

基于模糊理论和证据组合的被动段弹道导弹中断航迹关联方法

毛艺帆, 张多林, 王路
(空军工程大学防空反导学院, 西安 710051)

摘要: 针对航迹中断导致前后航迹不连贯的问题, 提出一种基于模糊理论和证据组合的被动段弹道导弹中断航迹关联方法。首先, 对新旧航迹分别进行航迹滤波和航迹预测处理, 将获取的同一时段数据作为关联样本; 通过对同时刻样本点之间各特征距离信息的模糊处理, 获取关联隶属度, 进而转化为证据理论中的基本概率指派; 然后对各证据进行组合, 得到各时刻的关联结果; 最后根据连续时长内样本点的关联判定, 得到最终的关联结果。仿真结果验证了所提方法的有效性。

关键词: 弹道导弹跟踪; 航迹关联; 航迹片段; 模糊理论; 证据组合

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2017)02-0047-04

Fuzzy Theory and Evidence Combination Based Track Segment Association for Ballistic Missile in Unpowered Phase

MAO Yi-fan, ZHANG Duo-lin, WANG Lu
(School of Air and Missile Defense, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: To solve the problem that the new track can not be linked to the preceding track when the track breaks off in ballistic missile's unpowered phase, a method based on fuzzy theory and evidence combination is presented for interrupted track association. Firstly, the tracks before breaking are predicted according to missile prediction model, and those after breaking are filtered by missile filtering algorithm. The new tracks above are regarded as targets waited association, the tracks in the same time segment are regarded as association samples. Then, fuzzy processing is made to characteristic distances of sample points at the same moment from different tracks in order to obtain the association membership degrees, which can be transferred into Basic Probability Assignments (BPAs) in evidence theory, so the evidence combination result in each sample instant can be obtained. According to the combination results during a continuous time, the whole association result is obtained. The simulation results show the effectiveness of this approach.

Key words: ballistic missile tracking; track association; track segment; fuzzy theory; evidence combination

0 引言

弹道导弹跟踪是弹道导弹防御中十分重要的一个环节, 由于主动段弹道目标红外特征明显, 诱饵也未弹出, 相对而言易于探测, 对跟踪的要求不高; 然而, 处于被动段的弹道导弹, 由于速度较大, 且可能存在伴飞诱饵, 在预警雷达及跟踪雷达工作时, 有可能因为探测率低、目标密集等原因出现探测航迹中断的问题。航迹一旦中断, 在新的航迹生成时, 雷达会重新进行目标编批, 导致航迹不连贯, 且中断前获取的目标特征信息在中断后不可对应使用, 对雷达本身及融合中心进行目

标跟踪识别造成困扰。所以, 被动段弹道目标中断航迹关联是一项十分有意义的研究课题。

针对中断航迹关联问题, 最早在1980年代已有学者进行研究^[1], 近年来也有了一些成果。文献[2]对旧航迹进行正向预测, 使用模糊理论的方法, 与新航迹的第一个量测点进行关联, 然而航迹的起始量测点往往误差较大, 作为关联样本对关联方法的影响很大; 文献[3]考虑了目标机动的情况, 使用多假设模型, 对目标多种方向和速度的可能性进行分析, 对机动目标有很大的实用价值, 但是对被动段的弹道目标, 处于无动力飞行阶段, 多假设模型反而增加了计算量, 且对关联的效果没有明显的提升; 文献[4]作为唯一可查的针对弹道目标中断航迹关联问题的中文文献, 同样对旧航迹进行正向预测, 然后对新航迹进行逆向预测, 但是

其并未对具体的逆向预测方法进行阐述,查看其参考资料^[5]可得,在量测信息缺失时,是不可进行逆向预测的,所以该方法对本文研究的情形不具备参考价值,另外,文献[4]使用滑窗法进行关联,有一定的意义,但是随着预测步长的增加,航迹预测值的误差也逐渐增大,那么滑窗的实际效果是不明显的。

为有效解决中断航迹关联问题,本文提出基于模糊理论和证据组合的被动段弹道导弹中断航迹关联方法。该方法使用旧航迹的预测航迹段和新量测的滤波航迹段作为关联样本,使用模糊理论获取样本关联隶属度,并转化为证据基本概率指派,进而通过证据组合得到各时刻的关联结果,最后根据连续时长内样本点的关联判定,得到最终的关联结果。

1 航迹关联样本的选择

关联样本即航迹进行关联计算时的对象,关联样本的选择对航迹关联算法的有效性起着十分重要的作用。在中断航迹关联问题中,量测中断前后的航迹段被分别称为旧航迹和新航迹,从现有的文献可知,使用旧航迹的正向预测航迹作为一类关联样本是所有文献的共识,不再赘述;而从新航迹中如何提取关联样本值得商讨。在文献中,或使用新量测的单个点作为关联样本,或使用一个实际中较难获取的逆向预测航迹段作为关联样本。显然,由于单个量测点受系统误差及测量误差的影响,作为关联样本与旧航迹的预测点进行相关判定,其合理性有待商榷;而使用逆向预测航迹,有其特定的使用条件,且计算量大,在弹道导弹的探测跟踪中,其实用性有待进一步验证。

基于以上分析,本文分别使用旧航迹的正向预测航迹和新航迹的正向滤波航迹作为关联样本,之所以使用新航迹的滤波航迹,是因为在航迹起批时,数据不稳定,而对前几个探测周期的数据进行滤波处理,起到去噪平滑的作用,与旧航迹预测航迹进行关联判断时,可以在一定程度上减小误差。假设样本长度为 L ,表示自新航迹起始时刻开始的 L 个探测周期,在 k 时刻,旧航迹的预测航迹为 $X_{pre}(k)$,新航迹的滤波航迹为 $X_m(k)$, $k \in \{1, 2, \dots, L\}$,则 $X_{pre}(k)$ 和 $X_m(k)$ 是本文要使用的关联样本,如图1所示。

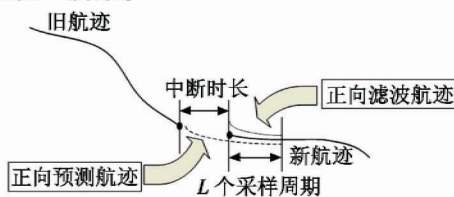


图1 关联样本示意图

Fig. 1 Association sample diagram

2 航迹关联证据生成

中断航迹关联是量测缺失的新旧航迹关联问题,属于典型的不确定性数据融合问题,而解决不确定性数据融合应用较广的方法有基于灰色理论的方法、基于模糊理论的方法和基于证据理论的方法等。本文选择模糊理论和证据理论结合的方法对该问题进行研究。本节主要解决如何使用模糊理论生成航迹关联证据的问题,其本质就是将航迹关联样本转化为航迹关联证据的基本概率赋值函数(Basic Probability Assignment, BPA)。

首先,将关联样本的特征信息模糊化,获取模糊隶属度。具体地,定义模糊因素集为 $U = \{u_1, u_2, u_3\}$, u_1 , u_2 和 u_3 分别表示 k 时刻样本点之间位置、速度和加速度之间的欧式距离。模糊因素权值集为 $A, A = \{a_1, a_2, a_3\}$, a_1, a_2 和 a_3 分别表示每个模糊因素对应的权系数,一般是给定的固定值,且 $a_1 > a_2 > a_3$ 。模糊评判集为 $V, V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$,当 $m=3$ 时, v_1, v_2 和 v_3 分别表示关联、不关联和不确定。单因素模糊评判矩阵为 $Q, Q = (q_{kl})_{n \times m}$, q_{kl} 表示考虑第 k 个模糊因素时,两个关联样本得到第 l 个评判结果的可能程度的大小,一般采用正态分布来计算^[6],最简单的情况是 $m=2$,如式(1)所示。

$$\begin{cases} q_{k1} = \exp[-\tau_k(u_k^2/\sigma_k^2)] \\ q_{k2} = 1 - \exp[-\tau_k(u_k^2/\sigma_k^2)] \end{cases} \quad (1)$$

式中: q_{k1} 表示样本判定为关联的隶属度大小; q_{k2} 表示样本判定为不关联的隶属度大小。本文考虑 $m=3$ 的情况,则结合模糊因素权值集 A ,可得到隶属度为

$$\begin{cases} q_{k1} = a_1 \exp[-\tau_k(u_k^2/\sigma_k^2)] \\ q_{k2} = a_1 \{1 - \exp[-\tau_k(u_k^2/\sigma_k^2)]\} \\ q_{k3} = 1 - q_{k1} - q_{k2} \end{cases} \quad (2)$$

具体到不同的模糊因素,其展度 σ_k 和调整度 τ_k 的值是不同的。可根据位置、速度、加速度的误差方差来计算其展度^[2],调整度可统一定义,其取值可参考文献[3],则其算式为

$$\begin{cases} q_{11} = a_1 \exp[-u_1^2/(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2)] \\ q_{12} = a_2 \exp[-u_2^2/(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2)] \\ q_{13} = a_3 \exp[-u_3^2/(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2)] \end{cases} \quad (3)$$

式中: σ_x^2, σ_y^2 和 σ_z^2 表示位置的误差方差; σ_x^2, σ_y^2 和 σ_z^2 表示速度的误差方差; σ_x^2, σ_y^2 和 σ_z^2 表示加速度的误差方差。

然后将不同模糊因素在不同评判下的隶属度大小转化为证据体,假设辨识框架为 $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3\}$, θ_1, θ_2 和 θ_3 分别表示为关联、不关联及不确定,根据位置、速

度、加速度可以构造 3 个证据体,即

$$\begin{cases} m_1(\theta_1) = q_{11}, m_1(\theta_2) = q_{12}, m_1(\theta_3) = q_{13} \\ m_2(\theta_1) = q_{21}, m_2(\theta_2) = q_{22}, m_2(\theta_3) = q_{23} \\ m_3(\theta_1) = q_{31}, m_3(\theta_2) = q_{32}, m_3(\theta_3) = q_{33} \end{cases} \quad (4)$$

3 航迹关联证据加权组合

证据体已经获取,只需选用高效的证据组合方法就能够形成最终的决策结果。由于在信息预测及滤波过程中可能会出现证据冲突,因此需要使用能够解决冲突证据融合的方法。自 1986 年 Zadeh 指出 D-S 理论无法合成冲突证据^[7]开始,国内外学者便展开对 D-S 理论改进方法的研究,在完备辨识框架的假设下可分为对组合规则的修改和对证据体的修改两类。Haenni 指出^[8],对证据体的修改无论是从工程上、数学上还是哲学上来看都更为合理。因此,本文采用修改证据体的方式来应对冲突证据合成问题。而在修改证据体的众多思路中,加权平均方法被认为具有很好的收敛效果,其流程为首先通过准则或算法计算各证据的权值,然后对待融合证据进行加权平均,最后对平均证据进行 $n - 1$ 次合成,得到最终结果。

本文使用基于证据相似度的证据加权组合方法,具体步骤如下。

1) 计算证据间的相似度 $c(m_i, m_j)$, 算式为

$$c(m_i, m_j) = \frac{\langle m_i, m_j \rangle}{\|m_i\| \cdot \|m_j\|} \quad (5)$$

式中, $\langle m_i, m_j \rangle = \sum_{j=1}^{2^n} \sum_{i=1}^{2^n} m_i(A_i) \cdot m_j(A_j) \cdot d_{ij}, d_{ij} = \frac{|A_i \cap A_j|}{|A_i \cup A_j|}$, $A_i, A_j \in P(\Theta), P(\Theta)$ 是 Θ 的幂集。

2) 计算各证据体 m_i 的被支持程度 $sup(m_i)$, 算式^[9]为

$$sup(m_i) = \sum_{j=1, j \neq i}^n s(m_i, m_j) \quad (6)$$

3) 对证据支持度 $sup(m_i)$ 做归一化处理,得到证据折扣 $\bar{\omega}(m_i)$, 算式为

$$\bar{\omega}(m_i) = \omega(m_i) / \sum_{i=1}^n \omega(m_i) \quad (7)$$

4) 对证据进行加权合成

$$m(A) = \sum \bar{\omega}(m_i) \cdot m_i(A) \quad (8)$$

5) 按照 D-S 规则对证据体 m 进行 $n - 1$ 次合成^[10], 得到最终所有证据体的融合结果 $m(\theta_1), m(\theta_2)$ 和 $m(\theta_3)$, 只有当 $m(\theta_1) - m(\theta_2) > m(\theta_3)$ 时, 认定样本是关联的。

对于有一定长度的样本而言,其整体的相关与否则要通过双门限准则来判定,选择整数 I 和 R (一般根据经验选值), $\forall k$ 时刻取 $1, \dots, R$, 设置计数器 c_{ij} , 初始取

值为 0, i 和 j 表示航迹标号。若关联成功, 则 $c_{ij}(k) = c_{ij}(k - 1) + 1$, 若 R 个时刻之后, 即经过 R 次关联检测, $c_{ij}(k) \geq I$, 则判定目标 i 和目标 j 为同一目标, 在后续的检测周期, 认定其为同一目标, 不需进行进一步的关联检验; 否则, 目标需要进入下一检测周期, 直到满足门限要求。对关联成功的样本对, 使用基础的加权法进行航迹融合。算法的整体流程如图 2 所示。

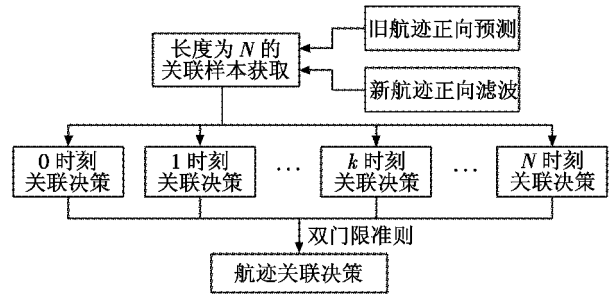


图 2 航迹关联决策

Fig. 2 Track association decision-making

每个时刻的关联决策流程如图 3 所示, 每个时刻获取的关联决策结果使用双门限准则进行关联检验, 获取航迹的关联决策结果。

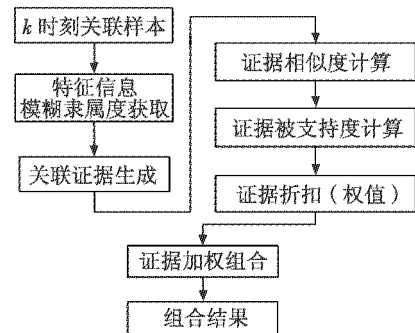


图 3 k 时刻关联决策

Fig. 3 Association decision-making at the k th instant

4 仿真分析

4.1 仿真环境 1

为了验证本文方法的有效性, 设置相应的仿真场景, 假设探测目标为中近程弹道导弹, 射程为 3000 km 左右。使用 STK 软件, 仿真 10 批射程为 3000 km 左右的弹道导弹目标, 以这些目标的飞行数据添加噪声之后作为量测数据。假设雷达的采样间隔 $T = 2$ s, 测距、测角和测速的误差标准差分别为 $\sigma_r = 500$ m, $\sigma_\theta = 0.1$ mrad 和 $\sigma_v = 50$ m/s, 都服从均值为零的正态分布。假设航迹中断的时长为 10 s, 对于整个航迹而言, 探测周期约有 450 个左右, 本次仿真选择在第 330 ~ 335 周期航迹中断。图 4a 表示弹道导弹原始航迹信息, 由图可知, 弹道目标是十分密集的; 图 4b 表示仿真选取的中断航迹段位置。

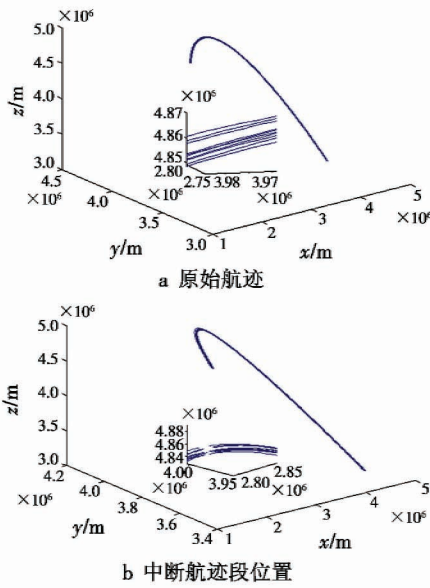


图4 弹道导弹航迹图
Fig.4 TBM track diagram

传感器对目标进行探测,得到量测数据,使用文献[11]中的跟踪滤波方法,利用其状态方程进行弹道预测,滤波和预测的样本点数均设置为10,由此获取关联样本数据。给定模糊因素对应的权值分别为: $a_1 = 0.5, a_2 = 0.3, a_3 = 0.2$ 。I/R逻辑选择3/5规则。进行50次蒙特卡罗仿真,图5为中断前后的量测航迹示意图,图6为关联后的结果示意图,在中断时间段之后,关联成功的样本进行加权融合,航迹比较平滑,接近于真实值。使用本文方法与文献[2]以及文献[5]的方法进行比较,得到航迹关联正确率如图7所示,由图可得,本文的方法是行之有效的,且优于文献[2]和文献[5]的方法。

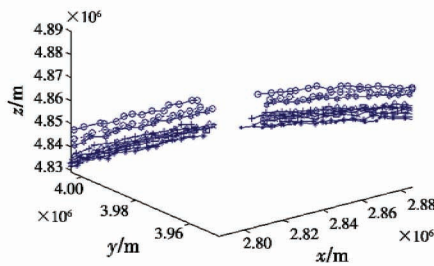


图5 中断前后量测航迹
Fig.5 Measurement before and after track breaking

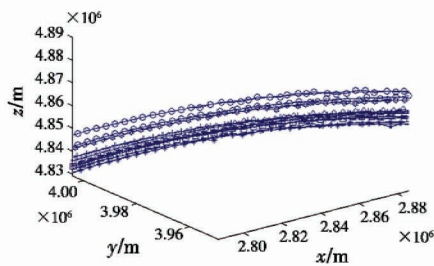


图6 关联融合后的航迹
Fig.6 Track after association fusion

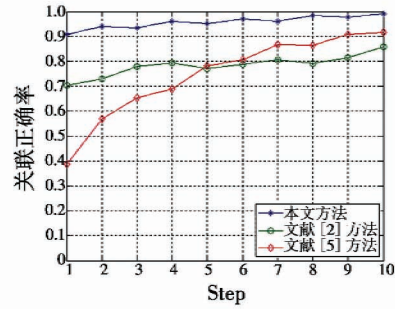


图7 关联正确率比较

Fig.7 Comparison of association accuracy

4.2 仿真环境2

改变航迹中断时长这个仿真条件,进行进一步的仿真。假设中断时间逐渐延长,每次仿真延长一个采样周期,中断时间分别如表1的区间所示,其他仿真条件不变。航迹关联之后的结果如表1所示,随着中断时长增加,关联正确率逐步降低,中断时长达10个采样周期之后,关联正确率已经降到了0.5以下。这是由于增大中断时间间隔之后,需要进行前向预测的目标航迹点数增多,而预测的误差是一个累积的过程,时间越长,误差就越大,则在目标比较密集且中断时长较长的时候,无法得到正确的结果。总之,在航迹中断不超过6个采样点的情况下,可认为本文算法的正确率是比较高的。

表1 中断时长与关联正确率的关系

Table 1 Relationship between breaking duration and association accuracy

中断周期	关联正确率
330 ~ 336 (12 s)	0.988 30
330 ~ 337 (14 s)	0.852 70
330 ~ 338 (16 s)	0.691 30
330 ~ 339 (18 s)	0.587 70
330 ~ 340 (20 s)	0.464 91

5 总结

本文针对被动段弹道导弹中断航迹关联问题进行研究,选择旧航迹的预测航迹段和新量测的滤波航迹段作为关联样本,避免了单个量测点或单个预测点作为样本点而带来的误差过大的问题;进一步,引入模糊理论,计算每时刻不同样本之间的关联隶属度,并转化成证据理论中的基本概率指派,与此同时,考虑到量测数据本身和数据处理过程中可能导致的误差,对证据之间可能产生的冲突问题进行处理。由此,中断航迹关联问题转化成冲突证据组合问题,通过每时刻的证据推理结果,再综合得出航迹整体的关联结果,该方法综合考虑了目标的位置、速度及加速度信息,而且计算比较简单。仿真结果表明,在一定的条件下,本文的方法是简单有效的。在未来进一步的研究中,可研究如

(下转第59页)

导引头装置,完成单枚导弹不可能完成的任务,显著提高导弹武器系统的抗干扰能力及拦截效能。

4.3 走模块化、低成本之路

多弹协同技术为导弹模块化设计和低成本研发创造了前提条件。一是更换不同的功能或结构模块就可以实现导弹改进改型,并使通用性和任务适应性增强,能缩短研制周期并节省研制费用;二是便于新技术的应用,如综合使用激光、雷达、红外、多模等不同的制导方式,协同互补地工作,提高对运动目标的识别、跟踪能力,还可适度降低末制导系统的难度,降低单枚导弹导引头的成本;另外,采用卫星导航、MEMS 惯性导航等简易导航设备,形成一种低成本精确制导导弹,并根据平台探测系统的信息、自身传感器的感知信息以及与其他导弹之间通过数据链进行信息的互联互通^[12],实现协同制导等作战手段,避免高价值精确制导导弹过多消耗,降低成本,获取最佳作战效益。

5 结束语

随着攻防技术、隐身技术、电磁和光电干扰技术的不断发展,未来多弹协同作战系统也在不断完善和进步,必将呈现出更多优点和良好前景。开展多弹协同作战系统的体系结构设计、协同策略、协同探测、导引控制、数据链、仿真验证等关键技术研究,有重大工程应用意义,为提高防空导弹武器在未来体系作战环境中的精确打击能力和作战效能提供了一种有效的作战途径,为推进导弹武器装备升级换代、促进防空导弹技术的发展奠定了技术基础。

(上接第50页)

何添加粗关联的步骤,其关键在于航迹中断后的门限设置;而且,应着重寻求针对弹道目标的、能应对目标机动的、中断时长较长的中断航迹关联方法。

参考文献

- [1] MUCCI R, ARNOLD J, BAR-SHALOM Y. Track segment association with a distributed field of sensors[J]. Acoustical Society of America, 1985, 78(4):1317-1324.
- [2] 杜渐,夏学知. 面向航迹中断的模糊航迹关联算法[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(5):68-71, 76.
- [3] 齐林,王海鹏,熊伟,等. 基于先验信息的多假设模型中断航迹关联算法[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(4):732-739.
- [4] 俞建国,刘梅,陈锦海. 弹道目标航迹片段关联及优化[J]. 航空学报, 2011, 32(10):1897-1904.
- [5] YEOM S W, KIRUBARAJAN T, BAR-SHALOM Y. Track segment association, fine-step IMM and initialization with Doppler for improved track performance[J]. IEEE Tran-

参考文献

- [1] 肖增博,雷虎民. 防区外多导弹协同突防复合制导研究[J]. 现代防御技术, 2011, 39(1):63-67.
- [2] LEE J I, JEON I S, THAK M J. Guidance law to control impact time and angle[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 13(1):301-310.
- [3] NATHAN H, BALAKRISHNAN S N. Impact time and angle guidance with sliding mode control[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Chicago, USA: AIAA, 2009:1-22.
- [4] 彭琛,刘星,吴森堂,等. 多弹分布式协同末制导时间一致性研究[J]. 控制与决策, 2010, 25(10):1557-1561.
- [5] 王晓芳,郑艺裕,林海. 多导弹协同作战制导律研究[J]. 弹道学报, 2014, 26(1):61-66.
- [6] 胡正东,林涛,张土峰,等. 导弹集群协同作战系统概念研究[J]. 飞航导弹, 2007(10):13-18.
- [7] 马培蓓,纪军. 多导弹三维编队控制[J]. 航空学报, 2010, 31(8):1660-1666.
- [8] 韦常柱,郭继峰,赵彪. 导弹协同作战编队飞行控制系统研究[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(9):1968-1972.
- [9] 马培蓓,纪军,范作娥. 考虑战场环境约束的多导弹协同任务规划[J]. 电光与控制, 2010, 17(8):5-10.
- [10] 李刚,李大鹏,韦道知,等. 导弹导引头隐身技术研究[J]. 飞航导弹, 2014(1):64-68.
- [11] 汪朝群. 多传感器融合技术在导弹武器抗干扰中的作用[J]. 上海航天, 2000(5):51-55.
- [12] 王国田,王航宇,石章松. 美军舰空导弹协同制导技术及其能力分析[J]. 上海航天, 2012(1):28-30.

sactions on Aerospace and Electronic Systems, 2004, 40(1):293-309.

- [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] ZADEH L A. A simple view of the Dempster-Shafer theory of evidence and its implication for the rule of combination[J]. Artificial Intelligence Magazine, 1986, 7(1):85-90.
- [8] HAENNI R. Are alternatives to Dempster's rule of combination real alternative? Comments on "About the belief function combination and the conflict management problem"[J]. Information Fusion, 2002, 3(4):237-239.
- [9] 邓勇,施文康,朱振福. 一种有效处理冲突证据的组合方法[J]. 红外与毫米波学报, 2004, 23(1):27-32.
- [10] MURPHY C K. Combining belief functions when evidence conflicts[J]. Decision Support Systems, 2000, 29(1):1-9.
- [11] 郭跃,刘新学,王才红. 混合坐标系下跟踪自由段弹道导弹的 IMM-UPF 算法研究[J]. 弹道学报, 2015, 27(1):12-17, 23.