

导弹防御系统中的目标综合识别模型

刘永祥 朱玉鹏 黎 湘 庄钊文

(国防科技大学电子科学与工程学院空间电子信息技术研究所 长沙 410073)

摘 要 目标识别是导弹防御系统的支撑技术,本文参考导弹防御系统配置,建立了基于时空信息序贯融合的综合识别数学模型,将专家知识、环境信息以及测量信息共同纳入综合识别流程。在空间域融合中,利用层次分析法度量了各技术途径的可靠性,并基于技术途径的可靠性和识别结果的一致性提出了“融合权重”的概念,用于度量各技术途径参与融合识别的重要程度;在时间域融合中,将 D-S 证据理论应用于融合识别结果的继承和更新。仿真实验结果表明,综合识别模型能够有效融合多个技术途径的局部决策,抑制个别奇异结果,具有较好的容错性能。

关键词 目标识别, 导弹防御, 信息融合

中图分类号: TN959.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)04-0638-05

Integrated Target Discrimination Model in Missile Defense System

Liu Yong-xiang Zhu Yu-peng Li Xiang Zhuang Zhao-wen

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract Target discrimination is a key technique in missile defense system, and after analyzing the defense system configuration, an integrated target discrimination mathematical model based on recursive temporal-spatial data fusion is performed, which brings the expert knowledge, environmental information and measure information into the integrated discrimination flow. During spatial fusion process, the reliability of discrimination approach is measured by Analytical Hierarchy Process (AHP), and the concept of fusion weight is introduced to measure the value of discrimination approach for participating in fusion, which is determined by reliability of discrimination approach and consensus among sensors' results. During temporal fusion process, the fusion discrimination result is inherited and updated by Dempster-Shafer theory. Simulation results show that the integrated discrimination model can fuse the local decision from discrimination approaches effectively, restrain the influence of singularity and tolerate the error of discrimination.

Key words Target discrimination, Missile defense, Data fusion

1 引言

纵观弹道导弹防御技术的发展史,从20世纪60年代开始,研究热点几经调整,开始集中于再入段“大气过滤”,后研究天基助推段拦截,到现在的大气层外中段拦截,如何有效解决目标识别一直是其核心问题之一^[1]。导弹防御系统中各种传感器经过信息处理而获得的目标特征信息涉及温度特性、轨迹特性、材料特性、质量特性以及结构特性等,要实现对导弹目标的可靠识别,需要综合这些特性信息完成对威胁目标群的全面描述。目前,针对弹道导弹防御中的多传感器融合识别,国外已进行了比较深入的研究^[2-5],但主要集中在信息合成层次上,结合导弹防御工作流程全面研究多传感器融合识别的公开文献尚未见诸报道。本文结合导弹防御系统的工作流程,提出了基于时空信息序贯融合的综合识

别模型,包括对各识别途径的评价和多源信息的合成,并完成了仿真实验与结果分析。

2 目标综合识别问题的数学描述

导弹防御系统目标综合识别是各传感器根据实时接收到的目标群信息,判断各目标属于弹头的可信度,进行威胁排序,选取威胁大的目标作为拦截对象。在后续描述中,把“某传感器基于某种特性判断目标属性的过程”称为一个“技术途径”。

设威胁目标群在时刻 t 的状态为 $X(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)\}$, 其中 N 为目标数目。各传感器根据目标群状态 $X(t)$ 某一可测特性信息形成识别结果,可测特性集 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_M\}$, 包括轨迹特性、材料特性、结构特性以及辐射特性等,由于传感器测量能力的限制以及目标特性的时效性,一般只能利用 S 的一个子集 S_k 进行识别。设在时刻 k , 技术途径 i 对目标 j 的识别结果为 $\{g_j^i(k), h_j^i(k), \theta_j^i(k)\}$,

其中 $g_j^i(k)$, $h_j^i(k)$ 和 $\theta_j^i(k)$ 表示通过技术途径 i 将目标 j 判为弹头、诱饵和不能分类的可信度, 且 $g_j^i(k) + h_j^i(k) + \theta_j^i(k) = 1$, $i=1,2,\dots,M_k$, $j=1,2,\dots,N_k$, M_k 和 N_k 表示在时刻 k 参与识别的技术途径个数和目标数。到时刻 l 为止, 通过综合识别, 判断目标 j 为弹头的可信度为

$$G_j(l) = F[g_j^i(k), h_j^i(k), \theta_j^i(k)] \quad (1)$$

其中, $i=1,2,\dots,M_k$, $j=1,2,\dots,N_k$, $k=1,2,\dots,l$, F 为融合算子, 将时刻 l 的识别结果和 l 时刻以前的识别结果进行融合。若 $G_d(l) = \max_{1 \leq j \leq N} \{G_j(l)\}$, 则判目标 d 为主要威胁目标。

图1给出了基于时空信息序贯融合的综合识别模型, 主要包括3个模块: 技术途径动态选择模块、空间域融合和时间域融合。“空间域融合”是将当前时刻多个技术途径的识别结果进行融合处理, “时间域融合”是将当前时刻的融合识别结果与前期的融合结果再合成, 实现导弹防御系统识别结果的继承和更新。

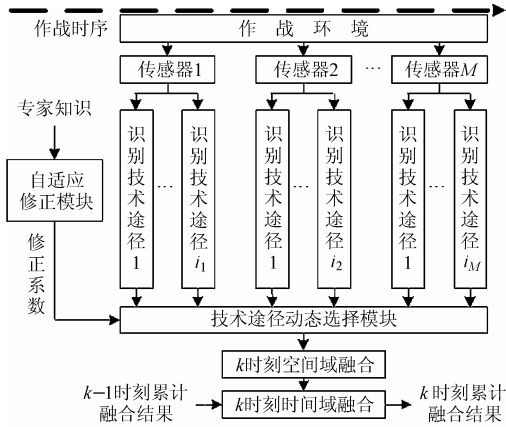


图1 基于时空信息序贯融合的综合识别模型

3 导弹防御系统中目标综合识别数学建模

3.1 空间域融合识别

在导弹防御系统中, 当某一时刻通过多个技术途径获得目标识别结果时, 首要问题是如何评判各技术途径识别结果的有效性, 本文拟从技术途径的可靠性和识别结果的一致性两方面来确定各识别结果参与融合识别的权重。

3.1.1 技术途径的可靠性分析 考察技术途径的目标识别信息处理流程, 如图2, 主要存在以下不确定性: (1)传感器对环境的适应性 θ_E ; (2)传感器测量数据的不精确性 θ_S ; (3)识别算法的稳健性 θ_P ; (4)抽取特征对真假目标区分的有效性 θ_F , 如图2。技术途径的环境适应性 θ_E 是指不同时刻参与融合的技术途径有所不同, 体现在技术途径的动态选择上, 而 θ_S , θ_P , θ_F 使得识别流程具有不确定性, 在确定技术途径的可靠性时需要综合考虑。

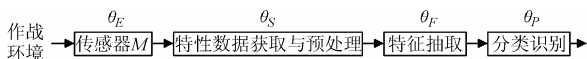


图2 技术途径的不确定性分析

本文借鉴系统工程理论中的层次分析法(AHP)来解决该问题^[6], 其基本思路是: 找出最终决策所涉及的各种因素, 按照其关联隶属关系构造阶梯层次模型, 通过推理分析, 对各因素间的相对重要性进行判断及排序, 从而找到解决问题的最佳方案。图3给出了融合识别问题的阶梯层次模型, 其中技术途径动态选择模块可以自适应地选择参与识别的技术途径集, 各技术途径均以一定权重影响融合识别性能。根据技术途径的不确定性分析可知, 对融合识别性能起主要影响的3个技术指标是: 算法稳健性、数据准确性、特征有效性。阶梯层次模型分为两层, 第1层是3个技术指标对融合识别性能的判断矩阵, 第2层是 M_k 个技术途径对于各技术指标的判断矩阵。

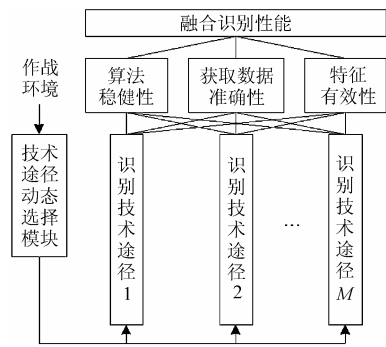


图3 融合识别的阶梯层次模型

设在时刻 k 基于专家经验知识和外界信息确定的判断矩阵为

$$A_k = \begin{pmatrix} a_{11}(k) & \dots & a_{1L}(k) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{L1}(k) & \dots & a_{LL}(k) \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中, L 为相对上层的影响因素数目(第1层为技术指标个数 $L=3$, 第2层为技术途径个数 $L=M_k$) 且满足 $a_{ij}(k) = 1/a_{ji}(k)$, $a_{ij}(k)$ 表示在时刻 k 因素 i 相对于因素 j 的重要性之比。根据矩阵理论, 求解 $A_k \square W_k = \lambda_{k \max} W_k$ 得到的特征向量 $W_k = (\omega_1(k), \omega_2(k), \dots, \omega_L(k))^T$ 即为影响因素集对上层的权值向量, 其中 $\lambda_{k \max}$ 为 A_k 的最大特征值。由于专家判断常常带有主观因素, 判断矩阵往往不满足一致性要求, 即 $a_{ij}(k) = a_{ik}(k)/a_{jk}(k)$, $\forall i, j, k$, 对此, 可通过利用最优传递矩阵改进型的层次分析法, 求得各个因素的影响权重^[7]。

基于上述分析, 先确定3个指标对融合识别性能的影响权值 $W^1 = [W_1^1, W_2^1, W_3^1]$, 然后计算时刻 k 参与识别的 M_k 个技术途径对技术指标集的影响权值 $W^2 = [W^{2,1}, W^{2,2}, W^{2,3}]^T$, 其中, $W^{2,L} = [W_1^{2,L}, W_2^{2,L}, \dots, W_{M_k}^{2,L}]$ 是 M_k 个技术途径对技术指标 L 的影响权值, $L=1,2,3$ 为技术指标序号。由此确定各技术途径对“融合识别性能”的影响权值:

$$W = W^1 \square W^2 = [w_1, w_2, \dots, w_{M_k}] \quad (3)$$

3.1.2 各技术途径识别结果的一致性分析 在空间域融合过程中, 各技术途径可视为共同协作环境下处理不确定性问题

的一组专家,按一定规则协调行动得到一致性结论,降低识别结果的不确定性,增加系统的容错性^[8]。

令 $\mathbf{g}^i(k)=[g_1^i(k),g_2^i(k),\dots,g_{N_k}^i(k)]^T$, $\mathbf{h}^i(k)=[h_1^i(k),h_2^i(k),\dots,h_{N_k}^i(k)]^T$ 表示在时刻 k 技术途径 i 判断 N_k 个目标是弹头和诱饵的可信度, $i=1,2,\dots,M_k$, 此时技术途径 i 和 j 识别结果的距离可定义为

$$d_{ij}(k)=\sqrt{\sum_{l=1}^{N_k}[g_l^i(k)-g_l^j(k)]^2}+\sqrt{\sum_{l=1}^{N_k}[h_l^i(k)-h_l^j(k)]^2} \quad (4)$$

其中 $i,j=1,2,\dots,M_k$, N_k 为时刻 k 待识别的目标数目。从而得到一致性距离度量矩阵:

$$\begin{pmatrix} d_{11}(k) & \dots & d_{1M_k}(k) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{M_k1}(k) & \dots & d_{M_kM_k}(k) \end{pmatrix} \quad (5)$$

令 $d_i(k)=\sum_{j=1}^{M_k}d_{ij}(k)$, 表征技术途径 i 与其他技术途径的

一致性度量, $d_i(k)$ 越小,表明技术途径 i 与技术途径集中其它识别结果的一致性程度越大。针对导弹防御系统中信息序贯处理的特点,定义时间积累一致性度量:

$$D_{ij}(k)=[d_{ij}(k)+D_{ij}(k-1)]/2 \quad (6)$$

其中 $D_{ij}(k)$ 表示到时刻 k 为止,技术途径 i 与 j 的一致性距离度量积累,具有时间上的继承性。未被选择的技术途径不参与式(6)中距离度量积累。

3.1.3 基于可靠性与一致性的技术途径权重确定 根据上述分析,技术途径的可靠性越高,识别结果与其它识别结果的一致性越强,则参与融合的权重应该越高。令 $\mathbf{\Gamma}(k)=[\gamma_1(k),\gamma_2(k),\dots,\gamma_{M_k}(k)]^T$ 表示技术途径集在时刻 k 的融合权重,构造准则函数:

$$J_i(k)=\sum_{j=1}^{M_k}\frac{D_{ij}^2(k)}{w_j^2(k)}\gamma_j^2 \quad (7)$$

其中 $w_j(k)$ 为技术途径 j 在时刻 k 的可靠性权值, $D_{ij}(k)$ 为到时刻 k 为止技术途径 i 与 j 的一致性距离度量积累。 $J_i(k)$ 越小,表明技术途径 i 与可靠性高的技术途径识别结果一致性越强,相应的,在融合识别中的权重应该越大。采用拉格朗日乘子法求解 $\gamma_i(k)$, 使 $\sum_{i=1}^{M_k}J_i(k)\rightarrow\min$, 且满足

$\sum_{i=1}^{M_k}\gamma_i(k)=1$, 得到时刻 k 各技术途径的融合权重:

$$\gamma_l(k)=\left[\sum_{i=1}^{M_k}\frac{D_{il}^2(k)}{w_l^2(k)}\sum_{j=1}^{M_k}\left[\frac{D_{ij}^2(k)}{w_j^2(k)}\right]^{-1}\right]^{-1} \quad (8)$$

其中, $l=1,2,\dots,M_k$ 。根据各技术途径的识别结果 $\{g_j^i(k),h_j^i(k),\theta_j^i(k)\}$ 和融合权重 $\mathbf{\Gamma}(k)=[\gamma_1(k),\gamma_2(k),\dots,\gamma_{M_k}(k)]^T$, 采用多属性决策融合技术^[9]进行融合,得到目标 j 的融合识别结果:

$$\left. \begin{aligned} g_j(k) &= \sum_i \gamma_i \cdot g_j^i(k) \\ h_j(k) &= \sum_i \gamma_i \cdot h_j^i(k) \\ \theta_j(k) &= \sum_i \gamma_i \cdot \theta_j^i(k) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

对各部分可信度进行归一化处理,满足 $g_j(k)+h_j(k)+\theta_j(k)=1$ 。

3.2 时间域融合识别

导弹防御系统通过不断获取目标的观测信息进行分类识别,识别过程时间上的存在延续性,体现为识别结果的继承和实时更新。因此,需要按时序对各时刻获得的识别结果进行融合,满足防御系统对目标识别的可靠性和实时性要求。

D-S证据理论^[10]应用于时间域融合有以下优势:(1)各时间段采用的技术途径不尽相同,降低了各时间段识别结果的相关性,较好满足D-S证据理论要求证据相互独立的假设;(2)识别框架简单,只包括3个元素:弹头、诱饵、未知,利于D-S证据理论的应用。

利用D-S证据理论进行时间域融合的基本思路是:将当前时刻以前的识别积累信息作为一组证据,当前时刻的空间域识别结果作为一组证据,按照D-S证据合成规则,完成融合识别结果的继承和更新。设 $\{g_j(k),h_j(k),\theta_j(k)\}$ 表示目标 j 在时刻 k 的空域融合识别结果, $\{G_j(k-1),H_j(k-1),\Theta_j(k-1)\}$ 表示目标 j 在时刻 k 以前的识别积累结果,则利用D-S证据合成规则得到目标 j 在时刻 k 的识别积累结果为

$$\begin{cases} G_j(k)=K[g_j(k)\cdot G_j(k-1)+g_j(k)\cdot\Theta_j(k-1) \\ \quad +\theta_j(k)\cdot G_j(k-1)] \\ H_j(k)=K[h_j(k)\cdot H_j(k-1)+h_j(k)\cdot\Theta_j(k-1) \\ \quad +\theta_j(k)\cdot H_j(k-1)] \\ \Theta_j(k)=K[\theta_j(k)\cdot\Theta_j(k-1)] \end{cases} \quad (10)$$

其中 $K=[1-g_j(k)\cdot H_j(k-1)-h_j(k)\cdot G_j(k-1)]^{-1}$ 。随着导弹防御识别的进程,根据时空融合结果中各目标属于弹头的可信度 $G_j(k)$ ($j=1,2,\dots,N_k$) 排序,实时识别判断出威胁目标。

4 仿真实验及结果分析

4.1 仿真环境设定

根据导弹防御系统工作流程,对仿真环境作如下设定:

- (1)目标群中目标的数目为5个,目标1为真弹头;
- (2)融合识别过程分为3个阶段,每个阶段采样3次,共有 $k=9$ 个融合节点;
- (3)共有4个技术途径进行识别,每个阶段采用的技术途径有所不同,如表1;
- (4)各技术途径在不同阶段判断各目标属于弹头的可信度会有所不同,如表2,在此基础上,判断各目标属于诱饵和不能分类的可信度随机确定,并满足可信度的归一化;

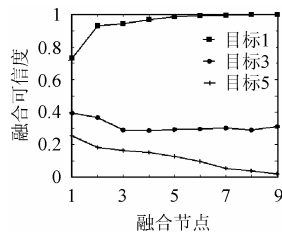


图8 目标1, 3, 5属于弹头的融合可信度比较

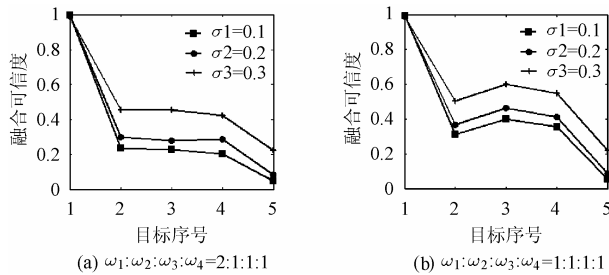


图9 不同识别偏差情况下判断各目标属于弹头的融合可信度

5 结束语

导弹防御系统的目标综合识别技术是优化整合系统资源,提升系统整体识别能力的支撑技术。随着识别任务和系统配置的升级,整个识别流程将不可避免地升级完善,而建立基于时空信息序贯融合处理的综合识别模型就是构建通用的信息评价、合成处理模型,作为识别系统升级完善的平台。

参考文献

- [1] 张光义. 空间探测相控阵雷达. 北京: 科学出版社, 2001: 45 – 76.
- [2] Levine R Y, Khuon T S. Neural networks for distributed sensor

data fusion the firefly experiment. SPIE, Sensor Fusion IV, 1991, Vol.1611: 52 – 64.

- [3] Byrd K, Bjork C. Intelligent fusion processing in BMD applications. SPIE, 1997, Vol.3067: 190 – 196.
- [4] Byrd K, Smith B. Intelligent processing techniques for sensor fusion. SPIE, 1998, Vol.3367: 2 – 15.
- [5] Cuomo K M, Piou J E, Mayhan J T. Ultrawide-band sensor fusion for BMD discrimination. IEEE International Radar Conference, Alexandria, VA, 2000: 31 – 34.
- [6] 周前祥, 张达贤. 工程系统多目标多层次模糊决策模型及其应用. 系统工程与电子技术, 2000, 22(2): 32 – 34.
- [7] 谭跃进. 系统工程原理. 长沙: 国防科技大学出版社, 1999: 78 – 133.
- [8] 刘永祥, 黎湘, 庄钊文. 谈判式时空整体决策信息融合方法研究. 电子与信息学报, 2001, 23(11): 1225 – 1230.
- [9] 曲长文, 何友. 应用多属性决策的威胁评估方法. 系统工程与电子技术, 2000, 22(5): 26 – 29.
- [10] Shafer G. A Mathematical Theory of Evidence. Princeton: Princeton University Press, 1976: 34 – 48.

刘永祥: 男, 1976年生, 博士, 从事信息融合、雷达目标识别的研究工作, 已发表学术论文20余篇。

朱玉鹏: 男, 1981年生, 硕士生, 从事信息融合及自动目标识别方面的研究。

黎湘: 男, 1967年生, 教授, 博士生导师. 已发表学术论文40余篇. 目前主要从事精确制导、信息融合、非线性信号处理等领域的研究工作。

庄钊文: 男, 1958年生, 教授, 博士生导师, 国防科技大学电子科学与工程学院院长. 从事信号处理、自动目标识别、模糊技术等领域的研究工作。