

异构平台要素协同理论方法研究

张修社, 胡小全, 易凯, 王小军
(中国电子科技集团公司第二十研究所, 陕西西安 710068)

摘要: 要素协同是协同作战发展的必经之路, 杀伤链的动态重构是其典型特征. 本文针对平台协同难以满足复杂作战任务需求的问题, 提出了异构平台要素协同的解决思路和理论方法. 首先分析了要素协同关系复杂性、协同能力不确定性两个难点问题; 其次基于反馈机制的可重构架构对复杂作战网络进行建模, 提出了杀伤链算子的要素动态重构、协同序参量的效能定量评估方法; 最后基于仿真场景实现杀伤链的动态构建与重构, 可指导要素协同的算法设计与工程实践.

关键词: 要素协同; 跨域作战; 动态重构; 体系建模; 杀伤链算子; 序参量

中图分类号: N945.12; TP18

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2024)04-1219-11

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20231051

Theory and Methodology of Heterogeneous Platform Element-Level Cooperation

ZHANG Xiu-she, HU Xiao-quan, YI Kai, WANG Xiao-jun
(The 20th Research Institute of CETC, Xi'an, Shaanxi 710068, China)

Abstract: Element-level cooperation is the next stage of cooperative operation, and the dynamic reconstruction of kill chain is its typical feature. Aiming at the problem that platform-level cooperation is difficult to meet the demand for complex operational tasks, this paper proposes solution ideas and theoretical methods for heterogeneous platform element collaboration. Firstly analyzes the two main difficulties in realizing element-level cooperation, namely the complexity of element-level cooperation relationship and the uncertainty of cooperative ability; Secondly a based on feedback mechanism reconfigurable architecture, a dynamic reconstruction method for elements of the kill chain operator and a quantitative evaluation method for the effectiveness of collaborative order parameters were proposed through operational network modeling; Finally, The dynamic construction and reconstruction of the kill chain were achieved by simulation scenario, which can guide the algorithm design and engineering practice of element collaboration.

Key words: element-level cooperation; cross-domain operations; dynamic refactoring; system modeling; kill-chain operator; order parameters

1 引言

在新时代智能化、信息化、多元化融合发展的背景下, 世界各国对联合作战、协同作战的研究与实践不断深入^[1,2], 新兴领域和战场空间不断拓展. 现代战争仅依靠平台自身的感知、决策、打击、通信等作战要素固定组合, 按照预先规定的时间、地点、任务, 实施平台协同作战, 难以应对精确制导武器饱和式攻击等复杂作战任务. 而且随着战争形态向分布式、无人化、智能化演进, 平台级协同更加难以适应未来高端战争的高动态、强实时复杂作战任务. 在此背景下, 为了充分发挥

体系作战优势, 亟需研究新的理论方法, 将海、陆、空、天作战域内广泛分布的舰艇、战车、飞机、卫星等异构平台的感知、决策、打击、通信等作战要素协同共用、按需组合和动态重构, 实施协同感知、协同决策、协同打击, 自主适应未来高端战争中的作战任务变化, 实现由平台协同向要素协同的转变. 当前美国提出的“自适应跨域杀伤网(Adapting Cross-domain Kill-webs, ACK)”、“马赛克战”等新型作战概念, 利用人工智能和自主系统实施决策中心战, 其概念符合异构平台要素协同的发展思路. 由此可以看出, 异构平台要素协同是当前协同作战领域的研究热点, 遂行要素协同作战是赢得未

来高端战争的必由之路。本文旨在剖析实现异构平台要素协同的核心问题,探索适用于要素协同作战的理论方法。

2 概念内涵

2.1 提出背景

协同作战的概念是指在联合作战或合同作战中,参战的海、陆、空等军兵种部队按照前期约定的协同计划,协调一致开展作战任务。协同作战按协同级别可分为兵力协同、平台协同、要素协同^[3]。作战部队之间完成同一作战目标称为兵力协同,例如在第二次世界大战中,诺曼底登陆战中航空兵、水面舰艇和登陆部队之间的协同。舰艇、飞机、战车等作战平台之间完成同一作战任务称为平台协同,例如科索沃战争中,美国隐身轰炸机、电子干扰机之间的平台级协同,实施对军事目标高密度轰

炸。作战平台上的感知、决策、打击、通信等作战要素之间完成同一作战任务称为要素协同,协同作战层次从兵力协同、平台协同向着要素协同发展是必然过程。

针对同一作战任务,平台协同的效能释放依赖平台自身作战能力,制胜关键是平台优势。但各平台上的装备高度集成、紧密耦合,火控高精度数据难以支持跨平台使用,存在看不远、跟不准、打不上等问题。例如,两伊战争和英阿马岛战争的案例,充分证实了平台协同的作战模式对付掠海飞行的反舰巡航导弹饱和式攻击显得苍白无力。

2.2 基本思路

异构平台要素协同是将传统的紧耦合多任务异构平台的感知、决策、打击等作战要素解聚,利用高速低延时数据链对各作战要素进行链接,面向作战任务按需组合和动态重构,跨域平台要素协同基本思路如图1所示。

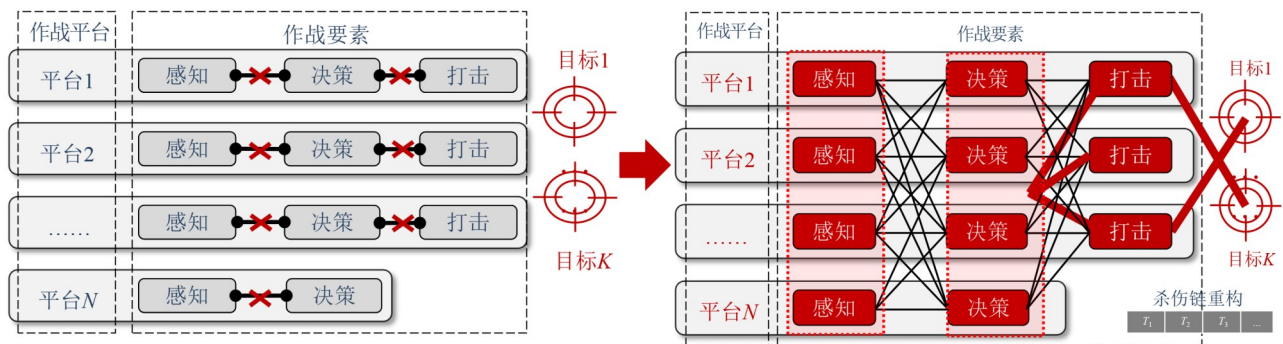


图1 异构平台要素协同基本思路示意图

和平台协同相比,异构平台要素协同的最小粒度由作战平台转变为作战要素,协同对象多样、协同关系多维,其内涵特征表现在以下几个方面:一是感知要素协同,通过对异构多平台多源传感器进行组网,利用多源传感器产生的视频、音频、图像、文本等跨介质多源大差异感知信息,实施信号级、数据级、决策级等多层次的态势感知和情报处理;二是决策要素协同,各平台利用一致的认知,通过局部协调和冲突消解实现分布式自主决策;三是打击要素协同,各平台软硬武器协同共用、多层衔接,提升打击效能。通过通信要素按需柔性组网,在感知要素、决策要素耦合链接下,通过优选打击策略,构建适应任务快速变化、要素动态组合的分布式跨域杀伤网^[4]。

感知、决策、打击要素概念建立在跨域协同作战背景下,其用途为打击/拦截空中、海上、陆上等高价值目标的杀伤链。感知要素的典型实体形态包括可搭载于卫星、飞机、战车、水面/水下舰艇的雷达、光电、红外、声呐、电侦等传感器;决策要素的典型实体形态包括飞机任务系统、战车指控系统、舰艇指控系统等指挥控制

备;打击要素的典型实体形态包括执行战术/战略打击的导弹、无人机、电子对抗设备等软硬武器装备。

由于感知、决策、打击要素各实体形态的使命任务、功能特征、战技性能各异,难以找到一种最细致且统一的表述方法,因此对其量化描述采取如下较为通用的表征方式,侧重描述要素在杀伤链构建过程中的关键属性。将要素属性归纳为标识、状态、功能及任务四大类属性。(1)标识:用以识别和区分不同的要素,包括名称、编号、符号等。(2)状态:描述了要素的当前情况或条件,包括位置、速度、方向、健康状况等。(3)功能:描述了要素的能力,包括通信能力、侦察能力、打击能力等,其定义了要素的能力范围和用途。(4)任务:描述了要素所分配的任务、任务分配过程中要素所处的状态以及任务的执行情况,包括分配的任务类型、目标、执行时间和执行地点等。标识、状态、功能以及任务四大类属性相互关联,其中标识、状态可视为通用属性,各类要素的表征方法一致。

以感知要素为例,其功能、任务类属性的量化描述可采用表1中的方式。

表 1 感知要素功能、任务属性

属性类别	属性	符号
功能	要素类型	swd, stg
	型号类型	swd_type _j , stg_type _j
	可协同要素 型号类型	co _i = swd_type _j , stg_type _j , d_type _j , t_type _j
	通信半径	c_range _i
	探测范围	s_range _i
	探测精度	s_accu _i
	雷达感知能力	rsc _j
	光电感知能力	psc _j
	电子感知能力	esc _j
任务	任务分配阶段	tcs _j
	所处杀伤链	kc _j
	任务完成度	tf _j

能转化为协同作战效能,因此对异类要素的协同关系描述需要遵循任务线程. 例如在时敏目标精确打击中, 根据任务的不同, 存在单个感知要素在决策要素的耦合下, 为单个打击要素提供信息保障的协同关系, 也存在若干感知要素协同为多个打击要素提供多目标信息保障的协同关系, 协同关系的复杂性概略表示如图 3 所示. 要素协同关系的复杂性使作战任务与作战要素之间难以高效、动态匹配.

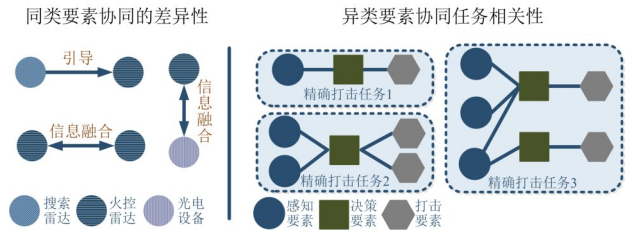


图 3 要素协同关系的复杂性

3 问题描述

异构平台要素协同的目的是杀伤效能的快速、高效释放, 由于作战资源规模化、作战任务多元化, 作战要素之间交互复杂, 交互对象既有单个作战要素也有作战要素集合, 交互方式具有非对称性, 交互过程涉及物理域、信息域、认知域, 且由于业务活动的强实时、高动态特点, 使得这种交互的动态性与不确定性更强, 表现出要素协同的复杂性, 这种复杂性关系如图 2 所示, 对实现异构平台要素协同作战带来巨大挑战.

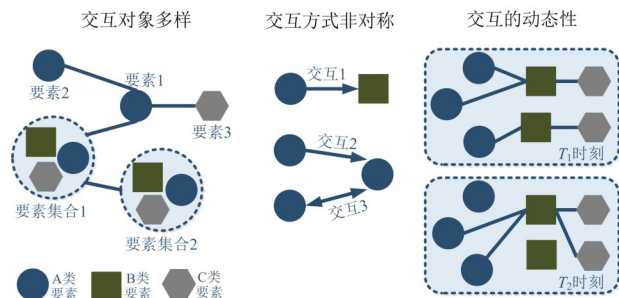


图 2 异构平台要素协同的复杂性

3.1 要素协同关系的复杂性问题

从要素协同关系来看, 同类作战要素存在功能相似但机理不同, 或机理相似但技术体制不同, 因此对同类作战要素的表征需要分析类内差异性. 感知要素主要包括视频类传感器、音频类传感器、图像类传感器以及文本类传感器等, 不同类型的感知要素对军事目标的感知方式与感知结果不同, 同类感知要素的融合与异类感知要素的融合存在差异, 需要反映并区分感知要素自身的关键属性, 以及感知要素协同的数据质量、更新周期等特征. 异类作战要素功能相异, 分布分散, 需要耦合衔接来参与杀伤链运行, 才能将自身功能性

3.2 要素协同能力的不确定性问题

从作战能力生成的角度来看, 涌现性是要素协同作战的主要特点, 通过异构平台要素协同, 使得各平台的感知、决策、打击等作战要素的个体属性拓展为跨平台要素的协同属性, 可以通过个体要素行为交互产生出整体模式, 支撑协同作战能力“涌现”, 要素协同能力的不确定性如图 4 所示. 但由于战场的不确定性, 这种“涌现”的能力往往并不是体系效能的直线上升, 而是体系效能的不规律波动. 因此, 体系效能的提升不能仅仅进行简单的叠加, 也不能通过简单的统计获取体系内在性质^[5], 要素协同能力的不确定性难以评价.

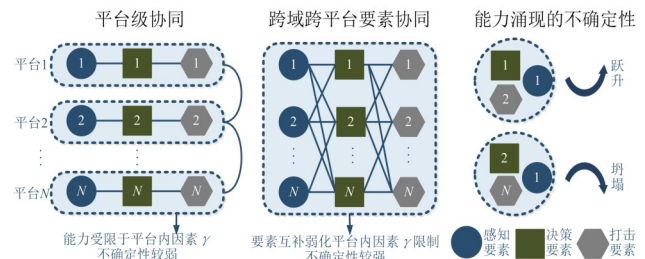


图 4 要素协同能力的不确定性

针对上述两个难点问题, 目前缺少作战任务与作战要素匹配的动态重构方法、作战要素协同效能定量表征方法. 现有研究工作大多将作战兵力、作战平台视作建模对象, 对协同关系的表述只抽象为简单的协同活动边或者指挥信息流、态势信息流, 未能刻画异构平台要素协同的复杂性, 对多种协同关系并存的作战体系表达能力较弱, 所构建的复杂作战网络在进行分析评估等运算时大多基于作战平台的线性/非线性叠加计算, 更适用于平台级协同作战. 此外, 现有利用复杂网络的作战体系建模与分析工作更多侧重于分析网络在

特定假设下的相关特性,如作战同步、分布式协同一致性、体系综合作战效能等,而以复杂网络建模为基础,进行杀伤链动态构建的研究相对较少.目前利用复杂网络来表示作战体系主要有三类路线^[6]:第一类是直接将作战体系的属性特点和业务规律抽象来构成复杂网络,也是当前较为主流的方法.例如在复杂网络中可以抽象描述舰艇编队作战过程^[7],可以将作战单元抽象为顶点、指挥关系抽象为边^[8].第二类是针对作战体系的对抗性^[9]、静态动态链接关系^[10]等关键特性,基于抽象描述这些特性的算法构建复杂网络.第三类是从感知、决策、打击等战术功能维度,或物理域、信息域、认知域等维度,按照网络化的组织指挥关系和作战机制,构建多层网络结构的超网络^[11].

4 理论模型

4.1 动态可重构架构

跨域分布式杀伤链的运用打破了按军种、单域的使用流程,针对作战任务,遵循跨域协同机理^[12],按照可用时间、空间、能力从作战资源池中抽取满足要求的感知要素、决策要素、打击要素,构建多条从感知到决策再到打击的跨域杀伤链路,形成分布式杀伤网,创造出不对称打击优势,为作战指挥人员提供有效的作战选项.在跨域分布式杀伤链运用机理的约束下,异构平台要素协同的外在形态表现为跨域要素协同作战体系,其核心特征为在外部输入或条件变更驱动下的“重构”,其运行基础为可重构架构.“重构”是指系统或体系在动态可重构架构下,采用任务式指挥方式^[13],根据作战任务情况或战场态势变化,快速配置作战力量、作战资源及功能,动态形成具有完成作战任务能力的分布式作战系统以及完成其战斗能力补充的过程^[13].当任务需求发生变化,可重构架构驱动体系演化,作战要素组合与杀伤链结构按照新的需求进行重组优化,可理解为使用控制论中的正反馈机制,引导并驱动体系向特定方向进化,快速调整满足当前作战需求.反馈控制下的杀伤链重构过程如图5所示.

按照上述思路,可设计如下基于异构平台要素协同的动态可重构架构.需要解构的原体系为已归建的建制平台和作战单元、单一作战系统等;可重构对象的粒度包含粗、细两个粒度,细粒度为从建制单元解聚的作战要素,如感知要素、决策要素、打击要素;粗粒度为要素组合以及功能衔接构成的杀伤链;重构后的体系表现为作战单元可动态重组的多杀伤链(网)^[13].可重构架构包含任务理解、要素动态重构、杀伤链生成、协同效能定量评估等核心组件.按照可重构对象粒度的不同,存在两个反馈分支,分别适用于局部重构与全链重构.作战任务是架构主要的外部信息输

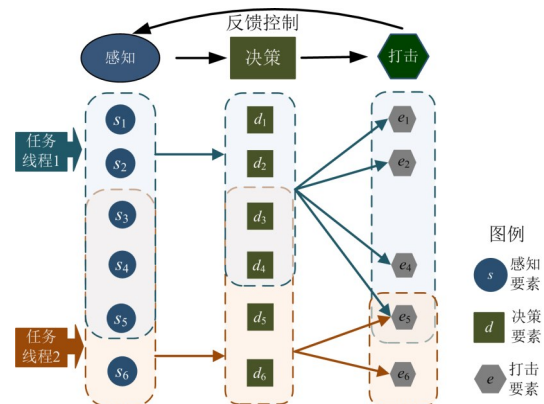


图5 反馈控制下的杀伤链重构

入,通过任务理解转换成规范的、形式化的格式内容,是后续操作过程的目标及约束,多个作战任务的短时并发将被视为相同问题背景下的多目标多约束.要素动态重构在任务理解的基础上,对接入的跨域作战要素资源进行筛选匹配,生成满足多目标多约束要求的要素编组集合,以及该编组的要素协同关系,依赖对要素个体与要素间协同效果的评估.在编组集合中进行目标分配打击计划,生成可执行的杀伤链,将要素协同效果转化为毁伤效果.协同效能定量评估对若干异构平台要素在杀伤链执行过程中的协同效果进行综合评估与实时监控,当目标及约束不变,但协同效果不满足要求时,进行局部重构,重构对象为作战要素,寻找替换组合或替换结构;当目标或约束改变,如若干目标突现,态势发生明显变化时,进行全链重构,重新执行任务理解、要素动态重构、杀伤链生成过程.杀伤链的动态重构过程如图6所示.

在杀伤链执行过程中,要素动态重构生成的要素编组集合与跨域作战要素资源池存在相关性,当某些作战要素退出资源池时,要素编组集合响应退出请求,刷新集合元素,以及对应的协同关系.因此局部重构后的结果存在依旧不满足效能要求的可能性,此时由架构外部判定是否继续使用无法满足要求的编组集合,例如考虑到作战时机,指战员可降低效能要求,平衡协同效能与任务完成度;架构自主升级局部重构为全链重构,来寻找更为合适的要素组合.

4.2 基于杀伤链算子的要素动态重构

在可重构架构中,要素动态重构为跨域要素协同作战提供了解空间,实现作战任务与作战要素的匹配.为了描述这种过程,需要对作战任务、作战要素、要素间的协同关系进行建模.以作战要素为基础的跨域要素协同作战体系,是在通信网支撑下,感知网、决策网和打击网有机融合后的“网络的网络”,是以异构平台的感知、决策、打击等作战要素为节点,各要素之间的协同规则、

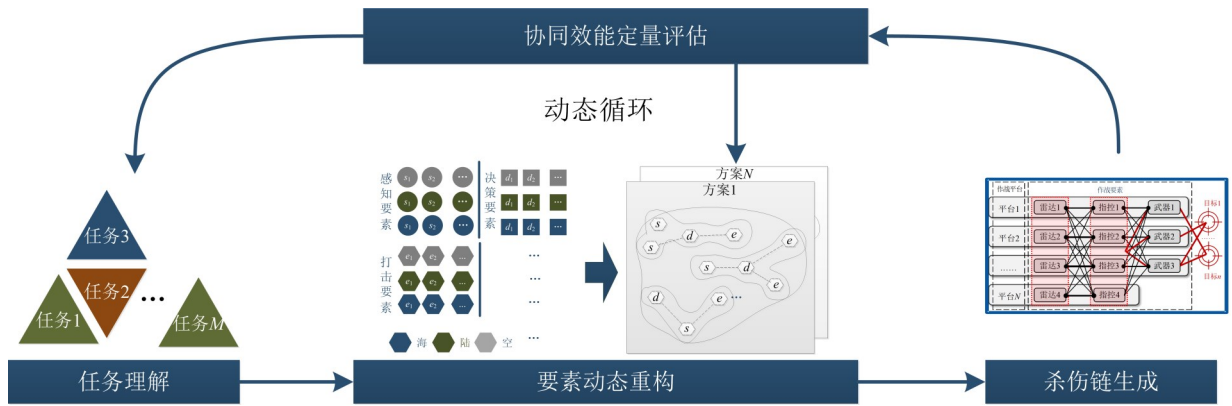


图6 动态可重构架构

信息认知交互为边,构成的具有多层次、多维性、多属性和多目标等特征的复杂作战网络^[14],可以借助图论中的理论和方法^[15,16],用超图或多层网络来描述要素动态重构过程,即将跨域要素协同作战体系视作复杂作战网络,将作战要素的标识、状态、功能等属性,抽象为复杂作战网络中的顶点,将协同关系、运用规则等,抽象为复杂作战网络中的连边,形成复杂网络结构。

将复杂作战体系抽象成单个网络忽略了作战要素之间的非线性交互对作战能力生成的贡献,这些交互

使得作战要素在时间和空间上产生各种形式的关联结构,呈现出时空多尺度特征.利用多层网络的描述方式能够突破单层网络中顶点和连边同质性的限制,对节点的战术功能区分清晰,再借助着色理论等手段,可以对连边的差异性进行精确刻画,从复杂网络结构中划分为多个可用的连通子图,寻找效能最优的连续路径,更适合处理异构平台要素协同的分布式杀伤链构建问题.多层作战网络中寻找可用的连通子图过程如图7所示.

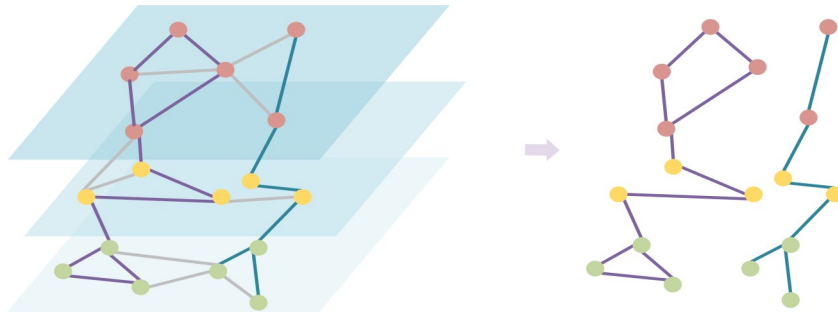


图7 多层作战网络中寻找可用的连通子图

假设作战网络由目标层、感知层、决策层、打击层组成,那么可以用 M 表示层数 $m=4$ 的多层作战网络模型 $M=(G, E)$,其中, $G=\{G_\alpha=(V_\alpha, E_\alpha)|\alpha=1,2,\dots,m\}$, $V_\alpha=\{v_i| i=1,2,\dots,N^\alpha\}$, v_i^α 表示 G_α 层中的顶点, N^α 表示 G_α 层中顶点的数量.层内各要素之间的交互通过 $E_\alpha=\{(v_i^\alpha, v_j^\alpha)\in G|\alpha\in\{1,2,\dots,m\}, i\neq j\}$ 来表示,各层之间通过 $E_{\alpha\beta}=\{(v_i^\alpha, v_j^\beta)\in G|\alpha,\beta\in\{1,2,\dots,m\}, \alpha\neq\beta\}$ 来表示,其表示顶点 v_i^α 和 v_j^β 在不同层上存在的跨层连接关系; $E=E_\alpha\cup E_{\alpha\beta}$ 表示层内和层间的信息交互关系以及任务分配关系。

在单层作战网络中可通过有向、无向、赋权、属性集等对各个作战要素的结构、功能等进行刻画,该思路可扩展至多层作战网络中.此外,一个含有 m 层的多层网络 M 可用超邻接矩阵 $\bar{A}=(A, O)$ 来表示,其中, $A=[A_1 A_2 \dots A_m]$ 表示多层网络中各层的邻接矩阵,

$A_\alpha=[a_{ij}^\alpha]$, a_{ij}^α 的值或内涵具有多种形式,可以指代各层之间的任务衔接关系,也可以指代目标信息交互关系.若以是否存在协同关系来简化考虑,那么当 α 层中顶点 v_i^α 和 v_j^α 之间存在连边关系时, $a_{ij}^\alpha=1$,否则 $a_{ij}^\alpha=0$. $O=[O_{12} O_{23} \dots O_{(m-1)m}]$ 表示层间网络邻接矩阵, $O_{\alpha\beta}=[o_{ij}^{\alpha\beta}]$,当 α 层中顶点 v_i^α 和 β 层中顶点 v_j^β 之间存在连边关系时, $o_{ij}^{\alpha\beta}=1$,否则 $o_{ij}^{\alpha\beta}=0$.根据上述定义,多层网络的一般矩阵形式为

$$\bar{A}=(A, O)=[A_1 A_2 \dots A_m; O_{12} O_{13} \dots O_{m-1,m}]$$

$$= \begin{bmatrix} A_1 & O_{12} & \dots & O_{1m} \\ O_{21} & A_2 & \dots & O_{2m} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ O_{m1} & O_{m2} & \dots & A_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

异构平台要素协同在作战任务牵引下形成的杀伤链或具有不同特征的杀伤链集合,可抽象为包含不同

群组作战要素及要素间协同关系的“杀伤链类”. 杀伤链类在要素动态重构过程中可以看作计算粒子,即“杀伤链算子”,其反映了该应用任务计算特征的一种模式,是完成该作战任务算法结构的一种抽象和归纳^[13]. 假设存在作战任务集合 O_M , 以及包含感知、决策、打击三类作战要素的作战要素集合 O_E , 可生成 l 条“感知-决策-打击”杀伤链, 那么, 杀伤链算子 A_H 可将作战任务与作战要素的匹配表示为

$$A_H = \text{match}(O_M, O_E) = (K, N, W, U) \quad (2)$$

其中, $\text{match}()$ 为匹配函数; $K = \{k_1, k_2, \dots, k_l\}$ 为杀伤链集合; $N = \{n_1, n_2, \dots, n_l\}$ 为边集, 表示杀伤链之间的依赖关系; $W = \{w_1, w_2, \dots, w_l\}$ 表示杀伤链中协同的作战要素数量; $W = \{w_i = (ns_i, nc_i, ne_i) | i = 1, 2, \dots, l\}$, ns_i, nc_i, ne_i 分别表示第 i 个杀伤链的感知要素、决策要素、打击要素协同数量; $U = \{u_1, u_2, \dots, u_l\}$ 表示边属性组成的集合.

杀伤链算子反映的作战任务与作战要素之间的匹配过程, 在多层作战网络模型 $M = (G, E)$ 中以连通子图的形式存在, 可作为多层作战网络的连通子图的搜索范式. 杀伤链算子的 K 描述各类连通子图, N 和 U 描述子图间的关系, W 描述子图的顶点集合. 因此作战任务与作战要素的匹配, 即杀伤链算子的求解可以近似为带耦合约束的多阶段任务分配问题, 从复杂的多层作战网络中遍历生成针对目标顶点的“发现-感知-决策-打击”行动路径. 一般来讲, 杀伤链构建可划分为协同探测、协同分配、协同打击制导三个阶段, 该问题的求解通常包含决策变量、目标函数、状态转移率、约束条件等设计因素.

决策变量的选择是带耦合约束的多阶段任务分配模型研究的基础. 用 i 表示当前所处阶段, 用 O_E 表示已生成的作战要素集合, 则阶段 i 当前时刻的状态 x_i . 状态转移律描述了在给定当前阶段状态和决策的前提下, 状态随时间变化并转移至另一状态的确切性规则. 即从状态 $x_i^0 = x_i$ 出发, 当决策 d_i^0 确定时, x_i^1 即确定. 求解复杂网络中连续路径的约束包括可行性约束、任务约束和其它约束. 可行性约束反映了能够执行作战任务的基本约束, 任务约束描述影响有效活动的规则与假设, 其它约束涵盖作战成本、交战窗口约束等.

4.3 基于协同序参量的效能定量评估

在跨域异构平台要素协同中, 各作战要素为了实现一致的作战任务和使命, 需要具备高度的协同一致性, 从而能够面对快速变化和动态发展的作战目标和作战场景. 因此, 在对跨域异构要素协同效果进行评估时, 作战要素之间的一致性成为了决定协同效果的关键因素. 在图 8 中分别描述了感知要素、决策要素、打击要素的协同机理, 感知要素的协同机理表现为感知要素获取的态势信息与真实信息的一致性, 决策要素

的协同机理表现为决策要素之间对态势理解的一致性, 打击要素的协同机理表现为打击要素对打击效果评估的一致性.

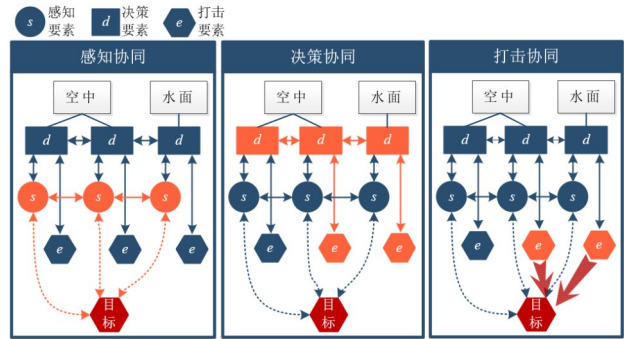


图 8 跨域同构要素协同机理

为了对跨域异构平台要素协同效能进行定量评估, 在文献[17]中引入了协同序参量概念, 如式(3)所示, 当目标态势 y_s 一致、分布式决策 y_d 一致, 打击效果 y_e 最大时, 全域序参量 γ 趋近于临界值(即为 1), 分布式系统要素协同作战效能达到最佳状态, 全局协同序参量可表示为

$$\gamma = \gamma_s \cdot \gamma_d \cdot \gamma_e \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \gamma_l &= \frac{1}{2N_l} \sum_i \sum_{j \in I_i} \left| \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta t} \int_{t_i}^{t_i + \Delta t} e^{i(\theta_i(t) - \theta_j(t))} dt \right| \\ \gamma_{sd} &= \frac{1}{N_l} \sum_i \sum_{j \in I_i, j > i} \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta t} \int_{t_i}^{t_i + \Delta t} e^{-|y'_s(t) - y'_d(t)|} e^{-|y'_d(t) - y'_e(t)|} dt \\ \gamma_e &= \frac{1}{n_e} \sum_{i=1}^{n_e} \gamma_e^i \end{aligned} \right. \quad (4)$$

其中, γ_l 表示网络中两两相邻节点之间达到协同的连边占网络所有连边 N_l 的比值; 相位参数 $\theta_i(t)$ 为要素 v_i 的时变状态; 每个作战环节的指挥周期为 $T = 2\pi\omega_i$, 代表指挥快慢程度; γ_{sc} 是网络中两两相邻节点之间达到态势一致和分配一致的归一化指数连边, 即 $e^{-|y'_s(t) - y'_d(t)|}$ 和 $e^{-|y'_d(t) - y'_e(t)|}$ 占网络所有连边 N_l 的比值; γ_e 是网络中已分配交战要素个数为 n_e 的杀伤效果累积值与已分配交战要素个数累积总数 y_e^i 的比值.

在文献[17]的基础上, 本文进一步将通信要素纳入跨域异构平台作战要素协同体系, 并分析通信要素对体系整体协同效果的影响. 通过分析可知, 通信要素协同效果主要表现为作战网络的连通性, 作战网络的连通性主要考虑时延、漏组率等两方面性能. 当作战网络的时延、漏组率等性能变差时, 作战网络的连通性将会下降. 相反, 当作战网络的时延、漏组率等性能变好时, 作战网络的连通性将会提升. 那么, 作战网络的连通性影响因子 C 可表示为

$$C = \frac{N_{sg}(x_i, x_j)}{N_{(G,E)}} \quad (5)$$

其中, N_{sg} 表示作战网络中最大连通子图中有效网络节点等效数量, 该变量是通信时延参数 x_i 和通信漏组率参数 x_j 的函数; $N_{(G,E)}$ 表示作战网络中初始节点数量. 作战网络连通性对作战体系整体协同效果的影响主要体现在两个方面: 一是当作战网络的连通性在阈值以上时, 会对态势、决策的一致性以及打击效能产生一定的影响, 但此时作战网络仍能满足作战体系协同使用要求; 二是当作战网络连通性下降到阈值以下时, 将会导致作战体系瘫痪甚至不可用. 经过以上分析, 通信要素协同因子可表示为分段函数:

$$C_k = \begin{cases} 1, & C \geq V_c \\ 0, & C < V_c \end{cases} \quad (6)$$

其中, V_c 表示作战网络运行的最低连通性门限要求, 通常与作战网络的使命任务、资源分布等因素有关. 那么, 用于协同效果定量评估的全域系统序参量可进一步扩展为

$$\gamma = C_k \cdot \gamma_l \cdot \gamma_{sd} \cdot \gamma_e \quad (7)$$

通过在全域序参量 γ 中引入代表通信要素协同效果的通信要素协同因子 C_k , 扩展了跨域异构作战要素协同效果评估的维度. 通过联合分析式(6)和式(7)可知, 在引入通信要素的跨域异构平台要素协同体系中, 当作战网络的连通性因子高于最低连通性门限 V_c 时, 通信要素协同效果不会对异构平台要素协同作战体系产生影响, 仍然能带来协同效能, 否则将导致要素协同作战体系不可用, 序参量为 0, 此时将回归平台协同状态, 因此, 通信要素之间的协同效果使跨域异构平台要素协同作战的前提和基础.

5 仿真实验

本文提出一种异构平台作战要素协同的理论模型, 重点解决作战任务和作战要素匹配的问题. 通过构建跨域作战要素协同仿真验证场景对本文提出的异构平台作战要素协同的理论模型进行推演和效能评估, 以验证所提理论模型的有效性和可行性.

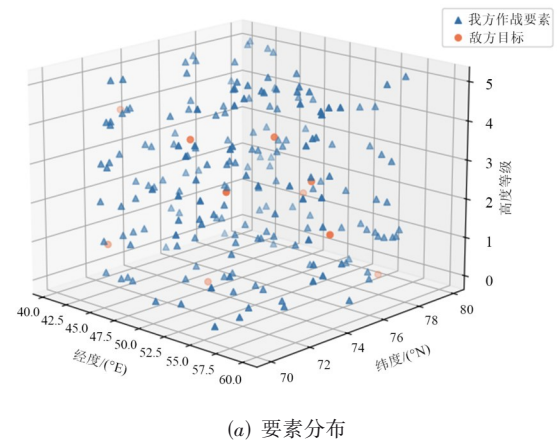
5.1 场景设置

构建如图 9 所示的跨域作战要素协同场景, 图 9(a) 为要素分布图, 图 9(b) 为作战网络拓扑图. 场景中包含 200 个红方作战要素, 其中, 感知要素为 112 个, 74 个为预警探测要素, 38 个为跟踪制导要素; 决策要素为 29 个; 打击要素为 59 个. 假定初始待打击蓝方目标为 10 个, 临机新增待打击蓝方目标为 3 个.

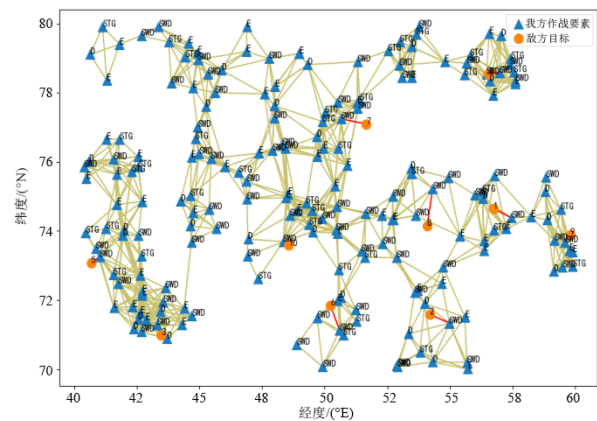
为了快速获取实验结果, 简化实验过程, 在实验实施中提出如下假定:

(1) 在同一批次中, 一个作战要素仅承担一项作战任务;

(2) 各作战要素的通信范围假定为球型, 忽略通信



(a) 要素分布



(b) 作战网络拓扑图

图 9 仿真验证场景

体制限制, 仅以通信距离作为是否通信连通的判断;

(3) 要素间协同数量的上限为 8 个;

(4) 决策节点不会失效.

另外, 由于仿真场景中要素规模较大, 要素间连边共 866 条, 未经处理的作战网络难以直观展示要素的属性、连边交互以及协同关系, 甚至难以通过作战网络观察到要素间连边, 因此结合图论的着色手段, 利用第 4.2 节给出的方法建立多层作战网络, 根据作战网络中顶点的邻居集合是否可协同进行染色操作, 不可协同顶点染为灰色, 并不断向四周扩散, 直至多层网络中的连边均已染色, 得到着色后的多层作战网络的三维视图, 如图 10 所示. 连边个数共计 561 条, 相对普通作战网络共计减少连边 305 条.

5.2 实验验证

(1) 杀伤链生成

基于构建的仿真验证场景, 采用本文提出的异构平台作战要素协同的理论模型对 10 个初始待打击目标进行杀伤链构建, 构建出的杀伤链结果如表 2 所示.

通过多层作战网络拓扑结构图可以比较直观的观察到上述 10 条杀伤链的分布及结构, 如图 11 所示.

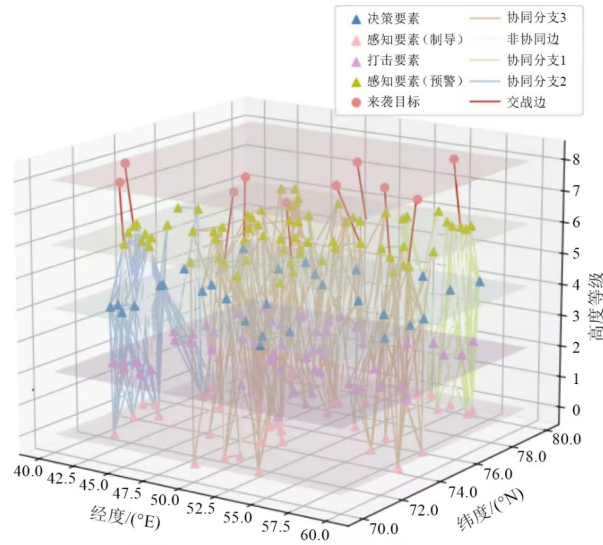


图10 着色后的多层作战网络三维视图

表2 杀伤链生成

目标编号	杀伤链	协同序参量值	目标编号	杀伤链	协同序参量值
1		0.97	2		0.81
3		1	4		0.98
5		0.84	6		0.83
7		0.80	8		0.80
9		0.96	10		0.84

(2) 杀伤链重构

杀伤链重构过程主要包括新生临机任务和原有杀伤链失效两种情况. 考虑新生临机任务的情况, 假定在上述 10 条杀伤链均未执行完任务时, 出现 3 个临机的

待打击目标, 对全部目标打击优先级进行排序, 并重新生成杀伤链, 完成杀伤链的重构. 原 10 个初始待打击目标的杀伤链生成结果一致, 3 个临机出现的待打击目标的杀伤链表 3 所示.

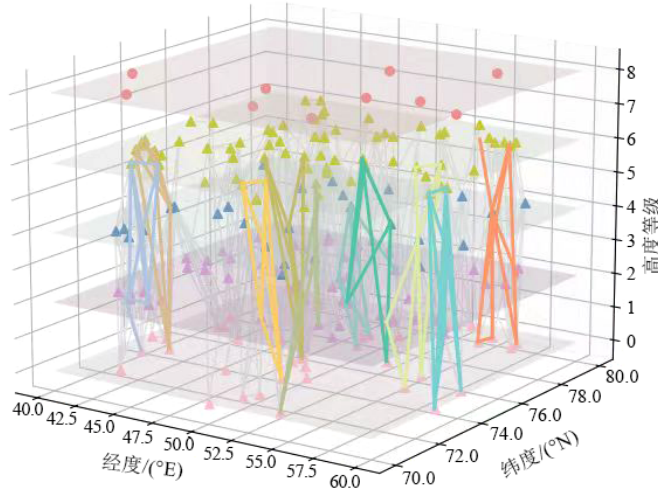


图 11 多层作战网络中针对 10 个初始待打击目标生成的杀伤链

表 3 重构后的杀伤链

目标编号	杀伤链	协同序参量值	目标编号	杀伤链	协同序参量值	目标编号	杀伤链	协同序参量值
11		0.96	12		0.80	13		1

考虑原有杀伤链失效的情况, 针对 10 个初始待打击目标的杀伤链, 假设在执行过程中的某时刻, 针对第 1 个目标的预警探测要素 swd_{120} 、针对第 7 个目标的预警探测要素 swd_{57} 、针对第 10 个目标的打击要素 e_{145} 失效, 导致对应的 3 条杀伤链的协同效能降低, 进行杀伤

链重构, 得到重构后的杀伤链表 4 所示.

从上述仿真实验中可以看出, 其在给定作战场景下能够准确地反映系统的结构, 与任务目标有匹配性, 为杀伤链生成与重构提供了良好的计算基础. 在杀伤链生成与重构过程中, 本文提出的理论方法在给定场

表 4 针对 3 个失效要素重构后的杀伤链

目标编号	杀伤链	协同序参量值	目标编号	杀伤链	协同序参量值	目标编号	杀伤链	协同序参量值
1		0.93	7		0.90	10		0.80

景下能够依据协同网络给出具备最优协同效能的杀伤链,且在出现新目标或者节点失效的条件下,均能够及时反应,保证杀伤链的动态性.

6 总结

要素级协同是协同作战未来发展的必经之路.在平台级协同的基础上,实现跨域战场中的要素级协同,不仅需要先进的武器装备,更需要一套适合要素级协同特点的理论方法与关键技术,来指导跨域要素协同作战体系的高效运用.首先,分析了异构平台要素协同的复杂性,梳理出异构平台要素如何高效自主协同的关键问题,提出了对应的解决思路.其次,提出了以可重构架构为基础的要素动态重构理论方法.通过建立杀伤链算子的感知、决策、打击等多要素动态重构模型,来反映各种要素组合关系,解决作战要素与任务的适配问题.提出协同序参量的协同效能度量方法,建立作战要素之间协同效果的定量数学表达,对杀伤链中要素协同效果进行动态评估,解决要素协同效能定量表征的问题,从而实现杀伤链构建、评估、再重构的动态循环过程.最后,通过构建跨域作战要素协同仿真验证场景对本文提出的模型理论的可行性和有效性进行了验证.随着对跨域协同作战理论的研究不断深入,以及信息化、智能化技术手段的持续应用,本文提出的异构平台要素协同理论与方法也会不断改进完善,优化杀伤链算子、协同序参量等核心理论点,形成理论方法谱系,不仅可以指导作战体系的运用,也可作为武器装备建设和军事理论研究的重要参考,为我军跨域协同作战能力的提升做出贡献.

参考文献

- [1] 许珺怡, 季明, 郭域峰, 等. 基于蒙特卡洛树搜索的全域指挥控制协同[J]. 指挥与控制学报, 2022, 8(1): 37-43.
XU J Y, JI M, GUO Y F, et al. All-domain command and control coordination based on Monte Carlo tree search[J]. Journal of Command and Control, 2022, 8(1): 37-43. (in Chinese)
- [2] 任双, 周洁, 高嵩, 等. 基于注意力机制的无人机集群协同分群控制算法[J]. 电子学报, 2023, 51(7): 1898-1905.
REN S, ZHOU J, GAO S, et al. Cooperative fission control algorithm of UAV swarm based on attention mechanism [J]. Acta Electronica Sinica, 2023, 51(7): 1898-1905. (in Chinese)
- [3] 张修社, 石静, 范文新. 协同作战系统工程导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2019.
ZHANG X S, SHI J, FAN W X. Introduction to Cooperative Engagement System Engineering[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2019. (in Chinese)
- [4] 胡钢, 卢志宇, 王乐萌, 等. 基于复杂网络多阶邻域贡献度的节点重要性序结构辨识[J]. 电子学报, 2023, 51(7): 1956-1963.
HU G, LU Z Y, WANG L M, et al. Identification of node importance order structure based on multi-order neighborhood contribution of complex network[J]. Acta Electronica Sinica, 2023, 51(7): 1956-1963. (in Chinese)
- [5] 高杨, 李东生, 柳向. 无人机集群协同态势觉察一致性评估[J]. 电子学报, 2019, 47(1): 190-196.
GAO Y, LI D S, LIU X. UAV swarm cooperative situation perception consensus evaluation[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(1): 190-196. (in Chinese)
- [6] 王小军, 张修社, 胡小全, 等. 跨域作战要素协同中的联合行动控制概念浅析[J]. 现代导航, 2021, 12(4): 235-241.
WANG X J, ZHANG X S, HU X Q, et al. Brief analysis of concept of joint actions control in synergy of cross-domain operational elements[J]. Modern Navigation, 2021, 12(4): 235-241. (in Chinese)
- [7] 朱涛, 常国岑, 张水平, 等. 基于复杂网络的指挥控制信息协同模型研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(22): 6058-6060, 6065.
ZHU T, CHANG G C, ZHANG S P, et al. Research on model of command and control information cooperation based on complex networks[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(22): 6058-6060, 6065. (in Chinese)
- [8] 张强, 李建华, 沈迪, 等. 基于复杂网络的作战体系网络建模与优化研究[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(5): 1066-1071.
ZHANG Q, LI J H, SHEN D, et al. Research on network modeling and optimization of operation system of systems based on complex network[J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(5): 1066-1071. (in Chinese)
- [9] 胡晓峰, 贺筱媛, 饶德虎. 基于复杂网络的体系作战协同能力分析研究方法研究[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2015, 12(2): 9-17.
HU X F, HE X Y, RAO D H. A methodology for investigating the capabilities of command and coordination for system of systems operation based on complex network theory[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2015, 12(2): 9-17. (in Chinese)
- [10] 胡晓峰, 贺筱媛, 饶德虎, 等. 基于复杂网络的体系作战指挥与协同机理分析方法研究[J]. 指挥与控制学报, 2015, 1(1): 5-13.
HU X F, HE X Y, RAO D H, et al. Research on mecha-

nism of command and coordination for system of systems operation based on complex network theory[J]. Journal of Command and Control, 2015, 1(1): 5-13. (in Chinese)

- [11] 王伟, 刘付显, 邢清华. 基于复杂网络的作战同步建模与优化[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(12): 91-95.
WANG W, LIU F X, XING Q H. Modeling and optimization of operational synchronization based on complex networks[J]. Fire Control & Command Control, 2016, 41(12): 91-95. (in Chinese)
- [12] 朱江, 刘大伟, 陈俊. 作战体系超网络模型及应用[J]. 指挥控制与仿真, 2013, 35(2): 13-16.
ZHU J, LIU D W, CHEN J. Hyper-network model of combat system and use case[J]. Command Control & Simulation, 2013, 35(2): 13-16. (in Chinese)
- [13] 王小军, 张修社, 胡小全, 等. 基于杀伤链感知的动态可重构作战体系结构[J]. 现代导航, 2020, 11(4): 235-243, 249.
WANG X J, ZHANG X S, HU X Q, et al. Dynamic reconfigurable combat architecture based on kill chain perception[J]. Modern Navigation, 2020, 11(4): 235-243, 249. (in Chinese)
- [14] ZENG A, SON S W, YEUNG C H, et al. Enhancing synchronization by directionality in complex networks[J]. Physical Review E, 2011, 83(4): 045101.
- [15] LEYVA I, SENDIÑA-NADAL I, ALMENDRAL J A, et al. Explosive synchronization in weighted complex networks[J]. Physical Review E, 2013, 88(4): 042808.
- [16] 贾琚, 吴元立, 贺筱媛, 等. 作战协同关系超图模型[J]. 国防科技大学学报, 2015, 37(3): 185-190.
JIA J, WU Y L, HE X Y, et al. Operation cooperative relation modeling based on hypergraphs[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2015, 37(3): 185-190. (in Chinese)
- [17] 王小军, 张修社, 胡小全, 等. 分布式作战系统要素协同控制理论与方法[J]. 现代导航, 2020, 11(2): 79-88.
WANG X J, ZHANG X S, HU X Q, et al. Theoretical method for element level cooperative control of distributed combat system[J]. Modern Navigation, 2020, 11(2): 79-88. (in Chinese)

作者简介



张修社 1965年3月生. 中国电子科技集团公司第二十研究所研究员. 主要研究方向为雷达系统、协同作战系统.

E-mail: zhangxiushe20@163.com



胡小全 1959年11月生. 中国电子科技集团公司第二十研究所研究员. 主要研究方向为雷达总体、电子信息系统总体.



易凯 1984年11月生. 中国电子科技集团公司第二十研究所高级工程师. 主要研究方向为电子信息系统、智能决策与控制技术.



王小军 1962年2月生. 中国电子科技集团公司第二十研究所研究员. 主要研究方向为综合电子信息系统、智能控制技术.