

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2015.03.021

基于改进灰色关联算法的雷达反隐身能力评估

师俊朋¹, 胡国平¹, 李涛²

(1. 空军工程大学 防空反导学院, 710051 西安; 2. 空军地空导弹兵驻宁某部, 210000 南京)

摘要: 针对复杂电磁环境下雷达获取隐身目标特性存在不完整性、多样性等特点, 提出一种基于改进灰色关联算法和距离优化评估模型的雷达反隐身能力评估方法。该方法针对一般的主观权重可靠性不足的缺点, 依据指标的主观、客观和关联属性实时计算并修正了指标权值。建立了基于性能与作战效能的雷达反隐身能力评估指标体系, 并结合样本序列的稳定程度和指标值的优劣程度给出了雷达反隐身能力的优化评估距离, 得出客观、准确的评估结果。理论分析和仿真试验表明, 与一般的灰色关联算法相比, 复合权重的灰色关联算法具有更好的系统评估能力和更高的准确性。

关键词: 雷达反隐身; 灰色关联算法; 指标体系; 评估距离

中图分类号: TN957

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2015)03-0116-06

Evaluation of anti-stealth ability of radar on improved grey correlation algorithm

SHI Junpeng¹, HU Guoping¹, LI Tao²

(1. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, 710051 Xi'an, China;

2. Air Force Air Missile Troops in Nanjing, 210000 Nanjing, China)

Abstract: Aiming at the characteristics of imperfection and various of stealth target acquired by radar in complex electromagnetic circumstance, a new method based on improved grey correlation and distance optimization evaluation model was presented. Firstly, the shortcoming of common subjective grey correlation algorithm was overcome by the method. According to the subjective and objective, associated attributes of indicators, the weight of grey correlation algorithm was calculated in real time. Secondly, a set of indexes to evaluate the ability of radar based on performance and operational effectiveness was established. The anti-stealth radar evaluation distance and results were given combined with the stability and effectiveness of the sample. The analysis of theory and results of simulation proved that, in contrast to the common subjective grey correlation algorithm, the composite weights grey correlation algorithm had higher ability of assessment and stronger computation reliability.

Keywords: radar anti-stealth; grey correlation algorithm; a set of indexes; evaluation distance

随着信息技术的快速发展, 电磁环境的日趋复杂, 米波雷达、超宽带雷达、激光雷达等新型反隐身雷达的层出不穷^[1-2], 雷达反隐身能力的定量评估面临重重困难。目前, 灰色关联算法已广泛

应用于性能评估、故障判断等领域, 其计算复杂度低于多数的统计方法, 但识别效果一般能达到神经网络、证据理论等算法水平。文献[3-5]分别研究了熵权灰色关联算法在辐射源识别、业务项目遴选和故障评估中的理论应用。文献[6]采用一种主客观集成、强调系统均衡协调发展的评估模型。但需要说明的是, 灰色关联算法中每个指标的权重对于评估结果具有重要影响。上述文献所提方法都是采用专家主观经验和熵权方法确定权重,

收稿日期: 2014-04-01.

基金项目: 国家自然科学基金(61372166); 陕西省自然科学基金研究计划(2014JM8308).

作者简介: 师俊朋(1988—), 男, 硕士研究生;

胡国平(1964—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 师俊朋, 1065698473@qq.com.

并未考虑算法的缺陷和指标间的相互影响,因此算法综合性存在不足,在实际应用中受到一定限制^[7]。为此,本文首先根据指标的主观属性、客观属性和关联属性给出一种基于复合权重的改进灰色关联算法。该算法的关键是根据层次分析法、改进的熵权算法及指标间的相关系数实时修正指标的权重。随后建立了基于性能与作战效能的雷达反隐身能力评估指标体系,最后结合改进的灰色关联算法提出了距离优化模型并对雷达的反隐身能力进行了定量评估。

1 灰色关联算法

1.1 灰色关联算法基本原理

灰色关联度是事物、因素之间关联程度的整体比较,是在一定参考下以关联度为测度的量化比较方法。记参考序列为 $X_0(j) = \{x_0(j) \mid j = 1, 2, \dots, N\}$, $x_0(j)$ 为雷达反隐身能力评估的第 j 个指标度量值, N 为指标总数。

设第 i 个样本数列(比较数列)为 $X_i(j) = \{x_i(j) \mid i = 1, 2, \dots, M\}$, M 为样本总数。若取差值 $\Delta_i(j) = x_i(j) - x_0(j)$, 则 $X_0(j)$ 与 $X_i(j)$ 的灰色关联系数为

$$\xi_i(j) = \frac{\min_i \min_j |\Delta_i(j)| + \rho \max_i \max_j |\Delta_i(j)|}{|\Delta_i(j)| + \rho \max_i \max_j |\Delta_i(j)|} \quad (1)$$

式中 ρ 为分辨系数,一般取 0.5。在计算灰色关联度时,由于各个指标的重要性不同,其分配的权重 λ_j 也不同,因此灰色关联度可定义为

$$\varphi_i = \sum_{j=1}^N \lambda_j \xi_i(j), \quad \sum_{j=1}^N \lambda_j = 1, \quad \lambda_j > 0 \quad (2)$$

对雷达反隐身能力进行评估时,参考序列的选择至关重要,是各指标最优化的数据序列,反映雷达系统的最佳性能,可从样本中选取最优数据确定。而权重表明不同指标在评估中的重要程度,反映不同指标在决策中的可靠性。一般情况下,权重是由专家根据应用经验主观赋值,该方法缺乏理论依据,不能客观地反映雷达的反隐身能力。

1.2 基于复合权重的灰色关联算法

在装备的性能评估中,权重是指标对于装备总体效能属性的度量,具体包含 3 个方面内容:装备设计时指标所具有的主观属性,体现了设计者对指标的认可程度;实际数据统计中指标所具有的客观属性,体现了指标能够给决策者提供信息量的有用程度;各个指标间具有的关联属性,体现了指标间的相互制约与冲突特性。因此,结合上述

因素对指标权重进行重新设计,既能达到主观和客观的统一,又能根据指标的相关性对灰色关联度进行修正。

1) 层次分析法确定主观权重。层次分析法是根据一定的事实判断和层次间的相互关系,利用数学方法,定量表示每一层次的全部指标相对重要性次序的权值,进而对问题进行分析和决策。其量化步骤为:根据 1~9 尺度逐层构造成对比较阵;计算比较矩阵的最大特征值与对应特征向量;定义一致性指标,并进行层次单排序和一致性检验。则将特征向量归一化可得主观权重向量为

$$\boldsymbol{\lambda}^{(1)} = \{\boldsymbol{\lambda}^{(1)}(j) \mid j = 1, 2, \dots, N\} \quad (3)$$

2) 熵权法确定客观权重。信息熵是对系统不确定性的描述,而熵权是体现评价指标相对激烈程度的系数,是对指标重要性的客观度量。根据熵的定义,第 j 个指标的熵为

$$H(j) = -\frac{1}{\ln M} \sum_{i=1}^M p_i(j) \ln p_i(j) \quad (4)$$

其中:

$$p_i(j) = \frac{x_i(j) + 10^{-4}}{\sum_{i=1}^M [x_i(j) + 10^{-4}]}$$

式中 10^{-4} 是对 $x_i(j)$ 的修正,反映了评价指标经过标准化处理后的精确位数,既能保证 $\ln p_i(j)$ 具有数学意义,又使 $x_i(j)$ 对熵值 H_j 的影响被控制在合理范围之内。

在实际评估中,对于第 j 个指标, $x_i(j)$ 的变化程度越大,该指标在综合评价中所起的作用越大;如果 $x_i(j)$ 全部相等,则该指标在综合评价中几乎不起作用。为此,可定义差异性系数:

$$\eta(j) = 1 - H(j)$$

则当 $x_i(j)$ 的差距越大时, $H(j)$ 越小, $\eta(j)$ 越大,指标越重要。以差异性系数定义熵权公式为

$$\lambda_0^{(2)}(j) = \frac{\eta(j)}{\sum_{j=1}^N \eta(j)} \quad (5)$$

分析上述算法发现,当所用指标熵值存在微小差别时,会使指标对应的熵权发生成倍数的变化,这显然与实际情况不符^[8]。为避免出现熵权跳跃现象,可定义改进的熵权计算公式为

$$\lambda^{(2)}(j) = \frac{\eta(j) + \frac{1}{10} \sum_{j=1}^N (\eta(j))}{\sum_{j=1}^N \left[\eta(j) + \frac{1}{10} \sum_{j=1}^N (\eta(j)) \right]} \quad (6)$$

3) 相关系数法确定修正因子。从系统学角度看,从不同侧面选择的多个反映系统性能的指标

之间不可能完全独立,必然存在一定的相关性.因此,结合指标间相关性的权重计算更能体现指标的作用性能.相关系数可采用 Pearson 提出的积矩方法求取,其定义为

$$r(j,k) = \frac{\sum_{i=1}^M (x_i(j) - \overline{x(j)})(x_i(k) - \overline{x(k)})}{\sqrt{\sum_{i=1}^M (x_i(j) - \overline{x(j)})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^M (x_i(k) - \overline{x(k)})^2}} \quad (7)$$

式中: $\overline{x(j)}$ 、 $\overline{x(k)}$ 分别为第 j 、 k 个指标的均值, $r(j,k)$ 为第 j 、 k 个指标间的相关系数.

相关系数反映了指标间的关联程度,其值越小,表明 2 个指标的信息独立性强,重要性越强;值越大,表明 2 个指标信息重合较多,重要性较低.因此,可用相关系数对指标权重进行修正,定义修正因子为

$$c(j) = 1 - \overline{r(j)},$$

其中

$$\overline{r(j)} = \frac{\sum_{k=1}^M r(j,k)}{M} \quad (8)$$

式中 $\overline{r(j)}$ 为第 j 个指标与其它指标的平均相关因子,则修正因子的大小直接反映了指标的相对重要程度的高低.

4) 求解复合权重. 综合权重是对主观权重、客观权重和修正因子的综合分析,三者具有一定的独立性,确定其相对比例系数为 α 、 β 、 γ ,则可利用线性补偿原理和能力指数法定义综合权重为

$$\lambda(j) = \frac{c(j)^\gamma [\alpha \lambda^{(1)}(j) + \beta \lambda^{(2)}(j)]}{\sum_{j=1}^M c(j)^\gamma [\alpha \lambda^{(1)}(j) + \beta \lambda^{(2)}(j)]} \quad (9)$$

式中 $\alpha + \beta + \gamma = 1$, $\lambda(j)$ 不仅考虑从主观意志和指标度量值变化程度反映该指标在综合评价中的作用,同时也考虑了指标间由于关联性而引起的对综合评估影响.因此,该方法较为全面的衡量了雷达反隐身能力各指标权值.

5) 求取各指标权重后,利用式(2)求取各样本序列的灰色关联度.

2 评估指标处理的基本方法

2.1 定量指标的标准化处理

在武器装备评估过程中,定量指标的量纲一般不同,这势必影响结果物理意义的分析和说明.为便于统一综合评价,常采用极值变换法将定量指标的实际值转化为度量值,以尽可能的消除原

始指标量纲对评估结论的影响.

该方法一般是根据指标对评估结果的影响趋势将指标分为正向指标、负向指标和区间指标.正向指标是随着指标数值的增大能力增强,负向指标与之相反.区间指标则是指处于特定区间能力最佳的指标.

正向指标:

$$x_i(j) = \frac{a_i(j) - \min_i a_i(j)}{\max_i a_i(j) - \min_i a_i(j)} \quad (10)$$

负向指标:

$$x_i(j) = \frac{\max_i a_i(j) - a_i(j)}{\max_i a_i(j) - \min_i a_i(j)} \quad (11)$$

区间指标:

$$x_i(j) = \begin{cases} \frac{a_i(j) - \min_i a_i(j)}{b - \min_i a_i(j)}, & a_i(j) < b; \\ 1, & b \leq a_i(j) < c; \\ \frac{\max_i a_i(j) - a_i(j)}{\max_i a_i(j) - c}, & a_i(j) \geq c. \end{cases} \quad (12)$$

式中: $a_i(j)$ 为第 i 个样本序列第 j 个指标的实际值, $x_i(j)$ 为相应的度量值, b 、 c 分别表示最佳区间的上下限.

2.2 定性指标的归一化处理

对于定性评价指标,针对模糊性、不确定性等特点,采用专家打分形式,对定性指标值进行确定,打分范围在 0~1 之间.设使用的评语集为“好”、“较好”、“一般”、“较差”、“差”,各评语对应的分数为:1、0.8、0.6、0.4、0.2.结合各指标评语确定指标值.

3 雷达反隐身能力评估步骤

针对复杂电磁条件下雷达系统参数、作战环境的不确定性和多样性,本文根据改进的灰色关联理论建立了不同雷达反隐身能力评估的识别和优化模型,给定了系统的评估指标,并对各指标进行量化,然后应用改进的灰色关联理论确定各雷达系统的灰色关联度,从而建立了样本序列与参考序列的距离优化评估模型,具体见图 1.

3.1 确定评估指标体系

雷达反隐身能力是对隐身目标探测能力和打击能力的综合反映,可将其分为 2 个方面:雷达性能和作战效能.前者体现了雷达设计时的具体性能参数,主要有平均功率、天线增益、灵敏度、工作波段等;后者反映了雷达实际作战中的探测能力、抗干扰能力、防空能力等.建立雷达反隐身能力评

估指标体系,具体见图2.

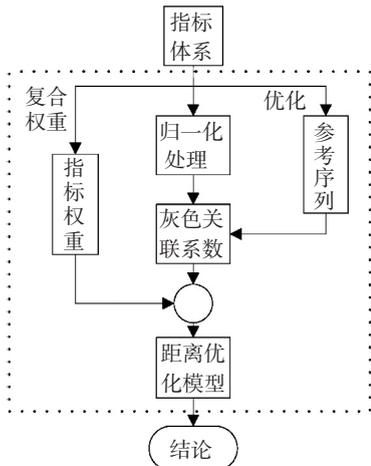


图1 雷达反隐身能力评估模型

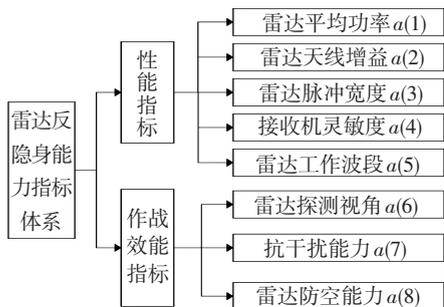


图2 雷达反隐身能力评估指标体系

3.2 指标的分析与计算

1)根据雷达最大作用距离方程和脉冲压缩体制雷达特点可知,增大雷达平均功率、天线增益、脉冲宽度与减小接收机灵敏度均能抑制目标的 RCS 缩减效应,进而增强雷达的反隐身能力.目前常用的改进措施有功率合成技术、大时宽脉冲压缩技术、减小系统噪声系数及微弱信号检测

技术等^[1].雷达的平均功率、天线增益、脉冲宽度、接收灵敏度均可通过查询雷达参数数据直接获得.

2)隐身目标主要针对厘米波段雷达,频段相对单一,不能实现全频段上的隐身.研究表明,采用 VHF、UHF、HF 等频段的雷达具有很强的反隐身性能.因此,雷达工作波段是雷达反隐身性能的重要评估指标^[9],其计算式为

$$a(5) = \begin{cases} \sigma, L, S \text{ 波段;} \\ (1200/f)^2(\sigma + 8) \text{ VHF, UHF 波段.} \end{cases} \quad (13)$$

式中: σ 为目标在 L, S 波段下的雷达散射截面 (RCS), f 为脉冲频率.

3)目前隐身目标还不能做到全空域隐身,雷达只要避开隐身目标 RCS 明显减缩的方向,从其它角度对其进行照射,就能保持原有距离上对隐身目标的探测能力.因此不同的雷达探测角度使雷达具有不同反隐身性能,如空基雷达、机载雷达、双(多)基地雷达等通过俯视、侧视、后视等角度就能大大提高探测能力.定义指标计算式为

$$a(6) = \begin{cases} 1, \text{不是空基雷达;} \\ 3, \text{多基地雷达;} \\ 5, \text{机载空基雷达.} \end{cases} \quad (14)$$

4)为提高雷达的反隐身性能,通过采用多种抗干扰技术措施提高雷达的抗干扰性能是常用的技术手段.在实际评估时,可将雷达的抗干扰能力近似于各种措施抗干扰能力(见表1)的和值,建立抗干扰因子评估模型^[10]为

$$a(7) = \sum_{i=1}^{12} w_k x_i. \quad (15)$$

式中 w_k 取值为 0 或 1,即雷达采用了该体制取 1,反之取 0; x_k 为第 k 种抗干扰措施的赋值.

表1 抗干扰措施赋值表

频率捷变	副瓣抑制	MTD	恒虚警	宽限窄	变重频	频率分集	极化可变	脉冲压缩	单脉冲	诱偏	复杂信号
6	2	4	4	2	2	2	3	4	3	4	2

5)任何雷达系统都是防空系统的一部分,能为防空武器系统提供目标的位置、方位等信息.因此,系统本身防空性能的好坏直接关系到雷达的反隐身作战效能.该指标可作为定性指标处理,即根据评语情况确定.

3.3 建立距离优化评估模型

按照式(10)~(12)对指标进行规范化处理,得到规范化矩阵 $X_i(j) = \{x_i(j) \mid i = 1, 2, \dots, M\}$.

在对雷达反隐身能力的实际评估中,为克服专家评估主观性强的缺点,指标权重的确定要综合考虑专家的主观意见、指标的数据变化和指标

间内在关系,如:雷达对防空能力的主观要求;雷达抗干扰能力、雷达平均功率、雷达灵敏度之间的关系等.因此,可根据改进的灰色关联算法确定各雷达的灰色关联度 φ_i .

定义1 样本序列的稳定距离

$$P_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^M [\xi_i(j) - \varphi_i]^2}{M}}. \quad (16)$$

定义2 样本序列与参考序列之间的灰色距离

$$S_i = 1 - \varphi_i. \quad (17)$$

由定义1可知,若某部雷达的个别指标值相

对较高,稳定距离值较大;若各指标值相差不大,稳定距离值相对较小.因此,稳定距离是对系统指标值稳定程度的综合度量,能有效避免某些局部较大,而整体发展不协调的系统,体现了“短板效应”原则,且其值越小,系统稳定性越强,值越大,系统稳定性越弱.由定义 2 可知,若样本序列与参考序列的关联系数很大,则两者之间的灰色距离就小,说明样本序列更接近于参考序列.因此,灰色距离是对系统指标值优劣程度的度量,能有效评估样本序列相对于参考序列的强弱程度,即距离越小,能力越强;反之,能力越弱.

基于上述分析,综合考虑指标值稳定程度与优劣程度是系统的、有效的评估雷达反隐身能力的必然选择.以 σ_1, σ_2 表示 P_i, S_i 的实际权重值,根据能力指数法定义优化评估距离为

$$L_i = P_i^{\sigma_1} \cdot S_i^{\sigma_2} \quad (18)$$

式中 $\sigma_1 + \sigma_2 = 1$. 则 L_i 是雷达评估指标稳定性和

优劣程度的综合体现,是雷达反隐身能力的最终评估指标.且其值越小,雷达反隐身能力越强;反之,雷达反隐身能力越弱.

4 仿真算例

4.1 算法过程仿真

进行雷达反隐身能力评估,选取不同频段机载、非空基、多基地雷达典型参数^[10]如表 2 所示.根据指标计算方法、复合权重的求解算法分别计算出各个指标的主观权重、客观权重、修正因子和复合权重,具体见表 3,其中,取 $\alpha = \beta = 0.3, \gamma = 0.4$.再依据式(2)、式(16)~(18)求出各部雷达在主观(算法 1)、客观(算法 2)和复合权重(算法 3)下评估距离,变化趋势见图 3.为分析和说明距离优化算法,分别求出各部雷达在复合权重下的稳定距离、灰色距离和评估距离,变化趋势见图 4.其中,取 $\sigma_1 = 0.4, \sigma_2 = 0.6$.

表 2 各雷达具体参数

雷达编号	平均功率/ kW	天线增益/ dB	脉宽/ MHz	灵敏度/ dBW	反射面积/ m ²	工作 波段	探测 模式	抗干扰措施	防空能力
1	6	40	5	-150	2	S	机载	频率捷变、恒虚警、复杂信号处理、MTD	较好
2	5	35	5	-130	1	S	非空基	副瓣抑制、MTD、变重频、单脉冲	一般
3	10	38	5	-128	1	L	多基地	副瓣抑制、MTD、变重频、单脉冲、恒虚警	好
4	0.05	24	4	-125	1	VHF	机载	恒虚警、MTD	差
5	0.80	31	5	-135	10	UHF	非空基	频率分集	较差

表 3 各评估指标权重值

指标	a(1)	a(2)	a(3)	a(4)	a(5)	a(6)	a(7)	a(8)
主观权重	0.042 8	0.042 8	0.014 4	0.085 7	0.214 3	0.171 4	0.300 0	0.128 6
客观权重	0.122 4	0.111 3	0.108 1	0.145 9	0.164 9	0.133 2	0.111 8	0.100 3
修正因子	0.203 1	0.150 3	0.108 0	0.147 0	0.178 2	0.207 2	0.172 1	0.164 5
复合权重	0.082 3	0.075 9	0.060 3	0.114 0	0.186 7	0.150 0	0.202 8	0.112 7

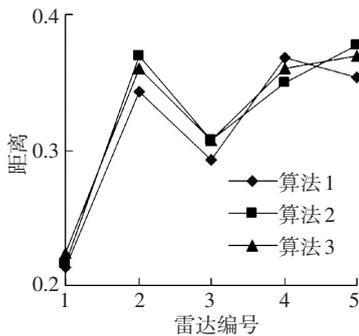


图 3 不同算法下的雷达评估距离

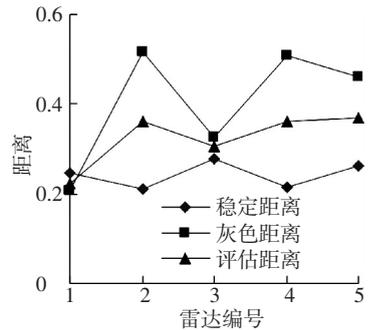


图 4 复合权重下的雷达距离参数

分析表 3 和图 3、4 可得出以下结论:

1) 在应用灰色关联算法对雷达反隐身能力进行评估分析时,特征权重的选择对评估结果的影响较大.复合权重灰色关联算法可以根据指标的数据信息实时更新修正特征权重,相比主观人

为设定和单纯的客观分析权重更加符合实际情况,因此采用复合权重灰色关联算法获得的指标权值要优于主、客观灰色关联算法,相应的评估结论也与实际情况更加相符.例如,在表 3 中复合权重相对于主、客观权重具有更强稳定性和准确性,

$a(7)$ 的复合权重值相对于主观权重更复合实际情况, $a(3)$ 的权重避免了由于过小而失去意义的现象;在图3中根据主观、客观、复合权重得到的雷达反隐身能力评估结论依次为:雷达1>雷达3>雷达2>雷达5>雷达4、雷达1>雷达3>雷达4>雷达2>雷达5、雷达1>雷达3>雷达2>雷达4>雷达5,显然,复合权重的求解结论更加符合各部雷达的实际情况。

2)采用距离优化评估算法求解时,能够系统衡量雷达反隐身的综合性能。由图4可知,雷达1的指标数据具有明显的反隐身优势,稳定性相对一般;雷达2的指标数据具有更强的稳定性,但反隐身优势不明显;雷达3的指标数据稳定性较差,但反隐身优势明显;雷达5的指标稳定性、优劣程度均较差等。因此,融合指标稳定性与劣性的评估算法可以克服单一灰色评估结果不准确、可靠性差的缺点。

4.2 算法检验仿真

为进一步检验算法,根据复合权重下的评估结果及各部雷达的关联系数矩阵应用 MATLAB 中 stepwise 函数进行逐步回归运算^[11]。由仿真结果可知,指标 $a(4)$ 、 $a(7)$ 对评估结果的影响程度较高,且每次回归所对应的剩余标准差逐渐减小到了 0.02 以下,模型的 F 值也大大提高,最终为 65.69,由此说明了回归结果的正确性。结合表 2、3 可知指标 $a(4)$ 、 $a(7)$ 的参数值相对于其余指标稳定性高、实际值大,复合权重值也相对较高,这都与上述检验结果相符合。由此可见,本文的评估模型具有很高的准确性。

5 结 论

定量评估雷达反隐身能力对雷达的论证设计、定型验收、实践应用等方面具有极其重要的意义。本文结合雷达反隐身性能和作战效能指标,给出了一种基于改进灰色关联度的距离优化评估算法,并通过算例仿真和 stepwise 函数验证了算法的正确性和可行性。该方法的特点是:

1)数据收集成本低、计算过程简便、模型可拓展性强、应用前景好。

2)实现了指标权重的优化处理,克服了权值

跳跃、主观性强、关联性弱等缺点。

3)综合考虑了雷达反隐身参数的稳定性和有效性,避免了个别指标较大、系统不协调现象,实现了评估的准确、可靠。

4)算法根据系统的原始数据求出了指标权重及评估结果,便于检验和分析。

参考文献

- [1] 李杰,付连庆. 雷达反隐身技术研究[J]. 中国雷达, 2011,2(2):1-7.
- [2] 曹丽梅,王瑛. 雷达隐身与反隐身技术发展综述[J]. 现代导航, 2012,6(3):215-218.
- [3] 林云,司锡才,周若琳,等. 改进灰色关联算法在辐射源识别中的应用[J]. 通信学报, 2010,31(8A):166-171.
- [4] 赵晶英,陈英俊,项顺伯. 物流企业遴选业务项目的熵权灰色关联算法设计[J]. 浙江大学学报, 2012,39(4):484-488.
- [5] 李天梅,邱静,刘冠军,等. 基于模糊灰色关联分析的故障样本集评估方法[J]. 仪器仪表学报, 2008,29(10):2196-2200.
- [6] 刘向阳,杜晓明,王琳,等. 基于综合权重的装备指挥效能评估[J]. 科学技术与工程, 2010,10(28):7092-7095.
- [7] 刘通,王静滨,张朝杰. 装备效能评估中加权求和模型的改进与应用[J]. 电光与控制, 2009,16(9):44-46.
- [8] 张近乐,任杰. 熵理论中熵及熵权计算式的不足与修正[J]. 统计与信息论坛, 2011,26(1):3-5.
- [9] 姜志敏,刘婕. 基于探测范围的雷达网反隐身能力评估方法[J]. 空军雷达学院学报, 2010,24(2):115-118.
- [10] 潘超. 雷达抗干扰效能评估准则与方法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2006.
- [11] 姜启源. 数学模型[M]. 北京:高等教育出版社, 2011.
- [12] GONG Shufeng, LONG Weijun, HUANG Hao, et al. Polyphase orthogonal sequences design for opportunistic array radar via HGA[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2013,24(1):60-67.
- [13] 梁睿,王崇林. 零序暂态电流灰色关联分析的小电流接地选线[J]. 中南大学学报, 2010,41(2):585-591.

(编辑 苗秀芝)