

## 带有反馈的分布式结构下的无序航迹融合算法

袁丁<sup>1</sup>, 梁伟<sup>1</sup>, 胡建旺<sup>1</sup>, 顾峰<sup>2</sup>

(1. 军械工程学院信息工程系, 石家庄 050003; 2. 中国人民解放军73903部队, 福建 厦门 361100)

**摘要:** 随着无序量测算法研究的不断深入, 分布式系统中的无序航迹融合估计问题也已经引起了研究者的关注。针对带有反馈的分布式结构下的无序航迹问题, 提出了基于递推融合 NALE 判决机制的融合算法。算法采用递推融合 NALE 判决机制, 在融合中心递推处理周期内无序到达的局部估计。而后, 在系统融合周期结束时刻将全局估计反馈到局部处理器。通过理论分析和仿真实验说明算法可有效处理无序航迹问题, 同时提高了系统稳定性和实时性。

**关键词:** 目标跟踪; 航迹融合; 无序航迹; 分布式融合估计

**中图分类号:** V271.4; TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)07-0006-04

## Algorithm on Out-of-Sequence Track Fusion for Distributed System with Feedback

YUAN Ding<sup>1</sup>, LIANG Wei<sup>1</sup>, HU Jian-wang<sup>1</sup>, GU Feng<sup>2</sup>

(1. Department of Information Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;

2. No. 73903 Unit of PLA, Xiamen 361100, China)

**Abstract:** With the development of researches on out-of-sequence measurement problem, attentions have been given to the out-of-sequence track (OOST) fusion problem existed in distributed system. Aiming at the out-of-sequence track fusion problem in distributed system with feedback, we put forward a fusion algorithm based on recursive fusion NALE mechanism. In fusion center, the local estimation arrived out-of-sequence was processed recursively. And at the end of global fusion period, the global estimation was fed back to the local processor. Theoretical and simulation results indicate that the new algorithm can effectively deal with OOST problem, and can improve the stability and real-time performance of the system.

**Key words:** target tracking; track fusion; out-of-sequence track; distributed fusion estimation

### 0 引言

在目标跟踪系统中, 由于各传感器具有不同的采样速率、预处理时间和通信滞后, 会出现传感器量测无序到达融合中心的现象, 即发生无序量测问题<sup>[1-2]</sup>。传统的滤波算法不适于处理这种“负时间更新”问题, 需要研究相应的滤波算法。

在集中式融合结构下, 以 Bar-Shalom 的研究成果为基础, 有大量性能最优或次优的滤波算法被提出<sup>[3]</sup>, 但在实际系统中, 使用更广泛的是分布式融合结构。与集中式融合结构相比, 分布式融合结构具有通信量少、抗干扰能力强、冗余性强等优点<sup>[4]</sup>, 分布式融合

结构中的无序数据融合估计问题的研究也得到了研究者的关注。

目前, 针对分布式融合结构中的无序航迹 (Out-of-Sequence Track, OOST) 融合问题的研究成果还不多。在分布式融合结构中, 系统存在“传感器—局部处理器—融合中心”的融合结构。文献[5-6]根据融合系统数据传输的不同形式, 提出了无序估计 (Out-of-Sequence Estimate, OOSE) 的概念, 在分布式框架下讨论无序数据估计的问题, 提出了相应的估计算法; 文献[7]考虑分布式结构下的 (Out-of-Sequence Measurement, OOSM) 问题, 假设无序情形发生于“传感器—局部处理器”这一过程。对于  $n$  个无序量测, 局部处理器产生  $n$  个对应估计, 融合中心进行  $n+1$  次递推以实现融合; 同时, 针对多个 OOSM 延迟步数相同的情形, 通过扩维, 推导得到了分布式结构下的 FA、FAl、FBl 等算法<sup>[8]</sup>。文献[4]假设无序情形发生于“局部处理器—

收稿日期: 2013-08-14

修回日期: 2014-03-19

基金项目: 军械工程学院科学研究基金 (YJXM11014)

作者简介: 袁丁 (1990—), 男, 山东泰安人, 硕士生, 研究方向为信息融合、目标跟踪和指控理论。

融合中心”这一过程,将基于伪量测的最优分布式融合估计算法与 OOSM A1 算法结合,得到了分布式最优单步延迟航迹融合估计算法。文献[5]则研究了分布式融合结构下的二次乱序传输估计,即假设两个传输过程均出现无序情形,提出了基于 NALE (Newest Available Local Estimate) 判别和协方交叉 CI (Covariance Insection) 融合的处理算法。

上述算法大都在开环结构下开展研究,未考虑融合中心到局部处理器的信息反馈。现针对带有反馈的分布式结构下,无序传输发生于“局部处理器—融合中心”的情形,提出相应的融合算法。算法根据 NALE 判别机制,在融合中心递推处理无序估计,同时,在融合中心融合时刻向局部处理器进行反馈,算法可有效处理无序航迹融合问题,且实时性更好。仿真实验验证了算法性能。

## 1 系统与问题描述

假设离散系统的状态方程为

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{F}_{k,k-1} \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{w}_{k,k-1} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{x}_k$  为  $k$  时刻的系统状态向量;  $\mathbf{F}_{k,k-1}$  为系统状态转移矩阵;  $\mathbf{w}_{k,k-1}$  为协方差为  $\mathbf{Q}_{k,k-1}$  的高斯零均值白噪声。

假设系统中共有  $N$  个传感器,量测方程为

$$\mathbf{z}_k^i = \mathbf{H}_k^i \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k^i \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{z}_k^i$  为第  $i$  个传感器  $k$  时刻对应的量测向量,  $i = 1, 2, 3, \dots, N$ ;  $\mathbf{H}_k^i$  为相应的量测矩阵;  $\mathbf{v}_k^i$  为协方差为  $\mathbf{R}_k^i$  的高斯零均值白噪声。假设初始状态与过程噪声和量测噪声不相关,过程噪声和量测噪声不相关,不同传感器量测噪声之间不相关。

针对图 1 所示的带有反馈的分布式系统,假设无序情形发生于“局部传感器—融合中心”这一过程,此时的无序数据是各个局部处理器的局部估计。

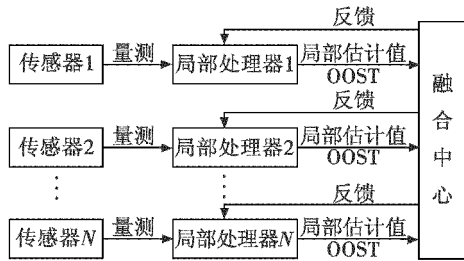


图 1 带有反馈的分布式系统

Fig. 1 A distributed system with feedback

假设融合中心在周期  $(k-1, k]$  获得的无序估计总数为  $m_k^{[5-6]}$ , 且有

$$m_k = \sum_{i=1}^N m_k^i \quad (3)$$

式中,  $m_k^i$  为周期内融合中心获得的第  $i$  个局部处理器的无序估计。根据到达融合中心的先后顺序, 该  $m_k$  个

无序估计可以顺序标记为

$$\hat{\mathbf{x}}_d = \{\hat{\mathbf{x}}_{d1}, \hat{\mathbf{x}}_{d2}, \dots, \hat{\mathbf{x}}_{dp}, \dots, \hat{\mathbf{x}}_{dm_k}\} \quad (4)$$

式中,  $\hat{\mathbf{x}}_{dp}$  ( $p = 0, 1, 2, \dots, m_k$ ) 表示周期内到达融合中心的第  $p$  个无序估计, 其真实时戳为  $r_{dp}^i$  ( $1 \leq i \leq N, 1 \leq r_{dp}^i \leq k-1$ )。

假设融合中心已经获得全局估计为  $\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}$  和相应的估计误差协方差矩阵  $\mathbf{P}_{k-1|k-1}$ , 现在要解决的问题是, 使用周期内的无序估计, 获得融合中心  $k$  时刻的融合估计, 即计算

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = E[\mathbf{x}_k | \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}, \hat{\mathbf{x}}_d] \quad (5)$$

$$\mathbf{P}_{k|k} = E\{[\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_{k|k}][\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_{k|k}]^T\} \quad (6)$$

## 2 NALE 判别机制

对于 OOST 估计问题, 由于其特有的信息继承特性, 并不要求所有到达融合中心的无序估计都参与系统的融合操作, 因此, 有学者提出了判别最新可利用的局部估计机制, 即 NALE 判别机制<sup>[6]</sup>。

对于特定的传感器与局部处理器, 由于 Kalman 滤波算法的递推特性, 最新的局部估计包含了此前所有局部估计的信息, 即

$$\text{Info}\{\hat{\mathbf{x}}_{k|k}^i\} \supset \text{Info}\{\hat{\mathbf{x}}_{m|k}^i\} \quad (7)$$

式中,  $\text{Info}\{\hat{\mathbf{x}}_{*|*}^i\}$  表示  $\hat{\mathbf{x}}_{*|*}^i$  中包含的信息, 且  $k > m$ ,  $m = 1, 2, \dots, k-1$ 。

因此, 融合中心在进行融合之前, 需要先判断局部处理器的哪一个无序估计是最新可利用的 NALE, 融合中心只需对 NALE 进行融合即可达到融合估计的目的。

目前, NALE 判别机制有整体融合和递推融合两种方案。其中, 整体融合判别机制, 是将周期内所有的无序估计全部判别完毕后, 进行整体融合, 而递推融合判别机制, 则是将判别出的 NALE 立刻参与系统融合过程, 相比而言, 递推融合的实时性和实用性更好。本文在算法设计中采用递推融合判别机制。

## 3 算法设计

算法处理的基本思想是, 采用递推融合 NALE 机制, 将周期内判定得到的 NALE 在融合中心直接进行融合, 而后在融合中心融合时刻, 将全局估计反馈到各个局部估计器。算法可分为判别、融合和反馈 3 个环节, 具体步骤如下所述。

### 1) 判别。

假设到时刻  $k-1$  为止, 融合中心已经获得的最新可利用的局部估计为  $\hat{\mathbf{x}}_{d,k|d,k}$  ( $r_{d,k}^i < k-1$ )。定义变量  $v_k$  用来存储此 NALE 的时戳, 置  $v_k = r_{d,k}^i$ , 另置计数变量  $p = 0$ 。假设此时融合中心已获得全局一步预测  $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$

和预测误差协方差矩阵  $\mathbf{P}_{k|k-1}$ 。

当融合中心获得一个无序估计  $\hat{\mathbf{x}}_{d,\alpha|d,\alpha}^i$  ( $r_{d,\alpha}^i < k-1$ ) 时,进行判别,若  $r_{d,\alpha}^i > v_k$ ,则置  $v_k = r_{d,\alpha}^i$ ,并将该无序估计进行下一步融合;否则,舍弃该无序估计,同时,置  $p = p + 1$ 。

重复进行上述判别,直到周期内所有的无序估计都被融合中心获得,即  $p = m_k$  [5]。

## 2) 融合。

融合中心接收到新的最新可利用局部估计以后,直接进行融合。此时有

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|v_k} = \mathbf{F}_{k,v_k} \hat{\mathbf{x}}_{v_k|v_k} \quad (8)$$

$$\mathbf{P}_{k|v_k} = \mathbf{F}_{k,v_k} \mathbf{P}_{v_k|v_k} \mathbf{F}_{k,v_k}^T + \mathbf{Q}_{k,v_k} \quad (9)$$

注意,由于  $v_k < k$ ,式(8)进行的是预测估计,并不存在 OOSM 算法中状态转移矩阵求逆的过程。

而后,将融合中心已有的预测估计值与式(8)得到的估计值进行融合,得到新的预测值。此处,若使用加权算法进行融合,需要面对全局估计与局部估计存在相关性的问题,故算法采用 CI 融合的方法进行融合,避免了复杂的相关性计算问题。以  $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$  和  $\hat{\mathbf{x}}_{k|v_k}$  融合为例,说明融合过程。

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{P} [w \mathbf{P}_{k|k-1}^{-1} \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + (1-w) \mathbf{P}_{k|v_k}^{-1} \hat{\mathbf{x}}_{k|v_k}] \quad (10)$$

$$\mathbf{P}^{-1} = w \mathbf{P}_{k|k-1}^{-1} + (1-w) \mathbf{P}_{k|v_k}^{-1} \quad (11)$$

式中,  $w \in [0, 1]$ , 且满足极小化性能指标

$$\min_w \text{tr} \mathbf{P} = \min_{w \in [0, 1]} \text{tr} \{ [w \mathbf{P}_{k|k-1}^{-1} + (1-w) \mathbf{P}_{k|v_k}^{-1}]^{-1} \} \quad (12)$$

式中,  $w$  的取值可以通过 0.618 法等搜索得到,具体参见文献[1]。

重复上述过程,直到将周期内所有的 NALE 融合后,得到最后的估计  $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$  和相应的估计误差协方差矩阵  $\mathbf{P}_{k|k}$ 。

## 3) 反馈。

完成上述两步以后,融合中心已经处理完周期 ( $k-1, k$ ] 内的无序估计,并得到相应的估计  $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$  和相应的估计误差协方差矩阵  $\mathbf{P}_{k|k}$ 。

算法采用递推融合判决机制,周期内可以获得多个预测值,但在反馈环节,无需将所有的预测值都反馈到局部处理器。融合中心只需在周期结束的  $k$  时刻,将估计  $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$  和估计误差协方差矩阵  $\mathbf{P}_{k|k}$  反馈到局部处理器即可。局部处理器利用反馈值进行下一步滤波。图 2 显示了反馈的原理 [9]。

由图 2 可知,  $k$  时刻的全局估计被反馈到各局部处理器,原预测过程  $L_1, L_2$  分别被  $L_4, L_6$  代替,从而建立了融合中心到局部处理器的反馈链路。

在分布式融合系统中,通过引入反馈,可以提高系统稳定性,改善局部估计,而对于此处的无序航迹问题,通过反馈将无序估计包含的信息引入到各局部处

理器,解决了无序信息利用不完全的问题 [6]。

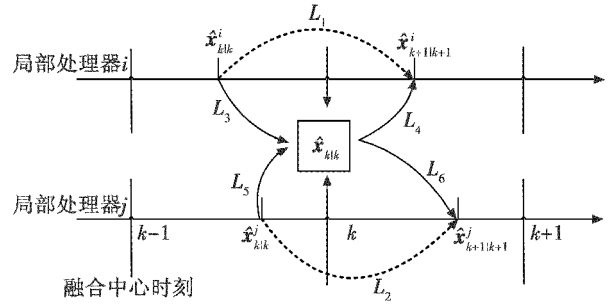


图 2 带有反馈的融合系统

Fig. 2 A fusion system with feedback

最后,对算法进行简要分析。算法与采用整体融合 NALE 判决机制的算法相比,实时性和实用性更好。这是因为:

1) 采用递推融合机制,判决得到的 NALE 立即进行融合,融合中心在接收到 NALE 的时候即可得到估计值,整个周期可得到多个估计值,而整体融合一个周期只输出单个估计值;

2) 采用递推融合机制,算法所需的计算量被分配到了一整个周期上,而整体融合机制,所有的计算量集中到融合时刻,系统计算负荷更高。

同时还要注意,本文的无序航迹问题是利用周期内的无序估计预测下一时刻的估计值,而无序量测问题则是利用无序量测再更新当前时刻的估计,此时的无序量测滤波过程可看作一个非标准的平滑过程。当然,无序量测也可以用来预测下一时刻的估计值,文献 [6] 对此进行了研究,在此不做过多探讨。

## 4 仿真实验

假设系统中有 5 个传感器跟踪同一个目标,此外,系统还包括 5 个对应的局部处理器和 1 个融合中心。假设目标为二维匀速运动模型。目标运动方程为

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x}_{k-1} + w_{k,k-1} \quad (13)$$

式中:  $T=1$  s; 过程噪声  $w_{k,k-1} \sim N(0, \mathbf{Q})$ ,  $\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} T^3/3 & T^2/2 \\ T^2/2 & T \end{bmatrix} \times q$ ,  $q$  为目标的随机扰动参数。这里,假设融合中心  $q=0.25 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , 5 个局部处理器对应的  $q$  分别为  $q_1=0.5, q_2=0.4, q_3=0.25, q_4=0.2, q_5=0.1$  (单位为  $\text{m}^2/\text{s}^2$ )。

量测方程为

$$\mathbf{z}_k^i = [1 \quad 0] \mathbf{x}_k + v_k^i \quad (14)$$

式中,量测噪声  $v_k^i \sim N(0, R_i)$ ,  $R_1=0.5, R_2=1, R_3=1.5, R_4=2, R_5=2.5$ 。

此外,设定初始状态为  $\mathbf{x}_0 = [10 \quad 11]^T$ , 初始误差

协方差矩阵为  $P_{111} = \begin{bmatrix} R & R/T \\ R/T & 2R/T^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}$ 。

对于无序情形,仿真中进行如下设定:融合中心与局部处理器1的融合周期为2s,且局部处理器1与融合中心之间传输无延迟;局部处理器2到局部处理器5等融合周期设定为1s,且在“局部处理器—融合中心”这一传输过程中会产生随机延迟,最大延迟步数为4步。

仿真中,共考察了融合中心前5个周期的滤波效果,图3给出处理无序估计后融合中心输出的航迹图。

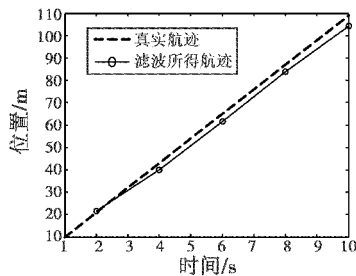


图3 融合中心输出航迹图

Fig. 3 Fusion center target trajectory

从图3中可以看出,算法可以处理无序航迹问题,具有较好的跟踪效果。

## 5 结论

针对带有反馈的分布式结构下无序传输发生于“局部处理器—融合中心”的情形,提出相应的无序航迹融合算法。算法基于NALE判决机制,递推处理到达融合中心的无序估计,同时,在融合时刻,将全局估计反馈到各局部处理器,算法可以有效处理无序航迹问题,提高了算法实时性,通过引入反馈,提高了系统稳定性,改善了局部滤波效果。本文仅假设无序情形产生于“局部处理器—融合中心”过程,对于“传感器—局部处理器”同时存在无序情形的情况,还有待进一步研究。

## 参考文献

- [1] 韩崇昭,朱红艳,段战胜,等. 多源信息融合[M]. 2版. 北京:清华大学出版社,2010:368-379.  
HAN C Z, ZHU H Y, DUAN Z S, et al. Multi-source information fusion [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2010:368-379.
- [2] 王洪峰,周磊,单甘霖. 国外军事信息融合理论与应用的研究进展[J]. 电光与控制,2007,14(4):13-17.  
WANG H F, ZHOU L, SHAN G L. Theory and application development of military information fusion[J]. Electronics Optics & Control, 2007, 14(4):13-17.
- [3] 王炜,黄心汉,王敏. 无序量测滤波更新算法综述[J]. 控制与决策,2012,27(1):1-5.  
WANG W, HUANG X H, WANG M. Survey of sequence measurement filtering algorithm [J]. Control and Decision, 2012, 27(1):1-5.
- [4] 金学波,杜晶晶,鲍佳. 基于伪量测的分布式最优单步延迟航迹融合估计[J]. 控制理论与应用,2011,28(10):1451-1454.  
JIN X B, DU J J, BAO J. Distributed optimal one-step-lag estimation for out-of-sequence track fusion based on pseudo-measurement for multi-sensor system[J]. Control Theory & Applications, 2011, 28(10):1451-1454.
- [5] 张建. 基于乱序数据传输的信息融合估计[D]. 哈尔滨:黑龙江大学,2012.  
ZHANG J. Information fusion estimate based on out-of-sequence data transmission [D]. Harbin: Heilongjiang University, 2012.
- [6] 葛泉波. 无序信息的网络融合及在舰船组合导航中的应用[D]. 上海:上海海事大学,2008.  
GE Q B. Research on network fusion based on OOSI and application in ship integrated invigitation [D]. Shanghai: Shanghai Maritime University, 2008.
- [7] WANG D H, ZHU Y M, SHEN X J. Distributed multisensor estimation fusion with out-of-sequence measurements [C]//Proceedings of International Conference on Embedded Software and Systems, 2008:390-395.
- [8] SHEN X J, ZHU Y M, WANG D H, et al. Optimal distributed fusion update with same lag time out-of-sequence measurements [C]//Proceedings of IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, 2008:613-618.
- [9] 文成林,葛泉波,刘双剑. 带有信息反馈的最优异步递推航迹融合算法[J]. 电子与信息学报,2009,31(9):2124-2131.  
WEN C L, GE Q B, LIU S J. Optimal asynchronous recursive track fusion with global feedback [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(9):2124-2131.

本刊国内邮发代号为 36-693 欢迎订阅