

基于组合赋权TOPSIS辐射源动态威胁评估

张银玲, 尚韬, 李兆坤

引用本文

张银玲, 尚韬, 李兆坤. 基于组合赋权TOPSIS辐射源动态威胁评估[J]. 计算机科学, 2024, 51(11A): 231000038-7.

ZHANG Yinling, SHANG Tao, LI Zhaokun. Radar Emitter Target Dynamic Threat Assessment Based on Combining Weighting-TOPSIS Method [J]. Computer Science, 2024, 51(11A): 231000038-7.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[基于综合赋权的网络安全等级灰色评价方法](#)

Grey Evaluation Method of Network Security Grade Based on Comprehensive Weighting
计算机科学, 2023, 50(11A): 230300144-6. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.230300144>

[基于熵权-AHP与云模型的国产BIM建模软件多维度评价研究](#)

Multidimensional Evaluation Method for Domestic Building Information Modeling Software Based on Entropy-Weight-AHP and Cloud Model
计算机科学, 2023, 50(6A): 220400216-9. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220400216>

[基于改进模糊综合评价法的电力监控系统网络可靠性分析](#)

Network Reliability Analysis of Power Monitoring System Based on Improved Fuzzy Comprehensive Evaluation Method
计算机科学, 2023, 50(6A): 220400293-7. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220400293>

[EHFM:一种面向多源网络攻击告警的高效层级化数据过滤方案](#)

EHFM: An Efficient Hierarchical Filtering Method for Multi-source Network Malicious Alerts
计算机科学, 2023, 50(2): 324-332. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220800049>

[一种融合多层次情感和主题信息的TS-AC-EWM在线商品排序方法](#)

TS-AC-EWM Online Product Ranking Method Based on Multi-level Emotion and Topic Information
计算机科学, 2022, 49(6A): 165-171. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210400238>

基于组合赋权 TOPSIS 辐射源动态威胁评估

张银玲¹ 尚 韬¹ 李兆坤^{1,2}

1 西安电子科技大学通信工程学院 西安 710071

2 上海交通大学电子信息与电气工程学院 上海 200240

摘 要 针对辐射源目标威胁评估中属性指标权重设计缺乏全面性、评估缺乏动态性等不足,提出基于层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)与熵权法组合赋权的逼近理想解(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS)动态辐射源威胁评估方法。首先提出包含平台属性和雷达属性的辐射源威胁评估指标体系;其次构建量化定性和定量属性的威胁隶属度函数;然后通过 AHP 和熵权法给属性进行主、客观组合赋权;接着利用泊松分布逆形式引入时间权重,融合多时刻信息;最后基于 TOPSIS 算法求解目标的威胁排序。仿真分析表明,相比主观赋权或客观赋权法评估,所提组合赋权法具有更强的全面性和有效性;相比仅考虑目标当前时刻属性信息评估方法,所提引入时间权重的动态评估方法具有更好的合理性和客观性。所提方法能较好地反映多目标的威胁排序,为作战指挥决策提供有力的依据。

关键词 辐射源威胁评估;层次分析法;熵权法;组合赋权;泊松分布;动态威胁评估;逼近理想解

中图分类号 TP391

Radar Emitter Target Dynamic Threat Assessment Based on Combining Weighting-TOPSIS Method

ZHANG Yinling¹, SHANG Tao¹ and LI Zhaokun^{1,2}

1 School of Telecommunication Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China

2 School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract Nowadays, index weights determining methods of radar emitter target threat assessment are incomplete and non-dynamic. A dynamic and combining weighting assessment method based on analytic hierarchy process(AHP), entropy weight method and technique for order preference by similarity to ideal solution(TOPSIS) model is proposed. First, an index system which includes platform attributes and radar attributes is proposed. Second, the threat subordinating degree functions of qualitative and quantitative attributes are established. Third, attributes are weighted by subjective and objective weights based on AHP and EWM. Fourth, the Poisson reverse distribution is induced for fusing decision information in multiple times. Finally, the threat assessment is obtained based on TOPSIS model. The simulation results show that, the proposed combining weighting dynamic assessment method is more comprehensive, effective, reasonable and actual compared with purely subjective weighting or objective weighting and single-moment method. It can reflect the multi-target threat ranking well and provide a strong basis for the combat command decision.

Keywords Radar emitter threat assessment, AHP, Entropy weight method, Combining weighting, Poisson distribution, Dynamic threat assessment, TOPSIS

1 引言

辐射源威胁评估是电子对抗领域的一个重要研究课题。按照美国国防部提出的 JDL 信息融合功能模型,威胁评估处于第三级,是该模型中较高级别的信息处理阶段^[1]。基于侦察探测获取或者指挥控制系统提供的战场态势信息,对敌方辐射源的威胁程度进行快速、准确的综合评价与排序,可以为作战指挥控制,如火力优化分配、行动计划制定、作战方案优选等提供重要的决策依据,同时对我方战斗元素完成作战任务和提高自身生存能力也至关重要。

常用的威胁评估方法较多,主要有直觉模糊推理、神经

网络方法、多属性决策理论、D-S 证据理论、贝叶斯推理等。其中,多属性决策方法模型具有简洁、数据易处理、解释性强等优点,是较为常用的一种方法。本文采用多属性决策理论进行多辐射源目标的威胁评估。

在威胁评估过程中,最为重要的步骤是属性权重的确定。文献[2-3]利用层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)确定属性权重,基于逼近理想解(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS)算法对目标进行威胁评估。然而,基于 AHP 法确定属性权重依赖专家打分,具有很强的主观性,缺乏可靠性和客观性。文献[4]提出基于熵权法和多准则妥协解排序方法(VlseKriterijums-

基金项目:国家自然科学基金(62001286);陕西省自然科学基金(2020ZDLGY15-05)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(62001286) and Natural Science Foundation of Shaanxi Province(2020ZDLGY15-05).

通信作者:张银玲(yinlingzhang@stu.xidian.edu.cn)

ka Optimizacija I Kompromisno Resenje, VIKOR) 的空中多目标威胁评估方法,采用熵权法确定属性权重,利用 VIKOR 算法构建威胁排序模型。该方法实现了在人为设定属性权重均等、不均等,以及熵权法确定权重 3 种情况下的威胁排序,并分析了决策机制系数对以上 3 种情况威胁程度的影响。但该方法仅利用了战场数据,而未考虑决策者的主观偏好。文献[5]针对属性间的相关性问题,提出基于指标相关性(Criteria Importance Through Intercriteria Correlation, CRITIC)和 TOPSIS 的威胁评估方法,以属性值的标准差和相关系数为依据计算属性客观权重,基于 TOPSIS 算法进行威胁排序。然而该方法未考虑决策者主观偏好和经验,在战场数据不足或失准的情况下,因同时缺乏经验依据,将造成较大的评估误差。

为兼顾决策者主观偏好和战场客观事实,文献[6-10]将主、客观权重进行组合,对目标进行威胁评估。其中,文献[7]针对低空无人机,利用熵权法确定客观权重,根据专家经验偏好直接赋予目标属性主观权重;文献[8]针对低慢小目标,联合 AHP 和熵权法确定目标属性的组合权重,利用组合权重对属性威胁隶属度加权,但未使用排序算法,直接根据加权结果对目标威胁排序;文献[9]利用网络层次分析法(Analytic Network Process, ANP)确定属性主观权重,利用熵权法计算属性客观权重,解决属性间存在耦合关系的目标威胁评估问题;文献[10]利用群组层次分析法和直觉模糊集熵法来确定目标属性的主、客观权重,处理目标参数信息不确定场景下的威胁评估问题。上述基于组合权重的威胁评估方法虽较好地解决了基于当前态势的威胁评估问题,但战争是一个动态持续的过程,以上方法未考虑动态态势下多时刻的数据融合及分析,会丢失历史态势信息,难以对一个连续的作战态势作出全面、客观的分析。文献[11]基于熵值法求解权重,应用 TOPSIS 理论进行威胁评估,对静态数值计算和动态模拟仿真均进行验证,然而该方法中属性权重的计算也只考虑了客观信息,并未考虑决策者的主观偏好,且虽然该方法建立了动态多时刻下不同态势的威胁评估,但各时刻态势相对独立,缺乏时间关联性。

针对以上方法在主客观权重确定、目标属性动态性考虑等方面的不足,本文针对辐射源目标,构建一套相对完善的包含平台属性和雷达属性且属性相关性低的威胁评估指标体系。采用隶属度函数的形式对定性指标和定量指标进行量化,提出综合采用基于专家打分的 AHP 法来确定目标属性的主观权重、基于熵权法来确定客观权重的方式,引入偏好系数对主客观权重进行组合,同时利用泊松分布逆形式引入时间权重对多时刻数据进行多态融合。最后采用 TOPSIS 算法,对辐射源目标进行动态威胁评估排序。

2 目标属性矩阵确定

2.1 威胁评估指标选取

对于辐射源目标,传统的评估指标主要侧重于辐射源信号参数,但随着辐射源载体平台种类的逐渐发展,平台的载荷、攻防、通探、速度等能力悬殊,同时实际战场态势复杂多变,仅从信号层面计算分析其威胁程度有较大片面性。这里结合现阶段雷达与无源侦察设备所能探测与侦察的信息,构建影响辐射源威胁程度的指标体系,其主要分为两个方面的

属性:平台属性和雷达属性,具体构成如图 1 所示。图 1 中,平台指标主要通过我方雷达测量得到,雷达指标主要通过无源侦察设备截获敌方辐射源信号得到。

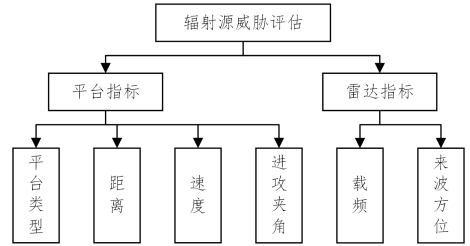


图 1 辐射源威胁评估指标体系

Fig. 1 Radar emitter threat assessment index system

2.2 威胁评估指标规范化

从辐射源目标属性指标是否为具体数值的角度,可以将其分为定性指标和定量指标,分别对应不同的量化方式。威胁指标各属性值的取值范围不同,物理量纲和数量级也不同,直接处理原始数据将对目标威胁评估产生不利的影响。因此,进行综合评估之前,需要对原始的威胁指标进行规范化处理。利用模糊数学中隶属度理论,通过构造隶属度函数的方式,按照各属性值的典型区间划分方法,将原始数据规范化至 $[0, 1]$ 的区间内^[12-14]。

2.2.1 定量指标

1) 速度

目标速度越快,越难对其实施拦截,对我方的威胁越大。选用上升型函数建立飞行速度威胁隶属度函数 u_v , 可表示为:

$$u_v = \begin{cases} 0.2, & 0 \leq v < 1 \\ 0.8(1 - e^{k_v(v-1)^2}) + 0.2, & v \geq 1 \end{cases} \quad (1)$$

其中, v 为目标速度,单位为马赫, $k_v = -0.8$ 。巡航导弹、空地导弹等导弹类目标速度一般最高可达 3 马赫甚至更高,固定翼飞机类目标速度一般最高为 1~2.6 马赫,目标速度在 1 马赫以下的目标威胁度较小,量化值为 0.2。

2) 距离

通常,目标与我方单元距离越小,我方单元的防御时间越短,目标对我方造成的毁灭性打击也越大,对我方单元的威胁程度越大。目标距离隶属度函数 μ_d 具体可以表示为:

$$\mu_d = \begin{cases} 1, & 0 \leq d \leq D_1 \\ \exp(-k_d(d - D_1)), & D_1 < d \leq D_2 \\ 0, & d > D_2 \end{cases} \quad (2)$$

其中, d 为目标与我方单元的距离,单位为 km, $D_1 = 30$ km, $D_2 = 600$ km, $k_d = 0.01$ 。

3) 目标进攻夹角

目标进攻夹角反映了目标相对于我方单元的运动方向。为方便讨论,规定进攻夹角以来袭目标与我方单元连线为基准,顺时针方向为正。当来袭目标进攻夹角在 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 区间时,其有较强的攻击意图,对我方单元造成威胁;当进攻夹角超出此区间范围,可认为目标对我方单元几乎没有威胁。当目标进攻夹角在 $[-22.5^\circ, 22.5^\circ]$ 区间内,会对我方单元造成中等以上威胁,进攻夹角越小则攻击意图明显,威胁程度越大,威胁度随着进攻夹角度数的增大逐渐降低。进攻夹角超出此区间范围时,目标对我方单元的威胁度在中等左右。故建立如下进攻夹角威胁隶属度函数 u_θ :

$$u_{\theta} = \begin{cases} e^{-k_{\theta}\theta^2}, & |\theta| \leq \frac{\pi}{8} \\ 0.5, & \frac{\pi}{8} < |\theta| \leq \frac{\pi}{2} \\ 0, & \theta > \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (3)$$

其中, θ 为进攻夹角, 单位为 rad, $k_{\theta} = 4.5$ 。

4) 载频

辐射源信号的载频是识别辐射源类型的重要信息之一。通常, 载频越高, 威胁越大。其威胁隶属度函数 μ_f 可以定为:

$$\mu_f = \frac{f - F_{\min}}{F_{\max} - F_{\min}} \quad (4)$$

其中, f 为目标载频, 单位为 Hz; F_{\min} 为所有目标载频中的最小值, F_{\max} 为所有目标载频中的最大值。

2.2.2 定性指标

1) 平台类型

辐射源平台类型不同, 其构成的威胁也有所差异。利用专家打分法量化平台威胁程度并对其赋值, 如表 1 所列。

表 1 目标平台类型威胁程度量化表

Table 1 Target platform type threat level quantification

平台类型	目标特性	威胁程度
巡航导弹、空地导弹、弹道导弹	飞行速度较快, 杀伤力较强, 突防能力强	0.9
战斗机、轰炸机、攻击机	突击能力强, 敌方实现空中打击的重要武器	0.8
侦察机、预警机、电子干扰机	不造成直接威胁, 在中高空活动	0.7
其他飞行目标	速度小, 突防能力、杀伤力较弱	0.3

2) 来波方位

辐射源来波方位及其方位变化情况能够反映辐射源平台对我方的动作意图。辐射源方位变化方式可大致分为 3 类: 方位不变、方位瞬变和方位慢变。辐射源方位不变, 表示已经锁定或跟踪到我方目标, 威胁最大; 方位瞬变表示目标攻击意图不明确或处于搜索状态, 威胁度最小; 方位慢变对应的威胁程度居于前两者之间。因此, 方位威胁隶属度函数 μ_{dir} 可以构建为:

$$\mu_{dir} = \begin{cases} 1, & \text{方位不变} \\ 0.5, & \text{方位瞬变} \\ 0.8, & \text{方位慢变} \end{cases} \quad (5)$$

3 属性权重确定-组合赋权法

属性权重反映了辐射源目标属性之间的相对重要程度, 是进行威胁评估的关键之一。属性权重的确定可以基于专家主观经验偏好和基于客观数据事实。例如, AHP 法利用专家经验对属性进行两两比较, 初步确定属性之间的重要程度, 继而通过矩阵数值计算得到属性间的权重占比, 但由于初步的判断矩阵是专家根据经验给出的, 因此具有很强的主观偏好性; 熵权法是通过求多目标属性值的信息熵来确定属性权重, 信息熵是对不确定性的衡量, 熵权法通过计算实际数据获得, 具有很强客观性。为了兼顾专家经验和客观事实, 我们综合采用 AHP 法和熵权法, 分别从主观经验偏好角度和客观数据支撑角度对目标属性权重进行考量, 然后以一定的偏好程度对主、客观权重进行组合, 最终得到更加全面、科学的属性权重。

设有 m 个辐射源目标构成威胁评估的目标集 $T = (T_1, T_2, \dots, T_m)$, 选取目标的 $C = (C_1, C_2, \dots, C_n)$ 个威胁属性构成属性指标集 $C = (C_1, C_2, \dots, C_n)$, 通过隶属度函数和威胁划分表, 即式(1)~式(5)和表 1, 对原始数据进行规范化处理, 得到目标威胁度的判决矩阵为: $X = (x_{ij})_{m \times n}$, 其中, T_i 为被评估目标 T_i 关于 C_j 的属性指标值。

3.1 主客观权重-AHP 法

1) 形成判断矩阵

依据指标体系构建层次分析模型, 利用专家经验和偏好对层次指标间的相对重要程度进行评估, 并应用表 2 中的比例标度法对指标间的相对重要程度进行量化, 形成判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 。

表 2 相对重要程度量化表

Table 2 Relative importance quantification

相对重要程度	量化数值
相等	1
稍微重要	3
明显重要	5
强烈重要	7
极端重要	9
介于上述重要程度之间	2, 4, 6, 8
倒数	若因素 i 与因素 j 的重要性之比为 a_{ij} , 则因素 j 与因素 i 的重要性之比为 $a_{ji} = 1/a_{ij}$

2) 层次单排序

求解判断矩阵 A 的最大特征值 λ_{\max} 对应的特征向量 ω_1 , 满足 $A\omega_1 = \lambda_{\max}\omega_1$ 。其中 $\omega_1 = (\omega_{11}, \omega_{12}, \dots, \omega_{1n})^T$ 即为威胁指标体系中各指标的权向量。

3) 一致性检验

为避免判断矩阵中出现自相矛盾的情况, 需要对其进行一致性检验。求判断矩阵的一致性比率 CR , $CR = CI/RI$, 其中 CI 为一致性指标, $CI = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1)$; RI 为平均随机一致性指标, 可以通过查表得到。当 $CR < 0.1$ 时, 通常认为矩阵通过一致性检验, 则可以用步骤 2) 中得到的归一化特征向量作为权向量, 否则需要重新构造判断矩阵。

4) 层次总排序

层次总排序确定各层次所有因素相对于总目标相对重要程度的权重排序。若第 $k-1$ 层某个指标相对于目标层的权重向量为 p , 第 k 层相对于 $k-1$ 层的权重向量为 H , 则第 k 层相对于目标层的权重向量为:

$$W = [\omega_{11}, \omega_{12}, \dots, \omega_{1n}] = p \cdot H \quad (6)$$

3.2 客观权重-熵权法

对判决矩阵 X 进行归一化, 生成归一化判决矩阵 $V = (v_{ij})_{m \times n}$:

$$v_{ij} = x_{ij} / \sum_{i=1}^m x_{ij}, 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n \quad (7)$$

计算第 j 个属性指标的信息熵 e_j :

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m v_{ij} \ln v_{ij}, 1 \leq j \leq n \quad (8)$$

计算第 j 项属性指标的客观权重 ω_{2j} :

$$\omega_{2j} = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)}, 1 \leq j \leq n \quad (9)$$

则 $\omega_{2j} (1 \leq j \leq n)$ 权重序列即构成目标的客观权重向量 $\omega_2 = (\omega_{21}, \omega_{22}, \dots, \omega_{2n})^T$ 。

3.3 组合权重

根据目标属性的主客观权重 ω_1 和客观权重 ω_2 , 引入偏好

系数 α, α 可根据实际情况灵活调整, 计算目标属性的组合权重 ω :

$$\omega = \alpha\omega_1 + (1-\alpha)\omega_2, 0 < \alpha < 1 \quad (10)$$

3.4 时间序列权重

现代战争中战场态势瞬息万变, 来袭目标的威胁程度也随时间不断变化, 因此, 只考虑当前时刻的目标属性参数并不能合理全面地反映其威胁程度, 需考虑目标参数的时间属性, 对目标的动态态势进行威胁评估。信息越接近当前时刻, 越能反映目标的意图和状态, 对威胁评估的价值越大, 故应赋予更大的权重。为综合多时刻辐射源数据信息, 选取当前时刻 p 及其之前的 $p-1$ 个时刻为一个完整的研究序列, 采用泊松分布逆形式对时间序列赋权:

$$\eta_k = \frac{k!/\varphi^k}{\sum_{k=1}^p (k!/\varphi^k)} \quad (11)$$

其中, $\eta_k > 0, \sum_{k=1}^p \eta_k = 1, \varphi \in (0, 2)$ 。

4 评估算法模型

TOPSIS 方法是一种评价多个对象之间优劣关系的方法, 其基本原理是: 基于规范化后的样本评判矩阵, 通过正理想解和负理想解构建出评价空间, 待评价的目标可视为评价空间中的一点, 通过计算其与正负理想解之间的距离, 对距离进行排序, 实现目标排序^[10]。TOPSIS 算法的处理流程如图 2 所示。

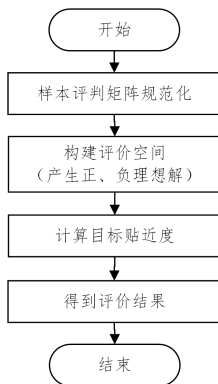


图 2 TOPSIS 算法处理流程

Fig. 2 TOPSIS algorithm processing flow

具体步骤如下:

步骤 1 将归一化判决矩阵 V 转化为加权规范化判决矩阵 VW 。

$$VW = V \cdot \omega^T = \begin{bmatrix} vw_{11} & vw_{12} & \cdots & vw_{1n} \\ vw_{21} & vw_{22} & \cdots & vw_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ vw_{m1} & vw_{m2} & \cdots & vw_{mn} \end{bmatrix} \quad (12)$$

步骤 2 确定理想解和负理想解。

理想解为每个目标属性值中威胁最大的解, 负理想解为其中威胁最小的解。理想解和负理想解分别记为 $VW^+ = (vw_{11}^+, vw_{21}^+, \dots, vw_{n1}^+)$ 和 $VW^- = (vw_{11}^-, vw_{21}^-, \dots, vw_{n1}^-)$:

$$\begin{aligned} vw_j^+ &= \max\{vw_{ij}, i=1, 2, \dots, m\} \\ vw_j^- &= \min\{vw_{ij}, i=1, 2, \dots, m\}, (1 \leq j \leq n) \end{aligned} \quad (13)$$

步骤 3 计算各辐射源目标与理想解和负理想解的欧氏

距离。

$$\begin{cases} S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (vw_{ij} - vw_j^+)^2} \\ S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (vw_{ij} - vw_j^-)^2}, 1 \leq i \leq m \end{cases} \quad (14)$$

步骤 4 计算相对贴近度, 进行威胁排序。

通过计算各目标属性与正、负理想解的贴近度 A_i , 并对目标威胁度进行排序:

$$A_i = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+}, 1 \leq i \leq m \quad (15)$$

其中, A_i 越大, 所对应的目标就靠近正理想解, 越远离负理想解, 威胁程度越大。

5 仿真验证

为验证本文威胁评估方法的有效性, 设计了 5 组辐射源目标的威胁评估场景, 算法仿真和数据处理是在 Windows10 环境下基于 Matlab 2023 进行的。5 组辐射源在 3 个时刻 (t_1, t_2, t_3) 下的属性数据信息^[13] 分别如表 3—表 5 所列。基于 AHP 法与熵权法综合赋权和 TOPSIS 模型的辐射源动态威胁评估方法对目标进行威胁评估。

步骤 1 计算 t_1 时刻的目标属性矩阵

根据式(1)—式(5)和表 1, 对表 3 中 t_1 时刻的原始目标属性数据进行规范化处理, 得到规范化评判矩阵 $X = (x_{ij})_{5 \times 6}$ 。

$$X = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.3679 & 0.4002 & 0.5 & 0.1667 & 0.5 \\ 0.9 & 0.2213 & 0.2 & 0.7346 & 1 & 1 \\ 0.8 & 0.1108 & 0.2 & 0.5 & 0 & 1 \\ 0.7 & 0.0550 & 0.2 & 0.5779 & 0.0370 & 0.5 \\ 0.8 & 0.0672 & 0.2064 & 0.5 & 0.1481 & 0.8 \end{bmatrix}$$

步骤 2 确定各属性指标权重

(1) 确定主观权重

经专家评议后, 得到 6 个属性之间的相对重要程度, 并得到对比矩阵 A 。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/5 & 1/4 & 1/3 & 2 & 1/2 \\ 5 & 1 & 2 & 3 & 6 & 4 \\ 4 & 1/2 & 1 & 2 & 5 & 3 \\ 3 & 1/3 & 1/2 & 1 & 4 & 2 \\ 1/2 & 1/6 & 1/5 & 1/4 & 1 & 1/3 \\ 2 & 1/4 & 1/3 & 1/2 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

依据 AHP 法, 可求解出各项指标的主观权重构成的权向量: $\omega_1 = (0.0641, 0.3825, 0.2504, 0.1596, 0.0428, 0.1006)$ 。经查表和计算, 矩阵阶数 $n=6$ 时, 平均随机一致性指标 $RI=1.26$, 一致性指标 $CI=0.0245$, 故一致性比例 $CR=0.0194 < 0.1$, 一致性检验通过。

(2) 确定客观权重

对 t_1, t_2, t_3 这 3 个时刻的属性判决矩阵 X 进行归一化后, 得到归一化的属性判决矩阵 $V = (v_{ij})_{5 \times 6}$ 。

基于矩阵 V , 利用式(7)—式(9), 求解出熵权法下各属性的客观权重指标权重向量: t_1 时刻, $\omega_2 = (0.0028, 0.2117, 0.0419, 0.0110, 0.6930, 0.0396)$; t_2 时刻, $\omega_2 = (0.0027, 0.2620, 0.0040, 0.0284, 0.6798, 0.0232)$; t_3 时刻, $\omega_2 = (0.0025, 0.2754, 0.0496, 0.0257, 0.6241, 0.0227)$ 。

表3 t_1 时刻辐射源属性数据Table 3 Radar emitter attribute data at t_1

辐射源目标	平台类型	距离/km	速度/Ma	进攻夹角/ $^\circ$	载频/GHz	波达角
T1	战斗机	130	1.6	30	12.5	瞬变
T2	巡航导弹	180	0.7	15	35	不变
T3	战斗机	250	0.9	40	8	不变
T4	预警机	320	0.6	20	9	瞬变
T5	轰炸机	300	1.1	25	12	慢变

表4 t_2 时刻辐射源属性数据Table 4 Radar emitter attribute data at t_2

辐射源目标	平台类型	距离/km	速度/Ma	进攻夹角/ $^\circ$	载频/GHz	波达角
T1	战斗机	110	1.30	20	12.5	慢变
T2	巡航导弹	170	0.75	10	35	不变
T3	战斗机	230	1.10	10	8	不变
T4	预警机	330	0.60	30	9	瞬变
T5	轰炸机	320	1.20	30	12	慢变

表5 t_3 时刻辐射源属性数据Table 5 Radar emitter attribute data at t_3

辐射源目标	平台类型	距离/km	速度/Ma	进攻夹角/ $^\circ$	载频/GHz	波达角
T1	战斗机	90	1.7	15	12.5	不变
T2	巡航导弹	160	0.8	8	35	不变
T3	战斗机	200	1.2	10	8	不变
T4	预警机	340	0.6	40	9	瞬变
T5	轰炸机	330	1.2	35	12	慢变

(3)确定组合权重

设置偏好系数 α ,对主观权重和客观权重进行组合得到组合权重 $\omega, \omega = \alpha\omega_1 + (1-\alpha)\omega_2$,综合主、客观权重的绝对影响。分别设置 $\alpha=1, 0.8, 0.5, 0.3, 0$,计算每个偏好系数下对应的组合权重。

步骤3 根据组合权重,更新属性矩阵

在获得目标属性矩阵 $X=(x_{ij})_{m \times n}$ 及组合权重向量 ω 的基础上,计算加权属性矩阵 $F=X \cdot \omega$ 。

步骤4 基于加权属性矩阵 F ,计算每个目标与正、负理想解的贴近度3个独立时刻的组合权重及各目标的贴近度。计算结果如表6—表8所列。

表6 t_1 时刻组合权重和贴近度Table 6 Combined weight and close degree at t_1

偏好系数 α	组合权重	贴近度(T1—T5)
1	(0.0641, 0.3825, 0.2504, 0.1596, 0.0428, 0.1006)	(0.6424, 0.5704, 0.3068, 0.0781, 0.1889)
	(0.0518, 0.3483, 0.2087, 0.1299, 0.1728, 0.0884)	(0.4390, 0.7426, 0.1943, 0.0541, 0.1659)
0.8	(0.0334, 0.2971, 0.1462, 0.0853, 0.3679, 0.0701)	(0.2714, 0.8768, 0.0935, 0.0394, 0.1516)
	(0.0212, 0.2630, 0.1045, 0.0555, 0.4979, 0.0579)	(0.2220, 0.9195, 0.0608, 0.0373, 0.1493)
0.3	(0.0028, 0.2117, 0.0419, 0.0110, 0.6930, 0.0396)	(0.1876, 0.9557, 0.0321, 0.0368, 0.1482)

表7 t_2 时刻组合权重和贴近度Table 7 Combined weight and close degree at t_2

偏好系数 α	组合权重	贴近度(T1—T5)
1	(0.0641, 0.3825, 0.2504, 0.1596, 0.0428, 0.1006)	(0.7151, 0.5979, 0.3976, 0.0089, 0.1611)
	(0.0518, 0.3584, 0.2011, 0.1333, 0.1702, 0.0851)	(0.5014, 0.7270, 0.2616, 0.0269, 0.1490)
0.8	(0.0334, 0.3222, 0.1272, 0.0940, 0.3613, 0.0619)	(0.3220, 0.8492, 0.1265, 0.0345, 0.1451)
	(0.0211, 0.2981, 0.0779, 0.0678, 0.4887, 0.0464)	(0.2625, 0.8906, 0.0791, 0.0358, 0.1455)
0.3	(0.0027, 0.2620, 0.0040, 0.0284, 0.6798, 0.0232)	(0.2142, 0.9278, 0.0384, 0.0365, 0.1464)

表8 t_3 时刻组合权重和贴近度Table 8 Combined weight and close degree at t_3

偏好系数 α	组合权重	贴近度(T1—T5)
1	(0.0641, 0.3825, 0.2504, 0.1596, 0.0428, 0.1006)	(0.8212, 0.5088, 0.3739, 0.0070, 0.1304)
	(0.0518, 0.3611, 0.2102, 0.1328, 0.1591, 0.0851)	(0.5960, 0.6286, 0.2790, 0.0226, 0.1300)
0.8	(0.0333, 0.3289, 0.1500, 0.0926, 0.3335, 0.0617)	(0.3967, 0.7774, 0.1541, 0.0325, 0.1375)
	(0.0210, 0.3075, 0.1098, 0.0659, 0.4497, 0.0461)	(0.3203, 0.8359, 0.1045, 0.0347, 0.1412)
0.3	(0.0025, 0.2754, 0.0496, 0.0257, 0.6241, 0.0227)	(0.2511, 0.8905, 0.0605, 0.0361, 0.1444)

步骤5 分配时间权重,构造时间加权评判矩阵

由步骤4中3个独立时刻的贴近度,构造各个偏好系数下的综合判断矩阵 Z 。利用泊松分布逆形式,取 $\varphi=1.5$,得到时间权重 $\omega=(0.2000, 0.2667, 0.5333)$ 。对综合评判矩阵 Z 进行时间加权得到时间加权评判矩阵 $Z_{wei}, Z_{wei} = Z \cdot \omega^T$ 。

步骤6 将TOPSIS法应用于矩阵 Z_{wei} ,得到每个目标与正、负理想解的距离及贴近度,并根据贴近度对目标进行排序,即得到最终的威胁排序,结果如表9所列。

表9 不同偏好系数下多时刻融合威胁评估

Table 9 Threat assessment with time fusion and different α

α	贴近度	威胁排序
1	(1, 0.6570, 0.4636, 0.1656)	T1>T2>T3>T5>T4
0.8	(0.7957, 1.0, 0.3802, 0.1749)	T2>T1>T3>T5>T4
0.5	(0.4375, 1.0, 0.1447, 0.1391)	T2>T1>T3>T5>T4
0.3	(0.3237, 1.0, 0.0759, 0.1313)	T2>T1>T5>T3>T4
0	(0.2336, 1.0, 0.0238, 0.0017, 0.1260)	T2>T1>T5>T3>T4

6 结论与分析

为对比偏好系数与时间权重对威胁排序的影响,取 $\alpha=1, 0.5, 0$,对比独立时刻和多时刻融合后的威胁排序数据,结果如表10所列。

表10 不同 α 组合赋权多时刻威胁评估Table 10 Threat assessment of combined weighting with different α at t_1, t_2, t_3 and time fusion

时刻	$\alpha=1$	$\alpha=0.5$	$\alpha=0$
t_1	T1>T2>T3>T5>T4	T2>T1>T5>T3>T4	T2>T1>T5>T4>T3
t_2	T1>T2>T3>T5>T4	T2>T1>T5>T3>T4	T2>T1>T5>T3>T4
t_3	T1>T2>T3>T5>T4	T2>T1>T3>T5>T4	T2>T1>T5>T3>T4
多时刻融合	T1>T2>T3>T5>T4	T2>T1>T3>T5>T4	T2>T1>T5>T3>T4

从表 10 中可以看出：

1) 不同偏好系数下，同一时刻的威胁评估结果存在差异。

例如，在 t_1 时刻，3 个偏好系数下的威胁排序评估结果各不相同，更直观的结果如图 3 所示。

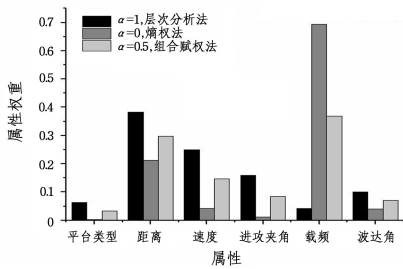


图 3 t_1 时刻不同偏好系数 α 下的属性权重

Fig. 3 Attribute weight value with different α at t_1

完全由主观权重确定方法计算出的属性权重向量为 $\omega_1 = (0.0641, 0.3825, 0.2504, 0.1596, 0.0428, 0.1006)$ ，表明属性重要程度为：距离 > 速度 > 进攻夹角 > 波达角 > 平台类型 > 载频；完全由客观权重决定的属性权重向量为 $\omega_2 = (0.0028, 0.2117, 0.0419, 0.0110, 0.6930, 0.0396)$ ，表明属性重要程度为：载频 > 距离 > 速度 > 波达角 > 进攻夹角 > 平台类型。当偏好系数取不同值时，属性权重分配情况如图 3 所示，本文方案和文献[8]中的组合权重威胁排序方案下目标威胁值如图 4 所示。

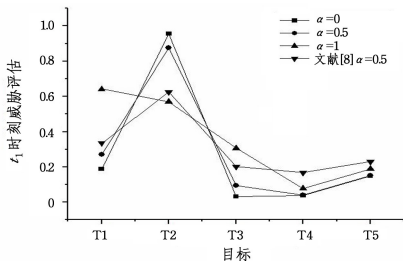


图 4 t_1 时刻不同偏好系数 α 下的威胁排序

Fig. 4 Threat rank with different α at t_1

当偏好系数 $\alpha=1$ 时，表明属性权重完全由专家决定，由表 10 和图 4 可知，此时的威胁排序为：T1 > T2 > T3 > T5 > T4。在这个规则下，距离较近、进攻夹角小、波达角锁定、平台类型为导弹的 T2 目标威胁最大。T3 和 T5 目标平台类型威胁相等，但距离更近一些且波达角锁定的 T3 目标威胁度更大。随着 α 逐渐变小，客观权重的比重逐渐加大，当 $\alpha=0.5$ 时，本文方案的威胁排序为：T2 > T1 > T5 > T3 > T4。我们发现，T3 和 T5 的威胁排序发生了反转，由图 3 可知，正是因为客观权重中“载频”属性的权重明显变大，所以该属性的威胁隶属度增大；当偏好系数 $\alpha=0$ 时，表明属性权重完全由熵权法确定，在这个规则下，威胁排序为：T2 > T1 > T5 > T4 > T3。T4 和 T3 目标的威胁排序也发生了反转，由图 3 可知，这是因为“平台类型”属性的客观权重最小，所以进攻夹角小的 T4 目标威胁度提高。同时基于 t_1 时刻数据，利用文献[8]中的方案对目标进行威胁估计，如图 4 所示，文献[8]中基于组合权重但未采用排序算法的方案，其排序结果为：T2 > T1 > T5 > T3 > T4，与本文方案结果一致，说明了本文方案的可行性。但是文献[8]方案生成的威胁值与本文方案相比，目标威胁度差异相对较小，因此本文方案更具区分性。

2) 同一偏好系数，不同独立时刻的评估结果存在差异

以 $\alpha=0.5$ 为例，更直观的威胁排序结果如图 5 所示。由表 10 和图 5 可知相较于 t_2 时刻， t_3 时刻目标 T3 和 T5 的威胁排序发生了反转。由表 3—表 5 的原始数据可得，T2 目标为巡航导弹，其波达角状态一直为“不变”，大概率在持续锁定状态中；进攻夹角绝对值小，且持续减小，角度威胁十分严峻；距离持续缩短；速度持续提升；“载频”属性的客观权重较高，拉高了该属性的综合权重，在该属性表现突出的 T2 目标，其威胁排序保持在第一位。T1 目标为战斗机，平台类型威胁次之，距离逐渐缩短，波达角状态由“瞬变”到“慢变”到“不变”，极大可能中途发现了我方单元，完成了锁定跟踪的过程；同时进攻夹角也持续减小，整体威胁度稳定居于第二。T4 目标为预警机，其距离和进攻夹角一直在增大，速度也处于较低水平，威胁度一直排序最后。T3 和 T5 两个目标在态势动态变化中，排序出现了变化，T5 轰炸机虽在逐渐靠近我方，但绝对距离较远；速度较快；进攻夹角逐渐增大，波达角处于慢变状态，表明已经完成粗跟踪；T3 战斗机逐渐靠近我方单元，速度绝对值较大且逐渐提升，进攻夹角小，波达角状态表明大概率在锁定状态，但是绝对距离和载频属性的威胁隶属度较低，故其威胁程度在 t_1 和 t_2 时刻处于 T5 之后，因速度和进攻夹角属性的威胁隶属度提高到一定程度，故在 t_3 时刻 T3 战斗机的威胁程度超过了 T5 轰炸机。

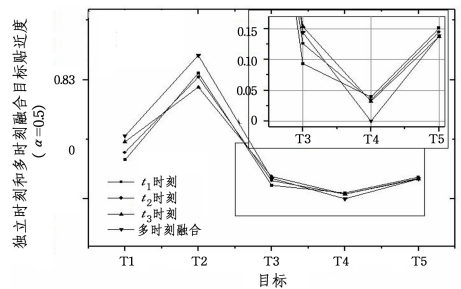


图 5 独立时刻和多时刻融合威胁排序 ($\alpha=0.5$)

Fig. 5 Threat ranking with independent time and multi-time fusion when $\alpha=0.5$

3) 多时刻融合评估更全面合理

由表 10 和 2) 中分析可得，基于独立时刻的数据进行威胁评估，不同时刻的结果不同。可见目标属性动态变化对威胁评估有较大的影响，应综合考虑该动态性，对多时刻数据进行融合分析。由于越接近当前时刻，数据越能反映战场态势，对威胁度的描述越发直接，故依据越接近当前时刻的数据权重越大的原则，以 $\alpha=0.5$ 为例，赋予数据时间权重，融合 3 个时刻的威胁度，得到一组综合排序，T2 > T1 > T5 > T3 > T4，结果见图 5。该排序反映了多态融合、动态演化的威胁排序结果，更加全面合理。

结束语 本文针对辐射源目标威胁评估中属性指标权重设计缺乏全面性、评估缺乏动态性等方面的问题，提出了基于 AHP 与熵权法组合赋权的 TOPSIS 动态辐射源威胁评估方法。构建了针对辐射源威胁评估的指标体系，设计了定性定量指标威胁度量隶属度函数，采用层次分析法和熵权法为目标属性组合赋权，采用泊松分布逆形式为时间序列赋权，基于 TOPSIS 算法进行威胁排序。仿真验证分析表明，所提方法能够综合考虑决策者主观偏好和战场客观事实，并能够融

合多时刻目标动态属性数据,更加科学、全面地对辐射源目标进行威胁评估。

下一步工作重点:1)建立更加完备、合理的辐射源威胁评估指标体系;2)将直觉模糊理论运用到威胁评估中,使评估过程更加柔性化。

参 考 文 献

- [1] TANG Z L,ZHANG A. Survey of methods and theory for battlefield threat assessment[J]. Fire Control & Command Control,2011,36(9):1617-1620.
- [2] WANG W,SHI H Q,WANG L,et al. Aerial target threat assessment method of warship formation collaborative combat[J]. Modern Defence Technology,2014,42(6):79-83.
- [3] SHI J Y,SUN Y C,Y T,et al. Battlefield radar target threat assessment based on AHP-TOPSIS[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2022,43(S2):29-34.
- [4] ZHANG K,LIU P P,KONG W R,et al. Multi-target threat assessment in aircombat based on entropy and VIKOR[C]//2017 Ninth ICACI. Doha,2017.
- [5] XU Y H,CHENG S Y,PANG M Y. Dynamic radiator threat assessment based on CRITIC-TOPSIS[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2020,46(11):2168-2175.
- [6] ZHANG K,ZHOU D Y. Application of TOPSIS based on entropy and GD-AHP in evaluating sequence of air target threat[J]. Journal of System Simulation,2008,20(7):1661-1664.
- [7] NIE X Q,YAN P,WANG B Q,et al. A target threat assessment method for low-altitude aircraft[C]//Journal of Physics: Conference Series,2020.
- [8] LUO R N,HUANG S C,ZHAO Y,et al. Threat Assessment Method of Low Altitude Slow Small(LSS) Targets Based on Information Entropy and AHP[J].Entropy,2021,23(10):1292.
- [9] YU D,WANG H J,LI B Y et al. PROMETHEE-Based Multi-AUV Threat Assessment Method Using Combinational Weights [J]. Journal of Marine Science and Engineering,2023,11(1422):1422.
- [10] ZHANG Y,WANG H W,GUOX T,et al. Emitter Threat Evaluating Method Based on GIFSS and TOPSIS[J]. Fire Control & Command Control,2018,43(4):37-41.
- [11] YANG L Z,HU S L,FENG S M. Dynamic Evaluation and Simulation of Targets Threat Based on Entropy and TOPSIS Method[J]. Ordnance Industry Automation,2020,39(3):53-56.
- [12] JIN Z,LIU H L,LIU D W,et al. Analysis and Assessment of Radar-Countermeasure Target Threaten in Electronic Air-Defense Operation[J]. Fire Control & Command Control,2015,40(5):108-111.
- [13] JIN C,SUN J,WANG Y J,et al. Threat comprehensive assessment for air defense targets based on intuitionistic fuzzy TOPSIS and variable weight VIKOR[J]. System Engineering and Electronics,2022,44(1):172-180.
- [14] YAO C C,SU T L. Evaluation Method of Radar Emitter Threat Based on Fuzzy MAGDM[J]. Shipboard Electronic Countermeasure,2012,35(4):34-38.



ZHANG Yinling, born in 1993, Ph. D. Her main research interests include data fusion and signal processing.