

基于模糊综合函数的航迹关联算法¹

何 友 陆大绘* 彭应宁* 王国宏

(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 本文运用现代数学中的综合分析方法,提出了模糊综合航迹关联算法,文中详细讨论了状态估计向量间模糊综合相似度的计算和评价方法,导出了三种典型模糊综合函数的递推式,研究了模糊综合航迹关联准则,并通过仿真将它与两种经典方法进行了比较。仿真结果表明,在密集目标环境下和 / 或交叉、分岔和机动航迹较多的场合,模糊航迹关联算法的性能明显优于传统方法,其正确关联率比传统方法提高了大约 40%。

关键词 信息融合, 航迹关联, 多传感器, 多目标, 雷达网

中图分类号 TP391

1 引 言

在多传感器环境中,经常应用两种不同类型的处理结构^[1-4]:一种是中心级跟踪,即集中式结构;另一种是传感器级跟踪,即分布式结构。在集中式结构中,传感器的所有量测数据都被传送到中心站处理。但在某些应用中,通常希望在传感器站进行处理,然后把处理过的结果传送到中心节点。为单传感器跟踪开发的许多算法都可以应用于集中式结构。但对分布式结构则需要研究航迹关联和融合^[5]问题,所谓航迹关联就是确定来自于不同局部节点的两个航迹估计是否对应于同一个目标的过程。目前用于航迹关联的主要算法有加权法^[6],修正法^[7,8],最近邻域法,经典分配法,似然比检验法,极大似然法, K 近邻域法^[9]和多元假设检验法^[10]等,其中前三种算法是在实际中应用最多的基本方法。但在密集目标环境下和 / 或交叉、分岔和机动航迹较多的场合,它们将导致较多的错、漏相关航迹,同时对这三种算法目前还缺乏系统和完整处理过程的描述。作为对模糊集理论的发展,本文用模糊综合函数研究航迹关联问题。

2 状态估计向量间的模糊综合相似度

目标运动、测量模型和各传感器的 Kalman 滤波方程表示在文献 [11] 中。考虑两个局部节点的情况,设 $U_1 = \{1, 2, \dots, n_1\}$, $U_2 = \{1, 2, \dots, n_2\}$ 分别为局部节点 1 和 2 中的航迹号集合。为了讨论问题的方便,假设各传感器同步采样,送至融合中心的所有状态估计 $\hat{X}_i^1(k) (i \in U_1)$ 、 $\hat{X}_j^2(k) (j \in U_2)$ 已被变换到相同的坐标系,数据通讯的延迟时间为零,它们对应的估计误差协方差分别为 $P_i^1(k)$ 和 $P_j^2(k)$ 。于是, $\forall i \in U_1, \forall j \in U_2$ 航迹 i 与 j 的关系有两种可能:一种是它们对应于同一个目标,另一种是它们代表不同目标的编号。如果把来自局部节点 2 的航迹看成是 n_2 个已知模式,把局部节点 1 的航迹 $i (i \in U_1)$ 看成是待识别模式,那么航迹关联检验实际上就是一个典型的模式识别问题。可以设想,如果由航迹 $i (i \in U_1)$ 状态估计构成的向量与由航迹 $j (j \in U_2)$ 状态估计构成的向量最相似,那么就可以

¹ 1997-08-01 收到, 1998-03-09 定稿
国防科研基金资助课题

判决来自节点 1 的航迹 i 与节点 2 的航迹 j 为关联对。为此, 需要研究航迹 $i(i \in U_1)$ 与 $j(j \in U_2)$ 状态估计向量间的相似性测度。

航迹状态估计向量是随着时间演变的离散序列, 因此在进行模式匹配时, 需要在各时刻的向量间进行。为此定义 l 时刻两状态估计向量标称化差为

$$u_{ij}(l) = C_{ij}^{-1/2}(l)[\hat{X}_i^l(l) - \hat{X}_j^2(l)], \quad i \in U_1, \quad j \in U_2, \quad l = 1, 2, \dots, k. \quad (1)$$

这里 $C_{ij}(l) = P_i^1(l) + P_j^2(l)$, 即假定两节点对同一个目标的状态估计误差是独立的。

选择正态型隶属度函数, 于是航迹 i 和 j 在 l 时刻的相似度可定义为

$$d_{ij}(l) = \exp[-bu_{ij}(l)'u_{ij}(l)], \quad i \in U_1, \quad j \in U_2; \quad (2)$$

其中 $0 < b \leq 1$ 是待定常数。 $\forall i \in U_1, \forall j \in U_2$, 显然有 $0 \leq d_{ij}(l) \leq 1$ 。因为 $\forall i \in U_1, P_i^1(l) = P_i^1(l)', \forall j \in U_2, P_j^2(l) = P_j^2(l)'$; 所以 (2) 式可化成

$$d_{ij}(l) = \exp\{-b[\hat{X}_i^1(l) - \hat{X}_j^2(l)]'[P_i^1(l) + P_j^2(l)]^{-1}[\hat{X}_i^1(l) - \hat{X}_j^2(l)]\}. \quad (3)$$

当 $\forall l \in \{1, 2, \dots, k\}$ 求得 $d_{ij}(l)$ 之后, 便形成了航迹 i 与 j 之间的相似性向量, 记 $M_{ij}(k)$ 为

$$M_{ij}(k) = (d_{ij}(1), d_{ij}(2), \dots, d_{ij}(k))', \quad i \in U_1, \quad j \in U_2. \quad (4)$$

这里 $M_{ij}(k) \in [0, 1]^k$ 。

在 $[0, 1]^k$ 中引入偏序 “ \leq ”, 即 $\forall j, p \in U_2$, 若 $\forall M_{ij}(k), M_{ip}(k) \in [0, 1]^k$, 恒有

$$M_{ij}(k) \leq M_{ip}(k) \Leftrightarrow d_{ij}(l) \leq d_{ip}(l), \quad l = 1, 2, \dots, k, \quad i \in U_1 \quad (5)$$

成立。显然 $([0, 1]^k, \leq)$, 是一个完全分配格。

由文献 [12] 可知, 一个映射 $S_k: [0, 1]^k \rightarrow [0, 1]$, 如果满足以下两个条件:

(1) 保序性, 即 $\forall M_{ij}(k), M_{ip}(k) \in [0, 1]^k$, 有

$$M_{ij}(k) \leq M_{ip}(k) \Rightarrow S_k(M_{ij}(k)) \leq S_k(M_{ip}(k)). \quad (5)$$

(2) 综合性, 即 $\forall M_{ij}(k) \in [0, 1]^k$, 有

$$\bigwedge_{l=1}^k d_{ij}(l) \leq S_k(M_{ij}(k)) \leq \bigvee_{l=1}^k d_{ij}(l), \quad (7)$$

则称为模糊综合函数。例如下列 S_k 都是综合函数:

$$S_k(M_{ij}(k)) = \left(\frac{1}{k} \sum_{l=1}^k d_{ij}^q(l)\right)^{\frac{1}{q}}, \quad q > 0, \quad i \in U_1, j \in U_2; \quad (8)$$

$$S_k(M_{ij}(k)) = \left(\prod_{l=1}^k d_{ij}(l)\right)^{\frac{1}{k}}, \quad i \in U_1, \quad j \in U_2; \quad (9)$$

$$S_k(M_{ij}(k)) = \frac{1}{2}[\bigwedge_{l=1}^k d_{ij}(l) + \bigvee_{l=1}^k d_{ij}(l)], \quad i \in U_1, \quad j \in U_2. \quad (10)$$

在引入模糊综合函数的概念之后, 便可定义航迹 i 、 j 到 k 时刻的综合相似度为

$$\mu_{ij}(k) \stackrel{\text{def}}{=} S_k(M_{ij}(k)) = S_k((d_{ij}(1), d_{ij}(2), \dots, d_{ij}(k))'), \quad i \in U_1, j \in U_2. \quad (11)$$

这样 $\mu_{ij}(k)$ 便是综合了 $d_{ij}(1), d_{ij}(2), \dots, d_{ij}(k)$ 后, 得到的融合结果, 它兼有保序性和综合性的特点, 并且也反映了时空融合过程。

3 模糊综合航迹关联准则

为了研究两航迹在不同时刻的综合相似度, 下面给出 (8) ~ (10) 式描述的三种典型模糊综合函数的递推式。

结论 1 当 $k = 0, 1, 2, \dots, N$ 时, 模糊综合函数 (8) 式的递推式为

$$S_{k+1}(M_{ij}(k+1)) = \left[\frac{1}{k+1} (kS_k^q(M_{ij}(k)) + d_{ij}^q(k+1)) \right]^{1/q}, \quad i \in U_1, j \in U_2; \quad (12)$$

证明 由 (8) 式有

$$S_{k+1}^q(M_{ij}(k+1)) = \frac{1}{k+1} \sum_{l=1}^{k+1} d_{ij}^q(l) = \frac{1}{k+1} \left[\sum_{l=1}^k d_{ij}^q(l) + d_{ij}^q(k+1) \right]. \quad (13)$$

再由 (8) 式得

$$S_k^q(M_{ij}(k)) = \frac{1}{k} \sum_{l=1}^k d_{ij}^q(l). \quad (14)$$

于是把 (14) 式代入 (13) 式并开 q 次方便得 (12) 式。

结论 2 当 $k = 0, 1, 2, \dots, N$ 时, 模糊综合函数 (9) 式的递推式为

$$S_{k+1}(M_{ij}(k+1)) = [S_k^k(M_{ij}(k)) \cdot d_{ij}(k+1)]^{1/(k+1)}, \quad i \in U_1, j \in U_2; \quad (15)$$

证明 由 (9) 式有

$$S_{k+1}(M_{ij}(k+1)) = \left[\prod_{l=1}^{k+1} d_{ij}(l) \right]^{1/(k+1)} = \left[\prod_{l=1}^k d_{ij}(l) d_{ij}(k+1) \right]^{1/(k+1)} \quad (16)$$

再由 (9) 式得

$$S_k^k(M_{ij}(k)) = \prod_{l=1}^k d_{ij}(l). \quad (17)$$

把 (17) 式代入 (16) 式便得 (15) 式。

结论 3 当 $k = 0, 1, 2, \dots, N$ 时, 模糊综合函数 (10) 式的递推式为

$$S_{k+1}(M_{ij}(k+1)) = \frac{1}{2} [S_{\text{sup}}(k) \vee d_{ij}(k+1) + S_{\text{inf}}(k) \wedge d_{ij}(k+1)], \quad i \in U_1, j \in U_2; \quad (18)$$

其中

$$S_{\sup}(k) = S_{\sup}(M_{ij}(k)) = \bigvee_{l=1}^k d_{ij}(l), \quad S_{\inf}(k) = S_{\inf}(M_{ij}(k)) = \bigwedge_{l=1}^k d_{ij}(l). \quad (19)$$

证明 由 (17) 式有

$$\begin{aligned} S_{k+1}(M_{ij}(k+1)) &= \frac{1}{2} [\bigvee_{l=1}^{k+1} d_{ij}(l) + \bigwedge_{l=1}^{k+1} d_{ij}(l)] \\ &= \frac{1}{2} [\bigvee_{l=1}^k d_{ij}(l) \vee d_{ij}(k+1) + \bigwedge_{l=1}^k d_{ij}(l) \wedge d_{ij}(k+1)]. \end{aligned} \quad (20)$$

把 (19) 式代入 (20) 式便得 (18) 式。

当用模糊综合函数计算完两航迹间在不同时刻的综合相似度之后, 下一步就是如何根据综合相似度判决两航迹间的相似性。为了给出航迹 $i(i \in U_1)$ 与航迹 $j(j \in U_2)$ 间的相似性判决, 需要去模糊, 其准则是基于最大综合相似度和阈值判别原则。令

$$\mu_{ij^*}(k) = \max_{j \in U_2} S_k(M_{ij}(k)), \quad i \in U_1, \quad (21)$$

如果

$$\mu_{ij^*}(k) > \varepsilon, \quad (22)$$

则判决航迹 i 与 j^* 在 k 时刻关联, 并且 j^* 在 k 时刻不再与其它航迹关联; 否则 i 与 j^* 为不关联航迹, 并且此时 i 为漏关联航迹。这里 ε 是阈值参数, 且 $0.5 \leq \varepsilon \leq 1$ 。

为了控制航迹关联检验的完结和终止, 现引入航迹关联质量 $m_{ij^*}(k)$ 。如果在 k 时刻依据 (22) 式判决航迹 $i(i \in U_1)$ 与 $j^*(j^* \in U_2)$ 为关联对, 则

$$m_{ij^*}(k) = m_{ij^*}(k-1) + 1, \quad (23)$$

否则

$$m_{ij^*}(k) = m_{ij^*}(k-1) - 1, \quad (24)$$

这里 $m_{ij^*}(0) = 0$, $m_{ij^*}(k) \geq 0$ 。如果 $m_{ij^*}(k) \geq 6$, 则规定航迹 i 、 j^* 为固定关联对, 并且在后续的检验中, 它们不再接受关联检验, 直接进入航迹合成阶段。也就是说从 k 时刻起航迹 i 、 j^* 的对应关系不再变化, 除非它们中有一个被撤消或离开公共区为止。

4 仿真分析

仿真考虑两种情况: 情况 1 模拟中等密度的目标环境, 开始进入公共区的目标为 60 批; 情况 2 模拟密集目标环境, 开始进入公共区的目标为 120 批。仿真模型与文献 [12] 相同, 参数 ε 取 0.6, 对情况 1, b 取 0.03, 对情况 2, b 取 0.035。关联效果度量考虑正确关联率 E_c , 错关联率 E_e 和漏关联率 E_s , 且 $E_s = 1 - E_c - E_e$ 。在随机数种子选为 18 的情况下, 图 1,2 和图 3,4 分别给出了情况 1 和 2 仿真 50 次后加权法、修正法和模糊综合法的正确和错关联率曲线。结果表明: 模糊综合法与加权和修正法相比从第一次关联检验开始就获得了明显的改善, 特别是密集目标环境下, 模糊综合法的正确关联率比加权和修正法提高了 40%。模糊法对包含有较大导航、传感器校准、转换和延迟误差的系统也具有较好的适应性, 与传统方法相比其计算和存贮量都没有明显增加。

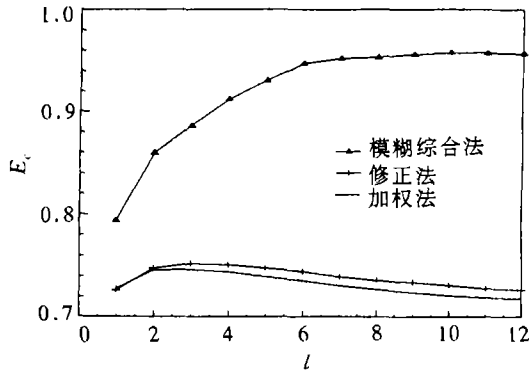


图 1 正确关联率曲线 (情况 1)

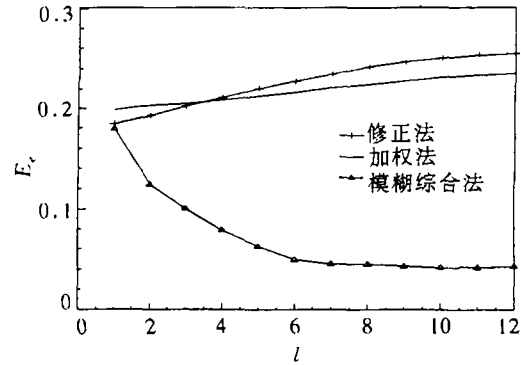


图 2 错关联率曲线 (情况 1)

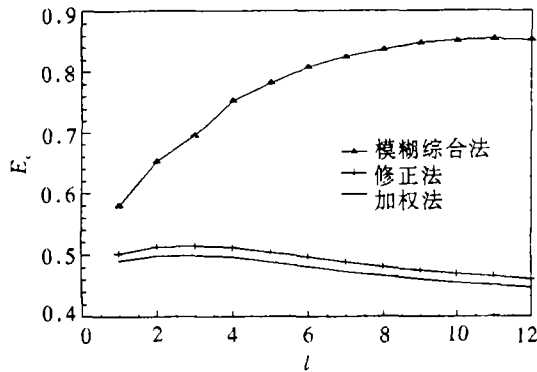


图 3 正确关联率曲线 (情况 2)

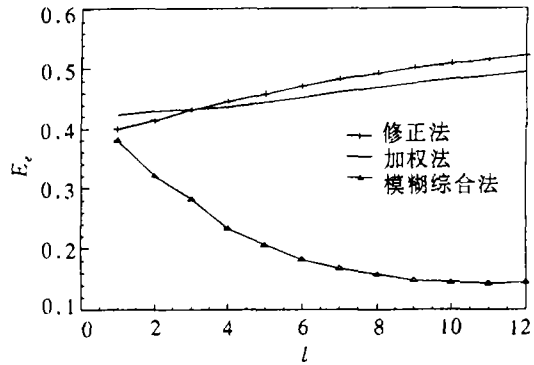


图 4 错关联率曲线 (情况 2)

5 结 论

本文运用现代数学中的综合分析法,提出了模糊综合航迹关联算法。文中详细讨论了状态估计向量间模糊综合相似度的计算和评价方法,导出了三种典型模糊综合函数的递推式,研究了模糊综合航迹关联准则,并通过仿真验证了算法的正确和有效性。仿真结果表明,模糊综合法与加权法和修正法相比其关联效果获得了明显改善,特别是在密集目标环境下和/或交叉、分岔和机动航迹较多的场合,其正确关联率改善了大约 40%。由于采用了具有递推结构的模糊综合函数,使算法的处理速度和存贮量与传统方法相比没有明显增加,这就进一步增加了模糊综合法的优势。它的另一个优点是对包含较大导航、传感器校准、转换与延迟误差的系统具有良好适应性。因而它是一种具有良好应用前景的方法。本文仅讨论了选用正态型隶属度函数和(8)式的模糊综合函数的性能,对选择哥西型、居中型隶属度函数及其它两种模糊综合函数的性能则是未来的研究课题。另外,当把(3)式中的统计距离换成文献[13]中描述的含有互协方差的统计量时,将形成相关模糊综合航迹关联算法,其性能分析也是有待于进一步研究的问题。

参 考 文 献

- [1] Bar-Shalom Y. Multisensor Tracking: Advanced Application, New York: Artech House, 1990, (1): 187-195.

- [2] 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, 9-13.
- [3] 何友, 谭庆海. 多传感器系统分类研究. 火力与指挥控制, 1988.13(2): 1-10.
- [4] 何友, 彭应宁, 陆大铨. 多传感器数据融合模型评述. 清华大学学报, 1996, 36(9): 14-20.
- [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] Ditzler W R. A demonstration of multisensor tracking. In Proceedings of the 1987 Tri-Service Data Fusion Symposium. USA: June 1987, 303-311.
- [7] Bar-Shalom Y. Tracking and Data Association. New York: Academic Press, 1988, 266-272.
- [8] Gul E. On the track similarity test in track splitting algorithm. IEEE Trans. on AES, 1994, 30(2): 604-606.
- [9] 何友, 谭庆海, 蒋蓉蓉. 多传感器综合系统中的航迹相关算法. 火力与指挥控制, 1989,14(1): 1-12.
- [10] Kenefic R J. Local and remote track file registration using minimum description length. IEEE Trans. on AES, 1993, 29(3): 651-655.
- [11] 何友, 彭应宁, 陆大铨, 高志永. 分布式多传感器数据融合中的双门限航迹相关算法. 电子科学学刊, 1997, 19(6): 721-728.
- [12] 李洪兴, 汪培庄. 模糊数学. 北京: 国防工业出版社, 1994, 54-87.
- [13] 何友, 彭应宁, 陆大铨, 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): 10-14.

TRACK CORRELATION ALGORITHMS BASED ON FUZZY SYNTHETIC FUNCTION

He You Liu Dajin* Peng Yingning* Wang Guohong

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

*(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing100084)

Abstract This paper presents fuzzy synthetic track correlation algorithms by using the synthetic analysis method in modern mathematics. In this paper, the computation and evaluation methods of the fuzzy synthetic measure of similarity between two state estimation vectors are discussed in detail, the recursive forms of three typical fuzzy synthetic functions are derived, the fuzzy synthetic track correlation criterion is described as well. Moreover, the algorithm is compared with two classical methods through simulation. The simulation results show that the performance of the fuzzy synthetic track correlation algorithm is much better than that of the classical methods in dense multitarget environments, more cross, split and maneuvering track situations. Under above situations, its correct correlation rate is improved about 40 percent over that of the classical methods.

Key words Data fusion, Track correlation, Multitarget, Multisensor, Radar network

何友: 男, 1956年生, 教授, 博士, 中国电子学会高级会员、雷达系统技术专业委员会委员, 《火力与指挥控制》、《水面兵器》杂志编委, 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.

陆大铨: 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, 教育工委副主任, 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.

王国宏: 男, 1963年生, 副教授, 博士生, 主要研究领域有: 信息融合、模式识别和雷达对抗等.