

# 雷达辐射源信号特征性能综合评价方法

普运伟<sup>1,2\*</sup>, 吴海潇<sup>1</sup>, 刘涛涛<sup>1</sup>, 郭江<sup>2</sup>

<sup>1</sup>昆明理工大学信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650500;

<sup>2</sup>昆明理工大学计算中心, 云南 昆明 650500

**摘要** 为解决雷达辐射源信号特征评价不够客观和缺乏评价依据等问题,提出一种基于区间模糊原理以及模糊交叉熵和多准则折中法的群体评价方法。建立信噪比分级评价模型,再结合三角模糊数的截集和区间逼近思想将雷达辐射源信号特征的评价体系转化为区间直觉模糊数;基于汉明距离进行寻优,得出信噪比权重,并运用区间直觉模糊加权平均算子集成群决策矩阵,基于熵最大化法计算属性权重;采取多准则折中法和模糊交叉熵实现特征方案排序。仿真实验结果表明,所提方法能够给出与实际情况相一致的特征评价排序方案,并和逼近理想点方法、投影模型方法分析结果基本一致,验证了所提方法的可行性和有效性。

**关键词** 遥感; 雷达辐射源信号; 特征评价; 区间直觉模糊; 多准则折中法

中图分类号 TN974

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0928001

## Comprehensive Evaluation Method of Radar Emitter Signal Features Performance

Pu Yunwei<sup>1,2\*</sup>, Wu Haixiao<sup>1</sup>, Liu Taotao<sup>1</sup>, Guo Jiang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China;

<sup>2</sup>Computer Center, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China

**Abstract** To solve the problem that radar emitter signal feature evaluation is not objective and lacks an evaluation basis, a group evaluation method based on interval fuzzy principle, cross-entropy, and multi-criterion compromise method is proposed. First, establish a signal noise rate (SNR) evaluation model, then combine the triangular fuzzy number cut set and interval approximation ideas to convert the evaluation system of radar emitter signal features into interval-valued intuitionistic fuzzy numbers. Next, optimize the SNR weight based on Hamming distance, and use interval-valued intuitionistic fuzzy weighted average operator-integrated group decision matrix based on the maximum entropy method to calculate the attribute weights. Finally, the multi-criteria compromise method and fuzzy cross-entropy are used to achieve the feature scheme ranking. Simulation results show that the proposed method can provide a consistent feature evaluation-ranking scheme with the actual situation and is consistent with the analysis results of the approach to the ideal point method and projection model method, verifying the feasibility and effectiveness of the proposed method.

**Key words** remote sensing; radar emitter signal; feature evaluation; interval-valued intuitionistic fuzzy; multi-criteria compromise method

**OCIS codes** 280.5600; 200.3050; 000.4930

收稿日期: 2020-08-19; 修回日期: 2020-09-14; 录用日期: 2020-09-20

基金项目: 国家自然科学基金(61561028)

\*E-mail: puyunwei@126.com

# 1 引言

从密集交叠的电磁环境中对雷达辐射源信号进行分选识别,是电子侦察中的关键环节。但实际战场环境变化多样,加之所部署的各种新体制复杂雷达越来越多,信号密度越来越大,致使用于分选识别的特征参数越来越难以有效甄选。因此,要想实现不同背景下分选识别特征的合理选择,构建科学、合理的雷达辐射源信号特征评估模型显得尤为重要。

在雷达辐射源信号特征评估方面:文献[1]引入三角模糊数进行模糊评判,但其初始指标值是通过层次分析法给定,其权重值取决于主观态度,故这样的做法缺乏客观性;文献[2]通过建立函数映射关系聚合指标信息,但其权重值仍是随机给出,且综合评价结果由各指标评分值的累加值表示,降低了评价结果的可靠性;文献[3]则建立投影寻踪模型,将综合评估问题转化为函数优化问题,但未考虑到不同信噪比(SNR)下雷达信号的分选效果;文献[4]按照信噪比进行特征评估,并对初始矩阵进行一致性检验,但其采用语义型数值确定指标权重,评价体系仍不够客观。总体而言,传统的雷达辐射源信号特征评估方法主要依靠于层次分析法、基于满意度进行量化评分等方法,但这些方法均存在评估体系不合理,评估方法不够客观、准确等问题。为此,本文提出一种结合区间直觉模糊和多准则折中法(IVIF-VIKOR)的雷达辐射源信号特征评价方法。该方法通过建立信噪比分级评价模型来减少信噪比对特征参数的影响<sup>[5]</sup>,在构建决策矩阵时,考虑到实际环境复杂多变,参数模型具有一定的模糊性,因此采取区间直觉模糊思想<sup>[6-7]</sup>来反映参数信息。所提方法利用单个决策矩阵与群决策矩阵的一致化程度求取分级权重并基于区间直觉模糊加权平均算子(IVIFWA)<sup>[7]</sup>获取群决策矩阵,采取信息熵法定义满足权重要求的属性向量,最后结合模糊交叉熵和多准则折中法<sup>[8]</sup>对特征方案进行排

序。实验结果与分析验证了所提方法的有效性和良好性能。

# 2 特征评价指标体系

为准确评价雷达辐射源信号特征的分选和识别性能,需要建立全面而准确的评价指标体系并选取合适的评价准则。考虑到特征提取的时间和空间代价、特征提取方法的稳健性和所提取特征的分选能力,构建如图 1 所示的特征性能综合评价指标体系。其中,代价  $C_1$ 、稳健性  $C_2$  为成本型指标,分离性  $C_3$  为效益型指标,本文将这三种属性作为评价的主要准则。设定时间代价  $C_{11}$  为算法运行所耗费的时间,各方案分别进行  $\bar{n}$  次测试并选取最值,用  $[a^{(L)}, a^{(U)}]$  表示,其中,  $a^{(L)}$  为  $\bar{n}$  次测试中的最小耗时,  $a^{(U)}$  为  $\bar{n}$  次测试中的最大耗时;空间代价  $C_{12}$  为所提取特征的向量维数;变异性  $C_{22}$  以提取到的各信号样本的无偏标准差来反映特征参数的稳定情况;抗扰度  $C_{23}$  反映特征的跃迁情况,即相邻信噪比下样本的差值,用  $[b^{(L)}, b^{(U)}]$  表示,其中,  $b^{(L)}$  为所有调制信号在相邻信噪比下样本的最小差值,  $b^{(U)}$  为所有调制信号在相邻信噪比下样本的最大差值;分选准确率  $C_{31}$  用  $[c^{(L)}, c^{(U)}]$  表示,其中,  $c^{(L)}$  为相同信噪比条件下所有调制信号中的最低分选准确率,  $c^{(U)}$  为相同信噪比条件下所有调制信号中的最高分选准确率,构造过程如下:  $c_i (\bar{i} = 1, 2, \dots, h)$  表示各信号的分选率,  $\bar{i}$  为第  $\bar{i}$  类信号,  $h$  为信号类别数,则平均分选率为  $\bar{c} = \sum_{i=1}^h c_i / h$ ,再将  $c_i$  视作两部分进行计算:选取  $c_i < \bar{c}$  的调制类型记为  $h_1$ ,  $c_i > \bar{c}$  的调制类型记为  $h_2$ ,可得  $c^{(L)} = \sum_{i=1}^{h_1} c_i / h_1$ ,  $c^{(U)} = \sum_{i=1}^{h_2} c_i / h_2$ ;分选灵敏度  $C_{32}$  为  $\bar{c}$  与时间代价的比值,用  $[y^{(L)}, y^{(U)}]$  表示,其中,  $y^{(L)}$  为其比值的最小值,  $y^{(U)}$  为其比值的最大值;类内聚合度  $C_{33}$  选取固定信噪比下所有调制信号的聚集率的极值,用  $[l^{(L)}, l^{(U)}]$  表示,其中,  $l^{(L)}$  为所有调制信号在

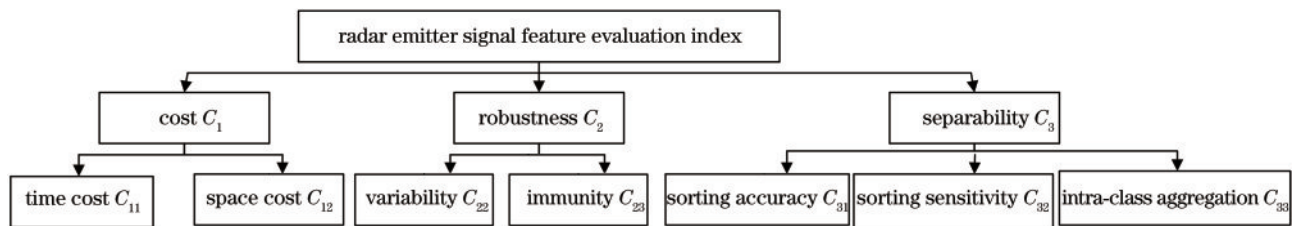


图 1 雷达辐射源信号特征综合评价指标体系

Fig. 1 Comprehensive evaluation index system of radar emitter signal features

固定信噪比下的最小聚集率,  $I^{(U)}$  为所有调制信号在固定信噪比下的最大聚集率。

### 3 基于 IVIF-VIKOR 的决策框架构建

#### 3.1 基本概念

**定义 1<sup>[6]</sup>** 设  $X$  是一个非空集合, 则称  $\bar{\alpha} = \{[\mu_{\bar{\alpha}}^{(L)}(x), \mu_{\bar{\alpha}}^{(U)}(x)], [v_{\bar{\alpha}}^{(L)}(x), v_{\bar{\alpha}}^{(U)}(x)] \mid x \in X\}$  为区

间直觉模糊集,  $[\mu_a^{(L)}(x), \mu_a^{(U)}(x)] \in [0, 1]$  为隶属度函数,  $[v_a^{(L)}(x), v_a^{(U)}(x)] \in [0, 1]$  为非隶属度函数,  $[\pi_a^{(L)}(x), \pi_a^{(U)}(x)] = [1 - \mu_a^{(L)}(x) - v_a^{(L)}(x), 1 - \mu_a^{(U)}(x) - v_a^{(U)}(x)]$  为犹豫度, 且  $\mu_a^{(U)}(x) + v_a^{(U)}(x) \leq 1$ 。

**定义 2<sup>[9]</sup>** 设  $a_1, a_2, a_3$  分别表示三角模糊数所属的可能值且  $a_1 \leq a_2 \leq a_3$ 。令  $\forall \alpha \in [0, 1]$ , 可得截集为  $\alpha$  的置信区间为

$$[a_L(\alpha), a_U(\alpha)] = [a_1 + (a_2 - a_1)\alpha, a_3 - (a_3 - a_2)\alpha] \quad (1)$$

**定义 3<sup>[10]</sup>** 区间直觉模糊数  $I(X)$  与直觉模糊数  $X$  相近, 表示为期望值相同, 即  $E[I(X)] = E(X)$ , 那么称  $I(X)$  为  $X$  的保持期望区间不变的区间直觉

逼近。如果  $\int_0^1 (1 - \nu_X)^{(L)}(\alpha) d\alpha \geq 0$ ,  $\nu_X$  为直觉模糊数  $X$  的隶属度, 可得

$$I(X) = \left( \left[ \int_0^1 (\mu_X)^{(L)}(\alpha) d\alpha, \int_0^1 (\mu_X)^{(U)}(\alpha) d\alpha \right], \left[ \int_0^1 (1 - \nu_X)^{(L)}(\alpha) d\alpha, \int_0^1 (1 - \nu_X)^{(U)}(\alpha) d\alpha \right] \right) \quad (2)$$

式中:  $\mu_X$  为直觉模糊数  $X$  的非隶属度;  $(\mu_X)^{(L)}(\alpha)$  为直觉模糊数  $X$  隶属度的  $\alpha$  截集下限;  $(\mu_X)^{(U)}(\alpha)$  为直觉模糊数  $X$  隶属度的  $\alpha$  截集上限;  $(1 - \nu_X)^{(L)}(\alpha)$  为 1 与直觉模糊数  $X$  的非隶属度之差的  $\alpha$  截集下限,  $(1 - \nu_X)^{(L)}(\alpha) = (\nu_X)^{(L)}(1 - \alpha)$ ,  $(\nu_X)^{(L)}(1 - \alpha)$  为直觉模糊数  $X$  的  $1 - \alpha$  截集的非隶属度下限;

$(1 - \nu_X)^{(U)}(\alpha)$  为 1 与直觉模糊数  $X$  的非隶属度之差的  $\alpha$  截集上限,  $(1 - \nu_X)^{(U)}(\alpha) = (\nu_X)^{(U)}(1 - \alpha)$ ,  $(\nu_X)^{(U)}(1 - \alpha)$  为直觉模糊数  $X$  的  $1 - \alpha$  截集的非隶属度上限;  $\alpha \in [0, 1]$ <sup>[11]</sup>。

**定义 4<sup>[7]</sup>** 设  $\tilde{\alpha}_j (j = 1, 2, \dots, m)$  为一组区间直觉模糊数, 则区间直觉模糊加权算子为

$$IVIFWA_{\xi}(\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2, \dots, \tilde{\alpha}_m) = \left( \left[ 1 - \prod_{j=1}^m (1 - \mu_j^{(L)})^{\xi_j}, 1 - \prod_{j=1}^m (1 - \mu_j^{(U)})^{\xi_j} \right], \left[ \prod_{j=1}^m (\nu_j^{(L)})^{\xi_j}, \prod_{j=1}^m (\nu_j^{(U)})^{\xi_j} \right] \right) \quad (3)$$

式中:  $\mu_j^{(L)}$  为属性  $C_j$  下的隶属度下限;  $\mu_j^{(U)}$  为属性  $C_j$  下的隶属度上限;  $\nu_j^{(L)}$  为属性  $C_j$  下的非隶属度下限;  $\nu_j^{(U)}$  为属性  $C_j$  下的非隶属度上限;  $j$  为属性数值;  $\xi = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m\}$  为权重值,  $\xi_j \in [0, 1]$ 。

#### 3.2 构建区间直觉模糊群决策矩阵

对于雷达辐射源信号特征评价问题, 建立信噪比分级评价模型。取特征集  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ , 属性集  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$ , 属性权重集  $\omega =$

$\{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m\}$ , 信噪比权重集  $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k\}$ , 其中  $A_i$  为第  $i$  个特征方案,  $n$  为特征方案总个数,  $C_j$  为第  $j$  个属性,  $m$  为属性总个数,  $\omega_j$  为第  $j$  个属性权重,  $\lambda_k$  为第  $k$  个信噪比权重,  $k$  为信噪比权重总个数。属性  $C_j$  下对特征  $A_i$  在不同 SNR 下的评估值用  $[x_{ij}^{(L)}, x_{ij}^{(U)}]$  或数值型数据表示, 构成具有  $n$  维特征、 $m$  种属性的  $k$  个初始评价信息矩阵  $\tilde{r}_k$ , 其中  $x_{ij}^{(L)}$  为评估区间数的下限,  $x_{ij}^{(U)}$  为评估区间数的上限。而最终构建群决策矩阵的过程如图 2 所示, 其中 SNR 表

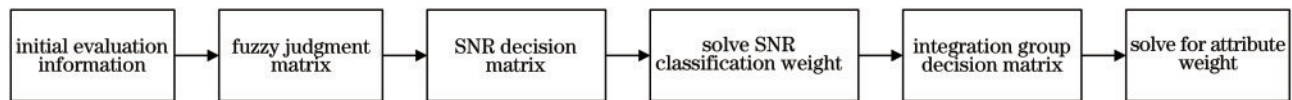


图 2 雷达辐射源特征评价中群决策矩阵构建流程

Fig. 2 Construction process of group decision matrix in evaluation of radar emitter feature

示为信号平均功率与噪声平均功率的比值。群决策矩阵的构建过程如下。

**步骤 1** 对  $n$  个方案进行两两比较,构造矩阵  $r_{ij} = ([\mu_{ij}, 1 - \nu_{ij}])_{n \times m}$ , 其中,  $i \in 1, 2, \dots, n, j \in 1, 2, \dots, m$ ,

$\mu_{ij}$  为方案  $A_i$  和方案  $A_j$  比较时偏爱  $A_i$  的程度,  $\nu_{ij}$  为偏爱  $A_j$  的程度,  $1 - \mu_{ij} - \nu_{ij}$  为犹豫度, 则称  $r_{ij}$  为模糊判断矩阵。由于各个准则间存在一定程度的不可通约性, 因此评估度量值需进行规范化处理。

收益类型的规范化<sup>[12]</sup>为

$$\begin{cases} \mu_{ij} = x_{ij}^{(L)} / \max_j x_{ij}^{(U)} \\ \nu_{ij} = 1 - x_{ij}^{(U)} / \max_j x_{ij}^{(U)} \end{cases}, i \in 1, 2, \dots, n, j \in 1, 2, \dots, m. \quad (4)$$

类似地, 成本类型的规范化为

$$\begin{cases} \mu_{ij} = \min_j x_{ij}^{(L)} / x_{ij}^{(U)} \\ \nu_{ij} = 1 - \min_j x_{ij}^{(L)} / x_{ij}^{(L)} \end{cases}, i \in 1, 2, \dots, n, j \in 1, 2, \dots, m. \quad (5)$$

**步骤 2** 通过模糊判断矩阵  $r_{ij}$  可知,  $\mu_{ij}, 1 - \nu_{ij}$  分别为隶属度的上下限,  $0, \nu_{ij}$  为非隶属度上下限, 可分别取其上下限的均值作为适中可能值, 分别构造以  $\mu_{ij}, [(1 - \nu_{ij}) + \mu_{ij}] / 2, 1 - \nu_{ij}$  为可能值的隶属三角模糊数, 以  $0, \nu_{ij} / 2, \nu_{ij}$  为可能值的非隶属三角模糊数, 以此来表征不同方案下的各属性模糊度。根据定义 2 分别得出其置信区间为  $[\mu^{(L)}(\alpha), \mu^{(U)}(\alpha)]$  和  $[\nu^{(L)}(\alpha), \nu^{(U)}(\alpha)]$ , 其中,  $\mu^{(L)}(\alpha)$  为经三角模糊数转换为置信水平  $\alpha$  下的可信区间数下限,  $\mu^{(U)}(\alpha)$  为经三角模糊数转换为置信水平  $\alpha$  下的可信区间数上限,  $\nu^{(L)}(\alpha)$  为经三角模糊数转换为置信水平  $\alpha$  下的不可信区间数下限,  $\nu^{(U)}(\alpha)$  为经三角模糊数转换为置信水平  $\alpha$  下的不可信区间数上限。进一步根据定义 3 的区间逼近思想得

出区间直觉模糊数, 则第  $k$  个信噪比决策矩阵为  $\bar{R}_k = ([\mu_k^{(L)}, \mu_k^{(U)}], [\nu_k^{(L)}, \nu_k^{(U)}])_{n \times m}$ , 其中,  $\mu_k^{(L)}$  为第  $k$  个信噪比决策矩阵的隶属度下限,  $\mu_k^{(U)}$  为第  $k$  个信噪比决策矩阵的隶属度上限,  $\nu_k^{(L)}$  为第  $k$  个信噪比决策矩阵的非隶属度下限,  $\nu_k^{(U)}$  为第  $k$  个信噪比决策矩阵的非隶属度上限。

**步骤 3**  $k$  个信噪比初始矩阵  $\bar{R}_k$  经 (3) 式集结成群决策矩阵  $\bar{R}$  后, 利用  $\bar{R}_k$  与  $\bar{R}$  之间的相似性测度求解各信噪比分级权重  $\lambda_k$ , 构造优化模型, 模型为

$$\begin{cases} \min \sum_{k=1}^t d(\bar{R}_k, \bar{R}) \\ \text{s.t.} \sum_{k=1}^t \lambda_k = 1, 0 \leq \lambda_k \leq 1 \end{cases}, \quad (6)$$

式中:  $t$  为信噪比初始矩阵的个数变量。其中, 相似性测度由汉明距离<sup>[7]</sup>表示为

$$d(\bar{R}_k, \bar{R}) = \frac{1}{n} \times \frac{1}{4m} \sum_{j=1}^m (|\mu_{ijk}^{(L)} - \mu_{ij}^{(L)}| + |\mu_{ijk}^{(U)} - \mu_{ij}^{(U)}| + |\nu_{ijk}^{(L)} - \nu_{ij}^{(L)}| + |\nu_{ijk}^{(U)} - \nu_{ij}^{(U)}|), \quad (7)$$

式中:  $\mu_{ijk}^{(L)}$  为第  $k$  个信噪比初始矩阵中备选方案在不同属性下的隶属度下限;  $\mu_{ijk}^{(U)}$  为第  $k$  个信噪比初始矩阵中备选方案在不同属性下的隶属度上限;  $\mu_{ij}^{(L)}$  为群决策矩阵中隶属度下限;  $\mu_{ij}^{(U)}$  为群决策矩阵中隶属度上限;  $\nu_{ijk}^{(L)}$  为第  $k$  个信噪比初始矩阵中备选方案在不同属性下的非隶属度下限;  $\nu_{ijk}^{(U)}$  为第  $k$  个信噪比初始矩阵中备选方案在不同属性下的非隶属度上限;  $\nu_{ij}^{(L)}$  为群决策矩阵中非隶属度下限;  $\nu_{ij}^{(U)}$  为群决策矩阵中非隶属度上限。(6) 式可通过遗传算法<sup>[13]</sup>得出满足相似度的信噪比分级权重  $\lambda_k$ , 结合 (3) 式集结成群决策矩阵  $\bar{R}$ 。

**步骤 4** 模糊熵是用来表征区间直觉模糊数的信息量, 信息量越大, 熵越小。因此, 可采用熵权法

来确定权重。由文献 [14] 可知, 区间直觉模糊数  $\bar{\alpha} = ([\mu^{(L)}(x), \mu^{(U)}(x)], [\nu^{(L)}(x), \nu^{(U)}(x)])$  的模糊熵  $e(\bar{\alpha})$  定义为  $e(\bar{\alpha}) = 1 - d(\bar{\alpha})$ , 其中,  $d(\bar{\alpha}) = ([\mu^{(L)}(x) - 0.5]^2 + [\mu^{(U)}(x) - 0.5]^2 + [\nu^{(L)}(x) - 0.5]^2 + [\nu^{(U)}(x) - 0.5]^2)^{-1/2}$ , 表示两区间直觉模糊数的距离, 则属性的信息熵可表示为  $E_j = \sum_{i=1}^n e_{ij} / n$ ,  $e_{ij}$  为备选方案在不同属性下的模糊熵, 基于熵的离差最大化确定的属性权重值为<sup>[14]</sup>

$$\omega_j = (1 - E_j) / \sum_{j=1}^m (1 - E_j) = d_j / \sum_{j=1}^m d_j, \quad (8)$$

式中:  $d_j$  为属性  $C_j$  下的距离信息。

### 3.3 基于模糊交叉熵的 VIKOR 排序

VIKOR 法是一种用于处理具有不同属性的多准则决策方法,以备选方案在不同属性下的最佳值 ( $f_j^+$ ) 和最差值 ( $f_j^-$ ) 作为基准,兼顾群体最大效用和个体最小遗憾来确定各评价值与  $f_j^+$  和  $f_j^-$  的接近程度,求出带有优先级的协调

方案。区间直觉模糊交叉熵是用来度量两区间直觉模糊数的差异程度。本文将交叉熵视作一种距离测度,引入 VIKOR 方法来对方案进行排序。

对群决策矩阵  $\tilde{R}$  中的各方案进行排序,其过程如图 3 所示,具体步骤如下。

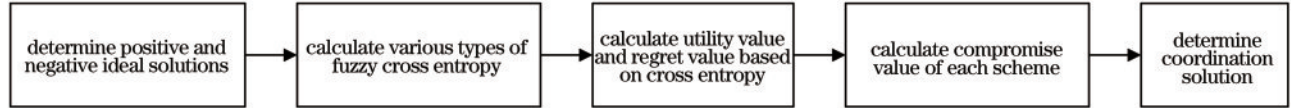


图 3 雷达辐射源特征评价中基于模糊交叉熵的 VIKOR 排序过程

Fig. 3 VIKOR ranking process based on fuzzy cross entropy in evaluation of radar emitter feature

**步骤 1** 确定各方案关于各属性的理想解和负理想解。 $f_{ij}$  为各方案在属性  $C_j$  下的区间值,  $f_j^+$  为属性  $C_j$  下的正理想解,  $f_j^-$  为属性  $C_j$  下的负理想解, 则有

$$\begin{cases} f_j^+ = \left( \max_{i=1,2,\dots,n} [\mu_{im}^{(L)}, \mu_{im}^{(U)}], \min_{i=1,2,\dots,n} [\nu_{im}^{(L)}, \nu_{im}^{(U)}] \right) \\ f_j^- = \left( \min_{i=1,2,\dots,n} [\mu_{im}^{(L)}, \mu_{im}^{(U)}], \max_{i=1,2,\dots,n} [\nu_{im}^{(L)}, \nu_{im}^{(U)}] \right) \end{cases} \quad (9)$$

**步骤 2** 为了表征  $A$  和  $B$  两区间直觉模糊数的差异性,定义他们之间的区间直觉模糊交叉熵<sup>[15]</sup>为

$$S(A, B) = D(A, B) + D(B, A), \quad (10)$$

$$D(A, B) = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_A^{(L)} + \mu_A^{(U)} + 2 - \nu_A^{(L)} - \nu_A^{(U)}}{4} \times$$

$$\ln \left[ 2(\mu_A^{(L)} + \mu_A^{(U)} + 2 - \nu_A^{(L)} - \nu_A^{(U)}) / (\mu_A^{(L)} + \mu_A^{(U)} + 2 - \nu_A^{(L)} - \nu_A^{(U)}) + (\mu_B^{(L)} + \mu_B^{(U)} + 2 - \nu_B^{(L)} - \nu_B^{(U)}) \right] +$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{2 - \mu_A^{(L)} - \mu_A^{(U)} + \nu_A^{(L)} + \nu_A^{(U)}}{4} \times$$

$$\ln \left[ 2(2 - \mu_A^{(L)} - \mu_A^{(U)} + \nu_A^{(L)} + \nu_A^{(U)}) / (2 - \mu_A^{(L)} - \mu_A^{(U)} + \nu_A^{(L)} + \nu_A^{(U)}) + (2 - \mu_B^{(L)} - \mu_B^{(U)} + \nu_B^{(L)} + \nu_B^{(U)}) \right]. \quad (11)$$

**步骤 3** 结合(8)式、(10)式、(11)式计算各方案的群体效用值  $S_i$  和个体遗憾值  $R_i$ , 表达式为

$$S_i = \sum_{j=1}^n \left[ \omega_j S(f_j^+, f_{ij}) / S(f_j^+, f_j^-) \right], \quad (12)$$

$$R_i = \max \left[ \omega_j S(f_j^+, f_{ij}) / S(f_j^+, f_j^-) \right]. \quad (13)$$

**步骤 4** 计算各方案的折中评价值  $Q_i$ , 表达式为

$$Q_i = \rho \frac{S_i - \min\{S_i\}}{\max\{S_i\} - \min\{S_i\}} + (1 - \rho) \frac{R_i - \min\{R_i\}}{\max\{R_i\} - \min\{R_i\}}, \quad (14)$$

式中:  $\rho$  为折中系数, 从均衡策略进行取得  $\rho = 0.5$ 。

**步骤 5** 确定协调解。分别利用  $S_i$ 、 $R_i$  和  $Q_i$  的值对方案进行排序, 得分值越小, 则排序越靠前。设  $n$  个方案按特征值的优劣排序为:  $M_1 > M_2 > \dots > M_n$ , 即  $M_1$  为  $Q_i$  中的最小解,  $M_2$  为次小解, 以此类推。如果同时满足  $Q(M_2) - Q(M_1) \geq 1/(n-1)$  (条件①) 且在  $S_i$ 、 $R_i$  排序中  $M_1$  至少有一个排序最靠前 (条件②), 则  $M_1$  为最优方案。若无法同时满足以

上两个条件, 则采用协调方案: 1) 若只满足条件①, 则协调解集为  $\{M_1, M_2\}$ , 2) 若只满足条件②, 由  $Q(M_2) - Q(M_1) \leq 1/(n-1)$  确定最大  $n$  值, 得到协调解集为  $\{M_1, M_2, \dots, M_n\}$ 。

至此, 利用区间模糊及逼近思想构建出区间直觉模糊群决策矩阵, 再通过模糊交叉熵整合群决策矩阵中的信息计算出  $S_i$ 、 $R_i$  和  $Q_i$ , 进而确定协调解集, 从而实现基于 IVIF-VIKOR 决策框架的特征方案排序。

## 4 实验结果及分析

### 4.1 算例分析

实验选取雷达辐射源信号的坐标域形态特征  $A_1^{[16]}$ 、三维地貌特征  $A_2^{[17]}$ 、模糊函数主脊(AFMR)切面特征  $A_3^{[18]}$ 、双谱特征  $A_4^{[19]}$  共 4 种方案和常规脉冲(CON)、线性调频(LFM)、二相编码(BPSK)、四

相编码(QPSK)、 $M$  伪随机序列( $M$ -SEQ)以及二频编码(BFSK)共 6 类雷达辐射源信号进行分析。所有信号的脉宽为  $10 \mu\text{s}$ , SNR 从 0 dB~8 dB, 每隔 2 dB 每种信号产生 100 个样本。本实验分别在 SNR 为 2 dB、4 dB 和 6 dB 的条件下进行初始评价。评价过程中, 各特征提取方法均运行 10 次, 所得的初始评价信息矩阵  $\bar{r}_1 \sim \bar{r}_3$  可表示为

$$\bar{r}_1 = \begin{pmatrix} [1.27, 1.52] & [3, 3] & [1.33, 1.33] & [0.66, 3.84] & [97.50, 100] & [65.24, 78.09] & [97, 100] \\ [0.13, 0.16] & [2, 2] & [10.05, 10.05] & [3.02, 4.01] & [81.95, 100] & [568.56, 699.77] & [79.96, 100] \\ [4.13, 4.68] & [3, 3] & [9.47, 9.47] & [0.83, 12.67] & [87.66, 100] & [20.05, 22.72] & [77, 100] \\ [4, 52, 5.08] & [2, 2] & [5.96, 5.96] & [2.83, 3.17] & [81, 89.67] & [10.67, 18.88] & [79, 95] \end{pmatrix}, \quad (15)$$

$$\bar{r}_2 = \begin{pmatrix} [1.27, 1.52] & [3, 3] & [0.41, 0.41] & [0.17, 0.66] & [99, 100] & [65.68, 78.61] & [99, 100] \\ [0.14, 0.16] & [2, 2] & [7.05, 7.05] & [3.02, 4.53] & [87.98, 100] & [587.44, 671.36] & [84.56, 100] \\ [4.13, 4.50] & [3, 3] & [7.94, 7.94] & [0.83, 3.50] & [89.33, 100] & [21.04, 22.92] & [83, 100] \\ [4.51, 4.89] & [2, 2] & [5.47, 5.47] & [3.17, 3.17] & [84.67, 92.33] & [18.10, 19.62] & [83, 98] \end{pmatrix}, \quad (16)$$

$$\bar{r}_3 = \begin{pmatrix} [1.30, 1.52] & [3, 3] & [0.00, 0.00] & [0.00, 0.17] & [100, 100] & [65.79, 76.92] & [100, 100] \\ [0.14, 0.16] & [2, 2] & [1.81, 1.81] & [0.52, 4.53] & [96.72, 100] & [615.75, 703.71] & [96.42, 100] \\ [4.20, 4.44] & [3, 3] & [4.02, 4.02] & [1.00, 3.50] & [94.50, 100] & [22.11, 23.37] & [90, 100] \\ [4.51, 4.78] & [2, 2] & [4.93, 4.93] & [1.50, 3.17] & [88, 95.33] & [19.18, 20.33] & [87, 100] \end{pmatrix}, \quad (17)$$

其中, 设定初始矩阵中行为方案值, 列为属性值。

将  $\bar{r}_1$  依据 (4) 式、(5) 式规范化为模糊判断矩阵后, 再根据 3.2 节步骤 2 的内容便可得到 SNR 为 2 dB 时的信噪比决策矩阵  $\bar{R}_1$ , 如表 1 所示。其余信噪比条件下的计算过程与  $\bar{R}_1$  类似, 不再给出。考虑到规范化公式的意义及数据来源的限制, 初始数据为 0 时使用 +0.001 进行修正。

根据 (6) 式、(7) 式计算得出信噪比权重

为  $\lambda(k) = \{0.2, 0.39, 0.41\}$ , 结合 (3) 式将信噪比决策矩阵  $\bar{R}_1$ 、 $\bar{R}_2$  和  $\bar{R}_3$  集结为如表 2 所示的群决策矩阵  $\bar{R}$ 。

根据 (8) 式计算得到群决策矩阵中的属性权值为  $\omega = \{0.1271, 0.1357, 0.1314, 0.1018, 0.1888, 0.1246, 0.1906\}$ 。根据 (9) 式确定各属性正、负理想解, 根据 (10) 式、(11) 式确定各方案在不同属性下的模糊交叉熵  $S(f_j^+, A_i)$  及  $S(f_j^+, f_j^-)$ , 得模糊交叉熵矩阵  $S$  为

$$S = \begin{pmatrix} 0.06605923 & 0.02549207 & 0.00000000 & 0.00000000 & 0.00000000 & 0.06415527 & 0.00000000 \\ 0.00000000 & 0.00000000 & 0.09169553 & 0.02561483 & 0.00214528 & 0.00000000 & 0.00257803 \\ 0.07531208 & 0.02549207 & 0.09182889 & 0.01533557 & 0.00237613 & 0.07380018 & 0.00442252 \\ 0.07570828 & 0.00000000 & 0.08775991 & 0.02508567 & 0.00882807 & 0.07236185 & 0.00533424 \\ 0.59565657 & 0.18785611 & 0.69885693 & 0.25162425 & 0.04676690 & 0.58077971 & 0.02798901 \end{pmatrix}. \quad (18)$$

依据 (12)~(14) 式确定各方案群体效用值  $S_i$ 、个体遗憾值  $R_i$  和折中评价值  $Q_i$ , 并对方案进行排序, 如图 4 所示。

由图 4 可知, 各方案按  $S_i$  排序为  $A_1 > A_2 > A_3 > A_4$ , 按  $R_i$  值排序为  $A_2 > A_1 > A_3 > A_4$ , 按  $Q_i$  值排序为  $A_2 > A_1 > A_3 > A_4$ 。通过条件 ① 检验

得:  $Q(A_1) - Q(A_2) = 0.024 < 1/4$ , 不满足此条件。通过条件 ② 可知, 按  $S_i$  排序时  $A_2$  不是最优解, 但在  $R_i$  排序中  $A_2$  最靠前, 满足条件 ②。由于  $Q(A_3) - Q(A_2) = 0.6217 > 1/4$ , 故可确定最大  $n$  值为 2, 得到协调解为  $\{A_2, A_1\}$ , 则方案排序为  $A_2 > A_1 > A_3 > A_4$ 。

表 1 信噪比决策矩阵(SNR为 2 dB)  
Table 1 SNR decision matrix(SNR is 2 dB)

Solution	$\bar{R}_1$						
	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{21}$	...	$C_{31}$	$C_{32}$	$C_{33}$
$A_1$	([0.0897, 0.0982], [0.2244, 0.6732])	([0.6667, 0.6667], [0.0833, 0.2500])	([1.0000, 1.0000], [0.0000, 0.0000])	...	([0.9812, 0.9937], [0.0000, 0.0000])	([0.0978, 0.1070], [0.2221, 0.6663])	([0.9775, 0.9925], [0.0000, 0.0000])
$A_2$	([0.8594, 0.9531], [0.0000, 0.0000])	([1.0000, 1.0000], [0.0000, 0.0000])	([0.1322, 0.1322], [0.2169, 0.6508])	...	([0.8646, 0.9549], [0.0000, 0.0000])	([0.8594, 0.9531], [0.0000, 0.0000])	([0.8497, 0.9499], [0.0000, 0.0000])
$A_3$	([0.0287, 0.0306], [0.2421, 0.7264])	([0.6667, 0.6667], [0.0833, 0.2500])	([0.1403, 0.1403], [0.2149, 0.6448])	...	([0.9075, 0.9691], [0.0000, 0.0000])	([0.0296, 0.0315], [0.2419, 0.7256])	([0.8275, 0.9425], [0.0000, 0.0000])
$A_4$	([0.0264, 0.0230], [0.2428, 0.7284])	([1.0000, 1.0000], [0.0000, 0.0000])	([0.2232, 0.2232], [0.1942, 0.5826])	...	([0.8317, 0.8750], [0.0258, 0.0775])	([0.0182, 0.0240], [0.2433, 0.7298])	([0.8300, 0.9100], [0.0125, 0.0375])

表 2 群决策矩阵  
Table 2 Group decision matrix

Solution	$R$						
	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{21}$	...	$C_{31}$	$C_{32}$	$C_{33}$
$A_1$	([0.0950, 0.1034], [0.2231, 0.6693])	([0.6667, 0.6667], [0.0833, 0.2500])	([1.0000, 1.0000], [0.0000, 0.0000])	...	([1.0000, 1.0000], [0.0000, 0.0000])	([0.0995, 0.1084], [0.2218, 0.6654])	([1.0000, 1.0000], [0.0000, 0.0000])
$A_2$	([0.8983, 0.9662], [0.0000, 0.0000])	([1.0000, 1.0000], [0.0000, 0.0000])	([0.0507, 0.0507], [0.2374, 0.7120])	...	([0.9426, 0.9809], [0.0000, 0.0000])	([0.8983, 0.9662], [0.0000, 0.0000])	([0.9330, 0.9777], [0.0000, 0.0000])
$A_3$	([0.0313, 0.0326], [0.2417, 0.7251])	([0.6667, 0.6667], [0.0833, 0.2500])	([0.0497, 0.0497], [0.2375, 0.7127])	...	([0.9372, 0.9791], [0.0000, 0.0000])	([0.0315, 0.0328], [0.2417, 0.7249])	([0.8910, 0.9637], [0.0000, 0.0000])
$A_4$	([0.0288, 0.0290], [0.2423, 0.7270])	([1.0000, 1.0000], [0.0000, 0.0000])	([0.0778, 0.0778], [0.2305, 0.6916])	...	([0.8747, 0.9138], [0.0166, 0.0498])	([0.0257, 0.0751], [0.2429, 0.7285])	([0.8772, 0.9502], [0.0000, 0.0000])

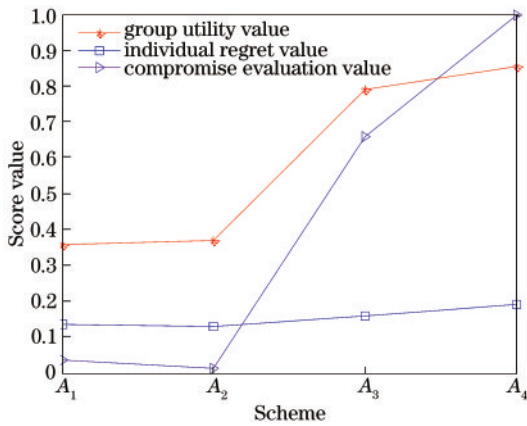


图 4 方案得分值  
Fig. 4 Scheme score value

由 4 种方案的具体特征提取<sup>[20]</sup>流程可知： $A_4$ 采取算法复杂度较高的双谱估计提取特征并使用 Walsh 变换对信息进行甄选，运算量较大且优化效率较低； $A_3$ 利用分数自相关对模糊函数进行多角度搜索，处理信息量较多，降低了分选效率； $A_1$ 基于 AFMR 切面形态特征进行提取，且用灰狼优化算法替代  $A_3$  中的穷举法进行搜索，具有良好的时效性和分选性； $A_2$ 以规模较低的模糊函数三维图进行特征

提取，大大提高了信号分选的工程实操性，能够满足大量雷达信号的分选需求。由此可见，所提方法给出的方案排序与实际情况基本吻合。

#### 4.2 TOPSIS 结果对比

采用逼近理想点(TOPSIS)法对表 2 的群决策矩阵进行分析计算，并将此方法与所提方法进行对比。各方案的接近度表达式为<sup>[7]</sup>

$$D_i^* = \frac{D_i^+(P^*, f_{ij})}{D_i^+(P^*, f_{ij}) + D_i^-(N^*, f_{ij})}, \quad (19)$$

式中： $D_i^+(P^*, f_{ij})$ 为优值  $P^*$  与各方案的正模糊交叉熵； $D_i^-(N^*, f_{ij})$ 为劣值  $N^*$  与各方案的负模糊交叉熵，其中由群决策矩阵确定的正理想解为  $P^* = f_j^+$ ，负理想解为  $N^* = f_j^-$ 。依据(19)式得到的评价结果如图 5 所示。

从图 5 可见，TOPSIS 方法得到的评价结果为  $A_2 > A_1 > A_4 > A_3$ ，与 VIKOR 法得到的结果存在一定差异，但仍满足协调解为  $\{A_2, A_1\}$ ，方案 3 和方案 4 排序的位置不同，这是因为在 VIKOR 法中，方案 4 在权重较高的属性  $C_{31}$ 、 $C_{33}$  上隶属度最低，相关

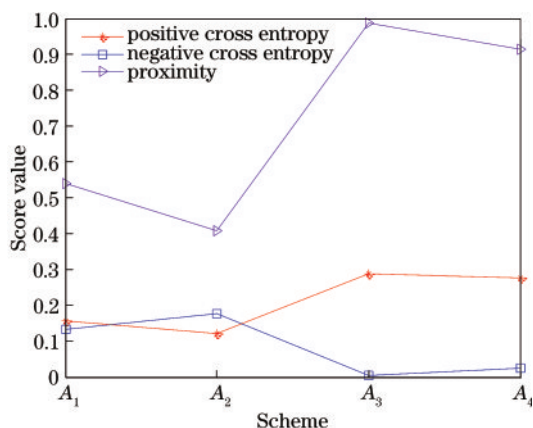


图 5 TOPSIS法得分值

Fig. 5 TOPSIS method score value

属性难以被补偿,而方案 3 的个体遗憾值较小,可均衡权重值对各属性的影响。TOPSIS 法仅选择评价对象与优劣值间的距离作为参考,未考虑到距离的权重,故结果与理想点存在一定的偏差。

### 4.3 投影模型结果对比

采取每个方案的得分向量  $s(A_i)$  和区间直觉模糊理想点  $s(A^+)$  之间夹角的余弦函数,对表 2 的群决策矩阵建立投影模型,并将此方法与所提方法进行对比。各方案的投影向量值可表示为<sup>[21]</sup>

$$P = |s(A_i)| \cos[s(A_i), s(A^+)] = \frac{1}{|\omega|} \sum_{j=1}^m \omega_j^2 s(\alpha_{ij}), \quad (20)$$

式中:  $\alpha_{ij}$  为区间直觉模糊数;  $|\omega|$  为属性权重的模,  $|\omega| = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j^2}$ ;  $A^+$  为理想方案,  $A^+ = ([1, 1], [0, 0])_{1 \times m}$ ;  $s(\alpha_{ij})$  为区间直觉模糊数的得分函数,表示为

$$s(\alpha_{ij}) = \frac{1}{2}(\mu^{(l)} - \nu^{(l)} + \mu^{(u)} - \nu^{(u)}), \quad (21)$$

(21) 式中,  $P$  值越大,  $s(A_i)$  和  $s(A^+)$  越接近,即方案  $A_i$  越接近理想方案  $A^+$ ,代表方案  $A_i$  越好。依据 (20) 式得到的评价结果如图 6 所示。

从图 6 可见,投影模型得到的评价结果为  $A_2 > A_1 > A_4 > A_3$ ,与 TOPSIS 法得到的排序结果一致,而与 VIKOR 法得到的结果存在一定差异,这是因为投影模型虽然考虑到权重的影响,但不同区间直觉模糊数的得分函数相同,进而影响了评价结果。

综合以上实验可知,VIKOR 法既能有效克服 TOPSIS 法易出现逆序现象的不足,也能避免投影

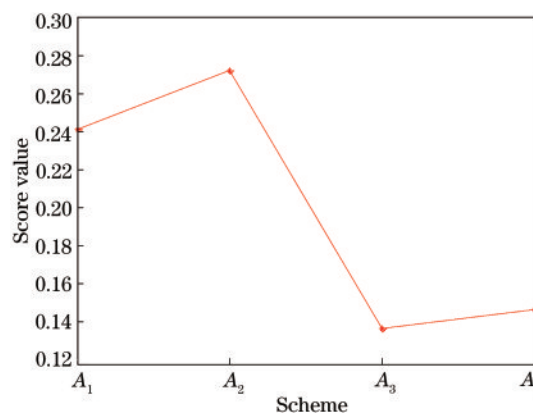


图 6 投影模型得分值

Fig. 6 Projection model score value

模型评价偏颇的现象,进而可以得到相对更为合理的评价结果。VIKOR 法引入折中系数,既考虑了群体效应还考虑了个体妥协,并兼顾了不同信噪比下的权重。结合各方案的理论结果,证明所提方法有效,且具有良好的性能。

## 5 结 论

在对雷达辐射源信号特征的研究中,构建有效的综合评价机制仍是一项急需解决的关键问题和难题。为此,提出一种基于 IVIF-VIKOR 的雷达辐射源信号特征评价模型与方法。该方法采用区间模糊的思想构建分级评价矩阵并基于汉明距离得到信噪比权重,有效提高了评估精度;然后基于 IVIFWA 算子整合单个决策矩阵,实现了群决策矩阵的集成,进而采取熵权法求解群矩阵中各属性的权重,最后基于模糊交叉熵的 VIKOR 法对方案进行评估,使得评估结果更为准确和客观。仿真实验结果表明,该方法能够对特征提取方案进行相对合理的评价,这为雷达辐射源信号特征评价研究提供了切实可行的研究思路,对电子对抗信号的特征提取与性能分析具有一定的指导意义。下一步,将进一步完善综合特征评价指标体系并优化评价流程,以便更加科学、客观、合理地雷达辐射源信号特征进行综合评价。

### 参 考 文 献

[1] Zhu B, Jin W D, Yu Z B, et al. FAHP-based feature evaluation for advanced radar emitter signals [J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(20): 18-22.  
朱斌,金炜东,余志斌,等.复杂体制雷达辐射源信号特征的 FAHP 评价[J]. 计算机工程与应用,



- 2012, 48(20): 18-22.
- [2] Han J, He M H, Tang Z K, et al. Estimating impulse characteristics of radar signal based on multi-index[J]. Chinese Journal of Electronics, 2011, 20(1): 187-191.
- [3] Zhu B, Jin W D, Yu Z B, et al. Intrapulse feature evaluation model of radar emitter signal based on differential evolution, particle swarm optimization and projection pursuit algorithm[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(1): 189-196.  
朱斌, 金炜东, 余志斌, 等. RES 脉内特征的差分进化粒子群投影寻踪评价模型[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(1): 189-196.
- [4] Chen C X, He M H, Feng M Y, et al. Estimating radar emitter signal characteristics based on CSS system[J]. Modern Defence Technology, 2015, 43(5): 33-38, 150.  
陈昌孝, 何明浩, 冯明月, 等. 基于 CSS 体系的雷达辐射源信号特征参数评估[J]. 现代防御技术, 2015, 43(5): 33-38, 150.
- [5] Shao J F, Hua D X, Wang L, et al. Development of ultraviolet dual-wavelength lidar and analysis of its signal-to-noise ratio [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(12): 1201004.  
邵江锋, 华灯鑫, 汪丽, 等. 紫外双波长激光雷达系统研制与信噪比分析[J]. 光学学报, 2020, 40(12): 1201004.
- [6] Bharati S K, Singh S R. Interval-valued intuitionistic fuzzy linear programming problem[J]. New Mathematics and Natural Computation, 2020, 16(1): 53-71.
- [7] Li Y L, Wang R, Chin K S, et al. New failure mode and effect analysis approach considering consensus under interval-valued intuitionistic fuzzy environment [J]. Soft Computing, 2019, 23(22): 11611-11626.
- [8] Dammak F, Baccour L, Alimi A M, et al. A new ranking method for TOPSIS and VIKOR under interval valued intuitionistic fuzzy sets and possibility measures[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2020, 38(4): 4459-4469.
- [9] Chakraverty S, Mahato N R, Karunakar P, et al. Differential equations with fuzzy uncertainty [M] // Advanced Numerical and Semi-Analytical Methods for Differential Equations, [S.l.]: Wiley Telecom, 2019: 209-216.
- [10] Li S Y. Approximation problem of intuitionistic fuzzy numbers [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- 李舒阳. 直觉模糊数逼近问题研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [11] Grzegorzewski P. Nearest interval approximation of a fuzzy number[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2002, 130(3): 321-330.
- [12] Yue Z L. A group decision making approach based on aggregating interval data into interval-valued intuitionistic fuzzy information[J]. Applied Mathematical Modelling, 2014, 38(2): 683-698.
- [13] Huang F, Zhang X K, Sun L, et al. Vibration spectral component analysis based on genetic algorithm and simulated annealing algorithm [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(9): 093001.  
黄凡, 张旭坤, 孙陆, 等. 基于遗传算法和模拟退火算法的振动光谱成分分析算法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(9): 093001.
- [14] Qi X W, Liang C Y, Zhang E Q, et al. Approach to interval-valued intuitionistic fuzzy multiple attributes group decision making based on maximum entropy [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2011, 31(10): 1940-1948.  
戚筱雯, 梁昌勇, 张恩桥, 等. 基于熵最大化的区间直觉模糊多属性群决策方法[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(10): 1940-1948.
- [15] Zhang Q S, Jiang S Y, Jia B G, et al. Some information measures for interval -valued intuitionistic fuzzy sets [J]. Information Sciences, 2010, 180(24): 5130-5145.
- [16] Pu Y W, Guo Y P, Hou W T, et al. Morphological feature extraction based on the polar transformation of the slice of ambiguity function main ridge[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(10): 1-9.  
普运伟, 郭媛蒲, 侯文太, 等. 模糊函数主脊切面极坐标域形态特征提取方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(10): 1-9.
- [17] Pu Y W, Hou W T, Guo Y P, et al. A sorting method of radar emitter signal based on three dimensional feature of ambiguity function[J]. Control and Decision, 2019, 34(10): 2178-2184.  
普运伟, 侯文太, 郭媛蒲, 等. 基于模糊函数三维特征的雷达辐射源信号分选方法[J]. 控制与决策, 2019, 34(10): 2178-2184.
- [18] Pu Y W, Jin W D, Zhu M, et al. Extracting the main ridge slice characteristics of ambiguity function for radar emitter signals[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2008, 27(2): 133-137.  
普运伟, 金炜东, 朱明, 等. 雷达辐射源信号模糊函数主脊切面特征提取方法[J]. 红外与毫米波学报,

- 2008, 27(2): 133-137.
- [19] Chen C X, He M H, Zhu Y Q, et al. Specific emitter features extract based on bispectrum analysis [J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(6): 1046-1049.
- 陈昌孝, 何明浩, 朱元清, 等. 基于双谱分析的雷达辐射源个体特征提取[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(6): 1046-1049.
- [20] Zu S, Hu P P, Pan Q, et al. Extraction method of artificial landmark center based on lidar echo intensity [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(8): 0810001.
- 祖爽, 胡攀攀, 潘奇, 等. 基于激光雷达回波强度的人工路标中心提取方法[J]. 中国激光, 2020, 47(8): 0810001.
- [21] Xu Z S, Hu H. Projection models for intuitionistic fuzzy multiple attribute decision making[J]. International Journal of Information Technology & Decision Making, 2010, 9(2): 267-280.