

文章编号: 1001-2486(2001)04-0083-05

## 基于运动状态和敌我属性的空中目标融合识别\*

王壮, 郁文贤, 庄钊文, 胡卫东

(国防科技大学 ATR 重点实验室, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 研究了基于实时跟踪器的空中目标航迹身份识别问题。从分析目标运动状态和敌我属性的不确定性出发, 建立了空中目标身份统计模型; 根据建立的模型, 通过采用 Dempster-Shafer 证据理论方法, 对空中目标进行融合识别。仿真实验结果证明了模型和算法的有效性。

**关键词:** 目标身份建模; D-S 证据理论; 融合识别

**中图分类号:** TP391.4 **文献标识码:** A

### Air Target Fusion Identification Based on Kinematic State and Foe-Friend Attribute

WANG Zhuang, YU Wen-xian, ZHUANG Zhao-wen, HU Wei-dong

(ATR Key Lab, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** This paper considers the problem of air target track identification based on the real-time tracker in surveillance system. The air target identity statistical model is established by analyzing the uncertainty of kinematic state and our and the enemy's attributes. Dempster-Shafer method is applied to develop the air target fusion identification. The results of simulation experiment show the applicability and effectiveness of the model and the algorithm.

**Key words:** target identity modeling; D-S evidential theory; fusion identification

现代战争要求作为作战指控系统神经中枢的  $C^4$ ISR 系统能够进行全方位、实时的目标识别。目前,  $C^4$ ISR 系统中目标识别的研究主要侧重于成像雷达目标识别、光学图像识别、无源侦察识别<sup>[1]</sup>等, 而基于实时跟踪器的目标识别研究并不十分受到关注。成像雷达目标识别无法满足实时警戒的要求; 光学系统易受灰尘、云团以及目标距离等因素的影响; 当敌方处于电磁静默状态时, 无源侦察无法发挥作用。而利用  $C^4$ ISR 系统中的多传感器可以全天候、实时地提供目标的跟踪结果, 是可靠的目标识别数据来源, 可以对空中目标身份进行层次化识别: 速度和俯仰角能够鉴别跟踪算法无法排除的虚假航迹, 有助于态势评估和改善警戒图的显示; 敌我属性和加速度可以分别用于区分敌我目标以及军用和民用目标, 有助于威胁评价<sup>[2]</sup>; 联合使用速度和高度可以进一步把目标细分成不同种类, 可以辅助进行资源分配。

发展这样一个目标识别器的主要困难是: 如何利用跟踪器提供的目标信息建立适合实时处理的身份模型。本文从分析目标运动状态和敌我属性的不确定性出发, 重点研究了空中目标身份建模问题, 并利用 Dempster-Shafer 证据理论方法对空中目标进行了融合识别。

## 1 空中目标身份建模

### 1.1 基于速度特征的统计模型

依据目标速度  $v_x$ ,  $v_y$  和  $v_z$  的变化, 定义特征  $X_1$  如下:

$$X_1 = \begin{cases} \text{稳定(stable)}, & \text{如果 } v_x, v_y \text{ 和 } v_z \text{ 在相邻扫描周期内都变化不大} \\ \text{不稳定(unstable)}, & \text{否则} \end{cases} \quad (1)$$

其中  $v_x$ ,  $v_y$  和  $v_z$  分别表示  $x$ ,  $y$ ,  $z$  方向的目标速度。通常在相邻扫描周期内, 真实航迹的速度变化

\* 收稿日期: 2001-03-01

基金项目: 国家部委基金资助(98.J6.6.2.KG0112); 国家部委项目资助(6.4.2.4)

作者简介: 王壮(1973-), 男, 博士生。

是极小的,而虚假航迹的速度变化是毫无规律的。假设在第  $i$  个扫描周期,目标的估计速度分别是  $z_{1x}(i) = v_x + w_{1x}(i)$ ,  $z_{1y}(i) = v_y + w_{1y}(i)$  和  $z_{1z}(i) = v_z + w_{1z}(i)$ , 这里  $w_{1x}(i)$ ,  $w_{1y}(i)$  和  $w_{1z}(i)$  分别是均值为 0, 方差为  $\sigma_{1x}^2$ ,  $\sigma_{1y}^2$  和  $\sigma_{1z}^2$  的可加白色高斯过程。如果  $w_{1x}(i)$ ,  $w_{1y}(i)$  和  $w_{1z}(i)$  是相互独立的, 我们可以获得基于速度的空中目标身份统计模型:

$$\begin{aligned}
 & p(z_1(i) | X_1 = \text{stable}) \\
 &= \int_{\frac{v_{\min} + v_x(i-1)}{v_{\max} + v_x(i-1)}}^{v_{\max} + v_x(i-1)} p(x | z_{1x}(i)) dx \cdot \int_{\frac{v_{\min} + v_y(i-1)}{v_{\max} + v_y(i-1)}}^{v_{\max} + v_y(i-1)} p(y | z_{1y}(i)) dy \cdot \int_{\frac{v_{\min} + v_z(i-1)}{v_{\max} + v_z(i-1)}}^{v_{\max} + v_z(i-1)} p(z | z_{1z}(i)) dz \quad (2) \\
 &= \int_{\frac{z_{1x}(i) - v_{\max} - v_x(i-1)}{z_{1x}(i) - v_{\min} - v_x(i-1)}}^{z_{1x}(i) - v_{\min} - v_x(i-1)} p_{w_{1x}}(x) dx \cdot \int_{\frac{z_{1y}(i) - v_{\max} - v_y(i-1)}{z_{1y}(i) - v_{\min} - v_y(i-1)}}^{z_{1y}(i) - v_{\min} - v_y(i-1)} p_{w_{1y}}(y) dy \cdot \int_{\frac{z_{1z}(i) - v_{\max} - v_z(i-1)}{z_{1z}(i) - v_{\min} - v_z(i-1)}}^{z_{1z}(i) - v_{\min} - v_z(i-1)} p_{w_{1z}}(z) dz
 \end{aligned}$$

其中  $v_{\max}$  和  $v_{\min}$  是决定目标稳定性的权值, 而  $p_{w_{1x}}$ ,  $p_{w_{1y}}$  和  $p_{w_{1z}}$  分别是  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的高斯白噪声分布。若  $v_{1x}(i)$  与  $v_{1x}(i-1)$  的差距在  $[v_{\min}, v_{\max}]$  范围内, 则在第  $i$  个扫描周期, 目标  $x$  方向的速度将以较高概率被认为是稳定的。对于  $v_{1y}$  和  $v_{1z}$  也可照此处理。

### 1.2 基于俯仰角特征的统计模型

依据目标俯仰角  $\psi(i)$  的变化, 定义特征  $X_2$  如下:

$$X_2 = \begin{cases} \text{常量 (constant)}, & \text{如果 } \psi(i) \text{ 在相邻扫描周期内变化不大} \\ \text{非常量 (unconstant)}, & \text{否则} \end{cases} \quad (3)$$

目标俯仰角可以直接通过雷达测量来获得, 其测量值通常被认为是由俯仰角真值  $\psi(i)$  加上可加性测量噪声  $w_2$  而构成的。基于俯仰角的空中目标身份统计模型  $p(z_2 | X_2)$  计算如下:

$$\begin{aligned}
 p(z_2(i) | X_2 = \text{constant}) &= \int_{\frac{h_{\min} + \psi(i-1)}{h_{\max} + \psi(i-1)}}^{h_{\max} + \psi(i-1)} p(\psi(i) | z_2(i)) d\psi(i) = \int_{\frac{z_2(i) - h_{\min} - \psi(i-1)}{z_2(i) - h_{\max} - \psi(i-1)}}^{z_2(i) - h_{\min} - \psi(i-1)} p_{w_2}(y) dy \quad (4) \\
 p(z_2(i) | X_2 = \text{nonconstant}) &= 1 - \int_{\frac{h_{\min} + \psi(i-1)}{h_{\max} + \psi(i-1)}}^{h_{\max} + \psi(i-1)} p(\psi(i) | z_2(i)) d\psi(i) = 1 - \int_{\frac{z_2(i) - h_{\min} - \psi(i-1)}{z_2(i) - h_{\max} - \psi(i-1)}}^{z_2(i) - h_{\min} - \psi(i-1)} p_{w_2}(y) dy \quad (5)
 \end{aligned}$$

其中  $h_{\max}$  和  $h_{\min}$  是决定目标高度稳定性的权值。若  $\psi(i)$  与  $\psi(i-1)$  的差距在  $[h_{\min}, h_{\max}]$  范围内, 则在第  $i$  个扫描周期, 目标的高度将以较高概率被认为是稳定的。

### 1.3 基于敌我属性特征的统计模型

依据来自于敌我识别器的敌我属性识别结果, 定义特征  $X_3 =$  目标身份 (TID) 如下:

$$X_3 = \begin{cases} \text{TID} & \text{航迹有一个正确的身份} \\ \text{no TID} & \text{航迹没有一个身份} \end{cases} \quad (6)$$

由于测量噪声可能会淹没目标身份信息或者关联算法可能将杂波错误地关联到航迹上, 因此一个包含  $N$  个点迹的航迹也许会由  $M$  个携带 TID 的点迹和  $N - M$  个不携带 TID 的点迹组成。所以, 基于敌我属性特征的空中目标身份统计模型是:

$$p(z_3 | X_3 = \text{TID}) = \frac{p_t^M (1 - p_t)^{N-M}}{[p_t^M (1 - p_t)^{N-M} + (1 - p_t)^M p_t^{N-M}]} \quad (7)$$

$$p(z_3 | X_3 = \text{no TID}) = \frac{(1 - p_t)^M p_t^{N-M}}{[p_t^M (1 - p_t)^{N-M} + (1 - p_t)^M p_t^{N-M}]} \quad (8)$$

其中  $p_t$  是一个友方目标的点迹携带 TID 的概率, 它依赖于敌我识别器的识别率。

### 1.4 基于加速度特征的统计模型

基于目标加速度, 定义特征  $X_4$  如下:

$$X_4 = \begin{cases} \text{机动 (maneuver)}, & \text{如果存在一个有目的的加速度} \\ \text{不机动 (no maneuver)}, & \text{否则} \end{cases} \quad (9)$$

这是以目标执行机动必须进行加速这一事实为依据的。军用飞机由于作战的需要, 在飞行过程中经常需要进行机动飞行; 而民用飞机一般按照固定的航线平稳飞行。假设  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的加速度  $a_x$ 、

$a_y$  和  $a_z$  是均值为 0，方差为  $\sigma_{ax}^2$  的相互独立的高斯过程。令  $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$  作为我们的观察  $z_4$ ，因此基于加速度特征的空中目标身份统计模型是：

$$p(z_4 | X_4 = \text{no maneuver}) = \int_0^{\theta_a} p_{z_4}(y) dy = \text{erf}\left[\frac{\theta_a}{\sqrt{2}\sigma_{ax}}\right] - \frac{\sqrt{2}\theta_a}{\sqrt{\pi}\sigma_{ax}} e^{-\frac{\theta_a^2}{2\sigma_{ax}^2}} \quad (10)$$

$$p(z_4 | X_4 = \text{maneuver}) = 1 - \int_0^{\theta_a} p_{z_4}(y) dy = 1 - \text{erf}\left[\frac{\theta_a}{\sqrt{2}\sigma_{ax}}\right] + \frac{\sqrt{2}\theta_a}{\sqrt{\pi}\sigma_{ax}} e^{-\frac{\theta_a^2}{2\sigma_{ax}^2}} \quad (11)$$

其中  $\theta_a$  是决定目标机动与否的权值。

### 1.5 基于速度和高度特征的统计模型

在空气动力学中，飞机飞行性能的两个最基本的特征——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。飞行包线满足了理论上可使用的高度和马赫数范围，直观地把飞机的飞行性能概貌表示出来。它所包围的高度—马赫数范围越大，飞机所具有的战斗能力就越强。图 1 给出了六种不同作战飞机的飞行包线。利用飞行包线可以大致建立超音速飞机、直升机和大型飞机（如战略轰炸机）等三种不同种类飞机的识别模型<sup>[3]</sup>。

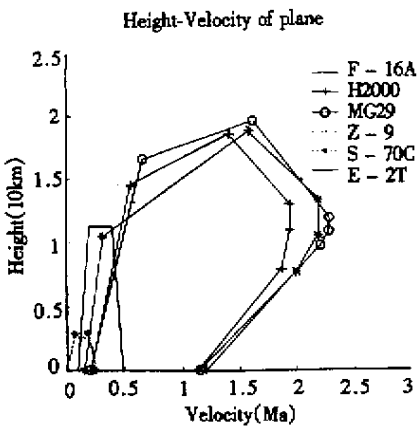


图 1 在  $H - Ma$  平面上的飞行包线

Fig.1 Height-Ma curve of planes

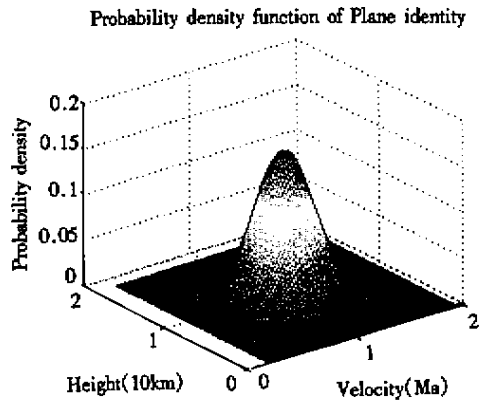


图 2 超音速飞机飞行高度和速度联合概率密度函数曲线

Fig.2 Joint probability density function curve of supersonic's height and velocity

通过对大量统计数据的计算，可以获得不同种类飞机的飞行高度和飞行速度联合概率密度函数  $p((z_H, z_v) | P_j)^{[4]}$ ，其中  $P_j$  表示不同种类的飞机（如超音速飞机）， $z_H$  和  $z_v$  分别表示飞机飞行高度和飞行速度的观测值。图 2 给出了超音速飞机的飞行高度和飞行速度联合概率密度函数曲线。因此基于飞行速度和飞行高度联合特征的空中目标身份统计模型是：

$$p(z_5 | P_j) = \int_{z_H - \sigma_H}^{z_H + \sigma_H} \int_{z_v - \sigma_v}^{z_v + \sigma_v} p((x, y) | P_j) dx dy \quad (12)$$

其中  $\sigma_H$  和  $\sigma_v$  分别表示飞行高度和飞行速度的测量误差。

## 2 Dempster-Shafer 目标融合识别算法

在 D-S 证据理论中，由互不相容的假设（基本命题）组成的完备集合被称为识别框架，表示对某一问题的所有可能答案（其中仅有一个答案是正确的）。识别框架  $\Theta$  的子集被称为命题。对于空中目标融合识别问题而言， $\Theta = \{H_1, H_2, H_3, H_4, H_5, H_6, H_7, H_8, H_9\}$ ，其中  $H_1$  = 我方民用飞机， $H_2$  = 我方军用超音速飞机， $H_3$  = 我方军用直升机， $H_4$  = 我方军用大型飞机， $H_5$  = 敌方民用飞机， $H_6$  =



为了更加细致地分析模型和算法的有效性,图3(b)-(f)给出了我方超音速飞机融合识别结果中某些命题的 BPA 值变化曲线( $x$ 轴为扫描周期数,扫描周期为1秒, $y$ 轴为 BPA 值)。图3(b)为虚假航迹,(c)为我方民用飞机,(d)为敌方民用飞机,(e)为我方超音速飞机,(f)为敌方超音速飞机。从图中可以看出,在航迹建立的初始阶段,不同命题的 BPA 值变化较为剧烈。特别是由于大量测量噪声和杂波淹没了目标的敌我应答,导致了在短时间内分配给敌方超音速飞机命题的 BPA 值较大。但是错误命题的 BPA 值很快便趋向于0,而分配给正确命题的 BPA 值便收敛于一个稳定的大值。这从另一个角度验证了空中目标身份统计模型和 D-S 算法的有效性。

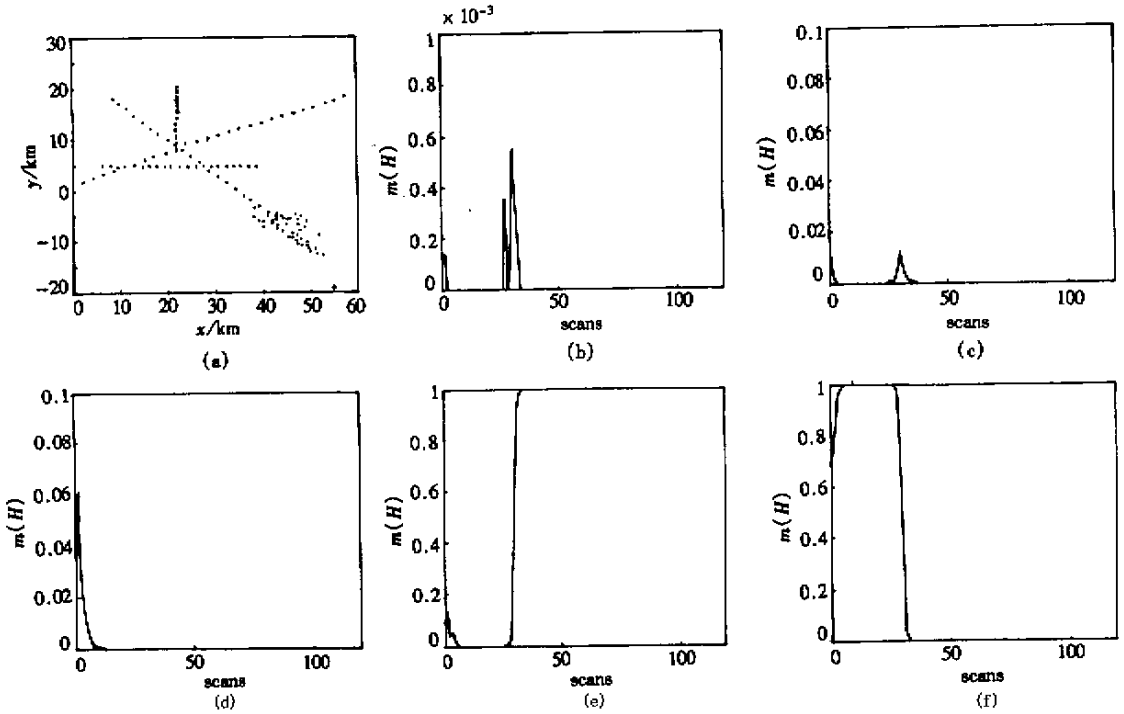


图3 我方超音速飞机融合识别结果分析

Fig.3 Result of fusion identification of friend supersonic

## 4 结论

本文从目标运动状态和敌我属性的不确定性出发,建立了空中目标身份统计模型;开发了基于 D-S 证据理论的目标综合识别算法。实验结果表明,模型能够较好地刻画空中目标不同层次的身份,目标综合识别算法是有效可行的。本文的研究内容不仅对开发基于跟踪器的自动目标识别算法具有重要的意义,而且为今后与  $C^4$ ISR 系统中其他信源提供的目标信息进行融合识别奠定了坚实的基础。

## 参考文献:

- [1] Teti J G Jr, Gorman R P, Berger W A. A multifeature decision space approach to radar target identification[J]. IEEE Trans. on A. E. S, 1996, 32(1).
- [2] Henry Leung, Jiangfeng Wu. Bayesian and Dempster-Shafer target identification for radar surveillance [J]. IEEE Trans. on A. E. S, 2000, 36(2).
- [3] 金长江, 范立钦. 飞行动力学-飞机飞行性能计算(修订本)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990.
- [4] Dillard R A, Statistical Decision Making with Uncertain and Conflicting Data[R]. AD-A243 853, 1992.



