

# 雷达辐射源信号识别效能评估的 I<sup>2</sup>TOPSIS 方法

徐 璟<sup>1,2</sup> 何明浩<sup>1</sup> 郁春来<sup>1</sup>

(1. 空军预警学院, 湖北武汉 430019; 2. 94969 部队, 上海 200070)

**摘 要:** 针对雷达辐射源信号识别效能评估方法杂乱, 指标模糊等问题, 提出一种基于 I<sup>2</sup>TOPSIS 雷达辐射源信号识别效能评估方法。该方法主要在以下三点对传统区间 TOPSIS 方法进行改进: 利用熵值计算指标权值; 利用理论极值确定正负理想点; 利用区间距离计算评估方案到正负理想点的距离, 并将 I<sup>2</sup>TOPSIS 方法应用于雷达辐射源信号识别效能评估中得到一种新的雷达辐射源信号识别效能评估方法。最后通过与传统区间 TOPSIS 方法的评估对比实验证明新方法所得结果更合理、可行。

**关键词:** 雷达辐射源; 信号识别; 评估; TOPSIS

**中图分类号:** TN971 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2015)03-0253-06

## Effectiveness Evaluation of Radar Emitter Signal Recognition Based on I<sup>2</sup>TOPSIS

XU Jing<sup>1,2</sup> HE Ming-hao<sup>1</sup> YU Chun-lai<sup>1</sup>

(1. Air Force Early Warning Academy, Wuhan, Hubei 430019, China; 2. No. 94969 Unit the PLA, Shanghai 200070, China)

**Abstract:** In order to solve the problems that radar emitter signal recognition evaluation methods are messy and evaluation indexes are confusing, a novel radar emitter signal recognition evaluation method based on I<sup>2</sup>TOPSIS is put forward. There are three improving points compared with the traditional TOPSIS method. That is using the entropy to build index weights, using theoretical extreme value to determine the ideal point and negative ideal point, using interval distance to compute the distance between evaluation plan and ideal and negative ideal points. Then use the I<sup>2</sup>TOPSIS method in effectiveness evaluation of radar emitter signal recognition. At last a comparing simulation between the novel method and traditional TOPSIS method is done, whose results prove that the novel method is more reasonable and feasible.

**Key words:** radar emitter; signal recognition; evaluation; TOPSIS

### 1 引言

对敌方雷达辐射源信号进行有效识别是电子战系统中的关键和重要环节, 也是对敌遂行电子干扰和电子攻击的前提和基础, 其技术水平是衡量雷达对抗系统技术先进程度的重要标志。随着雷达辐射源信号识别技术的日益成熟以及在电子战中的大量运用, 全面准确地对识别效能进行有效评估显得愈加重要<sup>[1-3]</sup>。

以往对雷达辐射源信号识别的效能进行评估主要是利用识别准确率和识别代价等少数几个评估指标进行评估, 这类评估方法并不能体现评估的

科学性和全面性。为此有学者对如何全面评估雷达辐射源信号识别效能进行了深入研究, 如利用专家打分方式的层次分析评估方法<sup>[4]</sup>, 基于模糊综合评判的评估方法和基于模式识别和人工智能的评估方法等<sup>[5-6]</sup>, 这些评估方法都建立了较为全面的评估指标体系, 能对评估结果进行比较全面的评估, 但这些方法也存在一些不可忽视的共性问题, 如指标选取标准模糊, 覆盖范围不全面; 主观因素在权值设置中所占比重较大; 隶属度划分不明确等。为解决上述问题, 论文建立了基于识别测试结果 (Measurement of Recognition Rate, MRR)<sup>[5-7]</sup> 的树状评估指标体系, 并将逼近理想的排序 (Technique

For Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS)方法<sup>[8-12]</sup>引入到雷达辐射源信号识别效能评估中,提出一种基于改进区间 TOPSIS (Improved-Interval-TOPSIS, I<sup>2</sup>TOPSIS)的雷达辐射源信号识别效能评估方法,但由于传统的区间 TOPSIS 方法存在评估结果无法重用、权值选取自由度大等问题,为此论文针对这些问题,对区间 TOPSIS 进行改进:主要是利用熵权值进行指标赋权;利用理论极值确定正负理想点,以代替传统区间 TOPSIS 方法中所确定理想点的方法;并利用区间距离计算贴近度。最后,通过计算机仿真实验验证了该方法的正确性。

## 2 评估指标的建立

评估指标是进行识别效能评估的基础,选取评估指标时应遵照一定的选取准则,如目的性准则、科学性准则、系统性准则等。但是在实际的效能评估过程中,由于各种复杂因素的影响,很难完全满足以上所有用于选取评估指标的准则,对雷达辐射源信号识别效能评估亦然。为此,根据雷达辐射源信号识别的特点,选择正确性、稳定性、独立性和识别代价作为效能评估准则,并得到相应的评估指标。

对雷达辐射源信号识别效能评估而言,上述四项准则所对应的指标可较完整地描述雷达辐射源信号识别的性能,通过上述分析,得出了可用于评估建模的指标。根据识别效能评估问题的性质与总体目标,并按照各个因素之间的相互关联影响以及隶属关系建立评估指标的分层树形结构模型,如图1所示。整个雷达辐射源信号识别效能评估指标体系包含目标层、准则层和指标层,其中目标层是整个指标体系衡量的最终目标;准则层是指标体系的中间层,包含四个评价准则:识别正确性、识别稳定性、识别独立性和识别代价;指标层是指标体系的末端,包括7个直接衡量识别效能的指标,分别是MRR、MRR均值、分布指标、MRR方差、SNR独立性、存储空间以及识别时间。其中MRR的计算方法在文献[5,7]中已经详细说明,论文不再赘述。

## 3 改进的区间 TOPSIS 模型

### 3.1 区间 TOPSIS 法及基本原理

TOPSIS 是由 Hwang 等于 1981 年提出的一种适合于根据多属性指标对多个评价对象进行比较选择的分析方法。该方法构造了  $n$  维属性空间的正负理想点,通过求解各评价对象与正负理想点之间的欧式

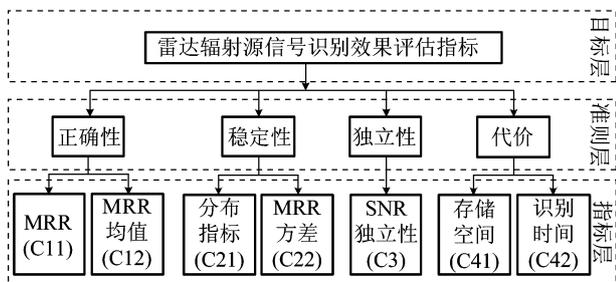


图1 雷达辐射源信号识别评估指标体系

Fig.1 The index system for radar emitter signal recognition evaluation

距离,测度该评价对象在靠近正理想点的同时远离负理想点的相对贴近度,并将相对贴近度作为最后评估的综合指标。区间 TOPSIS 法主要是对指标为区间数的评估对象进行评估的一种 TOPSIS 方法,对其计算需用到区间数运算法则。其计算步骤如下:

#### Step1 构建评价矩阵 $A$

$$A = \begin{bmatrix} [x_{11}^l, x_{11}^u] & \cdots & [x_{1n}^l, x_{1n}^u] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ [x_{m1}^l, x_{m1}^u] & \cdots & [x_{mn}^l, x_{mn}^u] \end{bmatrix} = \left\{ [x_{ij}^l, x_{ij}^u] \right\}_{m \times n} \quad (1)$$

式(1)中  $m$  为评估目标数,  $n$  为属性指标数,  $x_{ij}^l$  为第  $i$  个评估目标对应的第  $j$  个属性指标的最小值,  $x_{ij}^u$  为第  $i$  个评估目标对应的第  $j$  个属性指标的最大值,  $i=1, \dots, m, j=1, \dots, n$ 。

Step2 用向量规范法对  $A$  进行规范化处理得到规范化决策矩阵  $\hat{A} = \{[y_{ij}^l, y_{ij}^u]\}$ , 并消除不同指标之间量纲与量级的影响,以解决不同指标不可公度的问题,规范化方法主要有标准 0-1 变换和向量规范化计算<sup>[8]</sup>。

Step3 通过赋权  $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ , 构成加权规范矩阵  $\tilde{A} = \{[z_{ij}^l, z_{ij}^u]\}$ , 即

$$[z_{ij}^l, z_{ij}^u] = w_j \cdot [y_{ij}^l, y_{ij}^u] \quad (2)$$

式(2)中,  $i=1, \dots, m, j=1, \dots, n$ 。

Step4 确定正负理想点  $s^+$  与  $s^-$ , 即

$$s^+ = \{s_j^+, s_j^{u+}\} = \begin{cases} \max_{1 \leq i \leq m} [z_{ij}^l, z_{ij}^u] & j \in J^+ \\ \min_{1 \leq i \leq m} [z_{ij}^l, z_{ij}^u] & j \in J^- \end{cases} \quad (3)$$

$$s^- = \{s_j^-, s_j^{u-}\} = \begin{cases} \max_{1 \leq i \leq m} [z_{ij}^l, z_{ij}^u] & j \in J^+ \\ \min_{1 \leq i \leq m} [z_{ij}^l, z_{ij}^u] & j \in J^- \end{cases} \quad (4)$$

式(3)和(4)中,  $J^+$  为效益型指标集,  $J^-$  为成本型指标集,  $z_{ij}^l$  为第  $i$  个评估目标对应的第  $j$  个属性指标的加权规范化最小值,  $z_{ij}^u$  为第  $i$  个评估目标对应的第  $j$  个属

性指标的加权规范化最大值,  $i=1, \dots, m, j=1, \dots, n$ 。

**Step5** 计算各个评估对象到正负理想点的距离  $d_i^+$  与  $d_i^-$ , 即

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n [(z_{ij}^l - s_j^{l+})^2 + (z_{ij}^u - s_j^{u+})^2]} \quad (5)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n [(z_{ij}^l - s_j^{l-})^2 + (z_{ij}^u - s_j^{u-})^2]} \quad (6)$$

**Step6** 计算各评估对象的相对贴近度(综合评分值), 即

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (7)$$

其中,  $C_i$  为 0-1 之间的无量纲数, 其值大小代表了评估对象的优劣程度, 值越大, 性能越好。

### 3.2 I<sup>2</sup>TOPSIS 评估模型

通过对区间 TOPSIS 的分析, 可以得到权值、正负理想点的确定以及距离的计算是区间 TOPSIS 方法中的重要步骤。论文主要利用熵权法对权值进行求解和利用理论极值确定正负理想点的方法替代传统区间 TOPSIS 方法中仅在待评估方案中确定正负理想点的方法, 以提高区间 TOPSIS 方法应用到雷达辐射源信号识别效能评估中的性能, 最后利用区间距离计算评估方案到正负理想点的距离。由此可以得到 I<sup>2</sup>TOPSIS 评估模型的核心步骤为:

**Step1** 基于理论极值的正负理想点确定

传统的区间 TOPSIS 方法的正负理想点是在待评估对象的数据中进行选择的, 这就导致评估的结果只适用于某次评估, 因此该结果不具重用性, 导致评估结果对以后的应用不具指导意义, 这也降低了评估的实际意义。为此, 如何选择合适的正负理想点是提高评估重用性的有效途径。

根据上文分析, 确定绝对正负理想点是解决逆序问题的重要方法, 在此引入绝对理想点的概念。

**定义** 设  $S^+ = \{s_1^+, s_2^+, \dots, s_n^+\}$  与  $S^- = \{s_1^-, s_2^-, \dots, s_n^-\}$  为待评估案例的绝对理想点, 满足:

$$(1) \quad \begin{cases} s_j^+ \geq x_{ij}, s_j^- \leq x_{ij} & j \in J^+ \\ s_j^+ \leq x_{ij}, s_j^- \geq x_{ij} & j \in J^- \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $J^+$  为效益型指标集,  $J^-$  为成本型指标集,  $i=1, \dots, m, j=1, \dots, n$ 。

(2) 在评估案例的作用范围内的任何一种评估案例  $x_k$  都有

$$\begin{cases} s_j^+ \geq x_{kj}, s_j^- \leq x_{kj} & j \in J^+ \\ s_j^+ \leq x_{kj}, s_j^- \geq x_{kj} & j \in J^- \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中,  $j=1, \dots, n$ 。

属性指标分为定性指标和定量指标, 无论是定性还是定量指标都存在理论极值, 为此如何确定理论极值是确定正负理想点的关键。一般对于定性指标可以根据历史经验并结合案例实际, 进行极值的选择; 而对于定量指标, 其数据都是按照一定分布存在的, 如本文所用的 MRR 类指标已经证明符合正态分布, 因此可以在确定数据属于某种分布的情况下确定理论极值。

**Step2** 基于熵值确定指标权值<sup>[12]</sup>, 得到加权规范化矩阵

由上节 Step2 得到规范化决策矩阵  $\hat{A}$  后, 第  $j$  个指标的熵值  $E_j$  为

$$E_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m (\bar{y}_{ij} \ln \bar{y}_{ij}) \quad (10)$$

式(10)中,  $\bar{y}_{ij} = y_{ij} / \sum_{i=1}^m y_{ij}$ , 并设定  $\bar{y}_{ij} = 0$  时  $\bar{y}_{ij} \ln \bar{y}_{ij} = 0$ 。

根据式(10)计算得到的熵值  $E_j$ , 计算第  $j$  个指标的熵权值, 即

$$w_j = \frac{1 - E_j}{n - \sum_{j=1}^n E_j} \quad (11)$$

则基于熵值得到的属性指标权值为

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_n] \quad (12)$$

因为决策矩阵  $\hat{A}$  中的元素是区间型的, 所以得到的最终权值也应该是区间型的, 故式(12)应修正为  $W = [[w_1^l, w_1^u], [w_2^l, w_2^u], \dots, [w_n^l, w_n^u]]$  (13)

通过式(13)引出一个问题: 通过加权后, 会展宽所得矩阵中元素的区间宽度, 导致评估结果的失真, 故论文采用权值区间上下限的平均值作为最终的指标权值。

由于熵权是完全客观的权值, 而在有些评估条件下, 完全客观的权值并不能很好的体现评估对象的性能, 因此可以采用一种以熵权值为主体的、主观和客观组合的权值计算方法, 计算更合理的权值, 最大限度体现评估的性能。假设主观权值为  $W_1$ , 客观权值为  $W_2$ , 平衡因子为  $\alpha$ , 则组合权值为<sup>[13]</sup>

$$W = \alpha \cdot W_1 + (1 - \alpha) \cdot W_2 \quad (14)$$

根据计算得到的指标权值  $W$ , 计算得到加权规范化矩阵  $\tilde{A} = \{[z_{ij}^l, z_{ij}^u]\}$ 。

### Step3 基于区间距离计算贴近度

根据上文 Step5 计算得到的距离是一个数,最后计算得到的评分值也是一个数,得到的评估结果只能判断评估对象的优劣,但不能给出评估对象间优劣的程度,为此论文引入区间距离<sup>[9]</sup>代替原方法中的欧式距离,这样得到的评估值为区间分值,能确定不同评估对象间的优劣程度。

评估对象区间数向量之间的区间距离为

$$d_i^+ = \left[ \sqrt{\sum_{j=1}^n (w_j - z_{ij}^u)^2}, \sqrt{\sum_{j=1}^n (w_j - z_{ij}^l)^2} \right] \quad (15)$$

$$d_i^- = \left[ \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij}^l)^2}, \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij}^u)^2} \right] \quad (16)$$

将式(15)和(16)代入式(7),得到 I<sup>2</sup>TOPSIS 的贴近度。

通过上述3点改进得到 I<sup>2</sup>TOPSIS 方法,并将其用于雷达辐射源信号识别效能评估,得到 I<sup>2</sup>TOPSIS 的雷达辐射源信号识别效能评估方法。下文通过仿真实验验证该方法的有效性。

## 4 仿真分析

针对雷达辐射源信号识别系统,论文选取 SNR 为 0dB 条件下 8 类信号的平均复杂度特征<sup>[3]</sup>作为实验所用的特征参数,如表 1 所示。

采用概率神经网络 (Probabilistic Neural Net-

work, PNN)、支持向量机 (Support Vector Machine, SVM)、基于遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 的支持向量机和特征参数匹配法 (Characteristic Parameter Match, CPM) 四种识别算法,其中,GA 的代沟为 0.9,弹性因子为 1,其余方法中所涉及的参数都采用默认值。分别做如下两个仿真实验:

### 实验 1 利用熵权值的 I<sup>2</sup>TOPSIS 评估实验

通过平台仿真测量得到的原始决策矩阵,如表 2 所示。

在上述指标中,C11 和 C12 属于效益型指标,C21、C22、C3、C41 和 C42 属于成本型指标,为确定每个指标的极值,需分析每种指标的性质,其中 C11、C12 和 C22 属于 MRR 类,符合正态分布,故可用 3 $\sigma$  规则对极值进行求解,而 C21、C3、C41 和 C42 属于经验类,其理论极值可根据实际情况确立理想点,由此可以得到评估的正负理想点为  $S^+ = [92.79, 92.00, 0, 0.0009, 0, 0, 0]$ ,  $S^- = [71.74, 71.95, 1, 3.1609, 1, 100, 0.6]$ 。由于正负理想点为普通向量,而评估指标是区间数向量,这就避免了对两个区间数向量直接距离度量的讨论。根据正负理想点得到规范化矩阵,如表 3 所示。

由此通过熵值确定指标权值为  $W = [0.2814, 0.2890, 0.0240, 0.0387, 0.1814, 0.1435, 0.0493]$ ,由此可以得到加权后的规范化决策矩阵,如表 4 所示。

表 1 复杂度特征值

Tab. 1 Value of complexity

	CW	LFM	FSK	BPSK	QPSK	LFM-BPSK	FSK-BPSK	NLFM
盒维数	4.2904	4.5703	5.2071	4.8105	5.0848	4.9514	4.9069	5.6143
稀疏性	2.5834	2.5618	2.5671	2.5674	2.5537	2.5663	2.5862	2.7102

表 2 原始指标值

Tab. 2 The original indexes

	C11%	C12%	C21	C22	C3	C41/KB	C42/s
SVM	[88.63, 89.03]	88.81	0.4137	[0.2558, 0.5557]	0.8082	81	[0.12, 0.14]
PNN	[86.08, 87.12]	86.61	0.1807	[0.8383, 2.5570]	0.9695	65	[0.18, 0.20]
GASVM	[91.80, 91.94]	91.88	0.4600	[0.0471, 0.1439]	0.7763	85	[0.35, 0.44]
CPM	[71.75, 72.61]	72.06	0.3955	[0.0010, 0.0097]	0.8956	41	[0.08, 0.11]

表 3 指标规范化矩阵

Tab. 3 The normalized decision matrix

	C11	C12	C21	C22	C3	C41	C42
SVM	[0.8023, 0.8213]	0.8409	0.5863	[0.8244, 0.9193]	0.1918	0.1900	[0.7667, 0.8000]
PNN	[0.6812, 0.7306]	0.7312	0.8193	[0.1911, 0.7350]	0.0305	0.3500	[0.6667, 0.7000]
GASVM	[0.9530, 0.9596]	0.9940	0.5400	[0.9547, 0.9854]	0.2237	0.1500	[0.2667, 0.4167]
CPM	[0.0001, 0.0152]	0.0055	0.6005	[0.9972, 0.9999]	0.1044	0.5900	[0.8166, 0.8666]

表4 指标加权决策矩阵  
Tab.4 The weighted normalized decision matrix

	C11	C12	C21	C22	C3	C41	C42
SVM	[0.0516,0.0557]	0.1622	0.0427	[0.0417,0.0465]	0.0392	0.0192	[0.0783,0.0817]
PNN	[0.0256,0.0362]	0.0153	0.0597	[0.0097,0.0372]	0.0062	0.0354	[0.0238,0.0323]
GASVM	[0.0839,0.0854]	0.3671	0.0394	[0.0483,0.0499]	0.0457	0.0152	[0.0272,0.0340]
CPM	[0.0855,0.0862]	0.3744	0.0223	[0.0502,0.0506]	0.0424	0.0141	[0.0289,0.0323]

根据式(15)和(16)可求得评估对象与正负理想点的区间距离: $d_{SVM}^+ = [0.1432, 0.1455]$ ,  $d_{PNN}^+ = [0.1725, 0.2012]$ ,  $d_{GASVM}^+ = [0.1493, 0.1525]$ ,  $d_{CPM}^+ = [0.3487, 0.3499]$ ;  $d_{SVM}^- = [0.3132, 0.3190]$ ,  $d_{PNN}^- = [0.2634, 0.2810]$ ,  $d_{GASVM}^- = [0.3549, 0.3571]$ ,  $d_{CPM}^- = [0.1757, 0.1783]$ 。

根据式(7)可以得到评分区间值为  $C_{SVM} = [0.6741, 0.6991]$ ,  $C_{PNN} = [0.5462, 0.6446]$ ,  $C_{GASVM} = [0.6963, 0.7083]$ ,  $C_{CPM} = [0.3326, 0.3401]$ , 由此可以得到评估对象的优劣排序为  $C_{GASVM} >_{0.7667} C_{SVM} >_1 C_{PNN} >_1 C_{CPM}$ , 由排序结果可知, 基于 GASVM 的识别方法的效能要优于其余几种识别系统的效能, 但在当前指标权值下, 优于基于 SVM 的识别方法的可能性有 76.67%, 说明这两种识别系统差异不显著, 结果与实际情况相一致。

**实验2** 利用熵权值和主观权值组合的 I<sup>2</sup>TOPSIS 评估实验

根据雷达辐射源信号识别实际, 主观权值为  $W_1 = [0.15, 0.25, 0.075, 0.15, 0.075, 0.2, 0.1]$ ,  $\alpha = 0.75$ , 则最终权值为  $W = [0.2506, 0.2793, 0.0292, 0.0665, 0.1548, 0.1576, 0.0619]$ 。由此可修正表3, 并计算得到距正负理想点的距离为  $d_{SVM}^+ = [0.1904, 0.1920]$ ,  $d_{PNN}^+ = [0.2192, 0.2241]$ ,  $d_{GASVM}^+ = [0.3747, 0.3763]$ ,  $d_{CPM}^+ = [0.4020, 0.4044]$ ;  $d_{SVM}^- = [0.3208, 0.3252]$ ,  $d_{PNN}^- = [0.2736, 0.2857]$ ,  $d_{GASVM}^- = [0.3747, 0.3763]$ ,  $d_{CPM}^- = [0.1272, 0.1286]$ 。可以得到评分区间值为  $C_{SVM} = [0.6202, 0.6362]$ ,  $C_{PNN} = [0.5366, 0.5872]$ ,  $C_{GASVM} = [0.6657, 0.6718]$ ,  $C_{CPM} = [0.2386, 0.2430]$ , 由此可以得到评估对象的优劣排序为  $C_{GASVM} > C_{SVM} > C_{PNN} > C_{CPM}$ , 由上述结果可知, 采用主客观赋值方法确定权值后所得结果和只采用客观赋值方法所得结果相比并无颠覆性改变,

只是对原结果进行了修正, 使评估结果更符合实际需求。这也说明采用熵值赋权是正确有效的。

如果用传统的区间 TOPSIS 法进行评估, 所得评分值为  $C_{SVM} = 0.6316$ ,  $C_{PNN} = 0.4418$ ,  $C_{GASVM} = 0.5293$ ,  $C_{CPM} = 0.1023$ , 评估结果排序为  $C_{SVM} > C_{GASVM} > C_{PNN} > C_{CPM}$ , 显然基于 SVM 的识别方法优于基于改进 SVM 的识别方法在大多数情况下是不合理的。通过上述仿真实验验证论文所提方法的正确性。

## 5 结论

对雷达辐射源信号识别效能的评估具有重要的军事意义, 传统的评估方法缺乏科学性和完备性。为此, 论文提出了基于 I<sup>2</sup>TOPSIS 的雷达辐射源信号识别效能评估方法, 该方法主要对传统 TOPSIS 方法中的权值指标计算, 正负理想点的计算以及区间距离的计算进行改进, 并将 I<sup>2</sup>TOPSIS 方法应用于雷达辐射源信号识别效能评估中, 通过计算机仿真实验对四种识别方法进行了评估, 仿真结果证明了该评估方法的可行性, 论文所得结果对进一步研究雷达辐射源信号识别效能评估方法具有一定的参考价值。

## 参考文献

- [1] 肖乐群, 赵拥军, 朱建东. 一种新的雷达辐射源信号识别方法研究[J]. 信号处理, 2011, 28(2):213-219. Xiao Lequn, Zhao Yongjun, Zhu Jiandong. New Method for Radar Emitter Signal Recognition[J]. Signal Processing, 2011, 28(2):213-219. (in Chinese)
- [2] Xu Jing, He Minghao, Han Jun, Liu Rui. Estimating the Stability of Characteristic Parameters based on Single-element Analysis of Variance[C]//11th International Conference on Signal Processing, 2012: 1804-1807.
- [3] 韩俊, 何明浩, 朱振波, 等. 基于复杂度特征的未知

- 雷达辐射源信号分选[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(11): 2552-2555.
- Han Jun, He Minghao, Zhu Zhenbo, et al. Sorting Unknown Radar Emitter Signal Based on the Complexity Characteristics[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(11): 2552-2555. (in Chinese)
- [4] Huan Wang, Ming-hao He, Jing Xu, Duan Xu. Performance Evaluation for Radar Signal Recognition Based on AHP[C]//NCIS-CMSP2012. 2012: 554-561.
- [5] 王欢,何明浩,徐璟,等. 雷达信号识别效能的模糊综合评价研究[J]. 雷达科学与技术, 2012, 4(10): 372-375.
- Wang Huan, He Minghao, Xu Jing, et al. Research on Fuzzy Comprehensive Evaluation of Radar Signal Recognition Effect [J]. Radar Science and Technology, 2012, 4(10): 372-375. (in Chinese)
- [6] 徐璟,何明浩,陈昌孝,等. 雷达辐射源信号识别结果评估方法研究[J]. 电波科学学报, 2014, 29(2): 300-304,315.
- Xu Jing, He Minghao, Chen Changxiao, et al. performance evaluation Method for radar emitter signals recognition [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2014, 29(2): 300-304,315. (in Chinese)
- [7] 庄钊文,黎湘,李彦鹏,等. 自动目标识别效能评估技术[M]. 北京:国防工业出版社,2006:61-62.
- Zhuang Zhaowen, Li Xiang, Li Yanpeng, et al. Performance Evaluation Technology for Automatic Target Recognition[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006:61-62. (in Chinese)
- [8] 岳超源. 决策理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2003.
- Yue Chaoyuan. Decision-making Theory and Methods [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)
- [9] 何俊,赵宏钟,刘峥,等. 自动目标识别系统的区间评估分值模型及算法[J]. 信号处理, 2009, 25(5): 802-806.
- He Jun, Zhao Hongzhong, Liu Zheng, et al. Interval score evaluation model and its algorithm for ATR system [J]. Signal Processing, 2009, 25(5): 802-806. (in Chinese)
- [10] 田锦,谢拥军,辛红全,等. 复杂系统电磁兼容评估的改进 TOPSIS 方法[J]. 电子学报, 2013, 41(1): 105-109.
- Tian Jin, Xie Yongjun, Xin Hongquan, et al. A Synthetical EMC Evaluation Method for a Complicated System Based on a Novel TOPSIS Approach [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(1): 105-109. (in Chinese)
- [11] Wu Jie, Sun Jiasen, Song Malin, et al. A RANKING METHOD FOR DMUS WITH INTERVAL DATA BASED ON DEA CROSS-EFFICIENCY EVALUATION AND TOPSIS[J]. Journal of System Engineering and Electronics, 2013, 22(2): 191-201.
- [12] 张毅,姜青山. 基于分层 TOPSIS 法的预警机效能评估[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(5): 1051-1055.
- Zhang Yi, Jiang Qingshan. Effectiveness evaluation of early-warning aircraft based on hierarchy TOPSIS [J]. Journal of System Engineering and Electronics, 2011, 33(5): 1051-1055. (in Chinese)
- [13] 张涛,周中良,苟星禹,等. 基于信息熵和 TOPSIS 法的目标威胁评估及排序[J]. 电光与控制, 2012, 19(11): 35-38.
- Zhang Tao, Zhou Zhongliang, Gou Xinyu, et al. Threat Assessment and Sorting of Aerial Targets Based on Information Entropy and TOPSIS Method[J]. Electronics Optics & Control, 2012, 19(11): 35-38. (in Chinese)

#### 作者简介



**徐璟** 男,1986年生,江苏江阴人,博士,主要研究方向为电子对抗信息处理。E-mail:xujingokkkk@163.com



**何明浩** 男,1963年生,江苏江阴人,空军预警学院教授、博士生导师,主要研究方向为电子对抗信息处理、电磁场与微波技术和雷达系统工程。



**郁春来** 男,1981年生,江苏涟水人,空军预警学院讲师,博士,研究方向为信息对抗装备技术与运用。