

基于 Shapley-TOPSIS 的辐射源威胁评估

徐宇恒¹, 程嗣怡¹, 周一鹏¹, 索中英², 彭树铭³

(1. 空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038; 2. 空军工程大学基础部, 西安, 710051; 3. 95899 部队, 北京, 100085)

摘要 针对雷达对抗领域辐射源威胁评估问题, 利用基于 Shapley 值的优势关系粗糙集客观权重分配法克服主观赋值、不依赖先验知识的优点, 与 TOPSIS(逼近理想解排序)结合, 提出一种基于 Shapley-TOPSIS 的辐射源威胁评估模型。首先, 区分收益型和成本型对属性指标进行规范化, 构建目标集与属性集的评判矩阵; 然后, 利用优势关系进行属性约简, 并基于 Shapley 值确定各属性权重, 再利用属性权重更新评判矩阵; 最后, 计算得到模型的正、负理想解, 分别求解各辐射源的贴近度, 进行辐射源威胁等级排序。仿真结果表明, 与基于专家系统赋值的 TOPSIS 模型相比, 文中模型综合考虑了各属性的相互关系, 威胁等级排序结果更准确。

关键词 Shapley 值; 优势关系; TOPSIS; 威胁等级排序

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2020.02.014

中图分类号 TN97 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2020)02-0091-06

Radiator Threat Evaluating Based on Shapley-TOPSIS

XU Yuheng¹, CHENG Siyi¹, ZHOU Yipeng¹, SUO Zhongying², PENG Shuming³

(1. Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. Department of Basic Sciences, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

3. Unit 95899, Beijing 100085, China)

Abstract Aiming at the problem of radiator threat evaluating in radar countermeasures field, an objective weight distribution method based on Shapley value is used to overcome the advantages of subjective assignment and not relying on prior knowledge. Combined with TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution), a radiator threat assessment model based on Shapley-TOPSIS is proposed. Firstly, the evaluation matrix of target set and attribute set is constructed by distinguishing benefit type and cost type and standardize the attribute indexes. Then, the advantage relation is used for attribute reduction, and the weight of each attribute is determined based on Shapley value, and the attribute weight is used to update the evaluation matrix. Finally, the positive and negative ideal solutions of the model were obtained, and the proximity degree of each radiator was solved respectively, and the threat ranking of radiator was conducted. The simulation results show that, compared with TOPSIS model based on expert system assignment, the model in this paper comprehensively considers the relationship between various attributes, and the result of threat ranking is more accurate.

Key words Shapley value; dominance relation; TOPSIS; threat ranking

收稿日期: 2019-07-10

作者简介: 徐宇恒(1997—), 男, 湖北天门人, 硕士生, 主要从事信息对抗理论与技术研究。E-mail: 18192200837@163.com

引用格式: 徐宇恒, 程嗣怡, 周一鹏, 等. 基于 Shapley-TOPSIS 的辐射源威胁评估[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2020, 21(2): 91-96.
XU Yuheng, CHENG Siyi, ZHOU Yipeng, et al. Radiator Threat Evaluating Based on Shapley-TOPSIS[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2020, 21(2): 91-96.

目前,辐射源威胁评估领域涌现出很多算法模型。文献[1]构建了基于粗糙集和信息熵的辐射源威胁评估模型,定量表示辐射源威胁程度并实现排序;文献[2]针对空战多目标环境,提出一种基于改进群广义直觉模糊软集的评估方法;文献[3]通过直觉模糊熵计算属性权重,构建基于IFE-VIKOR的模型,实现了动态威胁评估;文献[4]引入云模型解决空战威胁评估中模糊不确定问题;文献[5]构建基于IFS-BN的辐射源威胁评估模型,在解决侦收信息不确定性的同时,实现了评估的实时性;文献[6]引入灰色关联理论,解决了评估指标不全、信息缺失的问题。以上研究虽然解决了辐射源威胁评估中信息不确定和不完备的问题,但构建的模型在很大程度上依赖于主观赋值和专家知识系统,主观性较强,导致针对不同的场景产生不同的偏好,客观性较差。

为避免辐射源威胁评估算法中主观赋值严重的问题,文献[7]提出基于遗传算法优化模糊递归小波神经网络的威胁评估模型,提高系统的自主学习能力;文献[8]在使用小波神经网络对辐射源进行威胁评估的基础上,引入BP算法更新模型参数;文献[9]引入动态贝叶斯网络和遗传算法,提高威胁评估的实时性;文献[10]构建了基于PSO-SVM的模型,实现快速、有效的辐射源威胁评估。但是,以上处理方法对先验知识要求较高,不能应对现实辐射源威胁评估中先验知识不足的情况,存在一定的局限性。

针对以上问题,文献[11~14]引入逼近理想解排序算法(Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution, TOPSIS),统一规范辐射源属性,引入正、负理想解和贴近度的概念,有效实现了辐射源威胁评估。近年来, TOPSIS广泛应用于投资、旅游、地热资源评估等领域^[15-17]。针对现有TOPSIS模型中属性权重分配问题,文献[18]提出基于Shapley值的优势关系粗糙集客观权重分配方法,能有效对属性进行约简,并以严格的数学公理和公式推导为基础,充分考虑属性间的相互关系,客观公正地分配属性权重。因此本文将基于Shapley值的优势关系粗糙集客观权重分配方法与TOPSIS结合,构建基于Shapley-TOPSIS的辐射源威胁评估模型,应用于辐射源威胁评估。

1 基于TOPSIS的辐射源威胁评估

TOPSIS根据各对象与正、负理想对象之间的相对距离对所有待评估对象进行排序与评价,并得出对象间的优劣关系。

在辐射源威胁评估问题中,针对一般情况下属性值与辐射源威胁程度的联系,可将属性指标划分

为收益型指标和成本型指标。对于收益型指标(属性),属性值越大,辐射源威胁程度越大;对于成本型指标(属性),属性值越大,辐射源威胁程度越小。计算公式为:

1) 收益型指标 p_{ij} :

$$p_{ij} = \frac{t_{ij} - \min_i t_{ij}}{\max_i t_{ij} - \min_i t_{ij}} \quad (1)$$

2) 成本型指标 p_{ij} :

$$p_{ij} = \frac{\max_i t_{ij} - t_{ij}}{\max_i t_{ij} - \min_i t_{ij}} \quad (2)$$

Step1 通过目标集与属性集的关系矩阵构建评判矩阵。

接收机侦收到空域中的未知辐射源信号,并整理出4种辐射源参数信息,得到初始目标集与属性集的矩阵 T 。

$$T = (t_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \cdots & t_{1n} \\ t_{21} & t_{22} & \cdots & t_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ t_{m1} & t_{m2} & \cdots & t_{mn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

为更方便地将各属性统一起来对辐射源进行描述,需要先对 T 进行规范化。对于辐射源属性 j ,其值越大,辐射源可能对我方构成的威胁程度越大,则判定 j 为收益型指标,根据式(1)进行属性规范化;若其值越大,辐射源可能对我方构成的威胁程度越小,则判定 j 为成本型指标,根据式(2)进行属性规范化。最后,可得到评判矩阵 P :

$$P = (p_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \cdots & p_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Step2 确定属性(4种辐射源参数)的权重,权重矩阵为 $W = (\omega_j)_n = (\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_n)$,更新评判矩阵为 P' :

$$P' = (p'_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} p'_{11} & p'_{12} & \cdots & p'_{1n} \\ p'_{21} & p'_{22} & \cdots & p'_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p'_{m1} & p'_{m2} & \cdots & p'_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $p'_{ij} = p_{ij} \times \omega_j$ 。

Step3 根据新的评判矩阵 P' 确定模型的正理想解 P^+ 和负理想解 P^- 。

计算式如下:

$$P^+ = \{ \max_{1 \leq i \leq m} p_{ij} \} = \{ p_1^+, p_2^+, \cdots, p_n^+ \} \quad (6)$$

$$P^- = \{ \min_{1 \leq i \leq m} p_{ij} \} = \{ p_1^-, p_2^-, \cdots, p_n^- \} \quad (7)$$

Step4 分别计算各辐射源到正、负理想解的距离 L_i^+ 和 L_i^- ,然后计算贴近度 L'_i 。最后,按贴近度从大到小的顺序对辐射源目标进行威胁等级排序。

L_i^+ 、 L_i^- 、 L'_i 计算如下:

$$L_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (p'_{ij} - p_j^+)^2} \quad (8)$$

$$L_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (p'_{ij} - p_j^-)^2} \quad (9)$$

$$L'_i = \frac{L_i^-}{L_i^+ + L_i^-} \quad (10)$$

2 基于 Shapley 值优势关系的属性权重分配

基于 Shapley 值优势关系^[18]的属性权重分配法首先综合分析属性值进行属性约简,仅留下对评估结果影响大的决策属性集,能有效缩短评估时间,提高评估时效性。另外,基于 Shapley 值优势关系的属性权重分配法引入 Shapley 值确定各属性的相对重要程度,以严格的数学公理和公式推导为基础,能客观公正地分配属性权重。

2.1 基于优势关系的属性约简

定义 1^[18] 信息系统 (U, D, f) 中, $U = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ 为对象集, $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ 为属性集, $f: U \rightarrow D$ 为 U 到 D 的关系集。

定义 2^[18] 信息系统 (U, D, f) 中, 属性集 $V \subseteq D$ 。若 $\forall d_k \in V$, 有 $f_{d_k}(x_i) \leq f_{d_k}(x_j)$, 称 x_j 在属性集 V 上优于 x_i 。称 $Z_V^{\leq}(x_i) = \{x_j \mid f_{d_k}(x_i) \leq f_{d_k}(x_j), \forall d_k \in V\}$ 为 x_i 的优势集。

定义 3^[18] 信息系统 (U, D, f) 中, 属性集 V 的信息量为:

$$H(V) = \sum_{i=1}^{|U|} \frac{1}{|U|} \left(1 - \frac{|Z_V^{\leq}(x_i)|}{|U|} \right) \quad (11)$$

式中: $|M|$ 表示集合 M 中元素的个数。信息量不仅具备表征优势集不确定性的能力, 还能作为衡量属性重要程度的标准。

定义 4^[18] 信息系统 (U, D, f) 中, $V \subseteq D$ 。当 $H(V) = H(D)$ 且 $H(V - \{d\}) < H(D)$ ($\forall d \in D$) 时, 称 V 为 D 的约简集。由公式可得, $H(V) = H(D)$ 时, 有 $Z_V^{\leq}(x_i) = Z_D^{\leq}(x_i)$ 。

记 $S^<(x_i, x_j) = \{d_k \mid f_k(x_i) < f_k(x_j)\}$, 称 $Z = \{S^<(x_i, x_j) \mid S^<(x_i, x_j) \neq \emptyset, x_i, x_j \in U\}$ 为辨识矩阵。约简集 V 具有如下性质: $\forall S \in Z, V$ 满足 $V \cap S \neq \emptyset$ 。

利用以上性质, 可在信息量不变的情况下, 对属性集 D 进行约简, 得到约简集 V 。

2.2 基于 Shapley 值的权重分配

定义 5^[18] 对集合 $H = \{h_1, h_2, \dots, h_n\}$, 若任一子集 $G \subseteq H$ 都对应一个函数 $c(G) = \sum_{g_i \in G} H(\{g_i\}) - H(G)$ 。满足 $c(\emptyset) = 0, c(G_1 \cup G_2) \geq c(G_1) +$

$c(G_2)$ ($G_1 \cap G_2 = \emptyset$), 则称 $c(G)$ 为子集 G 的效益函数, 其中 c_{h_i} 为 H 的元素 h_i 对效益所作的贡献。记 Shapley 值为:

$$\varphi_{h_i}(c) = \sum_{G \in H_i} \frac{(n - |G|)! (|G| - 1)!}{n!} [c(G) - c(G \setminus h_i)] \quad (12)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, n$; H_i 是 H 所有包含 h_i 元素的子集; $G \setminus h_i$ 表示子集 G 中剔除了元素 h_i 。

根据式 (11) 可知, 损失信息量 $c(D) = \sum_{d_k \in D} H(\{d_k\}) - H(D)$ 满足效益的条件。在分析属

性集各属性的重要度时, 可将对联合信息量的分配转移到对损失信息量的分配。则 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ 中属性 d_k 的重要程度为 $H(\{d_k\}) - \varphi_{\{d_k\}}(c)$, 对得到的各属性的重要程度进行归一化, 即得各属性的权重大小。

3 基于 Shapley-TOPSIS 的辐射源威胁评估

为了解决现有辐射源威胁评估模型对先验知识依赖大、属性权重分配主观性强、时效性差等问题, 本文提出基于 Shapley-TOPSIS 的辐射源威胁评估模型, 引入 Shapley 值优势关系分配属性权重, 通过 TOPSIS 有效实现辐射源威胁评估。

Step1 基于目标集 (辐射源) 与属性集 (4 种辐射源参数) 的关系矩阵 T , 利用式 (1)~(2) 规范属性, 构建评判矩阵 P 。(关键是区分开参数中的收益型指标和成本型指标。)

Step2 基于关系矩阵 T , 利用优势关系对属性进行约简, 通过 Shapley 值确定属性的权重, 将所得的权重矩阵 W 与 **Step1** 的评判矩阵 P 结合, 更新评判矩阵为 P' 。

Step3 基于评判矩阵 P' , 根据式 (6)~(7) 确定模型的正理想解 P^+ 和负理想解 P^- 。

Step4 分别计算各辐射源目标与 P^+ 、 P^- 的距离 L_i^+ 和 L_i^- , 然后推出各辐射源目标的贴近度 L'_i 。最后, 按贴近度从大到小的顺序对辐射源目标进行威胁等级排序。

4 仿真验证

为验证基于 Shapley-TOPSIS 的辐射源威胁评估模型的有效性, 在侦察数据库选取 8 个辐射源的 4 种参数信息进行仿真验证。辐射源类型和距离参数可以通过己方雷达探测和数据链信息获得, 接近速度可以通过雷达和己方飞行参数获得, 脉冲重复间隔可以通过 ESM 接收机获得。具体参数见表 1。

表 1 辐射源参数信息

辐射源	a	b/km	$c/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$d/\mu\text{s}$
x_1	a_1	35	810	0
x_2	a_4	80	220	235.3
x_3	a_2	30	300	9.1
x_4	a_2	63.5	295	14.3
x_5	a_4	92.2	233	156.4
x_6	a_5	71.3	293	59.9
x_7	a_3	39.8	195	20.3
x_8	a_6	874.5	267	189.2

表 1 中 a 表示辐射源类型; b 表示距离; c 表示接近速度; d 表示脉冲重复间隔; $a_1 \sim a_6$ 依次表示弹载末制导雷达、机载火控类大、地面制导雷达、机载预警雷达、地面目标指示雷达、远程预警雷达。

对于定性指标 a (辐射源类型), 经询问领域专家后, 根据通常情况下 6 种不同类型雷达可能对我方构成的威胁程度大小, 分别将 $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ 赋值 6, 3, 4, 2, 5, 1 (赋值原则是: 大部分情况下, 造成的威胁程度越大, 赋值越大)。

首先构建目标集与属性集的关系矩阵 T 。

$$T = \begin{bmatrix} 6 & 35 & 810 & 0 \\ 2 & 80 & 220 & 235.3 \\ 3 & 30 & 300 & 9.1 \\ 3 & 63.5 & 295 & 14.3 \\ 2 & 92.2 & 233 & 156.4 \\ 5 & 71.3 & 293 & 59.9 \\ 4 & 39.8 & 195 & 20.3 \\ 1 & 874.5 & 267 & 189.2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

1) 辐射源类型。数值越大, 威胁程度越高。因此, 辐射源类型 a 属于收益型指标。

2) 距离是指评估的辐射源离我方接收系统的距离。通常情况下, 距离越近, 即 b 越小, 威胁程度越高。因此, 距离 b 属于成本型指标。

3) 接近速度是指辐射源载机相对我方接收系统的相向运动速度 (即逼近速度)。显然接近速度越大, 辐射源威胁程度越高。因此, 接近速度 c 属于效益型指标。

4) 脉冲重复间隔 (PRI) 是指辐射源发射的相邻 2 个脉冲之间的时间间隔, 与脉冲重复频率 (PRF) 互为倒数。通常情况下, PRF 值越大, 即 PRI 值越小, 辐射源测量精度越高, 威胁程度越高。因此, 脉冲重复间隔 PRI 属于成本型指标。

然后, 规范化关系矩阵 T , 得到评判矩阵 P 。

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0.994 & 1 & 1 & 1 \\ 0.2 & 0.940 & 8 & 0.040 & 7 & 0 \\ 0.4 & 1 & & 0.170 & 7 & 0.961 & 3 \\ 0.4 & 0.960 & 3 & 0.162 & 6 & 0.939 & 2 \\ 0.2 & 0.926 & 3 & 0.061 & 8 & 0.335 & 1 \\ 0.8 & 0.951 & 1 & 0.159 & 3 & 0.745 & 4 \\ 0.6 & 0.988 & 4 & 0 & & 0.913 & 7 \\ 0 & 0 & & 0.117 & 1 & 0.195 & 9 \end{bmatrix} \quad (14)$$

基于优势关系对关系矩阵 T 进行属性约简。

Step1 根据定义 4 及约简集的性质构建辨识矩阵 Z , 见表 2。

表 2 辨识矩阵

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
x_1	\emptyset	\emptyset	$\{b\}$	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset
x_2	$\{a, b, c, d\}$	\emptyset	$\{a, b, c, d\}$	$\{a, b, c, d\}$	$\{c, d\}$	$\{a, b, c, d\}$	$\{a, b, d\}$	$\{b, d\}$
x_3	$\{a, b, c, d\}$	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	$\{a\}$	$\{a, b\}$	\emptyset
x_4	$\{a, b, c, d\}$	\emptyset	$\{b, c, d\}$	\emptyset	\emptyset	$\{a\}$	$\{a, b\}$	\emptyset
x_5	$\{a, b, c, d\}$	$\{b\}$	$\{a, b, c, d\}$	$\{a, b, c, d\}$	\emptyset	$\{a, b, c, d\}$	$\{a, b, d\}$	$\{c\}$
x_6	$\{a, b, c, d\}$	\emptyset	$\{b, c, d\}$	$\{b, c, d\}$	\emptyset	\emptyset	$\{b, d\}$	\emptyset
x_7	$\{a, b, c, d\}$	$\{c\}$	$\{b, c, d\}$	$\{c, d\}$	$\{c\}$	$\{a, c\}$	\emptyset	$\{c\}$
x_8	$\{a, b, c, d\}$	$\{a, b\}$	$\{a, b, c, d\}$	$\{a, b, c, d\}$	$\{a, b, d\}$	$\{a, b, c, d\}$	$\{a, b, d\}$	\emptyset

Step2 列举出辨识矩阵 Z 中的所有非空元素: $\{a\}$ 、 $\{b\}$ 、 $\{c\}$ 、 $\{a, b\}$ 、 $\{a, c\}$ 、 $\{b, d\}$ 、 $\{c, d\}$ 、 $\{a, b, d\}$ 、 $\{b, c, d\}$ 、 $\{a, b, c, d\}$ 。

Step3 根据约简集的性质 (对 $\forall S \in Z, V \cap S \neq \emptyset$), 可得约简集 $V = \{a, b, c\}$ 。

然后, 基于 Shapley 值对约简集 V 中的 3 个属性进行权重分配。

根据表格, 可得 $[x_1]_V^{\leq} = \{x_1\}$ 、 $[x_2]_V^{\leq} = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_6\}$ 、 $[x_3]_V^{\leq} = \{x_3\}$ 、 $[x_4]_V^{\leq} = \{x_1, x_3, x_4\}$ 、

$[x_5]_V^{\leq} = \{x_1, x_3, x_4, x_5, x_6\}$ 、 $[x_6]_V^{\leq} = \{x_1, x_6\}$ 、 $[x_7]_V^{\leq} = \{x_1, x_7\}$ 、 $[x_8]_V^{\leq} = \{x_1, x_3, x_4, x_6, x_8\}$ 。

$$H(V) = \sum_{i=1}^{|U|} \frac{1}{|U|} \left(1 - \frac{|[x_i]_V^{\leq}|}{|U|} \right) = \frac{5}{8} \quad (15)$$

同理可得: $H(\{a\}) = \frac{26}{64}$ 、 $H(\{b\}) = \frac{28}{64}$ 、

$H(\{c\}) = \frac{28}{64}$ 、 $H(\{a, b\}) = \frac{33}{64}$ 、 $H(\{a, c\}) = \frac{37}{64}$ 、

$H(\{b, c\}) = \frac{38}{64}$ 。

根据 $c(D) = \sum_{d_k \in D} H(\{d_k\}) - H(D)$ 可以得出: $c(\emptyset) = 0, c(\{a\}) = 0, c(\{b\}) = 0, c(\{c\}) = 0,$
 $c(\{a, b\}) = \frac{21}{64}, c(\{a, c\}) = \frac{17}{64}, c(\{b, c\}) = \frac{18}{64}, c(V) = \frac{42}{64}。$

由式(12)可得: $\varphi_{\{a\}}(c) = \frac{41}{192}, \varphi_{\{b\}}(c) = \frac{89}{284},$
 $\varphi_{\{c\}}(c) = \frac{77}{384}。$

根据 $H(\{d_k\}) - \varphi_{\{d_k\}}(c)$ 可以得出: $H(\{a\}) - \varphi_{\{a\}}(c) = \frac{74}{384}, H(\{b\}) - \varphi_{\{b\}}(c) = \frac{79}{384}, H(\{c\}) - \varphi_{\{c\}}(c) = \frac{91}{384}。$ 对结果进行归一化, 可得: b, c, e 3 个属性对应的权重大小为: $\omega_a = 0.303\ 3, \omega_b = 0.323\ 8, \omega_c = 0.372\ 9。$ 权重矩阵为:

$$W = (0.333\ 4, 0.358\ 3, 0.308\ 3) \quad (16)$$

对评判矩阵 P 进行约简, 得到:

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0.994\ 1 & 1 \\ 0.2 & 0.940\ 8 & 0.040\ 7 \\ 0.4 & 1 & 0.170\ 7 \\ 0.4 & 0.960\ 3 & 0.162\ 6 \\ 0.2 & 0.926\ 3 & 0.061\ 8 \\ 0.8 & 0.951\ 1 & 0.159\ 3 \\ 0.6 & 0.988\ 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0.117\ 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

利用公式 $p'_{ij} = p_{ij} \times \omega_j$ 对约简后的评判矩阵和权重矩阵结合。得到更新后的评判矩阵 P' :

$$P' = \begin{bmatrix} 0.303\ 3 & 0.321\ 9 & 0.372\ 9 \\ 0.060\ 7 & 0.304\ 6 & 0.015\ 2 \\ 0.121\ 3 & 0.323\ 8 & 0.063\ 7 \\ 0.121\ 3 & 0.311\ 0 & 0.060\ 6 \\ 0.060\ 7 & 0.300\ 0 & 0.023\ 0 \\ 0.242\ 6 & 0.308\ 0 & 0.059\ 4 \\ 0.182\ 0 & 0.320\ 0 & 0.000\ 0 \\ 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.043\ 7 \end{bmatrix} \quad (18)$$

根据式(6)~(7)计算模型的正理想解 P^+ 和负理想解 P^- 如下:

$$P^+ = \{ \max_{1 \leq i \leq 5} p_{ij} \} = \{ 0.303\ 3, 0.323\ 8, 0.372\ 9 \} \quad (19)$$

$$P^- = \{ \min_{1 \leq i \leq 5} p_{ij} \} = \{ 0, 0, 0 \} \quad (20)$$

根据式(8)~(9)计算各雷达辐射源与正、负理想解的相对距离如下:

$$L_1^+ = 0.001\ 9, L_1^- = 0.578\ 5 \quad (21)$$

$$L_2^+ = 0.429\ 1, L_2^- = 0.311\ 0 \quad (22)$$

$$L_3^+ = 0.358\ 8, L_3^- = 0.351\ 6 \quad (23)$$

$$L_4^+ = 0.361\ 7, L_4^- = 0.339\ 3 \quad (24)$$

$$L_5^+ = 0.426\ 4, L_5^- = 0.306\ 9 \quad (25)$$

$$L_6^+ = 0.319\ 7, L_6^- = 0.396\ 5 \quad (26)$$

$$L_7^+ = 0.392\ 2, L_7^- = 0.368\ 1 \quad (27)$$

$$L_8^+ = 0.552\ 5, L_8^- = 0.043\ 7 \quad (28)$$

根据式(10)计算各辐射源的贴适度如下:

$$L'_1 = 0.996\ 7, L'_2 = 0.420\ 2, L'_3 = 0.494\ 9, L'_4 = 0.484\ 0, L'_5 = 0.418\ 5, L'_6 = 0.553\ 6, L'_7 = 0.484\ 2, L'_8 = 0.073\ 3。$$

根据贴适度的大小, 可对 5 个雷达辐射源进行威胁等级排序: $x_1 > x_6 > x_3 > x_7 > x_4 > x_2 > x_5 > x_8。$

根据参数信息表, 分析如下: 辐射源 x_1 是弹载末制导雷达, 接近速度最大, 且脉冲重复间隔最小, 正不断逼近我方的概率较高, 威胁程度最大; 辐射源 x_6 是地面目标指示雷达, 且脉冲重复间隔较小, 威胁程度仅次于 x_1 ; 辐射源 x_3 是机载火控雷达, 距离我方接收机最近, 接近速度仅次于 x_1 , 因此威胁程度次于 x_1, x_3 , 高于其他辐射源; 辐射源 x_7 是地面制导雷达, 距离我方较近, 且脉冲重复间隔非常小, 因此可大致判断出威胁程度大于其他辐射源; 辐射源 x_4 是机载火控雷达, 与辐射源 x_2, x_5, x_8 相比, 脉冲重复间隔最小, 因此威胁程度高于 x_2, x_5, x_8 ; 辐射源 x_2, x_5 均为机载预警雷达, 两者接近速度相近, x_2 的距离较近, 但是脉冲重复间隔较大, 所以二者的威胁程度判断存在模糊; 辐射源 x_8 是远程预警雷达, 距离最远, 通常情况下对我方没有绝对的威胁, 威胁程度最低。综上所述, 分析可得辐射源威胁程度排序为: $x_1 > x_6 > x_3 > x_7 > x_4 > x_2 > x_5 > x_8,$ 与实验结果吻合。

为体现本文算法的有效性和优越性, 引入基于专家系统赋值的 TOPSIS 模型对获取的辐射源数据信息进行威胁评估。采用基于专家系统赋值的 TOPSIS 模型得出的辐射源威胁程度大小排序为: $x_1 > x_6 > x_3 > x_4 > x_7 > x_5 > x_2 > x_8。$ 通过对比可看出, 对于辐射源 x_4, x_7 , 基于专家系统赋值的 TOPSIS 模型得出的结论是 $x_4 > x_7$, 而辐射源 x_7 是地面制导雷达, 距离我方较近, 且脉冲重复间隔非常小, 威胁程度大于辐射源 x_4 , 两者的威胁程度大小关系应为 $x_7 > x_4$, 与本文算法所得结论吻合。对于辐射源 x_2, x_5 , 基于专家系统赋值的 TOPSIS 模型得出的结论是 $x_5 > x_2$, 两者均为机载预警雷达, 辐射源 x_2 相对我方的距离更小, 威胁程度更高, 两者的威胁程度大小关系应为 $x_2 > x_5$, 与本文算法所得结论吻合。

通过 2 种算法评估结果的对比, 可以看出本文所提算法的有效性, 且对于威胁程度相近的辐射源,

本文所提算法相较于基于专家系统赋值的 TOPSIS 模型更加准确和贴近实际,原因是本文属性权重确定方法不依赖于专家经验和主观意向。而且本文所提算法对侦收到的辐射源属性进行了约简,缩短了评估时间,提高了评估时效性,更适用于复杂多变、对时效性要求较高的战场环境。

5 结论

1)针对传统权重确定法主观性强、依赖先验知识等缺陷,将基于 Shapley 值的优势关系粗糙集客观权重分配法应用到基于 TOPSIS 的辐射源威胁评估中。充分发挥处理不完备性、不确定性数据的能力,另外,较强的数学公理使得权重分配更加客观。

2)提出一种基于 Shapley-TOPSIS 的辐射源威胁评估模型,实现了对辐射源的威胁程度排序,计算过程清晰。通过与其他模型所得结论对比,本文模型的实验结论准确度更高,证明了所提模型的有效性和优越性。

3)本文用于威胁评估的指标仍然较少,实际辐射源威胁评估过程中情况更加复杂多变,后续需要建立更完整的属性集。

参考文献

- [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.
- [2] 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(2): 4127-4139.
- [3] 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.
- [4] MA S D, ZHANG H Z, 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.
- [5] 张莹,王红卫,郭晓陶,等. IFS-BN 结合的辐射源威胁评估方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(1): 63-68.
- [6] 吕鹏程,王星,周东青,等. 基于熵权的灰色关联辐射源威胁评估[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2016, 17(6): 58-63.
- [7] 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.
- [8] 陈侠,刘子龙. 基于粒子群优化模糊小波网络的目标威胁评估[J]. 电光与控制, 2019, 26(3): 30-34,111.
- [9] 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.
- [10] 井胜勇. 一种基于改进支持向量机的目标威胁估计方法[J]. 舰船电子工程, 2018, 38(1): 29-32,76.
- [11] 郝英好,张永利,雷川,等. 基于组合赋权-TOPSIS 法的空中目标威胁评估仿真[J]. 战术导弹技术, 2015 (5): 104-108.
- [12] GUO H, XU H J, LIU L. Threat Assessment for Air Combat Target Based on Interval TOPSIS[J]. Systems Engineering & Electronics, 2009, 31 (12): 2914-2917.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] ZENG S Z, XIAO Y. Topsis Method for Intuitionistic Fuzzy Multiple-Criteria Decision Making and Its Application to Investment Selection[J]. Kybernetes, 2016, 45(2): 282-296.
- [16] GU T, REN P Y, JIN M Z, et al. Tourism Destination Competitiveness Evaluation in Sichuan Province Using TOPSIS Model Based on Information Entropy Weight[J]. Discrete and Continuous Dynamical Systems-Series S, 2019, 12(4-5): 771-782.
- [17] CAMBAZOGLU S, YAL G P, EKER A M, et al. Geothermal Resource Assessment of the Gediz Graben Utilizing TOPSIS Methodology [J]. Geothermics, 2019, 80: 92-102.
- [18] 索中英,程嗣怡,韩小妹. 基于 Shapley 值的优势关系粗糙集客观权重分配方法及应用[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2016, 17(5): 100-105.

(编辑:徐楠楠)