

Fuzzy Recognition of Aerial Target Based on D-S Evidential Theory

Kexin LI, Ruidong HOU, Binbin LIU, Junling XIAO

Department of Electronic Reconnaissance, Shenyang Artillery Academy, Shenyang, China

Email: lekexin@126.com

Abstract: Target type classification is one of the basic contents for air-defense army to estimate battlefield situation. The paper founded the evaluating index system which comprised tactical characters and physical characters of targets by classifying aerial target. Based on D-S evidential theory, the paper analyzed the method about aerial target recognition by using fuzzy recognition theory and redistributing subordinate consideration. At last an example is presented. The experimental results verify the validity of fusion method.

Keywords: aerial target type classification; fuzzy recognition; D-S evidential

基于 D-S 证据理论的空中目标模糊识别

李可心, 侯瑞东, 刘斌彬, 肖俊岭

沈阳炮兵学院电子侦察指挥系, 沈阳, 中国, 110162

Email: lekexin@126.com

摘 要: 对空中目标类型的识别是地面防空系统对空袭情况判断的基本内容, 也是对空中目标的攻击企图和威胁程度进行判断的重要依据。通过对空中目标类型进行归类, 确立了评价指标体系。在基于 D-S 证据理论的基础上, 应用模糊识别理论, 通过对模糊隶属度进行重新分配, 探讨了对空中目标进行识别的算法, 列举了具体的实例, 实验结果验证了算法的有效性。

关键词: 空中目标识别; 模糊识别; D-S 证据理论

1 引言

对空中目标类型的识别是地面防空系统对空袭情况判断的基本内容, 也是对空中目标的攻击企图和威胁程度进行判断的重要依据。通常, 空中目标识别主要通过目标的物理特征如目标的电磁波响应、目标的图像和雷达视频回波信号波形等信息加以实现。随着地面防空系统作战能力的逐步提高和面临空袭环境的日益复杂, 传统的目标类型识别将难以满足防空作战的需要。根据作战的需要, 不同类型的空中目标在作战过程中将呈现出不同的战术特征, 如目标加速度、目标出现时机、目标出现距离等。综合运用目标的物理特征和战术特征对空中目标的类型进行识别将可以提高对目标类型识别的准确性和科学性。由于目标类型识别具有不确定性即模糊性, 而模糊数学可以对不精确的语义信息进行处理, 因而应用模糊逻辑的方法来检测类似事件是可行的。但模糊模式识别在实际应用中存在缺陷, 对于多个

样本可能得出不一致甚至是矛盾的结果, 因而引入 D-S 证据理论, 以提高正确的识别率。

2 空中目标类型的划分及其评价指标体系的建立^[1]

对空中目标类型的划分是对空中目标类型进行识别的基础, 根据未来作战的发展趋势, 防区外精确制导武器攻击已经成为空袭的主要方式, 随着作战范围的逐步增大, 防空部队所面临的空中目标组成将更加复杂。在防空作战范围内, 将可能出现信息保障飞机、作战飞机、各种导弹以及民用飞机等。建立空中目标的类型划分方法见表 1。空中目标类型划分标准综合考虑了信息处理和防空作战两个方面的要求。一方面, 受技术水平的限制, 通常对目标类型处理时只能区分到大飞机、小飞机、导弹, 对目标具体类型的区分需要大量的基础数据和统计实验, 实现较为困难; 另一方面, 由于武器装备性能的改进, 飞机挂载武器类型和机动能力大大提

高,在过去以临空轰炸为主的情况下,歼击机可能只担负掩护任务,但现在歼击机同样可能挂载导弹实施攻击。

Table 1. Classification of aerial target type
表 1. 空中目标类型划分

类别	主要目标	主要特征
信息	预警机 B ₁	发现距离较远,一般不对防区构成
保障	侦察机 B ₂	威胁,但此类目标为敌空袭体系的
飞机	干扰机 B ₃	重要节点,对敌空袭具有重要意义。
	歼击机 B ₄	
作战	轰炸机 B ₅	可以构成直接威胁,是空袭主要作
飞机	直升机 B ₆	战空中平台。
	巡航导弹 B ₇	
导弹	弹道导弹 B ₈	严重的现实威胁。
类	空地(舰)导弹 B ₉	
	民用飞机 B ₁₀	
	鸟群、空飘物、	
其他	遥控飞行器 B ₁₁	特征参数不确定,一般不构成威胁。
	不明类型飞行目	
	标 B ₁₂	

在对空中目标类型划分标准确立的基础上,对融合目标战术特征和物理特征的目标类型区分模型进行研究。不同类型的空中目标所反应出的战术特征和物理特征众多,主要包括目标距离、目标速度、目标飞行高度、目标加速度、编队架(枚)数、目标雷达截面积、雷达回波特征、航向、航路捷径等。由于不同类型的空中目标反映出的特征参数不尽相同,那么根据这些特征参数,就可以建立对空中目标进行识别的指标体系。例如,考察目标的加速度特征:目标的加速度特征主要基于空中目标是否有明确的加速度来进行区分。考虑到作战的需要,歼击机、歼轰机、强击机、轰炸机、直升机等执行作战任务的飞机一般需要进行机动飞行,而运输机、预警机、干扰机等目标则一般是依照固定的航线匀速飞行,导弹在巡航飞行时,其速度也可以认为是不变的,因此根据目标的加速度特征可以大概确定目标的类型。再比如目标的速度和高度特征:空中目标的飞行速度和飞行高度之间的确定关系,一般用飞行包线来描述。飞行包线满足了该类目标理论上可使用的高度和马赫数范围,可以直观地把飞行性能概貌描述出来。飞行包线

所包围的高度——马赫数范围越大,飞机所具有的战斗能力就越强。利用飞行包线可以大致建立超音速飞机(主要包括歼击机、歼轰机、强击机、轰炸机等)、直升机和大型飞机(如预警机、侦察机、加油机等)不同种类飞机的识别模型。

3 目标模糊检测^[2]

假设已知目标特征库中有 N 类样本(识别框架): $\theta = (A_1, A_2, \dots, A_N)$, 且 $\theta_j = (A_{j1}, A_{j2}, \dots, A_{jk})^T$ 是一个含 k 个特征参数的联合特征向量, A_{ji} 表示第 j 类目标的第 i 个特征参数,探测矢量为 $X = (x_1, x_2, \dots, x_k)$, 其中 x_i 表示探测结果中的第 i 个特征参数。

对于观测样本中各参数的隶属度函数 $\mu_{A_j}(x_j)$ 可以采用梯形隶属度计算,即:

$$\mu_{A_j}(x_j) = \begin{cases} 1 & \text{当 } |x_i - A_{ji}| \leq 2\sigma_{ji} \\ \frac{2\sigma_{ji}}{|x_i - A_{ji}|} & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ_{ji} 为 A_{ji} 的偏差, A_{ji} 有多个取值,可以简单地取隶属度函数中最大的作为该参数的隶属度。

在求得各个特征矢量各个参数的模糊隶属度之后,假设 ω_i 为第 i 个参数的权重系数,且有 $\sum_{i=1}^k \omega_i = 1$, $\omega_i \geq 0$, $i = 1, 2, \dots, k$, 可以定义观测样本的最终隶属度 $\mu_{A_j}(X)$ 为:

$$\mu_{A_j}(X) = \sum_{i=1}^k \omega_i \times \mu_{A_{ji}}(x_i) \quad (2)$$

由此求得探测矢量 X 对于样本库 θ 的一组模糊隶属度集合,记为 L:

$$L = \{\mu_{A_1}(X), \mu_{A_2}(X), \dots, \mu_{A_N}(X)\} \quad (3)$$

从而完成一次探测结果的目标识别。为了消除模糊识别过程中随机因素引起的识别错误,将本次模糊识别结果作为一条证据,利用 D-S 证据理论对各周期探测结果进行组合。

4 基于 D-S 证据理论的空中目标识别

4.1 D-S 理论的数学模型

基于证据分析,确定相信一个命题为真的程度的方法,称为证据处理。按照 Shafer^[3]的观点,证据处理的数学模型为:

1) 首先确定辨识框架 θ 。只有确立了框架 θ 才能将对于命题的研究转化为对集合的研究。

2) 根据证据建立一个信度的初始分配, 即证据处理人员对证据加以分析, 确定出证据对每个集合(命题)本身的支持程度。

3) 分析前因后果, 算出对于所有命题的信度。

一批证据对于一个命题提供支持的话, 那么它也应该对该命题的推论提供同样的支持。所以, 对一个命题的信度等于证据对它的所有前提本身提供的支持程度之和。对每个命题的信度用信度函数 (Bel) 表达。

定义 1: 设 θ 为辨识框架, 如果集函数 $m: 2^\theta \rightarrow [0,1]$

(2^θ 为 θ 的幂集, 它是 θ 所有子集的集合) 满足:

$$\begin{cases} m(\varphi) = 0 \\ \sum_{A \subset \theta} m(A) = 1 \end{cases} \quad (4)$$

此时 m 称为框架 θ 上的基本可信度分配。于是由

$$Bel(A) = \sum_{B \subset A} m(B); (\forall A \subset \theta) \quad (5)$$

所定义的函数 $Bel: 2^\theta \rightarrow [0,1]$ 为 θ 上的信度函数。

关于一个命题 A 的信任仅用信度函数来描述还是不够的, 因为 $Bel(A)$ 不能反映怀疑 A 的程度, 即相信 A 的非为真的程度。所以为了全面描述对 A 的信任还必须引入表示怀疑 A 的程度的量, 即似真度函数。

定义 2: 设 $Bel: 2^\theta \rightarrow [0,1]$ 为 θ 上的一个信度函数。

定义:

$$pl: 2^\theta \rightarrow [0,1], pl(A) = 1 - Bel(\bar{A}) \quad (6)$$

则称 pl 为 Bel 的似真度函数。 $pl(A)$ 称为 A 的似真度。它表示不怀疑的程度或者说发现 A 可靠或似真的程度。

根据式 (6), 可以用与 Bel 对应的 m 来重新表示 $pl(A)$:

$$pl(A) = \sum_{B \subset \theta} m(B) - \sum_{B \subseteq A} m(B) = \sum_{B \cap A \neq \varphi} m(B); (\forall B \subset \theta) \quad (7)$$

可见一个事件的合理性是建立在对其相反事件不相信的基础上的。证据推理方法即用基本可信度分配函数获得证据区间, 通过证据区间量化命题的可信度和似真度。

4.2 D-S 合成法则

D-S 合成法则即证据合成法则, 是为了同时利用来

自相互独立的不同信息源的两组(或)多组证据, 提高对事件的置信程度而提出的一种多信息体的组合法则。

定义 3: 设 Bel_1 和 Bel_2 是同一辨识框架 θ 上的两个信度函数, m_1 和 m_2 分别是其对应的基本可信度分配, 若 $A \subseteq \theta$ 且 $m(A) > 0$, 则称 A 为焦元, 焦元分别为 A_1, A_2, \dots, A_k 和 B_1, B_2, \dots, B_l , 设

$$K = \sum_{A_i \cap B_j = \varphi} m_1(A_i) \cdot m_2(B_j) < 1,$$

那么, 由下式定义的函数 $m: 2^\theta \rightarrow [0,1]$ 是基本可信度分配^[4]:

$$\begin{cases} m(A) = 0 \\ m(A) = \frac{\sum_{A_i \cap B_j = A} m_1(A_i) \cdot m_2(B_j)}{1 - \sum_{A_i \cap B_j = \varphi} m_1(A_i) \cdot m_2(B_j)} \end{cases} \quad (8)$$

对于多个证据的组合, 可采用上述规则依次进行组合。

定理 1: 设 $Bel_1, Bel_2, \dots, Bel_n$ 是同一识别框架 θ 上的信度函数, m_1, m_2, \dots, m_n 分别是其对应的基本可信度分配, 如果 $Bel_1 \vee Bel_2 \vee \dots \vee Bel_n$ 存在且基本可信度分配为 m , 则 n 个信任函数的组合为 $((Bel_1 \vee Bel_2) \vee Bel_3) \vee \dots \vee Bel_n$, 式中 \vee 表示直和, 由组合证据获得的最终证据与其次序无关。

4.3 D-S 方法在空中识别的应用

假设某防空预警雷达对指定空域进行周期性探测, 则 t 次探测就对应 t 个结果。记第 i 次探测结果为:

$$L_i = \{\mu_{A_1}(X(i)), \mu_{A_2}(X(i)), \dots, \mu_{A_N}(X(i))\}, \\ i = 1, 2, \dots, t$$

这样就可以找出与评判对象有关的基本因素集 $\{L_1, L_2, \dots, L_t\}$, 对于每一个因素 L_i 赋予一个信任度, 即就认为获得一条证据, 可给出信任函数 $Bel(A)$:

$$Bel(A) = \sum_{B \subset A} m(B) \quad (9)$$

取 $Bel_i = L_i$, 通过运用证据理论的组合规则可以对隶属度函数进行组合, 得出最终信任度进而做出武器平台类型判别。

5 实例及其分析

假设对某一批次空中目标进行三次扫描, 获得有关目标的参数如表 2 所示:

现某防空系统内雷达在指定探测空域内发现目标,

要求根据跟踪探测结果来确定目标类型，以便进行威胁评估和作战指挥决策。

该案例的识别框架为 $\{A_1, A_2, A_3, A_4, A_5\}$ ，识别框架的命题集及其含义如表 2 所示。

Table 2. Recognition frame and meaning
表 2. 识别框架的命题集及其含义

序号	1	2	3	4	5
命题	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6
含义	侦察机	干扰机	歼击机	轰炸机	直升机

以探测目标的如下特征作为证据参数进行提取：飞行速度、飞行高度、目标雷达截面积、加速度、发现距离。现已根据数据信息的前极模糊融合得到加权综合隶属度，表 3 为 4 个探测周期得到的模糊综合隶属度（归一化处理）。

Table 3. Weighted of fuzzy recognition
表 3. 模糊识别的加权综合隶属度

隶属度	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
L_1	0.20	0.30	0.20	0.15	0.15
L_2	0.20	0.10	0.30	0.20	0.20
L_3	0.10	0.10	0.40	0.20	0.20
L_4	0.10	0.05	0.40	0.15	0.25

在表 2 的基础上，运用 D-S 证据理论对上述隶属度（信任度）进行规则组合，得到表 4 所示结果：

Table 4. Confidence level
表 4. 组合隶属度（信任度）

信任度	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6
$L_1 \oplus L_2$	0.210	0.158	0.316	0.158	0.158
$L_1 \oplus L_2 \oplus L_3$	0.091	0.070	0.559	0.140	0.140
$L_1 \oplus L_2 \oplus L_3 \oplus L_4$	0.040	0.012	0.758	0.071	0.119

由此看出，随着测量周期的增多，使得 B_4 的可信度达到 0.758。这里选取阈值为 0.75，决策结果为 B_4 ，即武器平台类型识别结果为某型歼击机。

6 结束语

本文综合运用模糊识别和 D-S 证据理论，对空中目标在多周期模糊识别的基础上进行证据组合，较好的克服了随机因素的消极影响，大大提高了空中目标的识别率。随着测量次数 t 的增加（证据更加充分），正确识别率将会更高，但会使系统反应变慢，实际应用中应当根据作战适时性要求适当选取 t 值，保障时间特性，以达到满足作战需求的目的。

致 谢

在课题的研究过程中，得到了沈阳炮兵学院夏忠武教授和刁华宗教授的大力支持，在此表示感谢。

References (参考文献)

- [1] Li Dun, The Study of Target Recognition Based on That the Polarization of the Echo Tends to the Pseudo-eigen Polarization of the Target [J], *ACTA Electronica SINICA*, 1999, 27(9): P1-4. 李盾. 基于回波趋向伪本征极化特性的目标识别研究[J]. 电子学报, 1999, 27(9): 1-4
- [2] Guo Guirong, Fuzzing pattern recognition[M], National Defense Press, 1993. 郭桂蓉. 模糊模式识别[M]. 长沙: 国防大学出版社, 1993.
- [3] SHAFER G.A. Mathematical theory of evidence[M]. Princeton N J: Princeton University Press, 1976.
- [4] SMET P. The combination of evidence in the transferable belief model. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intelligence*, 1990.