

基于 ESM 与 ELINT 信息融合的机载辐射源识别

王杰贵^{1,2}, 靳学明¹, 罗景青²

(1 中国电子科技集团第 38 研究所, 安徽合肥 230031; 2 电子工程学院 EW 信息处理实验室, 安徽合肥 230037)

摘要: 本文深入研究了 ESM 和 ELINT 多传感器系统的机载辐射源识别方法. 首先针对 ESM 系统提供的辐射源多特征信息, 提出了基于模糊综合评估获取基本可信度赋值函数 (BPAF) 的方法; 针对 ELINT 系统量测数据的特点, 提出了基于灰关联分析的 BPAF 获取方法. 在此基础上, 研究了应用 D-S 证据理论进行多传感器信息融合, 从而识别机载辐射源的原理. 识别实例和对比实验表明, 本文提出的 BPAF 获取方法是实用有效的, 基于信息融合的识别正确率高.

关键词: ESM; ELINT; 证据理论; 信息融合; 辐射源识别

中图分类号: TN991 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 03-0424-05

Airborne Em itter Recognition Based on Multisensor Data Fusion of ESM and ELINT

WANG Jie-gui^{1,2}, JIN Xuem ing¹, LUO Jing-qing²

(1. East China Research Institute of Electronic Engineering Hefei Anhui 230031, China

2. Electronic Engineering Institute Hefei Anhui 230037, China)

Abstract The method of airborne emitter recognition based on multisensor system of ESM and ELINT is deeply discussed in this paper. First based on the measurement of ESM system, a new method to calculate the Basic Probability Assignment Function (BPAF) with fuzzy synthetic evaluation is proposed. Based on the measurement of ELINT system, the method to calculate the BPAF with the gray correlation analysis is proposed too. And further the paper introduces the multisensor data fusion method based on the Dempster-Shafer (D-S) evidence theory, which is applied to the airborne emitter recognition of multisensor system of ESM and ELINT. The experiments indicate that the proposed method to calculate BPAF is practicable and the recognition method is effective.

Key words ESM; ELINT; evidence theory; data Fusion; emitter recognition

1 引言

对于目标识别来说, 单传感器提取的信息往往是待识别目标的不完全描述, 而利用多个传感器提取的独立、互补的信息, 进行多传感器信息融合, 可以消除多传感器信息之间可能存在的冗余和矛盾, 降低不确定性, 并产生新的有意义的信息, 这样有利于提高识别性能.

在多传感器数据融合时, 如果采用 Bayes 方法, 则需要一些先验概率, 这是很麻烦甚至是不可能的事. 如果采用 D-S (Dempster-Shafer) 证据理论^[1,2], 则由于 D-S 证据理论采用基本可信度赋值函数 (BPAF, Basic Probability Assignment Function) 而不是概率作为度量, 因此巧妙地解决了这一问题, 但 BPAF 的获取问题一直是 D-S 证据理论的一个

重点和难点问题^[3].

在现代电子战中, 空中打击力量的作用越来越重要. 而空中打击的保障以及打击的效果, 主要依赖于作战飞机的“眼睛”——机载辐射源. 因此, 对机载辐射源的识别始终是电子对抗信号处理的一个重要任务. 而随着高科技的应用和反侦察措施的加强, 对机载辐射源的识别也越来越困难. 目前, 对机载辐射源的识别, 大都是利用单一传感器或同一种类的多传感器系统^[7], 这些方法获取信息的互补性比较差, 因此在复杂条件下, 尤其是传感器对某些信息不可观测的情况下, 其识别性能一般不是太好.

本文提出了由多个 ESM (Electronic Support Measures) 和 ELINT (Electronic Intelligence) 构成的多传感器系统, 通过信息融合进行机载辐射源识别的方法. 针对 ESM 和

*ELNT*系统提供的不同观测信息,分别提出了基于模糊综合评估和灰关联分析的 *BPAF*获取方法,解决了不同条件下 *D-S*证据理论的 *BPAF*获取难题.在此基础上,详细阐述了基于 *D-S*证据理论的多传感器信息融合原理,以及应用于机载辐射源识别的有关问题.计算机仿真结果表明,本文提出的 *BPAF*获取方法有效、实用,识别方法性能优越,识别结果令人满意.

2 *BPAF*获取方法研究

*D-S*证据理论用识别框架 Θ 表示所感兴趣的命题集,命题 *A*为 Θ 的非空子集.如果函数 $m: 2^{\Theta} \rightarrow [0, 1]$,且满足

$$\begin{cases} m(\Phi) = 0 \\ \sum_{A \in \Theta} m(A) = 1 \end{cases} \quad (1)$$

则称 *m*是 Θ 上的基本可信度赋值函数 *BPAF*, *m*(*A*)反映了对 *A*的信度大小.

*BPAF*获取是应用证据理论的一个关键,本文根据 *ESM*系统和 *ELNT*系统提供的量测数据的不同,分别给出了不同的 *BPAF*获取方法.对于 *ESM*系统,我们基于辐射源多特征信息,运用模糊综合评估的方法得到 *BPAF*;对于 *ELNT*系统,我们运用灰关联分析的方法获取 *BPAF*.

2.1 *ESM*系统的 *BPAF*获取

因素集的构造: *ESM*系统提供的观测值通常包括辐射源的载频(*RF*)、脉冲重复周期(*PRI*)、脉宽(*PW*)、脉内特征(*IPC*)等特征数据^[4].在运用模糊综合评估模型^[5]确定 *BPAF*时,因素集确定为 *RF*、*PRI*、*PW*和 *IPC*这四个特征数据,记为 $\{f^m, T^m, t^m, C^m_p\}$,上标 *m*表示观测值.

权重的确定:在进行信度大小的评估时, *BPAF*的取值同各项因素权重的选择有着直接的关系.本文中,对 *RF*、*PRI*、*PW*和 *PC*权重的初始分配通过专家知识给定,然后根据多次 *Monte Carlo*实验结果加以修正,分别以 a_1, a_2, a_3, a_4 表示,它们满足归一化条件,即: $a_1 + a_2 + a_3 + a_4 = 1$

评价集的形成:对信度大小的评估,如果用一组模糊语言{很高,较高,一般,较低,很低}作为评价集,那么,评估效果很粗糙,且不利于辐射源的自动识别.为此,我们选用实数集 $V = \{x | 0 \leq x \leq 1\}$ 作为评价集, *x*的值越大,表示信度越大, *x*的值越小,表示信度越小.

单因素评估: *ESM*系统的 *BPAF*由辐射源多特征信息综合评估得到,首先进行单因素评估,下面给出了不同特征参数信度值的具体定义.

(1)基于 *RF*的信度值

对不同频率类型的辐射源,基于 *RF*信度值的定义是不同的.这里给出几种常见频率类型的 *RF*信度值的定义.如果知识库中第 *i*个辐射源的频率类型为频率固定,其频率中心值为 f_i ,则观测频率与该辐射源的频率差值 $\Delta f_i = |f - f_i|$,此时,基于 *RF*信度值的定义如下

$$m_{rf}(i) = \begin{cases} 1 & \Delta f_i \leq \xi \\ \frac{|\Delta f_i - 2\xi|}{\xi} & \xi < \Delta f_i < 2\xi \\ 0 & \Delta f_i \geq 2\xi \end{cases} \quad (2)$$

其中 ξ 是由系统噪声与量测噪声所确定的测频容差,下同.

如果第 *i*个辐射源的频率类型为频率捷变,其频率中心值为 f_i ,捷变频率范围为 f_i ,则观测频率与该辐射源的频率差值 $\Delta f_i = |f^m - f_i|$,此时,基于 *RF*信度值的定义如下

$$m_{rf}(i) = \begin{cases} 1 & \Delta f_i \leq f_i + \xi \\ \frac{|\Delta f_i - f_i - 2\xi|}{\xi} & f_i < \Delta f_i - f_i < 2\xi \\ 0 & \Delta f_i \geq f_i + 2\xi \end{cases} \quad (3)$$

如果第 *i*个辐射源的频率类型为频率分集,以频率二分集为例,设频率中心值分别为 f_{i1}, f_{i2} ,则频率差值为 $\Delta f_{ij} = |f^m - f_{ij}|$, $j = 1, 2$,此时,基于 *RF*信度值的定义如下

$$m_{rf}(i) = \begin{cases} 1 & \Delta f_{i1} \leq \xi, \text{ or } \Delta f_{i2} \leq \xi \\ \frac{|\Delta f_{ij} - 2\xi|}{\xi} & \xi < \Delta f_{ij} < 2\xi, j = 1, 2 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

(2)基于 *PRI*的信度值

对不同脉冲重复周期类型的辐射源,基于 *PRI*信度值的定义是不同的.这里给出几种常见脉冲重复周期类型的 *PRI*信度值的定义.如果知识库中第 *i*个辐射源的 *PRI*类型为重频固定,其 *PRI*中心值为 T_{ri} ,则观测 *PRI*与该辐射源的 *PRI*差值 $\Delta T_{ri} = |T_r^m - T_{ri}|$,此时,基于 *PRI*信度值的定义如下

$$m_{pri}(i) = \begin{cases} 1 & \Delta T_{ri} \leq T_{ie} \\ \frac{|\Delta T_{ri} - 2T_{ie}|}{T_{ie}} & T_{ie} < \Delta T_{ri} < 2T_{ie} \\ 0 & \Delta T_{ri} \geq 2T_{ie} \end{cases} \quad (5)$$

其中 T_{ie} 是由系统噪声与量测噪声所确定的脉冲重复周期测量容差.

如果第 *i*个辐射源的 *PRI*类型为重频参差,以二参差为例,设骨架周期为 T_{ri} ,二参差重复间隔分别为 T_{ri1}, T_{ri2} ,则 *PRI*差值为 $\Delta T_{rij} = |T_r^m - T_{rij}|$, $j = 1, 2$ 此时,基于 *PRI*信度值的定义如下

$$m_{pri}(i) = \begin{cases} 1 & \Delta T_{ri1} \leq T_{ie}, \text{ or } \Delta T_{ri2} \leq T_{ie}, \text{ or } \Delta T_{ri} \leq T_{ie} \\ \frac{|\Delta T_{rij} - 2T_{ie}|}{T_{ie}} & T_{ie} < \Delta T_{rij} < 2T_{ie}, j = 1, 2 \\ \frac{|\Delta T_{ri} - 2T_{ie}|}{T_{ie}} & T_{ie} < \Delta T_{ri} < 2T_{ie} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

(3)基于 *PW*的信度值

对不同脉宽类型的雷达, 基于 PW 信度值 $m_{PW}(i)$ 的定义是不同的. $m_{PW}(i)$ 的定义原则同于频率信度值的定义, 由于脉宽类型比较简单, 这里不再给出 $m_{PW}(i)$ 的具体定义.

(4) 基于 IPC 的信度值

对于脉内特征, 我们只考虑脉内调频、脉内调相以及无脉内特征这三种情况. 基于 IPC 信度值的定义原则是: 如果待识别辐射源与比较辐射源均无脉内特征, 则 $m_{IPC}(i) = 1$; 如果两辐射源一个有脉内特征, 一个无脉内特征, 则 $m_{IPC}(i) = 0$; 如果两辐射源都有脉内特征, 且脉内特征相同, 则 $m_{IPC}(i) = 1$; 如果两辐射源都有脉内特征, 但脉内特征不同, 则 $m_{IPC}(i) = 0$.

模糊综合评估: 基于多特征信息模糊综合评价确定 $BPAF$ 时, 显然, 由每个特征参数所确定的信度值都会直接影响到 $BPAF$ 结果. 所以在进行 $BPAF$ 合成运算时, 我们采用广义模糊算子 $M(\bullet, \odot)^{[5]}$, 可以得到待识别目标为知识库中第 i 个辐射源的 $BPAF$ 模糊综合评估结果为:

$$m(i) = a_1 m_f(i) \odot a_2 m_{PRI}(i) \odot a_3 m_{PW}(i) \odot a_4 m_{IPC}(i) \quad (7)$$

1.2 ELINT系统的 BPAF获取

灰关联分析是根据数据列因素之间相似或相异程度来衡量数据列接近的程度^[6]. 在进行数据列关联分析时, 必须先确定参考数列, 然后比较其他数列同参考数列的接近程度, 这样才能对其他数列进行比较, 进而作出判断.

数据列的确定: 本文利用 $ELINT$ 系统提供的辐射源工作模式和工作参数、活动规律、载机属性和运动参数等观测值^[4], 选取这些观测矢量作为参考数列, 记为 $X_0 = \{X_0(k) | k = 1, 2, \dots, M\}$. 选取知识库中已知辐射源作为比较数列 $X_i = \{X_i(k) | k = 1, 2, \dots, M\} (i = 1, 2, \dots, N)$, N 为知识库中已知辐射源的数量.

灰关联系数计算: 记 X_0 与 X_i 第 k 个指标的绝对差为 $\Delta_i(k) = |X_0(k) - X_i(k)|$, 则可得到 $X_i(k)$ 与 $X_0(k)$ 的关联系数为

$$\xi_i(k) = \frac{M \min_k \min_i \Delta_i(k) + \rho M \max_k \max_i \Delta_i(k)}{\Delta_i(k) + \rho M \max_k \max_i \Delta_i(k)} \quad (8)$$

其中, $\rho \in (0, +\infty)$, 称为分辨系数. ρ 越小, 分辨力越大. 一般 ρ 的取值范围为 $[0, 1]$, 通常取 $\rho = 0.5$. $M \min_k \min_i \Delta_i(k)$ 为两级最小差, $M \max_k \max_i \Delta_i(k)$ 为两级最大差.

于是, 据此可求出 $X_i(k)$ 与对应的 $X_0(k)$ 关联系数:

$$\xi_i = \{\xi_i(k) | k = 1, 2, \dots, M\} \quad (9)$$

灰关联度计算: 从关联系数的计算来看, 我们得到的是各比较数列与参考数列相对于各个指标的关联系数值. 结果较多, 信息过于分散, 不便于比较, 因而有必要将每一比较数列各个指标的关联系数集中体现在一个值上, 这个数值就是灰关联度. 比较数列对参考数列的灰关联度常记作 $\gamma(X_0, X_i)$, 简记为 γ_i . 常用的计算关联度的方法为平均值法, 也就是对各指标作平权处理. 事实上, 在进行雷达识别时, 各观测参数的重要性是不同的, 因而对各指标分配的权重也应不同.

令 $a(k), k = 1, 2, \dots, M$ 为相应各个指标的权系数, 且 $\sum_{k=1}^M a(k) = 1, a(k) \geq 0$, 则可定义加权关联度为

$$\gamma_i = \sum_{k=1}^M \xi_i(k) a(k), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

$BPAF$ 计算: 本文根据灰关联度计算 $BPAF$, 在关联度的分析中, 数列的处理方法不同, 关联度的大小会发生变化, 但关联序不会变, 因此这里用归一化原则来计算 $BPAF$.

$$m(i) = \gamma_i \setminus \sum_{j=1}^N \gamma_j, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

3 多传感器机载辐射源识别

识别框架 \odot : 机载辐射源包括机载雷达、通信设备等, 从电子对抗的角度来说, 机载雷达的重要性更大, 因此本文主要考虑机载雷达. 到目前为止, 对机载雷达的分类还没有一个统一的标准. 按雷达的用途分类, 常用的机载雷达有: 机载预警雷达、机载搜索雷达、机载轰炸瞄准雷达、机载导航雷达、机载护尾雷达、机载成像雷达、地形跟随雷达等等^[6].

传感器选取: 为了防侦察与抗干扰, 现代机载辐射源的技术越来越先进, 相应地对辐射源的侦察技术也有了较大的发展, 侦察传感器种类也日益丰富. 根据各种传感器提供的信息互补的原则, 我们选取多个 ESM 和 $ELINT$ 构成多传感器系统.

融合过程: 对于多传感器系统, 如果各传感器探测的主体相同 (即识别框架 \odot 相同), 那么多传感器数据融合实质上就成为在同一识别框架下, 将不同的证据体合并成一个新的证据体的过程. 为了提高识别的准确性, 本文同时采用多个传感器, 并且每个传感器进行多个周期的测量, 然后进行多传感器多测量周期的信息融合. 在解决多传感器多测量周期数据融合问题时, 这里采用如图 1 所示的中心式融合算法^[1]. 其主要思想是: 首先进行时域融合, 再进行空域融合, 最后进行决策. 即首先对于每一个传感器, 基于所有周期的累积量测, 计算每一个命题的融合后验 $BPAF$; 再基于这些 $BPAF$, 计算所有传感器的融合后验 $BPAF$; 最后基于此 $BPAF$, 根据一定的准则, 作出决策.

设识别系统的传感器数量为 P 个, 每个传感器有 Q 个

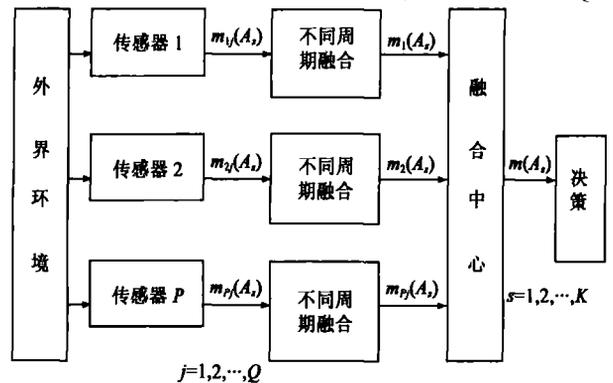


图 1 多传感器机载辐射源识别中心式融合算法

测量周期, 识别框架 Θ 包含的有意义的识别命题有 K 个 (A_1, \dots, A_K), 由式 (7) 和 (11) 得到每个传感器在各测量周期上获得的后验 $BPAF$ 为:

$$m_{ij}(A_s), i=1, 2, \dots, P, j=1, 2, \dots, Q, s=1, 2, \dots, K$$
$$u_j = m_{ij}(U), i=1, 2, \dots, P, j=1, 2, \dots, Q$$

其中, u_j 表示对“未知”命题的可信度分配。

多传感器多测量周期雷达体制识别中心式融合算法步骤如下:

(1) 单传感器多测量周期数据融合——时域融合

对于第 i 个传感器 ($i=1, 2, \dots, P$), 依据 Q 个测量周期的累积量测, 由 *Dempster* 组合规则可得到第 s 个命题 A_s ($s=1, 2, \dots, K$) 的单传感器融合后验 $BPAF$:

$$m_i(A_s) = \frac{\sum_{\cap A_n=A_s} \prod_{j=1}^Q m_{ij}(A_n)}{1 - \sum_{\cap A_n=\Phi} \prod_{j=1}^Q m_{ij}(A_n)} = \frac{\sum_{\cap A_n=A_s} \prod_{j=1}^Q m_{ij}(A_n)}{\sum_{\cap A_n \neq \Phi} \prod_{j=1}^Q m_{ij}(A_n)} \quad (12)$$

未知命题的融合后验 $BPAF$ 为:

$$u_i = \frac{\prod_{j=1}^Q u_{ij}}{1 - \sum_{\cap A_n=\Phi} \prod_{j=1}^Q m_{ij}(A_n)} \quad (13)$$

(2) 多传感器数据融合——空域融合

对 P 个传感器系统, 在以上单传感器多测量周期数据融合的基础上, 再对所有传感器进行数据融合, 可得到第 s 个命题 A_s ($s=1, 2, \dots, K$) 的多传感器融合后验 $BPAF$:

$$m(A_s) = \frac{\sum_{\cap A_n=A_s} \prod_{i=1}^P m_i(A_n)}{1 - \sum_{\cap A_n=\Phi} \prod_{i=1}^P m_i(A_n)} \quad (14)$$

未知命题的融合后验 $BPAF$ 为:

$$u = \frac{\prod_{i=1}^P u_i}{1 - \sum_{\cap A_n=\Phi} \prod_{i=1}^P m_i(A_n)} \quad (15)$$

(3) 决策

用证据理论组合证据后如何进行决策, 是与具体应用密切相关的问题。本文在解决多传感器机载辐射源识别问题时, 采用的是基于 $BPAF$ 的决策。其主要思想是:

设 $\exists A_1, A_2 \in \Theta$, 满足:

$$m(A_1) = \max\{m(A_1), A_1 \in \Theta\}$$

$$m(A_2) = \max\{m(A_1), A_1 \in \Theta \text{ and } A_1 \neq A_2\}$$

且有:

$$\begin{cases} m(A_1) - m(A_2) > \varepsilon_1 \\ m(U) < \varepsilon_2 \\ m(A_1) > m(U) \end{cases} \quad (16)$$

则 A_1 为判决结果, 其中 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 为预先设定的门限。

4 计算机仿真

为了验证本文算法的性能, 我们用模拟器分别模拟某四种机载辐射源 (E_1, E_2, E_3, E_4), 其中 E_1 为某型号机载预警雷达, E_2 为另一型号机载预警雷达, E_3 为某机载导航雷达, E_4 为某轰炸瞄准雷达。选择目标识别框架为 $\Theta = \{A_1, A_2, A_3, A_4\} = \{E_1, E_2, E_3, E_4\}$ 。多传感器系统包括两个独立的 ESM 系统和一个 $ELNT$ 系统。

4.1 识别过程仿真

选择模拟器模拟一部 E_1 机载预警雷达, 我们利用 ESM 系统三个测量周期和 $ELNT$ 系统一个测量周期的量测数据进行识别实验。

第一步是 $BPAF$ 获取。两个 ESM 系统每个测量周期后采用模糊综合评估的方法得到 $BPAF$, 其结果如表 1 所示; 利用灰关联分析方法, 得到 $ELNT$ 系统的 $BPAF$, 其结果由表 2 给出。其中 m_{ij} 表示第 i 个传感器第 j 个测量周期确定的 $BPAF$ 。

表 1 ESM 系统各测量周期的 $BPAF$

	A_1	A_2	A_3	A_4	U
$m_{11}(e)$	0.4	0.3	0.15	0	0.15
$m_{12}(e)$	0.4	0.2	0.2	0	0.2
$m_{13}(e)$	0.5	0.2	0.15	0	0.15
$m_{21}(e)$	0.3	0.5	0.1	0	0.1
$m_{22}(e)$	0.5	0.2	0.2	0	0.1
$m_{23}(e)$	0.4	0.3	0.1	0	0.2

表 2 $ELNT$ 系统的 $BPAF$

	A_1	A_2	A_3	A_4	U
$m_3(e)$	0.5	0.2	0.2	0	0.1

第二步是证据组合。按照中心式融合算法, 首先进行时域融合, 即对于传感器 1 和 2 基于所有周期的累积量测, 利用式 (12) 和 (13), 计算每一个命题的融合后验 $BPAF$: m_1 和 m_2 。时域融合的结果如表 3 所示。

表 3 传感器 1 和 2 时域融合后的 $BPAF$

	A_1	A_2	A_3	A_4	U
$m1(e)$	0.67	0.20	0.11	0.00	0.02
$m2(e)$	0.57	0.35	0.07	0.00	0.01

然后进行空域融合, 即基于以上每个传感器时域融合后的融合后验 $BPAF$, 利用式 (14) 和 (15), 计算三个传感器经空域融合后每个命题的融合后验 $BPAF$ 。其结果如表 4 所示。

表 4 多传感器融合后的 $BPAF$

	A_1	A_2	A_3	A_4	U
$m(e)$	0.894	0.095	0.011	0.00	1.7e-4

第三步进行决策。根据融合后的 $BPAF$, 按照式 (16) 进行决策。这里选取 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.1$ 决策结果为 A_1 , 即为机载预警雷达 E_1 。

4.2 对比实验

利用模拟器模拟多种机载辐射源,分别运用单传感器(单个ESM)和三传感器系统(两个ESM和一个ELINT)进行识别实验,单ESM系统分别采用本文提供的信息融合识别方法和文献[7]介绍的模板匹配法进行识别,多传感器系统运用本文方法进行识别。在不同信噪比条件下,经过近千次Monte Carlo对比识别实验,得到对比实验结果如表5所示:

表5 不同条件不同方法的正确识别率(%)

		信噪比(dB)			
		0	3	5	10
单传感器	文献[7]方法	10.7	69.3	82.5	92.0
	本文方法	57.1	84.3	90.7	94.3
多传感器	本文方法	78.4	92.6	97.8	99.2

5 结论

本文基于多传感器多测量周期信息融合的方法进行机载辐射源识别,通过大量的识别实验和对比实验表明:

(1)本文针对ESM和ELINT系统提出的两种BPAF获取方法,综合利用辐射源的多特征信息,通过模糊综合评估和灰关联分析的方法进行数据融合,两种BPAF获取方法是非常有效、实用的,它解决了证据理论在辐射源识别应用中的一个关键问题,为实用系统提供了有力的理论支持。

(2)由于证据理论可以区分不确定和不知道,可以处理由不知道所引起的不确定性,因此基于证据理论信号融合的机载辐射源识别方法明显优于文献^[7]介绍的模板匹配法,特别是在低信噪比的情况下。

(3)多传感器信息融合利用了多个传感器提取的独立、互补的信息,消除了多传感器信息之间可能存在的冗余和矛盾,使原来使用单一传感器可能存在的无法识别或错误识别等现象得到了明显的改善,大大提高了正确识别概率。

参考文献:

- [1] J Llinas E Waltz Multisensor Data Fusion [M]. Norwood Massachusetts Artech House 1990
- [2] D L Hall Mathematical Techniques in Multisensor Data Fusion [M]. Boston London Artech House

1992

- [3] 何友,等.多传感器信息融合及应用[M].北京,电子工业出版社,2000
HE You et al Multisensor Information Fusion With Applications[M]. Beijing Publishing House of Electronics Industry 2000 (in Chinese)
- [4] 罗景青,等.雷达对抗原理[M].北京,解放军出版社,2003
Luo Jingqing et al Principle of Radar Electronic Warfare [M]. Beijing Publishing House of PLA, 2003 (in Chinese)
- [5] 李洪兴.工程模糊数学方法及应用[M].天津科学技术出版社,1991 64-172
Li Hongxing Engineering Fuzzy Mathematics Methods and Applications[M]. Tianjin Tianjin Science and Technology Publishing House 1991 64-172 (in Chinese)
- [6] 邓聚龙.灰色控制系统[M].武汉:华中理工大学出版社,1997 10
Deng Julong Gray Control System [M]. Wuhan Publishing House of Center-China University of Technology, 1997. (in Chinese)
- [7] 袁学华,等.基于修正的M距离辐射源识别方法研究[J].电子对抗技术,2003 18(4): 9-11
Yuan Xuehua et al Research on the identification of radiation sources based on the modified M-distance [J]. Electronic Warfare Technology. 2003 18(4): 9-11 (in Chinese)

作者简介:

王杰贵 男,1969年生,安徽桐城人,博士,副教授,主要研究方向有电子对抗、信号与信息处理、数据融合技术、定位理论与技术、阵列信号处理等。近年来已发表相关论文30余篇。E-mail wjegu@163.com

靳学明 男,1966年生,安徽贵池人,研究员,主要研究方向有雷达技术、SAR与 SAR 对抗、信号处理等。

罗景青 男,1957年生,四川南溪人,教授,博士,博士生导师,国家“十五”863专家,主要研究方向有空间电子对抗技术、信号与信息处理、有源无源定位跟踪技术等,近年来已发表论文数十篇。