

文章编号: 1002-0411(2000)02-0168-05

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

陶俊勇 邱 静 温熙森 钱彦岭

(国防科技大学机械电子工程与仪器系 长沙 410073)

摘 要: 本文提出了一种自适应联合滤波模型结构及其算法, 定义了联合滤波模型信息分配系数的自适应调节准则. 并设计了车载 SINS/GPS 组合导航系统的自适应联合滤波器, 给出了滤波算法. 理论分析和实验室组合导航实验表明, 引入该准则的自适应联合滤波算法大大提高了系统容错性和定位精度。

关键词: 组合导航系统, 联合滤波器, 信息分配

中图分类号: TP13

文献标识码: B

1 引言

组合导航系统在导航定位精度、可靠性和容错性等方面比单一导航系统具有明显的优越性, 因此组合导航系统已成为导航技术的发展方向. 在中等精度陆用战车组合导航系统中广泛采用捷联惯导系统/全球定位系统(SINS/GPS)实现组合导航.

为了提高组合导航系统的定位精度, 在组合导航系统中普遍采用卡尔曼滤波技术, 常规的集中卡尔曼滤波模型, 存在计算量很大, 可靠性、容错性差等问题. 为了解决这一问题, Speyer, Kerr 等提出了分散滤波理论, 经过多年的发展提出了各种滤波结构和算法, 其中 Carlson 提出的联合滤波算法^[1], 由于其设计的灵活性、计算量小和容错性能好, 受到广泛重视, 被美国空军的容错导航系统(公共卡尔曼滤波器)计划选为基本算法.

对于联合滤波模型, 研究有效的融合信息分配准则, 实现融合信息在各子系统分配, 使得既不影响融合精度, 又较好地校正子系统, 是提高组合系统定位精度、容错性和可靠性的重要途径. 本文从矩阵范数的概念出发定义了联合滤波模型融合信息在各个子滤波器中的分配准则, 实现了联合滤波器融合信息的自适应分配. 实验室组合导航实验表明, 引入该准则的联合滤波算法提高了系统容错性和定位精度, 具有一定的实际应用价值.

2 基于“当前”统计模型的组合导航系统状态方程建立

在东北天导航坐标系中, 为了确定载体的位置和速度, 组合系统状态变量取为 $X_f = [x_e, v_e, a_e, x_n, v_n, a_n, x_u, v_u, a_u]^T$, 其中 $x_e, x_n, x_u, v_e, v_n, v_u, a_e, a_n, a_u$ 分别为东向、北向和天向的位置、速度和加速度. 采用车体“当前”统计模型^[2]作为组合系统的状态方程, 设采样周期为 T , 采用标准离散化过程可得组合导航系统的离散状态方程

$$X_f(k+1) = \Phi(k+1, k)X_f(k) + [U_e(k), U_n(k), U_u(k)]^T + W(k) \quad (1)$$

其中: $\Phi(k+1, k) = \text{diag}(\Phi_e(k+1, k), \Phi_n(k+1, k), \Phi_u(k+1, k))$

$$\begin{aligned}
 \Phi_e(k, k+1) &= \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{1}{\alpha_e}(-1 + \alpha_e T + e^{-\alpha_e T}) \\ 0 & 1 & \frac{1}{\alpha_e}(1 - e^{-\alpha_e T}) \\ 0 & 0 & e^{-\alpha_e T} \end{bmatrix} & \Phi_n(k, k+1) &= \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{1}{\alpha_n}(-1 + \alpha_n T + e^{-\alpha_n T}) \\ 0 & 1 & \frac{1}{\alpha_n}(1 - e^{-\alpha_n T}) \\ 0 & 0 & e^{-\alpha_n T} \end{bmatrix} \\
 \Phi_u(k, k+1) &= \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{1}{\alpha_u}(-1 + \alpha_u T + e^{-\alpha_u T}) \\ 0 & 1 & \frac{1}{\alpha_u}(1 - e^{-\alpha_u T}) \\ 0 & 0 & e^{-\alpha_u T} \end{bmatrix} \\
 U_e(k) &= \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha_e}(-T + \frac{\alpha_e T^2}{2} + \frac{1 - e^{-\alpha_e T}}{\alpha_e}) \\ T - \frac{1 - e^{-\alpha_e T}}{\alpha_e} \\ 1 - e^{-\alpha_e T} \end{bmatrix} & \bar{\alpha}_e U_n(k) &= \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha_n}(-T + \frac{\alpha_n T^2}{2} + \frac{1 - e^{-\alpha_n T}}{\alpha_n}) \\ T - \frac{1 - e^{-\alpha_n T}}{\alpha_n} \\ 1 - e^{-\alpha_n T} \end{bmatrix} \bar{\alpha}_n \\
 U_u(k) &= \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha_u}(-T + \frac{\alpha_u T^2}{2} + \frac{1 - e^{-\alpha_u T}}{\alpha_u}) \\ T - \frac{1 - e^{-\alpha_u T}}{\alpha_u} \\ 1 - e^{-\alpha_u T} \end{bmatrix} \bar{a}_u
 \end{aligned}$$

$\bar{a}_e, \bar{a}_n, \bar{a}_u$ 分别为车体“当前”加速度东向、北向、天向分量的均值, $\alpha_e, \alpha_n, \alpha_u$ 分别为车体运动加速度变化率的相关时间常数. 为离散的高斯白噪声序列.

3 车载 SINS/GPS 组合导航系统观测方程建立

对于捷联惯导系统(子系统 1), 其可以给出车体在东北天导航坐标系中三个方向的位置和速度信息, 因此取观测向量 $Z_1 = [x_e, v_e, x_n, v_n, x_u, v_u]^T$, 得到 SINS 观测方程为

$$Z_1 = H_1 X + V_1 \quad (2)$$

其中: H_1 是相应维数的观测矩阵, 测量噪声 $V_1 = [\omega_{xe}, \omega_{ve}, \omega_{xn}, \omega_{vn}, \omega_{xu}, \omega_{vu}]^T$, $\omega_{xe}, \omega_{ve}, \omega_{xn}, \omega_{vn}, \omega_{xu}, \omega_{vu}$ 分别为满足 $(0, \sigma_{1xe}^2), (0, \sigma_{1ve}^2), (0, \sigma_{1xn}^2), (0, \sigma_{1vn}^2), (0, \sigma_{1xu}^2), (0, \sigma_{1vu}^2)$ 的 SINS 系统高斯观测白噪声.

对于全球定位系统(子系统 2), 其也可以给出车体在东北天导航坐标系中三个方向的位置和速度信息, 由此同样得到 GPS 观测方程为

$$Z_2 = H_2 X + V_2 \quad (3)$$

其中: Z_2, H_2, V_2 和 SINS 系统观测方程相应变量意义相同, 此处不再赘述.

4 车载 SINS/GPS 组合导航系统自适应联合滤波器设计

自适应联合滤波模型的基本结构和算法采用 Carlson 提出的联合滤波模型^[1], 如图 1.

根据上述的组合系统状态方程和各个子系统的观测方程, 采用载体加速度均值的自适应算法^[2], 可以建立 SINS 的卡尔曼滤波方程

$$\begin{aligned}
 \hat{X}_1(k, k-1) &= \Phi_1(T) \hat{X}_1(k-1) \\
 \hat{X}_1(k) &= \hat{X}_1(k, k-1) + K_1(k) [Z_1(k) - H_1(k) \hat{X}_1(k, k-1)] \\
 P_1(k, k-1) &= \Phi_1(k, k-1) P_1(k-1) \Phi_1^T(k, k-1) + Q_1(k-1) \\
 K_1(k) &= P_1(k, k-1) H_1^T(k) [H_1(k) P_1(k, k-1) H_1^T(k) + R_1(k)]^{-1} \\
 P_1(k) &= [I - K_1(k) H_1(k)] P_1(k, k-1)
 \end{aligned} \quad (4)$$

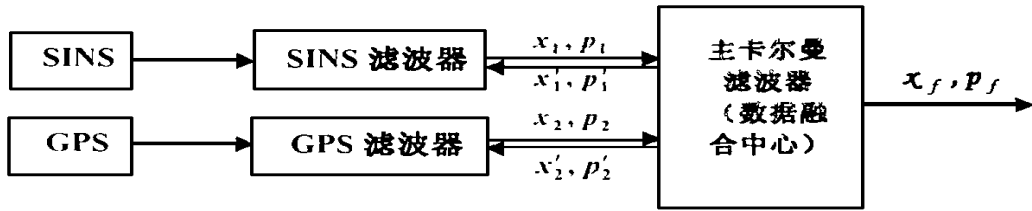


图1 自适应联合滤波器模型结构

其中: $\Phi_i(T) = \text{diag}\{\Phi_{le}(T), \Phi_{ln}(T), \Phi_{lu}(T)\}$

$$\Phi_{le}(k, k+1) = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \Phi_{ln}(k, k+1) = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \Phi_{lu}(k, k+1) = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

同样建立 GPS 的卡尔曼滤波方程

$$\begin{aligned} \hat{X}_2(k, k-1) &= \Phi_l(T) \hat{X}_2(k-1) \\ \hat{X}_2(k) &= \hat{X}_2(k, k-1) + K_2(k) [Z_2(k) - H_2(k) \hat{X}_2(k, k-1)] \\ P_2(k, k-1) &= \Phi_l(k, k-1) P_2(k-1) \Phi_l^T(k, k-1) + Q_2(k-1) \\ K_2(k) &= P_2(k, k-1) H_2^T(k) [H_2^T(k) P_2(k, k-1) + R_2(k)]^{-1} \\ P_2(k) &= [I - K_2(k) H_2(k)] P_2(k, k-1) \end{aligned} \quad (5)$$

图1所示的自适应联合滤波模型中,主滤波器不进行滤波运算,即 $\beta_m(k) = 0$,仅完成对各子系统信息的融合,SINS和GPS系统所对应的信息分配系数分别为 $\beta_1(k)$ 和 $\beta_2(k)$.联合滤波模型第 k 步整体状态的最优综合和信息分配过程如下^[1]:

$$P_f^{-1}(k) = P_1^{-1}(k) + P_2^{-1}(k), \quad Q_f^{-1}(k) = Q_1^{-1}(k) + Q_2^{-1}(k), \quad (6)$$

$$P_f^{-1}(k) \hat{X}_f(k) = P_1^{-1}(k) \hat{X}_1(k) + P_2^{-1}(k) \hat{X}_2(k) \quad (7)$$

$$P_1^{-1}(k) = \beta_1(k) P_f^{-1}(k), \quad P_2^{-1}(k) = \beta_2(k) P_f^{-1}(k), \quad (8)$$

$$Q_1^{-1}(k) = \beta_1(k) Q_f^{-1}(k), \quad Q_2^{-1}(k) = \beta_2(k) Q_f^{-1}(k)$$

$$\hat{X}_f(k) = \hat{X}_1(k) = \hat{X}_2(k), \quad \beta_1(k) + \beta_2(k) = 1 \quad (8)$$

5 自适应联合滤波模型信息分配准则

在以上所建立的自适应联合滤波模型中,信息的融合和分配按(6)式和(7)式进行,并满足(8)式条件.其中 $\beta_i(k)$ ($i=1,2$)按一定规则在每步递推过程中是实时可调的.

设第 i 个子滤波器对状态向量 X_i 的估计误差协方差阵为 P_i ($i=1,2$), P_i 描述了第 i 个子滤波器对 X_i 的估计质量, P_i^{-1} 称为信息矩阵,其描述了 X_i 的估计所含信息量的大小. P_i 越大,第 i 个子滤波器对 X_i 的估计精度越差,反之 P_i 越小, X_i 的估计精度越高.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 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,该滤波器滤波精度主要取决于子系统 i 的观测信息质量.

综上所述,为了使所设计的联合卡尔曼滤波器性能最佳,信息分配系数 $\beta_i(k)$ 的大小应与第 i 个子滤波器对状态估计的精度成正比,第 i 个子滤波器的估计精度越高, $\beta_i(k)$ 就取较大的

值, 反之亦然. 这样就能够保证估计精度高的子滤波器对融合后的整体状态估计值影响大, 而估计精度低的子滤波器对融合后的整体状态估计值的影响小, 从而使得自适应联合滤波器的整体输出具有较高的定位精度和容错性. 为了定量描述第 i 个子滤波器对状态估计的精度, 给出如下定义.

定义 第 i 个子系统估计精度因子 $EDOP_i = \sqrt{\text{tr}(P_i P_i^T)}$

其中: $EDOP_i$ 估计精度因子 表示第 i 个子系统估计误差协方差阵 P_i 的大小

$\text{tr}(\cdot)$ 矩阵迹运算函数

从上述定义知, $EDOP_i$ 满足矩阵范数的三个条件即: 非负性、齐次性和三角不等式. $EDOP_i$ 实质是用 P_i 矩阵的范数表征 P_i 的大小, $EDOP_i$ 的值是第 i 个子滤波器对状态向量 X_i 的每一分量估计的方差和的开方, 其大小表征了估计精度的高低, 因此定义给出了一种定量描述第 i 个子系统精度的指标.

根据定义, 有下列信息分配准则:

1. 融合信息分配前, 计算两个子滤波器估计协方差阵 P_i 的 $EDOP_i$ 值, 其中 ($i=1, 2$).
2. 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, 并满足

$$(8) \text{ 式的条件, 既 } \beta_1(k) = \frac{EDOP_2}{\sum_{K=1}^2 EDOP_K}, \beta_2(k) = \frac{EDOP_1}{\sum_{K=1}^2 EDOP_K}.$$

该准则可进一步拓展为由 N 个子导航系统组成的组合导航系统联合滤波模型的融合信息分配准则.

6 车载 SINS/GPS 组合系统自适应联合滤波器实验结果与分析

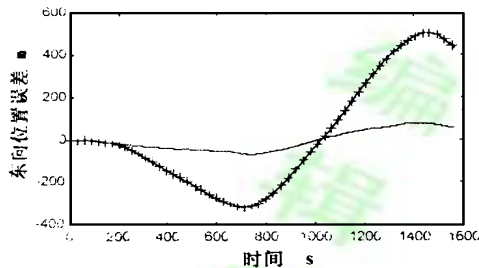


图 2 东向位置误差曲线

在实验室条件下, SINS/GPS 组合系统静止不动, 因此能方便地检验所提出的自适应联合滤波模型对位置、速度和加速度的估计效果. 基本实验过程是, 首先将 SINS 系统预热 20 分钟, 然后利用 GPS 数据初始化 SINS 的位置和速度, 并启动 SINS 系统采样, 同时, 在相应的时刻记录 GPS 的定位信息, 进行 SINS/GPS 组合导航. 图 2-4 为某次静态组合导航时(组合时间间隔为 1 秒), 采用自适应联合滤波算法和

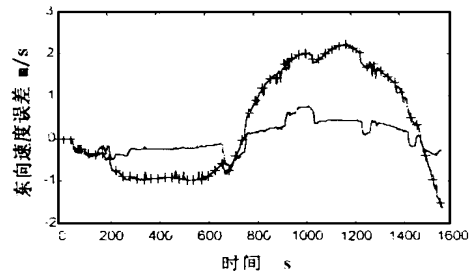


图 3 东向速度误差曲线

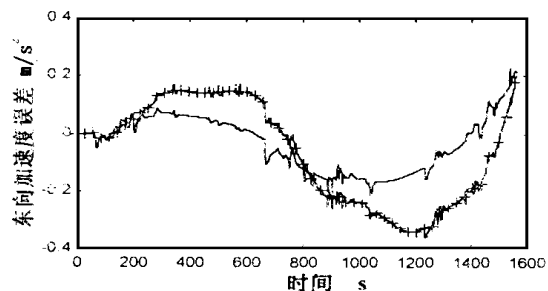


图 4 东向加速度误差曲线

无自适应联合滤波算法的组合系统东向位置、速度和加速度误差实验曲线,其中:“+”表示无自适应联合滤波算法(融合信息分配系数取固定值 $\beta_1 = \beta_2 = 0.5$)的实验曲线,实线表示自适应联合滤波模型算法的实验曲线.由实验结果可知,采用所给信息分配准则的自适应联合滤波算法明显改善了组合系统的定位精度,位置误差较无该准则的联合滤波算法大大地减小了,速度和加速度误差也得到了明显的改善,同时也提高了组合系统的容错性.

7 结论

通过实验室静态组合导航实验表明,车载 SINS/GPS 组合导航系统自适应联合滤波模型,通过信息分配因子的实时自适应调节,大大提高了组合导航系统的定位精度及容错能力.

参 考 文 献

- 1 Carlson N A. Federated Filter For Fault-tolerant Integrated Navigation. NASA 1996, 13415: 1~ 16
- 2 Hongren Zhou, K S P Kumar. A Current Statistical Model and Adaptive Algorithm for Estimating Maneuvering Targets. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1984, 17(5): 596~ 602
- 3 秦永元, 李岁芳. 联邦滤波器公共参考信息的分配, 导航, 1998, (1): 61~ 65
- 4 吴秋平, 万德钧, 王 庆. 车载 GPS/航位推算组合导航系统的信息融合, 导航, 1997, (3): 41~ 48

ADAPTIVE FEDERATED FILTER MODEL AND ITS APPLICATION IN SINS/GPS INTEGRATED NAVIGATION SYSTEM FOR VEHICLE

TAO Jun-yong QIU Jing WEN Xi-sen QIAN Yan-ling

(Dept. of Mechatronics Engineering and Instrumentation, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract: An adaptive federated filter model mechanism and its algorithm are creatively proposed, and also a fusion information distribution principle of federated filter among local filters is given. Moreover an adaptive federated filter algorithm of integrated navigation system for vehicle is implemented. The theoretical analysis and laboratory experimental results show this algorithm enhances positioning precision and fault tolerance of integrated navigation system.

Keywords: integrated navigation system, federated filter, information distribution

作者简介

陶俊勇(1969-),男,博士研究生.研究领域为多传感器组合导航系统、信息融合理论、故障诊断技术等.

邱 静(1964-),男,教授.研究领域为大型复杂机电系统状态监测与故障诊断、可靠性分析与测试等.

温熙森(1945-),男,校长,教授,博士生导师.研究领域为智能 BIT 技术、故障诊断技术、可靠性试验技术、信息融合理论与技术等.