

两级混合多传感器信息融合中的状态估计¹

何友 陆大绘* 彭应宁*

(海军航空工程学院电子工程系 烟台 264001)

*(清华大学电子工程系 北京 100084)

摘要 在混合式多传感器信息融合系统中,一部分传感器通过处理它们的数据产生局部航迹,另一部分传感器则只提供检测报告,这些航迹和检测报告被传送到融合中心完成航迹融合和组合滤波。本文提出适合于两级混合式多传感器系统的全局最优状态估计解。在这种结构中,融合中心首先需要融合来自 L 个传感器的局部估计,然后基于其它 $N-L$ 个传感器的观测,利用 Kalman 滤波技术依次更新已融合的航迹。本文还考虑了各传感器分布在不同地理位置时的状态估计问题。

关键词 信息融合, 状态估计, 多传感器, 航迹融合, 组合滤波

中图分类号 TP391, TN911.23

1 引言

在多传感器多目标跟踪系统中,用于处理多传感器数据的技术可分为三类。第一类是集中式处理方法,各传感器的原始数据被送到中心节点统一处理。这种方法的优点是极小化信息损失,但缺点是数据互联复杂、计算机资源要求高^[1,2]。第二类是分布式处理方法,每个传感器都通过处理它们的观测来产生局部航迹,然后把这些航迹送入融合中心进行航迹关

联与航迹融合^[3-9]。第三类是分布式和集中式同时使用的方法,称为混合式结构。在这种结构中,一部分传感器利用它们自己的观测来产生局部航迹送入中心节点,另一部分传感器把它们观测的原始数据送入融合节点处理。实际上,这种结构是分布式和集中式的混合式组合,其拓扑图如图1所示。在这种方法中,中心站首先完成数据校准、航迹关联和航迹融合功能,然后是数据互联和组合滤波。假设航迹关联、数据互联已基于状态向量或检测报告在中心节点完成,本文讨论融合中心的航迹融合和组合滤波问题。

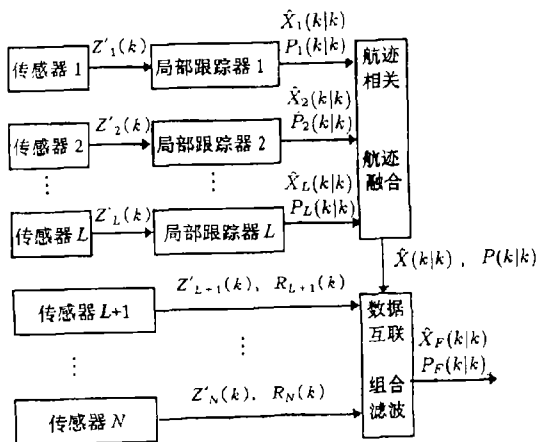


图1 混合融合结构

2 最优航迹融合

目标运动规律在离散化状态方程的基础上可模拟为

$$X(k+1) = F(k)X(k) + G(k)V(k), \quad (1)$$

其中 $X(k) = [x(k), y(k), z(k), \dots]^T$ 是 n 维状态向量, $F(k)$ 是状态转移矩阵, $G(k)$ 是过程

¹ 1998-02-23 收到, 1998-11-16 定稿
国防科研基金资助课题

噪声分布矩阵, $\mathbf{V}(k)$ 假设是正态分布的过程噪声, 且

$$E[\mathbf{V}(k)] = 0, \quad E[\mathbf{V}(k)\mathbf{V}^T(l)] = \mathbf{Q}(k)\delta_{kl}. \quad (2)$$

初始状态向量也假定是均值为 $\hat{\mathbf{X}}(0|0)$ 、方差为 $\mathbf{P}(0|0)$ 的正态分布, 且独立于 $\mathbf{V}(k)$ 。目标状态由 N 个传感器观测。传感器 i 在 k 时刻的观测为

$$\mathbf{Z}'_i(k) = \mathbf{H}_i(k)\mathbf{X}_i(k) + \mathbf{W}_i(k), \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (3)$$

这里测量噪声序列 $\mathbf{W}_i(k)$ 是相互独立零均值和白噪声的, 其方差为 $\mathbf{R}_i(k)$, 假定是独立于 $\mathbf{V}(k)$ 和 $\mathbf{X}(0)$ 的, $\mathbf{H}_i(k)$ 是测量矩阵。传感器 i 在融合中心笛卡尔坐标系中的三个位置分量假定是 $\mathbf{M}'_i = [a_i, b_i, c_i]^T$, 目标的位置坐标分量也假设是包含在测量向量中, 设

$$\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{M}'_i \\ 0 \end{bmatrix}_{n \times 1} \quad (4)$$

是传感器 i 在融合节点坐标系中位置坐标的增广向量。于是, 传感器 i 在中心坐标系中 k 时刻的观测为

$$\mathbf{Z}_i(k) = \mathbf{Z}'_i(k) + \mathbf{H}_i(k)\mathbf{M}_i, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (5)$$

这样, 传感器 i 在 k 时刻的 Kalman 滤波方程为

$$\hat{\mathbf{X}}_i(k|k) = \hat{\mathbf{X}}_i(k|k-1) + \mathbf{P}_i(k)\mathbf{H}_i^T(k)\mathbf{R}_i^{-1}(k)[\mathbf{Z}'_i(k) - \mathbf{H}_i(k)\hat{\mathbf{X}}_i(k|k-1)], \quad (6)$$

$$\mathbf{P}_i^{-1}(k|k) = \mathbf{P}_i^{-1}(k|k-1) + \mathbf{H}_i^T(k)\mathbf{R}_i^{-1}(k)\mathbf{H}_i(k), \quad (7)$$

其中

$$\hat{\mathbf{X}}_i(k|k-1) = \mathbf{F}(k-1)\hat{\mathbf{X}}_i(k-1|k-1), \quad (8)$$

$$\mathbf{P}_i(k|k-1) = \mathbf{F}(k-1)\mathbf{P}_i(k-1|k-1)\mathbf{F}^T(k-1) + \mathbf{G}(k-1)\mathbf{Q}(k-1)\mathbf{G}^T(k-1). \quad (9)$$

由文献 [5, 10] 的结果可推出基于 L 个局部航迹估计所形成的最优航迹融合算法为

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{X}}(k) = & \hat{\mathbf{X}}(k|k-1) + \mathbf{P}(k) \sum_{i=1}^L \{ \mathbf{P}_i^{-1}(k)[\hat{\mathbf{X}}_i(k) + \mathbf{M}_i] - \hat{\mathbf{X}}(k|k-1) \\ & - \mathbf{P}_i^{-1}(k|k-1)[\hat{\mathbf{X}}_i(k|k-1) + \mathbf{M}_i] - \hat{\mathbf{X}}(k|k-1) \}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\mathbf{P}^{-1}(k) = \mathbf{P}^{-1}(k|k-1) + \sum_{i=1}^L [\mathbf{P}_i^{-1}(k) - \mathbf{P}_i^{-1}(k|k-1)]. \quad (11)$$

这里

$$\hat{\mathbf{X}}(k|k-1) = \mathbf{F}(k-1)\hat{\mathbf{X}}(k-1), \quad (12)$$

$$\mathbf{P}(k|k-1) = \mathbf{F}(k-1)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{F}^T(k-1) + \mathbf{G}(k-1)\mathbf{Q}(k-1)\mathbf{G}^T(k-1). \quad (13)$$

3 融合节点中的组合滤波

根据 (10) 式, 来自 L 个局部估计器在 $k+1$ 时刻的航迹融合解为

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{X}}(k+1) = & \hat{\mathbf{X}}_F(k+1|k) + \mathbf{P}(k+1) \sum_{i=1}^L \{ \mathbf{P}_i^{-1}(k+1)[(\hat{\mathbf{X}}_i(k+1) + \mathbf{M}_i) - \hat{\mathbf{X}}_F(k+1|k)] \\ & - \mathbf{P}_i^{-1}(k+1|k)[(\hat{\mathbf{X}}_i(k+1|k) + \mathbf{M}_i) - \hat{\mathbf{X}}_F(k+1|k)] \}, \end{aligned} \quad (14)$$

其中

$$\mathbf{P}^{-1}(k+1) = \mathbf{P}_F^{-1}(k+1|k) + \sum_{i=1}^L [\mathbf{H}_i^T(k+1)\mathbf{R}_i^{-1}(k+1)\mathbf{H}_i(k+1)], \quad (15)$$

$\hat{\mathbf{X}}_F(k+1|k)$ 是融合节点的一步状态预测, $\mathbf{P}_F(k+1|k)$ 是一步预测协方差。

$\forall i \in \{L+1, L+2, \dots, N\}$, 传感器 i 的测量方程表示如 (5) 式。当把来自 $N-L$ 个传感器的测量与 (14) 式给出的已融合航迹互联后, 可以定义用于混合式多传感器信息融合的一种新的组合滤波算法。

如果我们把 $\mathbf{Z}_{L+1}(k), \mathbf{Z}_{L+2}(k), \dots, \mathbf{Z}_N(k)$ 看作为融合节点中具有零采样间隔的一组新观测, 那么, 对于 $i = L+1, L+2, \dots, N$, 中心节点的状态估计可以运用 Kalman 滤波技术循环地计算如下:

$$\hat{\mathbf{X}}_{k+1|k+1,i} = \hat{\mathbf{X}}_{k+1|k+1,i-1} + \mathbf{K}_i(k+1)[\mathbf{Z}_i(k+1) - \mathbf{H}_i(k+1)\hat{\mathbf{X}}_{k+1|k+1,i-1}], \quad (16)$$

这里

$$\mathbf{K}_i(k+1) = \mathbf{P}_{k+1|k+1,i}\mathbf{H}_i(k+1)^T\mathbf{R}_i^{-1}(k+1), \quad (17)$$

$$\mathbf{P}_{k+1|k+1,i}^{-1} = \mathbf{P}_{k+1|k+1,i-1}^{-1} + \mathbf{H}_i^T(k+1)\mathbf{R}_i^{-1}(k+1)\mathbf{H}_i(k+1), \quad (18)$$

且

$$\mathbf{P}_{k+1|k+1,L} = \mathbf{P}(k+1), \quad \hat{\mathbf{X}}_{k+1|k+1,L} = \hat{\mathbf{X}}(k+1). \quad (19)$$

在完成 $N-L$ 步更新后, 可以获得用于两级混合多传感器数据融合系统的组合滤波算法为

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{X}}_F(k+1) &= \hat{\mathbf{X}}_{k+1|k+1,L} + \sum_{i=L+1}^N \mathbf{K}_i(k+1)[\mathbf{Z}_i(k+1) - \mathbf{H}_i(k+1)\hat{\mathbf{X}}_{k+1|k+1,i-1}] \\ &= \hat{\mathbf{X}}_F(k+1|k) + \mathbf{P}(k+1) \sum_{i=1}^L \{ \mathbf{P}_i^{-1}(k+1)[\hat{\mathbf{X}}_i(k+1) + \mathbf{M}_i] - \hat{\mathbf{X}}_F(k+1|k) \} \\ &\quad - \mathbf{P}_i^{-1}(k+1|k)[\hat{\mathbf{X}}_i(k+1|k) + \mathbf{M}_i] - \hat{\mathbf{X}}_F(k+1|k) \} \\ &\quad + \sum_{L+1}^N \mathbf{K}_i(k+1)[\mathbf{Z}_i'(k+1) + \mathbf{H}_i(k+1)\mathbf{M}_i - \mathbf{H}_i(k+1)\hat{\mathbf{X}}_{k+1|k+1,i-1}], \quad (20) \end{aligned}$$

且状态估计协方差为

$$\mathbf{P}_F^{-1}(k+1) = \mathbf{P}_F^{-1}(k+1|k) + \sum_{i=1}^N \mathbf{H}_i^T(k+1)\mathbf{R}_i^{-1}(k+1)\mathbf{H}_i(k+1), \quad (21)$$

其中

$$\mathbf{P}_F(k+1|k) = \mathbf{F}(k)\mathbf{P}_F(k)\mathbf{F}^T(k) + \mathbf{G}(k)\mathbf{Q}(k)\mathbf{G}^T(k), \quad (22)$$

$$\hat{\mathbf{X}}_F(k+1|k) = \mathbf{F}(k)\hat{\mathbf{X}}_F(k). \quad (23)$$

4 结 论

本文提出了用于两级混合式多传感器信息融合的全局最优组合滤波解。对由 L 个传感器提供局部估计和 $N-L$ 个传感器提供观测的情况, 融合中心首先需要融合来自 L 个传感器的局部状态估计, 然后基于其它 $N-L$ 个传感器的观测利用 Kalman 滤波技术循环更新已融合的航迹。在本文提出的方法中, 我们考虑了各传感器和融合节点位于不同笛卡尔坐标系的航迹融合和组合滤波问题。

本文详细讨论了两级混合式多传感器的组合滤波算法, 这种方法可以推广到多级混合式多传感器系统中。在推导组合滤波算法的过程中, 假设没有延迟的无噪声通道和各传感器同步采样, 当这些假设不成立时, 本文的算法需做相应的扩展。

参 考 文 献

- [1] Llinas J, Waltz E. Multisensor Data Fusion. Norwood, Massachusetts: Artech House, 1990, Chapter 6.
- [2] Hall D H. Mathematical Techniques in Multisensor Data Fusion. Boston: Artech House, 1992: 251-290.
- [3] 何 友, 彭应宁, 陆大绘, 高志永. 多传感器数据融合中两种新的航迹相关算法. 电子学报, 1997, 25(9): 10-15.
- [4] 何 友, 彭应宁, 陆大绘, 高志永. 分布式多传感器融合系统中两种新的航迹相关算法. 电子科学学刊, 1997, 19(6): 271-278.
- [5] 孙红岩, 毛士艺, 林品兴. 多传感器数据分层融合的性质. 电子学报, 1996, 24(6): 55-61.
- [6] 周一宇. 分布估计及其在跟踪系统中的应用. 系统工程与电子技术, 1996, 15(6): 55-61.
- [7] 崔宁周, 谢维信, 余雄南. 多传感器多目标分布跟踪中数据关联的快速算法. 电子学报, 1996, 24(6): 62-66.
- [8] Bar-Shalom Y, Fortmann T E. Tracking and Data Association. New York: Academic Press, INC., 1988: 266-272.
- [9] Alovani A T, Rice T R, Helmick R E. On Sensor Track Fusion. Proceedings of the American Control Conference, Baltimore, Maryland: 1994, 1042-1046.
- [10] 何 友. 多目标多传感器分布信息融合算法. [博士论文]. 北京: 清华大学, 1996, 11.

STATE ESTIMATION FOR TWO-LEVEL HYBRID MULTISENSOR DATA FUSION SYSTEMS

He You Lu Dajin* Peng Yingning*

(Dept. of Electron. Eng., Naval Aeronautical Engineering Academy, Yantai 264001)

*(Dept. of Electron. Eng., Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract In hybrid multisensor systems where a part of sensors processes their data locally to produce local tracks, another part of sensors only provides detection reports, the tracks and detection reports are communicated to a central site where track fusion and composite filtering are performed. This paper presents a globally optimal composite filtering solution for a two-level hybrid multisensor system. It is shown that the fusion center first needs to fuse the local estimates from the L sensors, and then to update recursively the fused track by using a Kalman filter based on the observations of the other $N-L$ sensors. This paper also considers the estimation problems based on the different Cartesian coordinates.

Key words Data fusion, State estimation, Multisensor, Track fusion, Composite filtering

- 何 友: 男, 1956 年生, 教授, 博士, 博士生导师, 中国电子学会高级会员、雷达系统技术专业委员会委员, 中国航空学会信息处理与计算机应用专业委员会委员, 《火力与指挥控制》和《水面兵器》杂志编委, 《海军航空工程学院学报》编委会副主任. 主要研究领域有: 多传感器信息融合、多目标跟踪、雷达自适应检测方法、模式识别、火炮射表编制及其数据处理等.
- 陆大绘: 男, 1928 年生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会会士, 中国电子学会学术委员会副主任, 教育工作委员会副主任, 中国电子学报副主编, 从事信号与信息处理专业.
- 彭应宁: 男, 1939 年生, 教授, 博士生导师, 中国雷达学会理事, 从事高速实时数字信号处理的研究, 现在的研究方向集中在: 谱估计、自适应滤波、自适应阵列信号处理、雷达低角跟踪、信息融合以及神经网络的应用等领域.