

文章编号: 2095-4980(2025)03-0247-09

基于博弈论的主客观综合权重威胁等级识别

张连炜¹, 李文博¹, 张立东², 董春曦¹, 董阳阳¹

(1. 西安电子科技大学 电子工程学院, 陕西 西安 710071; 2. 中国人民解放军 93209 部队, 北京 100085)

摘 要: 辐射源威胁等级识别是干扰资源分配的重要依据, 目前工程上常用的威胁等级判断方法, 只考虑单一的方法进行指标赋权, 具有较强的主观因素, 得出的结果往往不具备合理性。针对以上问题, 提出一种基于博弈论的主客观综合权重威胁等级识别方法。该方法利用载频、脉冲宽度、脉冲重复周期和占空比 4 个威胁指标建立相应的隶属度函数, 利用博弈论的思想将层析分析法和熵值法的权重相结合得到综合权重; 将权重与隶属度相结合得到威胁等级识别结果。本文对多环境战场的雷达辐射源参数进行了分析, 结果表明, 使用基于博弈论的威胁等级评判方法相比于只使用单一的评判方法能够提供更加合理的结果, 达到了对多辐射源场景的良好识别。

关键词: 隶属度模型; 威胁等级判定; 博弈论; 综合权重

中图分类号: TN974

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023260

Threat grade identification of subjective and objective comprehensive weights based on game theory

ZHANG Lianwei¹, LI Wenbo¹, ZHANG Lidong², DONG Chunxi¹, DONG Yangyang¹

(1.School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an Shaanxi 710071, China;

2.The 93209 Unit of People's Liberation Army, Beijing 100085, China)

Abstract: The identification of radiation source threat level is an important basis for interference resource allocation. Currently, the commonly used threat level judgment methods in engineering only consider a single method for indicator weighting, which has strong subjective factors and often results in unreasonable results. In response to the above issues, this article proposes a subjective and objective comprehensive weight threat level identification method based on game theory. This method utilizes four threat indicators, namely carrier frequency, pulse width, pulse repetition period and duty cycle, to establish corresponding membership functions. Using the ideas of game theory, the weights obtained from tomography analysis and entropy method are combined to obtain comprehensive weights; combining weight with membership degree, the threat level recognition results are obtained. This article analyzes the parameters of radar radiation sources in multi-environment battlefields, and the results show that using a threat level evaluation method based on game theory can provide more reasonable results compared to using only a single evaluation method, achieving good recognition results for multi-radiation source scenes.

Keywords: membership model; threat level determination; game theory; comprehensive weight

在现代复杂电磁环境下, 如何对雷达威胁等级进行可靠识别成为电子战领域的关键一环, 可为后续的干扰决策提供可靠信息支撑。目前, 工程上现有的威胁等级判定方式较为单一, 不能合理地识别出威胁等级。

针对上述问题, 国内领域已有许多相关研究。文献[1]建立随机森林模型, 通过计算模型中指标与威胁值的相关性确定指标权重, 然后构建基于理想解相似性排序法(Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution-Rank Sum Ratio, TOPSIS-RAR)的威胁等级评估模型。文献[2]提出一种基于层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)的目标威胁等级评估方法, 利用 AHP 求出权重因子, 对威胁等级进行排序, 并实时更

收稿日期: 2023-09-14; 修回日期: 2023-11-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61901332)

新。文献[3]建立隶属度函数,通过组合赋权法确定权重,引入理想解相似度排序法(TOPSIS)算法计算各辐射源威胁相对于理想解的距离值,以此作为综合效用值对其进行排序。文献[4]通过层次分析法和熵值法获得了各威胁指标的主观和客观权重,用综合赋权法融合了主客观权重。文献[5]在现有 AHP 法的基础上进行一定的改进,融入聚类分析的思想,提出一种基于改进 AHP 法的雷达威胁等级判定的新方法。文献[6]分析确定告警目标威胁因子隶属度函数模型,使用模糊层次分析法和灰色关联度分析法建立联合判定模型。

本文针对多体制雷达威胁等级评估问题,首先采用模糊数学建立威胁评估因子的隶属度模型,并利用博弈论的思想将层析分析法和熵值法得出的权重相结合得到综合权重;最后将权重与隶属度相结合得到威胁度,并依据雷达威胁等级划分规则,得到对该威胁度所属的威胁等级的识别结果。

1 威胁评估因子隶属度模型

在雷达辐射源的众多技术参数中,用于威胁等级判定的参数为脉冲载频(Pulse Carrier Frequency, PCF)、脉冲宽度(Pulse Width, PW)、脉冲重复周期(Pulse Repetition Interval, PRI)和占空比(Duty Ratio, DR)^[7],依次记为 T_1 、 T_2 、 T_3 和 T_4 。本文选取的 4 个威胁指标利用模糊数学中的隶属程度,建立相应的隶属度函数。

1.1 脉冲载频隶属度模型

通常,雷达辐射源发射的脉冲信号的载频范围为 3 MHz~300 GHz,其中,绝大多数雷达辐射源脉冲载频集中在 L、S、C、X、Ku 波段。

脉冲多普勒雷达辐射源通常多工作在 Ku 或 X 频段,属于精密火控跟踪雷达,探测精确度高,威胁等级最高,因此,可将工作在 Ku 或 X 频段的雷达辐射源威胁隶属度取值为 1;雷达辐射源工作在 S 或 C 频段时,大多数情况下处于探测搜索,少数情况下属于火控制导,威胁程度比较大,因此可将工作在 S 或 C 频段的雷达辐射源威胁隶属度取值为 0.7;雷达辐射源工作在 L 频段时,属于探测预警,威胁程度相对较小,因此,可将工作在 L 频段的雷达辐射源威胁隶属度取值为 0.4;由于雷达辐射源工作在其他频段的情况相对较少,因此,其隶属度取值为 0.2^[4]。根据上述内容,可得雷达辐射源脉冲载频隶属度函数:

$$u(T_1) = \begin{cases} 1.0, & \text{Ku, X} \\ 0.7, & \text{S, C} \\ 0.4, & \text{L} \\ 0.2, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

1.2 脉冲宽度隶属度模型

通常,雷达辐射源脉冲宽度的取值范围为 0.1~200 μs ,脉冲宽度越窄,测距精确度越高,威胁程度越高,故精密跟踪雷达常采用窄脉冲。

雷达辐射源脉冲宽度大于 200 μs 时,属于远程搜索,其威胁等级较低,因此,可将雷达辐射源脉冲宽度大于 200 μs 时的威胁隶属度取值为 0;当雷达辐射源脉冲宽度处于 0~200 μs 时,可将其再次划分为 0~0.1 μs 和 0.1~200 μs 。其中,雷达辐射源脉冲宽度处于 0~0.1 μs 时,大多数情况下用于精确跟踪瞄准,对目标的威胁等级最高,因此,可将雷达辐射源脉冲宽度小于 0.1 μs 时的威胁隶属度取值为 1;雷达辐射源脉冲宽度处于 0.1~200 μs 时,属于中远程搜索、跟踪,且脉冲宽度会随着作战任务的不同而自适应调整,但整体趋势服从脉冲越窄,威胁等级越高的原则。为较好地描述此范围下雷达脉冲宽度与威胁等级取值之间的关系,用式(2)进行描述:

$$u(T_2) = 1 - \left[k(T_2 - 0.1)/0.1 \right] \quad (2)$$

式中 k 为常数,本文取值为 0.000 5。

综上所述,雷达辐射源脉冲宽度隶属度函数为:

$$u(T_2) = \begin{cases} 0, & T_2 > 200 \mu\text{s} \\ 1 - \left[k(T_2 - 0.1)/0.1 \right], & 0.1 \mu\text{s} \leq T_2 \leq 200 \mu\text{s} \\ 1, & T_2 < 0.1 \mu\text{s} \end{cases} \quad (3)$$

1.3 脉冲重复周期隶属度模型

通常,雷达辐射源的脉冲重复周期的大致范围为 100~10 000 μs ,脉冲重复周期越小,威胁等级越高,对目标

的威胁程度越大。

雷达辐射源脉冲重复周期小于100 μs 时,大多数情况下处于火控制导、跟踪搜索,对目标威胁最大,威胁等级最高,因此,雷达辐射源脉冲重复周期小于100 μs 的威胁隶属度取值为1。雷达辐射源脉冲重复周期处于100~250 μs 时,属于跟踪搜索,对目标威胁较大,威胁等级较大;雷达辐射源脉冲重复周期处于250~1 250 μs 时,大多数属于中程搜索,对目标威胁一般,威胁等级小;当雷达辐射源脉冲重复周期处于1 250~4 000 μs 时,属于中远程搜索,对目标威胁较小,威胁等级不高;当雷达辐射源脉冲重复周期大于4 000 μs 时,属于远程搜索,对目标威胁很小,威胁等级较低。同样,由于雷达辐射源脉冲重复周期的上限一般设定为10 000 μs ,因此,本文将雷达辐射源大于10 000 μs 的威胁隶属度取值为0。为较充分地描述雷达辐射源脉冲重复周期处于100~10 000 μs 区间内,与其威胁隶属度取值之间的映射关系,采用式(4)进行描述:

$$u(T_3) = \exp \left[-\frac{k'(T_3 - T_3^1)}{(T_3^2 - T_3^1)} \right] \quad (4)$$

式中: T_3^1 为雷达辐射源的脉冲重复周期下限,本文取值100; T_3^2 为雷达辐射源的脉冲重复周期上限,本文取值为10 000; k' 为常数,本文取值为0.97。

综上所述,雷达辐射源脉冲重复周期的隶属度函数为:

$$u(T_3) = \begin{cases} 0, & T_3 > 10\,000\ \mu\text{s} \\ \exp \left[-\frac{k'(T_3 - T_3^1)}{(T_3^2 - T_3^1)} \right], & 100\ \mu\text{s} \leq T_3 \leq 10\,000\ \mu\text{s} \\ 1, & T_3 < 100\ \mu\text{s} \end{cases} \quad (5)$$

1.4 脉冲占空比隶属度模型

通常,将雷达辐射源脉冲宽度与脉冲重复周期的比值定义为雷达辐射源的占空比(D)。对占空比进行深入分析可得,其取值范围与雷达辐射源威胁等级划分之间存在一定的映射关系。具体的映射规律可以概括为:雷达辐射源占空比越大,其威胁等级越高,对目标的威胁程度越大;反之,雷达辐射源占空比越小,其威胁等级越低,对目标的威胁程度越小。总之,雷达辐射源占空比与雷达威胁等级之间在数值上呈正比关系。同时,雷达辐射源占空比与雷达工作模式之间也存在一定的映射关系。在只考虑搜索、跟踪、制导模式情况下,雷达辐射源占空比与工作模式之间的映射规律可大致概括为:搜索模式下,雷达辐射源占空比较低,其威胁等级也相对较低;跟踪模式下,雷达辐射源占空比较高,其威胁等级也相对较高;制导模式下,雷达辐射源占空比最高,其威胁等级也相对最高。上述对占空比与工作模式的分析,进一步印证了雷达辐射源占空比因子作为雷达威胁评估因子的可靠性。

综上所述,本文依据真实电磁环境下,不同工作模式情况下雷达占空比变化范围,对雷达威胁等级区间进行划分,不同区间内的威胁因子隶属度取值不同,具体描述为:

$$u(T_4) = \begin{cases} 1.00, & T_4 \geq 25\% \\ 0.75, & 15\% \leq T_4 < 25\% \\ 0.50, & 5\% \leq T_4 < 15\% \\ 0.25, & T_4 < 5\% \end{cases} \quad (6)$$

2 威胁评估因子权重确定

不同威胁指标在辐射源威胁等级评定过程中存在着客观差别,弥补这些差别的方法是规定不同指标在威胁等级判定中的权重。

目前确定指标权重的方法主要有两类:第一类为主观赋权法,如专家调查法、层次分析法和Delphi法;第二类为客观赋权法,如因子分析法、熵值法和重要性排序法,两种方法各有优缺点。为兼顾专家对威胁指标重要的经验认知和战场环境提供的威胁指标重要性的客观信息,本文采用层次分析法获得各威胁因子的主观权重,采用熵值法获得各威胁因子的客观权重,最后采用基于博弈论的综合赋权法对主客观权重进行融合,确定各威胁指标的综合权重。

2.1 基于最优传递矩阵的层次分析法主客观权重确定

层次分析法是将与决策有关的指标分解成目标、准则、方案等层次，并在此基础上进行定性和定量分析的方法。从应用角度讲，根据雷达辐射源目标层次结构进行分解，对雷达辐射源参数进行两两判断建立判断矩阵，并对判断矩阵进行一致性检验，确定各层次中各元素的权重，最后综合各权重，得到目标决策评价^[7]，对 4 个雷达威胁评估因子构建层次，如图 1 所示。

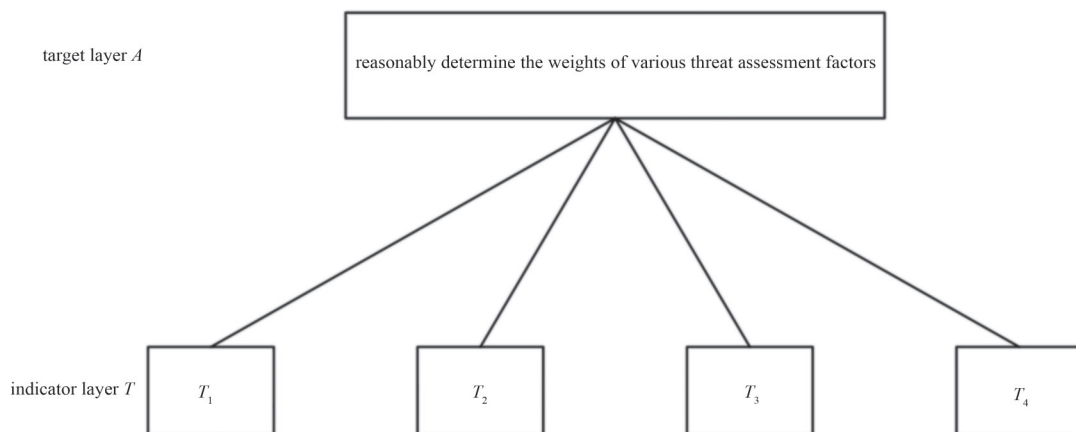


Fig.1 Hierarchy chart of evaluation factor weights
图 1 评估因子权重的层次结构图

根据上下层次之间的元素确立递阶层次结构后，按表 1 所示的标度含义对指标层 T 的元素 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 根据一定准则进行两两重要性判断(记为 a_{ij})，构建判断矩阵。

表 1 标度含义
Table1 Scale meaning

quantizer	pairwise comparison of importance levels
1	indicates that two elements have equal importance compared to each other
3	the former is slightly more important than the latter
5	the former is significantly more important than the latter
7	the former is more important than the latter
9	the former is extremely important compared to the latter
2,4,6,8	the intermediate value represents the adjacent judgment mentioned above
reciprocal	if the ratio of importance between the former and the latter is $a_{ij} (= 3)$; the ratio of importance between the latter and the former is $a_{ji} (= 1/3)$

根据表 1 所示的九标度法，结合专家先验知识，可构建得到如式(7)所示的雷达辐射源威胁评估因子两两之间重要性比较的判断矩阵。

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中 a_{mn} 表示威胁指标 m 较威胁评估因子 n 的重要性之比，且满足 a_{mn} 和 a_{nm} 互为倒数； a_{mn} 取值为 1 时，表示 2 个威胁评估因子同等重要。

本文采用拟优一致矩阵替换判断矩阵，对传统层次分析法进行改进^[8]。

步骤 1：建立雷达辐射源威胁评估因子权重的层次结构模型；

步骤 2：依据九标度法，结合专家先验知识，构建威胁评估因子两两之间重要性比较的判断矩阵 A ；

步骤 3：依据判断矩阵 A ，构建判断矩阵 B ，其中 $b_{mn} = \lg a_{mn}$ ；

步骤 4：计算矩阵 B 的最小偏差传递矩阵 C ：

$$c_{mn} = \frac{1}{4} \sum_{x=1}^4 (b_{mx} - b_{nx}) \quad (8)$$

步骤5：求判断矩阵 B 的拟优一致矩阵 A^* ：

$$A^* = 10^C \quad (9)$$

步骤6：利用方根法，求取矩阵 A^* 的最大特征值的特征向量，即：

$$w'_m = \sqrt[4]{\prod_{n=1}^4 a_{mn}^*} \quad (10)$$

步骤7：归一化处理，即可得到雷达辐射源威胁评估因子的主客观权重。即：

$$W' = [w'_1, w'_2, w'_3, w'_4]^T, \sum_{i=1}^4 w'_i = 1 \quad (11)$$

2.2 基于熵值法的威胁评估因子客观权重确定

本文采用熵值法，利用雷达辐射源威胁评估因子隶属度函数获取的隶属度矩阵，计算各雷达辐射源威胁评估因子的客观权重。其具体流程如下^[9]：

步骤1：依据雷达辐射源特征参数变化范围与雷达辐射源威胁等级划分规则之间的映射关系，构建雷达辐射源威胁评估因子隶属度函数模型；

步骤2：根据构建的雷达辐射源威胁评估因子隶属度函数模型，获取当前时间片内所有雷达辐射源的威胁评估因子隶属度函数值，构成隶属度矩阵 $L = (l_{it})_{k \times 4}$ ，其中， k 为当前时间片内雷达辐射源的数量；

步骤3：计算第 t 个威胁评估因子下第 k 部雷达辐射源占该威胁评估因子的比重：

$$p_{it} = \frac{l_{it}}{\sum_{i=1}^k l_{it}} \quad (12)$$

式中： t 为雷达辐射源威胁评估因子， $t=1,2,3,4$ ； i 为雷达辐射源编号， $i=1,2,\dots,k$ 。

步骤4：计算第 t 个威胁评估因子的熵值：

$$f_t = -\frac{1}{\ln k} \sum_{i=1}^k p_{it} \ln p_{it} \quad (13)$$

步骤5：计算雷达辐射源威胁评估因子 $T_i(t=1,2,3,4)$ 的客观权重，即：

$$w_t'' = \frac{(1-f_t)}{\sum_{t'=1}^4 (1-f_{t'})}, \quad t'=1,2,3,4 \quad (14)$$

2.3 基于博弈论的综合权重确定

对于多指标综合评价问题，指标权重起着决定性的作用。指标相同而选用的权重不同，可能会得出完全不同的评价结果，合理地确定指标权重是提高综合评价质量的前提。传统的确定评价指标权重的方法主要有层次分析法、熵值法、专家调查法、简单关联函数法等。通常采用某一种方法对评价指标赋权时，不是存在较大的主观因素的影响，就是没有考虑指标本身的问题重要性的差异。实际上，指标因素的重要性程度是客观存在的，并受到决策者主观意愿的影响，只有将主客观权重综合一起考虑才能完全反映评价指标的重要性程度。鉴于此，本文采用基于博弈论的综合赋权法，将由层次分析法确定的主观权重与由熵值法确定的客观权重相结合，得到雷达辐射源威胁评估因子的综合权重。这种方法体现了主客观权重确定方法之间既相互竞争，又协调一致的思想，能够客观、全面、科学地解决指标权重的问题。具体算法如下^[10-15]：

对于多指标评价问题，假设采用 L 种方法得到指标的权重向量为：

$$\omega_k = (\omega_{k1}, \omega_{k2}, \dots, \omega_{kn}), \quad k = (1, 2, \dots, L) \quad (15)$$

由此可得到一个基本的权重集 ω ， L 种权重向量的线性组合为：

$$\omega = \sum_{k=1}^L \alpha_k \omega_k^T \quad (16)$$

为选择出最满意的权重向量 ω^* ，需对线性组合系数 α_k 进行优化，使 ω 与每个 ω_k 的离差极小化。由此，可导出对策模型如下：

$$\min \left\| \sum_{k=1}^L \alpha_k \omega_k^T - \omega_k \right\|, k = (1, 2, \dots, L) \quad (17)$$

根据矩阵的微分性质, 可导出式(17)的最优化一阶导数条件为:

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \cdot \omega_1^T & \omega_1 \cdot \omega_2^T & \cdots & \omega_1 \cdot \omega_l^T \\ \omega_2 \cdot \omega_1^T & \omega_2 \cdot \omega_2^T & \cdots & \omega_2 \cdot \omega_l^T \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \omega_l \cdot \omega_1^T & \omega_l \cdot \omega_2^T & \cdots & \omega_l \cdot \omega_l^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_1 \cdot \omega_1^T \\ \omega_2 \cdot \omega_2^T \\ \vdots \\ \omega_l \cdot \omega_l^T \end{bmatrix} \quad (18)$$

由式(18)可求得 $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_l)$, 然后对其进行归一化处理, 即可得到综合权重向量 ω^* :

$$\alpha_k^* = \alpha_k / \sum_{k=1}^L \alpha_k \quad (19)$$

$$\omega^* = \sum_{k=1}^L \alpha_k^* \cdot \omega_k^T \quad (20)$$

基于博弈论的综合权重计算流程的详细步骤如下:

步骤1: 基于雷达辐射源威胁评估因子赋值规则, 获取雷达辐射源威胁评估因子主观权重 W_z 和客观权重 W_k 。

步骤2: 构建主客观综合权重向量 $W = [W_z \ W_k]$, 随机线性组合权重为:

$$W = \alpha_z W_z + \alpha_k W_k \quad (21)$$

式中 α_z 和 α_k 分别为主观权重和客观权重的系数。

步骤3: 根据博弈论^[14-16], 博弈过程的均衡通过对 α_z 和 α_k 的优化实现:

$$\min \left\| \sum_{j \in \{z, k\}} \alpha_j W_j - W_i \right\|, \quad i \in \{z, k\} \quad (22)$$

将其转化为线性方程为:

$$\begin{bmatrix} W_z W_z^T & W_z W_k^T \\ W_k W_z^T & W_k W_k^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_z \\ \alpha_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_z W_z^T \\ W_k W_k^T \end{bmatrix} \quad (23)$$

对式(23)求解, 可获取主观权重的系数 α_z 和客观权重的系数 α_k 。

步骤4: 将主观权重的系数 α_z 和客观权重的系数 α_k 进行归一化处理可得 α_z^Δ 和 α_k^Δ :

$$\alpha_z^\Delta = \frac{\alpha_z}{\alpha_z + \alpha_k} \quad (24)$$

$$\alpha_k^\Delta = \frac{\alpha_k}{\alpha_z + \alpha_k} \quad (25)$$

步骤5: 将归一化后的权重系数 α_z^Δ 和 α_k^Δ 代入随机线性组合权重表达式, 计算综合权重 W :

$$W = \alpha_z^\Delta W_z^T + \alpha_k^\Delta W_k^T \quad (26)$$

2.4 雷达辐射源威胁等级识别

设雷达辐射源各威胁评估因子的隶属度为 $L(l_i)_{1 \times 4}$, 将其与综合威胁评估因子权重 W 相乘, 便可得到该部雷达辐射源的综合威胁度 Z , 即:

$$Z = LW = \sum_{i=1}^4 (l_i \cdot w_i) \quad (27)$$

由分析可得, 不同辐射源的威胁程度差别较大, 如火控雷达比警戒雷达威胁大, 处于跟踪状态时的威胁程度大于处于搜索状态时的威胁程度。辐射源的参数与辐射源的威胁程度有着密切的关系。本文结合大量实际雷达辐射源威胁等级识别测试经验, 将威胁等级级别分为4级, 分别为最高威胁、高威胁、一般威胁和无威胁。

综上所述, 可得雷达辐射源威胁等级识别函数为^[4]:

$$R = \begin{cases} (0.792, 1.000], & \text{最高威胁} \\ (0.655, 0.792], & \text{高威胁} \\ (0.421, 0.655], & \text{一般威胁} \\ (0.000, 0.421], & \text{无威胁} \end{cases} \quad (28)$$

将综合威胁度 Z 与雷达辐射源威胁等级识别函数 R 对比, 便可获取指定辐射源的威胁等级。

3 仿真分析

本文构建了多环境战场下的模拟仿真, 其辐射源参数如表2所示。

表2 辐射源参数表

Table2 Radiation source parameters

radiation source	PCF/MHz	PW/ μ s	PRI/ μ s	D	state
a certain airborne early warning radar	435	13.0	300	0.043 3	search
a certain space detection phased array radar	435	4.0	287	0.013 9	search
a certain air surveillance radar	2 000	125.0	3 600	0.034 7	search
a certain air surveillance radar	1 400	51.2	1 230	0.041 6	search
a certain guided phased array radar	5 259	20.0	625	0.032 0	track
a certain Doppler shipborne fire control radar	9 500	10.0	333	0.030 0	track

分析比较4个威胁评估因子的重要程度, 给各个元素的重要性打分, 利用判断矩阵的构造公式, 对两两因素分值进行比较, 可得到判断矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \frac{8}{5} & \frac{8}{7} & \frac{8}{3} \\ \frac{5}{8} & 1 & \frac{5}{7} & \frac{5}{3} \\ \frac{7}{8} & \frac{7}{5} & 1 & \frac{7}{3} \\ \frac{3}{8} & \frac{3}{5} & \frac{3}{7} & 1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

由式(8)~(9)可得出 A 的拟优一致矩阵 A^* 为:

$$A^* = \begin{bmatrix} 1 & 1.6 & 1.143 & 2.6667 \\ 0.625 & 1 & 0.0714 & 1.6667 \\ 0.875 & 1.4 & 1 & 2.3333 \\ 0.375 & 0.6 & 0.4286 & 1 \end{bmatrix} \quad (30)$$

由式(10)~(12)可得主观权重为:

$$W_z = [0.3478 \quad 0.2174 \quad 0.3044 \quad 0.1304] \quad (31)$$

由式(12)~式(14)可得客观权重为:

$$W_k = [0.3127 \quad 0.3437 \quad 0.3116 \quad 0.032] \quad (32)$$

根据式(23)可得 $\alpha_z = -0.194 1$, $\alpha_k = 1.174 6$, 由式(24)~(25)可得 $\alpha_z^\Delta = -0.197 9$, $\alpha_k^\Delta = 1.197 9$, 最终由式(26)可得综合权重, 如表3所示。仅用主观层次法获得的结果如表4所示。

表3 隶属度及威胁度评判表

Table3 Membership and threat evaluation

radiation source	RF/MHz	PW/ μ s	PRI/ μ s	D	threat value	threat level
a certain airborne early warning radar	0.2	0.935 5	0.980 6	0.25	0.716 2	high threat
a certain space detection phased array radar	0.2	0.980 5	0.981 8	0.25	0.733 1	high threat
a certain air surveillance radar	0.7	0.375 5	0.709 7	0.25	0.577 8	general threats
a certain air surveillance radar	0.4	0.744 5	0.895 2	0.25	0.680 1	high threat
a certain guided phased array radar	0.7	0.900 5	0.949 9	0.25	0.846 5	the highest threat
a certain Doppler shipborne fire control radar	1	0.950 5	0.977 4	0.25	0.965 3	the highest threat

通过对比辐射源参数表与隶属度及威胁度评判表可知, 基于博弈论的主客观综合权重威胁等级识别结果符合现实情况, 跟踪状态威胁等级大于搜索状态, 火控雷达及反导雷达威胁等级大于预警雷达。当仅用主观层次法进行威胁等级评判时, 因决策者的主观因素影响较大, 易造成威胁等级评判不准的情况, 如某制导相控阵雷

达，合理的评判结果为最高威胁等级，仅使用主观层次法判定等级为高等级。

表 4 基于主观层次法的威胁等级评判表

Table4 Threat level evaluation table based on subjective hierarchy process

radiation source	hierarchy threat value	threat level
a certain airborne early warning radar	0.604 0	general threats
a certain space detection phased array radar	0.614 2	general threats
a certain air surveillance radar	0.573 7	general threats
a certain air surveillance radar	0.606 1	general threats
a certain guided phased array radar	0.761 0	high threat
a certain Doppler shipborne fire control radar	0.884 6	the highest threat

4 结论

本文针对现有的威胁等级评判方式较为单一的问题，提出了基于博弈论的主客观综合权重威胁等级识别方法。该方法在建立了威胁评估因子隶属度模型后，将基于博弈论的主客观权重融合作为综合权重，既考虑了专家可以根据实际问题和先验知识给出一个较为合理的主观权重，又考虑了各个数据之间的关联来确定权值，最后基于博弈论的思想得到客观、全面、科学的权重。分析结果表明，本文提出的基于博弈论的主客观综合权重威胁等级识别能够对辐射源威胁等级做出合理判定，能够满足实际战场的应用需求。

参考文献：

- [1] 霍润泽,曹泽阳,李威. 基于随机森林赋权和 TOPSIS-RSR 的目标威胁等级评估[J]. 空军工程大学学报, 2023,24(1): 82–88. (HUO Runze,CAO Zeyang,LI Wei. Target threat level assessment based on random forest empowerment and TOPSIS-RSR[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023,24(1):82–88.) doi:10.3969/j.issn.2097–1915.2023.01.012.
- [2] 丁磊,王睿家,范涌高. 一种基于 AHP 的电磁目标威胁评估方法[J]. 航天电子对抗, 2022,38(2):47–52. (DING Lei, WANG Ruijia,FAN Yonggao. A target threat level evaluation method based on the AHP[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2022,38(2):47–52.) doi:10.3969/j.issn.1673–2421.2022.02.010.
- [3] 兰春艳,刘益辰,杨格. 基于 TOPSIS 的辐射源威胁等级排序方法[J]. 舰船电子对抗, 2020,43(6):87–91. (LAN Chunyan, LIU Yichen,YANG Ge. Ordering method of emitter threat level based on TOPSIS[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2020,43(6):87–91.) doi:10.16426/j.cnki.jcdzdk.2020.06.019.
- [4] 周帆,封吉平,赵喜,等. 机载雷达告警系统中威胁等级判定方法研究[J]. 传感器与微系统, 2014,33(11):30–33. (ZHOU Fan,FENG Jiping,ZHAO Xi,et al. Research on threat level determination approach for airborne radar warning system[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2014,33(11):30–33.) doi:10.13873/J.1000–9787(2014)11–0030–04.
- [5] 王嘉文,郑辉. 一种基于改进 AHP 法雷达威胁等级判定新方法[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2015,31(5): 569–572,582. (WANG Jiawen,ZHENG Hui. A new method of radar's threatening level evaluation based on improved AHP[J]. Journal of Harbin University of Commerce(Natural Sciences Edition), 2015,31(5): 569–572,582.) doi: 10.3969/j. issn. 1672–0946.2015.05.015.
- [6] 马珂,毕大平,胡立群,等. 基于 FAHP-GRA 的告警目标威胁等级判定[J]. 电子信息对抗技术, 2020,35(4):73–77. (MA Ke,BI Daping,HU Liqun,et al. Threat level determination of warning target based on FAHP-GRA[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2020,35(4):73–77.) doi:10.3969/j.issn.1674–2230.2020.04.016.
- [7] 王嘉文,郑辉. 一种基于改进 AHP 法雷达威胁等级判定新方法[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2015,31(5): 569–572,82. (WANG Jiawen,ZHENG Hui. A new method of radar's threatening level evaluation based on improved AHP[J]. Journal of Harbin University of Commerce(Natural Sciences Edition), 2015,31(5): 569–572,582.) doi: 10.3969/j. issn. 1672–0946. 2015.05.015.
- [8] 邓雪,李家铭,曾浩健,等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012,42(7):93–100. (DENG Xue,LI Jiaming,ZENG Haojian,et al. Research on computation methods of AHP wight vector and its applications[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012,42(7):93–100.) doi:10.3969/j.issn.1000–0984.2012.07.012.
- [9] 孟雅蕾,王予,陈金广. 基于改进 AHP 的储层综合评价方法[J]. 计算机系统应用, 2016,25(8):8–15. (MENG Yalei,WANG Yu, CHEN Jinguang. Comprehensive reservoir evaluation method based on improved AHP[J]. Computer Systems & Applications, 2016,25(8):8–15.) doi:10.15888/j.cnki.csa.005300.
- [10] 耿凯迪. 雷达干扰效果在线评估技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2019. (GENG Kaidi. Research on the online effectiveness evaluation of radar jamming[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2019.) doi:10.7666/d.D01905284.
- [11] 杨孟娇,马赫,朱晓琳. 基于博弈论组合赋权——TOPSIS 的微课评价模型[J]. 广播电视大学学报(哲学社会科学版),

- 2022(1):32-39. (YANG Mengjiao, MA He, ZHU Xiaolin. Micro-course evaluation model based on combination weighting-TOPSIS in game theory[J]. Journal of Radio & TV University(Philosophy & Social Sciences Edition), 2022(1):32-39.) doi:10.16161/j.issn.1008-0597.2022.01.005.
- [12] 吴家乐, 时晨光, 周建江. 博弈论在雷达系统中的应用研究综述[J]. 飞航导弹, 2021(9): 59-66. (WU Jiale, SHI Chenguang, ZHOU Jianjiang. A review of the application of game theory in radar systems[J]. Aerospace Technology, 2021(9): 59-66.) doi:10.16338/j.issn.1009-1319.20210856.
- [13] 韩鹏, 张龙. 雷达干扰资源优化分配博弈模型和算法[J]. 现代雷达, 2019, 41(2): 78-83, 90. (HAN Peng, ZHANG Long. Game model and algorithm for optimal allocation of radar jamming resources[J]. Modern Radar, 2019, 41(2): 78-83, 90.) doi:10.16592/j.cnki.1004-7859.2019.02.018.
- [14] 韩志豪, 赵东来, 王钢. 超密集网络中基于博弈论的频谱分配策略研究[J]. 无线电工程, 2021, 51(1): 19-24. (HAN Zhihao, ZHAO Donglai, WANG Gang. Research on spectrum allocation strategy based on game theory in ultra dense network[J]. Radio Engineering, 2021, 51(1): 19-24.) doi:10.3969/j.issn.1003-3106.2021.01.004.
- [15] 周全兴, 李秋贤, 王振龙, 等. 基于博弈论的无线传感网络节点攻防优化[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022, 20(2): 181-187, 193. (ZHOU Quanxing, LI Qiuxian, WANG Zhenlong, et al. Attack and defense optimization of wireless sensor network nodes based on game theory[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2022, 20(2): 181-187, 193.) doi:10.11805/TKYDA2020659.
- [16] 吴伟, 张小飞. CRN合作频谱感知SSDF攻击的博弈分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016, 14(6): 866-871. (WU Wei, ZHANG Xiaofei. Game theoretic analysis for cooperative spectrum sensing under SSDF attack in cognitive radio networks[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016, 14(6): 866-871.) doi: 10.11805/TKYDA201606.0866.

作者简介:

张连炜(1997-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为干扰决策与评估, email:1255370915@qq.com.

李文博(1996-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为电子侦察和威胁评估.

张立东(1978-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为电子战技术.

董春曦(1970-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为信息对抗技术和信息对抗系统仿真.

董阳阳(1991-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为阵列信号处理和电磁频谱感知.