

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0848

基于行为特征的雷达辐射源威胁评估

王俊迪¹, 王星¹, 田元荣^{2,*}, 陈游¹

(1. 空军工程大学航空工程学院, 西安 710038; 2. 国防科技大学电子对抗学院, 合肥 230037)

摘要: 针对当前雷达辐射源威胁评估对精确侦察数据依赖性较大的问题, 提出一种基于行为特征的雷达辐射源威胁评估算法。从辐射源目标行为特征和数据融合理论出发, 建立基于行为特征的辐射源威胁评估体系, 并采用模糊理论和 Vague 数据集对各子行为进行表示; 考虑到指标间的耦合性和空战的高动态性, 利用改进的区间灰色关联度修正初始权重, 建立以距离为自变量的态势状态函数, 为各子行为动态赋权; 采用改进的雷达图法计算威胁目标的威胁程度。仿真结果表明: 所提算法具有较好的准确性和适应性。

关键词: 数据融合; 威胁评估; 行为特征; 动态权重; 区间灰色关联度; 雷达图法

中图分类号: TN974

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2024)10-3196-12

在以超视距攻击为主要作战模式的空战中, 导弹的瞄准和发射依赖自身的雷达辐射源, 因此, 通过评估目标的雷达辐射源威胁程度可以更加直接地反映目标的空战威胁程度。快速、准确的辐射源评估有利于提升载机的战场生存能力, 并帮助飞行员采取恰当的电子对抗手段或战术规避。

威胁评估是各国学者研究的重点, 主要算法包括多属性决策理论^[1-2]、直觉模糊集 (intuitionistic fuzzy sets, IFS)^[3-4]、贝叶斯网络 (Bayesian network, BN)^[5-6]、多目标排序^[7]、机器学习^[8-9]等。Zhao 等^[10]提出了一种基于可能性理论的扩展累积前景交互式多标准决策威胁评估算法。寇英信团队利用灰主成分^[11]、线性回归分析^[12]、动态变权^[13]等算法改进了 CRITIC 或 TOPSIS 算法。Zhang 等^[14]将信息量和信息的不确定性结合起来设计了一种新颖的直觉模糊熵。Zhang 等^[15]将众多专家提供的广义参数矩阵引入广义直觉模糊软集, 形成了群广义直觉模糊软集。Ma 等^[16]提出了基于云模型的目标威胁评估技术。杨远志等^[17]将粗糙集理论引入信息

熵理论, 构建了一套完备的辐射源威胁评估算法。张晓雷等^[18]利用云重心评价法和排队法解决了未来联合防空作战雷达辐射源的威胁评估问题。张莹等^[19]建立了基于改进组合赋权的雷达图辐射源威胁评估法。战场中, 电磁脉冲密度的急剧增加和新体制雷达的广泛应用给单独依靠雷达辐射源信号信息进行威胁评估的算法带来了挑战。针对以上问题, 王星团队^[20-23]提出了将自身雷达探测信息和告警器截获的辐射源信号信息相融合的威胁评估思想。改进的辐射源威胁评估算法融合了雷达探测信息提供的距离、方位等信息, 扩展了威胁评估指标的维度^[24-25], 从而可以更加全面地反映战场的威胁评估。

为减少辐射源威胁评估对侦察参数数据准确度的依赖, 本文在基于数据融合的辐射源威胁评估的思想基础上, 建立了基于行为特征的威胁评估体系, 将复杂空战态势的描述从具体转变为抽象, 从而提升了算法的容错能力。根据建立的行为特征体系, 计算各子行为指标的 Vague 数据集隶属度, 利用动态变权算法和灰色关联度算法优化威胁评

收稿日期: 2022-10-10; 录用日期: 2022-12-25; 网络出版时间: 2023-01-03 17:39

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230103.1419.002

基金项目: 国家自然科学基金 (62001489); 陕西省自然科学基金 (2021JM-225)

*通信作者. E-mail: tianyuanrong20@nudt.edu.cn

引用格式: 王俊迪, 王星, 田元荣, 等. 基于行为特征的雷达辐射源威胁评估 [J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50 (10): 3196-3207.

WANG J D, WANG X, TIAN Y R, et al. Threat assessment of radar radiation sources based on behavioral characteristics [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50 (10): 3196-3207 (in Chinese).

估权重, 并使用改进的雷达图法计算威胁数值, 以得到快速准确的辐射源来进行威胁评估。

1 辐射源行为特征的建立

目前, 对于辐射源威胁评估的研究主要以解析截获的辐射源信号参数为评价指标, 并在此基础上开展威胁等级评定。参数化的评价体系科学、严谨, 能够细致准确地计算出辐射源威胁等

级。但是, 对实际运用而言, 参数体系的威胁评估算法增加了对数据准确性的要求。针对以上问题, 根据空中目标辐射源行为和态势行为的层次特点, 本文建立了基于行为特征的空中目标辐射源威胁评估的层次划分算法, 如图 1 所示。算法为 4 层划分结构, 自下而上逐层抽象, 这 4 层分别为: 脉冲描述、状态描述、雷达/态势子行为描述、威胁度描述。

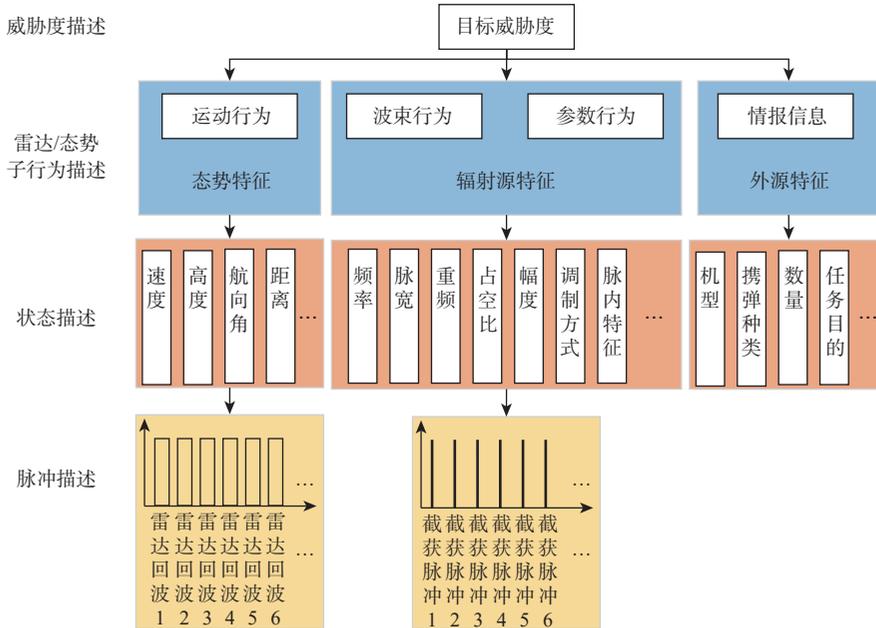


图 1 基于行为特征的威胁评估体系

Fig. 1 Threat assessment system based on behavioral characteristics

1) 脉冲描述。脉冲描述是对雷达脉冲的完整描述, 包含了脉冲信号的参数特征和样式特征。脉冲描述数据被储存到机载设备中, 为后期分析处理提供数据支撑。

2) 状态描述。状态描述是对雷达回波脉冲或侦察截获脉冲的解析, 以此目标的态势信息和雷达辐射源信息。其同时还结合数据链中的其他外源信息, 为威胁评估做支撑。

3) 雷达/态势子行为描述。子行为描述是在状态描述的基础上对目标进行更加抽象的描述, 从而更直观地表达目标的行动意图。

从行为层面上计算辐射源威胁度实际上是对目标从具体转变为抽象的描述, 其聚焦于能够反映威胁等级的核心特征。相较于辐射源参数化描述, 行为描述降低了对测量数据精度的要求^[24], 允许数据少量缺失和模糊。作为抽象的表征方式, 一个行为特征通常包括多种不同的参数特征, 以有效减小计算的规模, 并且具备较强的泛化能力和通用性^[25]。

2 基于 Vague 数据集的行为隶属度计算

利用目标的行为特征计算威胁度需要获得各子行为的威胁数值。由于各子行为是抽象概念, 无法对其直接进行量化, 因此本文使用模糊理论和 Vague 数据集对各子行为进行表示。模糊理论能够反映指标的不确定性, 不需要进行精确的描述。Vague 数据集通过隶属度和非隶属度对模糊概念进行描述, 可以体现出指标的模糊性和不确定性。概念定义如下:

定义 1 在论域 X 中, 对模糊集 \tilde{A} 用 Vague 数据集表示, $\mu_{\tilde{A}}(x)$ 为由支持证据所导出的肯定隶属度下界, $\nu_{\tilde{A}}(x)$ 为由反对证据所导出的否定隶属度下界, 且 $\mu_{\tilde{A}}(x) + \nu_{\tilde{A}}(x) \leq 1$, $\pi_{\tilde{A}} = 1 - \mu_{\tilde{A}}(x) - \nu_{\tilde{A}}(x)$ 表示集合 A 的不确定或犹豫度, 表示为 $\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x), \nu_{\tilde{A}}(x)) | x \in X\}$ 或 $[\mu_{\tilde{A}}(x), 1 - \nu_{\tilde{A}}(x)]$ 。

定义 2 设 \tilde{A} 、 \tilde{B} 为论域 X 上的 2 个用 Vagues 数据集表示的模糊集合, 令 $\tilde{A} \cup \tilde{B}$ 、 $\tilde{A} \cap \tilde{B}$ 分别表示模糊集合 \tilde{A} 与 \tilde{B} 的交集、并集, 对应的隶属度函数分别为

$\mu_{\bar{A} \cup \bar{B}}$ 、 $\mu_{\bar{A} \cap \bar{B}}$, 对于 X 的任意元素 x , 定义为

$$\begin{cases} \mu_{\bar{A} \cup \bar{B}} \stackrel{\text{def}}{=} \max(\mu_{\bar{A}}(x), \mu_{\bar{B}}(x)) \\ v_{\bar{A} \cup \bar{B}} \stackrel{\text{def}}{=} \min(v_{\bar{A}}(x), v_{\bar{B}}(x)) \\ \mu_{\bar{A} \cap \bar{B}} \stackrel{\text{def}}{=} \min(\mu_{\bar{A}}(x), \mu_{\bar{B}}(x)) \\ v_{\bar{A} \cap \bar{B}} \stackrel{\text{def}}{=} \max(v_{\bar{A}}(x), v_{\bar{B}}(x)) \end{cases} \quad (1)$$

定义 3 由于数据在不同指标中的数值大小相差较大, 因此为统一各指标下数值大小, 对数据进行归一化处理:

$$x' = \frac{x - x_{\max}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

式中: $x_{\max} = \max(x)$, $x_{\min} = \min(x)$ 。

2.1 运动行为隶属度计算

目标的运动行为是在速度、高度、距离、角度等雷达探测信息参数的基础上抽象而来的行为特征。结合超视距空战战术的特点和战机运动规律, 将运动行为的模糊评价语言划分为 5 个等级。设目标运动行为的行为论域 $N_d = [0, 1]$, 其包括高速远离模糊子集 N_{d1} 、中低速远离模糊子集 N_{d2} 、盘旋模糊子集 N_{d3} 、中低速接近模糊子集 N_{d4} 、高速接近模糊子集 N_{d5} , 隶属度函数为

$$\begin{cases} \mu_{N_d}(l, s) = (\mu_{L(l)} + \mu_{S(s)})/2 \\ \mu_{L(l)} = \exp\left\{-\frac{((1-l)-(i-1)/2)^2}{2\delta_1^2}\right\} \quad i \in (1, 2, 3) \\ \mu_{S(s)} = \exp\left\{-\frac{(s-(i-1))^2}{2\delta_2^2}\right\} \quad i \in (1, 2) \end{cases} \quad (3)$$

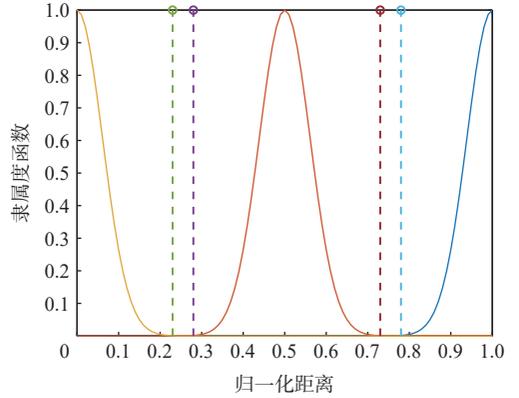
式中: $L(l)$ 和 $S(s)$ 为 2 个模糊集, $l \in [0, 1]$ 为归一化距离, $s \in [0, 1]$ 为归一化速度。根据文献 [11-13, 26] 中对速度、距离、高度各隶属度函数的分析, 求出式 (3) 中的 $\delta_1 = 0.073$ 、 $\delta_2 = 0.105$, $L(l)$ 和 $S(s)$ 的隶属度曲线如图 2 所示。

根据式 (3) 可以得出目标运动行为的各模糊子集对应的 Vague 数据集数值, 如表 1 所示。

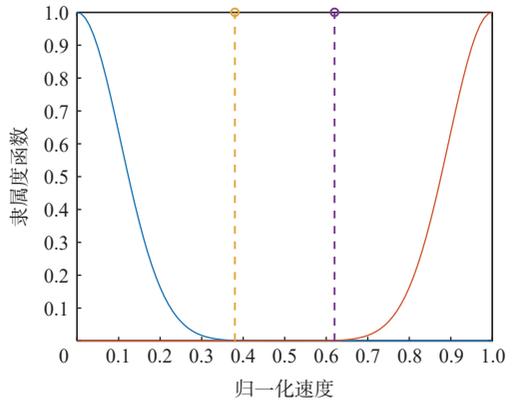
2.2 辐射源行为隶属度计算

雷达行为被定义为一部雷达外显出来的所有特征及规律, 包括信号的变化特征及雷达工作状态的转移特点和规则等。常见的雷达子行为包括波形行为、波束行为、天线扫描方式和占空比行为等。在现代空战中, 机载雷达辐射源的波束行为和参数行为与火力方面的联系最为紧密, 因此, 本文选取这 2 种行为作为雷达行为的描述特征。

波束行为主要指目标机载雷达窄波束在指定空域的扫描方式。辐射源波束的变化方式通常有 3 种: 方位不变、方位瞬变和方位慢变。辐射源波束方位不变, 表示已锁定或跟踪到目标; 方位慢变和瞬变表示敌攻击意图不明确或处于搜索状态。



(a) $L(l)$ 隶属度曲线



(b) $S(s)$ 隶属度曲线

图 2 $L(l)$ 和 $S(s)$ 隶属度曲线

Fig. 2 The membership curves of $L(l)$ and $S(s)$

表 1 运动行为模糊评价语言与 Vague 转换

Table 1 Fuzzy evaluation language of motor behavior and Vague transition

威胁等级	Vague数据集数值
高速远离	[0,0.305]
中低速远离	[0.31,0.615]
盘旋	[0.28,0.73]
中低速接近	[0.39,0.69]
高速接近	[0.7,1]

根据这一规律, 将雷达辐射源波束行为划为 3 个模糊等级。设目标辐射源波束行为论域 $N_b = [0, 1]$, 其包括短暂驻留模糊子集 N_{b1} 、循环驻留模糊子集 N_{b2} 、长时间驻留模糊子集 N_{b3} 。为客观计算波束行为隶属度, 对雷达处理过程进行简要分析。

在雷达恒虚警处理中, 只有当接收单元中的回波功率超过门限, 才会检测到目标。令 P_{Tc} 表示测试单元中的功率, T_{CACFAR} 表示自适应门限, k_2 用于设定所需虚警率的因子, P_m 表示第 m 个距离单元的功率, 目标的检测准则可表示为

$$P_{Tc} > T_{CACFAR} = \frac{k_2}{M} \sum_{m=1}^M P_m \quad (4)$$

P_m 与积累脉冲数有关, 在改善因子 0.8 dB 下的经验表达为

$$I(n_p) = 6.79(1 + 0.253P_D) \left[1 + \frac{\lg(1/P_{fa})}{46.6} \right] \lg n_p \cdot [1 - 0.14 \lg n_p + 0.018 310(\lg n_p)^2] \quad (5)$$

式中: P_D 为检测概率; P_{fa} 为虚警率; n_p 为脉冲数。

改善因子与积累脉冲数的关系如图 3 所示。

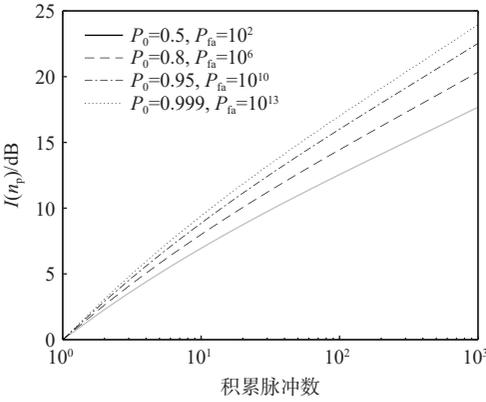


图 3 改善因子与积累脉冲数的关系曲线

Fig. 3 Relationship between improvement factor and accumulated pulse number

对于半球形空域覆盖, 需要的独立波束位置数 n_p 为

$$n_p = \frac{2\pi}{\theta_{AZ}\theta_{EL}} \quad (6)$$

式中: $\theta_{AZ} = 3 \text{ dB}$ 表示方位角波束带宽, rad; $\theta_{EL} = 3 \text{ dB}$ 表示俯仰角波束带宽, rad。

对于恒定脉冲重频雷达, 波束驻留时间为

$$T_d = 1/F_s \cdot n_p \quad (7)$$

式中: F_s 为信号脉冲频率。

根据式(4)~式(7), 目标辐射源波束行为模糊集隶属度函数为

$$\mu_{N_{bi}(n)} = \exp \left\{ -\frac{[t - (i-1)/2]^2}{2\delta_3^2} \right\} \quad i \in (1, 2, 3) \quad (8)$$

式中: $\delta_3 = 0.078 5$; $t \in [0, 1]$ 为归一化驻留时间, N_{bi} 函数隶属度曲线如图 4 所示。

根据式(8)可以得出目标波束行为 d 的各模糊

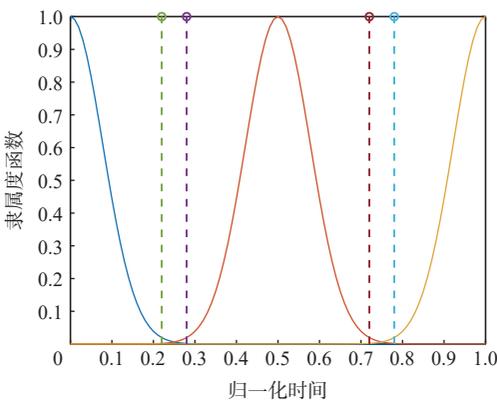


图 4 $N_{bi}(i=1, 2, 3)$ 隶属度曲线

Fig. 4 The membership curve of $N_{bi}(i=1, 2, 3)$

子集所对应的 Vague 数据集数值, 如表 2 所示。

表 2 波束行为模糊评价语言与 Vague 转换
Table 2 Fuzzy evaluation language of beam behavior and Vague transition

威胁等级	Vague 数据集数值
短暂驻留	[0, 0.28]
循环驻留	[0.22, 0.78]
长时间驻留	[0.72, 1]

参数行为主要指与导弹发射息息相关的雷达参数的变化, 主要包括信号载频 (radio frequency, RF)、信号脉宽 (pulse width, PW) 和信号重频 (pulse repetition interval, PRI)。载频影响目标速度信息的获取, 雷达系统主要通过多普勒频移求解探测目标的速度和距离信息, 速度为 V_r 的探测目标的多普勒频移 f_d 为

$$f_d = \frac{2V_r}{\lambda} = \frac{2V_r f_{ix}}{c} \quad (9)$$

式中: c 为光速, λ 为信号波长; f_{ix} 为信号载频。

根据式(9), 可以看出, 多普勒频移 f_d 与载频成正比。目标速度分辨率 ΔV_r 与载频的关系为

$$\Delta V_r = \frac{\lambda \Delta f_d}{2} = \frac{\lambda c}{2T_d f_{ix}} \quad (10)$$

速度分辨率与载频成反比, 给定相参周期时, 雷达的载频越高, 得到的速度分辨率越好。而给定速度分辨率时, 载频越高, 相参处理周期越短, 可获得更高的数据率。因此, 雷达的载频越高, 对于探测目标的速度信息掌握越准确, 对探测目标而言, 威胁程度越大。设目标辐射源载频行为论域为 $N_f = [0, 1]$, 其低载频模糊子集为 N_{f1} 、中载频模糊子集为 N_{f2} 、高载频模糊子集为 N_{f3} , 其隶属度函数为

$$\mu_{N_{fi}} = \exp \left\{ -\frac{[f - (i-1)/2]^2}{2\delta_4^2} \right\} \quad i \in (1, 2, 3) \quad (11)$$

式中: $\delta_4 = 0.059 8$; $f \in [0, 1]$ 为归一化频率。

N_{fi} 隶属度曲线如图 5 所示。

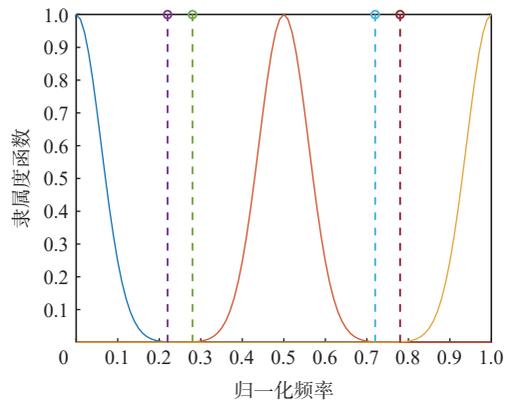


图 5 $N_{fi}(i=1, 2, 3)$ 隶属度曲线

Fig. 5 The membership curve of $N_{fi}(i=1, 2, 3)$

雷达另2个重要的参数是脉宽和重频,其影响着雷达测距精度 ΔR 和最大可测距离 R_{\max} ,关系式为

$$\begin{cases} \Delta R = \frac{cT_{PW}}{2} \\ R_{\max} = \frac{c}{2F_s} = R_{\max(i)} \prod_{i=2}^k \frac{R_{\max(i)}}{\Delta R_{\max(i)}} \end{cases} \quad (12)$$

为综合考虑脉宽和重频对威胁程度的影响,本文引入雷达信号占空比(duty ratio, DR),表示为

$$D = T_{PW}F_s \quad (13)$$

设目标占空比行为论域 $N_{DR} = [0, 1]$,其低占空比模糊子集 N_{DR1} 、高占空比模糊子集 N_{DR2} ,隶属度函数为

$$\mu_{N_{DRi}(\tau)} = \exp\left\{-\frac{[\tau - (i-1)/2]^2}{2\delta_5^2}\right\} \quad i \in (1, 2) \quad (14)$$

式中: $\delta_5 = 0.15$; $\tau \in [0, 1]$ 为归一化时间。

N_{DRi} 隶属度曲线如图6所示。

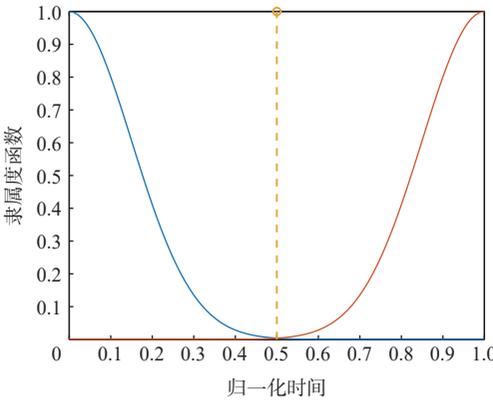


图6 $N_{DRi}(i=1, 2)$ 隶属度曲线

Fig. 6 The membership curve of $N_{DRi}(i=1, 2)$

辐射源参数行为的模糊集可由载频数据集和占空比数据集来表达:

$$N_{c(i \times j)} = N_{fi}N_{DRj} \quad i \in (1, 2, 3), j \in (1, 2) \quad (15)$$

根据式(15)可以得出目标参数行为各模糊子集对应的Vague数据集数值,如表3所示。

表3 参数行为模糊评价语言与Vague转换

Table 3 Fuzzy evaluation language of parameter behavior and Vague transition

威胁等级	Vague数据集数值
低载频低占空比	[0,0.11]
低载频高占空比	[0,0.22]
中载频低占空比	[0,0.36]
中载频高占空比	[0.14,0.72]
高载频低占空比	[0,0.5]
高载频高占空比	[0.39,1]

2.3 情报信息

情报信息主要是指其他数据源传输的关于目标类型、数量等先验数据,这些数据通过数据链传输威胁评估中心。在空战中,目标的机型属性和载弹类型是威胁评估的重要因素。设机载类型论域

$N_j = [0, 1]$,根据目前的机型划分其随队支援飞机模糊子集 N_{j1} 、三代战机模糊子集 N_{j2} 、四代战机模糊子集 N_{j3} ,其隶属度函数为

$$\mu_{N_{ji}} = \kappa_c \kappa_e \exp\left\{-\frac{[\kappa_m - (i-1)/2]^2}{2\delta_6^2}\right\} \quad i \in (1, 2, 3) \quad (16)$$

式中: κ_m 为战机的机动性能; κ_c 为各类战机探测能力; κ_e 为各类战机的电子对抗能力。

N_{ji} 隶属度曲线如图7所示。

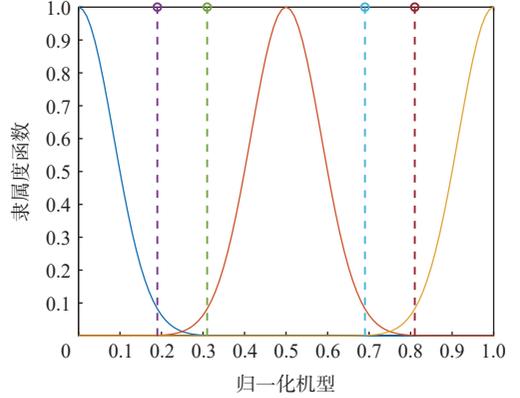


图7 $N_{ji}(i=1, 2, 3)$ 隶属度曲线

Fig. 7 The membership curve of $N_{ji}(i=1, 2, 3)$

设导弹类型论域 $N_k = [0, 1]$,根据导弹类型划分其对地制导炸弹模糊子集 N_{k1} 、反辐射导弹模糊子集 N_{k2} 、红外制导导弹模糊子集 N_{k3} 、雷达制导导弹模糊子集 N_{k4} ,其隶属函数为

$$k\mu_{N_{ki}} = \begin{cases} 0.9 & \text{雷达制导导弹} \\ 0.7 & \text{红外制导导弹} \\ 0.2 & \text{反辐射导弹} \\ 0.1 & \text{对地制导炸弹} \end{cases} \quad (17)$$

不同类型的战机可以加装不同类型的导弹,此时,其威胁评估模糊集满足:

$$N_{U(i \times j)} = N_{ki}N_{Nj} \quad i \in (1, 2, 3, 4), j \in (1, 2, 3) \quad (18)$$

3 子行为权重的确定

定义4 设 $\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x), v_{\tilde{A}}(x)) | x \in X\}$ 为论域 X 上的Vague数据集,对于 $\forall q_a, p_a > 0$,称式(19)为 \tilde{A} 的广义模糊熵^[27]:

$$\begin{aligned} E_{p_a, q_a}(\tilde{A}) &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (1 - |\mu_{\tilde{A}}(x_i) - v_{\tilde{A}}(x_i)|^{p_a}) \cdot \\ &\ln[e + |\mu_{\tilde{A}}(x_i) - v_{\tilde{A}}(x_i)|^{p_a} (1 - \mu_{\tilde{A}}(x_i) - v_{\tilde{A}}(x_i))^{q_a}] = \\ &\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (1 - |\mu_{\tilde{A}}(x_i) - v_{\tilde{A}}(x_i)|^{p_a}) \cdot \\ &\ln[e + |\mu_{\tilde{A}}(x_i) - v_{\tilde{A}}(x_i)|^{p_a} \pi_{\tilde{A}}^{q_a}(x_i)] \end{aligned} \quad (19)$$

式中: q_a 和 p_a 为广义模糊熵系数。可以根据决策者的风险态度设定 q_a 和 p_a 的值,本文选取决策者风险态度中立且Vague模糊数据集差异化信息凸显的系数 $p_a = 0.4559$ 和 $q_a = 0.0997$ 。

熵权法是一种只与决策信息有关的客观赋权算法, 其根据各属性提供的信息量的大小确定各属性权值。本文采用熵权法求解子行为权重, 同时采用式(18)计算 Vague 数据集的模糊熵。

在决策问题中, 应遵循的一个重要原则是减少整体系统的不确定性。根据该原则, 本文建立以下非线性规划模型求解最优权重:

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^n (w_i^0)^2 (1 - E_{ip_a, q_a}(\tilde{A}))^{-1} \\ \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^n w_i^0 = 1 \end{cases} \quad (20)$$

通过对式(19)求解得出目标的初始属性权重:

$$w_i^0 = \frac{(1 - E_{jp_a, q_a}(\tilde{A}))}{\sum_{j=1}^n (1 - E_{jp_a, q_a}(\tilde{A}))} \quad (21)$$

在建立评估体系的过程中, 不可避免地会引入主观因素, 且建立的各子行为之间存在一定的关联性。为减少各指标间的关联性, 保证各子行为的独立性, 本文利用区间灰色关联度算法减少了各子行为间的关联度。为准确度量模糊集之间的距离, 本文采用改进的相似度表达式, 如下:

$$d_{0sij}(t) = \frac{1}{2} |\mu_{a_{ij}^0}(x, t) - \mu_{a_{ij}^s}(x, t)| + \frac{1}{2} |v_{a_{ij}^0}(x, t) - v_{a_{ij}^s}(x, t)| + \frac{1}{6} |\pi_0(x, t) + \pi_s(x, t)| \quad (22)$$

式中: $\mu_{a_{ij}^0}$ 表示隶属度矩阵 u 的第 i 行, 第 j 列的数值; $(\mu_{a_{ij}^s})$ 表示参考隶属度矩阵 u 的第 i 行, 第 j 列的数值; $(v_{a_{ij}^0})$ 表示隶属度矩阵 v 的第 i 行, 第 j 列的数值; $(v_{a_{ij}^s})$ 表示参考隶属度矩阵 v 的第 i 行, 第 j 列的数值。

对求得的相似度 $d_{0sij}(t)$ 进行归一化处理, 得到 $D_{0sij}(a_{ij}^0(t), a_{ij}^s(t))$, 则灰色关联系数 $\gamma_{ij}(A_0(t), A_1(t))$ 为

$$\gamma_{ij}(A_0(t), A_1(t)) = \left(\min_i \min_j \min_k \{D_{0sij}(a_{ij}^0(t), a_{ij}^s(t))\} + \rho \max_i \max_j \max_k \{D_{0sij}(a_{ij}^0(t), a_{ij}^s(t))\} \right) / \left(D_{0sij}(a_{ij}^0(t), a_{ij}^s(t)) + \rho \max_i \max_j \max_k \{D_{0sij}(a_{ij}^0(t), a_{ij}^s(t))\} \right) \quad (23)$$

式中: $\rho \in [0, 1]$ 为分辨系数, 一般取 0.5。

将 2 个因素的关联度假设成 2 个集合的交集, 引入集合运算。用 w_i 、 w_j 表示两两联系的因素权重, 则修正后的权重表示为

$$w_i + w_j - r_{ij} = \left(w_i - \frac{1}{2} r_{ij} \right) + \left(w_j - \frac{1}{2} r_{ij} \right) \quad (24)$$

通常, 威胁评估属性指标权重不变, 考虑到空战态势变化与权重之间的关联性, 本文采用动态权

重理论。动态权重是指通过实时的战场态势改变属性指标权重, 主要算法是构造状态变权重向量 $S = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 与初始权重 w 的 Hadamard 乘积, 可得

$$w' = \frac{wS}{\sum_{i=1}^m w_i S_i} = \frac{[w_1 S_1, w_2 S_2, \dots, w_m S_m]}{\sum_{i=1}^m w_i S_i} \quad (25)$$

状态权重向量 $S = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 主要由空战态势构建的均衡函数 $B(x)$ 求导得出, 其计算公式为

$$S = \frac{\partial B(x)}{\partial x} \quad (26)$$

式中: $B(x)$ 为构建空战场的威胁目标均衡函数及 j 动态权重的核心, 本文根据现代空战的规律和飞行员判断准则构建了基于距离因素的均衡函数。

对于情报行为, 距离因素对其数值大小的影响, 采用一阶线性函数表达其均衡函数, 则第 j 个威胁目标情报行为与距离 L_j 的均衡函数 B_{Uj} 为

$$B_{Uj} = L_j \quad (27)$$

对于运动行为, 随着距离的缩进, 其影响程度越来越小, 主要作用在于构成攻击的先决条件, 其均衡函数为非线性函数。则第 j 个威胁目标的运动行为与距离 L_j 的均衡函数 B_{dj} 为

$$B_{dj} = 2L_j + \frac{1}{2} \alpha_1 (L_j / L_{jmmax})^2 + \alpha_2 \ln(L_j / L_{jmmax}) \quad (28)$$

式中: α_1 和 α_2 为运动行为的变权重, 可以根据指挥系统或飞行员实时确定; L_{jmmax} 为第 j 个威胁目标导弹最大攻击距离。

作战双方从远距不断到近距的过程中, 逐渐进入空空导弹发射范围内, 此时, 雷达辐射行为中的波束行为和参数行为充分体现了威胁目标的攻击意图, 对威胁程度的影响较大。则第 j 个威胁目标辐射源行为与距离 L_j 的均衡函数 B_{Rj} 为

$$B_{Rj} = -\frac{\varepsilon_j L_{jmmax}}{\alpha_3} e^{\alpha_3(1-L/L_{jmmax})} \quad (29)$$

式中: α_3 为雷达辐射源行为的变权重, 可以根据指挥系统或飞行员实时确定; ε_j 为第 j 个的威胁目标的电子设备作战性能。

综上所述, 各指标的动态权重表示为

$$w'(L) = \begin{cases} \frac{w_i^0 [2 + \alpha_1 (L_j / L_{jmmax}) + \alpha_2 (L_j / L_{jmmax})]}{\sum_{i=1}^n w_i^0 S_i} & \text{运动行为} \\ \frac{w_i^0 [\varepsilon_j e^{\alpha_3(1-L/L_{jmmax})}]}{\sum_{i=1}^n w_i^0 S_i} & \text{辐射源行为} \\ \frac{w_i^0}{\sum_{i=1}^n w_i^0 S_i} & \text{情报行为} \end{cases} \quad (30)$$

4 基于改进雷达图法的威胁数值计算

根据各子行为的权重划分不同指标扇形区域大小,为避免指标顺序的差异导致连接的多边形形状不同,本文用扇形区域取代原始的三角区域,算法的具体实现步骤如下:

步骤1 根据属性指标权重,按照 $\theta_j = 360^\circ \cdot w_j(l), j \in (1, 2, \dots, n)$ 计算各指标的扇形角度。

步骤2 确定指标轴。以平行于水平线为起始轴,根据 n 个指标的角度,逆时针画出其余 $n-1$ 条射线,如图8所示。

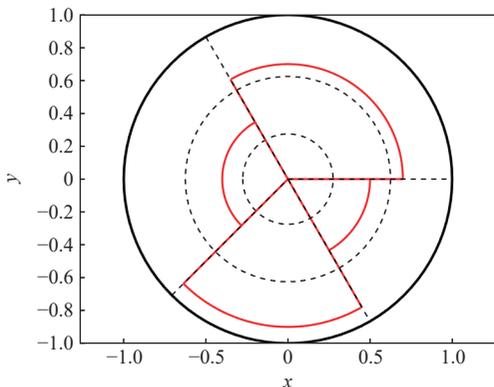


图8 多扇形雷达

Fig. 8 Multi-sector radar chart

步骤3 绘制多扇形雷达图。根据Vague数据集的距离式(22)计算目标的各指标属性到圆心的距离 d_k 。以圆心 O 为起点、以距离 d_k 为半径逆时针画扇形,分别计算各扇形弧长总和 C' 和面积总和 S' ;

$$\begin{cases} S' = \sum_{i=1}^n \pi d_i^2 \frac{\theta_i}{2\pi} = \sum_{i=1}^n \pi d_i^2 w_i \\ C' = \sum_{i=1}^n 2\pi d_i \frac{\theta_i}{2\pi} = \sum_{i=1}^n 2\pi d_i w_i \end{cases} \quad (31)$$

步骤4 计算辐射源威胁评估值 K ,参照评价思想和相似原理,构建面积评价指标和周长评价指标:

$$\begin{cases} \beta_1 = S'/\pi \\ \beta_2 = 1 + \frac{|L(2\pi\sqrt{S'\pi})^{-1} - S'|}{L(2\pi\sqrt{S'/\pi})^{-1}} \\ K = \sqrt{\beta_1\beta_2} \end{cases} \quad (32)$$

5 仿真实验

5.1 某空战态势场景构建

构建超视距作战的典型空空对抗作战场景:蓝方6架战机对抗红方带有信息支援情况下的5架战机,如图9所示。红方根据卫星侦察、地面预警探测组网系统等获取蓝方情报信息,如表4所示。

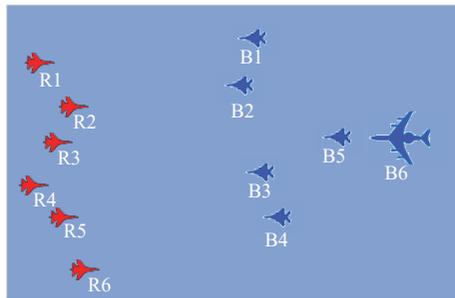


图9 空空作战场景示意图

Fig. 9 Schematic diagram of air-to-air combat scenario

表4 蓝方情报信息

Table 4 Blue intelligence information

编号	飞机型号	载弹类型	空空弹最大射程/km
B1	F-22战机	空对空红外制导导弹、空对空雷达制导导弹	150
B2	F-15战机	空对空红外制导导弹、空对空雷达制导导弹	100
B3	F-15战机	空对空红外制导导弹、空对空雷达制导导弹	100
B4	F-22战机	空对空红外制导导弹、空对空雷达制导导弹	150
B5	F-22战机	空对地反辐射导弹、空对空雷达制导导弹	150
B6	预警机		

5.2 基于行为特征的单机威胁评估仿真

红方某一战机在某一时间段内的雷达告警接收机接收到蓝方的辐射源特征参数行为和机载雷达探测的运动行为信息,如表5所示,表中, T_s 为辐射源照射开始时间, T_e 为辐射源照射结束时间, N 为积累脉冲个数。

根据表5中的数据 and 式(3)~式(18),可得蓝

方各目标行为Vague数据集,如表6所示。

根据式(21)~式(23),可得各属性指标的关联系数矩阵 γ_{ij} ,如图10所示。可以看出,波束行为和参数行为的关联度较大,情报行为和其他属性关联度较小。

根据式(24)和表6,可计算出修正后的初始权重,如表7所示。

表 5 蓝方行为指标数据
Table 5 Blue square behavior indicator data

编号	运动行为	载频/MHz	占空比/%	$T_s/\mu s$	$T_c/\mu s$	N
B1	中低速接近	9 800	40	1	3 071	512
B2	中低速接近	9 200	20	7 910.00	9 446.00	1 024
B3	高速接近	9 100	20	4 510	6 097.2	512
B4	高速接近	9 500	40	3	3 071	1 024
B5	盘旋	9 000	20	1 340.2	2 799.4	512
B6	盘旋	1 500	2	4 670	11 070.00	64

表 6 蓝方行为模糊评价语言与 Vague 转换
Table 6 Fuzzy evaluation language of blue square behavior and Vague transition

编号	运动行为	波束行为	参数行为	情报行为
B1	[0.39, 0.69]	[0.22, 0.78]	[0.39, 1]	[0.82, 1]
B2	[0.39, 0.69]	[0.72, 1]	[0.39, 1]	[0.56, 0.76]
B3	[0.7, 1]	[0.22, 0.78]	[0, 0.5]	[0.56, 0.76]
B4	[0.7, 1]	[0.72, 1]	[0.39, 1]	[0.82, 1]
B5	[0.28, 0.73]	[0, 0.28]	[0, 0.5]	[0.72, 0.86]
B6	[0.28, 0.73]	[0, 0.28]	[0, 0.36]	[0, 0.23]

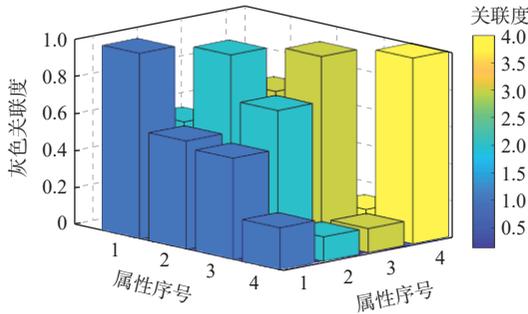


图 10 属性指标间的关联程度

Fig. 10 The degree of correlation between attribute indicators

表 7 行为评估初始权重

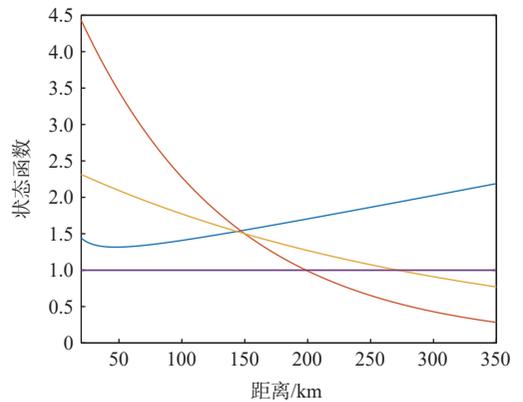
Table 7 Initial weights of behavior evaluation

行为	权重
运动行为	0.251 3
波束行为	0.260 6
参数行为	0.312 3
情报行为	0.175 8

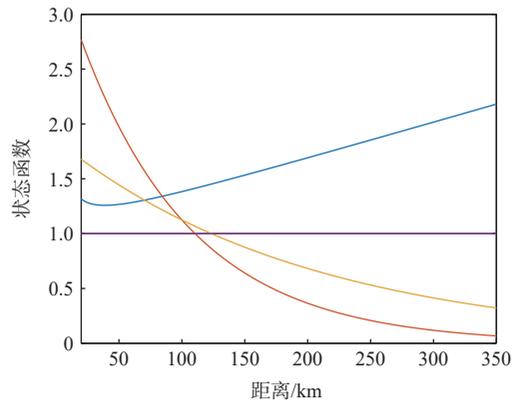
根据变权理论和各类型战机的性能参数及先验情报信息, 其状态函数的变化趋势如图 11 所示。

根据式 (30), 权重随距离的变化趋势如图 12 所示。

由图 11 和图 12 可以看出, 大于 150 km 时, B1 和 B4 的运动行为的指标权重大于辐射源行为指标权重。小于 150 km 时, B1 和 B4 的运动行为的指标权重小于辐射源行为指标权重。战机运动行为的指标权重和辐射源行为指标权重大小转折点在 150 km 处。对于威胁目标 B2 和 B3 战机, 运动行为



(a) B1和B4状态函数变化



(b) B2和B3状态函数变化

— 运动行为 — 波束行为
— 参数行为 — 情报行为

图 11 状态函数的变化趋势

Fig. 11 Change trend of state function

指标权重和辐射源指标权重的转折点大约在 100 km 处。与情报信息相比, 属性权重的变化转折距离与各战机挂载导弹的最大发射距离大致相同。

分别选取距离威胁目标 350 km 和 50 km 处的属性权重, 画出改进雷达图, 如图 13 和图 14 所示。

根据式 (21) 和式 (32) 计算出各威胁目标的威胁度, 如表 8 所示, 威胁度排序示意图如图 15 所示。

由表 8 和图 15 可以看出, 在 350 km 时, B3、B4 整体编队威胁度高于 B1、B2 整体编队, 与态势信息相比, B3、B4 整体编队的运动行为表现高速接近。在 50 km 时, B4 的威胁度高于同编队的 B3, B2 的威胁度高于同编队的 B1, 与态势信息相比,

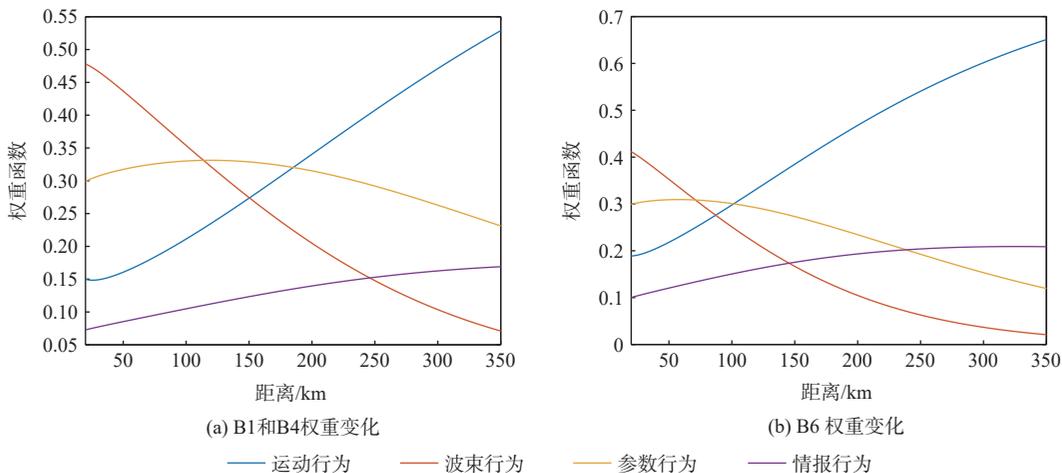


图 12 子行为权重的变化趋势

Fig. 12 Change trend of sub-behavior weights

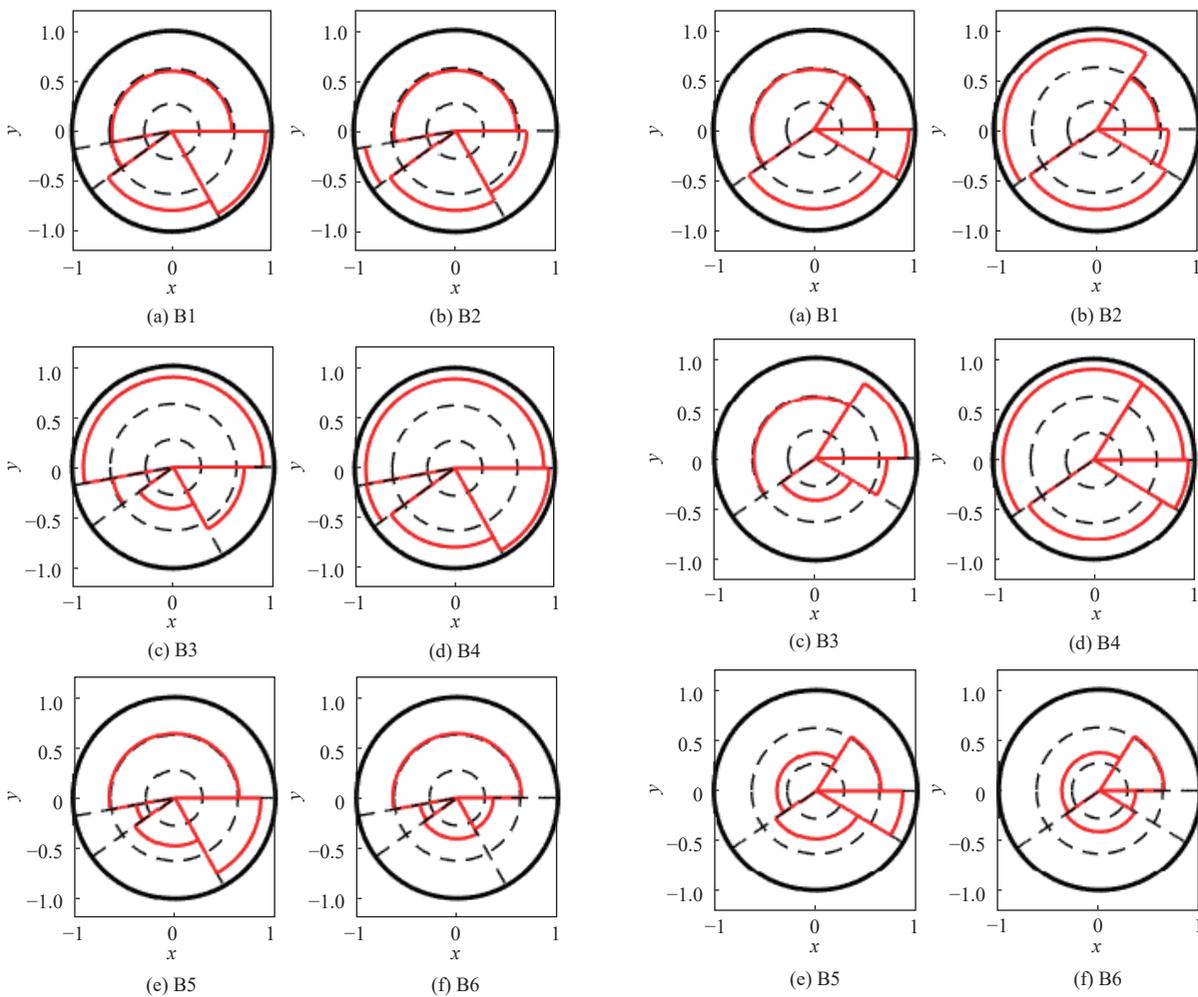


图 13 350 km 处各威胁目标雷达图

图 14 50 km 处各威胁目标雷达图

Fig. 13 Radar map of each threat target at 350 km

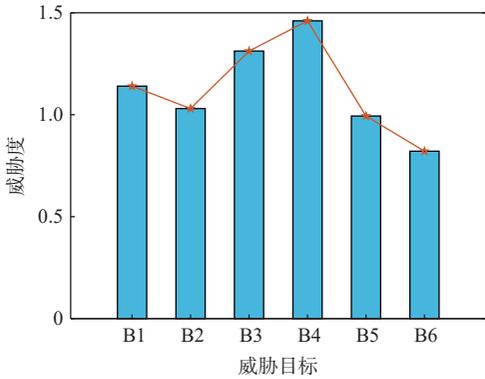
Fig. 14 Radar map of each threat target at 50 km

表 8 各威胁目标威胁度

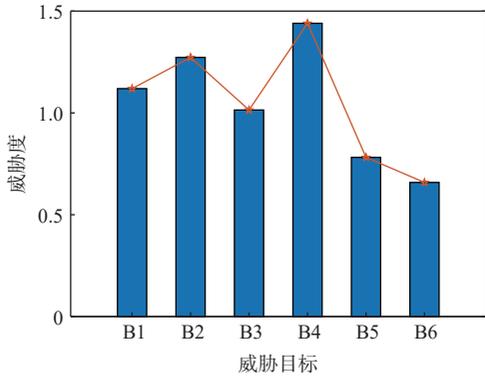
Table 8 Threat level of each threat target

目标距离/km	威胁度					
	B1	B2	B3	B4	B5	B6
350	1.14	1.03	1.31	1.46	0.99	0.821
50	1.119	1.272	1.014	1.44	0.781	0.658

B4、B2 的辐射源行为极有可能进入跟踪状态。对比 350 km 和 50 km 的排序结果,发现在空对空制导导弹攻击范围之外时,威胁目标的威胁度主要取决于运动行为;当在空空导弹攻击范围之内时,威胁目标的威胁度主要取决于辐射源行为。



(a) 350 km 威胁度柱状图



(b) 50 km 威胁度柱状图

图 15 目标威胁度柱状图

Fig. 15 Histogram of target threat degree

为更好地验证本文算法的正确性和合理性, 将其与常权初始权重算法^[20]、贝叶斯算法^[22]和 TOPSIS 算法^[28]进行对比, 对比结果如图 16 所示。

从结果中可以看出, 常权初始数量算法计算出的 B1 和 B2 的威胁程度相同, TOPSIS 算法和本文算法在 50 km 处的威胁排序相同。这是因为: TOPSIS 算法主要计算数据的相对位置关系, 因此容易受到指标间的关联影响。由于本文中有 2 个属性指标属于辐射源因素, 所以在计算中加大了辐射源的权

重。相较于 TOPSIS 算法和贝叶斯算法, 本文算法能够使用精确度较低的数据得到相同的威胁评估, 同时还可以根据态势的变化更加准确地反映出各目标的威胁程度。

6 结 论

1) 本文建立了基于行为特征的威胁评估层次指标模型, 将对威胁目标的速度、高度、航向角等参数描述转化为态势行为、辐射源行为和情报行为的抽象描述, 具备较强的泛化能力和通用性。

2) 本文建立了各子行为特征的模糊子集和隶属度函数, 通过仿真可知, 隶属度函数能够准确地定量描述每个行为特征的威胁程度, 相较于传统算法, 本文算法减小了对数据精确度的依赖。

3) 本文建立的特征权重计算算法能够消除特征之间的耦合性, 使得威胁度计算结果更为精确。同时, 能够准确反映现代空战的规律和飞行员判断准则, 可以根据态势的变化更加准确地反映各目标的威胁程度。

4) 本文算法为雷达辐射源威胁评估提供了新的思路, 并具有一定的普适性。本文主要针对空空作战场景, 在应用于其他作战场景时需要进一步优化和修正, 以保证算法的准确性。

参考文献 (References)

- [1] ZHANG K, KONG W R, LIU P P, et al. Assessment and sequencing of air target threat based on intuitionistic fuzzy entropy and dynamic VIKOR[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2018, 29(2): 305-310.
- [2] DENG Y. A threat assessment model under uncertain environment [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015, 2015: 878024.
- [3] ZHAO R J, YANG F B, JI L N, et al. Dynamic air target threat assessment based on interval-valued intuitionistic fuzzy sets, game theory, and evidential reasoning methodology[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021: 6652706.
- [4] LU Y L, LEI X L, ZHOU Z P, et al. Approximate reasoning based on IFRS and DS theory with its application in threat assessment[J]. IEEE Access, 2020, 8: 160558-160568.
- [5] DI R H, GAO X G, GUO Z G, et al. A threat assessment method for unmanned aerial vehicle based on Bayesian networks under the condition of small data sets[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018, 2018: 8484358.
- [6] HUANG L D, CAI G, YUAN H Y, et al. A hybrid approach for identifying the structure of a Bayesian network model[J]. Expert Systems with Applications, 2019, 131: 308-320.
- [7] GAO Y, LI D S, ZHONG H. A novel target threat assessment method based on three-way decisions under intuitionistic fuzzy multi-attribute decision making environment[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2020, 87: 103276.
- [8] 翟翔宇. 基于全连接神经网络的空战目标威胁评估方法研究[D].

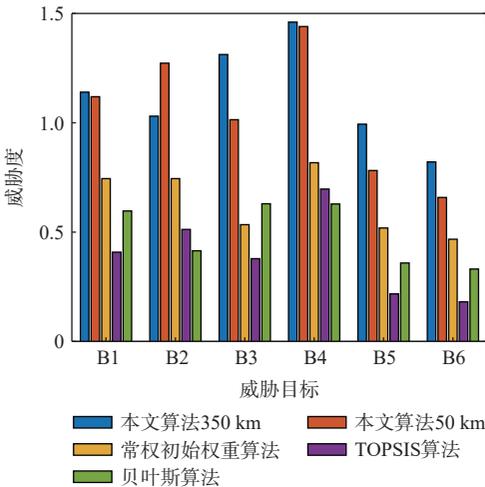


图 16 4 种威胁评估算法对比

Fig. 16 Comparison of four threat assessment algorithms

- 太原: 中北大学, 2020.
- ZHAI X Y. Research on threat assessment method of air combat target based on fully connected neural network[D]. Taiyuan: North University of China, 2020(in Chinese).
- [9] 郭辉, 徐浩军, 刘凌. 基于回归型支持向量机的空战目标威胁评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(1): 123-126.
- GUO H, XU H J, LIU L. Target threat assessment of air combat based on support vector machines for regression[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(1): 123-126(in Chinese).
- [10] ZHAO R J, YANG F B, JI L N. An extended fuzzy CPT-TODIM model based on possibility theory and its application to air target dynamic threat assessment[J]. IEEE Access, 2022, 10: 21655-21669.
- [11] 奚之飞, 徐安, 寇英信, 等. 基于改进 GRA-TOPSIS 的空战威胁评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(2): 388-397.
- XI Z F, XU A, KOU Y X, et al. Air combat threat assessment based on improved GRA-TOPSIS[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(2): 388-397(in Chinese).
- [12] 胡涛, 王栋, 孙曜, 等. 基于改进 CRITIC-LRA 和灰色逼近理想解排序法的空战威胁评估[J]. 兵工学报, 2020, 41(12): 2561-2569.
- HU T, WANG D, SUN Y, et al. Air combat threat assessment of improved CRITIC-LRA and grey TOPSIS[J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(12): 2561-2569(in Chinese).
- [13] 杨爱武, 李战武, 李宝, 等. 基于动态变权重的空战态势评估[J]. 兵工学报, 2021, 42(7): 1553-1563.
- YANG A W, LI Z W, LI B, et al. Air combat situation assessment based on dynamic variable weight[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(7): 1553-1563(in Chinese).
- [14] ZHANG H, XIE J, SONG Y, et al. A novel ranking method for intuitionistic fuzzy set based on information fusion and application to threat assessment[J]. Iranian Journal of Fuzzy Systems, 2020, 17: 91-104.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 杨远志, 王红卫, 索中英, 等. 基于粗糙集-逼近理想解排序的辐射源威胁排序方法[J]. 兵工学报, 2016, 37(5): 945-952.
- YANG Y Z, WANG H W, SUO Z Y, et al. An emitter threat evaluation method based on rough set and TOPSIS[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(5): 945-952(in Chinese).
- [18] 张晓雷, 单洁, 王刚. 基于云重心评价法的雷达辐射源威胁评估[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(8): 10-14.
- ZHANG X L, SHAN J, WANG G. Research on threat assessment of radar radiation source based on cloud gravity center evaluation method[J]. Fire Control & Command Control, 2017, 42(8): 10-14(in Chinese).
- [19] 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(in Chinese).
- [20] 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 Y H, CHENG S Y, ZHOU Y P, et al. Radiator threat evaluating based on Shapley-TOPSIS[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2020, 21(2): 91-96(in Chinese).
- [21] 董鹏宇, 王红卫, 陈游. 基于博弈论的 GRA-TOPSIS 辐射源威胁评估方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(10): 1973-1981.
- DONG P Y, WANG H W, CHEN Y. GRA-TOPSIS emitter threat assessment method based on game theory[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(10): 1973-1981(in Chinese).
- [22] 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.
- DONG P Y, WANG H W, CHEN Y. Combining TOPSIS and GRA for emitter threat evaluation with interval number[J]. Control and Decision, 2021, 36(6): 1516-1522(in Chinese).
- [23] 陈振坤, 程嗣怡, 徐宇恒, 等. 数据缺失下基于 IOWA-TOPSIS 的辐射源威胁评估[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2021, 22(1): 105-111.
- CHEN Z K, CHENG S Y, XU Y H, et al. A radiator threat assessment based on IOWA-TOPSIS under conditions of missing data[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2021, 22(1): 105-111(in Chinese).
- [24] 黄旭佳. 自适应雷达行为分析与辨识技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- HUANG X J. Research on analysis and identification techniques for adaptive radar behavior[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015(in Chinese).
- [25] 欧健. 多功能雷达行为辨识与预测技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.
- OU J. Research on behavior recognition and prediction techniques against multi-function radar[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017(in Chinese).
- [26] 肖冰松, 方洋旺, 胡诗国, 等. 一种新的超视距空战威胁评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(9): 2163-2166.
- XIAO B S, FANG Y W, HU S G, et al. New threat assessment method in beyond-the-horizon range air combat[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(9): 2163-2166(in Chinese).
- [27] 熊升华, 吴胜, 陈振频, 等. 广义直觉模糊熵及其在权重确定中的应用[J]. 控制与决策, 2017, 32(5): 845-854.
- XIONG S H, WU S, CHEN Z S, et al. Generalized intuitionistic fuzzy entropy and its application in weight determination[J]. Control and Decision, 2017, 32(5): 845-854(in Chinese).
- [28] 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.
- ZHANG Y, WANG H W, GUO X T, et al. An assessment method of emitter threat based on intuitional fuzzy sets and Bayesian network[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(1): 63-68(in Chinese).

Threat assessment of radar radiation sources based on behavioral characteristics

WANG Jundi¹, WANG Xing¹, TIAN Yuanrong^{2,*}, CHEN You¹

(1. Aviation Engineering School, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. School of Electronic Countermeasure, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: This paper studies the problem that the current radar radiation source threat assessment algorithm relies heavily on accurate reconnaissance data. Firstly, a radiation source threat assessment system based on behavior characteristics is constructed, starting from the radiation source target behavior characteristics and data fusion theory. Also, fuzzy theory and Vague datasets are employed to represent each sub-behavior. A situational state function with distance as an independent variable is constructed by using the modified starting weight of interval gray correlation degree to solve the coupling between indicators and the high dynamics of air warfare. Finally, an improved radar map method is adopted to calculate the threat level of the threatening target. The simulation results show that the algorithm in this paper has good accuracy and adaptability.

Keywords: data fusion; threat assessment; behavioral characteristics; dynamic weights; interval gray correlation degree; radar map method