

控制与决策

Control and Decision

区间条件下基于GRA和TOPSIS的辐射源威胁评估

董鹏宇, 王红卫, 陈游

引用本文:

董鹏宇, 王红卫, 陈游. 区间条件下基于GRA和TOPSIS的辐射源威胁评估[J]. *控制与决策*, 2021, 36(6): 1516–1522.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1559>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于犹豫度和相似度的专家权重确定方法及其应用

Expert weights determination method and application based on hesitancy degree and similarity measure

控制与决策. 2021, 36(6): 1482–1488 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1382>

概率区间值直觉犹豫模糊Maclaurin对称平均算子及决策方法

Probabilistic interval-valued intuitionistic hesitant fuzzy Maclaurin symmetric mean operators and decision method

控制与决策. 2021, 36(5): 1249–1258 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1370>

基于策略权重的模糊多属性决策方法

Strategic weight manipulation in fuzzy multiple attribute decision making

控制与决策. 2021, 36(5): 1259–1267 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0542>

考虑时间序列的动态大群体应急决策方法

Dynamic large group emergency decision-making method considering time series

控制与决策. 2020, 35(11): 2609–2618 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0088>

基于前景理论和模糊理论的在线多属性采购拍卖 供应商选择决策

Decision method of supplier selection for online multi-attribute procurement auction based on prospect theory and fuzzy theory

控制与决策. 2020, 35(11): 2637–2645 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1768>

区间条件下基于 GRA 和 TOPSIS 的辐射源威胁评估

董鹏宇[†], 王红卫, 陈游

(空军工程大学 航空工程学院, 西安 710038)

摘要: 将辐射源威胁评估作为多属性决策问题进行处理时, 由于作战环境的复杂性, 侦察方无法获取敌方辐射源的完整信息, 导致各个辐射源目标的属性取值通常不是确定数值, 具有一定的不确定性. 针对上述问题, 引入区间数理论和灰色关联分析对传统逼近理想解排序法进行拓展, 提出一种基于灰色关联分析和逼近理想解排序的区间多属性决策方法用于解决不确定条件下的辐射源威胁评估问题. 该方法构建基于区间数的欧氏距离和基于区间数的灰色关联度, 通过对二者进行结合构建关于战场态势的决策信息系统, 并通过构造新的综合贴近度实现对辐射源威胁程度的定量评价. 实验仿真验证了所提方法能够有效解决实际作战中不确定条件下的辐射源威胁排序问题, 有助于侦察方对于战场态势的进一步掌握.

关键词: 辐射源威胁评估; 逼近理想解排序; 灰色关联分析; 区间数; 多属性决策; 欧氏距离

中图分类号: TN97

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.1559

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 董鹏宇, 王红卫, 陈游. 区间条件下基于 GRA 和 TOPSIS 的辐射源威胁评估 [J]. 控制与决策, 2021, 36(6): 1516-1522.

Combining TOPSIS and GRA for emitter threat evaluation with interval number

DONG Peng-yu[†], WANG Hong-wei, CHEN You

(Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: When the radiation source threat assessment is treated as a multi-attribute decision problem, due to the complexity of the operational environment, the scouting party cannot obtain complete information of the enemy radiation source, and the attribute value of each radiation source target are not usually determined values. There is a certain degree of uncertainty, which is generally expressed by the interval number. Therefore, this paper introduces interval number theory and grey relational analysis (GRA) to extend the traditional TOPSIS method. An interval multi-attribute decision making method based on GRA and TOPSIS is proposed to solve the radiation source threat assessment problem under uncertain conditions. This method constructs Euclidean distance based on interval number and grey relational degree based on interval number, constructs the decision information system about battlefield situation by combining them, and realizes quantitative evaluation of radiation source threat degree by constructing new comprehensive proximity degree. Finally, the simulation results show that the proposed method can effectively solve the problem of radiation source threat sequencing under uncertain conditions in actual combat, which is helpful for the scouting party to further grasp the battlefield situation.

Keywords: emitter threat evaluation; TOPSIS; grey relational analysis (GRA); interval number; multi-attribute decision; Euclidean distance

0 引言

现代电子战是包括侦察、干扰与评估为一体的综合战法, 辐射源威胁评估作为侦察环节中的关键一步, 其评估准确程度越来越影响到电子作战的最终结果, 甚至影响整个战争的作战效能^[1].

将辐射源威胁评估作为多属性决策问题来进行研究所用到的方法包括云模型^[2]、广义直觉模糊软

集^[3]、模糊认知图^[4]、IFE-VIKOR 模型^[5]等, 同时有文献^[6-7]将智能算法运用到威胁评估中, 以提高评估效率. 上述模型与算法都对提高威胁评估能力起到了积极的作用, 但是由于作战环境的复杂性, 侦察方无法获取敌方辐射源的完整信息, 导致各个辐射源目标的属性取值以及属性权重通常不是确定数值, 具有一定的不确定性, 因而一般采用区间数进行表达, 上述

收稿日期: 2019-11-10; 修回日期: 2020-04-15.

[†]通讯作者. E-mail: Hickey1212@163.com.

方法在此种情况下不一定适用。

逼近理想解排序 (technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS) 法能够综合考虑和处理多个相互制约的决策准则, 是多属性条件下进行多设计方案比较、排序和选择的有效算法, 文献 [8-9] 已经引入 TOPSIS 法对辐射源威胁程度进行评估, 并取得了很好的效果。但是 TOPSIS 法并不是完美的, 一方面, 当评价过程中指标数据有限时, 便难以求得完美结果; 另一方面, TOPSIS 法仅仅考虑指标之间的欧氏距离, 不能直接反映评价指标序列的变化趋势。另外, 由于作战环境的复杂性, 侦察方无法获取敌方辐射源的完整信息, 导致各个辐射源目标的属性取值以及属性权重通常不是确定数值, 具有一定的不确定性, 对于这种情况一般采用区间数进行表达。针对上述 TOPSIS 法存在的问题, 本文引入区间数 (interval numbers) 理论和灰色关联分析对传统逼近理想解排序法进行拓展。灰色关联分析方法最初是由 Deng^[10] 提出来的, 适用于多属性情况下的决策。它的优势在于处理不确定性过程, 对决策过程中出现的不确定性进行整合。灰色关联分析 (grey relational analysis, GRA) 解决多属性决策问题的方法是将整个属性值范围合并为一个单独的值, 将原始问题简化为单个属性决策问题, 对于解决多属性的不确定决策问题具有无可比拟的优势。

基于上述分析, 本文提出一种基于灰色关联分析^[11]和 TOPSIS 的区间多属性决策方法用于解决辐射源威胁评估问题。所提方法构建了基于区间数的欧氏距离和基于区间数的灰色关联度, 通过对二者进行结合构建了关于战场态势的决策信息系统并通过构造新的综合贴近度来实现对辐射源威胁程度的定量评价, 极大地改善了传统 TOPSIS 法的应用范围。

1 基本理论

1.1 区间数理论

令 $a = [a^L, a^U] = \{x | a^L \leq x \leq a^U, a^L, a^U \in R\}$ 表示实数轴上的一个闭区间, 则 a 为一个区间数。通常以可能性的程度来定量比较区间数的排序情况^[12-13]。令 $a = [a^L, a^U], b = [b^L, b^U]$, 则 $a \geq b$ 的可能性可以通过下式表示:

$$P(a \geq b) = \frac{\max\{0, a^L - b^U\} - \max\{0, a^U - b^L\}}{a^L - a^U + b^L - b^U} \quad (1)$$

根据式 (1), 对于 a, b 的大小关系有以下 3 种情况:

- 1) 如果 $0.5 < P(a \geq b) \leq 1$, 则 $a > b$;
- 2) 如果 $P(a \geq b) = 0.5$, 则 $a = b$;

3) 如果 $0 \leq P(a \geq b) < 0.5$, 则 $a < b$ 。

上面这种方法使得对两个区间数的比较成了可能, 但同时上述方法也存在一个缺点, 当两个区间数之间没有重叠时, 它不能提供间隔距离的度量。因此, 文献 [14] 提出了一个参数用来度量区间之间的距离, 它可以用来指示区间的大小, 如下式:

$$\Delta_{a-b} = \frac{1}{2}(a^L + a^U) - \frac{1}{2}(b^L + b^U) \quad (2)$$

从式 (2) 可以看出, 它定义两个区间数中点之间的距离, 通过 Δ_{a-b} 的大小来判断两个区间数的大小: $\Delta_{a-b} > 0$ 表示 $a > b$; $\Delta_{a-b} < 0$ 表示 $a < b$; $\Delta_{a-b} = 0$ 表示 $a = b$ 。这种方法使得当两个区间有一个公共区域或者不相交的情况出现时, 判断其大小变得更加容易。同时, 得到区间数 a 和 b 之间的距离为

$$|a - b| = \left| \frac{1}{2}(a^L + a^U) - \frac{1}{2}(b^L + b^U) \right| \quad (3)$$

1.2 区间 TOPSIS

传统 TOPSIS 法的基本原理是基于标准化后的样本评价矩阵, 通过正样本和负样本构建出评价空间, 待评价的目标可以视为评价空间内的一点, 通过计算与正负样本之间距离, 给出评价结果。针对上文提到的传统 TOPSIS 法存在的问题, 本文提出区间数 TOPSIS 法, 具体步骤如下。

step 1: 建立决策矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$ 。

step 2: 采用向量规范法求解规范化决策矩阵 $\hat{R} = (\hat{r}_{ij})_{m \times n}$ 。将指标分为效益型指标和成本型指标, 对于效益型指标, 其属性值越大, 目标函数值越大, 而成本型指标则正好相反。对于效益型指标, $\hat{r}_{ij} = [r_{ij}^L, r_{ij}^U]$ 计算如下:

$$\hat{r}_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sqrt{\sum_1^n r_{ij}^2}} = \frac{[r_{ij}^L, r_{ij}^U]}{\sqrt{\sum_1^n [r_{ij}^L, r_{ij}^U]^2}} = \frac{[r_{ij}^L, r_{ij}^U]}{\left[\sqrt{\sum_1^n r_{ij}^{L^2}}, \sqrt{\sum_1^n r_{ij}^{U^2}} \right]} = \left[\frac{r_{ij}^L}{\sum_1^n r_{ij}^{L^2}}, \frac{r_{ij}^U}{\sum_1^n r_{ij}^{U^2}} \right] \quad (4)$$

同理, 对于成本型指标, 其计算结果如下:

$$\hat{r}_{ij} = \left[\frac{(1/r_{ij}^L)}{\sum_1^n (1/r_{ij}^L)^2}, \frac{(1/r_{ij}^U)}{\sum_1^n (1/r_{ij}^U)^2} \right] \quad (5)$$

step 3: 根据各个指标的重要性求加权规范化决策矩阵 $\bar{R} = (\bar{r}_{ij})_{m \times n}$, 有

$$\bar{R} = R \cdot \Lambda(\omega_{ij}), \quad \bar{r}_{ij}^* =$$

$$[r_{ij}^L, r_{ij}^U] \cdot [(\omega_j)^L, (\omega_j)^U] = [r_{ij}^L(\omega_j)^L, r_{ij}^U(\omega_j)^U]. \quad (7)$$

step 4: 确定正理想解 s^+ 和负理想解 s^- , 有

$$s^+ = \{s_1^+, s_2^+, \dots, s_m^+\} = \begin{cases} \{\max_{1 \leq i \leq m} \hat{r}_{ij}^*, j \in J^+\}; \\ \{\min_{1 \leq i \leq m} \hat{r}_{ij}^*, j \in J^-\}. \end{cases} \quad (8)$$

$$s^- = \{s_1^-, s_2^-, \dots, s_m^-\} = \begin{cases} \{\min_{1 \leq i \leq m} \hat{r}_{ij}^*, j \in J^+\}; \\ \{\max_{1 \leq i \leq m} \hat{r}_{ij}^*, j \in J^-\}. \end{cases} \quad (9)$$

其中 J^+ 和 J^- 分别为效益型指标集和成本型指标集.

step 5: 计算各评估对象与正、负理想解的欧氏距离 d_i^+ 与 d_i^- , 有

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (\hat{r}_{ij}^* - s_j^+)^2} = \sqrt{\sum_{j=1}^n \left| \frac{1}{2}(\hat{r}_{ij}^{*L} + \hat{r}_{ij}^{*U})^2 - \frac{1}{2}(s_j^{+L} + s_j^{+U})^2 \right|}, \quad (10)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (\hat{r}_{ij}^* - s_j^-)^2} = \sqrt{\sum_{j=1}^n \left| \frac{1}{2}(\hat{r}_{ij}^{*L} + \hat{r}_{ij}^{*U})^2 - \frac{1}{2}(s_j^{-L} + s_j^{-U})^2 \right|}. \quad (11)$$

step 6: 计算基于欧氏距离的相对贴近度 C_i^T , 并按照计算结果进行排序, 输出评估结果

$$C_i^T = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}. \quad (12)$$

1.3 区间 GRA

灰色关联分析的优势主要是通过曲线和几何形状的接近程度来判断方案理想与否, 再依据综合关联度大小排序判断方案的优劣. 针对输入数据是区间型的情况, 本文对传统 GRA 处理方式进行了一定改进, 具体处理步骤如下所示.

step 1 ~ step 4: 同区间 TOPSIS 法, 此略.

step 5: 选择各指标的最优值组成 GRA 模型的参考数列, 即正理想解集

$$\hat{r}_0^+ = \max \hat{r}_{ij}^*, \quad 1 \leq i \leq m. \quad (13)$$

step 6: 求灰色关联系数

$$\bar{r}^+ = \frac{\min_n \min_m |\hat{r}_0^+(j) - \hat{r}_{ij}^*| + \lambda \max_n \max_m |\hat{r}_0^+(j) - \hat{r}_{ij}^*|}{|\hat{r}_0^+(j) - \hat{r}_{ij}^*| + \lambda \max_n \max_m |\hat{r}_0^+(j) - \hat{r}_{ij}^*|}, \quad (14)$$

其中 λ 为分辨系数, 本文取值 0.3. 此时, 可以求出各评估对象与正理想解集的灰色关联度

$$\gamma_i^+ = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \bar{r}_{ij}^+. \quad (15)$$

step 7: 用同样的方式求出各评估对象与负理想解集的灰色关联度 γ_i^- .

step 8: 通过灰色关联度计算相对贴近度

$$C_i^G = \frac{\gamma_i^-}{\gamma_i^+ + \gamma_i^-}. \quad (16)$$

2 威胁评估模型

2.1 辐射源威胁评估体系

本文基于科学性、系统性和合理性的原则构建了如图 1 所示的辐射源威胁评估体系.

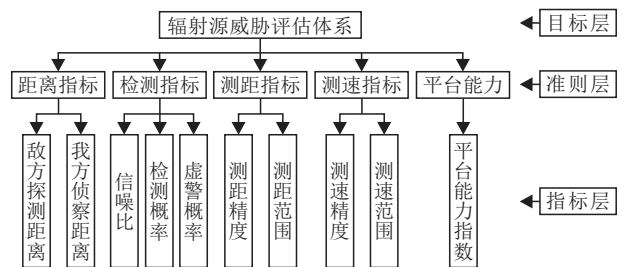


图 1 辐射源威胁评估体系

对于图 1 中指标层中敌方探测距离等指标的概念和计算公式在文献 [15] 中都有详细描述, 此略.

2.2 组合权重的确定

指标权重的确定对于多属性决策过程至关重要, 合理的权重确定方式得到的决策结果也是较为合理的. 目前, 主流的权重赋值方法有主观赋权法、客观赋权法和组合赋权法 [16-18]. 其中, 主观赋权法更多考虑的是决策者的专业知识以及偏好, 客观赋权更多情况下是通过决策数据建立数学模型进而求解权重. 但在实际问题的求解过程中, 单一的主观或客观赋权常常会因为忽略某一方面的信息造成赋权不准确, 进而影响评估排序结果. 而组合赋权法在避免主客观赋权缺陷的同时, 集合了它们的优势, 所以本文采用组合赋权法确定评估指标权重.

最优组合赋权方法确定组合权重的步骤如下.

step 1: 令 $\omega_z = u_1 = (u_{11}, u_{12}, \dots, u_{1n})$, $\omega_k = u_2 = (u_{21}, u_{22}, \dots, u_{2n})$.

step 2: 求得属性集结权重

$$d^* = (d_1^*, d_2^*, \dots, d_n^*), \quad (17)$$

$$d_i^* = \prod_{i=1}^2 (u_{ij})^{1/2} / \sum_{j=1}^n \prod_{i=1}^2 (u_{ij})^{1/2}. \quad (18)$$

step 3: 计算主、客观赋权结果与集结权重 d^* 的贴近度 $h(u_i, d^*)$, $i = 1, 2$.

step 4: 根据贴近度 $h(u_i, d^*)$ 计算主、客观赋权结果的可信度, 赋权结果的可信度可表示为

$$\alpha_i = h(u_i, d^*) / \sum_{i=1}^2 h(u_i, d^*). \quad (19)$$

Step 5: 确定组合指标权重

$$W = \alpha_1 W_z + \alpha_2 W_k = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n), \quad (20)$$

$$\omega_j = \sum_{i=1}^2 \alpha_i u_{ij}. \quad (21)$$

2.3 联合区间欧氏距离和区间GRA的决策法

灰色关联分析和 TOPSIS 多属性评价存在一定的相似性, 也存在一定差异. TOPSIS 法倾向于反映利用欧氏距离测量数字序列的位置关系, 而 GRA 侧重于反映由灰色关联度计算得到的数字序列的曲线形状关系. 为了同时考虑数据序列的位置和形状特性, 进而得到更加准确的决策结果, 本文将区间 TOPSIS 方法和区间 GRA 相结合, 解决了不确定的辐射源威胁排序问题, 并且构造了一种新的混合相对贴近度来评估各个辐射源的威胁程度. 具体评估流程如图 2 所示.

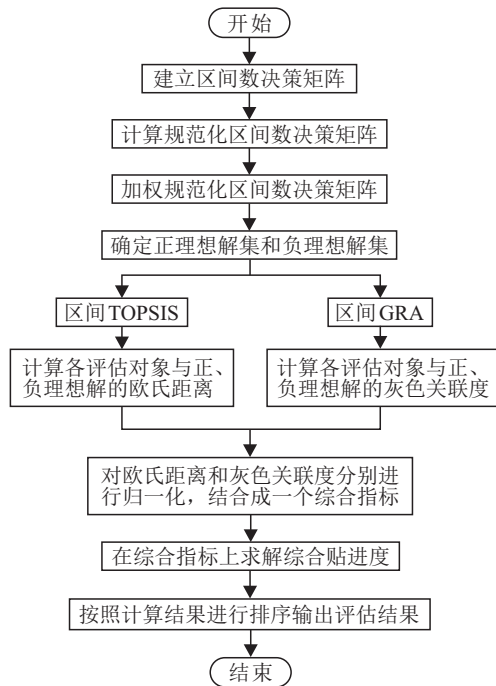


图 2 辐射源威胁评估流程

根据上述流程图, 可得具体操作步骤如下所示.

step 1: 构造区间数决策矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$.

step 2: 对矩阵 R 进行标准化处理, 得到标准化区间数决策矩阵 $Z = (z_{ij})_{m \times n}$.

step 3: 建立加权标准化区间数决策矩阵 $X = (x_{ij})_{m \times n}$.

step 4: 确定正理想解集和负理想解集.

step 5: 计算各评估对象与正、负理想解的欧氏距离 D_i^+ 与 D_i^- .

step 6: 计算各评估对象与正、负理想解的灰色关联度 γ_i^+ 与 γ_i^- .

step 7: 通过下面公式对欧氏距离和灰色关联度进行归一化处理:

$$d_i^{+*} = \frac{d_i^+}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (d_i^+)^2}}, \quad d_i^{-*} = \frac{d_i^-}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (d_i^-)^2}}; \quad (22)$$

$$\gamma_i^{+*} = \frac{\gamma_i^+}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (\gamma_i^+)^2}}, \quad \gamma_i^{-*} = \frac{\gamma_i^-}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (\gamma_i^-)^2}}. \quad (23)$$

从上文的分析可知, d_i^- 和 γ_i^+ 越大, 辐射源在位置和形状上越接近正区间数理理想解; 反之, d_i^+ 和 γ_i^- 越大, 辐射源在位置和形状上越接近负区间数理理想解. 因此, 考虑从位置和形状两个方面表达各个辐射源的威胁程度, 本文将归一化欧氏距离与归一化灰色关联度进行结合, 建立如下混合公式:

$$\begin{cases} h_i^+ = \alpha d_i^{-*} + \beta \gamma_i^+, \\ h_i^- = \alpha d_i^{+*} + \beta \gamma_i^-. \end{cases} \quad (24)$$

其中 α 和 β 分别为各辐射源与理想解相似度计算中位置和形状的权重, 反映了决策者对位置和形状因素的偏好, 决策者可以根据他的偏好调整 α 和 β 的大小 ($\alpha + \beta = 1, 0 \leq \alpha \leq 1, 0 \leq \beta \leq 1$).

step 8: 计算基于欧氏距离的相对贴近度, 并按照 c_i^* 计算结果进行排序, 输出评估结果

$$c_i^* = \frac{h_i^-}{h_i^- + h_i^+}. \quad (25)$$

3 实例仿真

3.1 仿真场景设置

仿真场景设置为我方一战斗机在某空域以 300 m/s 的速度执行作战任务, 我方后方侦察设备侦察到在我作战区域内存在 5 个未知辐射源, 记为 $X_i (i = 1, 2, \dots, 5)$. 我方 RWR/ESM 设备各参数设置如表 1 所示.

表 1 RWR/ESM 设备参数

设备参数	大小
天线增益 G_r /dB	35
最小可检测信号 $P_{r, \min}$ /dBW	[-60, -50]
接收机损耗/dB	6
RCS 值/ m^2	5

我方设备对侦收到的数据进行处理后得到脉冲样本图参数和辐射源特征参数分别如表 2 和表 3 所

示, 战场中敌方目标态势信息参数如表4所示, 其中 A_1 和 A_3 采用定性指标描述方法. 机载火控雷达 $l = 3$, 机载预警雷达 $l = 4$, 地面远程警戒雷达 $l = 2$, 地面制导雷达 $l = 6$; 抗干扰处理 $k = 5$, 空域对抗 $k = 2$, 综合对抗 $k = 8$.

表2 脉冲样本图参数

目标	RF/MHz	PRI/ μ s	PW/ μ s	AOA/ $^\circ$
X_1	9500	3.0	1.2	11
X_2	9800	11.3	0.29	2
X_3	9000	3.1	1.1	30
X_4	1500	100	1.1	15
X_5	10000	3.0	0.5	45

目标	PA/dB	Ts/ μ s	Te/ μ s	N
X_1	10	1.0	3072.0	1024
X_2	12	1340.2	2799.4	128
X_3	6	4510.0	6097.2	512
X_4	10	11	11070.0	64
X_5	5	7910.0	9446.0	512

表3 辐射源特征参数

目标	属性					
	P_t /KW	G/G_t /dB	F_n /dB	L /dB	$(S/N)_{\min}$ /dB	t_{fa} /s
X_1	12	40	4	6	[12, 20]	[60, 90]
X_2	12	40	4	6	[12, 20]	[60, 90]
X_3	13.5	45	3	4	[10, 20]	[60, 90]
X_4	50	48	2	7	[8, 16]	[90, 120]
X_5	15	50	3	6	[10, 18]	[50, 80]

表4 目标平台态势信息参数

目标	$A_1(l)$	A_2			$A_3(k)$
		R /km	v /(m/s)	h /m	
X_1	3	80	285	6000	5
X_2	3	50	290	5500	5
X_3	4	120	250	7000	5
X_4	2	400	0	0	2
X_5	6	150	0	0	8

表5 辐射源目标属性决策矩阵

目标	R	R_r	$R_{S,N}$	P_d	$P_{fa}/10^{-9}$	ΔR	R_{\max}	Δv	v_{\max}	C
X_1	[207.05, 130.64]	[218.86, 69.21]	13.43	[0.770, 0.750]	[20.00, 13.30]	0.18	0.45	5.13	5236.15	11.46
X_2	[98.13, 61.91]	[212.16, 67.09]	15.16	[0.976, 0.972]	[4.83, 3.22]	0.043	63.91	9.49	1719.78	11.38
X_3	[151.13, 84.99]	[435.74, 137.79]	16.99	[0.980, 0.990]	[18.30, 12.20]	0.16	0.46	10.50	5376.34	11.90
X_4	[186.51, 117.68]	[7107.22, 2247.50]	23.33	[0.830, 0.901]	[6.11, 4.58]	0.16	15.00	15.62	1000.00	7.38
X_5	[588.80, 371.51]	[735.11, 232.47]	32.91	[0.981, 1.000]	[10.00, 6.25]	0.075	0.45	9.76	5000.00	8.8

表6 加权规范化决策矩阵

目标	R	R_r	$R_{S,N}$	P_d	$P_{fa}/10^{-9}$	ΔR	R_{\max}	Δv	v_{\max}	C
X_1	[0.3036, 0.3079]	[0.0305, 0.0305]	0.2785	[0.3777, 0.3617]	[0.6683, 0.6682]	0.5965	0.0069	0.2157	0.5690	0.4951
X_2	[0.1452, 0.1459]	[0.0296, 0.0296]	0.3143	[0.4787, 0.4688]	[0.1614, 0.1618]	0.1425	0.9735	0.3989	0.1859	0.4916
X_3	[0.2236, 0.2003]	[0.0608, 0.0608]	0.3523	[0.4806, 0.4775]	[0.6115, 0.6130]	0.5302	0.0070	0.4414	0.5812	0.5141
X_4	[0.2760, 0.2774]	[0.9920, 0.9919]	0.4837	[0.4071, 0.4345]	[0.2042, 0.2301]	0.5320	0.2285	0.6566	0.1081	0.3188
X_5	[0.8712, 0.8757]	[0.1026, 0.1026]	0.6823	[0.4811, 0.4823]	[0.3342, 0.3140]	0.2485	0.0069	0.4103	0.5405	0.3836

3.2 威胁评估实验

首先, 根据表2~表4提供的参数, 可得辐射源目标属性决策矩阵 $X = (x_{ij})_{5 \times 10}$, 如表5所示, 再结合本文提出的基于GRA和TOPSIS联合决策的威胁评估流程, 求得加权规范化决策矩阵如表6所示.

其次, 根据我方侦察距离、虚警概率为成本型指标, 其余指标为效益型指标, 确定正理想解和负理想解分别为

$$s^+ = \{[0.0653, 0.0655], [0.0050, 0.0050], 0.0411, [0.0363, 0.0364], [0.0151, 0.0151], 0.0415, 0.1897, 0.0602, 0.0613, 0.0339\},$$

$$s^- = \{[0.0109, 0.0109], [0.1672, 0.1671], 0.0168, [0.0285, 0.0273], [0.0625, 0.0625], 0.0099, 0.0013, 0.0198, 0.0114, 0.0210\}.$$

根据区间TOPSIS法的step5, 可以得到各评估对象与正、负理想解的欧氏距离 d^+ 与 d^- , 有

$$d^+ = \{0.2589, 0.1065, 0.1756, 0.2205, 0.2350\},$$

$$d^- = \{0.0581, 0.0943, 0.0252, 0.0197, 0.0342\}.$$

根据区间GRA法的step5~step7, 可以得到各评估对象与正、负理想解的灰色关联度 γ^+ 与 γ^- , 有

$$\gamma^+ = \{0.7985, 1.0860, 0.6930, 1.1930, 0.8225\},$$

$$\gamma^- = \{1.2250, 1.1665, 1.0980, 0.5968, 0.9650\}.$$

对欧氏距离和灰色关联度进行归一化处理, 得

$$d^{+*} = \{0.2598, 0.1069, 0.1762, 0.2213, 0.2358\},$$

$$d^{-*} = \{0.2059, 0.4074, 0.1089, 0.0851, 0.1477\},$$

$$\gamma^{+*} = \{0.1738, 0.1508, 0.1791, 0.2597, 0.2364\},$$

$$\gamma^{-*} = \{0.2425, 0.2309, 0.2174, 0.1181, 0.1910\}.$$

令 $\alpha = \beta = 0.5$, 并将归一化后的欧氏距离和灰色关联度代入式(24)以得到联合处理后的指标

$$h^+ = \{0.2168, 0.1289, 0.1777, 0.2405, 0.2361\},$$

$$h^- = \{0.2242, 0.3192, 0.1632, 0.1016, 0.1694\}.$$

最后, 根据式(25)求得综合贴近度

$$C^* = \{0.5084, 0.7124, 0.4787, 0.2970, 0.4177\}.$$

对综合贴近度进行排序可以得到辐射源威胁程度排序为 $X_2 > X_1 > X_3 > X_5 > X_4$, 排序综合反映了决策者对于被评估对象与理想解之间基于距离的相似度和基于形状的相似度。

另外, 本文基于决策者对于被评估对象与理想解之间基于距离的相似度和基于形状的相似度偏好程度的不同作了对比, 结果如表7所示。

表7 不同偏好度下评估算法的威胁评估结果

目标	$\alpha = \beta = 0.5$		$\alpha = 0.8, \beta = 0.2$		$\alpha = 0.2, \beta = 0.8$	
	贴近度	排序	贴近度	排序	贴近度	排序
X_1	0.5084	2	0.4678	2	0.5518	2
X_2	0.7124	1	0.7628	1	0.6521	1
X_3	0.4787	3	0.4249	3	0.5230	3
X_4	0.2970	5	0.2860	5	0.3067	5
X_5	0.4177	4	0.3986	4	0.4356	4

从表7可以看出, 针对雷达辐射源的威胁排序, 不同偏好程度不会影响到最终的排序, 这也完全符合实际作战中敌方武器平台对于我方威胁程度的大小之分, 有助于我方对于战场态势的正确判断。

3.3 威胁评估效果对比

按照前面的场景设置, 根据本文改进的GRA-TOPSIS模型求得 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 五个辐射源目标的综合相对贴近度, 并与传统TOPSIS法进行对比, 结果如图3所示。

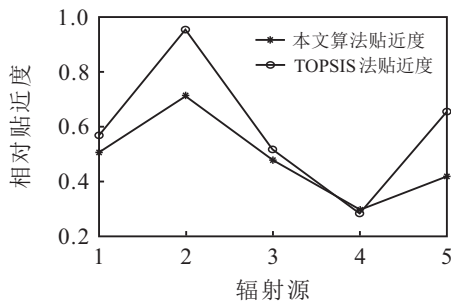


图3 威胁评估结果

从图3可以看出, 两种方法在对 X_5 的排序上出现了分歧. 根据原始数据进行分析, 可以得到 X_1 、 X_2 、 X_3 的威胁程度要高于 X_4 和 X_5 , 而对于 X_4 和 X_5 而

言, X_5 为制导雷达, 且态势信息中距离更近, 所以 X_5 对我方威胁程度要高于 X_4 . 分析可得, 本文所提方法能够极大程度地避免排序的错误发生, 对于我方战机在战场中的态势评估能提供更加准确的指导。

4 结论

针对传统TOPSIS法在进行辐射源威胁排序, 尤其是在处理不确定情况下辐射源威胁排序的问题时存在的缺点, 本文引入区间数理论和灰色关联分析对传统逼近理想解排序法进行拓展, 提出了一种基于灰色关联分析和逼近理想解排序的区间多属性决策方法, 用于解决不确定条件下的辐射源威胁评估问题. 该方法构建了基于区间数的欧氏距离和基于区间数的灰色关联度, 通过对二者进行结合构建了关于战场态势的决策信息系统, 并通过构造新的综合贴近度实现对辐射源威胁程度的定量评价. 仿真实验验证了本文所提方法能够有效解决实际作战中不确定条件下的辐射源威胁排序问题, 有助于侦察方对于战场态势的进一步掌握. 另外, 本文所提方法还可以应用到其他决策领域, 具有较强的可拓展性。

参考文献 (References)

- [1] 范翔宇, 王红卫, 索中英, 等. 基于粗糙集-信息熵的辐射源威胁评估方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(8): 1755-1761.
(Fan X Y, Wang H W, Suo Z Y, et al. Radiator threat evaluation method based on rough set and information entropy[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(8): 1755-1761.)
- [2] Ma S D, Zhang H G, Yang G Q. Target threat level assessment based on cloud model under fuzzy and uncertain conditions in air combat simulation[J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 67: 49-53.
- [3] Zhang Q, Hu J H, Feng J F, et al. Air multi-target threat assessment method based on improved GGIFSS[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2019, 36(5): 4127-4139.
- [4] Chen J, Yu G H, Gao X G. Cooperative threat assessment of multi-aircrafts based on synthetic fuzzy cognitive map[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2012, 17(2): 228-232.
- [5] Zhang K, Kong W R, Liu P P, et al. Assessment and sequencing of target threat based on intuitionistic fuzzy entropy and dynamic VIKOR[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2018, 29(2): 305-310.
- [6] 陈侠, 刘子龙, 梁红利. 基于GA-SLFRWNN的空中目标威胁评估[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(2): 424-432.

- (Chen X, Liu Z L, Liang H L. Assessment of aerial target based on genetic algorithm optimizing fuzzy recurrent wavelet neural network[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019, 37(2): 424-432.)
- [7] 么洪飞, 王宏健, 王莹, 等. 基于遗传算法DDBN参数学习的UUV威胁评估[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(12): 1972-1978.
(Yao H F, Wang H J, Wang Y, et al. Threat assessment of UUV based on genetic algorithm DDBN parameter learning[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39(12): 1972-1978.)
- [8] 杨远志, 于雷, 周中良, 等. 基于RS_TOPSIS的空中目标威胁评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(5): 1001-1007.
(Yang Y Z, Yu L, Zhou Z L, et al. Air target threat evaluation based on RS_TOPSIS[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(5): 1001-1007.)
- [9] 张浩为, 谢军伟, 葛佳昂, 等. 改进TOPSIS的多时刻融合直觉模糊威胁评估[J]. 控制与决策, 2019, 34(4): 811-815.
(Zhang H W, Xie J W, Ge J A, et al. Intuitionistic fuzzy set threat assessment based on improved TOPSIS and multiple times fusion[J]. Control and Decision, 2019, 34(4): 811-815.)
- [10] Deng J L. Introduction to grey system[J]. Journal Grey System, 1989, 1(1): 1-24.
- [11] Zhang M, Li G X. Combining TOPSIS and GRA for supplier selection problem with interval numbers[J]. Journal of Central South University, 2018, 25(5): 1116-1128.
- [12] Wang Y M, Luo Y. On rank reversal in decision analysis[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2009, 49(5/6): 1221-1229.
- [13] Xu Z, Chen J. Some models for deriving the priority weights from interval fuzzy preference relations[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 184(1): 266-280.
- [14] Jahanshahloo G R, Khodabakhshi M, Hosseinzadeh L F, et al. A cross-efficiency model based on super-efficiency for ranking units through the TOPSIS approach and its extension to the interval case[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2011, 53(10): 1946-1955.
- [15] Quan W, Li P, Wu D, et al. A new sorting algorithm for radar emitter recognition[C]. IEEE International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE). Changchun: IEEE, 2010: 407-410.
- [16] Kahraman C, Ertay T, Büyüközkan G. A fuzzy optimization model for QFD planning process using analytic network approach[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 171(2): 390-411.
- [17] Luo Z M, Zhou J Z, Zhang L P, et al. A TFN-ANP based approach to evaluate virtual research center comprehensive performance[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(12): 8379-8386.
- [18] 张莹, 王红卫, 陈游. 基于ICW-RCM的辐射源组合威胁评估[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(3): 557-562.
(Zhang Y, Wang H W, Chen Y. Combined emitter threat assessment based on ICW-RCM[J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(3): 557-562.)

作者简介

董鹏宇(1995—), 男, 硕士生, 从事信息对抗理论与技术的研究, E-mail: Hickey1212@163.com;

王红卫(1974—), 男, 副教授, 博士, 从事认知电子战、雷达信号处理等研究, E-mail: hww0818@163.com;

陈游(1983—), 男, 副教授, 博士, 从事电子对抗、人工智能等研究, E-mail: skyfishuu@163.com.

(责任编辑: 齐 霁)