

分布式传感器网络中一种新的模糊航迹关联算法

范 恩¹ 谢维信^{1,2} 刘宗香² 李鹏飞³

(1. 西安电子科技大学电子工程学院, 陕西 西安 710071;

2. 深圳大学 ATR 国防科技重点实验室, 广东 深圳 518060; 3. 防空兵指挥学院, 河南 郑州 450052)

摘要: 为了有效提高分布式传感器网络中航迹关联的计算速度, 本文提出了一种基于临时航迹和航迹可信度的模糊航迹关联算法。该算法首先利用来自同一局部航迹的两个点迹形成临时航迹, 再采用临时航迹与系统航迹关联; 同时引入航迹可信度, 当多条系统航迹与一条临时航迹关联时, 选取加权关联度最大的系统航迹与该临时航迹关联。将该算法用于一个航迹关联的仿真实验中, 与传统的模糊航迹关联算法相比, 仿真结果表明该算法在保证关联正确率的前提下, 提高了航迹关联速度和融合结果的性能, 是一种有效的航迹关联方法。

关键词: 临时航迹; 航迹可信度; 航迹关联

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2011)10-1561-05

A novel track-to-track association algorithm in distributed sensor network

FAN En¹ XIE Wei-xin^{1,2} LIU Zong-xiang² LI Peng-fei³

(1. School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an, 710071, China;

2. ATR Key Lab of National Defense, Shenzhen University, Shenzhen, 518060, China;

3. Air Defense Forces Command Academy, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Focused on improvement on computational speed of track-to-track association in distributed sensor network, a novel fuzzy track-to-track association algorithm based on a temporary track and track reliability is proposed in this paper. Firstly, in the global node, a temporary track is formed by two measurements from a local track, then track association is between the temporary track and system tracks. In addition, track reliability is introduced to use as the association rule that only a system track with the maximum weighted association degree can be selected to associate with the temporary track when there exist several system tracks associated with a temporary track. By applying the proposed algorithm to a simulation experiment of track association, the simulation results show that it can determine targets' tracks accurately, has better performance in the speed of track association processing than traditional fuzzy association algorithms, and is an effective and feasible track association method.

Key words: temporary tracks; track reliability; track association.

1 引言

随着未来战场范围日益扩大, 传感器类型和数目不断增加, 对信息融合实时性要求也越来越高, 异类多传感器信息融合是未来多源信息融合发展的趋势。

航迹关联是信息融合的关键技术之一, 分布式融合模型是其中一种重要的融合结构。在分布式融合系统中, 每个局部节点处理来自一个或一组同类传感器

的量测数据, 生成局部航迹; 全局节点处理来自各局部节点的航迹数据, 生成系统航迹。航迹关联是判断来自不同局部节点的航迹是否代表同一目标的航迹。现有的航迹关联算法主要分为两类: 基于统计的方法^[1-3]和基于模糊的方法^[4-6]。模糊航迹关联方法比较适合于密集目标环境和/或交叉、分叉及机动航迹较多的场合, 对存在较大导航、传感器校准、转换与延迟误差的系统具有良好的适应性, 且处理速度较快, 对存储

收稿日期: 2011 年 5 月 31 日; 修回日期: 2011 年 10 月 9 日

基金项目: 国防预研基金资助课题(51326030204); 国防科技重点实验室基金项目(9140C8004011007)资助课题; 教育部博士点重点学科基金(20104408120001); 深圳大学自然科学基金研究项目(20101477)

和通信量要求较低,具有良好的关联效果^[7]。

传统的模糊航迹关联算法(Fuzzy Track Association Algorithm, FTAA)^[7],通过定义航迹关联质量 m 和脱离质量 D 判断两条航迹是否关联^[7,8](一般取 $m \geq 6$, $D \geq 6$),因此,判断两条航迹关联至少需要 6 次判决,从而约束了航迹关联的计算速度。特别是在信源和目标数目较多的情况下,关联组合爆炸增长,直接制约了整个系统的处理速度。为了提高航迹关联的计算速度,本文提出了一种基于临时航迹和航迹可信度的模糊航迹关联算法,将局部航迹与局部航迹关联转换为临时航迹与系统航迹关联。在全局节点,首先利用来自不同局部节点的航迹数据形成临时航迹,再采用临时航迹与系统航迹关联;并引入航迹相对可信度,当有多条系统航迹与一条临时航迹关联时,选取加权关联度最大的系统航迹与该临时航迹关联;当系统航迹与临时航迹关联不上或者不存在系统航迹时,由临时航迹直接形成系统航迹。本文算法减少了单次判断航迹关联所需点迹数,缩短了系统航迹更新时间,提高了系统处理的实时性,并通过采用可信度最大的系统航迹与临时航迹关联,减少了航迹关联次数,提高了融合结果的性能。为了实现航迹的平滑,最后对系统航迹采用 α - β 滤波器进行滤波。

2 航迹可信度与临时航迹的概念

设在分布式融合系统 \mathbf{M} 中,有 1 个全局节点 N_0 和 n 个局部节点 $N_l, l=1,2,\dots,n$ 。 S_l^i 为 N_l 输出的第 i 条局部航迹,记为 $S_l^i \in U_l, i=1,2,\dots,n_l, U_l$ 为 N_l 输出航迹的集合。 S_0^j 为 N_0 输出的第 j 条系统航迹,记为 $S_0^j \in \Omega, j=1,2,\dots,n_0, \Omega$ 为 N_0 输出航迹的集合。设 \mathbf{U} 为所有局部航迹的全体,称为局部航迹空间;同理, Ω 称为系统航迹空间。

现有融合算法多数假设传感器类型相同、测量精度一致,各节点是等可靠的,从全局估计局部航迹,生成系统航迹。在大规模分布式传感器网络中,由于存在异类或者测量精度不一致的传感器,各局部节点是非等可靠的,必须考虑可靠性不同的航迹对融合结果权重贡献的影响^[9]。由于每个局部节点处理同类传感器所采集的数据,因而同一局部节点输出的航迹具有相同的可靠等级。为了保证融合结果的性能,本文根据各局部节点下的传感器的测量精度和虚警率定义航迹的可信度,将其引入航迹关联中。由于同一节点下的传感器类型相同,因而可以认为同一局部节点输出的航迹具有相同的可信度,即对 $\forall S_l^i \in U_l, S_l^i$ 的可信度均为 $\omega_l, i=1,2,\dots,n_l, l=1,2,\dots,n$ 。为了计算方便,需对可信度进行归一化:

$$\omega_l' = \frac{\omega_l}{\max(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)} \quad (1)$$

由于局部航迹往往以数据包的形式从局部节点发送到全局节点,在全局节点对数据包采用序贯的处理方式。通常一个数据包只包含一个点迹信息,用集合的形式可以表示为 $s_l^i(k) = \{\mathbf{x}_l^i(k), h_l^i, t_k, \omega_l'\}$, $s_l^i(k)$ 为局部航迹 S_l^i 的第 k 个数据包, $\mathbf{x}_l^i(k), h_l^i, t_k$ 分别为目标的位置、航迹号和发现时间, ω_l' 为 S_l^i 的航迹可信度,则 S_l^i 可以表示为 $\{s_l^i(1), s_l^i(2), \dots, s_l^i(n_l^i)\}$, n_l^i 为 S_l^i 包含的数据包包数。为了提高航迹关联的计算速度,本文引入临时航迹的概念,将局部航迹与局部航迹关联转换为临时航迹与系统航迹关联。由于单个点迹不包含目标运动的方向信息,因此采用同一局部航迹的两个数据包定义一条临时航迹,即 $S_T^i = \{s_l^i(k-1), s_l^i(k)\}$, S_T^i 为第 i 条临时航迹, $s_l^i(k-1), s_l^i(k)$ 分别为 S_l^i 的第 $k-1$ 、第 k 个数据包。设 \mathbf{U}_T 为临时航迹的集合,称为临时航迹空间。这里临时航迹 S_T^i 的可信度为局部航迹 S_l^i 的可信度 ω_l' , 并设系统航迹的可信度为最新数据包内的可信度。

3 基于可信度加权的模糊航迹关联算法

基于可信度加权的模糊航迹关联算法(reliability-weighted FTAA)主要可以分为三步:确立模糊因素集,选择模糊综合函数和计算加权关联度。

3.1 确立模糊因素集

为了方便讨论,设临时航迹与系统航迹的状态估计在相同的直角坐标系中,各个传感器采样周期相同,传输延迟时间为零。在 k 时刻,临时航迹 S_T^i 和系统航迹 S_0^j 的状态估计分别为 $\hat{\mathbf{x}}_T^i(k|k)$ 和 $\hat{\mathbf{x}}_0^j(k|k)$ 。一般影响航迹关联的模糊因素包含目标的位置、航速、加速度、航向和航向变化率等。实际应用中,为了减小算法的计算复杂度和融合系统的负担,选取对关联判决起主要作用的因素,以保证在各种运动方式下对目标的准确跟踪。本文选取目标的水平位置差,水平速度差和水平航向差作为模糊判决的主体。设 $\hat{\mathbf{x}}(k|k) = [\hat{x}(k|k), \hat{v}(k|k), \hat{y}(k|k), \hat{\psi}(k|k)]^T$ 为 k 时刻的状态估计,则对应的模糊因素分别为:

$$u_1 = \sqrt{[\hat{x}_T^i(k|k) - \hat{x}_0^j(k|k)]^2 + [\hat{y}_T^i(k|k) - \hat{y}_0^j(k|k)]^2} \quad (2)$$

$$u_2 = \left| \sqrt{[\hat{x}_T^i(k|k) + \hat{y}_T^i(k|k)]^2} - \sqrt{[\hat{x}_0^j(k|k) + \hat{y}_0^j(k|k)]^2} \right| \quad (3)$$

$$u_3 = \left| \arctan[\hat{y}_T^i(k|k)/\hat{x}_T^i(k|k)] - \arctan[\hat{y}_0^j(k|k)/\hat{x}_0^j(k|k)] \right| \quad (4)$$

即对应的模糊因素集为 $\mathbf{U} = \{u_1, u_2, u_3\}$ 。采用高斯型隶属度函数可以求出模糊向量 \mathbf{M}_i :

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_i &= [d_i(u_1), d_i(u_2), d_i(u_3)]^T \\ &= [e^{-(u_1/u_{1\max})^2}, e^{-(u_2/u_{2\max})^2}, e^{-(u_3/u_{3\max})^2}]^T \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $u_{1\max}$ 、 $u_{2\max}$ 和 $u_{3\max}$ 分别为所能容忍的最大水平位置差、最大水平速度差和最大水平航向差。

3.2 选择模糊综合函数

由模糊因素集 $\Sigma = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 可以定义模糊向量 $\mathbf{M}_i = [d_i(u_1), d_i(u_2), \dots, d_i(u_n)]^T$ 和 $\mathbf{M}_j = [d_j(u_1), d_j(u_2), \dots, d_j(u_n)]^T$, $\mathbf{M}_i, \mathbf{M}_j \in [0, 1]^n$, 并在 $[0, 1]^n$ 引入偏序“ \leq ”关系, 即对 $\forall p, q$, 需满足

$$\mathbf{M}_i \leq \mathbf{M}_j \Leftrightarrow d_i(u_l) \leq d_j(u_l), i=1, 2, \dots, n \quad (6)$$

由文献^[10]可知, 若存在映射 $S_n: [0, 1]^n \rightarrow [0, 1]$, 对 $\forall \mathbf{M}_i, \mathbf{M}_j \in [0, 1]^n$, 恒有

$$\mathbf{M}_i \leq \mathbf{M}_j \Rightarrow S_n(\mathbf{M}_i) \leq S_n(\mathbf{M}_j) \quad (7)$$

$$\bigwedge_{l=1}^n d_l(u_l) \leq S_n(\mathbf{M}_i) \leq \bigvee_{l=1}^n d_l(u_l) \quad (8)$$

两式成立, 则称该映射函数为综合函数。常用的综合函数有

$$S_n(\mathbf{M}_i) = \left[\frac{1}{n} \sum_{l=1}^n [d_i(u_l)]^q \right]^{1/q}, q > 0 \quad (9)$$

$$S_n(\mathbf{M}_i) = \left[\prod_{l=1}^n d_i(u_l) \right]^{1/n} \quad (10)$$

$$S_n(\mathbf{M}_i) = \sum_{l=1}^n a_l d_i(u_l), a_l \in [0, 1], \sum_{l=1}^n a_l = 1 \quad (11)$$

$$S_n(\mathbf{M}_i) = \left[\sum_{l=1}^n a_l [d_i(u_l)]^q \right]^{1/q}, a_l \in [0, 1], \sum_{l=1}^n a_l = 1, q > 0 \quad (12)$$

$$S_n(\mathbf{M}_i) = \frac{1}{2} \left[\bigwedge_{l=1}^n d_i(u_l) + \bigvee_{l=1}^n d_i(u_l) \right] \quad (13)$$

本文采用式(11)作为判决函数, 考虑到各模糊因素相对关联判决的重要性, 取 $a_1 = 0.55, a_2 = 0.35, a_3 = 0.1$ 。

3.3 计算加权关联度

在全局节点, 每收到一条临时航迹就与系统航迹进行关联判决。若 \mathbf{S}_r^i 与 \mathbf{S}_0^j 关联, 记为 $\mathbf{S}_r^i \cap \mathbf{S}_0^j$ 。传统关联算子(假定各局部节点是等可靠的)可表示为:

$$\mu(\mathbf{S}_r^i \cap \mathbf{S}_0^j) = f(\mathbf{S}_r^i, \mathbf{S}_0^j) \quad (14)$$

其中, μ 为关联度, f 为关联算子。考虑到实际情况, 各局部节点是非等可靠的, 需将航迹可信度 ω_l' 引入关联算子, 即

$$\mu(\mathbf{S}_r^i \cap \mathbf{S}_0^j) = f(\mathbf{S}_r^i, \mathbf{S}_0^j; \omega_l') = \omega_l' f(\mathbf{S}_r^i, \mathbf{S}_0^j) \quad (15)$$

本文中采用式(11)中的综合函数计算关联度, 则其加权关联度可以表示为:

$$\mu(\mathbf{S}_r^i \cap \mathbf{S}_0^j) = \omega_l' S_n(\mathbf{M}_i) \quad (16)$$

航迹可信度反映了局部节点的可靠程度, 影响航迹关联结果。若航迹可靠性越低, 则其可信度接近于 0; 若反之, 则其可信度越接近于 1。当有多条系统航迹与一条临时航迹关联时, 选取加权关联度最大的系统航迹与该临时航迹关联。实现算法的流程图如图 1 所示。

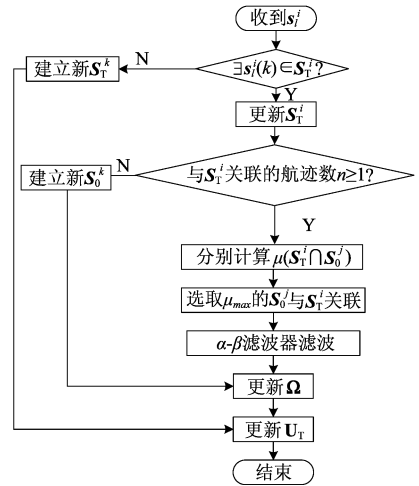


图 1 算法的流程图

Fig. 1 The flow chart of the proposed algorithm

4 仿真实验及分析

为了证明上述算法的有效性, 本节设计了以下测试实验: 实验中假定目标在 2D 平面上运动, 各传感器的采样周期相同, $T = 4$ s, 起始时刻不同。

设在分布式多传感器融合系统中, 有 4 个局部节点 N_1, N_2, N_3, N_4 和 1 个全局节点 N_0 。4 个局部节点分别处理来自 4 类传感器的点迹数据, 全局节点 N_0 处理来自 4 个局部节点的航迹数据。4 类传感器的性能参数分别为: 测距误差 $\sigma_{r1} = 50$ m, $\sigma_{r2} = 100$ m, $\sigma_{r3} = 50$ m, $\sigma_{r4} = 120$ m; 测角误差 $\sigma_{\theta1} = 1^\circ$, $\sigma_{\theta2} = 0.12^\circ$, $\sigma_{\theta3} = 0.1^\circ$, $\sigma_{\theta4} = 0.12^\circ$; 扫描周期均为 1 s。根据 4 个局部节点的先验信息, 给出 4 个局部节点输出的航迹的可信度分别为 1.0, 0.8, 1.0, 0.6。如图 2 所示, 假定空中有两批交叉运动的匀速目标, 起始状态分别为 $\mathbf{x}_{01} = [-295\ 00\ \text{m}, 290\ \text{m/s}, 345\ 00\ \text{m}, -400\ \text{m/s}]^T$, $\mathbf{x}_{02} = [-122\ 50\ \text{m}, 125\ \text{m/s}, 325\ 00\ \text{m}, -400\ \text{m/s}]^T$ 。分别采用本文算法与传统的模糊航迹关联算法 (FTAA), 跟踪门半径设为 800 m, 进行 100 次 Monte Carlo 仿真, 仿真平台为 Matlab r2009b。关联结果及位置均方根误差如图 3 所示, 表 1 给出了每条航迹的平均位置均方根误差; 并比较两种方法的单词关联的平均时间, 仿真结果如表 2 所示。

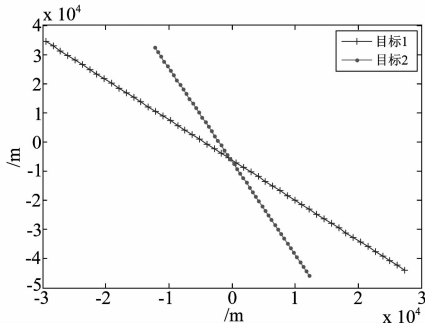


图2 两个目标真实航迹

Fig. 2 Real tracks of two targets

表1 目标平均位置均方根误差(m)

Tab. 1 The average RMSE of target position

| 方法 | 航迹 | |
|------------|-----------|-----------|
| | S_1 | S_2 |
| FTAA 算法[7] | 111.386 1 | 118.139 8 |
| 本文算法 | 38.074 5 | 42.091 5 |

表2 本文算法与模糊航迹关联算法运行时间比较(s)

Tab. 2 The average execution time based on the proposed algorithm versus the one in [7]

| 方法 | 单次关联时间 |
|------------|---------|
| FTAA 算法[7] | 0.014 4 |
| 本文算法 | 0.029 0 |

从图3和表1可以看出,当传感器误差相差较大时,由于本文算法选取加权关联度最大的系统航迹与临时航迹关联,因而能够提高融合后系统航迹的精度。从表2可以看出,由于本文采用临时航迹(仅包含两个点迹)与系统航迹关联,仅需要判断两条航迹当前状态估计是否关联就可以进行一次关联判决,从而减少了单次关联时间,缩短了系统航迹的更新时间,提高了系统处理的实时性;且在关联时选取加权关联度最大的系统航迹与临时航迹关联,减少了系统航迹与临时航迹的关联次数,进一步缩短了关联时间。

5 结束语

本文首先分析了传统模糊航迹关联算法的不足,在多传感器分布式融合系统中,提出了基于临时航迹和航迹可信度的模糊航迹关联算法。通过建立临时航迹,利用临时航迹与系统航迹关联,改变了传统航迹关联算法采用局部航迹间的关联方式,减少单次判断航迹关联所需点迹数,缩短了系统航迹更新时间,提高了系统处理的实时性;通过引入航迹可信度,选取加权关联度最大的系统航迹与临时航迹关联,避开了信源和目标数目较多所导致关联组合爆炸增长的情况,进一步提高了航迹关联速度和融合后系统航迹的数据精度。最后通过仿真实验证明,本文提出的算法在分布式多传感器信息融合系统中,解决了信源较多、航迹数据协方差未知以及航迹数据的误差相差较大的问题,提高了航迹关联的计算速度。

参考文献

- [1] N. F. Sandell, R. O. Saber. Distributed data association for multi-target tracking in sensor networks[C]. Cancun, Mexico: IEEE Proceedings of the 47th Conference on Decision and Control, 2008.
- [2] 何友,彭应宁,陆大纶,等.分布式多传感器数据融合系统中的双门限航迹相关算法[J],电子科学学刊. 1997, 19(6):721-728.
He You, Peng Ying-ning, Lu Da-jin, et al. Binary track correlation algorithms in a distributed multisensor data fusion system[J], Journal of Electronics. 1997, 19(6): 721-728. (in Chinese)
- [3] 郭汝江,袁业术,权太范.高频地波雷达飞行小目标跟踪方法研究[J],电子学报. 2005, 33(9):1586-1589.
Guo Ru-jiang, Yuan Ye-shu, Quan Tai-fan. Study of anti-weak aerial target tracking for high frequency surface wave radar[J], Acta Electronica Sinica. 2005, 33(9): 1586-1589. (in Chinese)
- [4] 何友,黄晓东.基于模糊综合决策的航迹相关算法[J],海军工程学院学报. 1999, 89(4):1-10.
He You, Huang Xiao-dong. Track correlation algorithms

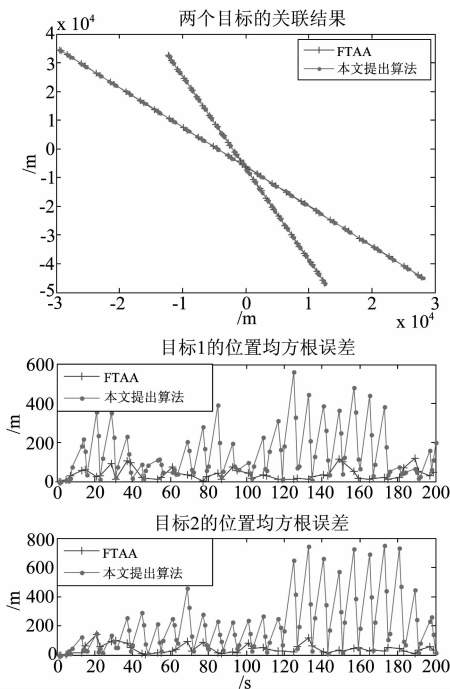


图3 关联结果示意图及目标位置均方根误差(m)

Fig. 3 (a) The association result of two targets; (b) Root mean square (RMSE) of target position

based on fuzzy synthetic decision[J], Journal of Naval Academy of Engineering. 1999, 89(4): 1-10. (in Chinese)

- [5] 丁锋,姜秋喜. 分布式系统模糊航迹关联算法分析[J], 计算机仿真. 2008, 25(2): 104-107.
Ding Feng, Jiang Qiu-Xi. An algorithm for fuzzy correlation of tracks distributed systems[J], Computer Simulation. 2008, 25(2): 104-107. (in Chinese)
- [6] 冉金和,张玉. 基于航迹隶属度的分布式系统数据融合算法[J], 信号处理. 2011, 27(2): 226-229.
Rang Jin-he, Zhang Yu. Distributed System data fusion algorithm based on track fuzzy membership[J], Signal Processing. 2011, 27(2): 226-229. (in Chinese)
- [7] 何友,王国宏,关欣,等. 信息融合理论与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2010.
He You, Wang Guo-hong, Guan Xin, et al. Information fusion theory with applications[M], Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. (in Chinese)
- [8] 何友. 多传感器系统中的航迹合成[J], 火力与指挥控制. 1990, 15(1): 7-14.
He You. Tracks synthesizing in multisensor system[J], Fire Control and Command Control. 1990, 15(1): 7-14. (in Chinese)
- [9] G. Rogova, V. Nimier. Reliability in information fusion; literature survey[C]. Proc. Fusion2004, 2004.
- [10] 李洪兴,汪培庄. 模糊数学及应用[M]. 北京:国防工业出版社,1994.
Li Hong-xing, Wang Pei-zhuang. Fuzzy mathematics and applications [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1994. (in Chinese)

作者简介



范 恩(1982-),男,博士生,主要研究方向为数据融合,多目标跟踪。

E-mail:efan@stu.xidian.edu.cn



谢维信(1941-),男,生于广东省花都,教授,博士生导师。1965年毕业于西安军事电讯工程学院,1981-1983年和1989-1990年分别在美国宾西法尼亚大学作访问学者和访问教授。现为深圳大学信号与信息处理学科学术带头人,深圳大学学术委员会主任,中国电子学会信号处理分会主任委员,国家级有突出贡献中青年专家,研究方向为:信号处理、智能信息处理、模糊信息处理、雷达目标识别等。

刘宗香(1965-),男,博士,深圳大学副研究员,主要研究方向为数据融合、智能信号处理、模糊信号处理。

E-mail:zongxiangliu@sohu.com



李鹏飞(1981-),男,博士,主要研究方向为数据融合,多目标跟踪。防空兵指挥学院防空导弹系讲师。

E-mail:roc5683@szu.edu.cn