

引用格式:杨军佳,时银水,王学青.基于区间数及DS证据理论的多传感器航迹关联方法[J].电光与控制,2019,26(5):64-67. YANG J J, SHI Y S, WANG X Q. A multi-sensor track association method based on interval number and DS evidence theory[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(5): 64-67.

## 基于区间数及DS证据理论的多传感器航迹关联方法

杨军佳, 时银水, 王学青  
(陆军炮兵防空兵学院郑州校区, 郑州 450000)

**摘要:**针对多传感器航迹关联问题,提出了一种基于区间数和DS(Dempster/Shافر)证据理论的解决方法。该方法通过分析误差对参数测量的影响,构建传感器探测目标参数真实值区间数,通过计算区间数之间的相对支持度,获取目标参数对于航迹相关的支持程度,基于DS证据理论将不同参数对航迹相关的支持程度进行合成,以此解决航迹关联问题。实例表明,该方法能够较好地解决多传感器航迹关联问题。

**关键词:**航迹关联; 区间数; DS证据理论; 多传感器

**中图分类号:** TN957      **文献标志码:** A      **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.05.012

## A Multi-sensor Track Association Method Based on Interval Number and DS Evidence Theory

YANG Jun-jia, SHI Yin-shui, WANG Xue-qing  
(Zhengzhou Campus, Army Academy of Artillery and Air Defense, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** A method for multi-sensor track association based on interval number and DS evidence theory is presented. Through analyzing the influence of error on parameter measurement, the interval numbers of target parameter true value detected by the sensors are established. The relative support level between the interval numbers is calculated, based on which the support level of track association about target parameter is obtained. Then, the support levels about track association of different parameters are combined based on DS evidence theory, and thus the problem of track association is solved. Examples show that this method is effective for multi-sensor track association.

**Key words:** track association; interval number; DS evidence theory; multi-sensor

### 0 引言

目标航迹关联的目的是在保证态势信息完整的同时,减少冗余信息,解决传感器空间覆盖区域中的重复跟踪问题<sup>[1]</sup>。目前航迹关联主要有基于统计<sup>[2-4]</sup>和基于模糊数学<sup>[5-6]</sup>的方法,比如经典的最近邻域法、模糊门限法等。这些方法确实具有一定的关联效果,但考虑系统误差之后,关联性能明显下降。针对存在系统误差的情况,文献[7]采用模糊综合决策的思想,通过构建目标航迹紧密度矩阵提取最有可能的航迹关联对;文献[8]从航迹的不确定区域着手,采用极坐标测量参数的航迹灰区域关联模型,实现了无需对系统误差配准的航迹关联;文献[9]在综合考虑海明距离、模

糊贴近度、灰色关联度等3种接近程度度量的基础之上,提出了基于综合相似接近度的航迹关联方法;文献[10]充分利用信号在时间上的冗余性,且将DS证据理论引入灰色航迹关联过程;文献[11]采用归一化的方法,构造了一种新的隶属度函数,在加权平均的基础上,提出采用综合相似度进行航迹关联;文献[12]在原灰色航迹关联算法中设置双门限,提出了基于双门限的灰色航迹关联算法;文献[13]针对航迹关联中模糊隶属度函数确定复杂等问题,将证据理论引入关联算法,提出了基于模糊理论的证据航迹关联算法;文献[14-15]从目标状态的历史信息中获取广义绝对灰关联系数,进而从广义绝对灰关联系数的历史信息中得到广义绝对灰关联度。

本文深入分析误差对参数测量的影响,通过定量分析测量值、真实值以及误差之间的关系,构建航迹关联的基础。

收稿日期:2018-05-16

修回日期:2019-04-08

作者简介:杨军佳(1987—),男,河南商水人,硕士,讲师,研究方向为雷达组网及作战使用。

## 1 问题描述

考虑  $N$  部传感器共同监视探测区域内的  $M$  批目标,且每部传感器能够获取目标的  $L$  个参数。假设各传感器对目标  $L$  个参数测量的系统误差为  $(\Delta_n^i)_{i=1}^L$ ,  $1 \leq n \leq N$ , 随机误差为  $(\varepsilon_n^i)_{i=1}^L$ ,  $1 \leq n \leq N$ ,  $\hat{\eta}_{n,m}^i(k)$  为  $k$  时刻第  $n$  部传感器对第  $m$  个目标第  $i$  个参数的状态估计,则  $k$  时刻传感器获取的量测参数与目标真实参数之间的关系为

$$\hat{\eta}_{n,m}^i(k) = \eta_{n,m}^i(k) + \Delta_n^i + \varepsilon_n^i \quad (1)$$

式中:  $\eta_{n,m}^i(k)$  表示极坐标下  $k$  时刻第  $m$  个目标第  $i$  个参数相对于第  $n$  部传感器真实的数值;  $\Delta_n^i$  表示第  $n$  部传感器对目标第  $i$  个参数测量的系统误差;  $\varepsilon_n^i$  表示具有零均值、恒定方差的高斯白噪声。

由于测量误差的存在,各传感器获得的目标参数并不是真实的目标数据。一般地,随机误差服从正态分布,经过滤波方法处理之后,其数值相对系统误差要小得多;系统误差是每台装备本身固有的,对于同一型号的不同装备,其系统误差可能不同。但是,如果在装备使用过程中,根据经验确定了系统误差的大致范围,就可以使用其最大值作为其对测量值的影响。

如图1所示,传感器对方位角的实际测量结果为  $\theta$ 。然而,由于测量误差的存在,目标相对于传感器的实际方位角应位于区间  $[\theta - \Delta\theta, \theta + \Delta\theta]$  之内。

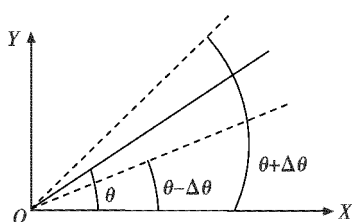


图1 测量误差影响示意图

Fig.1 The schematic diagram of measurement error influence

## 2 基本理论

### 2.1 区间数及相关定义

**定义1** 若实数  $a^- \leq a^+$ , 则称  $[a^-, a^+]$  为区间数, 记为  $\bar{a}$ 。当  $a^- = a^+$  时, 该区间数退化为实数<sup>[16]</sup>。

对于任意两个区间数  $\bar{a} = [a^-, a^+]$  和  $\bar{b} = [b^-, b^+]$ , 如图2所示, 在实轴上任取一点  $x$ , 点  $x$  在  $\bar{a}$  内记为事件  $A$ , 点  $x$  在  $\bar{b}$  内记为事件  $B$ 。

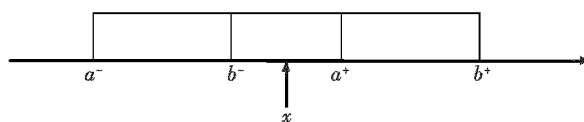


图2 点  $x$  与区间数  $\bar{a}$  与  $\bar{b}$  的位置关系

Fig.2 The position relationship between  $x$  and interval numbers of  $\bar{a}$  and  $\bar{b}$

在事件  $A$  发生的条件下, 事件  $B$  发生的概率为

$$P(B|A) = \begin{cases} 0 & a^+ < b^- \text{ or } b^+ < a^- \\ \frac{a^+ - b^-}{a^+ - a^-} & a^- \leq b^- \leq a^+ \leq b^+ \\ \frac{b^+ - b^-}{a^+ - a^-} & a^- \leq b^- \leq b^+ \leq a^+ \\ \frac{b^+ - a^-}{a^+ - a^-} & b^- \leq a^- \leq b^+ \leq a^+ \\ 1 & b^- \leq a^- \leq a^+ \leq b^+ \end{cases} \quad (2)$$

**定义2** 称  $P(B|A)$  为区间数  $\bar{a}$  关于区间数  $\bar{b}$  的相对支持度, 记为  $P(\bar{a}, \bar{b})$ 。从定义中可以看出,  $P(\bar{a}, \bar{b})$  越大, 表明区间数  $\bar{a}$  与区间数  $\bar{b}$  的重复区间占  $\bar{a}$  的比例越大, 即任取的一点  $x$  在  $\bar{a}$  内的情况下, 出现在  $\bar{b}$  内的概率越高。

### 2.2 DS 证据理论

设  $\Theta$  是一个假设空间, 如果函数  $f: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ , 且满足  $f(\phi) = 0$ ,  $\sum_{C \subseteq \Theta} f(C) = 1$ , 则称函数  $f$  是一个基本概率分布函数(Mass 函数)。在假设空间  $\Theta$  上, 基于 Mass 函数的信任函数为  $Bel(C) = \sum_{B \subseteq C} f(B)$  ( $\forall C \subseteq \Theta$ )。

对于  $\forall C \subseteq \Theta$ ,  $\Theta$  上的两个 Mass 函数  $f_1$  和  $f_2$ , Dempster 合成规则为

$$\begin{cases} f_1 \oplus f_2(C) = \frac{1}{k} \sum_{D \cap E = C} f_1(D) \cdot f_2(E) \\ k = 1 - \sum_{D \cap E = \phi} f_1(D) \cdot f_2(E) \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $k$  为归一化常数。

## 3 基于区间数及 DS 证据理论的航迹关联方法

假设传感器的随机测量误差经过卡尔曼滤波之后, 其相对于系统测量误差已经非常小, 且不同传感器对目标参数的状态估计值已经进行时空对准, 该方法的具体步骤如下。

### 1) 区间数的构建。

如果第  $m$  个目标在  $k$  时刻第  $i$  个参数的真实值为

$\eta_{n,m}^i(k)$ ,  $k$ 时刻第  $n$  部传感器对第  $m$  个目标第  $i$  个参数的状态估计值为  $\hat{\eta}_{n,m}^i(k)$ , 则

$$\eta_{n,m}^i(k) - \Delta_n^i \leq \hat{\eta}_{n,m}^i(k) \leq \eta_{n,m}^i(k) + \Delta_n^i \quad (4)$$

由上式可得

$$\hat{\eta}_{n,m}^i(k) - \Delta_n^i \leq \eta_{n,m}^i(k) \leq \hat{\eta}_{n,m}^i(k) + \Delta_n^i \quad (5)$$

由上式可得, 对于第  $m$  个目标第  $i$  个参数, 其真实值  $\eta_{n,m}^i(k)$  位于第  $n$  部传感器对该目标参数估计值与测量误差所构建的区间内。依据区间数的定义, 式(5)可以表示为

$$\bar{\eta}_{n,m}^i(k) = [\hat{\eta}_{n,m}^i(k) - \Delta_n^i, \hat{\eta}_{n,m}^i(k) + \Delta_n^i] \quad (6)$$

2) 计算相同时刻下, 第  $n$  部传感器探测到的第  $m$  个目标的第  $i$  个参数真实值区间数关于第  $q$  部传感器探测到的第  $j$  个目标第  $i$  个参数真实值区间数的相对支持度  $P(\bar{\eta}_{n,m}^i(k), \bar{\eta}_{q,j}^i(k))$ ,  $1 \leq j, m \leq M, 1 \leq n, q \leq N, n \neq q$ 。

3) 在步骤2)的基础上, 构建在相同时刻下, 对于第  $n$  部传感器探测到的  $M_n$  个目标的第  $i$  个参数真实值区间数关于第  $q$  部传感器探测到的  $M_q$  个目标第  $i$  个参数真实值区间数的相对支持度矩阵, 即

$$P = \begin{pmatrix} P(\bar{\eta}_{n,1}^i(k), \bar{\eta}_{q,1}^i(k)) & \cdots & P(\bar{\eta}_{n,1}^i(k), \bar{\eta}_{q,M_q}^i(k)) \\ \vdots & & \vdots \\ P(\bar{\eta}_{n,M_n}^i(k), \bar{\eta}_{q,1}^i(k)) & \cdots & P(\bar{\eta}_{n,M_n}^i(k), \bar{\eta}_{q,M_q}^i(k)) \end{pmatrix}_{M_n \times M_q} \quad (7)$$

4) 在步骤3)的基础上, 对于第  $n$  部传感器和第  $q$  部传感器探测到的目标第  $i$  个参数真实值区间数之间的相对支持度矩阵, 如果  $P(\bar{\eta}_{n,m}^i(k), \bar{\eta}_{q,j}^i(k))$  在矩阵第  $m$  行中数值最大, 则第  $n$  部传感器探测到的第  $m$  个目标的第  $i$  个参数真实值区间数关于第  $q$  部传感器探测到的第  $j$  个目标的第  $i$  个参数真实值区间数之间的相对支持度最大, 即同一个目标在该时刻被第  $n$  部传感器和第  $q$  部传感器同时探测到的可能性最大, 第  $n$  部传感器探测到的第  $m$  个目标与第  $q$  部传感器探测到的第  $j$  个目标为同一个目标的可能性最大。

5) 依据 DS 证据理论, 将不同传感器探测到的目标参数真实值区间数之间的相对支持度作为判断目标是否来源于同一个目标的证据, 则识别框架为  $\Psi = \{\text{相关}, \text{不相关}\}$ , 相关的概率为  $p$  ( $p$  与传感器探测到的目标某一个参数真实值区间数之间的相对支持度有关), 不相关的概率为  $1-p$ 。合成 DS 规则为

$$\begin{cases} \Omega = \varphi_1 \oplus \varphi_2 \oplus \cdots \oplus \varphi_n \oplus \cdots \oplus \varphi_L \\ \varphi_n = \begin{cases} p & \text{相关} \\ 1-p & \text{不相关} \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

## 4 仿真分析

为便于验证, 这里仅以 2 部传感器探测 20 批目标的 2 个参数为例。

仿真环境设置如下: 20 批目标在传感器探测区域内运动, 且其初始位置在  $x \in (10 \text{ km}, 20 \text{ km})$ ,  $y \in (15 \text{ km}, 30 \text{ km})$  的矩形区域内随机分布, 初始速度在  $100 \sim 700 \text{ m/s}$  之间随机分布, 初始航向在  $0 \sim 2\pi$  之间随机分布, 两部传感器的位置为  $(-10 \text{ km}, 0 \text{ km})$  以及  $(10 \text{ km}, 0 \text{ km})$ , 其距离测量误差以及方位测量误差分别为  $\Delta r$  和  $\Delta \theta$ , 且  $\Delta r$  在  $80 \sim 300 \text{ m}$  之间随机分布,  $\Delta \theta$  在  $0.5^\circ \sim 2.5^\circ$  之间随机分布, 采样间隔均为  $1 \text{ s}$ , 仿真时长为  $30 \text{ s}$ , 采用蒙特卡罗方法进行 100 次仿真。仿真结果如图 3 所示。

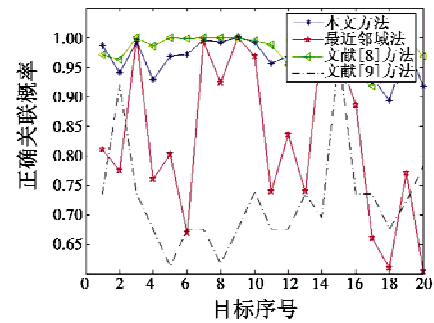


图3 不同目标航迹正确关联概率

Fig. 3 The correct association probability of different target tracks

从图3中可以看出, 几种方法对目标的关联情况大体相似, 只是正确关联率存在差异。本文方法的正确关联概率要优于经典的最近邻域法和文献[9]方法, 却低于文献[8]方法。但是文献[8]方法与本文方法相比存在以下问题: 1) 文献[8]在对灰区域处理的时候采用最小的“圆”, 本来目标应该位于两个不确定圆环的区域内, 采用画圆之后, 必然带来不确定区域的间接缩小或者扩大; 2) 文献[8]引入了灰关联系数的概念, 在关联的过程中, 必须对分辨系数进行合理分配, 而该数值主观随意性比较大; 3) 文献[8]方法运算量比较大, 实时性不如本文方法。

### 4.1 有效性检验

本文选取比较经典的最近邻域法、文献[8]方法以及文献[9]方法作为对比检验。

### 4.2 测量误差对本文方法的影响分析

为检验本文方法抗测量误差的性能, 仿真环境中目标参数和传感器位置与上文仿真参数一致, 传感器的距离和方位测量误差如表1所示。

表1 距离和方位测量误差

Table 1 The measurement error of distance and azimuth

实验	$\Delta r_1/\text{m}$	$\Delta r_2/\text{m}$	$\Delta \theta_1/(\text{°})$	$\Delta \theta_2/(\text{°})$
1	60	60	1	1
2	150	150	2	2
3	60	150	1	1
4	60	150	2	2
5	60	150	1	2

图4所示为不同传感器测量误差情况下由不同方法得到的目标正确关联概率情况。

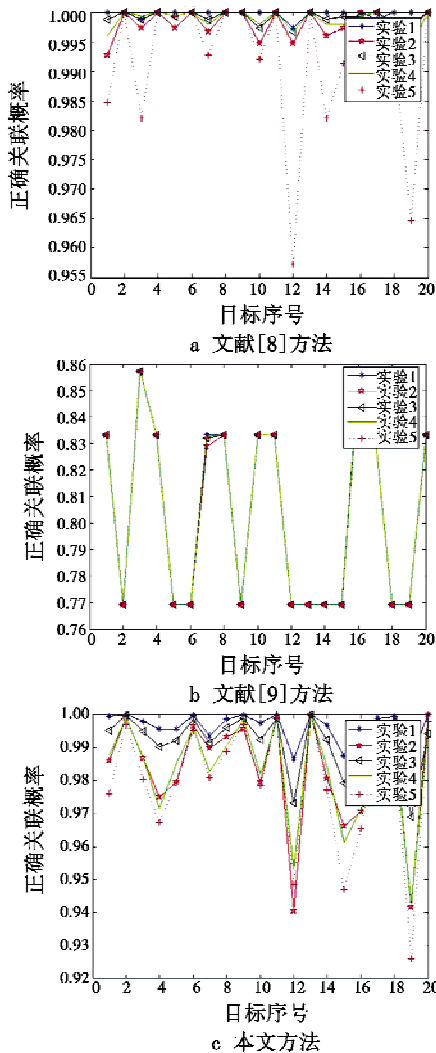


图4 不同方法的目标正确关联概率曲线

Fig.4 The correct target association probability curves of different methods

从图中可以看出：抗测量误差性能最好的是文献[9]方法，不论测量误差怎样变化，目标航迹正确关联概率曲线几乎不变，但是正确关联概率不高；本文方法和文献[8]方法，在不同测量误差情况下目标航迹正确关联概率趋势一致，且都在90%以上，正确关联概率排序为实验1，实验3，实验4，实验2，实验5。实验1与实验3相比，方位测量误差一致，距离测量误差有差异；实验3和实验4相比，距离测量误差一致，方位测量误差有差异；实验4和实验2相比，方位测量误差一致，距离测量误差有差异；实验2和实验5相比，方位测量误差和距离测量误差都有差异。从以上分析可以得出：1) 不论何种实验下的测量误差，本文方法都具有较高的正确关联概率；2) 对于相同型号的传感器，测量误差较小的正确关联概率高，对于不同型号的传

感器，有一个参数测量误差相同的正确关联概率高。

### 5 结论

本文研究了多传感器目标航迹之间的关联问题，提出了一种基于区间数和DS证据理论的航迹关联方法。通过仿真分析，验证了本文方法的有效性，且该方法原理简单，易于编程实现，具有一定的理论参考和工程应用价值。

### 参考文献

- [1] 何友,王国宏,陆大铨,等. 多传感器信息融合及应用[M]. 北京:电子工业出版社,2007.
- [2] BAR-SHALOM Y. On the track-to-track correlation problem[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1981, 26(2):571-572.
- [3] KOSAKA M, MIYAMOTO S, IHARA H. A track correlation algorithm for multisensor integration[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1987, 10(2):166-171.
- [4] DITZLER W R. A demonstration of multisensor tracking[C]//Proceedings of the Tri-Service Data Fusion Symposium, 1987:3-16.
- [5] 何友,王国宏,关欣,等. 信息融合理论及应用[M]. 北京:电子工业出版社,2010.
- [6] 兰旭辉,熊家军,马建朝,等. 一种改进的多源异类航迹关联方法[J]. 空军雷达学院学报,2012,26(4):263-265.
- [7] 熊伟,高峰,王海鹏. 系统误差下航迹关联算法[J]. 火力与指挥控制,2012,37(11):29-33.
- [8] 衣晓,张怀巍. 极坐标系下的航迹灰色区间关联算法[J]. 舰船电子工程,2012,32(8):45-48.
- [9] 韩国伟,张冰,朱志宇,等. 基于综合相似接近度的航迹关联算法[J]. 弹箭与制导学报,2009,29(2):279-281.
- [10] 杨博帆,李延磊,岳韶华. 基于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.
- [11] 董凯,王海鹏,刘瑜,等. 基于航向参照匹配的航迹抗差关联算法[J]. 电光与控制,2014,21(11):41-45.
- [12] 董凯,刘瑜,王海鹏. 基于质心参照拓扑的灰色航迹抗差关联算法[J]. 吉林大学学报:工学版,2015,45(4):1311-1317.
- [13] 丁锋,薛磊. 基于模糊理论的证据航迹关联算法分析[J]. 计算机应用研究,2015,32(6):1694-1697.
- [14] 高峰,谢小平,熊伟. 基于广义绝对灰关联度的航迹关联算法[J]. 雷达科学与技术,2016,14(6):642-647.
- [15] 高晓丽,李捷. 一种异类多传感器航迹关联新算法[J]. 火力与指挥控制,2018,43(2):77-81.
- [16] 胡宝清. 模糊理论基础[M]. 武汉:武汉大学出版社,2004.