

文章编号: 1001-0920(2004)12-1420-05

## 一种基于 RBF 网络的自适应容错联邦滤波算法研究

邱 恺, 魏瑞轩, 张宗麟

(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

**摘 要:** 联邦滤波的信息分配原则直接影响滤波器的容错性和精度。考虑到故障隔离后的子系统不能参与联邦滤波器的信息分配, 首先给出一种基于 RBF 网络的联邦滤波器的故障检测方法; 然后通过引入故障因子, 将系统的信息分配和故障状态综合考虑, 提出一种自适应的动态信息分配方法。仿真算例表明, 该方法能够提高系统的容错性和滤波精度。

**关键词:** 联邦滤波; RBF 网络; 自适应信息分配; 故障因子; 故障检测

**中图分类号:** V 249.32      **文献标识码:** A

## Study of an adaptive and fault-tolerant federated filter algorithm based on RBF

QIU Kai, WEI Rui-xuan, ZHANG Zong-lin

(Institute of Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China Correspondent: QIU Kai, Email: qiukai6321@sina.com)

**Abstract:** With the information-sharing schemes influence on the performance of the federated filter, the filters with various schemes differ in fault-tolerance and estimation precision. Considering that the local filter with fault separated from the federated filter can not share the information, a fault-detecting method is given based on the RBF. Then an adaptive sharing scheme for the federated filter algorithm is first presented by introducing the fault factor. The key to the proposed method is that fault detection and information sharing are considered as a whole. The information sharing coefficients for the local filters without fault are adjusted adaptively, according to the change of the estimation quality. With the sharing coefficient reset zero, the local filter whose failure has been detected is isolated from the federated filter structure by the fault factor, and recovered to the structure after its failure is removed. Simulation shows that the ability of fault-tolerance and the precision of the filter are improved by this method.

**Key words:** federated filter; radius basis function; adaptive information sharing; fault factor; fault detection

### 1 引 言

“信息分配”原则是联邦滤波的一个关键问题, 研究有效的“信息分配”原则对于提高系统的容错性、可靠性和精度等具有重要意义。文献[1~3]中对系统进行信息分配时, 只考虑了固定比例的信息分配问题。然而在实际的高动态导航环境中, 各子滤波

器的性能和估计质量都是不断变化的, 例如多普勒雷达在山区精度较高, 而在平原地区和海平面等场合可能难以使用<sup>[4]</sup>。针对这种固定比例信息分配的缺陷, 文献[5~7]提出了不同的信息动态分配原则。通过仿真可以发现, 文献[5~7]的方法虽然可以保证滤波器的数字计算稳定性<sup>[8]</sup>, 但不能提高系统

收稿日期: 2004-02-02; 修回日期: 2004-04-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60304004)

作者简介: 邱恺(1977—), 男, 湖北通山人, 博士生, 从事导航、制导与控制等研究; 张宗麟(1940—), 男, 陕西西安人, 教授, 博士生导师, 从事惯性导航与组合导航等研究

的滤波容错性, 并且根据这些自适应信息分配方法, 也不能实现该故障子系统的自动隔离. 由联邦滤波的信息分配作用可知, 当某个子系统不占有系统信息, 即该子系统的信息分配系数为零时, 该子系统将不参与融合. 因此, 当某个子系统故障时, 可以通过信息分配系数实现该故障子系统的自动隔离和联邦滤波器的自重构; 而当故障子系统恢复正常时, 又可实现滤波器的重组.

基于这样一种认识, 本文提出一种基于 RBF 网络的自适应容错联邦滤波算法. 由 RBF 网络实现联邦滤波器的故障检测, 给出一种与协方差成反比的动态自适应分配方法, 并在分配系数中引入故障因子, 当某个子系统故障时, 该子系统的信息分配系数为零, 实现故障隔离; 而当该子系统恢复正常时, 又可按动态自适应信息分配方法, 实现联邦滤波器的重构. 仿真结果表明, 该方法能够实现故障子系统的自动隔离和恢复, 并实现系统信息分配系数的动态自适应分配, 提高了系统的容错性和滤波精度.

## 2 自适应联邦滤波

### 2.1 联邦滤波算法原理<sup>[1,3]</sup>

联邦滤波器是一种采用两级数据融合技术的滤波结构, 先由子滤波器给出该子系统的最优估计, 再由主滤波器融合所有局部滤波器的输出, 给出最优估计. 一般由  $n$  个子系统组成的联邦滤波器结构如图 1 所示.

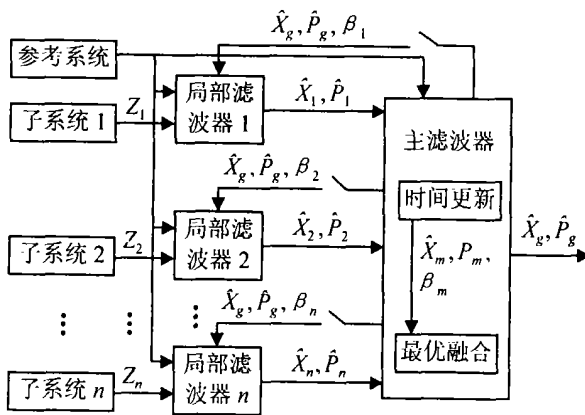


图 1 一般联邦滤波器的结构

设第  $i$  个子滤波器的系统状态方程和量测方程分别为

$$X_i(k) = \Phi(k, k-1)X_i(k-1) + W_i(k-1),$$

$$Z_i(k) = H_i(k)X_i(k) + V_i(k).$$

则联邦滤波算法步骤如下:

1) 信息分配: 将系统的噪声  $Q$  和状态方差  $P$  通

过信息分配系数  $\beta_i$  分配到各子滤波器和主滤波器中, 即

$$Q_i^{-1} = \beta_i Q^{-1}, P_i^{-1} = \beta_i P_g^{-1}, \hat{X}_i(k) = \hat{X}_g(k). \quad (1)$$

分配系数  $\beta_i$  满足信息守恒原理, 即

$$\sum_{i=1}^n \beta_i + \beta_n = 1,$$

其中  $\beta_n$  为主滤波器分配系数

2) 时间更新

$$\hat{X}_i(k, k-1) = \Phi(k, k-1)\hat{X}_i(k-1),$$

$$P_i(k, k-1) = \Phi(k, k-1)P_i(k-1) \times \Phi^T(k, k-1) + Q_i(k-1).$$

3) 量测更新

$$P_i^{-1}(k) = P_i^{-1}(k, k-1) + H_i^T(k)R_i^{-1}(k)H_i(k),$$

$$P_i^{-1}(k)\hat{X}_i(k) = P_i^{-1}(k, k-1)\hat{X}_i(k, k-1) + H_i^T(k)R_i^{-1}(k)Z_i(k).$$

4) 信息融合: 全局的状态估计  $\hat{X}_g$  和方差  $P_g$  由各子滤波器和主滤波器的状态估计和方差融合获得, 即

$$\hat{X}_g = P_g \sum_{i=1}^{n,m} P_i^{-1} \hat{X}_i, P_g = \left( \sum_{i=1}^{n,m} P_i^{-1} \right)^{-1}. \quad (2)$$

### 2.2 几种信息分配方法

#### 2.2.1 固定比例的信息分配方法

文献[3]在提出联邦滤波理论时, 采用的信息分配方法为固定比例的方法, 并采用平均分配的方式, 各滤波器的信息分配系数  $\beta_i = 1/N$ , 其中  $N$  为参与融合的滤波器个数. 文献[2]在此基础上进行了改进, 根据子滤波器的量测精度进行信息分配.

#### 2.2.2 动态自适应系数分配方法

由于基于信息分配系数固定比例的联邦滤波算法不能实时反映实际滤波子系统的精度变化, 文献[5, 6]分别提出了基于估计方差阵的动态自适应系数分配方法. 其中文献[5]提出将估计误差协方差阵  $P_i$  进行特征值分解, 即  $P_i = L \Lambda L^T$ , 信息分配方法为

$$\beta_i = \frac{\text{tr } \Lambda_i}{\text{tr } \Lambda_1 + \text{tr } \Lambda_2 + \dots + \text{tr } \Lambda_n + \text{tr } \Lambda_n} = \frac{\text{tr } \Lambda_i}{\sum_{i=1}^{n,m} \text{tr } \Lambda_i}. \quad (3)$$

其中  $\Lambda_i = \text{diag}\{\lambda_{i1}, \lambda_{i2}, \dots, \lambda_{in}\}$  为由方差  $P_i$  所对应的特征值组成的对角矩阵.

文献[6]则在[5]的基础上直接采用矩阵迹  $\text{tr } P_i$  替代特征值的迹  $\text{tr } \Lambda_i$  进行信息分配. 而文献

[7] 从矩阵的 Frobenius 范数出发, 采用如下分配方法:

$$\beta_i = \frac{P_i(k-1)}{\sum_{i=1}^n P_i(k-1)} (1 - \beta_n). \quad (4)$$

其中

$$A_F = \sqrt{\text{diag}(A^T A)}.$$

显然, 如果将主滤波器信息系数  $\beta_n$  也进行动态分配, 则文献[5]和[7]的自适应分配方法在本质上是相同的, 是一种分配系数与协方差阵的迹成正比的方法. 根据该方法, 滤波器精度越高, 信息分配系数越小, 这相当于扩大了精度较差的传感器的作用. 虽然这样分配能够保证滤波器的计算稳定性<sup>[8]</sup>, 但可能降低系统的容错性, 这一点可从文后的仿真实例中看出.

### 3 基于故障因子的自适应信息分配方法

本节首先提出一种基于 RBF 网络的联邦滤波故障检测方法; 然后通过信息系数动态分配中引入故障因子, 给出一种与协方差阵成反比的动态自适应信息分配方法. 根据该方法, 还可在滤波过程中实现故障子系统的自动隔离与恢复.

#### 3.1 基于 RBF 网络的联邦滤波故障检测方法

由于神经网络具有分布并行处理、非线性映射、自适应学习和鲁棒容错等特性, 在模式识别、控制优化以及故障诊断等方面都有广泛的应用<sup>[9,10]</sup>. 而联邦滤波器传统的故障检测方法, 一般采用  $\chi^2$  检验等方法<sup>[3]</sup>. 本文采用 RBF 网络进行故障检测.

RBF 网络为一种三层前馈网络<sup>[10]</sup>, 包括一个输入层, 一个隐含层和一个输出层. 隐含层节点称为 RBF 节点, 由以高斯型传递函数为典型代表的辐射状函数神经元构成; 输出层节点的传递函数通常为简单的线性函数, 输出为各隐单元输出的加权和. 隐含层节点的高斯核函数将对输入数据产生局部响应, 即当输入数据靠近高斯核函数的中心时, 隐含层节点将产生较大的输出; 反之则产生较少的输出. RBF 网络为一种局部逼近网络, 在函数逼近、分类和学习速度等方面均优于 BP 网络<sup>[9,10]</sup>.

当某个子系统故障时, 一般存在两种情况: 1) 该子系统的输出估计误差值会出现较大的偏差, 不再是零均值的高斯白噪声; 2) 无故障子系统(包括参考子系统)和故障子系统之间的输出估计会有较大的差值. 因此, 可由每个子系统之间的估计偏差和子系统的估计误差实现故障检测, 并以典型故障下的偏差值来训练 RBF 网络, 从而实现对联邦滤波器的故障检测.

定义以下几个输入变量:

第  $i, j$  子系统(包括参考子系统)之间的状态估计差值为

$$e_{ij} = \hat{X}_i - \hat{X}_j.$$

第  $i$  个子系统的量测估计误差残差为

$$z e_i = \tilde{Z}_i(k/k-1) = Z_i(k) - H_i(k)X_i(k/k-1).$$

定义 RBF 网络的输出为: 当系统无故障时, 输出为 0; 当系统有故障时, 输出为 1.

于是, 通过大量的系统模拟仿真, 可获得多种典型故障条件下系统的输出  $e_{ij}$  和  $z e_i$ ; 然后以相应的输入和输出样本对 RBF 网络进行训练. 这样, 在实际滤波过程中, 便可用训练好的 RBF 网络进行故障检测.

#### 3.2 引入故障因子的自适应信息分配方法

滤波精度、容错性和计算量等几个性能要求是相互矛盾的, 例如要求容错性能好, 精度可能差些<sup>[3]</sup>. 联邦滤波器采用“信息分配”原则来解决这一问题. 由联邦滤波算法的信息分配式可知, 联邦滤波实质上是将融合后的估计方差阵  $P_g^{-1}$  放大  $\beta_i$  后, 分配给不同的子滤波器. 因为卡尔曼滤波器能自动根据信息质量的优劣作权重不同的利用, 所以  $\beta_i$  越小, 对融合信息的利用权重就越低, 分配系数  $\beta_i$  的不同反映了对该子滤波器的信息利用程度<sup>[3]</sup>.

综上所述, 信息分配系数的大小应与该滤波器的精度成反比, 如果第  $i$  个滤波器的精度越高, 那么其分配系数  $\beta_i$  就越大, 反之则小. 这样, 精度低的子滤波器对融合后的整体估计值影响就小, 精度高的则比较大, 从而使得滤波器的整体输出具有较高的定位精度和容错性. 为此, 本文提出如下的信息分配方法.

首先定义故障因子如下:

**定义 1** 设  $r_i \in \{0, 1\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ , 如果第  $i$  个子系统故障, 则  $r_i = 0$ ; 否则  $r_i = 1$ , 称  $r_i$  为第  $i$  个子系统的故障因子.

设  $l_i = \text{tr}(p_i)/l_0$ , 其中,  $\text{tr}$  为矩阵求迹符号,  $p_i$  为第  $i$  个子滤波器的方差阵,  $l_0$  为公共参考值, 可取  $\text{tr}(p_i)$  的平均值, 其作用是避免出现一个很大的数除以较小的数造成病态, 以提高计算精度.

第  $i$  个子滤波器的信息分配系数为

$$\beta_i = \frac{r_i l_i^{-1}}{\sum_{i=1}^m r_i l_i^{-1}}. \quad (5)$$

显然, 当  $r_i = 0$  时,  $\beta_i = 0$ , 即第  $i$  个子滤波器的信息

分配为零, 此时该系统不占有信息, 从而通过联邦滤波算法, 自动实现了对该子系统的隔离; 当  $r_i = 1$  时, 则表示该子滤波器占有的信息不为零, 即表示该子系统正常. 因此, 通过故障因子  $r_i$ , 不但能实现故障子系统的检测与隔离, 而且当该子系统正常时, 又可以自动恢复. 故障因子可以通过训练好的 RBF 网络在滤波过程中获得.

自适应的联邦滤波结构如图 2 所示.

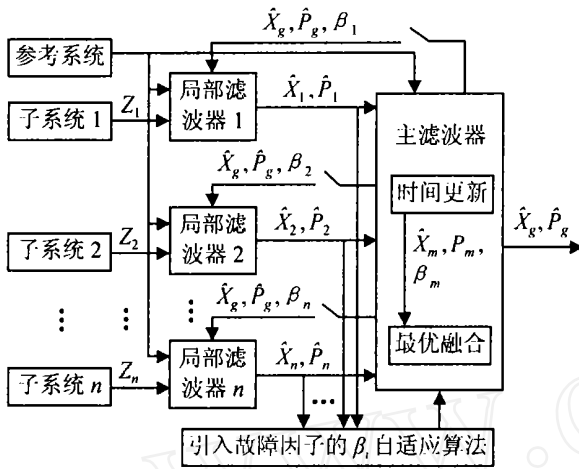


图 2 自适应联邦滤波器的结构

#### 4 仿真算例

设某物体沿一直线运动, 记  $t_k$  时刻的位移、速度和加速度分别为  $s_k, v_k, a_k$ , 对以上 3 个量进行估计, 并记  $X(k) = [s_k \ v_k \ a_k]$ , 则系统的状态方程为

$$X(k) = \Phi(k, k-1)X(k-1) + w(k-1).$$

假设系统的量测传感器由 3 个子量测传感器系统组成, 分别进行位移的测量. 记第  $i$  个传感器的量测方程为

$$Z_i(k) = H_i(k)X_i(k) + v_i(k), \quad i = 1, 2, 3$$

其中

$$\Phi(k, k-1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0.05 & 0 & 0.001 & 0.25 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$H_1 = [1 \ 0 \ 0], H_2 = [2 \ 5 \ 0 \ 0],$$

$$H_3 = [0 \ 5 \ 0 \ 0],$$

$$Q_k = E[w w^T] = \text{diag}\{5, 2, 3\}, E[w_i] = 0,$$

$$R_k = E[v_i v_j] = 30\delta_{ij}, E[v_i] = 0$$

设系统滤波时间为 1 200 步, 分两种情况进行仿真: 1) 各子系统均正常工作, 根据文献[5]方法和本文方法的滤波误差如图 3 所示; 2) 假设子滤波器 1 在 300 ~ 500 s 时突发故障而后恢复正常, 根据文献[5]方法和不引入故障因子的动态自适应方法的

滤波误差比较如图 4(a) 所示; 而根据引入了故障因

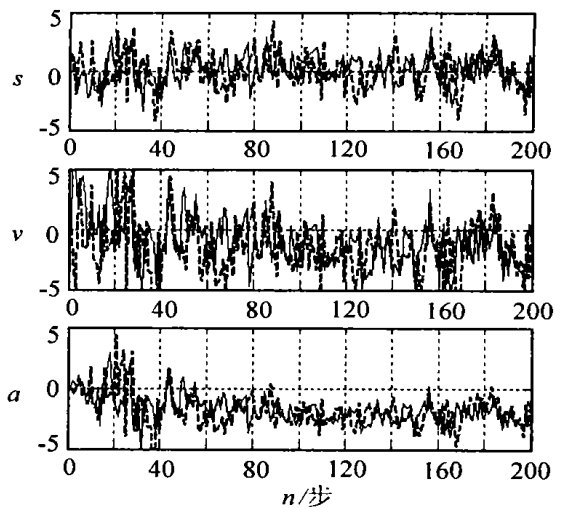
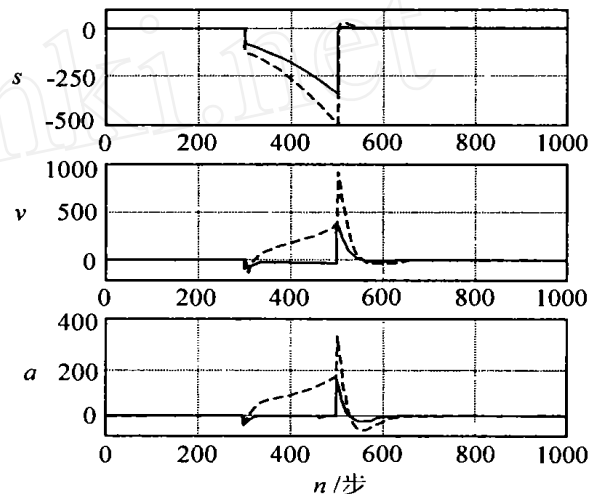
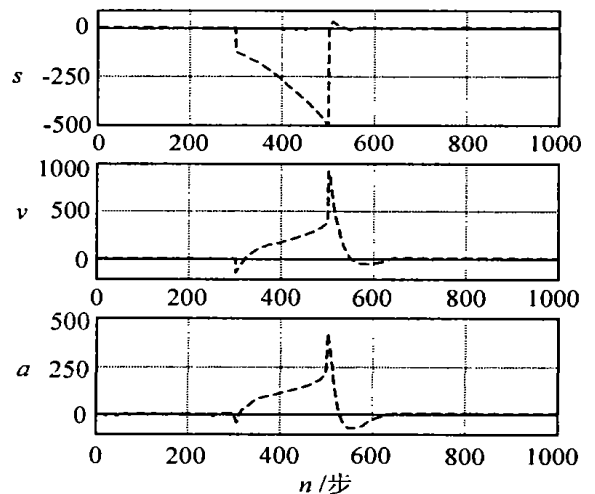


图 3 传感器无故障时估计误差



(a) 没引入故障因子



(b) 引入故障因子

图 4 传感器故障时估计误差

子的自适应信息分配方法和文献[5]方法仿真结果比较如图4(b)所示。图4中,虚线为文献[5]方法的估计误差;实线为本文方法的估计误差。

由图3可以看出,在无故障时,两种方法的滤波精度相当;由图4可见,当子系统有故障时,根据本文方法,通过RBF网络检测到故障并对相应的故障因子置零,将故障子系统隔离,因而该子系统不再影响全局的融合精度(见图4(b));当不引入故障因子时,本文方法也具有很强的容错性,并明显高于文献[5]的方法(见图4(a)),这主要是由于根据本文方法,故障子系统的估计精度降低则其分配系数减少,降低了故障传感器对全局估计的影响,因而提高了整体的容错性能。

## 5 结 语

考虑到联邦滤波器信息分配的作用,当某个子系统信息分配系数为零时,即可实现故障隔离。本文首先提出一种基于RBF网络的联邦滤波故障检测方法,然后通过信息系数动态分配中引入故障因子,给出一种与协方差阵成反比的动态自适应信息分配方法。根据该方法,可在滤波过程中实现故障子系统的自动隔离与恢复,并且明显提高了系统的容错能力。仿真结果表明,该方法具有较高的容错性,尤其对于那些可能出现短期故障而后又恢复的传感系统,如GPS在强干扰环境下短时失去作用等。

## 参考文献(References):

[1] 申功勋,孙建峰. 信息融合理论在惯性/天文/GPS组合导航系统中的应用[M]. 北京:国防工业出版社,1998(1).

[2] Carlson N A. Federated filter for fault-tolerant integrated navigation systems[A]. *Proc of Position Location*

*tion and Navigation System* 88[C]. Orlando: IEEE, 1988. 110-119.

- [3] 秦永元,张洪钺,汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安:西北工业大学出版社,1998.
- [4] 张宗麟. 惯性导航与组合导航[M]. 北京:航空工业出版社,2000.
- [5] 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*, 2000, 21(3): 274-276.  
(Wang Y F, Huang X L, Hu H Z. Eigenvalue-decomposition-based adaptive information fusion filter algorithm for integrated navigation systems[J]. *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica*, 2000, 21(3): 274-276.)
- [6] 刘准,陈哲. NS/GPS/TRCOM组合制导系统中的信息融合方法研究[J]. *宇航学报*, 2001, 22(3): 26-32.  
(Liu Z, Chen Z. Research on information fusion method in NS/GPS/TERCOM system[J]. *J of Astronautics*, 2001, 22(3): 26-32.)
- [7] 刘瑞华,刘建业. 联邦滤波信息分配新方法[J]. *中国惯性技术学报*, 2001, 9(2): 28-32.  
(Liu R H, Liu J Y. A new method of information sharing in federated filter[J]. *J of Chinese Inertial Technology*, 2001, 9(2): 28-32.)
- [8] 周哲,翁海娜,张良杰. 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): 501-506.  
(Zhou Z, Weng H N, Zhuang L J. Federated Kalman filtering and its application to ship integrated navigation system[J]. *Control and Decision*, 2000, 15(4): 501-506.)
- [9] 许东,吴铮. 基于MATLAB 6 X的系统分析与设计——神经网络[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2002.
- [10] 周东华,叶银忠. 现代故障诊断与容错控制[M]. 北京:清华大学出版社,2000.

## 下 期 要 目

一种基于遗传算法的进化计算模型 .....	龚道雄, 阮晓钢
提升多速率系统无波纹问题研究 .....	赵 霞, 姚 郁
快速信息融合 Kalman 滤波器 .....	邓自立, 高 媛
普适计算中的无缝迁移策略 .....	张德干, 等
不确定 T-S 模型的 D-域极点约束鲁棒控制 .....	周武能, 等
一种具有强鲁棒性的模型参考自适应控制系统 .....	王柏林
运用线性反馈分析设计饱和线性系统 .....	魏爱荣, 赵克友
一次性市场交易的信用机制设计 .....	马本江, 邱莞华
关于波动率与投资概率之间关系的进一步研究 .....	孟 力, 孙 威, 等
基于网络演算计算交换式工业以太网中的最大时延 .....	张奇智, 张 彬, 等