

引文格式: 黄文君, 黄心入, 金新, 等. 基于模糊Shapley值模型的激光武器体系贡献率能效评估方法[J]. 航空制造技术, 2025, 68(22): 122-128.

HUANG Wenjun, HUANG Xinru, JIN Xin, et al. Assessment method for contribution efficiency of laser weapon system based on fuzzy Shapley value model[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(22): 122-128.

基于模糊Shapley值模型的激光武器体系贡献率能效评估方法

黄文君¹, 黄心入², 金新², 王晨霁¹, 罗远哉¹

(1. 西北大学, 西安 710119;

2. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024)

[摘要] 激光武器是现代战争中反导反无人机的重要手段, 为了公平地评估激光武器联盟中各个装备的体系贡献率, 考虑激光武器在打击目标过程中的毁伤效应, 根据毁伤影响因子建立模糊系数矩阵。将激光武器视为合作博弈的参与者, 利用模糊 Shapley 值模型并给出计算公式, 量化各参与方在作战任务中的分担程度。最后, 通过计算得到典型激光武器作战场景下各激光武器的体系贡献率, 为激光武器使用策略提供参考依据。

关键词: 体系贡献率; 模糊 Shapley 值模型; 激光武器; 武器装备评估; 博弈论

中图分类号: V2; E92

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.22.122

Assessment Method for Contribution Efficiency of Laser Weapon System Based on Fuzzy Shapley Value Model

HUANG Wenjun¹, HUANG Xinru², JIN Xin², WANG Chenji¹, LUO Hangzai¹

(1. Northwest University, Xi'an 710119, China;

2. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] Laser weapons are essential means for anti-missile and anti-drone operations in modern warfare. To fairly assess the system contribution rates of various equipment in a laser weapon coalition, a fuzzy coefficient matrix is established based on damage impact factors, with full consideration of the damage effects of laser weapons during target engagement. Furthermore, by treating laser weapons as participants in cooperative games, the fuzzy Shapley value model is employed, and corresponding calculation formulas are derived to quantify the contribution share of each participant in combat missions. Finally, the system contribution rates of various laser weapons in typical laser weapon combat scenarios are calculated and obtained, which provides a reference basis for laser weapon employment strategies.

Keywords: System contribution rate; Fuzzy Shapley value model; Laser weapons; Weapon equipment evaluation; Cooperative game theory

未来战争发展方向多为无人化、低成本化、信息化, 激光武器以其高精度、高速命中、无须弹药供应、低成本、灵活性等优点被称为未来战争中重要的作战工具之一。自 1970 年以来, 美国一直在进行多项机载激光武器计划。其中, 最广为人知的是机载激光武器系统 (Airborne laser, ABL) 和战术激光武器 (Tactical laser

weapon, ATL)^[1]。激光武器作为一种新型的攻击型武器, 可应用于战斗机、无人机等多种机载平台, 其作战模式与常规武器系统也有较大差异, 大致可分为近距离自卫防护、近距离空中支援、多机协同作战。

激光武器有无限弹舱、高频发射、攻防兼备等诸多优势, 可与其他各类武器装备在未来信息化战争中相互

协同,发展为体系作战模式。因此运用体系贡献率评估武器装备对整体作战效果的影响,对激光武器系统的科学部署具有重要的参考意义。

目前体系贡献率评估方法通常以装备系统加入前后体系属性值的变化作为新研制装备对体系的贡献率^[2],称为“有无型”装备体系贡献率,即

$$\Delta C = \frac{C_1 - C_0}{C_0} \times 100\% \quad (C_0 \neq 0) \quad (1)$$

式中, C_0 为原始装备系统属性值; C_1 为加入装备后的系统属性值; ΔC 为装备体系贡献率。

在不同的作战环境研究中,装备贡献率的建模产生了不同的变体。例如,王龙等^[3]根据空对空的作战特点将体系贡献率模型改进为“替代型”,即将分子中的 C_1 作为使用装备 1 代替装备 0 后的体系贡献率。周琛等^[4]在评估模型中加入作战环网络效能模型进行求解,提高了模型的求解效率。

本文结合激光武器的作战特点,分别对不同的典型作战场景进行模拟建模,典型作战任务为致盲和毁伤。本文将激光武器多机协作作战系统实现作战目标的过程模拟为一个合作博弈问题,将激光武器作为合作博弈的参与者,整体系统的体系能效作为所有参与者的共同收益。本文通过建立 Shapely 值模型对系统中不同作战单位进行能效建模评估,评估在多种作战环境下激光武器不同的作战目标对应的体系贡献率,为激光武器的部署提供决策支持。

1 试验及方法

1.1 基于模糊 Shapley 值的合作博弈模型构建

激光武器作战体系在实战环境下面临诸多不确定因素,如目标特性的多样性,环境影响的复杂性以及系统自身性能的波动等。运用经典的 Shapley 值得到的利益分配在面对这些不确定和模糊信息时往往力不从心,容易导致评估结果的偏差,难以结合实践。因此引入模糊 Shapley 值算法,通过联盟规则合成目标损毁概率和系统响应时间的评估结果,从而得到更加综合的作战效能评估。

定义 1: 假设作战体系由 n 台激光武器构成,参与者集合为 $N = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ 。令 $P(N)$ 为 N 的幂集,对于任意子集 $S \in P(N)$,其在模糊合作博弈中的模糊特征函数为 $V(S)$,即 $V: P(N) \rightarrow \mathbb{R}$,表达为所有装备联盟的集中到实数域的映射,并且对空集规定 $V(\emptyset) = 0$ 。

定义 2: 称二元组 (N, \bar{V}) 在 N 上具有模糊支付函数,表达该贡献率评估合作博弈。

在探讨激光武器体系的作战效能评估时,面对的主要挑战是如何准确处理系统性能的不确定性和环境因

素的模糊性。为此,本文引入三角模糊数方法,该方法通过定义一个区间内的最可能值及其上下界,能有效量化和表达不确定性^[5]。下文给出三角模糊数的定义、计算及相关内容。

定义 3^[6]: 在模糊数学中,为了刻画不确定性信息,常用模糊数进行表示。若 $\eta = (\eta_1, \eta_2, \eta_3)$ 为一个有序三元组,且满足 $0 \leq \eta_1 \leq \eta_2 \leq \eta_3$,则 η 为一组三角模糊数,其隶属度函数 $\mu_\eta(x)$ 可表示为

$$\mu_\eta(x) = \begin{cases} (x - \eta_1) / (\eta_2 - \eta_1), & x \in [\eta_1, \eta_2] \\ (x - \eta_3) / (\eta_2 - \eta_3), & x \in [\eta_2, \eta_3] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中, η_2 为 η 的中心值; η_1, η_3 分别表示上、下限值; $\eta_2 - \eta_1$ 是 η 的左扩散。同理, $\eta_2 - \eta_3$ 是 η 的右扩散, η 也可以表示为 (η_2, η_r) ,其中 $\eta_r = \eta_2 - \eta_1 = \eta_3 - \eta_2$ 称为三角模糊数的扩散半径。

在激光武器作战体系中,设武器联盟特征函数上限为 V^+ ,下限为 V^- ,满足 $0 \leq V^- \leq \bar{V} \leq V^+$,则隶属度函数 $\mu_{\bar{V}(S)}(V)$ 可表达为

$$\mu_{\bar{V}(S)}(V) = \begin{cases} (V - V^-) / (\bar{V} - V^-), & V \in [V^-, \bar{V}] \\ (V - V^+) / (\bar{V} - V^+), & x \in [\bar{V}, V^+] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\mu_{\bar{V}(S)}(V)$ 是模糊特征函数 $\bar{V}(S)$ 的隶属度函数,设 $\forall \alpha \in [0, 1]$, $\bar{V}(S)$ 的 α 截集表示为 $\bar{V}_\alpha(S) = \{V \in \mathbb{R} | \mu_{\bar{V}(S)}(V) \geq \alpha\}$ 。由模糊数的性质可知, $\bar{V}(S)$ 的截集可表示为 $[V_\alpha^-(S), V_\alpha^+(S)]$,且满足: 对于 $\forall S, T \in N, S \cap T = \emptyset$, $\forall \alpha \in [0, 1]$, 有 $V_\alpha^+(S \cup T) \geq V_\alpha^+(S) + V_\alpha^+(T)$, $V_\alpha^-(S \cup T) \geq V_\alpha^-(S) + V_\alpha^-(T)$ ^[7]。

定义 4: 激光武器体系贡献率为 C_i ,所有激光武器合作时的收益值为 $V(N)$,武器 i 的体系贡献度为 ψ_i ,则装备 i 的体系贡献率可表达为

$$C_i = \frac{\psi_i}{V(N)} \quad (4)$$

1.2 激光武器作战体系效能模糊评估模型

激光武器与传统炮弹的打击方式不同,使用传统武器能效模型难以体现激光武器的攻击特性。因此本文通过分析激光武器在实际作战中目标打击的特性,提出了模糊评估模型,用于评估激光器毁伤效果对激光武器体系贡献率的影响。

战场作战环境复杂,激光毁伤效果由 3 部分决定: 激光器特性、传播环境以及打击目标特性。因此本文引入影响因子矩阵对模糊 Shapley 值模型进行修正。

(1) 激光武器数值及大气条件评估模型。

激光武器对打击目标的毁伤规律可描述为如下模型: 假设激光传播过程中大气密度均匀,暂不考虑大气

湍流效应^[8]和热晕效应^[9],根据朗博-比尔定律,激光透过率为

$$T(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} = \exp\left[-\int_0^R k(\lambda)dl\right] \approx e^{-k(\lambda)R} \quad (5)$$

式中, $I(\lambda)$ 为激光在传播距离 R 后的光强; $I_0(\lambda)$ 为激光器发射口的初始光强; k 为大气衰减系数,其数值由大气环境条件决定; R 表示激光从发射端到目标的总传播距离; l 为积分变量,表示沿传播路径从 0 到 R 的位置坐标,用于刻画激光在大气中传播过程中各微小距离段的衰减效应。当大气条件均匀时, $k(l)$ 可视为常数。

激光在经过大气衰减后功率密度为^[10]

$$P_r = P_t \frac{\rho_{\text{exp}} D^2 \cos \varphi}{4R^2} \eta_{\text{Aim}}^2 \eta_{\text{sys}} \quad (6)$$

式中, P_t 为初始发射功率; ρ_{exp} 为打击目标的平均反射系数; D 为接收光斑孔径; φ 为耦合角; R 激光雷达到目标的距离; η_{Aim} 为单程大气传输系数; η_{sys} 为光学系统透过率。

当激光到达打击目标表面的功率密度超过材料毁伤阈值,则判定为毁伤,否则需要进行多次攻击。因此,本文将激光毁伤指标 u_1 定义为激光毁伤影响因子,即

$$u_1 = \begin{cases} 0 & \varepsilon < \varepsilon_1 \\ \frac{\varepsilon - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} & \varepsilon_1 < \varepsilon < \varepsilon_2 \\ 1 & \varepsilon > \varepsilon_2 \end{cases} \quad (7)$$

式中, ε 为激光上靶功率密度; ε_1 为打击目标受损的最小功率密度; ε_2 为打击目标完全被击毁的功率密度。

激光武器瞄准与跟踪部件负责对打击目标的识别与跟踪,决定了激光武器的打击精度。由于激光发射公里为高斯型脉冲,当发射角度与目标位置有误差偏移时,杀伤功率会根据距离误差改变。因此引入目标探测影响因子 u_2 ,表示瞄准跟踪子系统引入的打击误差。

(2) 打击目标评估模型。

激光武器典型打击目标一般为无人机及导弹,作战任务分为毁伤和致盲,其机理如表 1 所示。激光毁伤是当激光辐照到材料表面时,其能量转化为 3 种形式:反射、吸收和透射。其中,被材料吸收的激光能量将引起材料中自由电子或束缚电子的振动,一部分振动的能量

表 1 无人机毁伤与致盲机理

Table 1 Mechanisms of unmanned aerial vehicle injuries and blinding

损伤类型	无人机	导弹
毁伤	机翼/机身/设备舱等结构受损	击穿整流罩/热效应引爆炸药
致盲	光学器件致眩、致盲,以及任务载荷失效	破坏导航传感器

转化为热能,实现对目标结构的破坏,致使无人机或导弹失控坠毁爆炸。激光致盲是对光电侦察部件或内部电子元器件等部位进行激光辐照,光学器件过曝饱和,使电子元器件载荷失效,致使无人机或导弹丧失侦察、导航等工作能力。

由于无人机的组成成分相对复杂,不同材料对激光的防御能量阈值各有不同,因此,引入打击目标毁伤能量阈值影响因素 u_3 。典型材料毁伤能量阈值如表 2 所示。

(3) 构建毁伤影响因子归一化矩阵。

根据前文所述,激光武器毁伤模型根据激光毁伤影响因子 u_1 、瞄准探测影响因子 u_2 、阈值影响因素 u_3 建立影响因子矩阵 U 。

$$U = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} \\ \dots & \dots & \dots \\ u_{i1} & u_{i2} & u_{i3} \end{bmatrix}$$

由于 3 类影响因子对毁伤评价的影响度不同,所以制定专家修正权重系数矩阵 $\omega = [\omega_1, \omega_2, \omega_3]^T$ 。将专家修正权重系数矩阵与影响因子矩阵 U 相乘,进一步得到综合影响程度系数矩阵 M ,即

$$M = U \times \omega = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} \\ \dots & \dots & \dots \\ u_{i1} & u_{i2} & u_{i3} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 \\ \dots \\ m_i \end{bmatrix}$$

1.3 修正 Shapley 值模型

在计算不同武器联盟的特征函数时,为确保计算的准确性,本文作出以下假设:在求解过程中,作战使命任务、作战想定设置等其他因素保持不变。该假设将有助于准确评估各联盟的体系贡献率。

定义 $S^{[1]}$: 对于模糊合作博弈 (N, \bar{V}) , $\forall \alpha \in [0, 1]$, 存在模糊 Shapley 值 $\bar{\varphi}(\bar{V}_\alpha) = [\bar{\varphi}_1(\bar{V}_\alpha), \bar{\varphi}_2(\bar{V}_\alpha), \dots, \bar{\varphi}_n(\bar{V}_\alpha)]$, 其中 $\bar{\varphi}_i(\bar{V}_\alpha) = [\bar{\varphi}_i^-(\bar{V}_\alpha), \bar{\varphi}_i^+(\bar{V}_\alpha)]$, $i=1, 2, \dots, n$, 即第 i 个激光武器的模糊贡献度,具体表达为

$$\bar{\varphi}_i^-(\bar{V}_\alpha) = \sum_{i \in S \in N} \omega(|S_i|) [V_\alpha^-(S) - V_\alpha^+(S \setminus \{i\})] \quad (8)$$

表 2 典型材料毁伤能量阈值

Table 2 Damage energy thresholds of typical materials

材料种类及部位	材料毁伤能量阈值/ $(W \cdot cm^{-2})$	毁伤时间/s		
		激光功率 10 kW	激光功率 50 kW	激光功率 30 kW
碳纤维材料	200~500	16	10	6~7
玻璃纤维材料	200~300	11	5	3
铝制外壳	100	10	5	3
光电传感器	70	11	5	2~3
锂电池	100	22~23	17	10~11

$$\bar{\varphi}_i^+(\bar{V}_\alpha) = \sum_{i \in S_i \in N} \omega(|S_i|) [V_\alpha^+(S) - V_\alpha^-(S/\{i\})] \quad (9)$$

式中, S_i 为所有含有激光武器 i 的武器联盟; $\omega(|S_i|)$ 为激光武器 i 在加入不同武器联盟 S_i 的加权因子, 表达为 $\omega(|S_i|) = (|S_i| - 1)! (n - |S_i|)! / n!$; $|S_i|$ 表示武器联盟 S_i 中的激光武器数量; n 为激光武器总数。

结合 1.2 节所述的激光武器毁伤特性影响因子, 进一步得到经过修正后的模糊 Shapley 值, 即 $\bar{\varphi}_i(\bar{v}_\alpha) = [\varphi_i^-(\bar{v}_\alpha), \varphi_i^+(\bar{v}_\alpha)]$ 。其中:

$$\varphi_i^+(\bar{v}_\alpha) = \psi_i^+(\bar{v}_\alpha) + (m_i - 1/n) \times \bar{v}_\alpha^+(N) \quad (10)$$

$$\varphi_i^-(\bar{v}_\alpha) = \psi_i^-(\bar{v}_\alpha) + (m_i - 1/n) \times \bar{v}_\alpha^-(N) \quad (11)$$

式中, $\varphi_i^-(\bar{v}_\alpha)$ 表示第 i 个激光武器参与方所得收益的最小值; $\varphi_i^+(\bar{v}_\alpha)$ 表示收益的最大值, 构成一个以 α 为隶属度的区间函数。由此引入包含激光武器毁伤特性综合影响的收益贡献率分配区间模糊值 $\bar{\varphi}_i(\bar{v}_\alpha)$, 包含激光器特性、传播环境以及打击目标特性的影响因素对利益分配的影响, 是初始模糊区间在实际作战场景中发生偏移的结果。

将模糊 Shapley 值模型修正初始区间后, 代入式 (4), 得到修正后的激光武器体系贡献率为

$$C_i^+ = \frac{\varphi_i^+(\bar{v}_\alpha)}{\bar{V}(N)} \quad (12)$$

$$C_i^- = \frac{\varphi_i^-(\bar{v}_\alpha)}{\bar{V}(N)} \quad (13)$$

上述模型以模糊 Shapley 值为核心原理, 引入激光毁伤效果影响因子综合系数对其修正。带有置信水平区间 α 的利益分配区间能更好地反映出激光武器联盟装备贡献率分配的实际情况, 还考虑了不同影响因子对武器资源投入的不均衡情况, 采用专家知识作为权重矩阵量化各影响因子在贡献率评估中的影响程度, 使综合评价结果更具有科学性。

2 算例分析与模型应用

2.1 算例背景

本文选取机载激光武器对抗无人机蜂群的作战场景, 不同空中作战环境对激光武器的发射及无人机打击效果产生不同影响, 选择不同的激光武器打击策略关乎作战效果、作战收益等。因此, 将构建模糊 Shapley 值模型应用到激光武器联合打击无人机蜂群的项目案例中, 通过对计算结果的比对分析, 验证该模型的可操作性。

根据激光武器的作战任务, 本文设定了机载激光武器典型作战场景。

场景 1: A 方某直升机编队执行军事任务, 遭遇 B 方无人机蜂群骚扰, 严重影响直升机安全, 需要对其进行击毁。A 方直升机编队由 n 架直升机组成, 每架直升

机配备 50 kW 激光武器一台。A 方编队区域防空系统正常工作, 检测到 B 方无人机蜂群的范围区域, B 方蜂群由 m 台无人机组成, 但无法获取其精确位置。当 B 方无人机蜂群来袭后, 假设无人机蜂群在进入 A 方编队范围内 20 km 处被机载雷达发现。无人机飞行速度为 30 m/s, 大气能见度为 20 km。激光武器毁伤目标打击时间为 10 s, 蓄能累计照射时间为 200 s。

场景 2: A 方直升机编队在执行军事任务, 遭遇 B 方侦察无人机在 A 方附近空域实行侦察作业, 严重威胁信息安全。现需要 A 方使用激光武器实现针对 B 方侦察机群致盲打击, 使其侦察任务失败并驶离 A 方区域。假设 B 方无人机蜂群在距离 A 方领域 15 km 处被雷达侦测到大致方位, 其飞行速度为 30 m/s, 激光武器完成致盲任务所需的时间为 5 s, 蓄能累积照射时间为 100 s, 大气能见度为 30 km。

2.2 激光武器毁伤能力评估矩阵

根据 2.1 节所述场景, 通过仿真得到激光武器毁伤概率与打击距离之间的关系曲线如图 1 所示。当目标距离过远时, 选择不使用激光武器, 而当目标位于激光武器打击范围时, 根据激光武器的跟踪瞄准参数、打击频率时间获得相应的打击目标数量。最后通过战场仿真并代入模糊 Shapley 值模型获得激光武器的体系贡献率^[5]。

本文通过仿真模拟场景 1 得到了对抗机群的相对位置, 令直升机编队成员数量 $n=5$, 无人机蜂群数量 $m=20$, 如图 2 所示。

在场景 1 中, 无人机时速为 30 m/s, 假设激光武器从瞄准、蓄能到打击的总耗时为 2 s, 给无人机目标加上位置偏移值, 最后结合图 1 所示的激光武器毁伤概率曲线, 代入式 (2), 构建激光武器的预期毁伤值与其隶属度函数, 隶属度函数参数如表 3 所示。

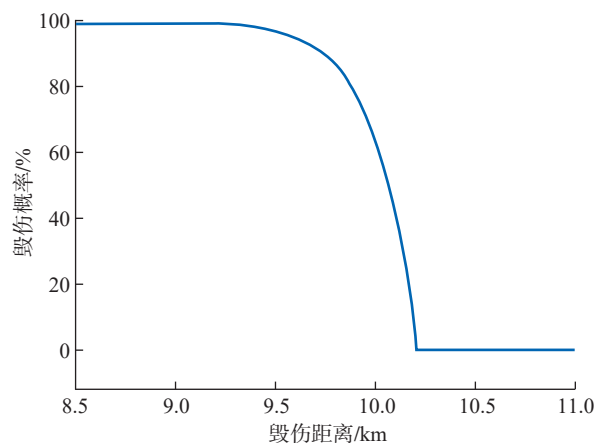
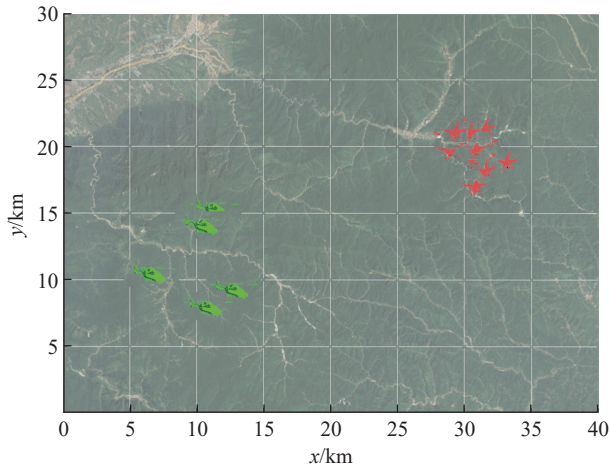


图 1 激光武器毁伤概率与毁伤距离曲线
Fig.1 Laser weapon damage probability and damage distance curve



注：绿色目标为直升机编队，红色目标为无人机蜂群。

图2 战场对抗模拟场景

Fig.2 Simulation scenario of battlefield confrontations

以激光武器 1 为例,代入式 (10) 和 (11),其预期毁伤值的 α 截集如表 4 所示。

同理,代入其他武器的预期毁伤值后计算得到相应 Shapley 值,如表 5 所示。

激光毁伤影响因子 u_1 、瞄准探测影响因子 u_2 、阈值影响因子 u_3 矩阵分别为

$$u_1=[0.16,0.79,0.31,0.53,0.17]^T$$

$$u_2=[0.60,0.26,0.65,0.69,0.75]^T$$

$$u_3=[0.45,0.08,0.23,0.91,0.15]^T$$

$$U=[(u_1 \ u_2 \ u_3)]$$

根据专家知识打分得到的归一化修正矩阵为

$$W=[0.18,0.15,0.20]^T$$

综合影响系数矩阵为

$$M=U \times W=[0.21,0.20,0.20,0.38,0.18]^T$$

代入权重修正系数得到修正后的 Shapley 值如表 6 所示。

2.3 评估结果

根据表 5 和 6 的计算结果可知,对于激光武器 1,其中心预期毁伤值为 5.71 台无人机,上限浮动 6.39 台,下限浮动 3.28 台,这一浮动空间是根据无人机在激光武器跟瞄过程中可能的移动位置所估算的结果。如图 3 所示,实线为修正后的 Shapley 值,虚线为原始 Shapley 值,机载激光武器根据不同位置对无人机蜂群有不同的打击效果,依据不同概率获得毁伤收益。

将激光武器的毁伤收益代入式 (12) 和 (13) 后得到体系贡献率,如表 7 所示。

传统方法只能代入精确值的经典 Shapley 值计算方法获得预期毁伤收益,而在实际战场对战中,由于无人机体积小,雷达反射面小,现有的激光武器精确跟瞄系

表 3 隶属度函数参数表

Table 3 Parameters of membership function

武器集合					η_1	η_2	η_3
0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
1	0	0	0	0	1.55	3.77	4.76
2	0	0	0	0	3.73	4.90	5.00
1	2	0	0	0	4.68	7.69	8.76
3	0	0	0	0	0.00	3.33	4.93
1	3	0	0	0	1.55	5.38	6.73
4	0	0	0	0	3.75	4.84	4.99
2	3	0	0	0	3.73	6.87	7.95
1	4	0	0	0	4.65	5.84	6.00
5	0	0	0	0	4.07	4.96	5.00
1	2	3	0	0	4.68	8.78	9.76
2	4	0	0	0	6.52	7.85	7.99
1	5	0	0	0	4.99	7.74	8.76
1	2	4	0	0	7.42	8.85	9.00
3	4	0	0	0	3.75	6.22	6.97
2	5	0	0	0	5.03	6.00	6.00
1	3	4	0	0	4.65	7.22	7.98
1	2	5	0	0	5.94	8.79	9.76
3	5	0	0	0	4.07	6.92	7.95
2	3	4	0	0	6.52	8.73	8.99
1	3	5	0	0	4.99	8.83	9.76
4	5	0	0	0	6.83	7.85	7.99
1	2	3	4	0	7.42	9.73	10.00
2	3	5	0	0	5.03	7.96	8.95
1	4	5	0	0	7.74	8.85	9.00
1	2	3	5	0	5.94	9.87	10.76
2	4	5	0	0	7.78	8.85	8.99
1	2	4	5	0	8.69	9.85	10.00
3	4	5	0	0	6.83	8.73	8.99
1	3	4	5	0	7.74	9.73	10.00
2	3	4	5	0	7.78	9.73	9.99
1	2	3	4	5	8.69	10.73	11.00

统存在一定误差,导致经典 Shapley 值模型难以应用于战场实践。并且,由于战场情况更为复杂,大气条件瞬息万变,为模糊 Shapley 值模型增设初始修正区间,更能在实际应用中贴合环境对激光武器的影响。

表 4 激光武器预期毁伤值 α 截集
Table 4 α -cuts of expected damage values for laser weapons

$I \in S$	$\omega(s)$	$\bar{v}_\alpha(s)$	$\bar{v}_\alpha(s \setminus \{1\})$	$\bar{v}_\alpha(s) - \bar{v}_\alpha(s \setminus \{1\})$
1	1/5	$[1.55+2.22\alpha, 4.76-0.99\alpha]$	0	$[1.55+2.22\alpha, 4.76-0.99\alpha]$
1, 2	1/20	$[4.68+3.02\alpha, 8.76-1.06\alpha]$	$[3.73+1.17\alpha, 5.00-0.10\alpha]$	$[0.94+1.85\alpha, 3.76-0.97\alpha]$
1, 3	1/20	$[1.55+3.83\alpha, 6.73-1.36\alpha]$	$[0.00+3.33\alpha, 4.93-1.60\alpha]$	$[1.55+0.49\alpha, 1.80+0.24\alpha]$
1, 4	1/20	$[4.65+1.19\alpha, 6.00-0.16\alpha]$	$[3.75+1.09\alpha, 4.99-0.15\alpha]$	$[0.91+0.09\alpha, 1.01-0.01\alpha]$
1, 5	1/20	$[4.99+2.76\alpha, 8.76-1.10\alpha]$	$[4.07+0.89\alpha, 5.00-0.04\alpha]$	$[0.92+1.87\alpha, 3.76-0.97\alpha]$
1, 2, 3	1/30	$[4.68+4.10\alpha, 9.76-0.98\alpha]$	$[3.73+3.13\alpha, 7.95-1.09\alpha]$	$[0.94+0.97\alpha, 1.80+0.11\alpha]$
1, 2, 4	1/30	$[7.42+1.43\alpha, 9.00-0.15\alpha]$	$[6.53+1.34\alpha, 7.99-0.14\alpha]$	$[0.91+0.09\alpha, 1.01-0.01\alpha]$
1, 2, 5	1/30	$[5.94+2.85\alpha, 9.76-0.97\alpha]$	$[5.03+0.97\alpha, 6.00+0.00\alpha]$	$[0.91+1.88\alpha, 3.76-0.97\alpha]$
1, 3, 4	1/30	$[4.65+2.56\alpha, 7.98-0.76\alpha]$	$[3.75+2.47\alpha, 6.97-0.75\alpha]$	$[0.91+0.09\alpha, 1.01-0.01\alpha]$
1, 3, 5	1/30	$[4.99+3.84\alpha, 9.76-0.92\alpha]$	$[4.07+2.85\alpha, 7.95-1.03\alpha]$	$[0.92+0.99\alpha, 1.80+0.11\alpha]$
1, 4, 5	1/30	$[7.74-1.12\alpha, 9.00-0.15\alpha]$	$[6.83+1.02\alpha, 7.99-0.14\alpha]$	$[0.91+0.09\alpha, 1.01-0.01\alpha]$
1, 2, 3, 4	1/20	$[7.42+2.3\alpha, 10.00-0.27\alpha]$	$[6.52+2.21\alpha, 8.99-0.27\alpha]$	$[0.91+0.09\alpha, 1.01-0.01\alpha]$
1, 2, 3, 5	1/20	$[5.94+3.93\alpha, 10.76-0.88\alpha]$	$[5.03+2.93\alpha, 8.95-0.99\alpha]$	$[0.91+1.00\alpha, 1.80+0.11\alpha]$
1, 2, 4, 5	1/20	$[8.69+1.16\alpha, 10.00-0.15\alpha]$	$[7.78+1.07\alpha, 8.99-0.14\alpha]$	$[0.91+0.09\alpha, 1.01-0.01\alpha]$
1, 3, 4, 5	1/20	$[7.74+1.99\alpha, 10.00-0.27\alpha]$	$[6.83+1.90\alpha, 8.99-0.27\alpha]$	$[0.91+0.09\alpha, 1.01-0.01\alpha]$
1, 2, 3, 4, 5	1/5	$[8.69+2.04\alpha, 11.00-0.27\alpha]$	$[7.78+1.95\alpha, 9.99-0.27\alpha]$	$[0.91+0.09\alpha, 1.01-0.01\alpha]$

表 5 修正前激光武器 Shapley 值
Table 5 Original laser weapon Shapley value

序号	$\psi_i^+(\bar{v}_\alpha)$	$\psi_i^-(\bar{v}_\alpha)$
1	$3.18+2.40\alpha$	$6.26-0.68\alpha$
2	$3.12+0.27\alpha$	$3.21+0.18\alpha$
3	$0.00+1.77\alpha$	$1.99-0.22\alpha$
4	$4.54-2.55\alpha$	$0.79+1.20\alpha$
5	$3.62-0.19\alpha$	$3.21+0.22\alpha$

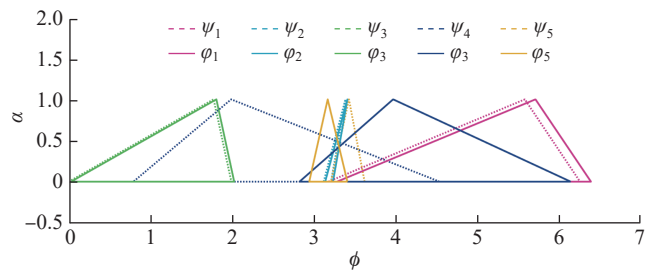


图 3 激光武器体系贡献率模糊 Shapley 值 α 截集
Fig.3 α -cuts of fuzzy Shapley values for laser weapon system contribution rates

表 6 修正后的激光武器 Shapley 值
Table 6 Corrected Shapley values for laser weapons

序号	$\phi_i^+(\bar{v}_\alpha)$	$\phi_i^-(\bar{v}_\alpha)$
1	$3.28+2.43\alpha$	$6.39-0.68\alpha$
2	$3.14+0.27\alpha$	$3.23+0.18\alpha$
3	$0.03+1.78\alpha$	$12.02-0.22\alpha$
4	$6.14-2.17\alpha$	$2.82+1.15\alpha$
5	$3.41-0.24\alpha$	$2.94+0.23\alpha$

表 7 激光武器体系贡献率
Table 7 System contribution rates of laser weapons %

序号	C_i^+	C_i^-
1	59.58	30.61
2	30.15	29.26
3	18.88	0.26
4	57.27	26.33
5	31.79	27.44

3 结论

本文研究了基于模糊 Shapley 值的激光武器体系贡献率评估方法,首先构建了模糊 Shapley 值原始模型;然后分析了激光武器传输特性、激光武器毁伤特性,并根据这些特性构建优化矩阵;最后实现了战场环境仿真模拟,依据模拟结果分别计算激光武器编队的毁伤收益及其体系贡献率。

(1)模糊 Shapley 值的引入,有效解决了激光武器在跟踪-瞄准-发射阶段,因无人机位置变化导致的毁伤概率偏移问题。通过引入置信水平 α 表征预期毁伤值的上下浮动程度,并在试验中通过模拟真实战场对抗环境,以 α 为隶属度的毁伤效果分配区间数。随着 α 的上升,预期毁伤值范围会更加精确,这也从侧面反映了激光武器跟踪瞄准系统精度对打击效果的影响。影响因子归一化矩阵的引入有效解决了在不同打击目标、不同打击环境、不同大气环境下,激光武器的打击效果的影响量化问题。引入专家打分矩阵有效评估了在不同外部环境条件及在不同作战任务下,影响因子对打击效果的影响程度。

(2)通过对战场环境的建模仿真进一步完善了激光武器体系贡献率的实践过程,证明本文提出的评估方法具有可行性。

综上所述,本文解决了激光武器体系贡献率评估的问题,充分考虑了在不同外部环境和作战任务下,影响因子对打击效果的影响,提出了一种基于模糊 Shapley 值的贡献率评估方法。通过构建模糊 Shapley 值模型、引入置信水平和专家打分矩阵,并结合战场仿真模拟,有效评估了激光武器编队的毁伤效益及其在整体体系中的贡献率,验证了本文方法的可行性。

然而,本文仅对激光武器的战场环境进行了简化建模和仿真,主要选取了激光武器的传输特性、毁伤特性等基础参数进行计算。实际上,激光武器的搭载平台性能、系统精度及气象、电磁环境等因素同样对武器性能有显著影响。未来的研究可以进一步针对多重影响因素的耦合关系,建立归一化模型,并结合实际作战案例,进行更加全面的综合评估。

参考文献

[1] 田春雨,张猛山. 机载激光武器及其关键技术[J]. 科技导报, 2019, 37(4): 30-34.
 TIAN Chunyu, ZHANG Mengshan. Airborne laser weapon and the key technology[J]. Science & Technology Review, 2019, 37(4): 30-34.
 [2] 蔡卓函,穆歌,段莉,等. 武器装备体系贡献率研究现状分析[J]. 火力与指挥控制, 2021, 46(9): 7-13, 19.
 CAI Zhuohan, MU Ge, DUAN Li, et al. Analysis on the status of the

contribution rate of weapon equipment system[J]. Fire Control & Command Control, 2021, 46(9): 7-13, 19.

[3] 王龙,李斌,仇振安. 空空导弹武器系统体系贡献率评估[J]. 航空兵器, 2021, 28(1): 20-25.

WANG Long, LI Bin, QIU Zhen'an. Evaluation of system contribution rate for air-to-air missile weapon system[J]. Aero Weaponry, 2021, 28(1): 20-25.

[4] 周琛,尚柏林,宋笔锋,等. 基于作战环的航空武器装备体系贡献率评估[J]. 航空学报, 2022, 43(2): 224958.

ZHOU Chen, SHANG Bolin, SONG Bifeng, et al. Contribution evaluation of aviation armament system-of-systems based on operation loop[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(2): 224958.

[5] 张丽媛,李涛. 三角模糊偏好下冲突型多属性群决策方法研究[J]. 运筹与管理, 2019, 28(2): 45-51.

ZHANG Liyuan, LI Tao. Research on conflict style multi-attribute group decision making method with triangular fuzzy preference information[J]. Operations Research and Management Science, 2019, 28(2): 45-51.

[6] VAN LAARHOVEN P J M, PEDRYCZ W. A fuzzy extension of Saaty's priority theory[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1983, 11(1-3): 229-241.

[7] WAN S P, WANG F, LIN L L, et al. Some new generalized aggregation operators for triangular intuitionistic fuzzy numbers and application to multi-attribute group decision making[J]. Computers & Industrial Engineering, 2016, 93: 286-301.

[8] 于小红. 湍流效应对激光通信性能影响的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2018.

YU Xiaohong. Research on influence of turbulence effect on laser communication performance[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018.

[9] 吴书云. 激光大气传输热晕效应及自适应光学校正的数值仿真和实验研究[D]. 成都: 中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所), 2020.

WU Shuyun. Numerical simulation and experimental study on thermal blooming effect and adaptive optical correction of laser propagation in atmosphere[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2020.

[10] 王佩,李言俊,田进. 机载激光武器仿真系统与分析[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1238-1242.

WANG Pei, LI Yanjun, TIAN Jin. Simulation system and analysis of airborne laser weapon[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(7): 1238-1242.

[11] 王亦虹,田平野,邓斌超,等. 基于修正区间模糊Shapley值的“一带一路”PPP项目利益分配模型[J]. 运筹与管理, 2021, 30(5): 168-175.

WANG Yihong, TIAN Pingye, DENG Binchao, et al. Benefit distribution model of "The Belt and Road" PPP project based on modified interval fuzzy shapley value[J]. Operations Research and Management Science, 2021, 30(5): 168-175.

通信作者: 罗远哉,教授,博士,研究方向为机器学习、嵌入式应用。

(责编 七七)