

文章编号: 1672-2892(2010)05-0550-05

## 基于 D-S 证据理论的无源航迹关联算法

颜坤玉<sup>1,2</sup>, 王杰贵<sup>1</sup>, 白日辉<sup>3</sup>

(1.电子工程学院, 安徽 合肥 230037; 2.安徽省电子制约技术重点实验室, 安徽 合肥 230037; 3.96602 部队, 北京 102488)

**摘要:** 目前分布式无源多目标跟踪系统的航迹关联算法基本照搬多传感器数据融合的理论, 仅利用目标的状态信息。文中利用了目标的多特征信息(载频、脉宽、脉冲重复间隔(PRI)等), 应用 Dempster-Shafer(D-S)证据理论, 提出了一种基于分布式无源多目标跟踪系统的多特征信息融合航迹关联算法。算法具有以下优点: 关联速度快, 正确率高, 而且能够适应密集目标的环境。仿真实验证明该算法的航迹关联效果明显优于加权航迹关联算法。

**关键词:** 无源跟踪; 航迹关联; 信息融合

**中图分类号:** TN919.5

**文献标识码:** A

## Track association algorithm with multi-feature based on distributed multi-target passive tracking system

YAN Kun-yu<sup>1,2</sup>, WANG Jie-gui<sup>1</sup>, BAI Ri-hui<sup>3</sup>

(1.Electronic Engineering Institute, Hefei Anhui 230037, China; 2.Anhui Electronic Restricting Technique Key Laboratory, Hefei Anhui 230037, China; 3.Unit 96602 of PLA, Beijing 102488, China)

**Abstract:** Present track association algorithms in distributed multi-target passive tracking system always adopt theory in multi-sensor information fusion, in other words, only state informations of targets are concerned. A new track association algorithm is proposed based on information fusion of multi-feature such as frequency pulse-width and Pulse Repetition Interval(PRI) in distributed multi-target passive tracking system by applying Dempster-Shafer(D-S) evidence theory. The algorithm is of such advantages like faster association speed, higher correctness probability and it can be adapted to circumstance of dense targets due to the use of multi-feature information. The simulation proves that the proposed algorithm is superior to weighted track association.

**Key words:** passive tracking; track association; information fusion

分布式无源多目标跟踪系统的一个重要问题,是如何判断来自于不同局部结点的两条航迹是否代表同一个目标,这就是航迹与航迹关联(或互联)问题,简称航迹关联或航迹相关问题。目前用于航迹关联的算法通常可分为2类<sup>[1-3]</sup>:一类是基于统计的方法,另一类是基于模糊数学的方法。这些方法都只利用了目标的运动状态信息。事实上,传感器不只是获取这些信息,它还可以获得更多的有关目标的其他特征数据(如载频、脉宽、PRI等)。文献[4]利用了目标运动状态信息以外其他特征信息来解决无源多目标跟踪系统中的点迹与航迹关联的问题,获得了很好的关联效果。关于如何利用这些特征信息来提高分布式无源多目标跟踪系统的航迹关联性能,国内外的文献报道尚不多见。

在无源跟踪系统中,通常可以直接用于计算目标状态的量测数据,包括信号到达方向(Direction Of Arrival, DOA)、信号到达时间(Time Of Arrival, TOA)以及多普勒频率等,而无源定位系统可以获得的辐射源特征数据还包括:工作频率、脉宽、脉幅、脉内特征,甚至脉冲重复周期、天线扫描特性等。而在分布式无源多目标跟踪系统的航迹关联中这些信息总是被忽略了。这里提出一种基于多特征信息融合的航迹关联算法,该算法利用目标多个特征信息,应用D-S证据理论进行多特征信息融合,得到局部结点 $m$ 局部航迹估计 $\hat{Y}_m^m$ 与局部结点 $n$ 局部航迹估计 $\hat{Y}_n^n$ 的关联度。

## 1 问题的描述

假设局部结点  $m$  局部航迹特征估计矢量  $\hat{Y}_i^m$  由目标的位置(包括  $x,y,z$  坐标)、目标的速度(对应  $x,y$  和  $z$  方向的速度)、目标载频、脉宽、PRI 等  $c$  个特征参数构成。

假设送至融合中心的所有特征矢量估计  $\hat{Y}_i^m(m=1,2,\dots,M,i=1,2,\dots,n_i)$  都在相同的坐标系里,并且各传感器同步采样,这里  $M$  是局部结点数,  $n_i$  是结点  $m$  的航迹的个数。

对于特殊应用,可以定义需要的坐标变换和恰当的时间校正,另外,还假设数据的传输延迟时间为零。统一的坐标变换是容易实现的工作,时间延迟可以通过延迟修正和外推补偿,而采样与更新的不同步可通过平滑、插值及外推完成目标状态估计点的时间校准。为了进一步简化分析,这里假定  $M=2$ 。

设局部结点 1,2 的航迹号集合分别为:  $U_1 = \{1,2,\dots,n_1\}, U_2 = \{1,2,\dots,n_2\}$ , 把来自局部结点 1 的  $n_1$  条航迹看成是  $n_1$  个已知模式, 而把局部结点 2 的航迹  $j(j \in U_2)$  看成是待识别模式, 那么航迹关联问题实际上就是一个典型的模式识别问题。

## 2 基于 D-S 证据理论的多特征航迹关联

### 2.1 航迹关联度的计算

D-S 证据理论用识别框架  $\Theta$  表示感兴趣的命题集, 它定义  $\Theta$  上的基本可信度赋值函数(Basic Probability Assignment Function, BPAF)  $m:2^\Theta \rightarrow [0,1]$ , 满足:

$$\begin{cases} m(\Phi) = 0 \\ \sum_{A \subset \Theta} m(A) = 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中命题  $A$  为  $\Theta$  的非空子集, 称为焦元,  $m(A)$  反映了对  $A$  的可信度大小。

如果  $m_1, m_2, \dots, m_n$  是同一识别框架  $\Theta$  上由  $n$  个独立的证据源导出的 BPAF, 则利用下面的 Dempster 组合规则, 可以计算这  $n$  个证据共同作用下的 BPAF:

$$\begin{cases} m(\Phi) = 0 \\ m(A) = \frac{\sum_{\cap_{A_i=A} i=1}^n m_i(A_i)}{1 - \sum_{\cap_{A_i=\emptyset} i=1}^n m_i(A_i)} = \frac{\sum_{\cap_{A_i=A} i=1}^n m_i(A_i)}{\sum_{\cap_{A_i \neq \emptyset} i=1}^n m_i(A_i)} \end{cases} \quad (2)$$

类似于 D-S 证据理论的 BPAF, 笔者提出了航迹关联度的概念, 这里航迹关联度指的是依据某个特征信息判定, 把局部结点 2 的航迹  $j(j \in U_2)$  与局部结点 1 的航迹  $i(i \in U_1)$  关联的程度。基于证据理论的信息融合实质上是在同一识别框架下将不同的证据体合成一个新的证据体的过程。

在进行多特征信息融合的航迹关联度计算时, 航迹关联的正确性与各个特征信息权重的选择有直接关系。对目标状态估计、工作频率、脉宽和脉冲重复周期的权重分配要视具体情况而定, 分别以  $a_1, a_2, a_3, a_4$  表示它们满足归一化条件, 即  $a_1 + a_2 + a_3 + a_4 = 1$ 。

#### 1) 基于目标状态估计的航迹关联度

用  $\hat{X}_i^1(k)$  表示局部结点 1 第  $i$  条航迹在  $k$  时刻的状态估计,  $D_1^i(k), D_2^i(k), \dots, D_{n_2}^i(k)$  分别表示  $k$  时刻局部结点 2 的  $n_2$  个状态估计  $\hat{X}_j^2(k), (j \in U_2)$  与局部结点 1 第  $i$  条航迹在  $k$  时刻的状态估计  $\hat{X}_i^1(k)$  的统计距离:

$$D_j^i(k) = (\hat{X}_i^1(k) - \hat{X}_j^2(k))^T (P_i^1(k) + P_j^2(k))^{-1} (\hat{X}_i^1(k) - \hat{X}_j^2(k)) \quad (3)$$

式中:  $P_i^1(k), P_j^2(k)$  分别是局部结点 1,2 的第  $i, j$  条航迹在  $k$  时刻的状态估计误差协方差。

基于目标状态估计的航迹  $i, j$  关联度记为  $m_d^{i,j}$ , 则:

$$m_d^{i,j}(k) = a_1 \frac{\min(D_1^i, D_2^i, \dots, D_{n_2}^i)}{D_j^i}, (i=1,2,\dots,n_1, j=1,2,\dots,n_2) \quad (4)$$

式中  $D_j^i$  为  $D_j^i(k)$  的简写, 可以看出  $m_d^{i,j} \in [0, a_1]$ ,  $D_j^i$  越小,  $m_d^{i,j}$  越大, 表示航迹  $i, j$  的关联程度越高。

#### 2) 基于工作频率的航迹关联度

设  $k$  时刻送至融合中心的各航迹的工作频率为  $f_i^1(k), f_j^2(k)$ , 如果目标的频率类型为频率固定, 可定义目标工

作频率的航迹关联度  $m_f^{i,j}$  :

$$m_f^{i,j}(k) = \begin{cases} a_2, \Delta f \leq f_\varepsilon \\ a_2 \frac{(\Delta f - 2f_\varepsilon)^2}{f_\varepsilon^2}, f_\varepsilon < \Delta f \leq 2f_\varepsilon \\ 0, \Delta f \geq 2f_\varepsilon \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\Delta f = |f_i^1(k) - f_j^2(k)|$ ;  $f_\varepsilon$  是由定位系统 1,2 噪声与量测噪声所确定的频率容差。如果目标的频率类型为频率捷变(FA), 或者为频率分集(FD), 则  $m_f^{i,j}$  的定义方法可以参考文献[4]。

### 3) 基于脉宽(PW)的航迹关联度

基于脉宽的关联度记为  $m_{PW}^{i,j}(k)$ , 表示航迹间脉宽 PW 对航迹关联程度的影响,  $m_{PW}^{i,j}(k)$  的定义:

$$m_{PW}^{i,j}(k) = \begin{cases} a_3, \Delta t \leq t_\varepsilon \\ a_3 \frac{(\Delta t - 2t_\varepsilon)^2}{t_\varepsilon^2}, t_\varepsilon < \Delta t \leq 2t_\varepsilon \\ 0, \Delta t \geq 2t_\varepsilon \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\Delta t$  为脉宽的绝对差值;  $t_\varepsilon$  为由系统噪声与量测噪声所确定的脉宽容差。  $m_{PW}^{i,j}(k)$  越大, 表示航迹关联程度越高。

### 4) 基于脉冲重复周期(PRI)的航迹关联度

对不同脉冲重复周期类型的辐射源, PRI 航迹关联度  $m_{PRI}^{i,j}(k)$  定义是不同的。如果目标的 PRI 类型为重复周期固定, 其 PRI 中心值为  $T_r$ , 则局部结点 1 第  $i$  条航迹的 PRI 与局部结点 2 的第  $j$  条航迹 PRI 差值  $\Delta T_r = |T_{ri}^1(k) - T_{rj}^2(k)|$ , 此时, PRI 航迹关联度  $m_{PRI}^{i,j}(k)$  的定义如下:

$$m_{PRI}^{i,j}(k) = \begin{cases} a_4, \Delta T_{ri} \leq T_{r\varepsilon} \\ a_4 \frac{(\Delta T_r - 2T_{r\varepsilon})^2}{T_{r\varepsilon}^2}, T_{r\varepsilon} < \Delta T_r < 2T_{r\varepsilon} \\ 0, \Delta T_{ri} \geq 2T_{r\varepsilon} \end{cases} \quad (7)$$

式中  $T_{r\varepsilon}$  是由系统噪声与量测噪声所确定的脉冲重复周期容差。  $m_{PRI}^{i,j}(k)$  越大, 表示航迹关联程度越高。对于重复周期参差的目标, 其航迹关联度  $m_{PRI}^{i,j}(k)$  的定义可以参考文献[4]。

对于局部结点 2 的  $n_2$  条航迹  $j(j \in U_2)$ , 在计算出每个特征信息与局部结点 1 的第  $i$  条航迹的航迹关联度后, 可以用式(2)对各个特征信息进行信息融合得到  $m^{i,j}(k)$ 。

## 2.2 航迹关联准则

当计算出描述两航迹接近程度的航迹关联度之后, 下一步就是如何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, 将航迹关联度从大到小排序, 采用最大关联度识别原则。即若  $m_{j^*} = \max(m^{i,j}(k))$ , 且  $m_{j^*} > \varepsilon$ , 则  $k$  时刻航迹  $j^*(j^* \in U_2)$  与航迹  $i(i \in U_1)$  关联, 否则  $i(i \in U_1)$  不与任何航迹  $j(j \in U_2)$  关联。  $\varepsilon$  为阈值参数,  $0.5 \leq \varepsilon < 1$ , 可以通过仿真实验确定。

为了控制航迹关联检验的完结与终止, 可进一步引入航迹关联质量  $\Delta_{ij}(k)$ 。关联质量是关于航迹关联历史情况的度量, 其值的大小反映正确关联的可靠程度。若在  $k$  时刻判决航迹  $i(i \in U_1)$  与航迹  $j(j \in U_2)$  为关联对, 则

$$\Delta_{ij}(k) = \Delta_{ij}(k-1) + 1 \quad (8)$$

否则

$$\Delta_{ij}(k) = \Delta_{ij}(k-1) - 1 \quad (9)$$

式中  $\Delta_{ij}(0) = 0$ 。

如果在  $k$  时刻航迹  $i(i \in U_1)$  与航迹  $j(j \in U_2)$  第一次关联,  $\Delta_{ij}(k-1) = 0$ ,  $\Delta_{ij}(k) = 1$ , 为了减少计算量, 当  $\Delta_{ij}(k) \geq 6$  时, 可以规定航迹  $i(i \in U_1)$  与航迹  $j(j \in U_2)$  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。

### 3 仿真实验

利用 2 个三时差定位系统测量运动辐射源的二维坐标(文献[5-6]线性时差定位算法),各系统主站具有测频、测脉冲 PRI 以及测量脉宽的功能。其中系统 1:主站位于(100 km,0),测频均方根误差为 2 MHz,测脉宽均方根误差为 25 ns,测 PRI 均方根误差为 45 ns,基线长度为  $L_1=L_2=L_3=25$  km,各基线间夹角为  $120^\circ$  时差均方根误差为 30 ns;系统 2:主站 2 位于(-100 km,0),测频均方根误差为 3 MHz,测脉宽均方根误差为 30 ns,测 PRI 均方根误差为 50 ns,基线长度为  $L_1=L_2=L_3=30$  km,各基线间夹角为  $120^\circ$  时差均方根误差为 30 ns。模拟目标在二维平面上具有有意无意机动,具有在速度上的过程噪声,目标初始位置在两坐标轴上  $-100$  km~ $100$  km 内均匀分布,初始速度在  $100$  m/s~ $1000$  m/s 内均匀分布,初始航向在  $0\sim 2\pi$  均匀分布,模拟工作频率、PRI、脉宽固定的目标。

图 1 给出了在公共观测区 60 批目标的运动轨迹,图 2 和图 3 给出了分布式时差定位系统的局部结点 1 和局部结点 2 经扩展卡尔曼滤波后的航迹输出。

图 4 给出的是对图 1 所示的公共区域的目标航迹分别采用本文算法和航迹加权关联法(文献[2])进行蒙特卡罗仿真后的结果。表 1 给出了  $t=80$  s 时,本文算法的正确关联概率随目标数目变化情况。

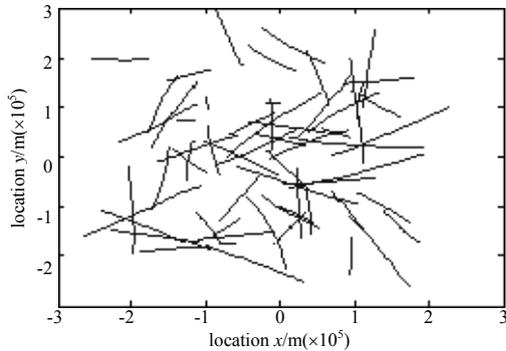


Fig.1 Movement track of 60 groups of targets  
图 1 60 批目标的运动轨迹

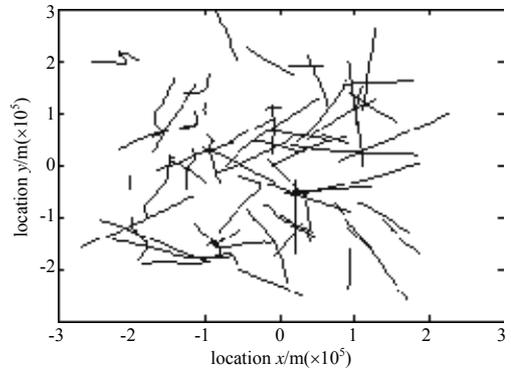


Fig.2 Track-out of local node 1  
图 2 局部结点 1 的输出航迹

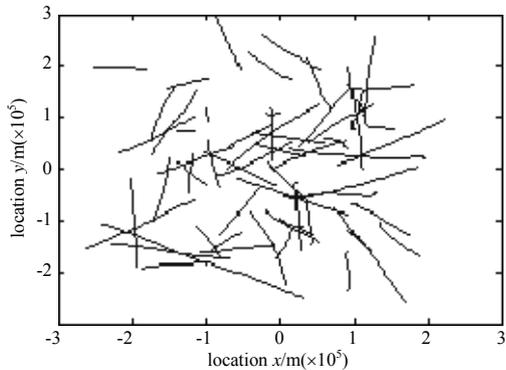


Fig.3 Track-out of local node 2  
图 3 局部结点 2 的输出航迹

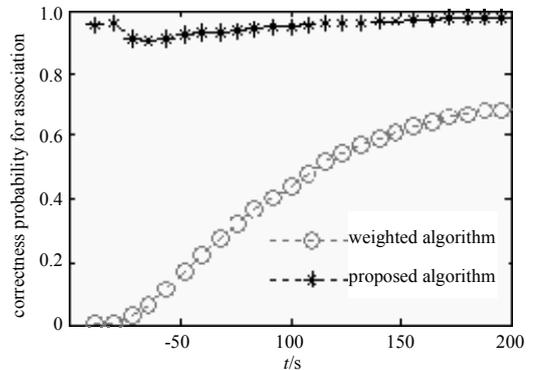


Fig.4 Comparison between the proposed algorithm and weighted algorithm  
图 4 本文算法与加权法比较

表 1 本文算法航迹关联正确概率随目标批数变化情况

Table1 Probability of correctness for track association vs. numbers of target groups

numbers of target groups	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
correctness probability for track association	0.998 0	0.986 0	0.985 3	0.979 5	0.969 6	0.968 3	0.960 3	0.954 0	0.945 1	0.942 8

由图 4 可以看出,本文算法提出的基于多特征信息融合的航迹关联算法与加权航迹关联法相比关联正确率明显提高。传统的加权航迹关联算法仅仅利用了目标的状态估计信息(目标的位置、速度等),而本文算法合理地利用了目标的多特征信息(载频、脉宽、PRI 等)。在航迹开始阶段,扩展卡尔曼滤波的跟踪准确度不高,从而仅利用目标的运动状态信息的加权航迹关联法正确关联概率较差。由于本文算法充分利用了目标的其他特征信息,在航迹的起始阶段该算法就获得了很高的航迹正确关联概率。表 1 表明本文算法的航迹关联性能随目标批数的增加下降不明显,在目标批数达到 100 时,航迹关联正确率为 0.942 8,符合实际应用的要求,说明本文算法能够适应密集目标环境。

## 4 结论

本文提出一种基于多特征信息融合的航迹关联算法,该算法利用目标的多个特征信息,应用D-S证据理论进行多特征信息融合得到局部航迹间的关联度。无源定位系统的定位准确度较低,导致其跟踪性能较差,本文算法充分考虑无源定位系统的特点,利用了目标状态信息以外的目标特征信息,使其航迹关联的正确率明显提高。与加权航迹关联算法相比,本文算法具有以下优点:关联速度快,正确率高,而且能够适应密集目标的环境。

### 参考文献:

- [1] Llinas J,Waltz E. Multisensor Data Fusion[M]. Norwood,Massachusetts:Artech House, 1990.
- [2] 何友,王国宏,彭应宁,等. 多传感器信息融合及应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2000. (HE You,WANG Guo-hong,PENG Ying-ning,et al. Multisensor Information Fusion With Applications[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2000.)
- [3] 衣晓,关欣,何友. 分布式跟踪系统的灰色航迹关联模型[J]. 信号处理, 2005,21(6):653-655. (YI Xiao,GUAN Xin,HE You. Gray Track Correlation Model for Distributed Multitarget Tracking System[J]. Signal Processing, 2005,21(6):653-655.)
- [4] 王杰贵,罗景青. 基于多目标多特征信息融合数据关联的无源跟踪方法[J]. 电子学报, 2004,32(6):1013-1016. (WANG Jie-gui,LUO Jing-qing. Passive Tracking Based on Data Association with Information Fusion of Multi-Feature and Multi-Target[J]. Acta Electronica Sinica, 2004,32(6):1013-1016.)
- [5] 王成,李少洪,王鑫全,等. 测试差被动算法的研究[J]. 系统工程与电子技术, 2001,23(11):9-12. (WANG Cheng,LI Shao-hong,WANG Xin-quan,et al. Research of Passive Location Algorithm Based on Time-Difference of Arrival[J]. System Engineering and Electronics, 2001,23(11):9-12.)
- [6] 陈玲,李少洪. 基于无源时差定位系统的机动目标跟踪算法[J]. 系统工程与电子技术, 2005,27(1):127-130. (CHEN Ling,LI Shao-hong. Algorithm of maneuvering target tracking with TDOA passive location system[J]. System Engineering and Electronics, 2005,27(1):127-130.)

### 作者简介:



颜坤玉(1984-),男,江苏高邮人,在读硕士研究生,主要研究方向为数据融合技术、定位理论与技术.email:yankunyu22@126.com.

王杰贵(1969-),男,安徽桐城人,博士,副教授,主要研究方向有电子对抗、信号与信息处理、数据融合技术、定位理论与技术、阵列信号处理等.

白日辉(1981-),男,辽宁庄河人,助理工程师,研究方向为雷达新技术研究.