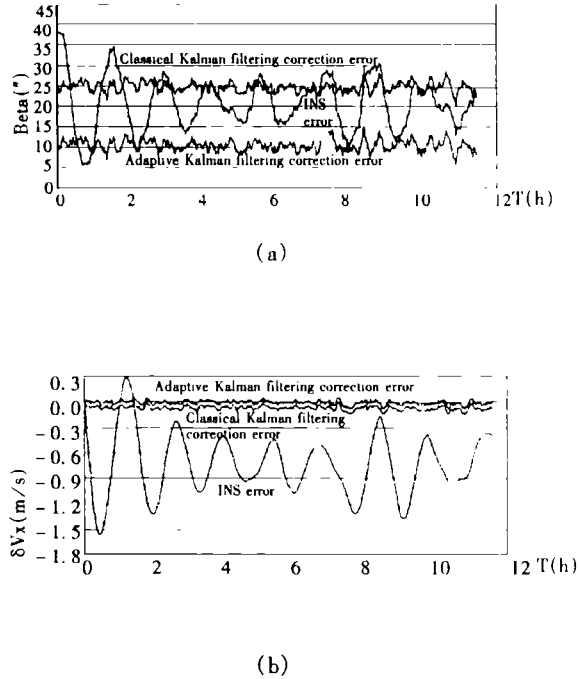


Fig.3 Adaptive Kalman filtering correction error of the multisensor integrated navigation system

图 3 给出了水平基准误差角  $\beta$  曲线和东向速度误差  $\delta V_x$  曲线,其它曲线类似。

图中给出了 INS 误差与组合导航系统经滤波处理后的滤波修正残差,可以看出,组合导航系统的精度明显提高,组合导航系统定位克服了 INS 的误差积累特性,与经典自适应卡尔曼滤波比较,由于水面多传感器组合导航系统是有常值干扰的系统,因此经典卡尔曼滤波是有偏估计。修正的自适应卡尔曼滤波算法对系统的误差估计更为有效,自适应滤波对系统状态和随机常值干扰量同时进行估计,使滤波估计无偏,且自适应卡尔曼滤波不必事先了解各个系统的输出噪声模型,可以达到工程上的需求。

### 5 结论

本文研究的水面多传感器组合导航系统对 INS 系统的精度有一定程度改善,提出的自适应卡尔曼滤波算法,通过适当调整遗忘因子,可有效的抑制滤波发散,达到较好的收敛效果,并可保证系统的精度。

**参考文献:**

- [1] Faruqi M, Farhan. A. Non - linear mathematical model for integrated global positioning inertial navigation system[J]. Applied Mathematics and Computation, 2000, 115(2 - 3): 191 - 212.
- [2] Evoins C D, Riggins. Design and Analysis of integrated navigation systems using real INS and GPS data[A]. Proc. Natl. Aerosp. Electron Conference, IEEE Piscata Way [C]. NJ, USA, 1995, (1): 154 - 160.
- [3] 张崇猛, 陈超英, 庄良杰, 等. 信息融合理论及在 INS/GPS/Doppler 组合导航系统中的应用[J]. 中国惯性技术学报, 1999, (3): 56 - 60.
- [4] 彭荆明, 乐慧康. GPS/平台罗经/DR 组合导航技术研究[J]. 导航, 2000, (2), 20 - 27.

**Research on the multisensor integrated navigation system**

CHENG Li , YAN Guo - zheng , YAN De - tian

( *Department of Information Detection Technology and Instrument , Electronic Information Engineering Institute , Shanghai Jiaotong University , Shanghai 200030 , China* )

**Abstract:** In addition to describing a marine multisensor integrated navigation system, the paper also establishes a mathematical model for the integrated navigation system . To gain good performance and divergence , an adaptive Kalman filtering technique applied to the system is proposed. The simulation shows that this technique can effectively restrain the filtering divergence and improves accuracy of the integrated navigation system.

**Key words:** INS , GPS , integrated navigation systems, adaptive Kalman filtering

**作者简介:** 程 莉(1978 - ), 女, 河北省吴桥县人, 1999年毕业于上海交通大学信息检测及仪器系, 获学士学位, 现为上海交通大学精密仪器及机械专业硕士研究生, 主要从事机器人技术的研究工作。

颜国正(1961 - ), 男, 湖南省桃江县人, 上海交通大学电子信息学院副院长, 教授, 博士生导师, 主要从事微特机器人技术的研究。