

# 雷达辐射源信号分选识别特征性能评价的改进灰色关联模型

普运伟<sup>1,2</sup>, 吴海潇<sup>1</sup>, 姜 莹<sup>1</sup>, 余永鹏<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学信息工程与自动化学院, 昆明 650500; 2. 昆明理工大学计算中心, 昆明 650500)

**摘 要:** 为解决雷达辐射源信号分选识别特征评价不够客观和缺乏评价依据等问题, 构建了一种结合区间直觉模糊思想的改进灰色关联的特征评价模型。该模型引入信噪比维度来考察不同层次数据的动态差异, 以区间型数据描述特征信息, 建立区间直觉模糊综合决策矩阵; 其次, 采用特征间总离差最大化的优化模型来确定各指标权重; 最后基于改进灰色关联框架, 结合逼近理想点方法实现特征方案排序。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分选识别特征评价排序结果, 并未改进的灰色关联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:** 雷达辐射源信号; 特征评价; 区间直觉模糊; 改进灰色关联

**中图分类号:** TN974      **文献标志码:** A

## Improved Grey Correlation Model for Performance Evaluation of Radar Emitter Signal Sorting and Recognition Features

PU Yunwei<sup>1,2</sup>, WU Haixiao<sup>1</sup>, JIANG Ying<sup>1</sup>, YU Yongpeng<sup>1</sup>

(1. Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;  
2. Computer Center, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of insufficient objective evaluation and lack of evaluation basis for the classification and identification of radar emitter signal, an improved gray correlation feature evaluation model combined with interval-valued intuitionistic fuzzy thought is constructed. The model introduces the dimension of signal-to-noise ratio (SNR) to examine the dynamic differences of data at different levels, describes feature information with interval data, and establishes an interval-valued intuitionistic fuzzy comprehensive decision matrix. Secondly, an optimization model that maximizes the total deviation between features is used to determine the weight of each indicator. Finally, based on the improved gray correlation framework, the ranking of feature schemes is achieved by combining with the approach to ideal points. The simulation results show that the proposed method can give the sorting identification feature evaluation and sorting results that are consistent with the actual situation, and is basically consistent with the analysis results by the unimproved gray correlation method, which verifies the feasibility and effectiveness of the proposed method.

**Key words:** radar emitter signal; feature evaluation; interval-valued intuitionistic fuzzy; improved grey correlation

## 引言

雷达辐射源信号分选与识别是现代电子对抗的重要组成部分,它可截获敌方雷达参数进行分析,甄选出作战信息等关键因素,以便对战场进行态势评估和敌对风险分析,是对敌制胜的关键手段,对国防科技的发展具有重大意义。然而随着电磁环境的日趋复杂及分选识别技术的不断发展,如何对分选识别特征性能进行有效、合理的评估已成为这些特征投入战场应用的制约因素,这直接关系着电子侦察信号处理的效能改进。然而,国内外在设计合理且有效的综合评价模型上的研究仍然乏善可陈,例如:文献[1]提出了 Logistic 回归模型对雷达辐射源信号进行特征评估,但只利用特征的正确识别率进行规划求解,并未提出完备的评价体系,评价结果有失偏颇;文献[2]引入雷达辐射源测试识别结果来进行模糊评判,但其模糊度由优、良等评语性等级设定,且采用层次分析法获取指标权值,整体评价框架不够客观;文献[3]采用层次分析法进行指标权重的确定,即将评价指标两两比较后根据重要程度进行权重赋值,缺乏一定的客观性;文献[4]只以参数间的距离作为评价度量,缺乏全面性;文献[5]虽从多指标角度构建了评价体系,但仅对雷达信号的熵特征进行评价,缺乏普遍适用性;文献[6]通过群体智能寻优来确定指标权重,仅从单一时间段进行分析,并未考虑到不同信噪比下信号参数的影响,评价结果不够准确。总体而言,传统的雷达辐射源信号分选识别特征评价方法多数存在评价指标单一、权重设定不合理等问题,这仅能从某些侧面反映分选识别特征性能,在复杂电磁环境中,既无法保证评估结果的科学性,也难以满足实际战场需求,并且多数方法仅对单时段(即静态)情况进行评价研究,然而实际决策中,诸多问题常需要融合不同时间段的测度信息进行探讨,因此通过动态层次分解来进行评价更具有实际意义。基于以上背景,本文提出了一种在区间直觉模糊数的形式下,基于多指标、多时段、多特征的角度将参数信息进行动态层次分解,以探索动态多指标评价模型建立的方法。

在雷达辐射源信号的分选识别过程评价中,考虑到特征参数不可避免地会受到噪声的影响,故而建立以不同信噪比为基础的动态层次分解模型;考虑到信号参数来源不够完备且受到多径效应影响,参数模型具有一定的模糊性,故在构建决策矩阵时,采取区间直觉模糊(Interval-valued intuitionistic fuzzy, IVIF)思想<sup>[7]</sup>来反映参数信息;考虑到信号参数属于多维非线性数据,可采取改进灰色关联法对备选特征进行排序。为此,本文设计了一种结合区间直觉模糊思想和改进灰色关联法的雷达辐射源信号分选识别特征评价方法。该方法在动态信噪比层次下构建评价矩阵,进一步通过公式集结为区间直觉模糊数型的综合决策矩阵;然后建立基于多特征离差最大化的优化模型,确定指标属性;进而构建改进灰色关联评价体系求得特征方案的排序结果;最后通过实验分析验证本文模型的有效性和良好性能。区间直觉模糊和灰色关联法是根据数据信息量来进行分析的评价算法。该方法将初始数据进行模糊处理,能够有效避免因数据来源限制、背景因素等造成的信息损失。此类算法对数据没有服从线性条件的前提要求,适用于高维非线性拟合和非高斯数据的群体评价,在系统制造<sup>[8]</sup>、项目投资<sup>[9]</sup>及社交网络<sup>[10]</sup>等领域均有广泛应用。经前期研究已证明雷达辐射源信号分选识别属于多维非线性数据<sup>[6]</sup>,因此灰色关联法非常适合用来研究雷达辐射源信号分选识别特征评价问题。

## 1 分选识别特征评价指标体系

本文通过建立一个系统性的分层聚合模型来评价雷达辐射源信号的分选识别性能,为遴选最佳特征提供全面而合理的决策支撑。考虑到特征提取的复杂性、特征提取方法的鲁棒性和所提取特征的分离能力,本文主要从3个方面设定了6个评价指标来反映雷达辐射源信号分选识别特征性能,构建如图1所示的评价指标体系。图1中,分选准确率  $C_{31}$  为效益型指标,其余5个指标为成本型指标。

时间复杂性  $C_{11}$  以各信噪比下进行  $n$  次特征提取实验所耗费的平均时间来度量,以区间数  $[a^L, a^U]$  表示;考虑到运算过程中实际问题的规模,需要对提取特征的计算量进行分析,故采取算法复杂度  $C_{12}$  对各特征方案的算法阶数进行量化,具体评价依据可参考文献[3];噪声适应度  $C_{21}$  反映特征参数在不同噪声下的适应情况,即在同一噪声水平下提取到各信号样本的无偏标准差,以区间数  $[b^L, b^U]$  表示;为描述各特征参数的抗噪性能,即特征在不同信噪比下的跃迁情况,可采用噪声稳定性  $C_{22}$  进行计算,将相邻信噪比范围内所有调制信号分选识别后的样本数据进行差值计算,结果以区间数  $[c^L, c^U]$  表示;分选准确率  $C_{31}$  以区间数  $[e^L, e^U]$  表示,即各固定信噪比下的所有调制信号的平均分选成功率;类间离散度  $C_{32}$  用来衡量特征参数的聚类效果,为同一信噪比下各类调制信号聚集率的最大差值,以区间数  $[g^L, g^U]$  表示。

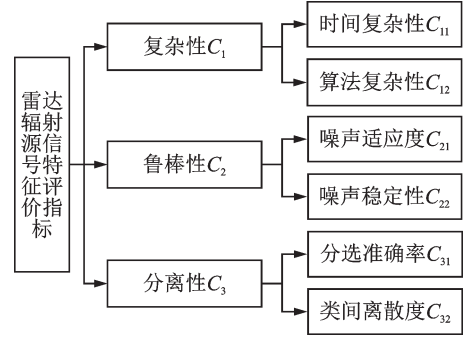


图1 雷达辐射源信号分选识别特征综合评价指标体系

Fig.1 Comprehensive evaluation attribute system of radar emitter signal sorting and identification features

## 2 基于区间直觉模糊思想的改进灰色关联评价模型

### 2.1 动态层次分解的区间直觉模糊矩阵

对于雷达辐射源信号分选识别特征评价问题,建立  $k$  个动态层次分解模型,设定特征集为  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ , 指标集为  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$ , 指标权重集为  $\omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m\}$ 。不同层次下指标  $C_j$  对特征  $A_i$  的评估信息用区间型数据表示,构建初始矩阵  $X_k = \left( \left[ (x_{ij}^k)^L, (x_{ij}^k)^U \right] \right)_{n \times m}$ 。采取  $[0, 1]$  区间规范化方法对矩阵  $X_k$  中效益型评价指标进行标准化处理,表达式为<sup>[11]</sup>

$$(\tilde{y}_{ij}^k)^L = (x_{ij}^k)^L / \max_j (x_{ij}^k)^U, (\tilde{y}_{ij}^k)^U = (x_{ij}^k)^U / \max_j (x_{ij}^k)^U \quad i \in N, j \in M \quad (1)$$

类似地,对成本型评价指标的标准化处理为

$$(\tilde{y}_{ij}^k)^L = \min_j (x_{ij}^k)^L / (x_{ij}^k)^U, (\tilde{y}_{ij}^k)^U = \min_j (x_{ij}^k)^L / (x_{ij}^k)^L \quad i \in N, j \in M \quad (2)$$

进一步将归一化后的矩阵  $\tilde{Y}_k = \left( \left[ (\tilde{y}_{ij}^k)^L, (\tilde{y}_{ij}^k)^U \right] \right)_{n \times m}$  分别按特征集  $A_i$  重新集结为新的  $k$  个动态层次分解矩阵  $Y_k = \left( \left[ (y_{ij}^k)^L, (y_{ij}^k)^U \right] \right)_{n \times m}$ , 并将其转换为区间直觉模糊数  $([\mu_{ij}^L, \mu_{ij}^U], [\nu_{ij}^L, \nu_{ij}^U])$  的形式,其中

$[\mu^L, \mu^U] \in [0, 1]$  称为隶属度,  $[\nu^L, \nu^U] \in [0, 1]$  称为非隶属度,且  $\mu^U + \nu^U \leq 1$ 。当隶属度大于非隶属度时,表示肯定概率大于反对概率。

依据文献[12]可得矩阵  $Y_k$  转换为区间直觉模糊数的过程如下:

(1) 当  $Y_k = \left( \left[ (y_{ij}^k)^L, (y_{ij}^k)^U \right] \right)_{n \times m}$  的值越大,那么第  $k$  个层次下第  $i$  个特征项对第  $j$  个指标的认可程度越高。为了确定每个指标所认可的边界值,可得

$$\xi_{ij}^L = \min_j (y_{ij}^k)^U, \xi_{ij}^U = \max_j (y_{ij}^k)^U \quad (3)$$

$$\zeta_{ij}^L = \min_j (y_{ij}^k)^L, \zeta_{ij}^U = \max_j (y_{ij}^k)^L \quad (4)$$

式中 $[\xi_{ij}^L, \xi_{ij}^U]$ ,  $[\zeta_{ij}^L, \zeta_{ij}^U]$ 分别称为指标的认可区间和不认可区间。

(2)考虑到端点 $\zeta_{ij}^L, \zeta_{ij}^U$ 的值越小,则第*i*个特征对第*j*个指标的不认可程度越高。因此给出了如下2个端点的线性变换

$$\delta_{ij}^L = 1 - \zeta_{ij}^U, \delta_{ij}^U = 1 - \zeta_{ij}^L \quad (5)$$

(3)整理式(3~5),可得出特征 $A_i$ 相对于指标 $C_j$ 的评价信息为区间直觉模糊数的形式,即 $r_{ij} = ([\mu_{ij}^L, \mu_{ij}^U], [\nu_{ij}^L, \nu_{ij}^U])$ ,其中

$$\begin{cases} \mu_{ij}^L = \frac{\xi_{ij}^L}{\xi_{ij}^L + \xi_{ij}^U + \delta_{ij}^L + \delta_{ij}^U}, \mu_{ij}^U = \frac{\xi_{ij}^U}{\xi_{ij}^L + \xi_{ij}^U + \delta_{ij}^L + \delta_{ij}^U} \\ \nu_{ij}^L = \frac{\delta_{ij}^L}{\xi_{ij}^L + \xi_{ij}^U + \delta_{ij}^L + \delta_{ij}^U}, \nu_{ij}^U = \frac{\delta_{ij}^U}{\xi_{ij}^L + \xi_{ij}^U + \delta_{ij}^L + \delta_{ij}^U} \end{cases} \quad (6)$$

(4)集结单一区间直觉模糊数可得到综合决策矩阵为 $R = (r_{ij})_{n \times m}$ 。

## 2.2 改进灰色关联评价模型

逼近理想点法(Technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)和灰色关联法是2种典型的应用于多维数据处理的评价方法。TOPSIS是以评价对象与正负理想方案之间的距离作为评价依据,但这仅能反映两者之间的位置关系,不能全面地反映某一评价对象的指标在整个体系中的重要程度,且此方法并未考虑到权重的影响,故无法保证结果的准确性。传统的灰色关联法同样以评价对象与理想对象的距离测度来进行衡量,但仅考虑了最佳偏好结果,并未考虑到不同备选方案相对于最差理想方案的测度信息。因此本文将TOPSIS的评价依据引入到灰色关联法中,设计一种改进灰色关联评价模型,从而得到更稳定的评价效果,步骤如下:

**步骤1** 确定在综合决策矩阵 $R$ 中第*i*个特征在第*j*个指标下的正理想解 $f_j^+$ 及理想解 $f_j^-$ <sup>[13]</sup>

$$f_j^+ = \left( \max_{i=1,2,\dots,n} [\mu_{im}^L, \mu_{im}^U], \min_{i=1,2,\dots,n} [\nu_{im}^L, \nu_{im}^U] \right), f_j^- = \left( \min_{i=1,2,\dots,n} [\mu_{im}^L, \mu_{im}^U], \max_{i=1,2,\dots,n} [\nu_{im}^L, \nu_{im}^U] \right) \quad (7)$$

**步骤2** 确定各特征在不同指标下与正、负理想方案的关联系数分别为<sup>[13]</sup>

$$\epsilon_{ij}^{+k} = \frac{\min_i \min_j D_{ij}^+ + \theta \max_i \max_j D_{ij}^+}{D_{ij}^+ + \theta \max_i \max_j D_{ij}^+} \quad (8)$$

$$\epsilon_{ij}^{-k} = \frac{\min_i \min_j D_{ij}^- + \theta \max_i \max_j D_{ij}^-}{D_{ij}^- + \theta \max_i \max_j D_{ij}^-} \quad (9)$$

式中: $\theta$ 为决策系数,通常取 $\theta = 0.5$ ;  $D_{ij}^-$ 和 $D_{ij}^+$ 分别表示各指标值下特征信息之间的Euclidean距离,表达式为<sup>[14]</sup>

$$D_{ij}^+(\alpha_{ij}, \alpha_j) = \sqrt{\frac{1}{4} \left[ (\mu_{ij}^L - \mu_j^{L+})^2 + (\mu_{ij}^U - \mu_j^{U+}) + (\nu_{ij}^L - \nu_j^{L+}) + (\nu_{ij}^U - \nu_j^{U+}) \right]} \quad (10)$$

$$D_{ij}^-(\alpha_{ij}, \alpha_j) = \sqrt{\frac{1}{4} \left[ (\mu_{ij}^L - \mu_j^{L-})^2 + (\mu_{ij}^U - \mu_j^{U-}) + (\nu_{ij}^L - \nu_j^{L-}) + (\nu_{ij}^U - \nu_j^{U-}) \right]} \quad (11)$$

式中 $([\mu_j^{L+}, \mu_j^{U+}], [\nu_j^{L+}, \nu_j^{U+}])$ ,  $([\mu_j^{L-}, \mu_j^{U-}], [\nu_j^{L-}, \nu_j^{U-}])$ 分别为各指标值下所求得的正、负理想解。

**步骤3** 通过建立以在所有指标下特征  $A_i$  和其他特征  $A_k$  间总离差最大化为目标的数学规划模型来确定各属性权重,即求解如下优化模型

$$\begin{cases} \max D(w) = \sum_{j=1}^n D_j(w) = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m w_j (|\mu_{ij}^L - \mu_{kj}^L| + |\mu_{ij}^U - \mu_{kj}^U| + |v_{ij}^L - v_{kj}^L| + |v_{ij}^U - v_{kj}^U|) \\ \text{s.t. } \sum_{j=1}^n w_j^2 = 1, w_j \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (12)$$

式中  $D_j(w)$  表示对指标  $C_j$  而言,所有特征方案和其他特征方案的总离差,表达式为

$$D_j(w) = \sum_{i=1}^m D_{ij}(w) = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m d(R_{ij}, R_{kj}) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m w_j [|\mu_{ij}^L - \mu_{kj}^L| + |\mu_{ij}^U - \mu_{kj}^U| + |v_{ij}^L - v_{kj}^L| + |v_{ij}^U - v_{kj}^U|] \quad i, k = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

为求解式(13),可构造 Lagrange 函数并求其偏导数,经过归一化处理后可得指标权重为

$$w_j = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m (|\mu_{ij}^L - \mu_{kj}^L| + |\mu_{ij}^U - \mu_{kj}^U| + |v_{ij}^L - v_{kj}^L| + |v_{ij}^U - v_{kj}^U|)}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m (|\mu_{ij}^L - \mu_{kj}^L| + |\mu_{ij}^U - \mu_{kj}^U| + |v_{ij}^L - v_{kj}^L| + |v_{ij}^U - v_{kj}^U|)} \quad (14)$$

式中:  $|\mu_{ij}^L - \mu_{kj}^L|$ 、 $|\mu_{ij}^U - \mu_{kj}^U|$ 、 $|v_{ij}^L - v_{kj}^L|$ 、 $|v_{ij}^U - v_{kj}^U|$  分别表示特征  $A_i$  在指标  $C_j$  下与其他特征  $A_k$  的离差值。显然,式(14)就是式(12)的最优解,详细证明过程可参阅文献[14]。

**步骤4** 将由式(14)得到属性权重及式(8,9)得到的关联系数代入到式(15,16)中,计算出每个方案在所有指标下正、负灰色关联度为<sup>[14]</sup>

$$\gamma_i^{+k} = \sum_{j=1}^m w_j \times \epsilon_{ij}^{+k} \quad (15)$$

$$\gamma_i^{-k} = \sum_{j=1}^m w_j \times \epsilon_{ij}^{-k} \quad (16)$$

**步骤5** 结合 TOPSIS 的思想,将 TOPSIS 中各特征方案与正、负理想解的距离测度转换为灰色关联度,得到综合评价值为<sup>[14]</sup>

$$\gamma_i = \frac{\rho \gamma_i^{+k}}{\rho \gamma_i^{+k} + (1 - \rho) \gamma_i^{-k}} \quad (17)$$

式中: $\rho$ 为决策系数, $\rho = 0.5$ 。对于模型整体, $\gamma_i$ 越大,则被评价特征距离正理想解最近,而距离负理想解最远,因此特征性能越优;反之 $\gamma_i$ 越小则特征性能越差。

### 3 实验分析

为验证所提特征评价模型的可行性及有效性,选取雷达辐射源信号的模糊函数主脊(Ambiguity function main ridge, AFMR)切面特征  $A_1$ <sup>[15]</sup>、模糊函数(Ambiguity function, AF)等高线特征  $A_2$ <sup>[16]</sup>、小波脊频级联特征  $A_3$ <sup>[17]</sup>共3种典型特征提取方案来进行评价和敏感性分析,并与灰色关联法分析的结果进行对比。

#### 3.1 特征评价结果与分析

选取常规脉冲信号(Conventional pulse, CON)、线性调频信号(Linear frequency modulated,



LFM)、二相编码(Binary phase-shift keying, BPSK)、四相编码(Quadrature phase-shift keying, QPSK)、M伪随机序列(M-sequence, M-SEQ)以及二频编码(Binary frequency-shift keying, BFSK)共6类雷达辐射源信号的上述3种特征进行实验和分析。其中,LFM的带宽为10 MHz,BPSK和BFSK均采用13位Barker码,M-SEQ编码规则设成[1011100],QPSK采用16元素的Frank码<sup>[18]</sup>。所有信号PW为10  $\mu$ s, $f_s=60$  MHz。此外,除BFSK的2个频点分别取10和2 MHz外,其余信号RF=10 MHz<sup>[18]</sup>。SNR在0~10 dB范围内,每种信号每隔2 dB产生100个测试样本,实验分别在SNR=0~2 dB、4~6 dB和8~10 dB范围内对3种特征提取和分选过程进行评价。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 $\tilde{x}_1\sim\tilde{x}_3$ 如式(18~20)所示,其中设定初始矩阵中行为特征值列为属性值。

$$\tilde{x}_1 = \begin{pmatrix} (3.42, 4.01) (90) & (9.47, 19.27) & (0, 34) & (81.17, 93.83) & (23, 42) \\ (0.23, 0.28) (85) & (1.63, 8.81) & (0, 19.42) & (89.04, 98.53) & (3.31, 19.42, ) \\ (3.56, 3.80) (70) & (3.93, 6.63) & (1, 20) & (81, 92.33) & (9, 19) \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$\tilde{x}_2 = \begin{pmatrix} (3.69, 4.21) (90) & (4.02, .94) & (0, 13) & (94.67, 98.17) & (1, 17) \\ (0.25, 0.30) (85) & (0.51, 0.93) & (0, 1.07) & (99.21, 99.58) & (0.90, 1.97) \\ (3.83, 3.94) (70) & (0.36, 0.87) & (1, 2.70) & (97.54, 99.20) & (0.90, 2.24) \end{pmatrix} \quad (19)$$

$$\tilde{x}_3 = \begin{pmatrix} (3.34, 3.87) (90) & (0, 2.04) & (0, 5) & (99.17, 100) & (0, 5) \\ (0.31, 0.34) (85) & (0, 0) & (0, 0) & (100, 100) & (0, 0) \\ (3.45, 3.94) (70) & (0, 0.52) & (0, 1) & (99.67, 100) & (0, 1) \end{pmatrix} \quad (20)$$

将 $\tilde{x}_1$ 、 $\tilde{x}_2$ 、 $\tilde{x}_3$ 标准化处理后再重新整合得到特征型矩阵 $Y_1$ 、 $Y_2$ 和 $Y_3$ ,计算过程中考虑到数据来源的限制和规范式(1,2)的适用性,初始数据为0时使用+0.001进行修正。将 $Y_1\sim Y_3$ 依据式(3~6)由区间型数据集结为区间直觉模糊数型的综合决策矩阵 $R$ ,如表1所示。在综合决策矩阵 $R$ 中,计算出每个特征 $A_i$ 在指标 $C_j$ 下与正、负理想方案的关联系数,分别如表2、3所示。

表1 区间直觉模糊综合决策矩阵

Table 1 Interval intuitionistic fuzzy comprehensive decision matrix

特征指标	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{21}$	$C_{22}$	$C_{31}$	$C_{32}$
$A_1$	[[0.033 3, 0.045 9], [0.454 8, 0.466 0]]	[[0.388 9, 0.388 9], [0.111 1, 0.111 1]]	[[0.029 8, 0.332 8], [0.304 7, 0.332 7]]	[[0.250 0, 0.250 0], [0.250 0, 0.250 0]]	[[0.445 7, 0.468 0], [0.003 9, 0.082 5]]	[[0.047 0, 0.326 3], [0.300 6, 0.326 2]]
$A_2$	[[0.441 2, 0.441 2], [0.038 9, 0.078 8]]	[[0.411 8, 0.411 8], [0.088 2, 0.088 2]]	[[0.280 0, 0.396 7], [0.000 0, 0.323 3]]	[[0.333 3, 0.333 3], [0.000 0, 0.333 3]]	[[0.477 0, 0.477 0], [0.000 0, 0.045 9]]	[[0.353 4, 0.353 4], [0.000 0, 0.293 2]]
$A_3$	[[0.032 1, 0.044 6], [0.457 2, 0.466 2]]	[[0.500 0, 0.500 0], [0.000 0, 0.000 0]]	[[0.138 3, 0.333 4], [0.195 5, 0.332 8]]	[[0.000 3, 0.333 3], [0.333 0, 0.333 3]]	[[0.442 4, 0.472 1], [0.001 6, 0.084 0]]	[[0.124 0, 0.337 3], [0.201 8, 0.336 9]]
$f_j^+$	[[0.441 2, 0.441 2], [0.038 9, 0.078 8]]	[[0.500 0, 0.500 0], [0.000 0, 0.000 0]]	[[0.280 0, 0.396 7], [0.000 0, 0.323 3]]	[[0.333 3, 0.333 3], [0.000 0, 0.250 0]]	[[0.477 0, 0.477 0], [0.000 0, 0.045 9]]	[[0.353 4, 0.353 4], [0.000 0, 0.293 2]]
$f_j^-$	[[0.032 1, 0.044 6], [0.457 2, 0.466 2]]	[[0.388 9, 0.388 9], [0.111 1, 0.111 1]]	[[0.029 8, 0.332 8], [0.304 7, 0.332 8]]	[[0.000 3, 0.250 0], [0.333 0, 0.333 3]]	[[0.442 4, 0.468 0], [0.003 9, 0.084 0]]	[[0.047 0, 0.326 3], [0.300 6, 0.326 2]]

表2 正理想解系数

Table 2 Positive ideal solution coefficient

特征指标	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{21}$	$C_{22}$	$C_{31}$	$C_{32}$
$A_1$	0.334 1	0.644 6	0.502 1	0.593 2	0.891 2	0.483 0
$A_2$	1.000 0	0.695 5	1.000 0	0.828 9	1.000 0	1.000 0
$A_3$	0.333 3	1.000 0	0.617 3	0.457 3	0.886 1	0.566 0

表3 负理想解系数

Table 3 Negative ideal solution coefficient

特征指标	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{21}$	$C_{22}$	$C_{31}$	$C_{32}$
$A_1$	1.000 0	1.000 0	0.333 3	0.999 8	1.000 0	1.000 0
$A_2$	0.999 5	1.000 0	0.333 3	0.999 7	1.000 0	0.999 7
$A_3$	1.000 0	0.999 9	0.333 3	0.999 9	1.000 0	0.999 9

依据 1.2 节步骤 3 中的模型求解出指标权重为  $\omega=(0.376 5, 0.103 8, 0.146 8, 0.194 5, 0.020 0, 0.158 4)$ 。依据式 (15, 16) 求出各特征在所有指标下正灰色关联度为:  $\gamma^{+k}=(0.476 1, 0.935 1, 0.516 2)$ , 负灰色关联度为:  $\gamma_i^{-k}=(0.902 1, 0.901 8, 0.902 1)$ 。

依据式(17), 结合 TOPSIS 法的思想, 将 TOPSIS 法中各特征与正、负理想解的距离测度转换为灰色关联度, 得到综合评价值为:  $\gamma_1=0.345 5, \gamma_2=0.509 1, \gamma_3=0.364 0$ , 故各特征方案排序结果为  $A_2 > A_3 > A_1$ 。

### 3.2 敏感度分析

为了预测此评价模型的风险性, 可采取摄动法对评价指标的系数和权重进行敏感性分析, 通过权重和系数在特定范围内的微小变动对评价信息造成的干扰来观察各特征方案排序的相应变化。

#### 3.2.1 系数敏感度分析

在式(17)中, 评价系数从均衡策略考虑取值  $\rho=0.5$ 。为验证结果的敏感性, 在  $\rho=[0, 1]$  中以步长 0.1 进行取值, 分析综合评价值  $\gamma_i$  随决策系数  $\rho$  变化后的性能。综合评价值随决策系数变化的敏感度分析如图 2 所示。由图 2 可知, 在进行的 9 次实验中, 不论  $\rho$  如何变化, 特征方案排序结果均保持一致, 仍为  $A_2 > A_3 > A_1$ , 通过计算得出系数敏感性实验稳定性结果达到 100%, 验证了本实验的有效性和可行性。

#### 3.2.2 权重敏感度分析

评价指标  $C_j$  的初始权重为  $w_j$ , 经干扰后记为  $w'_j = \varphi w_j$ , 其中  $0 \leq w'_j \leq 1$ , 则参数  $\varphi$  的变化区间为  $0 \leq \varphi \leq 1/w_j$ , 由权重归一性可得, 当  $w_j$  发生变化时, 其余权重  $w_k$  均随之改变, 记  $w'_k = \eta w_k$ 。利用公式  $w'_j + \sum_{k=1, k \neq j}^m w'_k = 1$ , 即  $\varphi w_j + \sum_{k=1, k \neq j}^m \eta w_k = 1$ ,

在干扰系数  $\eta$  依次取值为 0.2、0.8、1.4、2、2.6 的情况下, 计算干扰后的 6 个指标的权重值, 进而得出各特征方案的综合评价信息如图 3 所示。由图 3 可知, 在进行的 30 次干扰实验中, 最佳特征方案仍为  $A_2$ , 只有在指标 4 的权重受到干扰的情况下, 排序结果发生变化, 两次变动结果为  $A_1$  和  $A_3$ , 且两者的综合评价值差距不大。其余实验的排序结果仍为  $A_2 > A_3 > A_1$ 。权重敏感度实验的稳定性达到 93.33%, 表明了本文的评价模型具有良好的有效性和可行性。

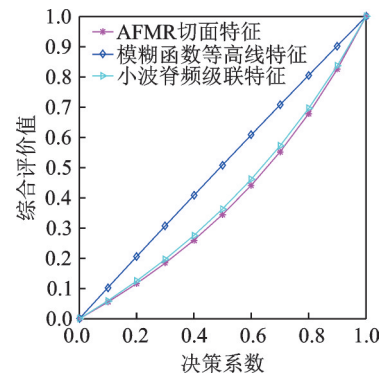


图2 综合评价值随决策系数变化的敏感度分析

Fig.2 Sensitivity analysis of comprehensive evaluation value changing with decision coefficient

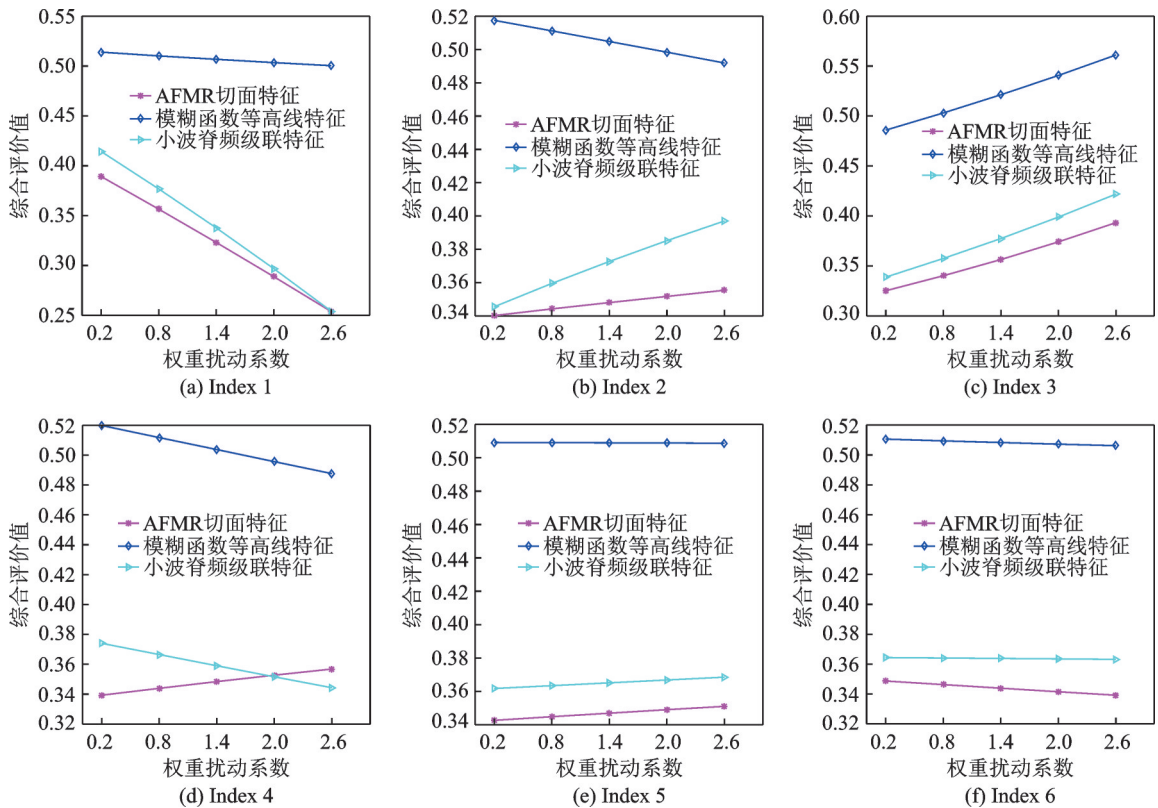


图3 综合评价价值随权重变化的敏感度分析

Fig.3 Sensitivity analysis of comprehensive evaluation value changing with weight

### 3.3 对比实验分析

#### 3.3.1 灰色关联法对比分析

采取未改进的灰色关联法对综合决策矩阵  $R$  进行分析计算<sup>[19]</sup>,并将此方法与所提方法进行对比。考虑所有特征方案在动态层次模型下获得完全肯定情况,即将特征方案的理想解均设定为  $([1, 1], [0, 0])$ 。依据 Euclidean 距离计算出各特征方案的评价信息相对于理想解的距离,构成距离矩阵为

$$\tilde{D} = \begin{bmatrix} 0.7531 & 0.4392 & 0.6305 & 0.5590 & 0.3864 & 0.6243 \\ 0.3976 & 0.4206 & 0.4967 & 0.5000 & 0.3705 & 0.4801 \\ 0.7543 & 0.3536 & 0.5779 & 0.6453 & 0.3862 & 0.5833 \end{bmatrix} \quad (21)$$

在指标  $C_j$  的条件下,结合式(21)计算特征方案相对于理想解的接近程度,以灰色关联系数  $\tilde{\gamma}_{ij}$  来表示,表达式为

$$\tilde{\gamma}_{ij} = \frac{\min_i \min_j \tilde{D}_{ij} + \theta \max_i \max_j \tilde{D}_{ij}}{\tilde{D}_{ij} + \theta \max_i \max_j \tilde{D}_{ij}} \quad (22)$$

得出系数矩阵为

$$\tilde{\gamma} = \begin{bmatrix} 0.6465 & 0.8951 & 0.7252 & 0.7806 & 0.9570 & 0.7297 \\ 0.9432 & 0.9160 & 0.8362 & 0.8331 & 0.9774 & 0.8524 \\ 0.6459 & 1.0000 & 0.7651 & 0.7147 & 0.9573 & 0.7608 \end{bmatrix} \quad (23)$$

将本文已求得的指标权重并结合式(23)代入式(24),计算各特征方案在所有指标下的综合灰色关



联系数  $\tilde{\gamma}_i$  并进行排序,  $\tilde{\gamma}_i$  越大, 排序越靠前, 特征性能越佳。

$$\tilde{\gamma}_i = \sum_{j=1}^n \tilde{\gamma}_{ij} \omega_j \tag{24}$$

通过式(24)计算得出  $\tilde{\gamma}_1 = 0.7293$ ,  $\tilde{\gamma}_2 = 0.8896$ ,  $\tilde{\gamma}_3 = 0.7380$ , 则排序结果为  $A_2 > A_3 > A_1$ 。这一评价结果与本文提出的改进灰色关联法得到的结果一致, 证明了所提方法的有效性和良好性能。但此方法评价时理想解设定为  $([1, 1], [0, 0])$ , 为完美理想状态, 然而实际中会存在评价偏好, 不可能所有特征的评价偏好值都达到最佳。当理想解为  $([0.5, 0.5], [0.5, 0.5])$ , 即保持中立情况时, 排序结果为  $A_2 > A_1 > A_3$ , 发生评价结果的偏离。考虑到理想解的取值多数为主观偏好值, 故从实际问题的角度出发, 采用改进灰色关联法得到的结果更为合理。

利用3.2节的权重敏感度分析方法, 对灰色关联法得到的评价结果进行分析, 同样对于各评价指标权重  $\omega_j$ , 当取不同参数  $\varphi$  时得到相应的特征性能排序。本次对比实验干扰参数取值与所提实验方法一致, 共进行30次实验, 发生排序结果变化的为指标1、指标2及指标4, 图4示例性地给出部分指标下灰色关联法权重敏感度分析。

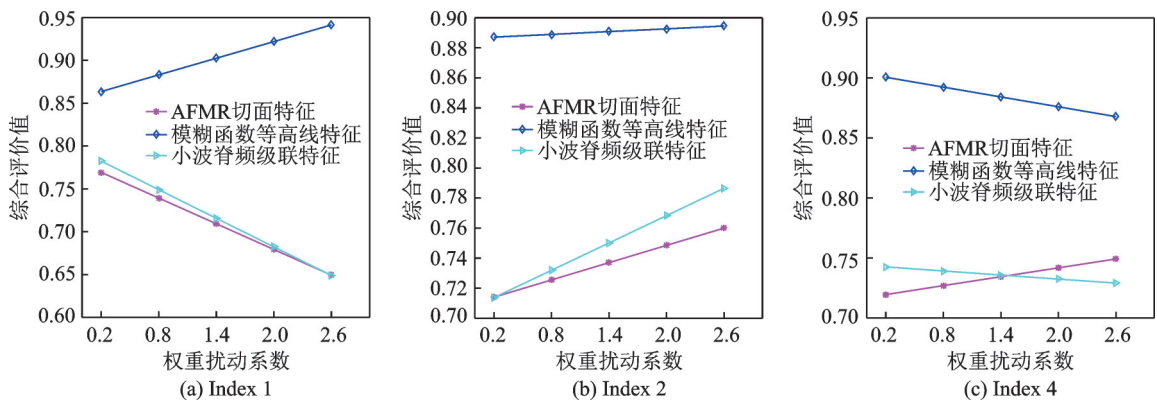


图4 灰色关联法权重敏感度分析

Fig.4 Analysis of weight sensitivity of grey correlation method

由图4可知, 在30次实验中,  $A_2$  一直为最优特征,  $A_1$  与  $A_3$  发生4次排序变化, 本实验的稳定性为86.67%, 与所提方法相比, 前者对权重改变更为敏感, 不稳定性也更高。

### 3.3.2 得分函数法对比分析

依据文献[20]采取的得分函数法对综合决策矩阵  $R$  进行分析计算, 并将此方法与所提方法进行对比。

首先, 由区间直觉模糊加权平均算子 (Interval-valued intuitionistic fuzzy weighted average, IVIF-WA) 集成综合决策矩阵  $R$  中第  $i$  行所有特征的模糊值  $\tilde{\alpha}_i$ , 结果依次为:  $\tilde{\alpha}_1 = ([0.1338, 0.2285], [0.2808, 0.3091])$ ,  $\tilde{\alpha}_2 = ([0.3833, 0.3991], [0, 0.1582])$ ,  $\tilde{\alpha}_3 = ([0.1296, 0.2632], [0, 0])$ 。

其次, 将各特征的模糊值代入式(25)中, 计算出特征方案的得分值  $s(\alpha_i)$ , 并对特性性能依次排序<sup>[20]</sup>。设  $\tilde{\alpha} = ([a, b], [c, d])$  为一个区间直觉模糊数, 则称

$$s(\tilde{\alpha}) = \frac{1}{2}(a - c + b - d) \tag{25}$$

为  $\tilde{\alpha}$  的得分值, 其中  $s$  为  $\tilde{\alpha}$  的得分函数,  $s(\tilde{\alpha}) \in [-1, 1]$ 。

依据式(25)所示的得分函数可知, 各特征性能排序为  $A_2 > A_3 > A_1$ 。此方法的排序结果与本文提

出的改进灰色关联法得到的结果一致,证明了所提方法的有效性和良好性能。但因其未考虑到指标权重的影响,且不同区间直觉模糊数的得分函数可能会相同,进而影响评价结果。故从多数据样本的角度看,采用改进灰色关联法得到的结果更为合理。

综合以上实验可知,改进灰色关联法结合了TOPSIS的思想,既考虑了不同指标下的权重,也兼顾了评价特征与最优及最劣解之间距离的均衡性,得到的可行解在理论实验、实际环境及敏感性分析中均表现出较为可靠的评价结果,证明了所提方法的有效性和良好性能。

#### 4 结束语

在对雷达辐射源信号分选识别特征的研究中,构建有效的特征综合评价机制是一项具有实际意义的研究。为此,本文创新性地将对雷达辐射源信号参数特征转换为区间直觉模糊评价问题,同时在模糊情形下建立区间数型的评价指标体系,并将引入不同信噪比作为分析维度,提出一种基于改进灰色关联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动态层次分解的评价矩阵,有效提高了评估精度;然后融合不同层次下的评价信息,实现群决策矩阵的集成,使其更具有现实意义;进而采取离差最大化求解群矩阵中各指标权值;最后基于改进的灰色关联法对方案进行评估,使得评估结果更为准确和客观。仿真实验与对比分析结果表明,该方法能够对所提取的特征进行相对合理的评价,为雷达辐射源信号分选识别特征评价研究提供切实可行的研究思路,对电子对抗中信号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、客观及合理地将对雷达辐射源信号分选识别特征进行综合评价。

#### 参考文献:

- [1] DENG Yanli, JIN Weidong, YU Zhibin. Feature evaluation of radar emitter signal based on logistic regression model[J]. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2013, 210(97): 919-926.
- [2] HAN Jun, PAN Yichun, CHENG Bolin, et al. Recognition effect evaluation of radar signals based on fuzzy comprehensive evaluation[C]//*Proceedings of 2016 International Conference on Electrical, Mechanical and Industrial Engineering (ICEMIE 2016)*. [S.l.]: Atlantis Press, 2016: 118-122.
- [3] 朱斌,金炜东,余志斌.基于AHP的复杂体制RES特征评价[J].*计算机工程*,2012,38(11): 239-241.  
ZHU Bin, JIN Weidong, YU Zhibin. Complex system res feature evaluation based on AHP[J]. *Computer Engineering*, 2012, 38(11): 239-241.
- [4] 邓延丽,金炜东,余志斌.基于类别距离和Bhattacharyya距离的雷达信号特征评价[J].*计算机应用研究*, 2012, 29(11): 4079-4081.  
DENG Yanli, JIN Weidong, YU Zhibin. Feature evaluation of radar signal based on category distance and Bhattacharyya distance[J].*Application Research of Computers*, 2012, 29(11): 4079-4081.
- [5] 吴思东,朱明,付克昌.基于多元集对分析的辐射源信号熵特征评价[J].*电路与系统学报*, 2013, 18(2): 298-304.  
WU Sidong, ZHU Ming, FU Kechang. Entropy feature evaluation of radar emitter signals based on SPA[J]. *Journal of Circuits and Systems*, 2013, 18(2): 298-304.
- [6] 朱斌,金炜东,余志斌.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.  
ZHU Bin, JIN Weidong, YU Zhibin. 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.
- [7] BHARATI S K, SINGH S R. Interval-valued intuitionistic fuzzy linear programming problem[J]. *New Mathematics and Natural Computation*, 2020, 16(1): 53-71.
- [8] MOUSAVI S M, JOLAI F, TAVAKKOLI M R, et al. A fuzzy grey model based on the compromise ranking for multi-criteria group decision making problems in manufacturing systems[J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2013, 24(4):

819-827.

- [9] YANG Wei, PANG Yongfeng. A new MCDM method based on GRA in interval-valued intuitionistic fuzzy setting [C]// Proceedings of 2010 3rd International Conference on Computer Science and Information Technology. Chengdu, China: [s.n.], 2010: 299-302.
- [10] CHEN Xiaohong, ZHAO Cuicui, YANG Li. A group decision-making model based on interval-valued intuitionistic fuzzy numbers and its application on social network[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2017, 37(7): 1842-1852.
- [11] ABBAS A B, MORTEZA O, BEHROOZ K. Deriving preference order of open pit mines equipment through MADM methods: Application of modified VIKOR method[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 38(3): 2550-2556.
- [12] YUE Zhongliang. An approach to aggregating interval numbers into interval-valued intuitionistic fuzzy information for group decision making[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 39(5): 6333-6338.
- [13] ZHANG Qiansheng, XING Hongyan, LIU Fuchun, et al. An enhanced grey relational analysis method for interval-valued intuitionistic fuzzy multiattribute decision making[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2014, 26(1): 317-326.
- [14] 王霞,陈京荣,陈琼,等.基于未知权重的TOPSIS区间直觉模糊多属性决策[J].运筹与模糊学,2019,9(4):299-306.  
WANG Xia, CHENG Jingrong, CHENG Qiong, et al. TOPSIS interval-valued intuitionistic fuzzy multi-attribute decision making based on unknown weights[J]. Operations Research and Fuzziology, 2019, 9(4): 299-306.
- [15] 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].红外与毫米波报,2008,27(2):133-137.  
PU Yunwei, JIN Weidong, ZHU Ming, 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.
- [16] 侯文太,普运伟,郭媛蒲,等.基于高斯平滑与模糊函数等高线的雷达辐射源信号分选[J/OL].自动化学报.[2020-11-24].  
<https://doi.org/10.16383/j.aas.c180739>.  
HOU Wentai, PU Yunwei, GUO Yuanpu. A sorting method for radar emitter signals based on the Gaussian smoothing and contour lines of ambiguity function[J/OL]. Acta Automatica Sinica.[2020-11-24].<https://doi.org/10.16383/j.aas.c180739>.
- [17] 余志斌,金炜东,陈春霞.基于小波脊频级联特征的雷达辐射源信号识别[J].西南交通大学学报,2010,45(2):290-295.  
YU Zhibin, JIN Weidong, CHEN Chunxia. Radar emitter signal recognition based on WRFCFF[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2010, 45(2): 290-295.
- [18] 郑陵潇,吴海潇,陈磊,等.一种快速搜索模糊函数主脊切面的自适应灰狼算法[J].数据采集与处理,2020,35(5):892-902.  
ZHENG Lingxiao, WU Haixiao, CHEN Lei, et al. A self adaptive GWO for quickly searching the main ridge slice of ambiguity function[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2020, 35(5): 892-902.
- [19] LIU Hongjiu, LIU Qingyang, HU Yanrong, et al. Evaluating risks of mergers & acquisitions by grey relational analysis based on interval-valued intuitionistic fuzzy information[J].Mathematical Problems in Engineering, 2019. DOI: <http://10.1155/2019/3728029>.
- [20] NGUYEN H. A generalized p-norm knowledge-based score function for an interval-valued intuitionistic fuzzy set in decision making[J].IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2020, 28(3): 409-423.

## 作者简介:



普运伟(1972-),通信作者,男,教授,博士,博士生导师,研究方向:电子战信号处理、模式识别,E-mail: puyunwei@126.com。



吴海潇(1995-),女,硕士研究生,研究方向:智能信息处理,E-mail: 1078113272@qq.com。



姜莹(1998-),女,硕士研究生,研究方向:智能信息处理。



余永鹏(1995-),男,硕士研究生,研究方向:智能信息处理,E-mail: 1031767295@qq.com。