

## 雷达辐射源识别的多元信息融合算法研究

沈 阳<sup>①</sup> 陈永光<sup>①②③</sup> 李修和<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(解放军电子工程学院 合肥 230037)

<sup>②</sup>(63880 部队 洛阳 471003)

<sup>③</sup>(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

**摘要:** 该文针对复杂电磁环境下侦察设备获得的雷达辐射源信息具有不完整性和模糊性的情况,通过对现代雷达侦察情报特点的分析,研究了利用多种侦察设备获得的多元信息,采用证据理论信息融合的方法对雷达辐射源进行识别。设计了辐射源属性的基本概率赋值函数,提出了辐射源属性融合、多侦察周期时域融合和多侦察设备空域融合的三级融合算法。仿真结果表明该融合算法具有优越的性能。

**关键词:** 雷达; 辐射源; 识别; 信息融合

中图分类号: TN95, TP391

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)10-2329-04

## Multi-data Fusion Algorithm for Radar Emitter Identification

Shen Yang<sup>①</sup> Chen Yong-guang<sup>①②③</sup> Li Xiu-he<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(*Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China*)

<sup>②</sup>(*Unit 63880, Luoyang 471003, China*)

<sup>③</sup>(*School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

**Abstract:** The information of radar emitter acquired by reconnaissance equipment is partial and fuzzy under complicated electromagnetic environment. For this reason, this paper firstly analyzes the characteristics of modern radar ELINT, and then identifies radar emitter by means of Dempster-Shafer fusion method based on multi-data from various kinds of reconnaissance equipment. It designs Basic Probability Assignment Function (BPAF) of emitter characters. It presents a three-degree fusion algorithm, including emitter character fusion, multiple reconnaissance period time fusion, and multiple reconnaissance equipment space fusion. The fusion algorithm is proved to have superior performance with the help of simulation results.

**Key words:** Radar; Emitter; Identification; Data fusion

### 1 引言

随着科学技术的发展,现代战场的电磁信号环境日益复杂,辐射源密度成倍增加,电磁信号样式复杂多变。其中,雷达辐射源情况显得尤为突出。各种新体制、复杂信号雷达相继问世,使得战场上由雷达辐射源构成的电磁信号环境呈现日趋复杂的态势。现代雷达往往具有多个工作模式,每个模式都有相应的技术特征参数。另外,诸如低截获概率、频率捷变等雷达抗干扰措施的运用,使得侦察设备得到的雷达辐射源技术特征参数不完整、不确定。鉴于此,对雷达辐射源的识别变得异常困难<sup>[1]</sup>。现代雷达侦察的内容包括电子情报侦察(ELINT)、电子支援措施(ESM)、雷达寻的和告警(RHAW)以及雷达对抗侦察等等<sup>[2]</sup>。无论哪种侦察都是为了获取雷达的技术特征和战术参数,为针对雷达的电子干扰和硬摧毁提供支持。雷达侦察情报是上述所有侦察手段获取的

雷达技术特征和战术参数的统称。通过对现代战场环境下雷达的技战术分析,可知现代雷达侦察情报具有以下特点:(1)雷达信号密集,特征参数互相交错;(2)雷达隐蔽性增强,部分特征参数缺失;(3)雷达体制多样,特征参数复杂多变;(4)雷达信号复杂,特征参数存在模糊性。

雷达侦察设备总是通过对被识别雷达各个特征参数的观测,并和数据库中各已知雷达特征参数按某种方式进行匹配来确定被识别雷达辐射源类别的。由于现代雷达的多模性和隐蔽性,雷达辐射源识别必须综合利用侦察到的雷达辐射源的多元信息,采用不确定性推理方法进行识别。传统的数据库比对法已不能适应现代战争的要求,而专家系统等人工智能方法又显得复杂,开发周期长,耗资巨大。寻求一种既经济又实用的方法成为当前迫切需要解决的问题。不确定推理方法是解决不完整、不精确属性融合的基础理论。不确定性推理方法主要有主观Bayes方法和证据理论方法等。相比较而言,证据理论方法拥有许多优点<sup>[3]</sup>。因此,本文采用

Dempster-Shafer(D-S)证据理论对多元雷达辐射源信息进行融合识别, 它是对雷达进行威胁评估的基础, 同时也为雷达电子战提供决策支持。证据理论方法运用的关键在于如何构造证据的基本概率赋值函数<sup>[6]</sup>, 文中对辐射源属性的基本概率赋值函数进行了详细讨论, 给出了计算公式; 设计了辐射源属性融合、多侦察周期时域融合和多侦察设备空域融合的三级融合算法。仿真表明, 基于D-S证据理论的多元信息融合雷达辐射源识别具有效率高、可靠性强等特点。

2 D-S 证据理论

D-S证据理论用识别框架  $U$  表示所感兴趣的命题集, 它定义  $U$  上的基本概率赋值函数 (Basic Probability Assignment Function, BPAF)  $m : 2^U \rightarrow [0,1]$ , 满足

$$\left. \begin{aligned} m(\Phi) &= 0 \\ \sum_{A \subset U} m(A) &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中命题  $A$  为  $U$  的非空子集, 称为焦点;  $m(A)$  反映了对  $A$  的信度大小。

如果  $m_1, m_2, \dots, m_n$  是同一识别框架  $U$  上由  $n$  个独立的证据推导出的 BPAF, 则利用下面的 Dempster 组合规则, 可以计算出这  $n$  个证据共同作用下的 BPAF

$$m(C) = \begin{cases} 0, & C = \Phi \\ \frac{\sum_{\bigcap_{i=1}^n A_i = C} \prod_{i=1}^n m_i(A_i)}{1 - \sum_{\bigcap_{i=1}^n A_i = \Phi} \prod_{i=1}^n m_i(A_i)}, & \forall C \subset U, C \neq \Phi \end{cases} \quad (2)$$

用证据理论组合证据后如何进行决策是与应用密切相关的问题。常用的决策方法有基于信任函数的决策、基于基本概率赋值的决策和基于最小风险的决策。因为计算量小, 这里采用基于基本概率赋值的决策方法。设  $U$  是识别框架,  $m$  是基于 Dempster 组合规则得到的组合后的基本概率赋值。设  $\exists A_1, A_2 \subset U$ , 满足

$$\left. \begin{aligned} m(A_1) &= \max \{m(A_i), A_i \subset U\} \\ m(A_2) &= \max \{m(A_i), A_i \subset U \text{ 且 } A_i \neq A_1\} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

若有

$$\left. \begin{aligned} m(A_1) - m(A_2) &> \varepsilon_1 \\ m(u) &< \varepsilon_2 \\ m(A_1) &> m(U) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

则  $A_1$  即为判决结果。式中  $m(u)$  表示未知的基本概率;  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  为预先设定的门限。

3 基于多元信息融合的雷达辐射源识别

3.1 多元信息融合算法

基于D-S的雷达辐射源识别多元信息融合算法就是在多元侦察情报的基础上, 利用 Dempster 组合规则, 首先进行辐射源技术特征参数的属性融合, 其次进行多个侦察周期的

时域融合, 然后进行多个侦察设备的空域融合, 最后进行识别决策。融合算法流程如图 1 所示。

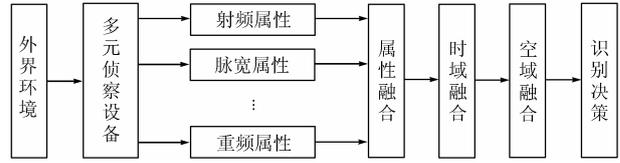


图 1 雷达辐射源识别的多元信息融合算法

3.2 BPAF 的确定方法

常用于雷达辐射源识别的技术特征参数包括: 载频 (RF)、脉冲重复频率/周期 (PRF/PRI)、脉宽 (PW) 等<sup>[7]</sup>。雷达辐射源识别的属性融合是根据分选好的一个脉冲描述字, 运用D-S证据理论对其分析推理得出雷达类型的判别。对于属性融合, 建立脉冲描述字关于识别框架  $U$  的基本概率赋值函数成为属性融合的关键所在<sup>[8]</sup>。下面详细讨论辐射源载频、重频和脉宽等特征参数对识别框架的BPAF的计算方法。

该方法首先定义载频、脉冲重复频率和脉宽的相似度, 即侦察得到的这些参数与识别框架中相应参数的相似程度, 二者误差越小, 则相似度越大, 并且规定相似度处于 0 与 1 之间。有了相似度, 再定义各属性的 BPAF, 相似度越大, BPAF 也越大, 当然各属性的 BPAF 分别满足归一性。

(1)载频 BPAF 的计算 辐射源载频有固定、捷变和分集等类型。对固定载频雷达而言, 定义载频关于雷达  $i$  的相似度为

$$\delta_{RF}(i) = \begin{cases} 1, & \Delta f_i \leq \varepsilon f \\ \frac{(\Delta f_i - 2\varepsilon f)^2}{\varepsilon f^2}, & \varepsilon f < \Delta f_i \leq 2\varepsilon f \\ 0, & \Delta f_i > 2\varepsilon f \end{cases} \quad (5)$$

式中  $\Delta f_i$  为载频观测值与第  $i$  类雷达载频的差值;  $\varepsilon f$  为侦察系统的测频误差。

对频率捷变雷达而言, 定义载频关于雷达  $i$  的相似度为

$$\delta_{RF}(i) = \begin{cases} 1, & \Delta f_i \leq Af + \varepsilon f \\ \frac{(\Delta f_i - Af - 2\varepsilon f)^2}{\varepsilon f^2}, & Af + \varepsilon f < \Delta f_i \leq Af + 2\varepsilon f \\ 0, & \Delta f_i > Af + 2\varepsilon f \end{cases} \quad (6)$$

式中  $Af$  为捷变频范围。

对频率分集雷达而言, 以频率二分集为例, 设二分集率的差值为  $Df$ , 定义载频关于雷达  $i$  的相似度为

$$\delta_{RF}(i) = \begin{cases} 1, & \Delta f_i \leq \varepsilon f \text{ or } |\Delta f_i - Df| \leq \varepsilon f \\ \frac{(\Delta f_i - 2\varepsilon f)^2}{\varepsilon f^2}, & \varepsilon f < \Delta f_i \leq 2\varepsilon f \\ \frac{(|\Delta f_i - Df| - 2\varepsilon f)^2}{\varepsilon f^2}, & \varepsilon f < |\Delta f_i - Df| < 2\varepsilon f \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

因此, 定义辐射源载频 RF 关于识别框架的 BPAF 为

$$m_{RF}(u) = 1 - \max\{\delta_{RF}(i)\}$$

$$m_{RF}(i) = \begin{cases} 0, & \sum_{i=1}^n \delta_{RF}(i) = 0 \\ \frac{\delta_{RF}(i)[1 - m_{RF}(u)]}{\sum_{i=1}^n \delta_{RF}(i)}, & \sum_{i=1}^n \delta_{RF}(i) \neq 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中  $m_{RF}(u)$  为载频关于未知的基本概率赋值;  $n$  为识别框架中的雷达数;  $\delta_{RF}(i)$  为辐射源载频关于雷达  $i$  的相似度;  $i=1,2,\dots,n$ 。

(2)重频 BPAF 的计算 辐射源重频有固定、参差和抖动等类型。对固定重频雷达而言, 定义重频关于雷达  $i$  的相似度为

$$\delta_{PRF}(i) = \begin{cases} 1, & \Delta PRF_i \leq \epsilon PRF \\ \frac{(\Delta PRF_i - 2\epsilon PRF)^2}{\epsilon PRF^2}, & \epsilon PRF < \Delta PRF_i \leq 2\epsilon PRF \\ 0, & \Delta PRF_i > 2\epsilon PRF \end{cases} \quad (9)$$

式中  $\Delta PRF_i$  为重频观测值与第  $i$  类雷达重频的差值;  $\epsilon PRF$  为侦察系统的重频测量误差。

对重频参差而言, 以重频二参差为例, 设二参差重频的差值为  $DPRF$ , 定义重频关于雷达  $i$  的相似度为

$$\delta_{PRF}(i) = \begin{cases} 1, & |\Delta PRF_i - DPRF| \leq \epsilon PRF \\ \frac{(|\Delta PRF_i - DPRF| - 2\epsilon PRF)^2}{\epsilon PRF^2}, & \epsilon PRF < |\Delta PRF_i - DPRF| \leq 2\epsilon PRF \\ 0, & |\Delta PRF_i - DPRF| > 2\epsilon PRF \end{cases} \quad (10)$$

式中  $DPRF$  为二参差重频的差值。

因此, 定义辐射源重频 PRF 关于识别框架的 BPAF 为

$$m_{PRF}(u) = 1 - \max\{\delta_{PRF}(i)\}$$

$$m_{PRF}(i) = \begin{cases} 0, & \sum_{i=1}^n \delta_{PRF}(i) = 0 \\ \frac{\delta_{PRF}(i)[1 - m_{PRF}(u)]}{\sum_{i=1}^n \delta_{PRF}(i)}, & \sum_{i=1}^n \delta_{PRF}(i) \neq 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中  $m_{PRF}(u)$  为重频关于未知的基本概率赋值;  $n$  为识别框架中的雷达数;  $\delta_{PRF}(i)$  为辐射源重频相似度;  $i=1,2,\dots,n$ 。

(3)脉宽 BPAF 的计算 辐射源脉宽有固定和滑变等类型。对固定脉宽雷达而言, 定义脉宽关于雷达  $i$  的相似度为

$$\delta_{PW}(i) = \begin{cases} 1, & \Delta PW_i \leq \epsilon PW \\ \frac{(\Delta PW_i - 2\epsilon PW)^2}{\epsilon PW^2}, & \epsilon PW < \Delta PW_i \leq 2\epsilon PW \\ 0, & \Delta PW_i > 2\epsilon PW \end{cases} \quad (12)$$

式中  $\Delta PW_i$  为脉宽观测值与第  $i$  类雷达脉宽的差值;  $\epsilon PW$  为侦察系统的脉宽测量误差。

对脉宽滑变雷达而言, 设脉宽的滑变范围为  $APW$ , 定义脉宽关于雷达  $i$  的相似度为

$$\delta_{PW}(i) = \begin{cases} 1, & \Delta PW_i \leq APW + \epsilon PW \\ \frac{(\Delta PW_i - APW - 2\epsilon PW)^2}{\epsilon PW^2}, & APW + \epsilon PW < \Delta PW_i \leq APW + 2\epsilon PW \\ 0, & \Delta PW_i > APW + 2\epsilon PW \end{cases} \quad (13)$$

式中  $APW$  为脉宽滑变范围。

因此, 定义辐射源脉宽 PW 关于识别框架的 BPAF 为

$$m_{PW}(u) = 1 - \max\{\delta_{PW}(i)\}$$

$$m_{PW}(i) = \begin{cases} 0, & \sum_{i=1}^n \delta_{PW}(i) = 0 \\ \frac{\delta_{PW}(i)[1 - m_{PW}(u)]}{\sum_{i=1}^n \delta_{PW}(i)}, & \sum_{i=1}^n \delta_{PW}(i) \neq 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中  $m_{PW}(u)$  为脉宽关于未知的基本概率赋值;  $n$  为识别框架中的雷达数;  $\delta_{PW}(i)$  为辐射源脉宽相似度;  $i=1,2,\dots,n$ 。

#### 4 计算机仿真与分析

辐射源侦察传感器采用雷达对抗侦察设备、ESM 和 ELINT。分别运用 D-S 证据理论, 根据雷达对抗侦察设备获取的辐射源载频、重频和脉宽, ESM 获取的辐射源工作状态、技术体制, 以及 ELINT 的情报数据库确定基本概率赋值函数。时域融合时, 雷达对抗侦察设备和 ESM 各有两个侦察周期, ELINT 有一个侦察周期。

识别框架为  $U = \{A_1, A_2, A_3, A_4\}$ , 对应的含义分别为: 预警雷达、警戒雷达、目标指示雷达和火控雷达。按照 3.2 节中属性 BPAF 的确定方法, 运用 D-S 证据理论方法进行属性融合, 得各侦察周期的 BPAF 如表 1 所示(限于篇幅, 计算过程省略), 其中  $m_{ij}(\bullet)$  表示设备  $i$  第  $j$  个侦察周期的 BPAF。

表 1 属性融合后的 BPAF

		$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$u$
雷达对抗 侦察	$m_{11}(\bullet)$	0.4	0.3	0.1	0	0.2
	$m_{12}(\bullet)$	0.3	0.4	0.15	0	0.15
ESM	$m_{21}(\bullet)$	0.4	0.4	0.1	0	0.1
	$m_{22}(\bullet)$	0.3	0.5	0.05	0	0.15
ELINT	$m_3(\bullet)$	0.3	0.4	0.2	0	0.1

按照证据理论方法, 对各侦察设备不同侦察周期的 BPAF 分别进行时域融合, 得出的 BPAF 如表 2 所示。

表 2 多周期时域融合后的 BPAF

		$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$u$
雷达对抗 侦察	$m_1(\bullet)$	0.42	0.43	0.1	0	0.05
	$m_2(\bullet)$	0.38	0.55	0.04	0	0.03
ELINT	$m_3(\bullet)$	0.3	0.4	0.2	0	0.1

按照证据理论方法, 对各侦察设备不同侦察周期的

BPAF 进行空域融合, 得出的 BPAF 如表 3 所示。

表 3 多设备空域融合后的 BPAF

	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$u$
$m(\cdot)$	0.34	0.65	0.01	0	$6.6 \times 10^{-4}$

基于表 3 所示空域融合后的 BPAF 决策, 设置门限  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.1$ , 则判定该雷达辐射源属  $A_2$ , 即警戒雷达。而且经信息融合后, 关于辐射源的未知概率  $m(u)$  下降到  $6.6 \times 10^{-4}$ , 说明基于多元信息融合的雷达辐射源识别方法增加了辐射源识别的可信度。

## 5 结束语

随着现代战场电磁环境的日趋复杂和雷达技术的日新月异, 运用多种侦察手段进行电磁辐射源侦察势在必行。本文在多元雷达侦察情报的基础上, 运用 D-S 证据理论对多元信息进行融合识别。计算机仿真结果表明基于多元信息融合的辐射源识别算法较传统识别方法更具生命力, 识别可信度高、稳定可靠; 该识别算法相对专家系统辐射源识别方法更

经济实用。其中, 辐射源属性基本概率赋值函数的确定是该方法的关键, 文中进行了详细讨论和设计。雷达辐射源高可信度的识别为雷达电子战提供了强有力的支持。

## 参考文献

- [1] 沈阳. 组网雷达“四抗”能力分析及其效能评估研究. [硕士论文], 合肥: 解放军电子工程学院, 2004.6.
- [2] 林象平. 雷达对抗原理. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1985.6: 171-175.
- [3] 何友, 王国宏等. 多传感器信息融合及应用. 北京: 电子工业出版社, 2000.11: 24-35.

沈 阳: 男, 1978 年生, 博士生, 专攻多传感器信息融合、计算机作战模拟、电子战作战效能评估和组网雷达对抗技术等.

陈永光: 男, 1962 年生, 博士, 总工程师, 研究员, 博士生导师, 现主要从事电子信息装备试验技术、电子战作战模拟等研究.

李修和: 男, 1975 年生, 博士, 研究方向为信息融合、计算机作战模拟、组网雷达对抗技术等.