

基于直觉模糊的双门限航迹关联算法

杨博帆¹, 李延磊², 岳韶华¹

(1.空军工程大学防空反导学院,陕西西安,710051;2.空军工程大学科研部,陕西西安,710051)

摘要 为解决在密集目标环境和出现交叉航迹的情况下,航迹的统计关联方法关联正确概率降低,不能准确地对目标航迹进行正确相关的问题,根据传统的模糊双门限航迹关联方法,将非隶属度函数引入其中,提出了一种基于直觉模糊的双门限航迹关联算法。根据关联特点,确立了隶属度函数和非隶属度函数;利用蒙特卡洛仿真,对2部雷达观测的存在交叉的航迹进行关联,并与传统的模糊双门限航迹关联算法进行了对比,结果表明:在密集航迹情况下,该算法相比传统的模糊双门限航迹关联算法正确关联概率从45.1%提高至49.8%,该改进算法能够更好地适应密集航迹的关联。

关键词 直觉模糊;双门限;航迹关联;蒙特卡洛仿真

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.05.007

中图分类号 TP274 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)05-0030-04

A Track Association Algorithm on Intuitionistic Fuzzy Bi-threshold

YANG Bo-fan¹, LI Yan-lei², YUE Shao-hua¹

(1. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;
2. Scientific Research Department, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: In order to solve the low right track association probability of statistical association method under condition of dense target and cross track which fails to right associate to the target accurately, this paper proposes a track association algorithm on intuitionistic fuzzy bi-threshold based on traditional track association using fuzzy bi-threshold through introduction of non-membership functions, and determines membership functions and non-membership functions in line with association peculiarity. Finally, the paper associates the crossing tracks observed by two radars by utilizing Monte-Carlo simulation, and compares the fuzzy bi-threshold algorithm with the traditional track association algorithm. The results show that the correct association probability is improved from 45.1% to 49.8%, and this indicates that the algorithm is better in adapting to the association of intensive track.

Key words: intuitionistic fuzzy; bi-threshold; track association; Monte-Carlo simulation

在军事领域中,为保证对战场态势的较好把握,器间信息的交互及融合显得尤为重要,而融合在进行航迹融合之前,必须首先进行航迹的关联。目标

收稿日期:2013-10-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61102109)

作者简介:杨博帆(1990-),男,陕西汉中,硕士生,主要从事信息融合与目标跟踪研究。E-mail: yangbofan508@hotmail.com

引用格式: 杨博帆,李延磊,岳韶华. 直觉模糊的双门限航迹关联算法[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(5):30-33. YANG Bofan, LI Yanlei, YUE Shaohua. A track association algorithm on intuitionistic fuzzy bi-threshold[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(5): 30-33.

航迹关联是跟踪融合中最关键和最困难的部分。航迹关联就是判定不同传感器获得的目标航迹是否源于同一目标,从而对源于同一目标的航迹进行融合,目的是提高数据的精度,同时减少冗余数据。

目前关于航迹关联的方法主要有统计航迹关联和模糊航迹关联。统计航迹关联的方法有加权法、独立序贯法、双门限法、最近邻法和联合概率数据关联等^[1]。对于复杂背景下密集多目标的航迹关联,统计航迹关联方法的性能都不尽人意^[2]。为了能很好解决上述航迹关联问题,有学者提出了利用模糊理论来处理航迹关联中的不确定性,模糊关联方法是通过隶属度函数来表示 2 条航迹属于同一目标源的程度,它是统计航迹关联算法的扩展,可以更好地应用于观测误差较大、目标比较密集的情况。然而,在实际中,有些问题并非传统模糊理论表示的“亦此亦彼”的概念,而是存在“非此非彼”的中立情况^[3],例如不同传感器所得到航迹即有可能以一定的概率源于同一目标,即关联,也有可能以一定的概率不源于同一目标,即不关联,还有一定的概率无法判断是否源于同一目标,即中立。本文基于信号检测中的双门限准则,通过引入直觉模糊的概念,通过模糊隶属度函数与非隶属度函数描述 2 航迹源于同一目标的程度、不源于同一目标的程度和难以判断的中立程度,对传统的模糊关联算法进行了改进。

1 目标的状态方程和观测方程

设目标的状态方程为:

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{\Phi}(k)\mathbf{X}(k) + \mathbf{G}(k)\mathbf{W}(k) \quad (1)$$

观测方程为:

$$\mathbf{Z}(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{X}(k) + \mathbf{N}(k) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{X}(k)$ 为 n 维目标状态向量; $\mathbf{Z}(k)$ 为 m 维量测向量;状态噪声 $\mathbf{w}(k)$ 和量测噪声 $\mathbf{N}(k)$ 为互不相关的高斯白噪声序列,其统计特性分别为:

$$E[\mathbf{w}(k)] = 0, E[\mathbf{w}(k)\mathbf{w}^T(j)] = \mathbf{Q}(k)\delta_{kj} \quad (3)$$

$$E[\mathbf{N}(k)] = 0, E[\mathbf{N}(k)\mathbf{N}^T(j)] = \mathbf{R}(k)\delta_{kj} \quad (4)$$

2 模糊隶属度函数与非隶属度函数

设模糊因素集为 $\mathbf{U} = \{u_1, u_2, \dots, u_k, \dots, u_n\}$, 其中 u_k 为影响判决的第 k 个模糊因素。模糊因素包括目标位置、航速、航向之间的欧氏距离,也可以为目标 X 、 Y 、 Z 轴方向上的位置、速度和加速度之间的欧氏距离等;对于因素集的权值分配为 U 上的模糊集 $\mathbf{A} = \{a_1, a_2, \dots, a_k, \dots, a_n\}$, 其中 a_k 为对应于 u_k 上的权值,一般规定:

$$\sum_{k=1}^n a_k = 1 \quad (5)$$

根据航迹关联特点,影响关联正确与否的因素通常可假设为高斯白噪声,故选取正态型隶属度函数描述模糊因素 u_k 为:

$$\mu_k = \mu(u_k) = \exp(-\tau_{k,1}(u_k^2/\sigma_{k,1}^2)) \quad (6)$$

式中: $\sigma_{k,1}^2$ 为对应模糊集 \mathbf{A} 中第 k 个因素的展度; $\tau_{k,1}$ 为调整度,其值可以通过仿真确定^[2]。

设模糊因素 u_k 的非隶属度函数为:

$$\lambda_k = \lambda(u_k) = 1 - \exp(-\tau_{k,2}(u_k^2/\sigma_{k,2}^2)) \quad (7)$$

且:

$$\mu_k + \lambda_k \leq 1 \quad (8)$$

直觉指数为:

$$\pi_k = 1 - \mu_k - \lambda_k \quad (9)$$

π_k 在 $[0, 1]$ 上,先增大,后减小,即中立程度先增大,后减小。可以解释为对于某一时刻,2 部传感器所获得的 2 点如果很接近,即 u_k 接近于 0,则 2 点源于同一目标的可能性大,为不同目标的可能性小,不确定性很小;当 2 点距离很远时,即 u_k 很大时,可以认为 2 点源于同一目标的可能性很小,为不同目标的可能性很大,不确定性也很小;当 2 点距离较近时,该 2 点源于同一目标或不同目标的可能性均不太大,反而“非此非彼”的中立性较大,即不确定性大。

3 航迹直觉模糊关联

3.1 综合相似度与综合不相似度

通过对 2 条航迹在 l 时刻所构建的隶属度函数与非隶属度函数,可得 l 时刻航迹 i, j 的综合相似度为:

$$f_{ij}(l) = \sum_{k=1}^n a_k(l)\mu_k; i \in U_1, j \in U_2 \quad (10)$$

航迹 i, j 的综合不相似度为:

$$g_{ij}(l) = \sum_{k=1}^n a_k(l)\lambda_k; i \in U_1, j \in U_2 \quad (11)$$

从而,传感器 1 测得的 n_1 条航迹和传感器 2 测得的 n_2 条航迹构成 l 时刻的模糊关联矩阵:

$$\tilde{\mathbf{F}}(l) = \begin{bmatrix} f_{11}(l) & \cdots & f_{1n_2}(l) \\ \vdots & & \vdots \\ f_{n_11}(l) & \cdots & f_{n_1n_2}(l) \end{bmatrix} \quad (12)$$

以及模糊不关联矩阵:

$$\tilde{\mathbf{G}}(l) = \begin{bmatrix} g_{11}(l) & \cdots & g_{1n_2}(l) \\ \vdots & & \vdots \\ g_{n_11}(l) & \cdots & g_{n_1n_2}(l) \end{bmatrix} \quad (13)$$

3.2 关联过程

首先,在矩阵 $\tilde{F}(l)$ 中找出最大元素 $f_{ij}(l)$, 如果 $f_{ij}(l) > \epsilon$ 且对应的 $g_{ij}(l) < \eta$ (ϵ 和 η 是判决门限), 则判定在 l 时刻航迹 i 与 j 试验关联; 然后从矩阵 $\tilde{F}(l)$ 划去 i 与 j 所对应的行、列元素, 得到新的降阶模糊关联矩阵 $\tilde{F}_1(l)$ 和模糊不关联矩阵 $\tilde{G}_1(l)$, 但原矩阵的行、列号(航迹号)不变。再对 $\tilde{F}_1(l)$ 和 $\tilde{G}_1(l)$ 重复上述过程, 直至 $F_*(l)$ 中的所有元素均小于 ϵ 或 $F_*(l)$ 中大于 ϵ 的元素在 $\tilde{G}_*(l)$ 中所对应的元素大于 η 为止。剩下的元素所对应的行、列号在 l 时刻为不关联航迹, 其输出形式要根据整个航迹历史确定^[2]。

一般地, 根据经验, ϵ, η 取值为:

$$0.5 \leq \epsilon \leq 1, 0 \leq \eta \leq 0.5 \quad (14)$$

基于信号检测中的双门限准则, 取 2 个正整数 I 和 $R, \forall l=1, 2, \dots, R$, 在上述过程中, 如果试验关联成功, 则:

$$m_{ij}(l) = m_{ij}(l-1) + 1, (m_{ij}(0) = 0) \quad (15)$$

且:

$$D_{ij'}(l) = D_{ij'}(l-1) + 1, (j \neq j') \quad (16)$$

$$D_{i'j}(l) = D_{i'j}(l-1) + 1, (i \neq i') \quad (17)$$

否则, 置 $F_*(l)$ 和 $G_*(l)$ 所有元素对应 $D_j(e)$ 为:

$$D_{ij}(l) = D_{ij}(l-1) + 1, (D_{ij}(0) = 0) \quad (18)$$

式中 $m_{ij}(l)$ 和 $D_{ij}(l)$ 分别为航迹关联和脱离质量。在 R 次关联检验完成后, 若有:

$$m_{ij}(R) \geq I; i \in U_1, j \in U_2 \quad (19)$$

则判决航迹 i 与 j 为固定关联对, 并在后续判决中停止对它们间的关联检验, 即关联赋值进入了固定期。若对于 $\exists i' \in U_1$, 对于任意与它可能试验关联的 $j' (j' \in U_2)$, 都存在 $m_{i'j'}(R) \leq I$, 则 i', j' 不能成为固定关联对, 需要进入下一个周期的试验关联检验。

4 仿真分析

设有目标 1 至目标 4 分别为在平面内做匀速直线运动的 4 个目标, 其中, 目标 1 的初始位置为 (40, 35) m, 速度为 (5, 0) m/s; 目标 2 的初始位置为 (40, 43) m, 速度为 (5, -0.2) m/s; 目标 3 的初始位置为 (40, 27) m, 速度为 (5, 0.2) m/s; 目标 2 的初始位置为 (60, 5) m, 速度为 (1, 1) m/s, 其中, 目标 1、目标 2 和目标 3 为相邻目标。在 (0, 0) m 处和 (-100, -100) m 处分别有 2 部传感器对上述 4 个目标进行观测, 设观测噪声和方差分别为 (0, 9) 和 (0, 25)。设隶属度函数为 $\mu_k = \mu(u_k) = \exp(-\tau_{k,1}(u_k^2/\sigma_{k,1}^2))$, 其中 $\tau_{k,1} = 10, \sigma_{k,1} = 10$, 非

隶属度函数为 $\lambda_k = \lambda(u_k) = 1 - \exp(-\tau_{k,2}(u_k^2/\sigma_{k,2}^2))$, 其中 $\tau_{k,1} = 5, \sigma_{k,1} = 30$ 。门限 $\epsilon = 0.7, \eta = 0.2$, 判决次数 $R = 15$, 门限 $I = 10$ 。4 个目标的航迹见图 1。

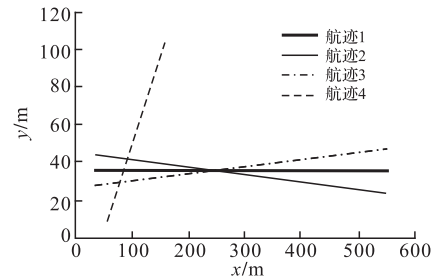


图 1 目标运动航迹

Fig.1 Targetsmotion tracks

进行 1 000 次蒙特卡洛仿真, 得到 2 部雷达所测航迹关联结果见表 1。

表 1 本文算法关联结果

Tab.1 Association result of the algorithm in this paper

雷达 2	雷达 1 测得			
测得	航迹 1	航迹 2	航迹 3	航迹 4
航迹 1	530	231	214	0
航迹 2	233	685	45	0
航迹 3	217	42	698	2
航迹 4	0	0	0	997

对相同数据采用传统的模糊双门限航迹关联算法结果见表 2。

表 2 对比算法关联结果

Tab.2 Association result of the comparing algorithm

雷达 2	雷达 1 测得			
测得	航迹 1	航迹 2	航迹 3	航迹 4
航迹 1	491	268	198	0
航迹 2	257	637	38	0
航迹 3	216	48	691	1
航迹 4	0	0	2	991

结论: 从以上试验数据可以看出, 2 种方法的全局正确关联的概率分别为 49.8% 和 45.1%。在 1 000 实验中, 用本文提出的方法比传统的模糊双门限算法对于 4 个目标正确关联的次数分别提高了 39 次, 48 次, 7 次和 6 次, 全局正确关联的概率提高了 4.7%。由于目标 1、目标 2、目标 3 是空间上相邻的目标, 由此可见, 本文提出的航迹关联算法相比传统的模糊双门限航迹关联算法对相邻航迹能够更好地进行区分。

5 结语

在多传感器信息融合过程中, 航迹关联是航迹融合的重要前提, 关联的正确与否直接影响着航迹

融合的结果。本文提出的航迹关联算法,利用直觉模糊集,使航迹关联在双门限的基础上,多了一次门限判决,避免了单纯利用模糊函数时门限定额不合理造成的误关联或漏关联。本文仿真中对2部雷达获得的航迹进行的关联,亦可以推广至3部及以上雷达的航迹关联中。

参考文献 (References):

- [1] Barshalom Y, William Dale Blair. Multitarget-multi-sensor tracking applications and advances [M]. London: Artech house, 2000.
- [2] 何友, 王国宏, 陆大经, 等. 多传感器信息融合及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
HE You, WANG Guohong, LU Dajin, et al. Multi-sensor information fusion with application[M]. Beijing: Publishing house of electronics industry, 2007. (in Chinese)
- [3] 雷英杰. 基于直觉模糊推理的态势与威胁评估研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005.
LEI Yingjie. Research on situation and threat assessment based on intuitionistic fuzzy reasoning [D]. Xi'an: Xidian university, 2005. (in Chinese)
- [4] 毛艺帆, 王睿, 张金成. 基于空天信息的异类传感器模糊航迹关联算法[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2012, 13(5): 35-39. (in Chinese)
MAO Yifan, WANG Rui, ZHANG Jincheng. Heterogeneous sensors fuzzy track association algorithm based on aerospace information [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2012, 13(5): 35-39. (in Chinese)
- [5] 王睿, 雷英杰, 贺正洪. 基于 CIFNS 的预警机系统目标威胁估计[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2010, 11(2): 33-37.
WANG Rui, LEI Yingjie, HE Zhenghong. Research on the threat assessment base on CIFNS model in ELC plane's command and control system [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2010, 11(2): 33-37. (in Chinese)
- [6] 杨万海. 多传感器数据融合及其应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
YANG Wanhai. Multisensor data fusion with application [M]. Xi'an: Publishing house of xidian university, 2004. (in Chinese)
- [7] 陈昌质, 阮怀林. 组网雷达系统中的一种模糊航迹关联方法[J]. 舰船电子对抗, 2008, 31(2): 46-48.
CHEN Changzhi, RUAN Huailin. A fuzzy trace correlation method in netted radar system [J]. Shipboard electronic countermeasure, 2008, 31(2): 46-48. (in Chinese)
- [8] 郭徽东, 章新华. 基于模糊综合函数的航迹关联算法及其应用[J]. 系统工程及电子技术, 2003, 25(11): 1401-1403.
GUO Huidong, ZHANG Xinhua. A track-to-track association algorithm based on fuzzy synthetical function and its application [J]. System engineering and electronics, 2003, 25(11): 1401-1403. (in Chinese)
- [9] 王耀南. 智能信息处理技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
WANG Yaonan. Intelligent information processing technology [M]. Beijing: Higher education press, 2003. (in Chinese)

(编辑: 田新华)