

基于群广义直觉模糊软集的空袭目标威胁评估方法

武 华^{1,2}, 苏秀琴¹

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所 中国科学院超快诊断技术
重点实验室, 西安 710119; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 空袭目标威胁评估是提高防空武器系统应对多目标的基础. 针对威胁评估的实时性、多因素和信息不确定性问题, 构建一种基于群广义直觉模糊软集的多属性威胁评估模型. 在选择合适的威胁评估指标和量化方法的基础上, 引入多专家参量集来弥补传统广义直觉模糊软集中单个专家的评估不准确性和知识局限性等缺陷. 通过应用实例分析并与其他最新决策评估方法进行比较, 验证了该方法的可行性和有效性.

关键词: 威胁评估; 直觉模糊集; 广义直觉模糊软集; 群决策

中图分类号: TP181

文献标志码: A

Threat assessment of aerial targets based on group generalized intuitionistic fuzzy soft sets

WU Hua^{1,2}, SU Xiu-qin¹

(1. Key Laboratory of Ultra-fast Photoelectric Diagnostics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China. Correspondent: WU Hua, E-mail: sunshinesmilewh@163.com)

Abstract: The threat assessment of aerial targets is the basis for improving the ability that air defense system deals with various objects. Considering the timeliness, multi-factor and imprecision in a threat assessment process, a group generalized intuitionistic fuzzy soft sets (G-GIFSS) is constructed to fulfill the threat assessment. Among them, after selecting suitable evaluation indexes and quantitative methods, a multi-expert parameter set is introduced to overcome the knowledge limitation of the only one expert in original GIFSS. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed method for threat assessment is verified by comparison with other state-of-the-art decision methods on a practical instance.

Keywords: threat assessment; intuitionistic fuzzy sets; generalized intuitionistic fuzzy soft sets; group decision making

0 引 言

近年来,随着空袭环境和空袭目标特征的复杂化和多样化,指挥控制的困难不断增加,地面指挥员很难作出及时、准确的指挥和决策.因此,各国相继进行了目标威胁评估方面的研究.目标威胁评估为后续火力分配和指挥决策提供前提和依据,能够显著提高现代防空武器系统应对多目标的能力.

目前,威胁评估方法主要包括贝叶斯网络^[1-2]、TOPSIS法^[3]、直觉模糊集^[4-7]、多属性决策^[8]和折衷排序法^[9]等.这些方法各具特点,分别适用于不同的环境.其中,直觉模糊集在威胁评估上的运用已经取得了一定的成果.雷英杰等^[4]针对联合防空威胁评估问题,建立了威胁程度等级划分的量化模型和基于直觉模糊集的系统推理模型;夏博龄等^[5]提出了一种基

于直觉模糊推理的改进方法,采用三角型属性函数描述系统状态变量,并将包括可信度的直觉模糊推理规则应用于威胁评估中;Wang等^[6]在威胁评估中引入了认知理论,并提出了直觉模糊认知方法;Xu等^[7]在直觉模糊集多属性决策方法的基础上,通过结合熵权重法和包含比较概率法构建了混合威胁评估方法.

虽然这些基于直觉模糊集的方法在威胁评估中得到了广泛的应用,但是准确地确定目标隶属度仍存在困难,这与信息本身的不确定性、不完整性以及决策者的专业知识局限和个人偏好等有关^[10].此外,直觉模糊集本身缺乏合适的参数化工具.为了解决此类问题,Molodotsov^[10]提出了软集的概念,此后,基于软集的理论在多个领域取得了显著成果^[11-13].受直觉模糊集和软集的启发,Maji等^[14-15]将其结合,提出了直

收稿日期: 2014-04-14; 修回日期: 2014-10-12.

作者简介: 武华(1987-),女,博士生,从事信号与信息处理、智能决策的研究;苏秀琴(1965-),女,研究员,博士生导师,从事有关红外、电视监视、跟踪、测量及视频记录领域和智能决策等研究.

觉模糊软集理论,并在多属性决策(MADM)方面取得了良好的效果. Agarwal 等^[16]提出了广义直觉模糊软集(GIFSS),在应用直觉模糊集对信息进行描述的基础上,引入了一个表示决策者对所提供信息有效性判断的广义参量. GIFSS 在医疗诊断方面得到了成功的应用. 在问诊中,患者可能会夸大症状引起误诊,而专家没有充足的时间进行详细问诊,并确认这些信息. 方便有效的做法是由一位具有资质的医生对病人进行详细问诊,然后提出一个广义参量来调节患者所描述的症状的严重程度.

广义直觉模糊软集法对处理不确定、不准确的信息有良好的效果,然而在复杂的威胁评估环境中,单一的决策者很难考虑到决策问题的各个重要方面. 因此,本文提出了群广义直觉模糊软集,并将其引入到威胁评估中. 与以往基于直觉模糊的威胁评估方法所不同的是,本文考虑了威胁评估所具有的全局性和过程的特点,以及对实时性的需求,提出了基于广义直觉模糊的威胁评估方法. 首先,对威胁评估中存在的多个影响因素进行分析,选取合适的威胁评估指标和量化方法;其次,构建群广义直觉模糊软集的多属性的威胁评估模型,其中,评估参数由量化后的实时测量参数所对应的评估数据和多位专家对整体局势进行观察所提供的广义参量这两部分组成;最后,通过实例分析和比较,验证了该方法的有效性和优越性.

1 预备知识

定义 1^[17] 设 $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 是一个非空论域,集合 A 为直觉模糊集. 其中: $\mu_A(x_i)$ 和 $\nu_A(x_i)$ 分别为 U 中元素 x_i 属于 A 的隶属度和非隶属度,即 $\mu_A(x_i) : U \rightarrow [0, 1], \nu_A(x_i) : U \rightarrow [0, 1]$, 且 $0 \leq \mu_A(x_i) + \nu_A(x_i) \leq 1, \forall x_i \in U$. 直觉模糊集为

$$A = \{ \langle x_i, \mu_A(x_i), \nu_A(x_i) \rangle \mid x_i \in U \}. \quad (1)$$

另外,用 $\omega_A(x_i)$ 表示 U 中元素 x_i 属于 A 的犹豫度,即

$$\omega_A(x_i) = 1 - \mu_A(x_i) - \nu_A(x_i). \quad (2)$$

定义 2^[18-19] 直觉模糊数的运算法则为: 设任意直觉模糊数为 $\alpha = (\mu_\alpha, \nu_\alpha), \beta = (\mu_\beta, \nu_\beta)$, 则有

$$\alpha \oplus \beta = (\mu_\alpha + \mu_\beta - \mu_\alpha \mu_\beta, \nu_\alpha \nu_\beta); \quad (3)$$

$$\alpha \otimes \beta = (\mu_\alpha \mu_\beta, \nu_\alpha + \nu_\beta - \nu_\alpha \nu_\beta); \quad (4)$$

$$\lambda \alpha = (1 - (1 - \mu_\alpha)^\lambda, (\nu_\alpha)^\lambda), \lambda > 0; \quad (5)$$

$$(\alpha)^\lambda = ((\mu_\alpha)^\lambda, 1 - (1 - \nu_\alpha)^\lambda), \lambda > 0. \quad (6)$$

定义 3^[20] 设 B 为直觉模糊数集合, $\beta = (\mu_i, \nu_i)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 为一组直觉模糊数, $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ 为直觉模糊数 β 的权向量, 且满足 $w_i \in [0, 1], \sum_{i=1}^n w_i = 1$, 则直觉模糊加权平均(IFWA)为

$$\begin{aligned} \text{IFWA}(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n) = & \\ (w_1 \beta_1 \oplus w_2 \beta_2 \oplus \dots \oplus w_n \beta_n) = & \\ \left(1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i)^{w_i}, \prod_{i=1}^n (\nu_i)^{w_i} \right). & \quad (7) \end{aligned}$$

定义 4^[14-15, 21] 设 U 是一个非空论域, IF^U 表示 U 上所有直觉模糊子集所构成的集合. E 为参数集合, 令 $A \subseteq E$, 则称序对 (P, A) 为论域 U 上的一个直觉模糊软集, 其中映射 $P : A \rightarrow \text{IF}^U$.

定义 5^[16, 22] 设 U 为一个元素全集, E 为一个参数全集, 则称序对 (U, E) 为软集. 令 $A \subseteq E$, 映射 $Q : A \rightarrow \text{IF}^U, \text{IF}^U$ 为 U 的所有直觉模糊子集的集合, 且广义参量 δ 为 E 的一个直觉模糊子集, 则 Q_δ 为基于软集 (U, E) 的广义直觉模糊软集, 即

$$Q_\delta = (Q(e), \delta(e)), Q(e) \in \text{IF}^U, \delta(e) \in \text{IF}. \quad (8)$$

其中: 映射 $Q_\delta : A \rightarrow \text{IF}^U \times \text{IF}, Q(e)$ 为在直觉模糊软集中对元素的隶属度, $\delta(e)$ 为 $Q(e)$ 中 U 元素隶属度的可能性程度.

例 1 某校图书馆为了丰富本校学生课外阅读, 计划购买 5 套丛书, 现进行调研. 每套丛书的特征不尽相同, 特征参数集为 $E = \{ \text{学术价值高}(e_1), \text{收藏价值大}(e_2), \text{简装版}(e_3), \text{辅导功能强}(e_4), \text{当前热卖书}(e_5) \}$. $A \subseteq E$ 为管理者给出的调研结果的有效性参数, 令 $A = \{e_2, e_5\} \subset E, \delta : E \rightarrow \text{IF}$, 则有

$$\delta(e_2) = (0.7, 0.2), \delta(e_5) = (0.6, 0.1).$$

最终订购意向用广义直觉模糊软集表示为 $Q_\delta : A \rightarrow \text{IF}^U \times \text{IF}$, 则有

$$\begin{aligned} Q_\delta(e_2) = & \\ \{ \{ x_1 | (0.7, 0.2), x_2 | (0.4, 0.5), x_3 | (0.7, 0.1), & \\ x_4 | (0.5, 0.3), x_5 | (0.3, 0.4) \}, & \mathbf{(0.7, 0.2)} \}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_\delta(e_5) = & \\ \{ \{ x_1 | (0.7, 0.1), x_2 | (0.5, 0.4), x_3 | (0.4, 0.5), & \\ x_4 | (0.6, 0.3), x_5 | (0.6, 0.3) \}, & \mathbf{(0.8, 0.1)} \}. \end{aligned}$$

例 1 中的粗体字为广义参量, 是一位管理者对这次调研进行综合性判断后给出的评估参量.

定义 6^[16] 设任一直觉模糊数 $A = (\mu_A, \nu_A)$, 则得分函数和精确函数分别为

$$E_A = \mu_A^2 - \nu_A^2, F_A = \mu_A^2 + \nu_A^2. \quad (9)$$

2 群广义直觉模糊软集

随着社会的不断进步, 多属性决策方面也呈现出高度复杂性的特点. 在实际的决策环境中, 对于单一决策者而言, 很难考虑到决策问题中所有的重要方面,

并作出相对客观、准确的判断. 因此, 本文提出了群广义直觉模糊软集, 采用参量集的形式表示多位决策者结合实际情况和自身经验所给出的广义参量.

定义 7 设 U 为一个元素全集, E 为一个参数全集, 则称序对 (U, E) 为软集. 令 $A \subseteq E$, 映射 $Q: A \rightarrow \text{IF}^U$, IF^U 为 U 的所有直觉模糊子集的集合, 且广义参量 $G = \{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n\}$ 为 E 的所有直觉模糊子集的集合, 其权重集 $w_\delta = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ ($0 \leq w_i \leq 1$, $\sum_{i=1}^n w_i = 1$) 为与 G 对应的权重, 则 Q_G 为基于软集 (U, E) 的群广义直觉模糊软集 (G-GIFSS), 即

s.t. $Q(e) \in \text{IF}^U$, $G(e) \in \text{IF}$;

$$Q_G = (Q(e), G(e)) = (Q(e), \{\delta_1(e)|_{w_1}, \delta_2(e)|_{w_2}, \dots, \delta_n(e)|_{w_n}\}). \quad (10)$$

其中: 映射 $Q_G: A \rightarrow \text{IF}^U \times \text{IF}$, $Q(e)$ 为直觉模糊软集中对元素的隶属度, $G(e) = \{\delta_1(e)|_{w_1}, \delta_2(e)|_{w_2}, \dots, \delta_n(e)|_{w_n}\}$ 为 $Q(e)$ 中 U 元素隶属度的可能性程度.

通过在广义直觉模糊软集中加入多专家参量集对其直觉模糊集的可靠性进行再次评估, 以修正单一直觉模糊集在问题描述时存在的不准确表述.

特别地, 当 $G(e) = \{\delta(e)\}$ 且 $w = 1$ 时, 群广义直觉模糊软集退化为广义直觉模糊软集. 因此, 本文提出的群广义直觉模糊软集不仅可以弥补单一专家评估时的不准确性和知识依赖性, 同时更具一般性.

例 2 以例 1 的背景为例, 3 位权重相等的管理者进调研后, 提供的调研结果有效性参数集为 $A' \subseteq E$, 令 $A' = \{e_2, e_5\} \subset E$, $G: E \rightarrow \text{IF}$, 则有

$$G(e_2) = \{\delta_1|_{\frac{1}{3}}(0.7, 0.2), \delta_2|_{\frac{1}{3}}(0.8, 0.1), \delta_3|_{\frac{1}{3}}(0.7, 0.1)\},$$

$$G(e_5) = \{\delta_1|_{\frac{1}{3}}(0.6, 0.1), \delta_2|_{\frac{1}{3}}(0.5, 0.4), \delta_3|_{\frac{1}{3}}(0.7, 0.3)\}.$$

最终订购意向用广义直觉模糊软集表示为 $Q_G: A' \rightarrow \text{IF}^U \times \text{IF}$, 则有

$$Q_G(e_2) = \{\{x_1|(0.7, 0.2), x_2|(0.4, 0.5), x_3|(0.7, 0.1), x_4|(0.5, 0.3), x_5|(0.3, 0.4)\}, \{\delta_1|_{\frac{1}{3}}(\mathbf{0.7, 0.2}), \delta_2|_{\frac{1}{3}}(\mathbf{0.8, 0.1}), \delta_3|_{\frac{1}{3}}(\mathbf{0.7, 0.1})\}\};$$

$$Q_G(e_5) = \{\{x_1|(0.7, 0.1), x_2|(0.5, 0.4), x_3|(0.4, 0.5), x_4|(0.6, 0.3), x_5|(0.6, 0.3)\}, \{\delta_1|_{\frac{1}{3}}(\mathbf{0.6, 0.1}), \delta_2|_{\frac{1}{3}}(\mathbf{0.5, 0.4}), \delta_3|_{\frac{1}{3}}(\mathbf{0.7, 0.3})\}\}.$$

例 2 中的粗体字表示广义参量, 是在多位管理者对这次调研进行综合性的判断后给出的参量值.

定义 8 设 $M_F(e) = (M(e), F(e))$ 和 $N_G(e) = (N(e), G(e))$ 为软集 (U, E) 上的两个群广义直觉模糊软集, 且 $F(e)$ 和 $G(e)$ 同为权重 w_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 相关的广义参量. 若有

$$F(e) \subseteq G(e), \forall e \in E; \\ M(e) \subseteq N(e), \forall e \in E, \quad (11)$$

则称满足共同条件的 $M_F(e) = (M(e), F(e))$ 为 $N_G(e) = (N(e), G(e))$ 的子集.

定义 9 设 $M_F(e) = (M(e), F(e))$ 在条件 $w = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$, $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ 上的补集为

$$M_F^C(e) = (M^C(e), F^C(e)), \forall e \in E. \quad (12)$$

定义 10 $M_F(e)$ 和 $N_G(e)$ 为软集 (U, E) 上的两个群广义直觉模糊软集, 且 $F(e)$ 和 $G(e)$ 同为权重 w_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 相关的广义参量, 其交集为

$$M_F(e) \cap N_G(e) = (\{\min(\mu_M, \mu_N), \max(v_M, v_N)\}, \{\min(\mu_F, \mu_G), \max(v_F, v_G)\}). \quad (13)$$

定义 11 $M_F(e)$ 和 $N_G(e)$ 为软集 (U, E) 上的两个群广义直觉模糊软集, 且 $F(e)$ 和 $G(e)$ 同为权重 w_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 相关的广义参量, 其并集为

$$M_F(e) \cup N_G(e) = (\{\max(v_M, v_N), \min(\mu_M, \mu_N)\}, \{\max(v_F, v_G), \min(\mu_F, \mu_G)\}). \quad (14)$$

定义 12 设 $Q_{G_i} = (Q_i(e), G_i(e))$ 为一组群广义直觉模糊软集, 且有

$$Q(e) = \{a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im}\},$$

$$G(e) = \{q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{il}\},$$

其权重向量分别为

$$w_i = \{w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{im}\},$$

$$w'_i = \{w'_{i1}, w'_{i2}, \dots, w'_{im}\},$$

则群广义直觉模糊软集的聚合算子 Z_{Q_i} 可表示为

$$Z_{Q_i}(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im}) = \text{IFWA}(q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{il}) \otimes \text{IFWA}(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im}) = \left[\left(1 - \prod_{j=1}^l (1 - \mu_{q_{ij}})^{w'_{ij}} - \prod_{j=1}^m (1 - \mu_{a_{ij}})^{w_{ij}} + \prod_{j=1}^l (1 - \mu_{q_{ij}})^{w'_{ij}} \prod_{j=1}^m (1 - \mu_{a_{ij}})^{w_{ij}} \right), \left(\prod_{j=1}^l (v_{q_{ij}})^{w'_{ij}} + \right. \right.$$

$$\prod_{j=1}^m (v_{a_{ij}})^{w_i} - \prod_{j=1}^l (v_{q_{ij}})^{w'_i} \prod_{j=1}^m (v_{a_{ij}})^{w_i} \Big]. \quad (15)$$

定理 1 若 $Q_{G_i} = (Q_i(e), G_i(e))$ 为一组群广义直觉模糊软集, 满足定义 12, 且有 $\mu_{q_{ik}} = (1, 0) (k = 1, 2, \dots, l)$, 则群广义直觉模糊软集的加权平均聚合值 Z_{Q_i} 在数值上等于直觉模糊数 $Q_i(e)$ 的加权平均值, 即

$$Z_{Q_i} = \left(1 - \prod_{i=1}^m (1 - \mu_{a_{ij}})^{w_i}, \prod_{i=1}^m (v_{a_{ij}})^{w_i} \right). \quad (16)$$

将 $\mu_{q_{ik}} = (1, 0) (k = 1, 2, \dots, l)$ 代入式 (15) 即可得证, 计算过程略。

定理 2 若 $Q_{G_i} = (Q_i(e), G_i(e))$ 为一组群广义直觉模糊软集, 满足定义 12, 且有 $\mu_{q_{ik}} = (0, 1) (k = 1, 2, \dots, l)$, 则有

$$Z_{Q_i} = (0, 1). \quad (17)$$

将 $\mu_{q_{ik}} = (0, 1) (k = 1, 2, \dots, l)$ 代入式 (15) 即可得证, 计算过程略。

由此可知, 本文提出的群广义直觉模糊软集更具一般性, 通过引入多专家参量集, 减少了直觉模糊集存在的不确定和不准确性。

3 基于群广义直觉模糊软集的多属性空中目标威胁评估算法

当今战场环境复杂, 所获取的信息常常不完整或失真, 为了更好地减少上述问题带来的数据不确定性和个人理性决策局限性的影响, 本文提出一种基于群广义直觉模糊软集的多属性威胁评估方法。

3.1 目标威胁评估主要因素及其计算模型

空中目标的威胁评估是建立在目标识别的基础上的, 需要考虑多重因素的影响。在因素的选择上, 不仅各具代表性, 还可以从不同角度反映目标的威胁程度。本文综合考虑了雷达和其他辅助设备的情报获取能力和防空武器的性能特点, 选择目标类型、干扰能力、目标高度、目标距离、目标速度和航路捷径 6 个

主要属性用于空袭目标威胁评估。其计算方法和依据如表 1 所示。

然而, 在实际战争中, 除了上述 6 个主要因素外, 其他重要因素同样具有重要的参考价值, 如保护地的经济地位、地理位置和天气气候等“天时地利”方面的因素, 以及上级要求和战术安排等“人和”方面的因素。这些因素的特点难以量化或量化过程繁杂, 因此, 本文通过多位专家结合多方面因素, 根据其自身经验提出广义参量集。该方法不仅可以修正基于前面的 6 个主要因素的威胁评估误差, 还具有广泛的适应能力。

3.2 评估过程

Step 1: 建立当前时刻空袭目标威胁隶属度矩阵。设所有空袭目标集合为 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, 集合 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_6\}$ 的元素分别表示上述 6 个属性, 时刻 t 为上次测量时刻, $t + \Delta t$ 为本次测量时刻。

根据表 1 对 $t + \Delta t$ 时刻的各空中目标主要属性进行赋值计算, 可得空袭目标威胁隶属度矩阵 $N_{n \times 6}$ 。

Step 2: 计算犹豫度值。犹豫度表达了一种潜在的威胁动机。将前后两次实时采样的结果进行比较, 可以反映某时刻空袭目标的动机。由表 1 可知, 目标类型、干扰能力和目标速度的取值越大, 相应的威胁程度越大; 目标高度、目标距离和航路捷径的取值越大, 相应的威胁程度越小。设初始的犹豫度值为 $\omega = 0.5(1 - \mu)$ 。

设 r_t 为前一时刻 t 的测量值, $r_{t+\Delta t}$ 为当前时刻 $t + \Delta t$ 的测量值, 则有: 目标类型、干扰能力和目标速度的犹豫度值满足

$$\omega = (0.5 + k)(1 - \mu); \quad (18)$$

目标高度、目标距离、航路捷径的犹豫度值满足

$$\omega = (0.5 - k)(1 - \mu). \quad (19)$$

其中: k 为测量变化率, 且有

$$k = \frac{r_{t+\Delta t} - r_t}{r_{t+\Delta t}}. \quad (20)$$

表 1 目标威胁评估主要因素及其计算模型

属性	隶属度计算公式	原因
目标类型	0.9, 0.7, 0.5, 0.3, 0.1	根据目标特征及其威胁程度分为 5 类 ^[23] : TBM、大型机、小型机、武装直升机和诱饵等。以 Miller ^[24] 的人类认知理论为量化依据, 对各目标类型隶属度分别依次赋值。
干扰能力	0.9, 0.7, 0.5, 0.3, 0.1	目标干扰能力越强, 防空武器对其命中率越低, 威胁程度越大。按干扰能力从强到弱分为 5 个等级: 很强、强、一般、弱、无。依据文献 [24] 对干扰能力隶属度依次赋值。
目标高度	$\mu_h = \frac{\max\{h_i\} - h_i}{\max\{h_i\} - \min\{h_i\}}$	空中目标高度越高, 我方对其采取措施的时间越充分, 所以其威胁程度就越小。目标高度的实时隶属度值可由无量纲化公式计算得到 ^[25] 。
目标距离	$\mu_l = \frac{\max\{l_i\} - l_i}{\max\{l_i\} - \min\{l_i\}}$	空袭目标距离反映了敌方的攻击企图和达成攻击的可能性。目标距离越远, 威胁程度越小。目标距离的实时隶属度值可由公式计算得到 ^[25] 。
目标速度	$\mu_v = \frac{v_i - \min\{v_i\}}{\max\{v_i\} - \min\{v_i\}}$	空袭目标速度直接关系到防空武器的系统反应时间和毁伤概率。目标的速度越快, 其威胁程度越大。目标速度的实时隶属度值可由公式计算得到 ^[25] 。
航路捷径	$\mu_s = \frac{\max\{s_i\} - s_i}{\max\{s_i\} - \min\{s_i\}}$	目标航路捷径是指我方所保护的要地到空袭目标瞬时速度在水平面的投影延长线的垂直距离。航路捷径越小, 威胁程度越高。其实时隶属度值可由公式计算得到 ^[25] 。

Step 3: 得到直觉模糊集矩阵 $M_{n \times 6}$. 由式(2)得到威胁评估非隶属度值, 与 Step 1 整理得到直觉模糊矩阵 $M_{n \times 6}$.

Step 4: 得到直觉模糊软集. m 个专家提供广义参量集 $G_{n \times m}$, 整理广义直觉模糊软集矩阵 $Q_{n(m+6)} = (M(e), G(e))$.

Step 5: 由式(15)可得各空袭目标在 $t + \Delta t$ 的威胁评估结果.

Step 6: 根据式(9)对所有的空袭目标威胁程度值按降序进行排序.

4 实例分析

例如, 我方通过雷达和其他辅助设备探测到 6 个空袭目标, 分别得到前一时刻 t 和当前时刻 $t + \Delta t$ 的空袭目标实时指标参数如表 2 和表 3 所示. 设空袭目标的集合 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_6\}$ 分别对应目标 1 到目标 6, 集合 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_6\}$ 的元素分别为目标类型、干扰能力、目标高度、目标距离、目标速度和航路捷径 6 个属性.

Step 1: 整理属性资料, 依据表 1 为各个目标的隶属度赋值, 得到当前时刻 $t + \Delta t$ 的空袭目标威胁隶属度矩阵 $N_{6 \times 6}$, 如表 4 所示.

Step 2: 计算犹豫度值. 目标属性中各属性的犹豫度值可通过式(18)~(20)计算得到, 计算结果如表 5 所示.

Step 3: 由式(2)得到威胁评估非隶属度值, 并整理得到直觉模糊集矩阵 $M_{6 \times 6}$, 如表 6 所示.

Step 4: 3 位专家提供广义参量集 $G_{6 \times 3}$, 如表 7 所示. 整理 Step 3 所得的直觉模糊集可得广义直觉模糊

软集矩阵 $Q_{6 \times 9} = \{M_{6 \times 6}, G_{6 \times 3}\}$.

表 2 t 时刻的空袭目标指标参数

目标	类型	干扰能力	高度/m	距离/km	速度/(m/s)	航路捷径/km
1	1	无	60	65	220	3.2
2	2	强	12 000	251	410	6.4
3	5	强	4 000	78	300	7.2
4	4	弱	1 600	82	90	5.7
5	3	弱	5 100	230	180	8.1
6	1	无	1 680	72	300	5.7

表 3 $t + \Delta t$ 时刻的空袭目标指标参数

目标	类型	干扰能力	高度/m	距离/km	速度/(m/s)	航路捷径/km
1	1	无	50	50	210	3
2	2	很强	11 000	260	450	6.2
3	5	强	3 600	75	300	7
4	4	一般	1 800	80	100	5.6
5	3	弱	5 000	220	200	8
6	1	无	1 560	60	320	5.4

表 4 $t + \Delta t$ 时刻空袭目标威胁隶属度矩阵 $N_{6 \times 6}$

空袭目标	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
a_1	0.9	0.1	1	1	0.314 3	1
a_2	0.7	0.9	0	0	1	0.36
a_3	0.1	0.7	0.675 8	0.881 0	0.571 4	0.2
a_4	0.3	0.5	0.840 2	0.857 1	0	0.48
a_5	0.5	0.3	0.547 9	0.190 5	0.285 7	0
a_6	0.9	0.1	0.862 1	0.952 4	0.628 6	0.52

表 5 $t + \Delta t$ 时刻空袭目标威胁犹豫度矩阵 $W_{6 \times 6}$

空袭目标	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
a_1	0.05	0.450 0	0	0	0.310 2	0
a_2	0.15	0.072 2	0.590 9	0.465 4	0	0.340 6
a_3	0.45	0.150 0	0.198 1	0.063 4	0.214 3	0.422 9
a_4	0.35	0.450 0	0.062 2	0.075 0	0.600 0	0.269 3
a_5	0.25	0.350 0	0.235 1	0.441 6	0.428 6	0.512 5
a_6	0.05	0.450 0	0.079 6	0.033 3	0.208 9	0.266 7

表 6 $t + \Delta t$ 时刻空袭目标威胁直觉模糊矩阵 $M_{6 \times 6}$

空袭目标	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
a_1	(0.9,0.05,0.05)	(0.1, 0.450 0, 0.450 0)	(1,0,0)	(1, 0,0)	(0.314 3, 0.375 5, 0.310 2)	(1,0,0)
a_2	(0.7,0.15,0.15)	(0.9, 0.027 8, 0.072 2)	(0, 0.409 1, 0.590 9)	(0, 0.534 6, 0.465 4)	(1,0,0)	(0.360 0, 0.299 4, 0.340 6)
a_3	(0.1,0.45,0.45)	(0.7, 0.150 0, 0.150 0)	(0.675 8, 0.126 1, 0.198 1)	(0.881 0, 0.054 8, 0.064 3)	(0.571 4, 0.214 3, 0.214 3)	(0.200 0, 0.377 1, 0.422 9)
a_4	(0.3,0.35,0.35)	(0.5, 0.050 0, 0.450 0)	(0.840 2, 0.054 8, 0.064 3)	(0.857 1, 0.067 9, 0.075 0)	(0, 0.400 0, 0.600 0)	(0.480 0, 0.250 7, 0.269 3)
a_5	(0.5,0.25,0.25)	(0.3, 0.350 0, 0.350 0)	(0.547 9, 0.217 0, 0.235 1)	(0.190 5, 0.368 0, 0.441 6)	(0.285 7, 0.285 7, 0.428 6)	(0, 0.487 5, 0.512 5)
a_6	(0.9,0.05,0.05)	(0.1, 0.450 0, 0.450 0)	(0.862 1, 0.058 3, 0.079 6)	(0.952 4, 0.014 3, 0.033 3)	(0.628 6, 0.162 5, 0.208 9)	(0.520 0, 0.213 3, 0.266 7)

表 7 3 位专家提供的广义参量矩阵 $G_{6 \times 3}$

空袭目标	$e x_1$	$e x_2$	$e x_3$
a_1	(0.9,0.05,0.05)	(0.9,0.02,0.08)	(0.9,0.1,0)
a_2	(0.7,0.25,0.05)	(0.8,0.15,0.05)	(0.7,0.23,0.07)
a_3	(0.6,0.32,0.08)	(0.6,0.2,0.2)	(0.6,0.3,0.1)
a_4	(0.8,0.05,0.15)	(0.8,0.1,0.1)	(0.6,0.3,0.1)
a_5	(0.7,0.03,0.27)	(0.8,0.07,0.13)	(0.7,0.1,0.2)
a_6	(0.8,0.03,0.17)	(0.9,0.05,0.05)	(0.9,0.02,0.08)

Step 5: 计算空袭目标威胁评估结果 $Z_{Q_i} (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im})$. 其中: 目标的各个属性权重为 $w = \{0.2,$

$0.16, 0.22, 0.11, 0.13, 0.18\}$, 各专家权重为 $w' = \{0.45, 0.3, 0.25\}$.

由式(15)可得基于群广义直觉模糊软集的多属性威胁评估结果

$$Z_{Q_1} = (0.9, 0.045 2), Z_{Q_2} = (0.734 4, 0.210 1),$$

$$Z_{Q_3} = (0.342 5, 0.418 1), Z_{Q_4} = (0.467 5, 0.236 3),$$

$$Z_{Q_5} = (0.260 2, 0.342 5), Z_{Q_6} = (0.672 5, 0.125 5).$$

Step 6: 根据式(9)对所有的空袭目标威胁程度值

按降序进行排序, 可以得到排序结果 $a_1 > a_2 > a_6 > a_4 > a_5 > a_3$.

1) 比较算法 1. 基于直觉模糊集的威胁评估方法 (IFSS)^[20].

根据 Step 3 中的直觉模糊集矩阵 $M_{6 \times 6}$ 可得 $t + \Delta t$ 时刻基于直觉模糊集的空袭目标威胁评估计算结果 Z_{a_i} , 其中目标的各个属性的权重为

$$w = \{0.2, 0.16, 0.22, 0.11, 0.13, 0.18\},$$

由式 (7) 可得基于直觉模糊的威胁评估结果

$$Z_{a_1} = (1, 0), Z_{a_2} = (1, 0),$$

$$Z_{a_3} = (0.5708, 0.1991),$$

$$Z_{a_4} = (0.6004, 0.1549),$$

$$Z_{a_5} = (0.3543, 0.3062),$$

$$Z_{a_6} = (0.7789, 0.0969).$$

2) 比较算法 2. 基于多属直觉模糊集的威胁评估方法 (IFMATEEICP)^[7].

根据文献 [7] 所得的空袭目标威胁评估计算结果可得

$$\theta_1 = 0.2298, \theta_2 = 0.2129,$$

$$\theta_3 = 0.1405, \theta_4 = 0.1197,$$

$$\theta_5 = 0.0977, \theta_6 = 0.1933.$$

3) 比较算法 3. 基于广义直觉模糊集的威胁评估方法 (GIFSS)^[16].

为了验证本文算法的有效性, 根据文献 [23] 分别计算只有一个专家时, 空袭目标威胁评估计算结果.

基于专家 1 的威胁评估结果 (简称为 GIFSS-1) 为

$$Z_{ex11} = (0.9, 0.05),$$

$$Z_{ex12} = (0.7, 0.25),$$

$$Z_{ex13} = (0.3425, 0.4554),$$

$$Z_{ex14} = (0.4804, 0.1971),$$

$$Z_{ex15} = (0.2480, 0.3270),$$

$$Z_{ex16} = (0.6231, 0.1240);$$

基于专家 2 的威胁评估结果 (简称为 GIFSS-2) 为

$$Z_{ex21} = (0.9, 0.02),$$

$$Z_{ex22} = (0.8, 0.15),$$

$$Z_{ex23} = (0.3425, 0.3593),$$

$$Z_{ex24} = (0.4804, 0.2394),$$

$$Z_{ex25} = (0.2834, 0.3548),$$

$$Z_{ex26} = (0.7010, 0.1421);$$

基于专家 3 的威胁评估结果 (简称为 GIFSS-3) 为

$$Z_{ex31} = (0.9, 0.1),$$

$$Z_{ex32} = (0.7, 0.23),$$

$$Z_{ex33} = (0.3425, 0.4393),$$

$$Z_{ex34} = (0.3603, 0.4084),$$

$$Z_{ex35} = (0.2480, 0.3756),$$

$$Z_{ex36} = (0.7010, 0.1150).$$

根据式 (9), 将比较算法 1 到比较算法 3 的目标威胁程度值进行排序.

将本文给出的基于广义直觉模糊软集的空袭目标威胁评估方法与比较算法 1 到比较算法 3 给出的威胁评估方法进行比较, 结果如表 8 所示.

表 8 多种威胁评估算法结果比较

算法	结果
本文算法	$a_1 > a_2 > a_6 > a_4 > a_5 > a_3$
IFSS ^[20]	$a_1 = a_2 > a_6 > a_4 > a_3 > a_5$
IFMATEEICP ^[7]	$a_1 > a_2 > a_6 > a_3 > a_4 > a_5$
GIFSS-1 ^[16]	$a_1 > a_2 > a_6 > a_4 > a_5 > a_3$
GIFSS-2 ^[16]	$a_1 > a_2 > a_6 > a_4 > a_3 > a_5$
GIFSS-3 ^[16]	$a_1 > a_6 > a_2 > a_4 > a_3 > a_5$

通过将实例所得结果与另外 3 种算法所得结果进行比较可知, 本文算法决策结果与实际情况最相符, 客观地反映了空袭环境. IFSS 和 IFMATEEICP 都是基于 6 个主要属性进行威胁评估, 没有考虑其他影响因素. 在复杂的作战环境中, 由于所获取的信息可能存在不完整、不确定等情况, 威胁评估的结果会产生偏差. 特别是 IFMATEEICP, 其对属性数据的依赖较大, 偏差更容易被放大, 如 $a_3 > a_4 > a_5$. 相比而言, GIFSS 通过引入专家修正, 可以有效调节 6 个主要属性的刚度, 减小评估偏差. 但是, 由于不同专家的知识背景和个人偏好都不尽相同, 导致引入不同专家 (GIFSS-1, GIFSS-2, GIFSS-3) 时, 得到的评估结果不同. 而本文综合考虑了多位专家经综合多方面因素和情报所提出的广义参量, 更能体现出实际的威胁状态, 减少了单一对主要因素进行评估所带来的误差. 从实验结果可以看出, 本文算法更适合进行威胁评估.

5 结 论

本文通过对威胁评估的重要影响因素进行分析, 在考虑实时性、过程性和准确性基础上, 构建了一种基于群广义直觉模糊软集多属性威胁评估方法. 相比于原始的广义直觉模糊软集方法, 引入的多专家广义参量集可以有效弥补由于信息不确定性和个人决策局限性所产生的评估误差. 通过实验验证可知, 本文算法数学模型计算简便, 有效综合了各种评估因素, 同时算法更具一般性, 便于扩展.

参考文献(References)

[1] 刘跃峰, 陈哨东, 赵振宇, 等. 基于 FBNs 的有人机/UCAV 编队对地攻击威胁评估[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(8): 1635-1639.

- (Liu Y F, Chen S D, Zhao Z Y, et al. Threat assessment of manned/unmanned combat aerial vehicle formation air-to-ground attack based on FBNs[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(8): 1635-1639.)
- [2] Wang Y, Sun Y, Li J Y, et al. Air defense threat assessment based on dynamic bayesian network[C]. *Proc of IEEE Int Conf on Sysyems and Informatics*. Yantai, 2012: 721-724.
- [3] 王宝成, 栗飞, 陈正. 基于模糊 TOPSIS 法的空袭目标威胁评估[J]. *海军航空工程学院学报*, 2012, 27(3): 323-326.
(Wang B C, Li F, Chen Z. Air-attack targets threat assessment based on fuzzy TOPSIS[J]. *J Naval Aeronautical and Astronautical University*, 2012, 27(3): 323-326.)
- [4] 雷英杰, 王宝树, 王毅. 基于直觉模糊推理的威胁评估方法[J]. *电子与信息学报*, 2007, 29(9): 2077-2081.
(Lei Y J, Wang B S, Wang Y. Techniques for threat assessment based on intuitionistic fuzzy reasoning[J]. *J Electronics & Information Technology*, 2007, 29(9): 2077-2081.)
- [5] 夏博龄, 贺正洪, 雷英杰. 基于直觉模糊推理的威胁评估改进算法[J]. *计算机工程*, 2009, 35(16): 195-197.
(Xia B L, He Z H, Lei Y J. Improved algorithm of threat assessment based on intuitionistic fuzzy reasoning[J]. *Computer Engineering*, 2009, 35(16): 195-197.)
- [6] Wang Y, Miao X. Intuitionistic fuzzy perceiving methods for situation and threat assessment[C]. *Proc of IEEE Int Conf on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*. Sichuan, 2012: 578-582.
- [7] Xu Y, Wang Y, Miu X. Multi-attribute decision making method for air target threat evaluation based on intuitionistic fuzzy sets[J]. *J of Systems Engineering and Electronics*, 2012, 23(6): 891-897.
- [8] 王小艺, 刘载文, 侯朝楨, 等. 基于模糊多属性决策的目标威胁估计方法[J]. *控制与决策*, 2007, 22(8): 859-863.
(Wang X Y, Liu Z W, Hou C Z, et al. Method of object threat assessment based on fuzzy MADM[J]. *Control and Decision*, 2007, 22(8): 859-863.)
- [9] 王鑫, 吴华, 赵玉, 等. 电子战目标威胁评估的折衷排序方法[J]. *电光与控制*, 2013, 20(8): 14-17.
(Wang X, Wu H, Zhao Y, et al. A compromise sorting method for electronic warfare target threat assessment[J]. *Electronics Optics & Control*, 2013, 20(8): 14-17.)
- [10] Molodtsov D. Soft set theory-first results[J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 1999, 37(4): 19-31.
- [11] Maji P. An application of intuitionistic fuzzy soft sets in a decision making problem[C]. *Proc of IEEE Int Conf on Progress in Informatics and Computing*. Shanghai, 2010: 349-351.
- [12] Majumdar P, Samanta S K. Similarity measure of soft sets[J]. *New Mathematics and Natural Computation*, 2008, 4(1): 1-12.
- [13] 李铭洋, 樊治平, 尤天慧. 多方参与决策且指标集有差异的方案排序方法[J]. *控制与决策*, 2013, 28(6): 849-854.
(Li M Y, Fan Z P, You T H. Method for ranking alternatives considering multi-person decision making and different index sets[J]. *Control and Decision*, 2013, 28(6): 849-854.)
- [14] Maji P K, Biswas R, Roy A R. Intuitionistic fuzzy soft sets[J]. *J of Fuzzy Mathematics*, 2001, 9(3): 677-692.
- [15] Maji P K, Roy A R, Biswas R. On intuitionistic fuzzy soft sets[J]. *J of Fuzzy Mathematics*, 2004, 12(3): 669-684.
- [16] Agarwal M, Biswas K K, Hanmandlu M. Generalized intuitionistic fuzzy soft sets with applications in decision-making[J]. *Applied Soft Computing*, 2013, 13(8): 3552-3566.
- [17] Atanassov K T. Intuitionistic fuzzy sets[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1986, 20(1): 87-96.
- [18] Xu Z. Intuitionistic preference relations and their application in group decision making[J]. *Information Sciences*, 2007, 177(11): 2363-2379.
- [19] Xu Z, Yager R R. Some geometric aggregation operators based on intuitionistic fuzzy sets[J]. *Int J of General Systems*, 2006, 35(4): 417-433.
- [20] Xu Z. Intuitionistic fuzzy aggregation operators[J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2007, 15(6): 1179-1187.
- [21] Maji P K. More on intuitionistic fuzzy soft sets[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2009: 231-240.
- [22] Agarwal M, Hanmandlu M, Biswas K K. Generalized intuitionistic fuzzy soft set and its application in practical medical diagnosis problem[C]. *Proc of IEEE Int Conf on Fuzzy Systems*. Taipei, 2011: 2972-2978.
- [23] 邢清华, 刘付显. 直觉模糊集隶属度与非隶属度函数的确定方法[J]. *控制与决策*, 2009, 24(3): 393-397.
(Xing Q H, Liu F X. Method of determining membership and nonmembership function in intuitionistic fuzzy sets[J]. *Control and Decision*, 2009, 24(3): 393-397.)
- [24] Miller G A. The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information[J]. *Psychological Review*, 1956, 63(2): 81-97.
- [25] 孙海永, 陈阳晔, 韩会刚. 基于灰色聚类的空袭目标威胁评估与排序[J]. *空军雷达学院学报*, 2011, 25(5): 355-357.
(Sun H Y, Chen Y Y, Han H G. Assessing and ranking of air-raid target threat based on grey clustering[J]. *J of Air Force Radar Academy*, 2011, 25(5): 355-357.)