

带反馈信息的多传感器分层估计算法

何 友¹, 熊 伟¹, 陆大猷², 彭应宁²

(1. 海军航空工程学院电子工程系, 烟台 264001; 2. 清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘 要: 为了改善局部节点和传感器级的跟踪性能, 本文研究带反馈信息的多级式多传感器系统中的状态估计技术. 在给出有反馈信息情况下传感器级状态估计解的基础上, 本文提出多坐标系中有反馈信息的两层集中、分布和混合估计方程. 在不同笛卡尔坐标系中, 本文提出了几种带反馈信息的三层多传感器系统中的航迹级融合方法, 其中包括集-分估计、分-分估计和混-分估计, 并以定理的形式证明有、无反馈信息情况下的两类三层状态估计是等价的、最优的. 仿真结果表明, 在多传感器信息融合系统中引入反馈机制可以明显改善一些局部节点和传感器级的跟踪精度.

关键词: 信息融合; 分层估计; 反馈机制; 多传感器跟踪; 航迹融合

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 12-0085-05

Multisensor Hierarchical Estimation Algorithms with Feedback Information

HE You¹, XING Wei¹, LU Da-jin², PENG Ying-ning²

(1. Department of Electronic Engineering, Naval Aeronautical Engineering Academy, Yantai 264001, China;

2. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to improve the tracking performances of some sensors and local nodes, the paper discusses the state estimation techniques in multilevel multisensor surveillance systems with feedback information. Based on the single sensor Kalman filtering equations with feedback information, this paper presents two-level centralized, distributed and hybrid track level fusion methods with feedback information in multicordinate systems. In the different Cartesian coordinates, several kinds of track level fusion methods with feedback information for three-level multisensor data fusion systems are proposed, in which centralized, distributed, distributed and hybrid distributed estimation combination problems with feedback information are considered, and proves that two kinds of three-level estimation solutions with or without feedback information are optimal and equivalent in the form of the theorem. The simulation results show that the multilevel multisensor data fusion system can not only increase the global estimation accuracy of target but also greatly improve the tracking performances of some sensors and local nodes by using the feedback information.

Key words: data fusion; hierarchical estimation; feedback mechanism; multisensor tracking; track fusion

1 引言

多传感器信息融合就功能模型而论可分为五个层次^[1], 即检测/判决融合、空间(位置)融合、属性融合、态势评估与威胁估计. 其中位置(空间)级是最重要和应用最多的一级, 这种系统的结构主要有集中式、分布式、混合式和多级式^[1,2]. 关于集中式、分布式和混合式多传感器系统的状态估计人们已进行了较多的研究^[3~11]. 但对多级式系统人们则很少涉及^[12]. 文献[12]研究了无反馈信息情况下多级式多传感器状态估计问题. 为了改善局部节点和传感器级的跟踪性能, 本文研究带反馈信息的三层多传感器信息融合系统中的线性状态估计问题. 带反馈信息的三层多传感器系统有三种可能的结构^[13]: 第一种是局部节点为集中式, 而融合节点为分布式结构, 称为集-分式多级系统; 第二种是局部节点和融合节点均为分布式结构, 称为分-分式多级系统; 第三是局部节点为混

合式, 而融合节点为分布式结构, 称为混-分式多级系统. 本文在假设各传感器同步采样、数据传送延迟时间为零的条件下, 研究多坐标系中带反馈信息的三层多传感器信息融合中的线性状态估计问题. 本文是文献[12]的继续、推广和扩展.

2 带反馈信息的单传感器级状态估计

目标运动、测量模型和传感器状态估计方程由文献[12]给出, 本文中符号和变量表示含意也与文献[12]相同. 如果传感器 i 接收来自于局部融合中心 j 的反馈信息, 则状态估计可以利用 Kalman 滤波器循环计算如下:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_i^j(k+1) = & \hat{\mathbf{x}}_i^j(k+1|k) - \hat{\mathbf{g}}_i^j(k+1) \{ \mathbf{Z}_i^j(k+1) \\ & - \mathbf{H}_i^j(k+1) [\hat{\mathbf{x}}_i^j(k+1|k) - \hat{\mathbf{g}}_i^j(k)] \} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_i^j(k+1|k) = \mathbf{F}_i^j(k) \hat{\mathbf{x}}_i^j(k) \quad (2)$$

$$\mathbf{G}_i^j(k+1) = \mathbf{P}_{ji}^j(k+1) \mathbf{H}_i^j(k+1) \mathbf{R}_i^j(k+1)^{-1} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} P_{fi}^j(k+1)^{-1} &= P_{fi}^j(k+1|k)^{-1} + H_i^j(k+1) \\ &\quad \cdot R_i^j(k+1)^{-1} H_i^j(k+1) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} P_{fi}^j(k+1|k) &= (k) P_F^j(k) (k) + G(k) Q(k) G(k) \\ &= P_F^j(k+1|k) \end{aligned} \quad (5)$$

$X_F^j(k)$ 、 $P_F^j(k)$ 是带反馈信息时局部融合中心在 k 时刻产生的航迹状态估计和误差协方差, 它们被反馈到 L_j 个传感器中作为先验统计量. 本文的各层状态估计解都隐含假定是对应相同的目标^[12].

3 带反馈信息的局部节点状态估计

为了研究三层估计问题, 这里把局部节点分成三种可能的结构, 即集中式、分布式和混合式. 下面以某一局部节点 j 为例分别讨论有反馈情况下三种结构的估计方程.

3.1 带反馈的两层集中估计

这里所说的反馈信息是指局部节点 $j(j \in U)$ 接收来自融合节点的反馈 $X_F^j(k)$ 、 $P_F^j(k)$. 当考虑来自融合节点的反馈信息时, 由文献[12]中的式(19)~(23)可得 $k+1$ 时刻的两层集中估计解为:

$$\begin{aligned} X_F^j(k+1) &= X_F^j(k+1|k) - \sum_{i=1}^{N_j} K_{fi}^j(k+1) \{ Z_i^j(k+1) \\ &\quad + H_i^j(k+1) [\hat{x}_i^j(k+1) - X_F^j(k+1|k)] \} \end{aligned} \quad (6)$$

$$X_F^j(k+1|k) = (k) X_F^j(k) \quad (7)$$

$$K_{fi}^j(k+1) = P_F^j(k+1) H_i^j(k+1) R_i^j(k+1)^{-1} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} P_F^j(k+1)^{-1} &= P_F^j(k+1|k)^{-1} + \sum_{i=1}^{N_j} H_i^j(k+1) \\ &\quad \cdot R_i^j(k+1)^{-1} H_i^j(k+1) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} P_F^j(k+1|k) &= (k) P_F^j(k) (k) + G(k) Q(k) G(k) \\ &= P_F^j(k+1|k) \end{aligned} \quad (10)$$

其中 $X_F^j(k+1)$ 、 $P_F^j(k+1)$ 是带反馈信息的两层集中估计和协方差.

3.2 带反馈的局部分布估计

这里假设每次更新后, 已融合的局部融合的节点 j 的航迹分别被反馈到传感器 1 到 L_j 作为先验信息, 从局部节点 j 到其它 $N_j - L_j$ 个传感器没有通信要求, 但所有传感器到局部融合节点 j 都有通信要求. 在这种情况下, 根据文献[12]中的式(24)推出带反馈局部节点 $j(j \in U)$ 的分布估计可表示如下:

$$\begin{aligned} X_F^j(k+1) &= P_F^j(k+1) \{ \sum_{i=1}^{L_j} P_{fi}^j(k+1)^{-1} [X_{fi}^j(k+1) + \hat{x}_i^j] \\ &\quad - (L_j - 1) P_F^j(k+1|k) X_F^j(k+1|k) \\ &\quad + \sum_{i=L_j+1}^{N_j} \{ P_i^j(k+1)^{-1} [X_i^j(k+1) + \hat{x}_i^j] \\ &\quad - P_i^j(k+1|k)^{-1} [X_F^j(k+1|k) + \hat{x}_i^j] \} \} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} P_F^j(k+1)^{-1} &= \sum_{i=1}^{L_j} P_{fi}^j(k+1)^{-1} - (L_j - 1) P_F^j(k+1|k) \\ &\quad + \sum_{i=L_j+1}^{N_j} [P_i^j(k+1)^{-1} - P_i^j(k+1|k)^{-1}] \end{aligned} \quad (12)$$

当 $L_j=0$, 显然式(11)退化为无反馈情况下的结果. 当 $L_j=N_j$,

即所有的传感器均接收来自局部节点 j 的反馈信息, 则分层估计为

$$\begin{aligned} X_F^j(k+1) &= P_F^j(k+1) \{ \sum_{i=1}^{N_j} P_{fi}^j(k+1)^{-1} [X_{fi}^j(k+1) + \hat{x}_i^j] \\ &\quad - (N_j - 1) P_F^j(k+1|k)^{-1} X_F^j(k+1|k) \} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} P_F^j(k+1) &= \sum_{i=1}^{N_j} P_{fi}^j(k+1)^{-1} - (N_j - 1) P_F^j(k+1|k)^{-1} \end{aligned} \quad (14)$$

如果系统融合中心到节点 j 也有反馈信息, 则式(11)和式(13)状态估计中的 $X_F^j(k+1|k)$ 要用 $X_F^j(k+1|k) - \hat{x}_i^j$ 代替, 而式(12)和(14)中的 $P_F^j(k+1|k)$ 要用 $P_F^j(k+1|k)$ 代替.

3.3 带反馈的局部混合估计

这里假定局部节点 $j(j \in U)$ 为两层混合结构, 其中 L_j 个传感器向节点 j 传送航迹信息, 而其它 $N_j - L_j$ 个传感器向节点 j 传送检测报告, 传送航迹的 L_j 个传感器也可接收来自局部节点 j 的反馈信息. 先考虑节点 j 到 L_j 个传感器有反馈, 而融合节点到节点 L_j 无反馈的情况. 根据式(11)和文献[10]中的式(20)的结构, 可得带反馈的局部混合估计为:

$$\begin{aligned} X_F^j(k+1) &= P_F^j(k+1) \{ \sum_{i=1}^{L_j} P_{fi}^j(k+1)^{-1} [X_{fi}^j(k+1) + \hat{x}_i^j] \\ &\quad - (L_j - 1) P_F^j(k+1|k)^{-1} X_F^j(k+1|k) \} \\ &\quad + \sum_{i=L_j+1}^{N_j} \bar{G}_i^j(k+1) \\ &\quad \cdot \{ Z_i^j(k+1) - H_i^j(k+1) [X_{k+1|k+1,i-1}^j - \hat{x}_i^j] \} \end{aligned} \quad (15)$$

其中 $\bar{G}_i^j(k+1)$ 、 $P_{k+1|k+1,i}^j$ 由文献[10]的式(17)和(18)给出, 但

$$\begin{aligned} [P_{k+1|k+1,L_j}^j]^{-1} &= P_F^j(k+1|k)^{-1} + \sum_{i=1}^{L_j} H_i^j(k+1) \\ &\quad \cdot R_i^j(k+1)^{-1} H_i^j(k+1) \end{aligned} \quad (16)$$

且 $X_F^j(k+1|k)$ 、 $P_F^j(k+1|k)$ 分别由式(7)和(9)给出 $X_{k+1|k+1,i}^j$ 的表达式中的有关变量也要做相应的变化^[10]. 当融合中心到局部节点 j 也有反馈信息时, 式(15)和(16)中的 $X_F^j(k+1|k)$ 和 $P_F^j(k+1|k)$ 要分别用 $X_F^j(k+1|k) - \hat{x}_i^j$ 及 $P_F^j(k+1|k)$ 代替.

4 多传感器信息融合的三层估计

现在研究融合节点的估计问题, 当把来自于 M 个局部节点的航迹在融合中心作进一步处理时, 从全系统的角度看, 已变成三层估计问题. 如前所述, 这类系统有三种可能的结构, 即: 集 - 分式、分 - 分式和混 - 分式结构.

4.1 带反馈的集 - 分式分层估计

这里的反馈指融合节点到局部节点的反馈, 而局部节点到传感器由于是集中式不能有反馈信息. 假定有 L 个局部节点接收来自融合中心的反馈信息, 则于文献[12]中的式(40)可得带反馈的集 - 分式三层估计解为:

$$X_F(k+1) = P_F(k+1) \{ \sum_{j=1}^L P_F^j(k+1)^{-1} [X_F^j(k+1) + \hat{x}_j^j]$$

$$\begin{aligned}
& - (L-1) P_F(k+1|k)^{-1} \} X_F(k+1|k) \\
& + \sum_{j=L+1}^M \{ P_F^j(k+1)^{-1} [X_F^j(k+1) + \dots + X_F^j(k+1|k) + \dots + X_F^j(k+1|k)] \} \quad (17)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_F(k+1)^{-1} = & \sum_{j=1}^L P_F^j(k+1)^{-1} - (L-1) P_F(k+1|k)^{-1} \\
& + \sum_{j=L+1}^M [P_F^j(k+1)^{-1} - P_F^j(k+1|k)^{-1}] \quad (18)
\end{aligned}$$

其中 $X_F(k+1|k)$ 、 $P_F(k+1|k)$ 分别由式(7)和(10)给出, $X_F^j(k+1)$ 、 $P_F^j(k+1)$ 由式(6)和(9)给出, 而 $X_F^j(k+1)$ 、 $X_F^j(k+1|k)$ 、 $P_F^j(k+1)$ 和 $P_F^j(k+1|k)$ 分别由文献[12]中的式(18)、(19)、(21)、(22)给出. 当 $L=0$ 时, 以上两式便退化成无反馈情况. 当 $L=M$, 即所有局部节点均接收反馈信息. 这时最优融合解为

$$\begin{aligned}
X_F(k+1) = & P_F(k+1) \{ \sum_{j=1}^M P_F^j(k+1)^{-1} [X_F^j(k+1) + \dots + X_F^j(k+1|k)] \\
& - (M-1) P_F(k+1|k)^{-1} X_F(k+1|k) \} \quad (19)
\end{aligned}$$

$$P_F(k+1)^{-1} = \sum_{j=1}^M P_F^j(k+1)^{-1} - (M-1) P_F(k+1|k)^{-1} \quad (20)$$

4.2 带反馈的分 - 分式分层估计

假设有 L 个局部节点接收来自融合节点的反馈信息, 而这些局部节点中又分别有 $L_j (j=1, 2, \dots, L)$ 个传感器接收来自局部节点的反馈信息. 于是由式(11)有

$$\begin{aligned}
& P_F^j(k+1)^{-1} X_F^j(k+1) - P_F^j(k+1|k)^{-1} X_F^j(k+1|k) \\
& = \sum_{i=1}^{L_j} P_{F_i}^j(k+1)^{-1} [X_{F_i}^j(k+1) + \dots + X_{F_i}^j(k+1|k) + \dots + X_{F_i}^j(k+1|k)] \\
& \quad + \sum_{i=L_j+1}^{N_j} \{ P_{F_i}^j(k+1)^{-1} [X_{F_i}^j(k+1) + \dots + X_{F_i}^j(k+1|k) + \dots + X_{F_i}^j(k+1|k)] \\
& \quad - P_{F_i}^j(k+1|k)^{-1} [X_{F_i}^j(k+1|k) + \dots + X_{F_i}^j(k+1|k)] \} \quad (21)
\end{aligned}$$

由上述假设知: $\forall i=1, 2, \dots, L_j$ 及 $\forall j=1, 2, \dots, L$, $X_{F_i}^j(k+1|k) = X_{F_i}^j(k+1|k) - \dots - X_{F_i}^j(k+1|k) - \dots - X_{F_i}^j(k+1|k)$, $P_{F_i}^j(k+1|k) = P_{F_i}^j(k+1|k) = P_{F_i}^j(k+1|k)$; $\forall j=L+1, L+2, \dots, M$, $L_j=0$. 把式(21)代入式(17)并化简, 可得带反馈的分 - 分式系统三层估计为:

$$\begin{aligned}
X_F(k+1) = & P_F(k+1) \{ [1 - \sum_{j=1}^L L_j] P_F(k+1|k)^{-1} X_F(k+1|k) \\
& + \sum_{j=1}^L \sum_{i=1}^{L_j} P_{F_i}^j(k+1)^{-1} [X_{F_i}^j(k+1) + \dots + X_{F_i}^j(k+1|k) + \dots + X_{F_i}^j(k+1|k)] \\
& + \sum_{j=1}^L \sum_{i=L_j+1}^{N_j} \{ P_{F_i}^j(k+1)^{-1} [X_{F_i}^j(k+1) + \dots + X_{F_i}^j(k+1|k) + \dots + X_{F_i}^j(k+1|k)] \\
& - P_{F_i}^j(k+1|k)^{-1} [X_{F_i}^j(k+1|k) + \dots + X_{F_i}^j(k+1|k)] \} \\
& + \sum_{j=L+1}^M \sum_{i=1}^{N_j} \{ P_{F_i}^j(k+1)^{-1} [X_{F_i}^j(k+1) + \dots + X_{F_i}^j(k+1|k) + \dots + X_{F_i}^j(k+1|k)] \\
& - P_{F_i}^j(k+1|k)^{-1} [X_{F_i}^j(k+1|k) + \dots + X_{F_i}^j(k+1|k)] \} \} \quad (22)
\end{aligned}$$

再由(12)和文献[12]中的式(37)得

$$P_F(k+1)^{-1} = [1 - \sum_{j=1}^L L_j] P_F^{-1}(k+1|k) + \sum_{j=1}^L \sum_{i=1}^{L_j} P_{F_i}^j(k+1)^{-1}$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{j=1}^L \sum_{i=L_j+1}^{N_j} [P_{F_i}^j(k+1)^{-1} - P_{F_i}^j(k+1|k)^{-1}] \\
& + \sum_{j=L+1}^M \sum_{i=1}^{N_j} [P_{F_i}^j(k+1)^{-1} - P_{F_i}^j(k+1|k)^{-1}] \quad (23)
\end{aligned}$$

当 $L=M$, $\forall j=1, \dots, L$, $L_j=N_j$, 则式(22)和(23)分别变成

$$\begin{aligned}
X_F(k+1) = & P_F(k+1) \{ [1 - \sum_{j=1}^M N_j] P_F(k+1|k)^{-1} X_F(k+1|k) \\
& + \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N_j} P_{F_i}^j(k+1)^{-1} [X_{F_i}^j(k+1) + \dots + X_{F_i}^j(k+1|k) + \dots + X_{F_i}^j(k+1|k)] \} \quad (24)
\end{aligned}$$

$$P_F(k+1)^{-1} = [1 - \sum_{j=1}^M N_j] P_F(k+1|k)^{-1} + \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N_j} P_{F_i}^j(k+1)^{-1} \quad (25)$$

$X_F(k+1)$ 和 $P_F(k+1)$ 表示局部节点和传感器接收反馈信息情况下系统的三层估计和协方差.

4.3 带反馈的混 - 分式分层估计

当向融合节点只传送局部估计和协方差时, 带反馈混 - 分式分层估计与带反馈集 - 分式分层估计相同, 表示在式(17)和(18). 现在考虑用传感器航迹和测量表示的带反馈混 - 分式分层估计, 假设 M 个局部节点全部接收来自融合节点的反馈信息, 而每个混合式局部节点只有 L_j 个传感器接收来自上一层的反馈信息. 于是, 把式(15)代入式(19)有:

$$\begin{aligned}
X_F(k+1) = & P_F(k+1) \{ [1 - \sum_{j=1}^M N_j] P_F(k+1|k)^{-1} X_F(k+1|k) \\
& + \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{L_j} P_{F_i}^j(k+1)^{-1} [X_{F_i}^j(k+1) + \dots + X_{F_i}^j(k+1|k) + \dots + X_{F_i}^j(k+1|k)] \\
& + \sum_{j=1}^M \sum_{i=L_j+1}^{N_j} \bar{G}_i^j(k+1) \{ Z_i^j(k+1) - H_i^j(k+1) \\
& \cdot [X_{F_i}^j(k+1|k+1, i-1) - \dots - X_{F_i}^j(k+1|k) + \dots + X_{F_i}^j(k+1|k)] \} \} \quad (26)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_F(k+1)^{-1} = & [1 - \sum_{j=1}^M N_j] P_F^{-1}(k+1|k) + \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{L_j} P_{F_i}^j(k+1)^{-1} \\
& + \sum_{j=1}^M \sum_{i=L_j+1}^{N_j} [H_i^j(k+1) R_i^j(k+1|k)^{-1} H_i^j(k+1|k)] \quad (27)
\end{aligned}$$

$\bar{G}_i^j(k+1)$ 、 $P_{F_i}^j(k+1|k+1, i)$ 、 $X_{F_i}^j(k+1|k+1, i)$ 由文献[10]中的式(17)、(18)和(16)给出, $[P_{F_i}^j(k+1|k+1, L_j)]^{-1}$ 由式(16)给出, 但

$$\begin{aligned}
X_{F_i}^j(k+1|k+1, L_j) = & P_{F_i}^j(k+1) \{ \sum_{i=1}^{L_j} P_{F_i}^j(k+1)^{-1} [X_{F_i}^j(k+1) + \dots + X_{F_i}^j(k+1|k) + \dots + X_{F_i}^j(k+1|k)] \\
& - (L_j-1) X_F(k+1|k)^{-1} [X_F(k+1|k) - \dots + X_F(k+1|k)] \} \quad (28)
\end{aligned}$$

且 $X_F(k+1|k)$ 、 $P_F(k+1)$ 和 $P_F(k+1|k)$ 分别由式(7)、(9)和(10)给出. 当只有 L 个局部节点接收来自融合中心的反馈信息时, 仍可求出类似的结果.

5 有无反馈情况下分层估计解的关系

前面已经讨论了有反馈信息情况下传感器级、局部节点和融合中心的状态估计. 在有反馈信息情况下, 接收融合中心反馈信息的局部节点其跟踪性能获得了改善, 这一点可以在下一节的仿真中得到验证. 那么, 在有反馈信息的情况下, 随着大量局部节点跟踪性能的改善, 融合节点的状态估计精度

是否会发生变化? 结论是有无反馈信息融合节点的状态估计是等价的、最优的。下面以分-分式分层估计为例,以定理形式给出证明。

定理 1: 在多传感器信息融合系统中,来自融合中心的反馈信息可以明显改善一些局部节点的跟踪性能,但有、无反馈信息其分层估计解是等价的和最优的。

证明: 现以分-分式分层估计为例证明两类估计的等价性。为此,需要证明 $P_F(k+1) = P_f(k+1)$, $X_F(k+1) = X_f(k+1)$, 它们分别对应无、有反馈信息情况下的分-分式分层估计的协方差和状态估计。

先证 $P_F(k+1) = P_f(k+1)$, 由文献[12]的(37)、(38)两式可得

$$P_F^{-1}(k+1) = [\begin{matrix} (k) & P_f(k) & (k) & + & G(k) & Q(k) & G(k) & J^{-1} \\ + & \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N_j} & H_j^T(k+1) & R_j^i(k+1)^{-1} & H_j^i(k+1) \end{matrix}] \quad (29)$$

再由文献[12]中的式(23)、(38)有

$$\begin{aligned} P_F^{-1}(k+1) - P_F^{-1}(k+1|k) &= \left\{ \sum_{j=1}^L \left[\sum_{i=1}^{L_j} P_{fj}^i(k+1)^{-1} P_{fj}^i(k+1|k)^{-1} \right] \right. \\ &\quad \left. + \sum_{i=L_j+1}^{N_j} H_j^T(k+1) R_j^i(k+1)^{-1} H_j^i(k+1) \right\} \\ &\quad + \sum_{j=L+1}^M \sum_{i=1}^{N_j} H_j^T(k+1) R_j^i(k+1)^{-1} H_j^i(k+1) \end{aligned} \quad (30)$$

把式(4)代入上式得

$$\begin{aligned} P_F(k+1)^{-1} &= [\begin{matrix} (k) & P_f(k) & (k) & + & G(k) & Q(k) & G(k) & J^{-1} \\ + & \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N_j} & H_j^T(k+1) & R_j^i(k+1)^{-1} & H_j^i(k+1) \end{matrix}] \\ &\quad + \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N_j} H_j^T(k+1) R_j^i(k+1)^{-1} H_j^i(k+1) \end{aligned} \quad (31)$$

由于 $P_F(0) = P_f(0) = P_0$, 因此,由式(29)、(30)可知,存在 $P_F(k+1) = P_f(k+1)$, 进而有 $P_f(k+1|k) = P_F(k+1|k)$ 。

再证 $X_F(k+1) = X_f(k+1)$ 。把式(1)代入式(22),并运用 $X_F^j(k+1|k) + \begin{matrix} j \\ j \end{matrix} = X_F(k+1|k)$, $P_{fj}^i(k+1|k) = P_F^i(k+1|k)$ 的特性及式(4),则有

$$\begin{aligned} X_F(k+1) &= P_F(k+1) \{ P_F^{-1}(k+1|k)^{-1} X_F(k+1|k) \\ &\quad + \sum_{j=1}^L \sum_{i=1}^{L_j} \{ H_j^T(k+1) R_j^i(k+1)^{-1} H_j^i(k+1) X_F(k+1|k) \\ &\quad + H_j^T(k+1) R_j^i(k+1)^{-1} Z_j^i(k+1) - H_j^i(k+1) \\ &\quad \cdot R_j^i(k+1)^{-1} H_j^i(k+1) [X_F(k+1|k) - \begin{matrix} j \\ j \end{matrix}] \} \\ &\quad + \sum_{j=1}^L \sum_{i=L_j+1}^{N_j} \{ P_{fj}^i(k+1)^{-1} [X_F^i(k+1) + \begin{matrix} j \\ j \end{matrix}] \\ &\quad - P_{fj}^i(k+1|k)^{-1} [X_F^i(k+1) + \begin{matrix} j \\ j \end{matrix}] \} \\ &\quad + \sum_{j=L+1}^M \sum_{i=1}^{N_j} \{ P_{fj}^i(k+1)^{-1} [X_F^i(k+1) + \begin{matrix} j \\ j \end{matrix}] \\ &\quad - P_{fj}^i(k+1|k)^{-1} [X_F^i(k+1) + \begin{matrix} j \\ j \end{matrix}] \} \} \end{aligned} \quad (32)$$

化简式(32)可得

$$X_F(k+1) = P_F(k+1) \{ P_F^{-1}(k+1|k)^{-1} X_F(k+1|k)$$

$$\begin{aligned} &+ \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N_j} \{ P_{fj}^i(k+1)^{-1} [X_F^i(k+1) + \begin{matrix} j \\ j \end{matrix}] \\ &- P_{fj}^i(k+1|k)^{-1} [X_F^i(k+1|k) + \begin{matrix} j \\ j \end{matrix}] \} \end{aligned} \quad (33)$$

因为 $P_F(k+1) = P_f(k+1)$, $P_F(k+1|k) = P_f(k+1|k)$, 且 $X_F(0) = X_f(0) = \mu$, 因而式(33)与文献[12]中的式(42)的分层估计结果相同即 $X_F(k+1) = X_f(k+1)$ 成立。同理可以证明,集-分式和混-分式的融合结果也存在着同样的结论。当不考虑融合节点到局部节点的反馈信息时,定理1对局部节点也成立。由文献[12]可知,式(22)的具有反馈信息的分-分估计也是最优的。

6 仿真分析

6.1 仿真模型

为了讨论问题的方便,假设融合系统是分-分结构,有两个局部节点,每个局部节点配有两部2D雷达,每部雷达都有自己的数据处理器,它们同时跟踪一个目标。

设目标状态为 $X(k) = [x, y, \dot{x}, \dot{y}]^T$, 方程中的状态转移、过程噪声分布和噪声方差阵与文献[11]相同。在仿真中取 $T = 1s$, 测量向量表示为 $z = (x_m, y_m)$, 测量矩阵和传感器 i 的测量及测量误差方差阵也表示在文献[11]中。

模拟目标运动时,取 $q_x(k) = 0.01 \dot{x}(k)$, $q_y(k) = 0.01 \dot{y}(k)$, 雷达跟踪滤波在直角坐标系中完成,各雷达同步采样,且数据的传输延迟为零,局部节点和融合中心的航迹关联^[13]已正确完成,目标初始状态为 $X(0) = [2800, 1500, -350, -200]^T$ 。

设局部节点1中两部雷达的测距和测角精度为 $r_1 = 400m$, $\theta_1 = 0.0375rad$, $r_2 = 200m$, $\theta_2 = 0.027rad$; 局部节点2中两部雷达的测距和测角精度为: $r_3 = 100m$, $\theta_3 = 0.0175rad$, $r_4 = 50m$, $\theta_4 = 0.01rad$ 。

6.2 仿真结果及分析

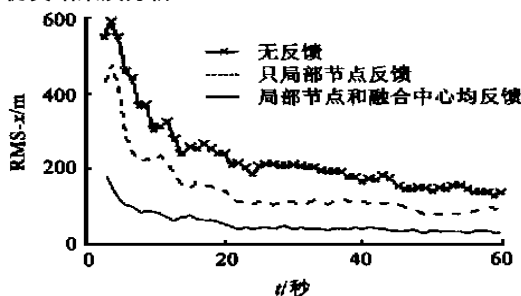
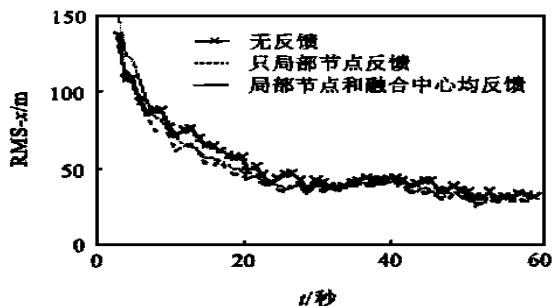
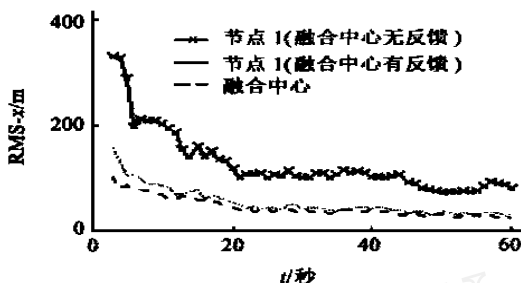
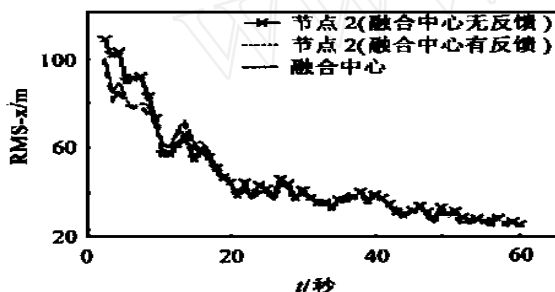


图1 传感器1, x轴位置误差均方差

图1和图2给出传感器1和传感器4在三种情况下目标 x 轴位置估计误差的均方根值,图3和图4则给出局部节点1和节点2及融合中心在两种情况下目标 x 轴位置估计误差均方根值,对 y 轴和速度估计误差也有类似的结果。

从图1可以看出,只从局部节点引入反馈信息的传感器1其跟踪性能已获得了明显的改善,而同时带有局部节点和融合中心反馈信息的传感器1其跟踪性能获得了更大的改善。在图2中,三种情况下传感器4的跟踪性能基本接近,当然传感器4在引入1、2层的反馈后,其性能均有进一步的改

图2 传感器4, x 轴位置误差均方值图3 节点1和融合中心, x 轴位置误差均方值图4 节点2和融合中心, x 轴位置误差均方值

善,但不明显.这说明,为了改善传感器级的跟踪性能,应该在测量误差大的传感器引入反馈机制,相反反馈机制对测量误差小的传感器没有实际意义.这一结论对局部节点也成立.在图3中,带反馈的局部节点1较无反馈的节点1的性能获得了明显的改善,几乎接近融合中心的性能.但图4中的三种性能都几乎相同.这些结论对集-分式和混-分式三层系统同样适用.

7 结论

本文在多坐标系的假设下研究了带反馈信息的多传感器信息融合中目标跟踪的分层估计问题.对线性离散时间系统,文中提出了几种带反馈信息的三层多传感器系统中的航迹融合方法,在满足 Kalman 滤波技术的条件下,所有结果都是最优的,并且在实时通讯的条件下,有、无反馈信息的各层估计是等价的.仿真结果表明,在观测误差大的传感器或局部节点引入上一层的反馈信息可以明显改善传感器或局部节点的跟踪性能,这时传感器或局部节点的跟踪性能已接近发送反馈信息节点的融合精度.观测误差小的传感器或局部节点在接受反馈信息后其跟踪性能改善得不明显,在实际应用中可以不引入反馈信息.本文的结果可以直接推广到大于三层的线性

离散系统,也可以扩展到非线性和连续时间跟踪系统,以及包括控制项或过程噪声与观测噪声相关情况下非标准多传感器系统中.当各传感器采样不同步^[14],传感器到局部节点及局部节点到融合中心传送测量或航迹信息的延迟时间不为零且含有噪声时,本文提出的带反馈信息的多传感器分层估计解需要进一步扩展.

作者简介:



何 友 1956 年 10 月生,教授,博士,博士生导师.1982 年毕业于武汉海军工程大学,1988 年在该校获硕士学位,1991 年 10 月至 1992 年 11 月在西德不伦瑞克工业大学作访问学者,1997 年 6 月在清华大学通信与信息系统专业获博士学位,现为烟台海军航空工程学院电子工程系主任教授,海军工程大学兼职博士生导师.主要研究领域有:多传感器信息融合、多目标跟踪、模式识别、雷达自适应检测方法以及分布检测理论等.在国内外重要学术刊物与国际会议上发表论文 200 余篇,其中有 60 余篇论文被 SCI、EI、ISIP 等国际文摘收录,出版专著 4 部,有 19 项研究成果获省部级科技进步奖.曾获第二届“全国百篇优秀博士论文奖”和第三届中国“求是杰出青年实用工程”奖,1999 年入选国家“百千万人才工程”第一、第二层次.



熊 伟 男,1977 年生,现为烟台海军航空工程学院信号与信息处理专业硕士研究生,研究方向为多传感器信息融合、多目标跟踪.

参考文献:

- [1] 何 友,彭应宁,陆大.多传感器数据融合模型评述[J].清华大学学报,1996,36(9):14-20.
- [2] D. H. Hall. Mathematical techniques in multisensor data fusion [M]. Arch House, 1992.
- [3] H. R. Hashemipour, et al. Decentralized structures for parallel Kalman filtering [J]. IEEE T-AC, 1988, 33(1): 88-93.
- [4] N. A. Karlson. Federated square root filter for decentralized parallel processes [J]. 1990 IEEE T-AES, 26(3): 517-525.
- [5] 周叶等. 线性离散时间系统分散估计的合成算法 [J]. 控制与决策, 1989, 6: 1-6.
- [6] 何友. 多传感器系统中的航迹合成 [J]. 火力与指挥控制, 1990, 1: 7-14.
- [7] 孙红岩等. 多传感器数据分层融合性质 [J]. 电子学报, 1996, 24(6): 55-61.
- [8] 周一宇. 分布估计及其在跟踪系统中的应用 [J]. 系统工程与电子技术, 1993, (6): 58-70.
- [9] K. C. Chang, R. K. Saha, Y. Bar-Shalom. On optimal track-to-track fusion [J]. IEEE Transactions on AES, 33(4): 1271-1276.

(下转第 63 页)

类典型情况的实验结果,验证了文献[1]中提出的宽带高分辨目标极化检测理论.实验结果表明,基于横向极化滤波的高分辨目标检测方法能够有效地利用目标与杂波的空间—极化结构之间的差异性信息,具有良好的检测性能.

需要指出的是,由于实验条件所限,本文仅对目标的静态宽带极化散射进行了外场测量,而未能对目标的高分辨动态起伏特性进行测量实验和建模;同样也未能对杂波进行高分辨测量实验和建模,而是直接采用了文献[3]提供的杂波模型,这些不足在一定程度上影响了最终实验结果的准确性.但是,本文的研究目的在于通过这些检测实验得到雷达检测性能与诸相关参数的依赖关系,而这些关系具有一定的“相对性”和“适应性”,即未必需要获知被实验对象的各项绝对参数的精准模型.在这个意义上,本文得到的实验结论仍然具有普遍的意义.

参考文献:

- [1] 王雪松,肖顺平,李永祯.高分辨雷达目标极化检测理论与性能优化模型[J].电子学报,2000,7.
 - [2] 王雪松,宽带极化信息处理的研究[D].长沙:国防科技大学电子工程学院,1999,6.
 - [3] L. M. Novak, M. J. Cardullo. Studies of target detection algorithms that use polarimetric radar data [J]. IEEE Trans, 1989, AES-25 (2): 150 ~ 165.
 - [4] J. J. van Zyl. On the importance of polarization in Radar scattering problems [D]. California Institute of technology, pasadena, CA, Jan. 1986.
 - [5] 林茂庸,柯有安.雷达信号理论[M].北京:国防工业出版社,1981.
 - [6] 庄钊文,肖顺平,王雪松.雷达极化信息处理及其应用[M].北京:国防工业出版社,1999.
-
- (上接第 89 页)
- [10] He You, Peng Yingning, Lu Dajin. Composite Filtering in Hybrid Multi-sensor Data Fusion Systems [S]. Inter. Radar Symposium, Germany September, 1998: 745 - 748.
 - [11] He You, Peng Yingning, Lu Dajin. Sensor track fusion with feedback information [S]. Inter. Conf. on Radar System, May, 1999, France.
 - [12] 何友,王国宏,陆大燮,彭应宁.多级式多传感器信息融合中的状态估计[J].电子学报,1999,27(8):66 - 69.
 - [13] 何友,王国宏,陆大燮,彭应宁.多传感器信息融合及应用[M].电子工业出版社.北京:第十一章,2000,11.
 - [14] A. T. Alouani, T. R. Rice. Performance analysis of an asynchronous track fusion and architecture [J]. SPIE. 1997, 3068: 194 - 205.