

doi: 10.7690/bgzdh.2018.06.013

舰艇编队动态防空威胁的直觉模糊决策方法

陈天夫, 丁 勇, 申兴盼

(南京航空航天大学自动化学院, 南京 211106)

摘要: 针对舰艇编队在不确定海战场环境中的威胁估计问题, 提出一种动态防空威胁的直觉模糊决策方法。首先对来袭目标的不同类型信息作规范化处理, 得到直觉模糊决策矩阵; 其次由直觉模糊熵权法得出评估指标的初始权重, 并融合指挥员的主观偏好信息建立指标权重优化模型, 使得权重结果更为合理; 然后采用正态分布方法处理多时刻信息, 得到不同时刻的权重; 最后基于 TOPSIS 思想得到目标的威胁度排序结果。仿真实例表明: 该算法具有可行性, 为解决舰艇编队的威胁估计问题提供了一种有效的途径。

关键词: 直觉模糊集; 舰艇编队; 动态威胁估计; TOPSIS 法

中图分类号: TJ762.3 **文献标志码:** A

Dynamic Method for Threat Evaluation in Aerial Defense of Warship Formation Based on Intuition Fuzzy Decision-making Method

Chen Tianfu, Ding Yong, Shen Xingpan

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: Aiming at the problem of threat evaluation of warship formation in uncertain marine battlefield environment, a dynamic decision-making method based on intuition fuzzy sets is proposed. Firstly, the information in different types of air targets is standardized and intuition fuzzy decision-making matrices can be gained. Secondly, the initial weights of evaluation indexes are computed by using intuitionistic fuzzy entropy and an optimization model combining subjective preference information of commander is established to get more reasonable weight results. Then, time series weight is obtained to handle multi-moments data basing on normal distribution. Finally, on the basis of TOPSIS, levels of threat the raiding targets pose can be assessed and sequenced. A simulation example illustrates the feasibility of the proposed method which provides an effective way to solve the problem of threat evaluation of warship formation.

Keywords: intuition fuzzy sets; warship formation; dynamic threat evaluation; TOPSIS

0 引言

舰艇编队协同防空作战能力是海上军事力量的象征。如何准确估计目标的威胁程度, 是编队防空领域的重要问题。由于空中袭击具有多武器、多方向、连续性的特点, 且模糊信息不断增加, 对目标威胁程度的估计面临着严峻的挑战。

目前, 威胁估计的研究方法有贝叶斯网络^[1]、灰色关联度分析^[2]、神经网络^[3]和云模型^[4]等。由于直觉模糊集理论在不确定信息决策领域有着显著的优越性, 近年来, 不少学者将其应用于威胁估计问题。Xu 等^[5]综合熵权法和包含比较概率法, 构建了直觉模糊集下舰艇编队的威胁估计模型, 体现出指挥员对战场态势的把握; 黄文斌等^[6]使用 IFHPOWA 算子集结各目标的属性值, 确定了威胁评估范围的准则; 武华等^[7]建立了一种基于群广义直觉模糊软集的多属性威胁评估模型, 降低了单个专家评估所

造成的不准确性; 黄洁等^[8]采用直觉模糊集 Choquet 积分, 实现关联因素的威胁评估。

然而, 上述方法都是基于某一固定时刻的信息进行威胁估计, 未能客观展现目标的动态态势。考虑到现代海战场环境是瞬息多变的, 笔者提出一种舰艇编队的动态威胁估计方法。结合直觉模糊集理论, 笔者在评估指标权重确定上兼顾主观与客观信息, 并由正态分布法求解时间序列权重, 在此基础上借鉴 TOPSIS 思想实现威胁估计; 最后, 通过仿真实例验证了所提方法的合理性。

1 直觉模糊集的基本理论

1986 年, Atanassov 对 Zadeh 的模糊集进行拓展, 提出了直觉模糊集的概念。直觉模糊集考虑到隶属度、非隶属度和犹豫度的信息, 对描述客观世界的模糊性本质更有表现力。

定义 1^[9] 设 X 为非空有限论域, 则称

收稿日期: 2018-04-05; 修回日期: 2018-04-26

基金项目: 国家自然科学基金(61374130)

作者简介: 陈天夫(1996—), 男, 江苏人, 本科, 从事智能优化与决策研究。

$$A = \{ \langle x, \mu_A(x), \nu_A(x) \rangle | x \in X \} \quad (1)$$

为 X 上的一个直觉模糊集, 其中 $\mu_A(x): X \rightarrow [0,1]$ 和 $\nu_A(x): X \rightarrow [0,1]$ 分别为元素 x 属于 $\pi_A(x) = 1 - \mu_A(x) - \nu_A(x)$ 的隶属度和非隶属度, 且有 $0 \leq \mu_A(x) + \nu_A(x) \leq 1$ 恒成立。另外, $\pi_A(x) = 1 - \mu_A(x) - \nu_A(x)$ 称为 x 属于 A 的犹豫度。

定义 2^[10] 对于 $A = \{ \langle x, \mu_A(x), \nu_A(x) \rangle | x \in X \}$, 存在对应的区间数形式 $A(x) = [\mu_A(x), 1 - \nu_A(x)]$ 。

定义 3^[11] 设 $\alpha = (\mu_\alpha, \nu_\alpha)$ 与 $\beta = (\mu_\beta, \nu_\beta)$ 均为直觉模糊数, 则定义基本运算法则如下:

- 1) $\alpha \oplus \beta = (\mu_\alpha + \mu_\beta - \mu_\alpha \mu_\beta, \nu_\alpha \nu_\beta)$;
- 2) $\alpha \otimes \beta = (\mu_\alpha \mu_\beta, \nu_\alpha + \nu_\beta - \nu_\alpha \nu_\beta)$;
- 3) $\chi \alpha = (1 - (1 - \mu_\alpha)^\chi, \nu_\alpha^\chi)$, $\chi > 0$;
- 4) $\alpha^\chi = (\mu_\alpha^\chi, 1 - (1 - \nu_\alpha)^\chi)$, $\chi > 0$ 。

2 编队防空威胁的直觉模糊模型

2.1 模型概述

威胁估计在本质上是不确定战场环境下的多属性决策问题。假设我方舰艇编队在某时刻侦察到敌方的 m 个目标, 这些目标需要在 n 个指标下进行威胁估计。设来袭目标集合 $U = (U_1, U_2, \dots, U_m)$, 评估指标集合 $C = (C_1, C_2, \dots, C_n)$, 目标 U_i 关于指标 C_j 的属性值为 $x_{ij} (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$ 。指标 C_j 对应的权重为 ω_j , $\omega_j \in [0,1]$ 且有 $\sum_{j=1}^n \omega_j = 1$ 。从而, 威胁

估计问题可表示成如下的矩阵形式:

$$X = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ \begin{matrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2)$$

笔者在考虑海战场环境的基础上, 建立了编队空中威胁的评估体系^[12], 如图 1 所示。

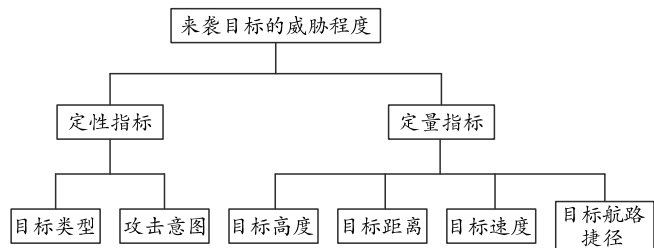


图 1 舰艇编队空中威胁的评估体系

在上述评估体系中, 关于定性指标的属性值由决策人员依据知识经验与战场情况给出语言变量来描述威胁程度的大小, 如“弱”“很强”等; 关于定量指标的属性值由舰艇编队的侦察设备获取。在日益复杂的战场环境中, 这些属性值不仅体现了目标对编队构成威胁的程度, 还体现了目标对编队不构成威胁的程度; 因此, 直觉模糊集更适用于解决这种不确定性威胁估计问题。

2.2 直觉模糊决策矩阵的建立

在研究威胁估计问题时, 首先需要将对式(2)进行规范化处理, 其实质是运用数学变换把所有的属性值统一到 $[0,1]$ 范围内。下面具体讨论如何将 X 转化为直觉模糊决策矩阵 $D = (A_{ij})_{m \times n} = ((\mu_{ij}, \nu_{ij}))_{m \times n}$ 。

对于定性指标, 笔者将语言变量分为很强、强、中等、弱、很弱这 5 个等级。表 1 为语言变量到直觉模糊数的转化。

表 1 语言变量的直觉模糊转化

语言变量	很强	强	中等	弱	很弱
直觉模糊数	(0.9,0.05)	(0.7,0.15)	(0.5,0.25)	(0.3,0.55)	(0.1,0.65)

对于定量指标, 首先考虑舰艇编队直接获取到目标的准确属性值这种情况, 即属性值是实数形式。

笔者结合韦伯-费希纳感知定律和黄金分割法则, 建立目标威胁的直觉感知等级^[13], 如表 2 所示。

表 2 目标威胁的直觉感知等级

威胁等级	感知范围 $[t_k^-, t_k^+]$	基准值 t_k^0
一级	(0.618, 1]	0.764
二级	(0.382, 0.618]	0.472
三级	(0.236, 0.382]	0.292
四级	(0.146, 0.236]	0.180
五级	[0, 0.146]	0.146

对效益型指标, 有 $r_{ij} = x_{ij} / \max_{1 \leq i \leq m} x_{ij}$; 对成本型指标, 有 $r_{ij} = \min_{1 \leq i \leq m} x_{ij} / x_{ij}$ 。将 r_{ij} 与表 2 中的直觉感知等级比对, r_{ij} 会落在某威胁等级 $k (k \in \{1, 2, 3, 4, 5\})$ 的范围 $[t_k^-, t_k^+]$ 内。构造函数 $f(r_{ij}) = r_{ij} / t_k^+ + t_k^- / r_{ij}$, 易证: 当 $r_{ij} = \sqrt{t_k^- t_k^+}$ 时, $f(r_{ij})$ 有最小值 $2\sqrt{t_k^- / t_k^+}$; 当 $r_{ij} = t_k^-$ 或 t_k^+ 时, $f(r_{ij})$ 有最大值 $1 + t_k^- / t_k^+$ 。对 $f(r_{ij})$ 归一化处理, 得

$$\frac{f(r_{ij})}{(1 + t_k^- / t_k^+)} = \frac{r_{ij}}{t_k^- + t_k^+} + \frac{t_k^- t_k^+}{r_{ij}(t_k^- + t_k^+)} \leq 1. \quad (3)$$

于是, 可定义 U_i 在 C_j 下隶属于威胁等级 k 的直觉模糊数为

$$A_{ij}^k = (\mu_{ij}^k, \nu_{ij}^k) = (r_{ij} / (t_k^- + t_k^+), t_k^- t_k^+ / [r_{ij} (t_k^- + t_k^+)]) \quad (4)$$

再将直觉模糊数 A_{ij}^k 和其所对应的直觉感知等级的基准值 t_k^0 综合，得到 U_i 在 C_j 下的直觉模糊数

$$A_{ij} = \frac{A_{ij}^k}{1 - t_k^0} = (\mu_{ij}, \nu_{ij}) = \left(1 - \left[1 - \frac{r_{ij}}{t_k^- + t_k^+} \right]^{1-t_k^0}, \left[\frac{t_k^- t_k^+}{r_{ij} (t_k^- + t_k^+)} \right]^{1-t_k^0} \right) \quad (5)$$

在防空作战中，由于受系统性能、外界环境以及敌方干扰等因素的影响，我方侦察设备获取的信息可能会不完整、不精确。比如，传感器系统测得某来袭目标的速度为 260~300 m/s。

下面考虑定量指标的属性值是区间形式的情况，设来袭目标 U_i 在 C_j 下的属性值是区间数 $\tilde{\alpha} = [\alpha_{ij}^L, \alpha_{ij}^U]$ ，其规范化处理方法^[14]如下：对效益型指标，有 $\tilde{\beta} = [\alpha_{ij}^L / \max_{1 \leq i \leq m} \alpha_{ij}^U, \alpha_{ij}^U / \max_{1 \leq i \leq m} \alpha_{ij}^U]$ ；对成本型指标，有 $\tilde{\beta} = [\min_{1 \leq i \leq m} \alpha_{ij}^L / \alpha_{ij}^U, \min_{1 \leq i \leq m} \alpha_{ij}^L / \alpha_{ij}^L]$ 。由此， $\tilde{\alpha}$ 被规范化为 $\tilde{\beta} = [\beta_{ij}^L, \beta_{ij}^U]$ 的形式，则 U_i 关于 C_j 的犹豫度为 $\pi_{ij} = (\beta_{ij}^U - \beta_{ij}^L) / (\beta_{ij}^U + \beta_{ij}^L)$ 。

U_i 关于 C_j 的隶属度为

$$\mu_{ij} = \varepsilon \beta_{ij}^U / \max_{1 \leq i \leq m} \beta_{ij}^U \quad (6)$$

式中 ε 是乐观指数，且 $0.5 \leq \varepsilon \leq 1$ ，文中取 0.9。

U_i 关于 C_j 的非隶属度为

$$\nu_{ij} = 1 - \pi_{ij} - \mu_{ij} \quad (7)$$

按上面的方法，区间数 $\tilde{\alpha}$ 可被转化为直觉模糊数 $A_{ij} = (\mu_{ij}, \nu_{ij})$ 的形式。

综上所述，无论是语言变量形式的定性指标值，还是实数或区间数形式的定量指标值，最终均可得到直觉模糊决策矩阵 $D = ((\mu_{ij}, \nu_{ij}))_{m \times n}$ 。

3 评估指标权重和时间序列权重的确定

3.1 基于直觉模糊熵权法的指标权重确定

对于决策环节，必须要确定评估体系中各指标的具体权重大小。若某一指标的直觉模糊熵越小，说明它提供的信息越多，则它对决策结果起的作用越大，所占的权重也就越大。

笔者给出直觉模糊熵的定义^[15]如下：

定义 4 对于 $A = \{(x, \mu_A(x), \nu_A(x)) | x \in X\}$ ， A 的

直觉模糊熵为 $E(A) = \cos\{\frac{\pi}{2}[\mu_A^2(x) - \nu_A^2(x)]\}$ 。

因此，目标 U_i 关于评估指标 C_j 的直觉模糊熵为

$E(A_{ij}) = \cos[\frac{\pi}{2}(\mu_{ij}^2 - \nu_{ij}^2)]$ ，指标 C_j 的直觉模糊熵为

$E_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m E(A_{ij})$ 。指标权重由下式给出

$$\omega_j = \frac{1 - E_j}{n - \sum_{j=1}^n E_j} \quad (8)$$

3.2 考虑主观偏好信息时的指标权重确定

舰艇编队联合防空作战，除了要考虑我方获取的客观信息，还需把作战指挥人员的主观偏好信息纳入考虑。为了提高指标权重计算的科学性，笔者进一步建立了权重的最优化模型^[16-17]。

根据定义 2， D 可转化为直觉模糊区间决策矩阵 $D' = ([\mu_{ij}, 1 - \nu_{ij}])_{m \times n}$ ，并简记 $\theta_{ij} = [\mu_{ij}, 1 - \nu_{ij}]$ 。设 $\delta(\theta_{i_1 j_1}, \theta_{i_2 j_2}) = \|\theta_{i_1 j_1} - \theta_{i_2 j_2}\| = |\mu_{i_1 j_1} - \mu_{i_2 j_2}| + |\nu_{i_1 j_1} - \nu_{i_2 j_2}|$ 为 $\theta_{i_1 j_1}$ 和 $\theta_{i_2 j_2}$ 间的接近度。

设有 q 个指挥员参与决策，每个指挥员的权威度为 $\zeta_k (k=1, 2, \dots, q)$ ， ω_{j0} 为指标的初始权重(可由熵权法获得)， ρ_i 为多指挥员对第 i 个方案的综合偏好度，则 $\rho_i = \frac{1}{q} \sum_{k=1}^q \zeta_k \sum_{j=1}^n \theta_{ij} \omega_{j0}$ 。

指标权重的选择应使所有方案与理想解之间的偏差(用接近度的平方表示)总和最小，即满足

$$\min C_1(\omega) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \omega_j^2 \delta^2(\theta_{ij}, \theta_j^+) \text{ s.t. } \sum_{j=1}^n \omega_j = 1, \omega_j \geq 0 \quad (9)$$

其中 $\theta_j^+ = [\max_{1 \leq i \leq m} \mu_{ij}, 1 - \min_{1 \leq i \leq m} \nu_{ij}]$ 为 C_j 的理想解。

为使编队防空作战决策科学合理，指挥员的主观偏好信息应发挥一定的指导作用。指标权重的选择应使所有方案的客观属性值与主观偏好值的偏差总和最小，即满足

$$\min C_2(\omega) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \omega_j^2 \delta^2(\theta_{ij}, \rho_i) \text{ s.t. } \sum_{j=1}^n \omega_j = 1, \omega_j \geq 0 \quad (10)$$

对式(9)和式(10)中的决策模型，运用线性加权法，构造指标权重的综合最优化模型如下：

$$\min C = a_1 C_1(\omega) + a_2 C_2(\omega) \text{ s.t. } \sum_{j=1}^n \omega_j = 1, \omega_j \geq 0 \quad (11)$$

对此模型，通过建立拉格朗日函数求解得

$$\omega_j = \frac{1 / \sum_{i=1}^m [a_1 \delta^2(\theta_{ij}, \theta_j^+) + a_2 \delta^2(\theta_{ij}, \rho_i)]}{\sum_{j=1}^n 1 / \sum_{i=1}^m [a_1 \delta^2(\theta_{ij}, \theta_j^+) + a_2 \delta^2(\theta_{ij}, \rho_i)]} \quad (12)$$

式中， a_1 和 a_2 是调节 2 种模型的权系数，且 $a_1 + a_2 = 1$ ， a_1 和 a_2 分别反映了客观信息与主观信息占决策的比例大小，可通过实际需要调节。特别情况下，当 $a_1 = 1$ ， $a_2 = 0$ ，决策时完全重视客观信息；当 $a_1 = 0$ ， $a_2 = 1$ ，决策时完全倾向于指挥员的主观偏好。为了理性决策，文中选取 $a_1 = a_2 = 0.5$ 。

上述的权重规划模型，既考虑到来袭目标的客观情报信息对威胁估计的影响，又考虑到指挥人员借助军事经验所作出的主观偏好判断对威胁估计的影响，避免了只重客观信息或只看主观信息时出现偏差问题。评估指标权重的合理确定，为舰艇编队防空威胁估计的求解奠定了基础。

3.3 基于正态分布法的时间序列权重确定

舰艇编队防空战是一个动态的过程，威胁估计要全面考虑多时间信息。不同时间的信息有着不同的重要性，越靠近当前决策时刻，所获取的信息对威胁估计的影响越大^[18]。笔者采用均值为 0 的离散正态分布形式对不同的时间点赋权。设威胁估计过程中选取 T_1, T_2, \dots, T_s 连续 s 个时间的目标数据，则 $T_k = (k=1, 2, \dots, s)$ 时间的权重计算如下：

$$\tau_k = \frac{\left[(1 / \sqrt{2\pi\sigma}) e^{-k^2/2\sigma^2} \right]^{-1}}{\sum_{k=1}^s \left[(1 / \sqrt{2\pi\sigma}) e^{-k^2/2\sigma^2} \right]^{-1}} = \frac{e^{k^2/2\sigma^2}}{\sum_{k=1}^s e^{k^2/2\sigma^2}} \quad (13)$$

4 基于直觉模糊 TOPSIS 法的动态威胁估计

TOPSIS 法的思想为，从各指标中选出正理想方案与负理想方案，并由各方方案到正、负理想方案的距离计算相对贴近度，从而对目标进行威胁估计。

鉴于直觉模糊交叉熵是度量 2 个直觉模糊集间的差别程度^[19]，笔者引入模糊交叉熵来计算直觉模糊集间的距离。设 $A = \{ \langle x, \mu_A(x), \nu_A(x) \rangle | x \in X \}$ ， $B = \{ \langle x, \mu_B(x), \nu_B(x) \rangle | x \in X \}$ ，则 A 、 B 之间的模糊交叉熵为

$$I(A, B) = \frac{1}{2} \gamma_A(x) \log_2 \frac{2\gamma_A(x)}{\gamma_A(x) + \gamma_B(x)} + \frac{1}{2} \eta_A(x) \log_2 \frac{2\eta_A(x)}{\eta_A(x) + \eta_B(x)} \quad (14)$$

式中， $\begin{cases} \gamma_I(x) = \mu_I(x) + 1 - \nu_I(x) \\ \eta_I(x) = 1 - \mu_I(x) + \nu_I(x) \end{cases}$ ， $I = A$ 或 B 。

A 、 B 之间的模糊交叉熵距离为

$$d(A, B) = I(A, B) + I(B, A) \quad (15)$$

笔者利用直觉模糊 TOPSIS 思想来解决动态时间下舰艇编队的威胁估计问题，详细步骤如下：

1) 根据 2.2 节中方法得到 T_k 时间的直觉模糊决策矩阵 $D(T_k)$ ，然后用式(12)求解指标权重向量 $\omega(T_k)$ ，由此得到 T_k 时间的加权直觉模糊决策矩阵：

$$D_w(T_k) = (\bar{A}_{ij}(T_k))_{m \times n} = ((\bar{\mu}_{ij}(T_k), \bar{\nu}_{ij}(T_k)))_{m \times n} = ((1 - [1 - \bar{\mu}_{ij}(T_k)]^{\omega_j(T_k)}, [\bar{\nu}_{ij}(T_k)]^{\omega_j(T_k)}))_{m \times n} \quad (16)$$

2) 选出每个时间的正、负理想方案，规则如下：

$$\bar{A}_j^+(T_k) = \max_{1 \leq i \leq m} \bar{\mu}_{ij}(T_k), \min_{1 \leq i \leq m} \bar{\nu}_{ij}(T_k) \quad (17)$$

$$\bar{A}_j^-(T_k) = (\min_{1 \leq i \leq m} \bar{\mu}_{ij}(T_k), \max_{1 \leq i \leq m} \bar{\nu}_{ij}(T_k)) \quad (18)$$

3) 结合式(15)分别计算 T_k 时间 U_i 到正、负理想方案的直觉模糊交叉熵距离。

U_i 到正理想方案的距离为

$$d_i^+(T_k) = \sum_{j=1}^n d(\bar{A}_{ij}(T_k), \bar{A}_j^+(T_k)) \quad (19)$$

U_i 到负理想方案的距离为

$$d_i^-(T_k) = \sum_{j=1}^n d(\bar{A}_{ij}(T_k), \bar{A}_j^-(T_k)) \quad (20)$$

4) 计算 T_k 时间目标 U_i 的相对贴近度大小 $\xi_i(T_k) = d_i^-(T_k) / d_i^+(T_k) + d_i^-(T_k)$ ，并得到动态决策矩阵 $Q = (\xi_i(T_k))_{m \times s}$ 。 $\xi_i(T_k)$ 越大，则目标 U_i 的威胁程度越大。

5) 运用式(13)得到时间序列权重向量 $\tau = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_s]$ ，并构建加权动态决策矩阵 $Y = (y_{ik})_{m \times s} = ((\tau_k \xi_i(T_k)))_{m \times s}$ 。

6) 选出 Y 中的正、负理想方案，规则如下：

$$Y^+ = (\max_{1 \leq i \leq m} y_{i1}, \max_{1 \leq i \leq m} y_{i2}, \dots, \max_{1 \leq i \leq m} y_{is}) \quad (21)$$

$$Y^- = (\min_{1 \leq i \leq m} y_{i1}, \min_{1 \leq i \leq m} y_{i2}, \dots, \min_{1 \leq i \leq m} y_{is}) \quad (22)$$

7) 计算 U_i 到 Y^+ 、 Y^- 的距离。 U_i 到 Y^+ 的距离

为 $D_i^+ = \sqrt{\sum_{k=1}^s (y_{ik} - \max_{1 \leq i \leq m} y_{ik})^2}$ ， U_i 到 Y^- 的距离为

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{k=1}^s (y_{ik} - \min_{1 \leq i \leq m} y_{ik})^2}$$

8) 计算 U_i 的威胁度 $\varphi_i = D_i^- / (D_i^+ + D_i^-)$ ，并根据 φ_i 的大小对所有目标的威胁程度进行排序。

5 仿真与结果分析

5.1 仿真验证

设我舰艇编队在某次海战中侦测到敌方 5 个目标 $U_1 \sim U_5$ 的情报信息，评估指标为目标类型 C_1 、目标高度 C_2 (m)、目标距离 C_3 (km)、目标速度 C_4 (m/s)、目标航路捷径 C_5 (m) 和攻击意图 C_6 。现选取连续 3 个时间 $T_1 \sim T_3$ 的信息进行防空威胁估计，且有 3 位编队指挥员参与决策，权威度 $\xi_1 \sim \xi_3$ 为 0.84、0.92 和 0.89。各时间的目标信息如表 3、表 4 和 5 所示。

表 3 T_1 时间来袭目标的情报信息

目标	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
U_1	弱	[238,266]	[267,290]	115	430	很强
U_2	强	[1 123,1 199]	[98,116]	344	458	中等
U_3	很强	[264,228]	[347,361]	539	716	强
U_4	强	[325,354]	[185,202]	312	506	很强
U_5	中等	[439,460]	[550,576]	436	308	强

表 4 T_2 时间来袭目标的情报信息

目标	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
U_1	弱	[205,230]	[225,256]	161	340	很强
U_2	强	[940,996]	[81,97]	400	385	中等
U_3	很强	[229,256]	[283,301]	592	640	强
U_4	强	[293,310]	[145,160]	351	470	很强
U_5	中等	[441,469]	[562,600]	436	332	强

表 5 T_3 时间来袭目标的情报信息

目标	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
U_1	弱	[199,222]	[181,200]	223	306	很强
U_2	强	[903,959]	[70,80]	452	311	中等
U_3	很强	[192,205]	[232,258]	630	603	很强
U_4	强	[250,267]	[102,127]	437	379	很强
U_5	中等	[437,458]	[560,590]	440	337	强

1) 对属性值作规范化处理，将语言变量、区间数和实数统一用直觉模糊数来表达。 T_1 时间的直觉模糊决策矩阵如表 6 所示。

由权重规划模型，得 T_1 时间指标的权重向量为 $\omega(T_1) = (0.145 8, 0.080 8, 0.041 1, 0.221 0, 0.226 0, 0.285 2)$ 。

2) 在 1) 的基础上得到加权直觉模糊决策矩阵，并确定 T_1 时间的正、负理想方案如下：

$$G^+(T_1) = ((0.285 2, 0.646 1), (0.169 8, 0.777 5), (0.090 3, 0.843 4), (0.594 0, 0.406 0), (0.602 2, 0.397 8), (0.481 5, 0.425 5));$$

$$G^-(T_1) = ((0.050 7, 0.916 5), (0.017 0, 0.979 8), (0.007 2, 0.991 7), (0.202 5, 0.789 3), (0.214 0, 0.773 5), (0.179 4, 0.709 4)).$$

限于篇幅，上述 2 个步骤中 T_2 、 T_3 的相关计算略去。

3) 计算每个时间各目标的相对贴进度，由此得到动态决策矩阵为

$$Q = \begin{bmatrix} 0.416 1 & 0.449 7 & 0.486 5 \\ 0.359 4 & 0.505 5 & 0.540 5 \\ 0.579 4 & 0.639 9 & 0.734 8 \\ 0.458 2 & 0.541 8 & 0.739 2 \\ 0.582 3 & 0.498 7 & 0.414 8 \end{bmatrix}。$$

4) 在式(13)中选取标准差 $\sigma = 1.5$ 计算不同时间点所占的权重，得到 $\tau = [0.112 8, 0.219 7, 0.667 5]$ ，则加权动态决策矩阵为

$$Y = \begin{bmatrix} 0.046 9 & 0.098 8 & 0.324 7 \\ 0.044 6 & 0.111 1 & 0.360 7 \\ 0.065 4 & 0.140 6 & 0.490 5 \\ 0.051 7 & 0.119 0 & 0.493 4 \\ 0.065 7 & 0.109 1 & 0.270 9 \end{bmatrix}。$$

表 6 T_1 时间的直觉模糊决策矩阵

目标	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
U_1	(0.30,0.55)	(0.90,0.04)	(0.34,0.61)	(0.64,0.34)	(0.92,0.07)	(0.90,0.05)
U_2	(0.70,0.15)	(0.19,0.78)	(0.90,0.01)	(0.89,0.10)	(0.90,0.09)	(0.50,0.30)
U_3	(0.90,0.05)	(0.81,0.15)	(0.25,0.73)	(0.98,0.02)	(0.65,0.32)	(0.70,0.15)
U_4	(0.70,0.15)	(0.66,0.30)	(0.48,0.48)	(0.81,0.18)	(0.83,0.17)	(0.90,0.05)
U_5	(0.50,0.30)	(0.49,0.49)	(0.16,0.82)	(0.95,0.04)	(0.98,0.02)	(0.70,0.15)

5) 确定 Y 中的正、负理想方案如下：

$$Y^+ = (0.065 7, 0.140 6, 0.490 5);$$

$$Y^- = (0.044\ 6, 0.098\ 8, 0.270\ 9)。$$

计算各目标与 Y^+ 、 Y^- 间的距离如下:

$$D^+ = (0.174\ 8, 0.137\ 5, 0.002\ 9, 0.025\ 7, 0.218\ 8);$$

$$D^- = (0.047\ 9, 0.084\ 8, 0.218\ 6, 0.217\ 6, 0.023\ 5)。$$

6) 计算各来袭目标的威胁度大小为 $\varphi = (0.215\ 2, 0.381\ 4, 0.986\ 7, 0.894\ 3, 0.096\ 9)$, 得到威胁估计排序结果 $U_3 > U_4 > U_2 > U_1 > U_5$ 。

5.2 结果分析

在本实例中, U_5 在各时间的高度、距离、速度等方面的数据基本无变化; 而由其他目标的数据能看出 $U_1 \sim U_4$ 在逐渐逼近我方舰艇编队, 它们急剧影响着战场态势。从直观上能判断出 U_5 的威胁程度是动态下降的, 应将其归为“威胁度低”的目标。这与仿真结果是一致的。

此外, 在当前 T_3 时间的评估结果中, 目标的最大威胁度与最小威胁度相差 $0.324\ 4(0.739\ 2 - 0.414\ 8)$, 采用动态评估后, 目标的最大威胁度与最小威胁度相差 $0.889\ 8(0.986\ 7 - 0.096\ 9)$ 。笔者的方法使得各目标的威胁度差距显得清晰, 这将有利于舰艇编队指挥员作出下一步的决策。

由上述实例可知: 若只采用当前时间的数据进行威胁估计, 排序结果为 $U_4 > U_3 > U_2 > U_1 > U_5$, U_3 和 U_4 的排序发生了改变。这是因为静态评估下未能涉及到目标的历史情报信息, 而在实际海战场威胁估计的过程中, 综合考量历史与当前信息是必要的, 所以动态评估结果 $U_3 > U_4 > U_2 > U_1 > U_5$ 更趋合理化。

6 结束语

笔者针对舰艇编队不确定海战场环境下的威胁估计问题, 提出了一种动态防空威胁的直觉模糊决策方法。该方法通过直觉模糊熵权法及融合主观偏好信息对评估指标的权值进行解算, 使得结果更符合战场需要; 然后根据正态分布法对多时间的信息作加权时间处理, 将空中目标的历史数据和当前数据共同纳入威胁估计的体系, 改善了传统海战场的静态评估方法, 可动态呈现出防空态势, 威胁估计的结果更加准确。该方法为解决舰艇编队的威胁估计问题提供了一种有效的途径。

参考文献:

- [1] 卞泓斐, 杨根源. 基于动态贝叶斯网络的舰艇防空作战威胁评估研究[J]. 兵工自动化, 2015, 34(6): 14-19.
- [2] 张肃. 空中目标威胁评估技术[J]. 情报指挥控制系统与仿真技术, 2005, 27(1): 41-45.
- [3] 李京, 杨根源. 基于神经网络的地面目标威胁度分析[J]. 兵工自动化, 2012, 31(3): 15-18.
- [4] 季傲, 姜礼平, 吴强. 基于改良云模型的舰艇防空威胁评估[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(5): 35-38.
- [5] XU Y, WANG Y, Miu X. Multi-attribute decision making method for air target threat evaluation based on intuitionistic fuzzy sets[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2012, 23(6): 891-897.
- [6] 黄文斌, 伍之前, 陈颜辉. 基于属性优先级的空中目标威胁评估模型[J]. 舰船科学技术, 2010, 32(9): 59-62.
- [7] 武华, 苏秀琴. 基于群广义直觉模糊软集的空袭目标威胁评估方法[J]. 控制与决策, 2015, 30(8): 1462-1468.
- [8] 黄洁, 李弼程, 赵拥军. 直觉模糊集 Choquet 积分在目标威胁估计中的应用[J]. 信息工程大学学报, 2014, 15(1): 6-11.
- [9] ATANASSOV K. Intuitionistic Fuzzy Sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1986, 20(1): 87-96.
- [10] 缪旭东, 王永春. 舰艇编队协同防空任务规划理论及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 142.
- [11] 徐泽水. 直觉模糊信息集成理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 7.
- [12] 潘科, 潘宣宏, 郭新奇. 基于多属性决策的水面舰艇防空威胁判断分析[J]. 计算机与数字工程, 2014, 42(5): 802-805.
- [13] WANG Y, MIU X. Intuitionistic fuzzy perceiving methods for situation and threat assessment[C]. 9th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, 2012: 578-582.
- [14] 郝娜, 孔德鹏, 常天庆, 等. 基于诱导有序加权直觉模糊集的混合多属性目标威胁评估方法[J]. 装甲兵工程学院学报, 2016, 30(3): 100-105.
- [15] 刘满凤, 任海平. 基于一类新的直觉模糊熵的多属性决策方法研究[J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(11): 2909-2916.
- [16] 雷英杰, 赵杰, 贺正洪, 等. 直觉模糊集理论及应用: 下册[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 427-429.
- [17] 王毅, 刘三阳, 张文, 等. 属性权重不确定的直觉模糊多属性决策的威胁评估方法[J]. 电子学报, 2014, 42(12): 2509-2514.
- [18] 张媛媛, 冯琦, 周德云, 等. 基于直觉模糊集的空战动态多属性威胁评估[J]. 电光与控制, 2015, 22(2): 17-21.
- [19] 赵萌, 任嵘嵘. 基于模糊熵的直觉模糊多属性群决策方法[J]. 数学的实践与认识, 2014, 44(23): 153-159.