

DOI:10.11918/202505034

分布式防御杀伤网密度的定义与评估方法应用

万莉,李洋,包云霞,赵文婷,刘海军

(北京电子工程总体研究所,北京 100854)

摘要:为提高复杂对抗环境下分布式防御体系的资源调度效率与战场适应性,解决传统表征方法以局部能力为主、难以全局精细化量化资源时空分布特性的问题,将空间密度评估引入分布式防御效能分析,提出一种基于杀伤网密度的分布式防御能力表征新方法。首先,提出了杀伤网密度的概念,以量化资源时空分布特性,在此基础上结合威胁加权与网格化空间分割,提出一种基于杀伤网密度的分布式防御能力表征新方法。其次,通过系统定义杀伤网密度的理论模型,结合指控中心、跟踪雷达、制导雷达,以及发射车的多维度约束条件,构建了基于极坐标系分区的动态密度评估框架,量化各单元内有效杀伤链的时空分布特性,并提出了分区密度相对极差指标,实现对资源部署均衡性的精细化评估。最后,通过典型攻防场景仿真验证分析方法有效性。结果表明,所提方法能够有效区分威胁驱动型资源倾斜与被动部署存在强弱点,可为分布式防御资源优化部署与临机调度提供评估基础,提升分布式防御在实战中适应性和高效性。

关键词: 杀伤网;密度评估;分布式防御;杀伤链;防空反导

中图分类号: TJ761;E955 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2026)04-0156-09

Definition and application of evaluation method for kill web density in distributed defense

WAN Li, LI Yang, BAO Yunxia, ZHAO Wenting, LIU Haijun

(Beijing Institute of Electronic System Engineering, Beijing 100854, China)

Abstract: To improve the resource scheduling efficiency and battlefield adaptability of distributed defense systems in complex adversarial environments and to solve the problem that traditional characterization methods mainly focus on local capabilities and are difficult to finely quantify the global spatiotemporal distribution characteristics of resources, this paper introduced spatial density evaluation into the effectiveness analysis of distributed defense and proposed a new characterization method for distributed defense capability based on kill web density. First, this paper proposed the concept of kill web density to quantify the spatiotemporal distribution characteristics of resources. On this basis, combined with threat weighting and gridded spatial partitioning, this paper proposed a new characterization method for distributed defense capability based on kill web density. Secondly, by systematically defining the theoretical model of kill web density and combining the multi-dimensional constraints of command and control centers, tracking radars, guidance radars, and launch vehicles, this paper constructed a dynamic density evaluation framework based on polar coordinate system partitioning to quantify the spatiotemporal distribution characteristics of effective kill chains within each unit and proposed a relative range index of partition density to achieve the refined evaluation of resource deployment balance. Finally, the effectiveness of the analysis method was verified through the simulation of typical attack-defense scenarios. The results indicate that the proposed method can effectively distinguish between threat-driven resource bias and the strengths and weaknesses existing in passive deployment, can provide an evaluation basis for the optimal deployment and adaptive scheduling of distributed defense resources, and enhances the adaptability and high efficiency of distributed defense in actual combat.

Keywords: kill web; density evaluation; distributed defense; kill chain; air and missile defense

现代战争正经历由平台中心战、网络中心战向决策中心战的深刻变革与转型升级,在防御领域,分布式防御是决策中心战的主要体系形态^[1-4]。分布

式防御改变了传统集中式防御“弹-站-架”高度耦合的树状架构^[5],通过装备功能解耦形成众多分布式作战单元,以网状组织架构为基础、以作战任务

收稿日期: 2025-05-15;录用日期: 2025-08-21;网络首发日期: 2026-03-20

网络首发地址: <https://link.cnki.net/ulid/23.1235.t.20260320.1122.002>

作者简介: 万莉(2002—),女,硕士研究生

通信作者: 李洋,2350948936@qq.com

为驱动,动态组织调度分布式作战单元形成多种多样、复杂多变的跨域跨平台杀伤链,实现对来袭目标的最优杀伤。

杀伤网是分布式防御体系的外部形态表现形式,其核心在于打破传统“弹-站-架”防御装备内部闭合杀伤链的预置固化约束,通过分散部署、动态聚合形成的网状防御结构^[6]。相较于传统防御杀伤链结构,杀伤网通过解耦探测、制导、指控与火力等资源要素的物理耦合关系,形成互联、互通、互操作的杀伤网络,围绕全局效能最大化准则,支持最优杀伤链动态选取和跨系统构建,可拓展防御能力包线和增加防御能力厚度。这一结构特性不仅规避了传统体系核心节点损毁导致的生存力不足问题,还可通过动态资源调度重构杀伤链,显著提升体系防御效率,在现代战争中展现出突出的应用价值^[7-8]。

近年来,分布式防御及杀伤网研究领域已取得显著进展。在资源调度优化方面,Shi等^[9]提出基于粒子群优化的动态分配算法,通过群体智能机制实现多目标资源匹配,显著提升了动态环境下的决策效率。陈民铀等^[10]进一步引入自适应进化策略,增强了算法在复杂约束下的鲁棒性。Avcı等^[11]通过改进群体智能算法,显著优化了大规模武器-目标分配问题的求解效率。此外,国内外很多研究人员采用基于深度强化学习的动态分配算法能够实时匹配威胁演化趋势^[9-17]。然而,此类方法多依赖全局统计指标,难以精细化表征防御能力的空间异质性特征,导致局部资源过载或防御缺口无法精准定位。针对时序关联问题,王冰冰^[18]提出多阶段优化模型,通过引入时序网络分析框架,有效降低了动态场景下的决策延迟。黄强娟^[19]在此基础上构建多层时序网络模型,提升了大规模杀伤链构建的稳定性。Li等^[20]通过联合特征提取与聚类方法,进一步增强了时序网络的动态表征能力。尽管时序优化算法显著提升了动态响应效率。同时许多研究人员针对动态问题考虑与时序的关联性,提升了复杂场景下的决策效率^[18-22]。但其对威胁分布非均匀性引发的时空耦合效应缺乏鲁棒性,容易因局部资源耗尽而引发连锁失效。此外,威胁权重机制的融合研究逐步深化,刘祥雨等^[23-24]基于博弈论提出目标优先级量化方法,通过多属性效用函数区分高价值目标与低威胁目标的拦截需求。Liu等^[25]系统梳理了多目标分配问题的研究进展,为威胁动态评估提供了理论支撑。然而,随着战场环境复杂度的提升,如何进一步精细化表征防御能力空间分布特性、增强动态时序关联的鲁棒性,仍是分布式防御研究难点,亟须展开深刻研究。

针对上述问题,本文提出一种基于杀伤网密度的分布式防御能力表征新方法,该方法基于提出的杀伤网密度概念,结合威胁加权与网格化空间分割,通过构建动态密度场模型与分区密度相对极差指标,量化防御资源时空分布特性,解决空间异质性表征不足的问题。同时设计“评估—诊断—优化”闭环控制逻辑,融合威胁权重与动态调度机制,增强体系对非均匀威胁分布的适应性,为分布式防御资源优化部署与临机决策提供新的理论工具。最后通过数值仿真验证了所提方法的有效性,为复杂对抗环境下防御体系的资源调度与效能提升提供了实证依据。

1 分布式防御杀伤网密度模型

1.1 杀伤网密度理论建模

分布式防御杀伤网的效能核心在于“目标-传感器-火力”动态匹配的协同能力。考虑敌方目标集 L 向我方防御区域突袭时,我方指控中心集 H 、跟踪雷达集 I 、制导雷达集 J 与发射车集 K 动态组合形成杀伤链 $l-h-i-j-k$ (目标 l 由指控中心 h 指挥、跟踪雷达 i 跟踪目标、制导雷达 j 制导导弹、发射车 k 拦截)。这一过程需满足资源容量、通信状态与功能覆盖等多维度约束,其复杂性可建模为多指标整数规划问题。

定义杀伤网密度 ρ 为分布式防御在某区域内杀伤链占分布式防御总杀伤链数量比值,其表达式为

$$\rho = \frac{Q}{Q_0} \quad (1)$$

式中: Q 为某区域内有效杀伤链数量, Q_0 为该区域内杀伤链总数,二者的表达式为

$$\begin{cases} Q = \text{card}(C) \times \text{card}(R_g) \times \text{card}(R_z) \times \text{card}(F) \\ Q_0 = \text{card}(C_0) \times \text{card}(R_{g0}) \times \text{card}(R_{z0}) \times \text{card}(F_0) \end{cases} \quad (2)$$

式中: card 为集合内有效要素数目, C 为满足约束条件的指控中心集合, R_g 为满足约束条件的跟踪雷达集合, R_z 为满足约束条件的制导雷达集合, F 为满足约束条件的发射车集合, C_0 为分布式防御所有的指控中心集合, R_{g0} 为所有的跟踪雷达集合, R_{z0} 为所有的制导雷达集合, F_0 为所有的发射车集合。在构建杀伤链过程中从上述集合选取并遵循“指控中心-跟踪雷达-制导雷达-发射车”顺序组合,才计入杀伤链数量。

1.2 杀伤网密度约束条件

杀伤网构建需满足战场物理规律与装备性能限制,约束条件的选择直接决定密度计算的准确性与实用性。从指控中心、跟踪雷达、制导雷达、发射车

4 方面构建约束条件,具体如下。

1.2.1 发射车约束

1) 发射车资源容量约束。剩余弹药量始终维持正向冗余。构建发射车资源容量约束有效集合,记作 F_1 。

$$F_1 = \{k | F_k \geq 0, \forall k = 1, 2, \dots, K\} \quad (3)$$

式中 F_k 为第 k 个发射车对应的剩余弹量。

2) 拦截能力约束。导弹杀伤区需覆盖目标航迹。构建有效发射车集合,记作 F_2 。

$$F_2 = \{k | R_{Fmin}^k \leq R_{ZF}^k \leq R_{Fmax}^k, |\varphi_{ZF}^k| \leq \varphi_{Fmax}^k, H_{Fmin}^k \leq H_Z \leq H_{Fmax}^k, V_{Fmin}^k \leq V_{ZF}^k\} \quad (4)$$

式中: R_{ZF}^k 、 R_{Fmin}^k 、 R_{Fmax}^k 分别为遭遇点相对第 k 个发射车斜距、第 k 个发射车杀伤区近界和杀伤区远界, φ_{ZF}^k 、 φ_{Fmax}^k 分别为遭遇点相对第 k 个发射车航路角和发射车最大航路角, H_Z 、 H_{Fmin}^k 、 H_{Fmax}^k 分别为目标遭遇点海拔、第 k 个发射车杀伤区高界和第 k 个发射车杀伤区低界, V_{ZF}^k 、 V_{Fmin}^k 分别为目标相对第 k 个发射车径速、第 k 个发射车有效拦截最小径速。

由式(4)可知,为求解得到遭遇点位置,首先假设目标飞行轨迹为从进入点朝保卫要地直线水平飞行,根据余弦定理,可以得到:

$$\begin{cases} R_{ZF} = \min\left(\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}\right), & b^2 \geq 4ac \\ \text{无法拦截}, & b^2 < 4ac \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} a = \frac{V_l^2}{V_F^2} - 1 \\ b = \frac{2V_{IF}R_{IF}}{V_F} \\ c = R_{IF}^2 \end{cases}$$

式中: R_{ZF} 、 R_{IF} 分别为遭遇点相对发射车斜距、目标进入点相对发射车斜距, V_l 、 V_F 、 V_{IF} 分别为目标速度、发射车内弹药速度、发射车相对目标径速。

由式(5)求解得到预测遭遇点相对发射车斜距,进而根据遭遇点位置进行有效杀伤网判断,构成有效杀伤网集合。

1.2.2 跟踪雷达约束

1) 跟踪雷达资源容量约束。目标数不超过波束调度能力。构建跟踪雷达的资源容量约束有效集合,记作 R_{g1} 。

$$R_{g1} = \{i | R_g^i \geq 0, \forall i = 1, 2, \dots, I\} \quad (6)$$

式中: R_g^i 为第 i 个跟踪雷达对应的通道数。

2) 探测覆盖约束。跟踪雷达杀伤需覆盖目标航迹并返回目标数据。构建跟踪雷达的探测覆盖约束有效集合,记作 R_{g2} 。

$$R_{g2} = \{i | R_{gmin}^i \leq R_{Zg}^i \leq R_{gmax}^i, R_{gmin}^i \leq R_{Ag}^i \leq R_{gmax}^i, |P_g^i| \leq P_{gmax}^i, H_{gmin}^i \leq H_Z \leq H_{gmax}^i\} \quad (7)$$

式中: R_{Zg}^i 、 R_{Ag}^i 、 R_{gmin}^i 、 R_{gmax}^i 分别为目标遭遇点和目标进入点相对第 i 个跟踪雷达斜距、跟踪雷达的杀伤区近界和杀伤区远界, P_g^i 、 P_{gmax}^i 分别为遭遇点相对第 i 个跟踪雷达航路捷径、最大航路捷径, H_{gmin}^i 、 H_{gmax}^i 分别为第 i 个跟踪雷达杀伤区高界和杀伤区低界。

1.2.3 制导雷达约束

1) 制导雷达资源容量约束。和跟踪雷达同理,构建制导雷达的资源容量约束有效集合,记作 R_{z1} 。

$$R_{z1} = \{j | R_z^j \geq 0, \forall j = 1, 2, \dots, J\} \quad (8)$$

式中 R_z^j 为第 j 个制导雷达指控对应的通道数。

2) 探测覆盖约束。制导雷达探测范围需覆盖导弹拦截全程。构建雷达的探测覆盖约束有效集合,记作 R_{z2} 。

$$R_{z2} = \{j | R_{zmin}^j \leq R_{Zz}^j \leq R_{zmax}^j, |P_z^j| \leq P_{zmax}^j, H_{zmin}^j \leq H_Z \leq H_{zmax}^j\} \quad (9)$$

式中: R_{Zz}^j 、 R_{zmin}^j 、 R_{zmax}^j 分别为目标遭遇点相对第 j 个制导雷达斜距、制导雷达的杀伤区近界和杀伤区远界, P_z^j 、 P_{zmax}^j 分别为遭遇点相对第 j 个制导雷达航路捷径、最大航路捷径, H_{zmin}^j 、 H_{zmax}^j 分别为第 j 个制导雷达杀伤区高界和杀伤区低界。

根据式(3)~(9),将符合指控约束条件的雷达和发射车构建为新集合:

$$\begin{cases} R'_g = \{i | \forall i = 1, 2, \dots, I'\} \\ R'_z = \{j | \forall j = 1, 2, \dots, J'\} \\ F' = \{k | \forall k = 1, 2, \dots, K'\} \end{cases} \quad (10)$$

式中: 针对来袭目标, I' 为有效跟踪雷达总数, J' 为有效制导雷达总数, F' 为针对来袭目标的有效发射车总数。

1.2.4 指控中心约束

1) 指控中心资源容量约束。指控中心的并行处理目标数不超过通道限制。据此构建指控中心的资源容量约束有效集合,记作 C_1 。

$$C_1 = \{h | C_h \geq 0, \forall h = 1, 2, \dots, H\} \quad (11)$$

式中 C_h 为第 h 个指控中心对应的通道数。

2) 通信状态约束。指控系统的最大有效通信距离需确保完全覆盖雷达和发射车的实际部署位置。构建指控中心的通信状态约束有效集合,记作 C_2 。

$$C_2 = \{h | R_{Cmax}^h \geq R_{CR_g}^{hi}, R_{Cmax}^h \geq R_{CR_z}^{hj}, R_{Cmax}^h \geq R_{CF}^{hk}, \forall i = 1, 2, \dots, I', \forall j = 1, 2, \dots, J', \forall k = 1, 2, \dots, K'\} \quad (12)$$

式中: R_{Cmax}^h 为第 h 个指控中心最大通信范围, $R_{CR_g}^{hi}$ 、 $R_{CR_z}^{hj}$ 、 R_{CF}^{hk} 分别为第 i 个跟踪雷达、第 j 个制导雷达和第 k 个发射车相对第 h 个指控中心斜距。

2 基于杀伤网密度分布式防御评估方法

传统杀伤网效能评估多采用全局统计指标,难以精准表征资源空间分布的异质性特征。尤其在动态对抗场景中,敌方威胁往往呈现非均匀分布态势,若仅依赖全局指标进行资源调度,易出现局部过载或防御缺口,导致防御能力下降。为此,本文提出基于极坐标系分区的杀伤网密度评估模型,构建精细化密度场量化方法。

2.1 基于极坐标的威胁加权密度场建模

根据杀伤网密度约束条件建立的资源约束体系以及式(3)~(12)对应的指控约束条件可以得出:

$$\begin{cases} C_0 = C_1 \cap C_2 \\ R_{g0} = R_{g1} \cap R_{g2} \\ R_{z0} = R_{z1} \cap R_{z2} \\ F_0 = F_1 \cap F_2 \end{cases} \quad (13)$$

式中: C_0 为有效指控集合, R_{g0} 为有效跟踪雷达集合, R_{z0} 为有效制导雷达集合, F_0 为有效发射车集合。

根据式(1)~(13),构建杀伤网密度模型:

$$\rho = \frac{\text{card}(C_0) \times \text{card}(R_{g0}) \times \text{card}(R_{z0}) \times \text{card}(F_0)}{\text{card}(C) \times \text{card}(R_g) \times \text{card}(R_z) \times \text{card}(F)} = \frac{\text{card}(C_1 \cap C_2) \times \text{card}(R_{g1} \cap R_{g2}) \times \text{card}(R_{z1} \cap R_{z2}) \times \text{card}(F_1 \cap F_2)}{\text{card}(C) \times \text{card}(R_g) \times \text{card}(R_z) \times \text{card}(F)} \quad (14)$$

根据资源约束得到杀伤网密度计算展开式为式(14)。在此基础上,为实现防御资源时空分布特性的多维度表征,首先需建立极坐标网格化模型。以保卫要地为中心,将防御空域按方位角划分为若干扇区及径向层,形成离散化网格单元。在此基础上,定义扇区杀伤网密度为单元内有效杀伤链占比,建立区域密度模型:

$$\rho(r, \theta) = \frac{Q_0(r, \theta)}{Q(r)} \quad (15)$$

式中: $\rho(r, \theta)$ 为半径为 r 圆形区域内,以角度 θ 划分扇区,每个扇区有效杀伤链占杀伤链总数比值; $Q_0(r, \theta)$ 为半径为 r ,角度为 θ 的扇区内有效杀伤链数目; $Q(r)$ 为半径为 r 的圆形区域内杀伤链总数。

在传统密度评估中,仅依赖有效杀伤链占比难以反映实战场景中威胁优先级的差异。为此,在式(15)的基础上,进一步引入目标威胁度参数,构建威胁加权密度模型:

$$\rho_{\text{raw}} = \frac{\sum_l (\omega_l \cdot Q_0^l)}{\sum_l (\omega_l \cdot Q^l)} \quad (16)$$

式中: Q_0^l 为单元格内针对第 l 个目标有效杀伤链数目, Q^l 为单元格内针对第 l 个目标所有杀伤链数目,

ω_l 为第 l 个目标的威胁度。

为评估全局资源分布的空间均衡性,需构建密度极差指标。极差定义为各扇区密度最大值与最小值的绝对差值,即

$$\gamma(r_0) = \frac{\max(\rho(r_0, \theta)) - \min(\rho(r_0, \theta))}{\rho_0(r_0)} \quad (17)$$

式中: $\gamma(r_0)$ 为半径为 r_0 的圆形区域内杀伤网密度极差, $\max(\rho(r_0, \theta))$ 、 $\min(\rho(r_0, \theta))$ 分别为半径为 r_0 的圆形区域内,以角度 θ 划分得出扇区有效杀伤链数最大值、最小值。

为科学评估极差的实际意义,需结合战场态势建立分类标准。设置合理评估指标将杀伤网密度评价划分为3类:均匀、一般、不均匀,即

$$\begin{cases} \gamma(r_0) \in (0, \mu_1(r_0)), & \text{均匀} \\ \gamma(r_0) \in (\mu_1(r_0), \mu_2(r_0)), & \text{一般} \\ \gamma(r_0) \in (\mu_2(r_0), +\infty), & \text{不均匀} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $\mu_1(r_0)$ 、 $\mu_2(r_0)$ 分别为针对极差评估杀伤网均匀程度阈值。当极差处于较高阈值区间 $\gamma(r_0) \in (\mu_2(r_0), +\infty)$ 时,表明杀伤网密度不均匀,局部区域存在资源失衡,需通过动态调度优化;当极差处于中等或较低阈值区间,表明资源分布与威胁态势匹配度较高。

2.2 资源部署闭环优化逻辑设计

基于密度评估结果,静态资源部署策略难以适应动态战场环境,设计“评估-诊断-优化”闭环控制逻辑如图1所示。

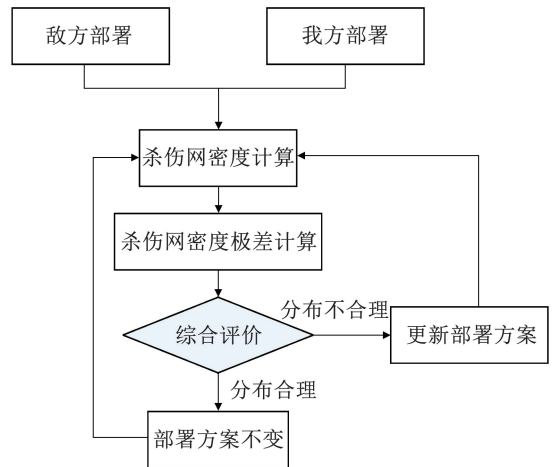


图1 杀伤网密度评估部署流程图

Fig. 1 Flowchart of deployment for kill web density evaluation

通过实时计算密度分布特征并生成调度策略,实现防御资源的高效配置与动态调整。首先,需基于实时战场数据构建防御空域的极坐标网格化模型,根据敌我部署情况,将雷达、指控中心,以及发射车的部署位置映射至极坐标系。其次,通过空间分割策略将防御区域划分为若干扇区与径向层。最

后,在每个网格单元内,依据式(14)来评估当前杀伤链的密度分布。

在评估阶段,通过式(16)~(18)计算密度极差指标并分析量化资源部署的空间均衡性。基于评估结果,对我方资源部署进行诊断与优化。针对资源过载扇区,分析当前资源分配是否超出物理极限。对于部署不合理扇区,则需结合来袭目标分布,生成资源补充方案。进一步根据优化后的资源部署状态重新计算密度场,验证调度策略的有效性,并迭代调整直至满足作战要求。

通过上述流程提升资源部署的空间均衡性,增强分布式防御体系在复杂对抗环境中的自适应能力与作战效能。

3 杀伤网密度评估仿真校验与分析

为验证所提杀伤网密度评估方法的科学性与实用性,本文构建防御装备不同部署模式的两个饱和攻击场景并开展仿真试验。通过对比分析不同场景下的杀伤链密度分布特征,分析资源部署与防御效能间的动态关联,为体系资源优化部署调整提供分析支撑。

3.1 防御装备部署均匀的饱和空袭场景仿真分析

3.1.1 场景构建

为校验杀伤网密度评估对部署优化的有效性,构建攻防场景如下。

1) 敌方攻击模式。设定来袭目标数目 350 个,高威胁目标与低威胁目标占比为 0.3。高威胁目标集合威胁度为 1.5,速度服从 100~200 m/s 的均匀分布;低威胁目标集合威胁度为 1.0,速度服从 50~80 m/s 的均匀分布。以保卫中心为原点,构建坐标系,来袭目标进入点位置从均匀分布随机取值,见表 1。

表 1 来袭目标位置分布信息

Tab. 1 Position distribution information of incoming targets

目标方位/(°)	距保卫中心水平投影距离/km	高度/m
U(0,360)	U(50,250)	U(800,1 000)

2) 我方初始部署。我方在保卫要地附近部署 35 部跟踪雷达,每个雷达通道数为 8;部署 35 部制导雷达,每个雷达通道数为 8;部署 40 个发射车,每个发射车通道数为 8;部署 30 个指控中心,每个指控中心通道数为 10。

跟踪雷达对应的杀伤区远界为 250 km,近界为 50 km;制导雷达对应的杀伤区远界为 200 km,近界为 30 km;发射车对应的杀伤区远界为 150 km,近界为 20 km,导弹飞行速度为 200 m/s;指控中心通信覆盖范围为 150 km。以保卫中心为原点,构建坐标系,对

应我方初始部署参数从均匀分布随机取值,见表 2。

表 2 我方部署位置信息

Tab. 2 Deployment position information of friendly forces

类型	方位(°)	距保卫中心水平投影距离/km
跟踪雷达	U(0,360)	U(0,150)
制导雷达	U(0,360)	U(0,150)
发射车	U(0,360)	U(0,150)
指控中心	U(0,360)	U(0,150)

3.1.2 仿真结果分析

将防御空域采用极坐标网格化分割策略,径向以 10 km 为间隔分层,角度按 10°划分扇区,形成 36 个扇区与 25 个径向层的乘积作为空间网格单元。

场景实验显示,350 个来袭目标呈现显著的空间聚集特征,约 70% 的目标集中分布于保卫中心北部方位(0°~180°扇区),显著高于其他方位,如图 2 所示。

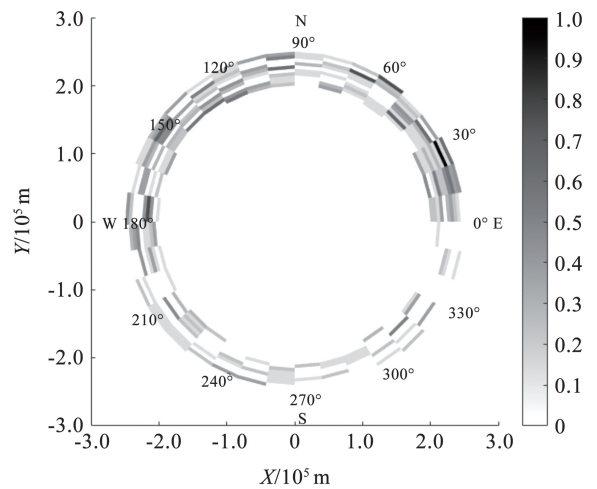


图 2 饱和场景目标分布热力图

Fig. 2 Heatmap of target distribution in saturation scenario

为直观表征杀伤网密度分布特征,设计杀伤链拓扑图(图 3)。在图 3 上叠加雷达、发射车、指控中心图标,显示部署位置,杀伤链通过有向线段连接“指控中心-跟踪雷达-制导雷达-发射车”节点,线段的灰度反映杀伤链的有效性。有效杀伤链根据威胁等级赋权,高威胁目标对应的有效链以深色表示并赋值为 1.0,低威胁目标对应的有效链以浅色细线表示并赋值为 0.6,无效链则以灰色虚线表示并赋值为 0。若一条杀伤链同时服务于多个目标,其综合权重为各目标赋值的代数和。同时将威胁加权密度归一化,密度值转换为梯度颜色分布,高亮区域表征杀伤网密集区域,深色区域则指示杀伤网稀疏区域。

由图 3 可知,一定程度表征分布式防御资源的响应特征。对应杀伤链热力图密度峰值同样分布于该区域,如图 4 所示,最高密度值达 0.89。

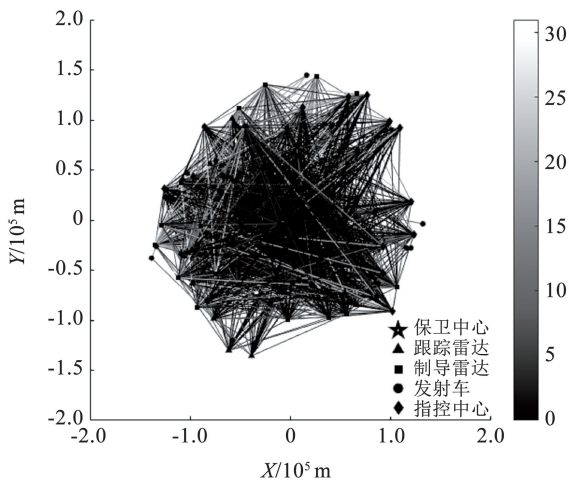


图3 饱和场景杀伤链显示图

Fig. 3 Display diagram of kill chains in saturation scenario

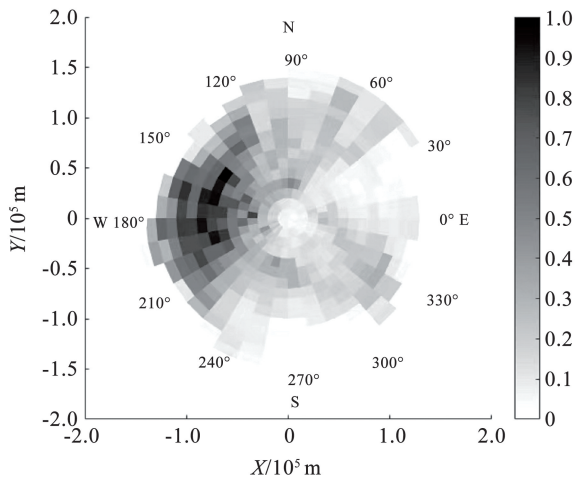


图4 饱和场景杀伤链密度热力图

Fig. 4 Heatmap of kill chain density in saturation scenario

杀伤网密度与来袭目标分布接近,均主要集中分布于保卫中心北部方位,此现象源于防御体系根据目标聚集态势自动资源分配,将雷达探测波束与发射车火力通道优先指向北方扇区,形成密集拦截网络。

进一步分析发现,北部 120° ~ 180° 扇区部署的 12 部跟踪雷达、10 部制导雷达与 15 辆发射车贡献了 68% 的有效杀伤链,其通道超载,处于过载运行状态;然而,东南部 240° ~ 300° 扇区因目标分布稀疏,资源利用率不足 30%。结果表明,当前部署策略虽能应对局部威胁聚集,但全局资源利用率严重失衡,亟须通过动态调度资源优化部署,以提升体系整体效能。凸显杀伤网密度评估对动态调度机制在均衡全局效能方面的潜力。

3.1.3 密度极差量化分析

为量化杀伤网资源部署的空间均衡性,选取极差作为关键评估指标。在饱和攻防场景中,敌方目

标集中分布于北部扇区(0° ~ 180°),我方资源通过动态调度优先响应威胁聚集区域。仿真计算显示,36 个扇区的密度极差为 7.1。尽管全局极差较高,但此现象源于威胁分布的非均匀性,通过动态资源分配主动增强高威胁区域的拦截密度,导致极差主要反映威胁态势的空间差异,而非部署不科学。

若剔除威胁权重影响,极差降至 4.3,表明威胁加权机制放大了高优先级区域的密度波动幅度。该结果验证了该方法能够区分“主动资源倾斜”与“被动部署失衡”,为指挥员提供更精准的决策依据。

3.2 防御装备部署不均匀的饱和空袭场景仿真分析

3.2.1 场景构建

敌方设定来袭目标数目 350 个,来袭目标进入点位置选取和我方资源数目与饱和攻防场景设计表 1 相同,但我方资源部署不均。以保卫要地中心为原点,构建坐标系,对应我方初始部署参数,从均匀分布随机取值,见表 3。

表3 我方部署位置信息

Tab. 3 Deployment position information of friendly forces

类型	方位/(°)	距保卫中心水平投影距离/km
雷达	U(0,330)	U(0,150)
发射车	U(0,330)	U(0,150)
指控中心	U(0,330)	U(0,150)

3.2.2 仿真结果分析

实验中,350 个来袭目标位置如图 5 所示,在方位上标准差小于 15%,呈现近似均匀分布。

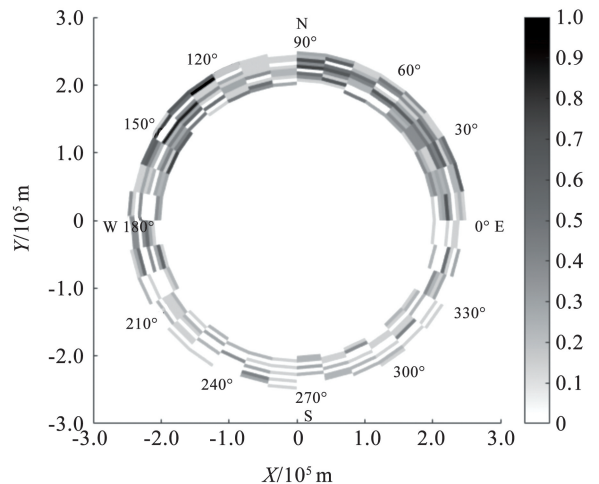


图5 缺陷场景来袭目标分布热力图

Fig. 5 Heatmap of incoming target distribution in defect scenario

缺陷场景杀伤链如图 6 所示,展示了杀伤链分布特征。对应杀伤网密度如图 7 所示,330° ~ 360° 扇区因缺乏资源部署,形成显著防御缺口。

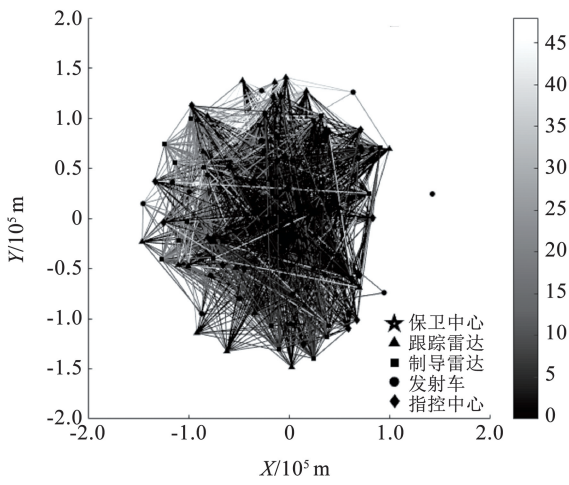


图 6 缺陷场景杀伤链显示图

Fig. 6 Display diagram of kill chains in defect scenario

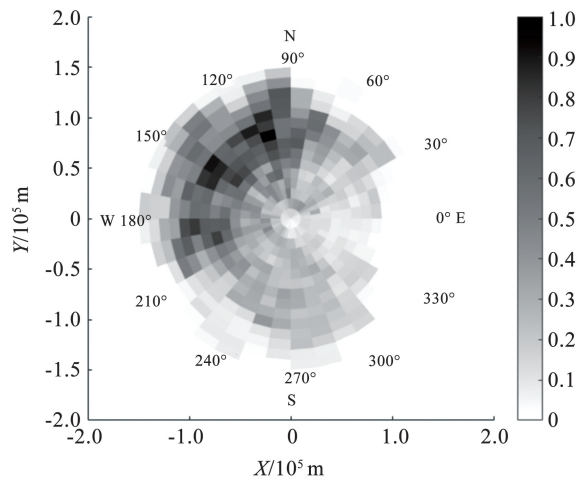


图 7 缺陷场景杀伤链密度热力图

Fig. 7 Heatmap of kill chain density in defect scenario

仿真结果显示,该区域仅能通过周围部署资源,构建稀疏杀伤链,密度均值低至 0.18。为应对此弱点,体系启动资源代偿机制,其他扇区资源通道利用率上升,对应区域杀伤网密度上升,防空区域密度最高升至 0.98。这种代偿行为虽短期内维持了体系整体拦截能力,但加速了弹药消耗与雷达过载风险。验证了部署不均不仅直接削弱特定方向防御能力,还会引发连锁资源消耗,导致体系整体抗饱和攻击能力下降。

3.2.3 密度极差量化分析

敌方目标呈近似均匀分布,但我方资源在 330° ~ 360°扇区存在显著部署缺口。仿真结果显示,36 个扇区的密度极差为 8.1。对比威胁分布与资源部署的空间匹配度,极差的高值表征部署存在弱点导致的密度失衡。

极差作为空间异质性的直接表征,其应用需结合威胁分布与作战意图综合判读。若极差主要由威

胁权重引起,表明资源调度符合实战优先级需求,此时极差不宜作为部署优化依据;若极差源于部署存在弱点,则需通过动态调度或资源补充降低极差,以提升体系鲁棒性。

在仿真试验中,通过动态调整我方资源部署区域的范围与分布均匀性,进一步探究杀伤网密度极差的演变规律。如图 8 所示,随着部署区域由中心向外围扩展,极差呈现先上升后下降的波动趋势。

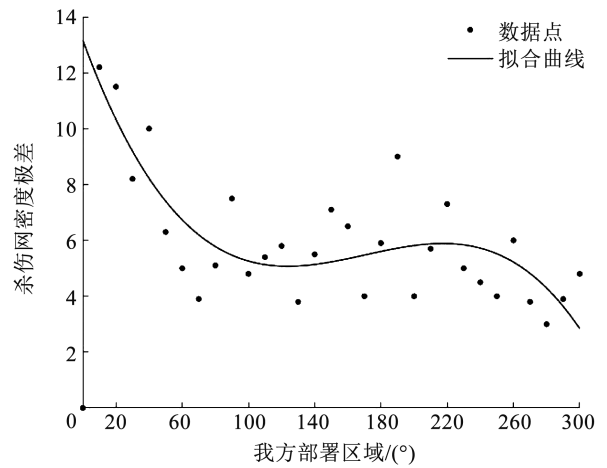


图 8 杀伤网密度极差随部署区域变化拟合曲线图

Fig. 8 Fitted curve of kill web density range changing with deployment area

我方部署范围为 0°时,无法构建杀伤链,极差为 0。部署范围过小、资源过度集中导致局部扇区密度饱和,而外围扇区因资源覆盖不足形成显著密度落差,此时极差达到峰值;当部署范围扩大时,资源分布的离散性增强,各扇区间的密度差异逐步缩小,极差最低下降至 3.2。

在部署范围扩展至 300°的过程中,极差曲线虽存在局部波动但总体呈现单调递减趋势,最终稳定在 5°以下。这种波动源于部分区域资源部署与目标的位置匹配存在明显差异,导致局部扇区密度梯度异常。

图 9 展示了杀伤网平均密度随我方部署区域扩展的动态变化趋势。仿真数据表明,当部署区域为 0°时,由于资源完全未部署,无法构建有效杀伤链,平均密度为 0。随着部署区域逐步扩大,平均密度呈现显著上升趋势,反映了资源覆盖范围的扩展能够有效提升防御体系的整体效能,资源利用率逐步提高。

在部署区域扩展至 200° ~ 300°区间时,平均密度增速放缓,且出现局部波动。可能源于资源分布逐渐分散,导致部分扇区虽被覆盖,但因部分类型资源不足,无法满足杀伤链某一类型资源约束条件。此外,局部区域的过载或闲置也可能引发密度波动。

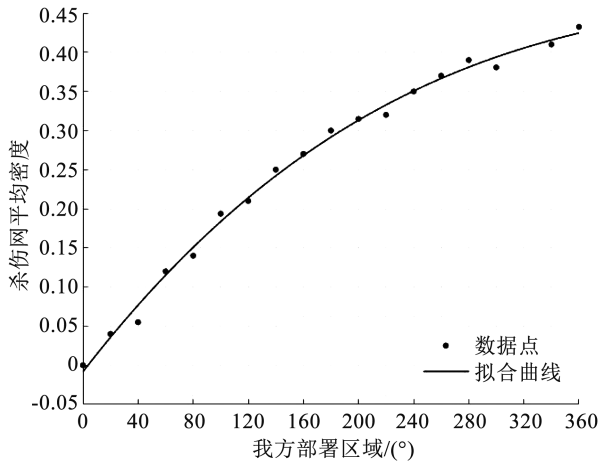


图9 杀伤网平均密度随部署区域变化拟合曲线图

Fig.9 Fitted curve of average kill web density changing with deployment area

资源部署扩展继续增长。这表明在更大范围的部署策略下,系统能够通过动态调度机制实现资源的协同补偿。

综上所述,扩大部署区域可通过增强资源分布的空间自由度,有效抑制因威胁分布不均引发的密度极化现象。同时提升资源利用率,使杀伤网密度有效提升。

3.3 参数灵敏度与决策效能分析

为系统评估关键参数对杀伤网密度分布的动态影响机制,本文通过 $\pm 10\%$ 参数扰动实验构建灵敏度分析。量化跟踪雷达、制导雷达、发射车,以及指控系统的关键性能参数调整对分布式防御杀伤网密度的作用。表4展示了参数调整对中心区域(径向距离 $0 < 75$ km)、外围区域(径向距离 $75 < 150$ km)杀伤网密度变化幅度影响。

当部署区域扩展至 300° 以上时,平均密度随着

表4 关键参数灵敏度分析结果

Tab.4 Sensitivity analysis results of key parameters

参数名称	变化幅度/%													
	跟踪雷达远界		跟踪雷达近界		制导雷达远界		制导雷达近界		发射车远界		发射车近界		指控通信半径	
	R_{gmax}	R_{gmin}	R_{zmax}	R_{zmin}	R_{Fmax}	R_{Fmin}	R_{Cmax}	R_{Cmin}						
参数调整幅度	-10.0	+10.0	-10.0	+10.0	-10.0	+10.0	-10.0	+10.0	-10.0	+10.0	-10.0	+10.0	-10.0	+10.0
中心区域杀伤网密度 变化幅度	-7.3	+5.2	-8.4	+9.0	-5.1	+4.6	-7.7	+4.2	-12.0	+15.7	-16.4	+15.6	-0.2	+0.8
外围区域杀伤网密度 变化幅度	-17.4	+15.3	-10.7	+15.8	-8.5	+13.6	-14.8	+8.6	-24.1	+20.2	-22.7	+18.5	-0.7	+0.5

仿真结果显示,跟踪雷达和制导雷达参数的影响呈现相似趋势,远界参数缩减 10% 时,外围区域密度降幅显著高于中心区域,表明外围防御效能对跟踪雷达远界覆盖能力更敏感。此现象可能源于对来袭目标的拦截依赖雷达的远距离探测能力,远界收缩直接限制了外围区域的预警范围与杀伤链预构建。

发射车参数调整对杀伤网密度影响的敏感性最高。这源于导弹拦截能力对拦截来袭目标有直接联系。相较而言,指控通信半径参数的灵敏度最低,其 $\pm 10\%$ 变化对杀伤网密度的影响幅度不足 1% ,表明指控系统的通信覆盖冗余度较高,短时通信距离波动对体系整体效能的影响有限。

基于上述灵敏度特征,针对“评估-诊断-优化”闭环控制逻辑,在决策时可据此优先优化发射车部署位置或弹药配置,以缓解高威胁区域的资源过载问题;而指控通信半径参数的冗余性特征则为动态调度提供了空间。

进一步结合极坐标系下的密度极差指标,系统能够区分威胁驱动型资源倾斜与被动部署失衡,并通过热力图梯度映射直观呈现防御缺口。既保持了威胁优先级的动态响应能力,又通过空间均衡性约

束提升了体系抗毁性,从而为复杂对抗环境下的分布式防御体系提供了一定的决策支撑。

4 结论

1) 提出并定义了“杀伤网密度”核心概念,建立了基于极坐标系分区与威胁加权的动态密度场量化评估框架。该方法融合指控中心、跟踪雷达、制导雷达,以及发射车的多维度约束条件,通过网格化空间分割,精细量化了各单元内有效杀伤链的时空分布特性,并创新性提出“分区密度相对极差”指标,有效解决了传统全局统计方法难以表征资源空间分布异质性的难题。

2) 通过典型攻防场景仿真验证,结果表明所提方法具备优异的适应性评估与诊断能力。仿真分析精准揭示了威胁驱动型资源倾斜与被动部署失衡导致的强弱点,密度极差指标量化表征了资源空间分布的严重失衡程度。参数灵敏度分析进一步表明发射车性能参数对杀伤网密度影响最为显著,为资源优化调度提供了关键依据。

3) 构建“评估-诊断-优化”闭环控制逻辑及威胁加权密度模型,为分布式防御资源动态优化部

署与临机调度提供了有效的理论工具和决策支撑。能够显著提升体系对非均匀威胁分布的适应能力、资源利用效率和整体作战效能,为分布式杀伤网架构从静态规划向动态自适应演进提供了理论支撑,研究成果对提升复杂对抗环境下防御体系的实战效能具有重要参考价值。

参考文献

- [1] GULDEN T R, LAMB J, HAGEN J, et al. Modeling rapidly composable, heterogeneous, and fractionated forces: Findings on mosaic warfare from an agent-based model [M]. Santa Monica: Published by the RAND Corporation, 2021. DOI: 10.7249/r4396
- [2] U. S. Army Training and Doctrine Command. Multi-domain battle: combined arms for the 21st century 2025-2040 [R]. Washington: U. S. Army Training and Doctrine Command, 2017.
- [3] TOWNSEND S J. Accelerating multi-domain operations: evolution of an idea [EB/OL]. (2018-07-23) [2022-11-05]. <https://mwi.westpoint.edu/accelerating-multi-domain-operations-evolution-idea/>
- [4] SPENCER D K, DUNCAN S, TALIAFERRO A. Operationalizing artificial intelligence for multi-domain operations: a first look [C]// Artificial Intelligence and Machine Learning for Multi-Domain Operations Applications. Baltimore: SPIE, 2019: 1. DOI: 10.1117/12.2524227
- [5] 何永鹏, 杨艺, 程志君, 等. 反辐射导弹发展的挑战、现状及展望[J]. 空天防御, 2024, 7(4): 38
HE Yongpeng, YANG Yi, CHENG Zhijun, et al. Future challenges, current status, and development direction of anti-radiation missiles[J]. Air & Space Defense, 2024, 7(4): 38. DOI: 10.3969/j.issn.2096-4641.2024.04.005
- [6] 关星凯, 张安, 毕文豪, 等. 云边协同杀伤网的作战链路服务化构建流程设计[J]. 指挥与控制学报, 2025, 11(4): 504
GUAN Xingkai, ZHANG An, BI Wenhao, et al. Service-oriented combat chain construction process design for the cloud-edge collaborative kill web[J]. Journal of Command and Control, 2025, 11(4): 504. DOI: 10.20278/j.jc2.2096-0204.2024.0338
- [7] 张永健, 康鹏, 卓志敏, 等. 一种防御体系抗毁伤度量方法研究[J]. 现代防御技术, 2022, 50(2): 33
ZHANG Yongjian, KANG Peng, ZHUO Zhimin, et al. Research on a defense system survivability measurement method [J]. Modern Defense Technology, 2022, 50(2): 33. DOI: 10.3969/j.issn.1009-086x.2022.02.005
- [8] 曹罡, 陈新中, 郭晓鸿, 等. 弹性杀伤网作战概念及装备图像[J]. 指挥信息系统与技术, 2022, 13(4): 46
CAO Gang, CHEN Xinzong, GUO Xiaohong, et al. Operational concept and equipment image of elastic kill web [J]. Command Information System and Technology, 2022, 13(4): 46. DOI: 10.15908/j.cnki.cist.2022.04.008
- [9] SHI Yuhui, EBERHART R C. Empirical study of particle swarm optimization [C]// Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99. Washington: IEEE, 2002: 1945. DOI: 10.1109/CEC.1999.785511
- [10] 陈民铀, 张聪誉, 罗辞勇. 基于自适应进化粒子群算法的多目标优化方法[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(22): 7061
CHEN Minyou, ZHANG Congyu, LUO Ciyong. Adaptive evolutionary particle swarm algorithm for multi-objective optimisation [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(22): 7061. DOI: 10.16182/j.cnki.joss.2009.22.071
- [11] AVCI I, YILDIRIM M. Solving weapon-target assignment problem with salp swarm algorithm [J]. Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette, 2023, 30(1): 17. DOI: 10.17559/TV-20220113192727
- [12] ZHANG Jinzhong, KONG Min, ZHANG Gang, et al. Weapon-target assignment using a whale optimization algorithm [J]. International Journal of Computational Intelligence Systems, 2023, 16(1): 62. DOI: 10.1007/s44196-023-00243-4
- [13] XU Han, ZHANG An, BI Wenhao, et al. Dynamic Gaussian mutation beetle swarm optimization method for large-scale weapon target assignment problems [J]. Applied Soft Computing, 2024, 162: 111798. DOI: 10.1016/j.asoc.2024.111798
- [14] XING Huaixi, XING Qinghua. An air defense weapon target assignment method based on multi-objective artificial bee colony algorithm [J]. Computers, Materials & Continua, 2023, 76(3): 2685. DOI: 10.32604/cmc.2023.036223
- [15] ANTKIEWICZ M, MYSZKOWSKI P B, GMYREK K. Gene-level adaptation in balanced non-dominated tournament genetic algorithm (aB-NTGA) applied to versatile multi-stage weapon-target assignment problem [C]// Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion. Melbourne: ACM, 2024: 627. DOI: 10.1145/3638530.3654342
- [16] ACAR E, HATIPOĞLU S, YILMAZ İ. A quantum algorithm for solving weapon target assignment problem [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 125: 106668. DOI: 10.1016/j.engappai.2023.106668
- [17] 邬潇莹, 阚东, 白杨, 等. 基于时序网络的作战体系韧性评估方法[J]. 空天预警研究学报, 2024, 38(6): 432
WU Xiaoying, KAN Dong, BAI Yang, et al. Toughness assessment method of combat systems based on time sequence network [J]. Journal of Air & Space Early Warning Research, 2024, 38(6): 432. DOI: 10.3969/j.issn.2097-180X.2024.06.009
- [18] 王冰冰. 时序网络的时间关联性与动力学涨落研究 [D]. 武汉: 华中师范大学, 2016
WANG Bingbing. The time correlation and dynamical fluctuation of temporal network [D]. Wuhan: Central China Normal University, 2016
- [19] 黄强娟. 时序网络结构建模与演化分析研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2019
HUANG Qiangjuan. Research on structure modeling and evolution analysis in temporal network [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019. DOI: 10.27052/d.cnki.gzjgu.2019.000135
- [20] LI Dongyuan, MA Xiaoke, GONG Maoguo. Joint learning of feature extraction and clustering for large-scale temporal networks [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2023, 53(3): 1653. DOI: 10.1109/TCYB.2021.3107679
- [21] LV Laishui, ZHANG Kun, ZHANG Ting, et al. Eigenvector-based centralities for multilayer temporal networks under the framework of tensor computation [J]. Expert Systems with Applications, 2021, 184: 115471. DOI: 10.1016/j.eswa.2021.115471
- [22] SEABROOK I E, BARUCCA P, CACCIOLI F. Evaluating structural edge importance in temporal networks [J]. EPJ Data Science, 2021, 10(1): 23. DOI: 10.1140/epjds/s13688-021-00279-6
- [23] 刘祥雨, 王刚, 郭相科, 等. 面向区域防空场景的杀伤链设计方法[J]. 系统工程与电子技术, 2025, 47(5): 1582
LIU Xiangyu, WANG Gang, GUO Xiangke, et al. Kill chain design methodology for area air defense scenarios [J]. Systems Engineering and Electronics, 2025, 47(5): 1582. DOI: 10.12305/j.issn.1001-506X.2025.05.20
- [24] 刘祥雨, 王刚, 郭相科, 等. 基于改进天际线选择方法的大规模目标威胁评估[J]. 空军工程大学学报, 2025, 26(2): 34
LIU Xiangyu, WANG Gang, GUO Xiangke, et al. A large-scale target threat assessment based on improved skyline selection methods [J]. Journal of Air Force Engineering University, 2025, 26(2): 34. DOI: 10.3969/j.issn.2097-1915.2025.02.005
- [25] LIU Shuangxi, LIN Zehuai, HUANG Wei, et al. Current development and future prospects of multi-target assignment problem: a bibliometric analysis review [J]. Defence Technology, 2025, 43: 44. DOI: 10.1016/j.dt.2024.09.006