

8-19-2021

Modeling on Anti-UAV System-of-systems Combat OODA Loop Based on NetLogo

Zhao Zhu

1. *The 11th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100020, China;*
;2. *CETC Electro-optics Technology Corporation Limited, Beijing 100020, China;*

Wang Yi

1. *The 11th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100020, China;*
;2. *CETC Electro-optics Technology Corporation Limited, Beijing 100020, China;*

Ruifeng Fan

1. *The 11th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100020, China;*
;2. *CETC Electro-optics Technology Corporation Limited, Beijing 100020, China;*

Liya Li

1. *The 11th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100020, China;*
;2. *CETC Electro-optics Technology Corporation Limited, Beijing 100020, China;*

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Modeling on Anti-UAV System-of-systems Combat OODA Loop Based on NetLogo

Abstract

Abstract: Aiming at the threats from unmanned aerial vehicle (UAV) or swarm, as well as the difficult problems of systems confrontation modeling, overall process design, and operational effectiveness evaluation in anti-UAV system-of-systems, the structure and operational process both of the UAV and anti-UAV systems are analyzed respectively, and *the anti-UAV Observe-Orient-Decide-Act (OODA) system-of-systems combat model which based on multi-agent modeling platform NetLogo is proposed. Utilizing the emergence of agent role in this simulation model, the influence exerted by OODA on anti-UAV is studied by the multi-agent simulation.* The results show that the OODA loop is one of the key factors that affects the combat effectiveness of anti-UAV system, which is an important guiding significance for the anti-UAV combat command system construction.

Keywords

anti-UAV(unmanned aerial vehicle), Observe-Orient-Decide-Act(OODA), system-of-systems combat, multi-agent modeling, NetLogo

Authors

Zhao Zhu, Wang Yi, Ruifeng Fan, Liya Li, and Qi Meng

Recommended Citation

Zhao Zhu, Wang Yi, Fan Ruifeng, Li Liya, Qi Meng. Modeling on Anti-UAV System-of-systems Combat OODA Loop Based on NetLogo[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(8): 1791-1800.

基于多主体 NetLogo 平台的反无人机 OODA 体系对抗建模

赵柱^{1,2}, 王毅^{1,2}, 樊芮锋^{1,2}, 李丽亚^{1,2}, 祁蒙^{1,2}

(1. 中国电子科技集团公司 第十一研究所, 北京 100020; 2. 中电科光电技术有限公司, 北京 100020)

摘要: 针对日益严峻的无人机或无人机蜂群威胁问题, 以及反无人机作战系统设计过程中存在的体系对抗建模、总体流程设计和作战效能评估等难题, 研究无人机与反无人机系统的组织架构与作战流程, 提出基于多主体建模 NetLogo 平台的反无人机 OODA(Observe-Orient-Decide-Act)体系对抗模型, 利用仿真模型中主体作用的涌现性, 研究 OODA 模型对反无人机作战的影响和规律, 验证了 OODA 模型是影响反无人机作战效果的关键因素之一, 对反无人机作战指挥及系统建设具有重要的指导意义。

关键词: 反无人机; OODA(Observe-Orient-Decide-Act); 体系对抗; 多主体建模; NetLogo

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2021)08-1791-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0355

Modeling on Anti-UAV System-of-systems Combat OODA Loop Based on NetLogo

Zhao Zhu^{1,2}, Wang Yi^{1,2}, Fan Ruifeng^{1,2}, Li Liya^{1,2}, Qi Meng^{1,2}

(1. The 11th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100020, China;

2. CETC Electro-optics Technology Corporation Limited, Beijing 100020, China)

Abstract: Aiming at the threats from unmanned aerial vehicle (UAV) or swarm, as well as the difficult problems of systems confrontation modeling, overall process design, and operational effectiveness evaluation in anti-UAV system-of-systems, the structure and operational process both of the UAV and anti-UAV systems are analyzed respectively, and the anti-UAV Observe-Orient-Decide-Act (OODA) system-of-systems combat model which based on multi-agent modeling platform NetLogo is proposed. Utilizing the emergence of agent role in this simulation model, the influence exerted by OODA on anti-UAV is studied by the multi-agent simulation. The results show that the OODA loop is one of the key factors that affects the combat effectiveness of anti-UAV system, which is an important guiding significance for the anti-UAV combat command system construction.

Keywords: anti-UAV(unmanned aerial vehicle); Observe-Orient-Decide-Act(OODA); system-of-systems combat; multi-agent modeling; NetLogo

引言

当前, 非法小型无人机对城市、要地安全防护构成新的严峻挑战^[1-2], 反无人机技术需求日益迫切。由于无人机及蜂群作战是信息化时代的新型作战模式, 因此反无人机作战必须置于信息化战争体系对抗条件之下。其中, 作为反无人机体系对抗核心的指挥控制系统, 已建立了多种理论

模型^[3]。基于某种指控模型而建立的反无人机作战体系, 可通过系统仿真的方式进行理论检验^[4]。

基于无人机蜂群作战所呈现的整体涌现性特征与多主体(Agent)建模思想的高度吻合, 可利用多主体理论开展无人机与反无人机体系对抗仿真研究, 从而分析模型参数对作战过程和作战效果的影响, 进而指导反无人机作战的体系建设。

本文研究的主要目标为: ①从无人机与反无

收稿日期: 2020-06-15 修回日期: 2020-07-29

第一作者: 赵柱(1987-), 男, 博士, 高工, 研究方向为反无人机系统设计。E-mail: bit_zhaozhu@163.com

人机体系对抗的角度，建立适用于反无人机作战的体系对抗模型；②基于 Agent 建模理论的 NetLogo 编程建模平台，建立反无人机体系对抗模型；③设计仿真实验，对系统仿真结果进行分析和总结。

1 OODA 模型

OODA(Observe-Orient-Decide-Act)模型^[5-6]是军事领域描述和解释指挥控制过程的经典模型。该模型包括 4 个步骤的循环过程：观察、判断、决策和执行，如图 1 所示。观察是从外部环境中获取有助于判断的信息；判断是将观察获取的信息进行数据加工和处理，为决策提供必要的态势情报；决策是基于观察和判断结果，生成有利于完成任务的作战方案；行动是对决策方案的执行，并在其过程中不断反馈和接收最新动态发展信息。

OODA 模型具有周期性，一个环路结束时，另一个新的环路开始，率先完成循环的一方能够更快地采取行动，从而获取战场主动权，因此 OODA

循环周期是评价体系能力的重要指标。一个 OODA 周期 T_{OODA} 可分解为观察到完成判断时间 Δt_1 、判断到完成决策时间 Δt_2 、决策到完成行动时间 Δt_3 和行动结束到下一循环观察开始时间 Δt_4 ，即：

$$T_{OODA} = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 \quad (1)$$

式中： Δt_1 位于信息域，由作战体系网络信息交换速率 λ_T 决定； Δt_2 位于认知域，由体系的整体决策速率 λ_{C2} 决定； Δt_3 同时包含于信息域和物理域，因此与 λ_T 和平均行动部署速率 λ_E 有关； Δt_4 也同时包含于信息域和物理域，与 λ_T 和平均交战速率 λ_F 有关。综上， T_{OODA} 的表达式为^[7]：

$$T_{OODA} = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 = \frac{1}{\lambda_T} + \frac{1}{\lambda_{C2}} + \left(\frac{1}{\lambda_T} + \frac{1}{\lambda_E} \right) + \left(\frac{1}{\lambda_T} + \frac{1}{\lambda_F} \right) = \frac{3}{\lambda_T} + \frac{1}{\lambda_{C2}} + \frac{1}{\lambda_E} + \frac{1}{\lambda_F} \quad (2)$$

对于多个平台构成的体系对抗模型，每个作战平台都遵循 OODA 环，并嵌入在更高级别的 OODA 环内，形成更为复杂的体系对抗网络。

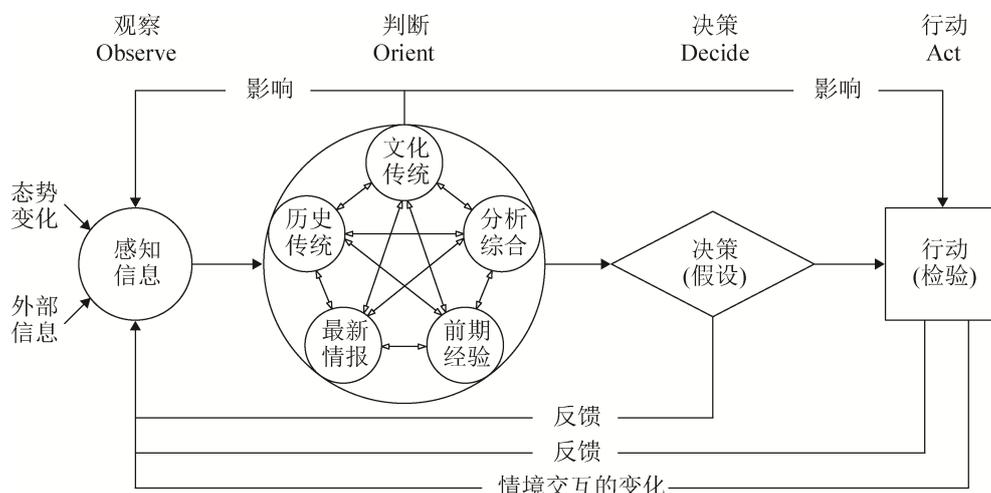


图 1 OODA 模型
Fig. 1 OODA loop

2 反无人机体系对抗模型的建立

反无人机作战的主体包括无人机系统和反无人机系统。通过对各主体的作战方式进行分析，进而确立适用于反无人机作战的体系模型。

2.1 无人机目标分析

典型的无人机系统由飞行器、任务规划控制站 (MPCS)、有效载荷和数据链组成。飞行器是无人机系统中在空中的飞行部分，由机体结构、推进装

置、飞行控制、电力系统和飞行数据终端(数据链的机载部分)组成, 可分为固定翼、旋翼等类型。MPCS 是无人机系统的操作中心, 飞行器的视频、指令、遥测数据在此进行处理和显示, 并通过地面终端(数据链的地面部分)完成中继。有效载荷是使用无人机系统的根本原因, 包括侦察监视系统(如可见光、夜视、雷达等)、指示设备(如激光器)、电子战系统(如全谱段信号情报或干扰机)、武器系统(如射击、投放或发射战斗部)以及扩展通视型无线电射频系统(中继平台)等。数据链为无人机系统提供了双向通信能力, 其上行数据链提供飞行路径和载荷指令, 下行数据链发送应答指令、状态信息及传感器数据。

典型微小型无人机作战如图 2 所示。飞行器外挂传感器首先将感知获得的外部环境信息(观察)回传至 MPCS, MPCS 处理数据信息, 操作人员根据对态势的理解(判断), 发送操控指令(决策), 飞行器及任务载荷执行相应的动作和任务(行动)。可见, 无人机控制及任务过程遵循 OODA 模型, 包含观察—判断—决策—行动完整过程, 因而美国空军研究实验室(AFRL)将 OODA 模型作为无人机系统性能衡量的主要依据。

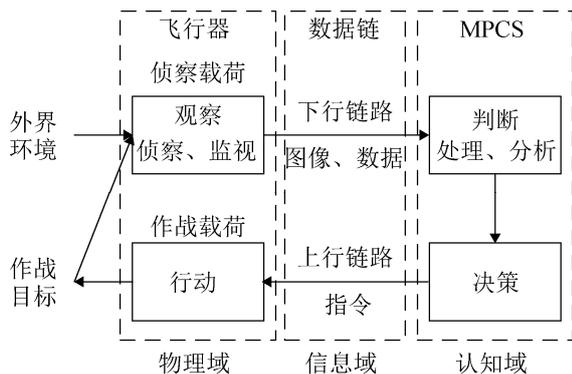


图 2 无人机作战流程示意图
Fig. 2 Operational flow diagram for UAV

2.2 反无人机系统分析

由于反无人机探测与处置技术均无法形成单一手段的解决方案, 因此通用的反无人机系统均采用多源探测、多元处置的复杂组网体系, 并以指挥

控制系统作为战场信息处理与作战过程控制的核心。典型的反无人机组网体系由探测、指挥控制和处置 3 个部分构成, 如图 3 所示。

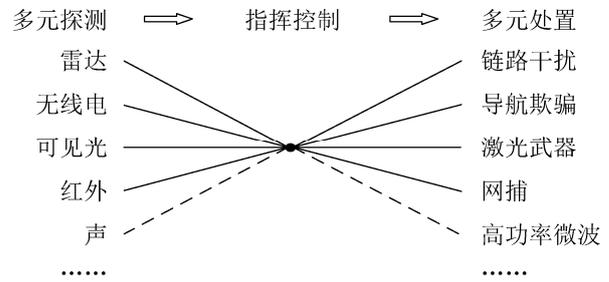


图 3 反无人机组网体系
Fig. 3 Anti-UAV networking system

反无人机作战的一般过程是: 探测系统对无人机目标进行全空域、全维度侦察预警(观察); 指挥控制系统对传感数据进行信息融合和态势判定, 对目标身份进行识别(判断); 根据目标威胁等级, 制定行动决策(决策); 向处置设备下达指令, 执行并完成处置任务(行动), 同时动态掌握战场态势, 进行下一轮任务流程。上述作战过程包含了完整的观察—判断—决策—行动闭环, 因此, 反无人机作战体系同样遵循 OODA 模型, 如图 4 所示。

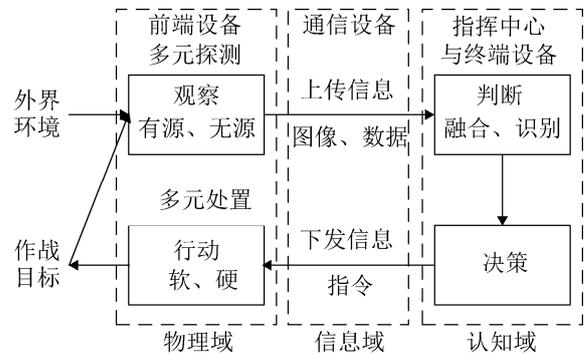


图 4 反无人机作战流程示意图
Fig. 4 Operational flow diagram for anti-UAV

2.3 反无人机 OODA 体系对抗模型

由于无人机及反无人机任务执行过程均遵循 OODA 模型, 因此, 反无人机作战的本质是敌我 OODA 的体系对抗, 如图 5 所示。在 OODA 体系对抗中, 冲突体现在 OODA 环的时间竞争上: 缩短己方的 OODA 周期, 并尽可能增加敌方的 OODA

周期,使己方周期短于敌方周期,从而掌握作战主动权,获取战场优势^[7-8]。基于 OODA 模型的反无人机体系对抗过程为:

(1) 观察:采用多传感器,对无人机目标进行侦察预警,获取战场感知信息;

(2) 判断:指控系统进行信息融合处理,形成战场态势,分析目标威胁;

(3) 决策:根据战场态势和判定信息,形成处

置预案,内容包括:作战计划(优先采用何种处置方式和设备)、组织协同(协同作战的处置方式和设备)、战斗准备(引导处置设备瞄准目标);

(4) 行动:作战单元根据获得的战场信息、战术决策和作战命令执行任务,并进行战况信息反馈;存储作战数据,建立作战数据库,提升系统数据处理、态势分析和辅助决策的精度与能力。

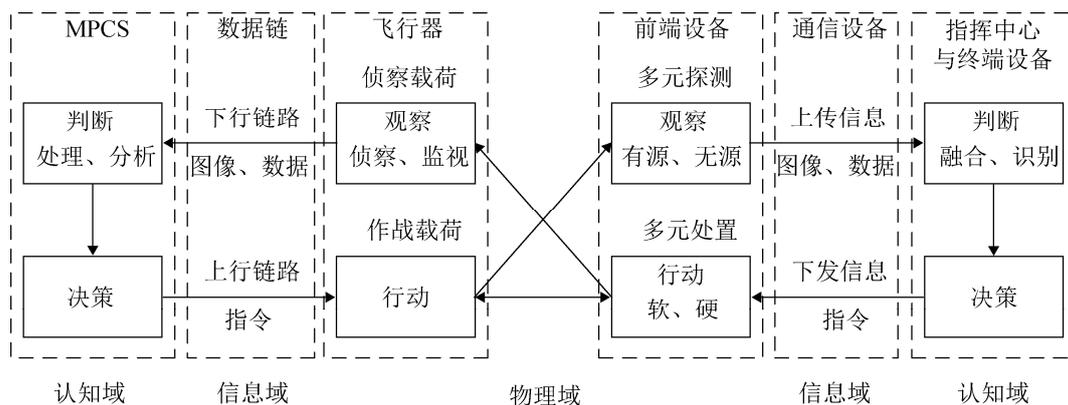


图 5 无人机与反无人机作战的 OODA 体系对抗模型

Fig. 5 System-of-systems combat OODA loop for UAV and anti-UAV

3 基于 NetLogo 平台的反无人机 OODA 对抗仿真

多主体系统建模技术是对“主体”(Agent)个体及其之间的交互等行为进行模拟,通过微观个体获得主体整体作用的涌现性,揭示现实世界复杂系统的宏观行为及规律^[9]。在基于多主体建模技术的仿真平台中,NetLogo 更适用于随时间演化的复杂系统建模^[10]。由于 OODA 环之间的对抗关系集中体现为时间竞争,因此本文基于 NetLogo 平台开展对反无人机 OODA 体系对抗的仿真模拟。

3.1 模型概述

3.1.1 仿真内容

反无人机 OODA 体系对抗模型内容为:无人机(集群)向某防护要地发起攻击,防护要地反无人机系统进行防御。其作战过程为:一定数量的无人机(集群)目标随机分布,并以一定的速度向指控中

心(C2)抵近,对 C2 进行探测、判断、决策和攻击;C2 利用反无人机系统,对无人机目标进行探测、判断、决策和打击。交战过程中,无人机与 C2 的 OODA 环之间形成对抗。

3.1.2 仿真主体及属性

仿真主体分为三大类:战场环境、无人机(集群)和反无人机系统,如图 6 所示。各主体的主要属性如表 1 所示。

3.1.3 仿真主体交互规则

(1) 战场环境设定为理想条件,不与无人机和反无人机主体产生交互,为静态主体;

(2) 无人机、C2、传感器和处置设备主体为动态主体;

(3) 探测规则:当无人机进入传感器主体的探测范围时,各传感器主体以一定的探测概率发现该批无人机目标的入侵;C2 落入无人机探测范围时,无人机以一定的探测概率发现 C2;

(4) 判断规则: 光电探测主体发现无人机后, C2 经过判断响应时间, 完成对无人机身份的判定; 当无人机发现 C2 后, 经过判断响应时间, 完成对 C2 的判定;

(5) 决策规则: 当 C2 完成对无人机的判定后, 经过决策响应时间, 形成对无人机的反制决策; 当无人机完成对 C2 情况的判定后, 经过决策响应时间, 形成对 C2 的攻击决策;

(6) 行动规则: 当 C2 完成对无人机的反制决策后, 无人机进入处置设备主体的打击范围时, 各

处置设备主体以一定的打击概率对该批目标的入侵实施反制; 当无人机完成对 C2 的攻击决策后, C2 落入无人机打击范围时, 无人机以一定的打击概率攻击 C2;

(7) 当无人机个体被任何处置设备主体有效反制后, 该无人机目标主体被“歼灭”, 属性、行为及交互规则清除; 当 C2 被任何无人机个体有效攻击后, C2 主体被“摧毁”, 属性及交互规则清除;

(8) 当所有无人机被“歼灭”, 或 C2 被“摧毁”, 作战仿真结束。

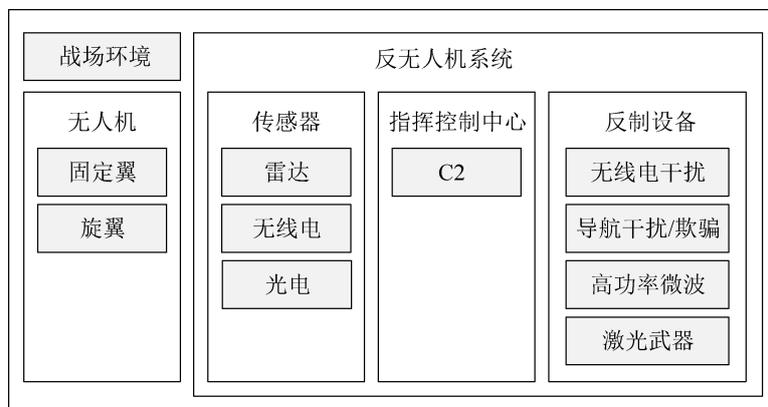


图 6 仿真主体架构

Fig. 6 Simulation framework

表 1 仿真主体、属性、属性参考值及取值范围

Tab. 1 Agent, property, reference value and range of the simulation

主体	固定翼 无人机	旋翼 无人机	雷达	无线电	光电	C2	无线电 干扰	导航干扰/ 欺骗	高功率 微波	激光 武器
数量	25 [0~100]	25 [0~100]	1	1	1	1	1	1	1	1
速度 m/s	30 [0~100]	15 [0~50]	0	0	0	0	0	0	0	0
探测能力/km	5 [0~10]	2 [0~5]	9/6 [0~10]	8/5 [0~10]	7/4 [0~10]					
探测概率/%	50 [0~100]	50 [0~100]	90 [0~100]	50 [0~100]	50 [0~100]					
判断响应/s	25 [0~120]	25 [0~120]				5 [0~120]				
决策响应/s	50 [0~120]	50 [0~120]				10 [0~120]				
打击能力/km	1 [0~10]	0.4 [0~5]					5/3 [0~10]	5/3 [0~10]	3/2 [0~5]	1.5/1 [0~5]
打击概率/%	30 [0~100]	10 [0~100]					50 [0~100]	50 [0~100]	80 [0~100]	80 [0~100]

注: “/”左侧为针对固定翼目标的参数, “/”右侧为针对旋翼目标的参数

3.1.4 模型中的作战评价指标

为从宏观上把握反无人机 OODA 体系对抗的规律, 作战评价指标基于仿真过程中的整体涌现性, 而非各 OODA 环的周期长短与作战结果的简单关联。整体作战过程中, 信息优势体现为掌握目标信息的多少和平均获取时间; 判定效果体现为准确判定目标威胁信息的多少和平均判定时间, 决策优势体现为决策正确率和平均决策响应时间, 行动优势体现为完成有效打击的次数和平均打击时间。由于本模型不设定合法目标, 不区分通用频段、特殊频段及程序、视觉等方式控制飞行的无人机目标, 因此不涉及决策正确率的指标分析。

综上, 本模型中的作战评价指标设计为:

(1) C2 发现的无人机数量 n_{C2-Ob} 及平均时间 t_{C2-Ob} (即 Δt_1);

(2) C2 识别的无人机数量 n_{C2-Or} 及平均时间 t_{C2-Or} (即 $\Delta t_1 + \Delta t_2$);

(3) C2 形成决策的平均时间 t_{C2-De} (即 $\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3$);

(4) C2 有效处置的无人机数量 n_{C2-A} 及平均时间 t_{C2-A} (即 $T_{OODA} = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4$);

(5) 发现 C2 的无人机数量 $n_{U\&D-Ob}$ 及平均时间 $t_{U\&D-Ob}$ (即 Δt_1);

(6) 识别 C2 的无人机数量 $n_{U\&D-Or}$ 及平均时间 $t_{U\&D-Or}$ (即 $\Delta t_1 + \Delta t_2$);

(7) 无人机形成决策的平均时间 $t_{U\&D-De}$ (即 $\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3$);

(8) 攻击 C2 的无人机数量 $n_{U\&D-A}$ 及平均时间 $t_{U\&D-A}$ (即 $T_{OODA} = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4$)。

3.2 仿真建模

3.2.1 仿真策略

NetLogo 平台环境中, 包括两类主体形式, 即静态主体“瓦片”(patches)和动态主体“海龟”(turtles)。其中, 瓦片构成的二维网格坐标系, 海龟可在瓦片构成的背景上移动。反无人机体系对

抗模型中, 战场环境通过瓦片的方式实现, 其他各类动态主体均通过不同类别的海龟实现。

(1) 战场环境空间和时间的仿真策略

设每个瓦片的大小代表真实世界 $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ 的区域范围, 则通过设定 100×100 个瓦片构成的坐标系, 模拟 $20\text{ km} \times 20\text{ km}$ 范围的战场环境。战场环境的中心为坐标系原点(0,0)。

战场环境的时间直接采用 NetLogo 内建的时钟计数 ticks, 一次 tick 设为 1 s 的时间间隔。

(2) 动态主体的仿真策略

通过 breed 声明不同类别海龟的方式定义不同的无人机、传感器、C2 和处置设备等动态主体。无人机主体的初始位置随机分布, 通过 forward 命令实现平移, 步长为 $v/200$ (v 为目标真实速度, m/s)。C2、传感器、处置设备主体位于坐标原点, 仿真过程中不移动。

(3) 动态主体交互行为的仿真策略

动态主体的交互行为可以分为两类: C2 的 OODA 行为以及无人机的 OODA 行为。

C2 的 OODA 交互行为通过无人机目标颜色属性的判断和改变来进行定义。例如, 利用 distancexy 指令计算无人机主体与传感器主体的距离, 当距离小于该传感器的探测能力参数时, 无人机主体的颜色以一定的概率(即传感器的探测概率)发生变化, 由初始色号 105 变为 45, 表明该目标被 C2“发现”, 同时发现无人机目标数量 n_{C2-Ob} 和当前的时钟数进行累加, 用于作战评价指标的统计计算; C2 主体以相似的方式对色号为 45 的无人机目标进行“判定”(如果目标为初始色号 105, 则不进行“判定”), “判定”后目标色号 45 变为 25。C2 对无人机目标的“决策”、“打击”采用同样方法实现。

无人机的 OODA 交互行为则通过无人机目标尺寸大小属性的判断和改变来进行定义, 仿真策略与上述方法相同。

(4) 动态主体被“消灭”的仿真策略

通过执行 die 指令消除该无人机或 C2 的全部

属性和行为, 表明该无人机被“歼灭”或 C2 被“破坏”; 如果全部无人机主体被“歼灭”, 或 C2 主体被“破坏”, 执行 stop 指令结束仿真。

3.2.2 界面功能设计

反无人机体系对抗模型的功能界面由 4 部分组成, 如图 7 所示, 基本功能为:

(1) 属性配置滑块组: 通过拖动滑块, 完成对各主体属性(表 1)的参数配置和更改。

(2) 仿真控制按钮: 用于属性参考值配置(Refe-Param)、主体参数生成(Set)和程序启动/暂停控制(Go)。

(3) 模拟显控界面: 世界面板对仿真过程进行

动态展示, 依时钟间隔实时刷新; 航迹开关控制世界面板中无人机目标飞行航迹的显示/关闭; 无人机数量监视器实时显示仿真中已被发现、但未被处置的无人机数量。

(4) 数据曲线图: 数据统计曲线图对应 6 个数量作战评价指标, 所有数据曲线图以时钟 ticks 为横坐标; 平均时间监视器显示对应的 6 个时间作战评价指标。

3.2.3 仿真程序设计

仿真程序通过 LOGO 编程语言完成。程序结构、设计内容与主要函数如表 2 所示。

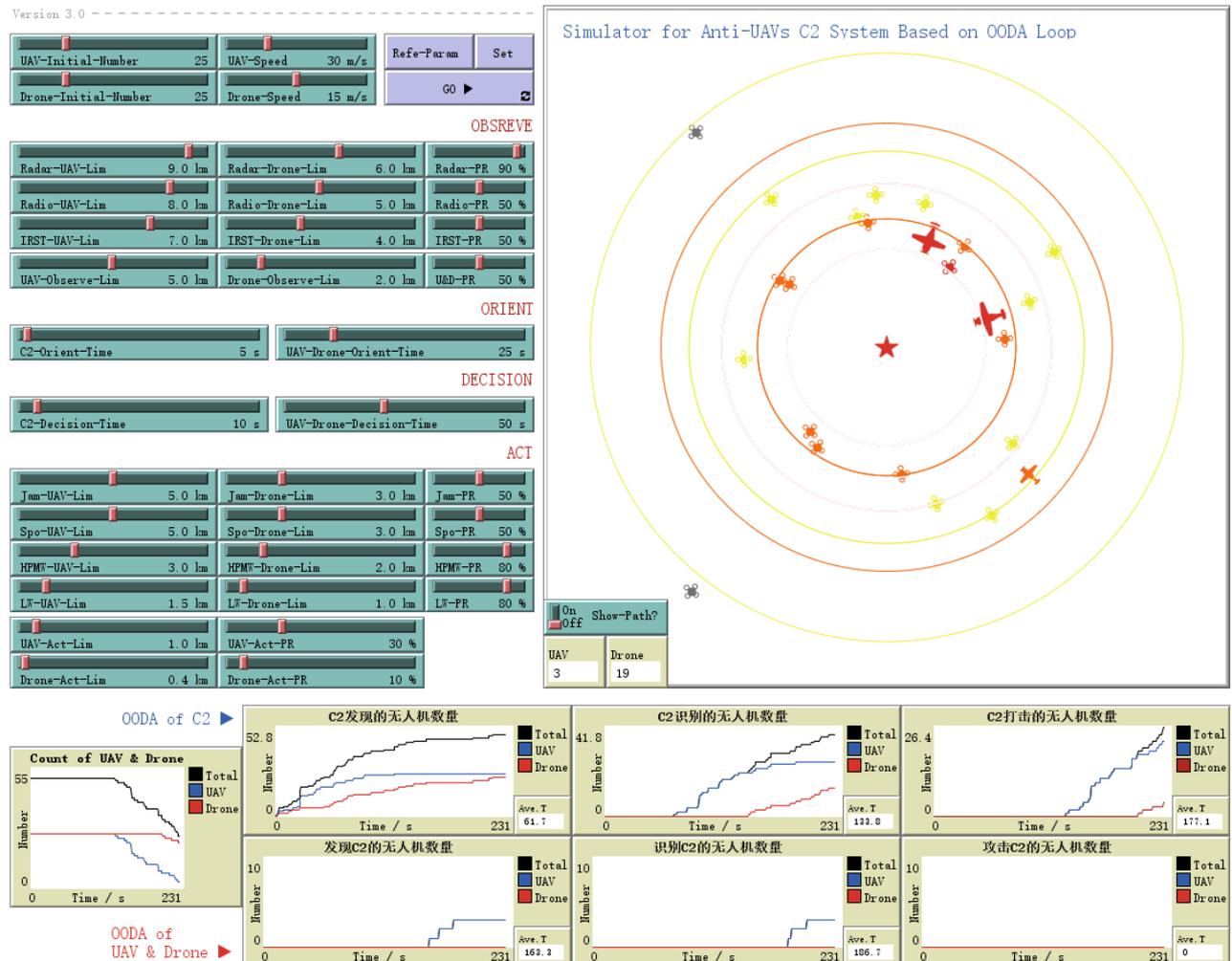


图 7 仿真模型界面
Fig. 7 Simulation model interface

表 2 仿真程序设计
Tab. 2 Design of simulation program

主例程	所属例程	程序功能	使用的主要内嵌函数
全局变量声明		定义全局变量	globals []
主体定义		定义异型主体及内置变量声明	breed [], turtles-own []
默认参数配置		赋予参数配置滑块默认数值	set
	初始化全局变量	赋予全局变量初始值	set
设置	无人机主体设置	生成无人机主体, 定义属性; 生成无人机探测圈、判断圈和攻击圈主体, 定义属性	create-turtles [] ask turtles []
	C2 主体设置	生成 C2 主体, 定义属性; 生成反无人机同主体, 定义属性	create-turtles [] ask turtles []
	战场主体设置	生成战场主体	ask patches []
	仿真结束判断	无人机或 C2 数量为 0 时, 程序停止	if not any? turtles, [stop]
运行	无人机主体运动	定义移动步长和/方向, 航迹开/关	forward, pen-down
	交互	定义交互规则, 同时对作战评价数据进行累计/计算/统计	let X one-of turtles-here with [] if X != nobody [ask turtles []]
	绘制曲线图	绘制作战评价曲线图	set-current-plot " ", plotxy

4 仿真实验

4.1 实验设计

实验参数定义如表 3 所示。实验分为 I, II, III 组。I 组为参考组, 主体参数采用默认参数见表 1。II 组研究 OODA 对反无人机作战效果的影响, 无

人机参数采用默认参数, C2 能力参数适当调整, 见表 4。III 组研究 OODA 对无人机作战效果的影响, C2 参数采用默认参数, 无人机能力参数适当调整, 见表 5。

每组实验进行 15 次仿真, 记录作战评价指标数据的平均值。

表 3 仿真实验数据符号定义

Tab. 3 Symbol definition of the simulation experimental data

数据名称	符号定义
雷达对固定翼/旋翼的探测能力、探测概率	$L_{R-U}/L_{R-D}, P_R$
无线电对固定翼/旋翼的探测能力、探测概率	$L_{RAI-U}/L_{RAI-D}, P_{RAI}$
光电对固定翼/旋翼的探测能力、探测概率	$L_{OE-U}/L_{OE-D}, P_{OE}$
C2 判断响应时间	T_{C2-Or}
C2 决策响应时间	T_{C2-D}
无线电干扰对固定翼/旋翼的干扰能力、干扰概率	$L_{JAM-U}/L_{JAM-D}, P_{JAM}$
导航欺骗对固定翼/旋翼的欺骗能力、欺骗概率	$L_{SPO-U}/L_{SPO-D}, P_{SPO}$
高功率微波对固定翼/旋翼的打击能力、打击概率	$L_{HPM-U}/L_{HPM-D}, P_{HPM}$
激光武器对固定翼/旋翼的打击能力、打击概率	$L_{LW-U}/L_{LW-D}, P_{LW}$
固定翼/旋翼无人机对 C2 的探测能力、探测概率	$L_{U-Ob}/L_{D-Ob}, R_{U\&D-Ob}$
无人机判断响应时间	$T_{U\&D-Or}$
无人机决策响应时间	$T_{U\&D-D}$
固定翼/旋翼无人机对 C2 的打击能力、打击概率	$L_{U-A}/L_{D-A}, R_{U\&D-A}$

表 4 II 组实验 C2 参数配置表
Tab. 4 Parameters configuration table of C2 in Group II

实验组	L_{R-U}	L_{RAI-U}	L_{OE-U}	T_{C2-Or}/s	T_{C2-D}/s	L_{JAM-U}	L_{SPO-U}	L_{HPM-U}	L_{LW-U}
	L_{R-D}/km	L_{RAI-D}/km	L_{OE-D}/km			L_{JAM-D}/km	L_{SPO-D}/km	L_{HPM-D}/km	L_{LW-D}/km
II-1	10	9	8	2	5	6	6	4	2
	7	6	5			4	4	3	1.5
II-2	8	7	6	8	15	4	4	2	1
	5	4	3			2	2	1.5	0.5

表 5 III 组实验无人机参数配置表
Tab. 5 Parameters configuration table of UAV in Group III

实验组	L_{U-Ob}	L_{D-Ob}	$T_{U\&D-Or}$	$T_{U\&D-D}$	L_{U-A}	L_{D-A}
	km	km	s	s	km	km
III-1	6	2.5	15	40	1.5	0.7
III-2	4	1.5	35	60	0.5	0.1

4.2 实验结果与结论

(1) I 组与 II 组对比实验结果见表 6。由表 6 可知: 与参考组 I 组数据对比, II-1 组 C2 的发现、识别和有效打击的无人机目标数量分别增加了 0.1, 0.5 和 1.6 架, 信息获取、完成判断以及完成处置的时间分别提前了 27.1, 33.5 和 30.0 s, 胜率提升 13.3%; II-2 组 C2 的发现、识别和有效打击的无人机目标数量分别减少了 0.7, 3.0 和 3.6 架, 信息获取、完成判断以及完成处置的时间分别延后了 30.1, 18.9 和 13.3 s, 胜率降低 20%。

表 6 I 组与 II-1、II-2 组实验数据
Tab. 6 Experimental data of Group I and Groups II-1/II-2

实验组	n_{C2-Ob}	n_{C2-Or}	n_{C2-A}	t_{C2-Ob}	t_{C2-Or}	t_{C2-A}	C2 胜率/%
				s	s	s	
I	49.8	49	47.4	105.4	206.3	278.6	66.7
II-1	49.9	49.5	49.0	78.3	172.8	248.6	80.0
与 I 的 差值	0.1	0.5	1.6	-27.1	-33.5	-30.0	13.3
II-2	49.1	46.0	43.8	135.5	225.2	291.9	46.7
与 I 的 差值	-0.7	-3.0	-3.6	30.1	18.9	13.3	-20.0

(2) I 组与 III 组对比实验结果见表 7。由表 7 可知: 与参考组 I 组数据对比, III-1 组无人机的发现、识别和有效攻击 C2 的无人机目标数量分别增加了 23.6, 23.5 和 0.2 架, 信息获取、完成判断以及完成攻击的时间分别提前了 22.1, 39.5 和 69.0 s,

胜率提升 20%; III-2 组无人机的发现、识别和有效攻击 C2 的无人机目标数量分别减少了 2.2, 4.5 和 0.1 架, 信息获取、完成判断以及完成攻击的时间分别延后了 27.1, 81.1 和 142.7 s, 胜率降低 6.6%。

表 7 I 组与 III-1、III-2 组实验数据
Tab. 7 Experimental data of Group I and Groups III-1/III-2

实验组	$n_{U\&D-Ob}$	$n_{U\&D-Or}$	$n_{U\&D-A}$	$t_{U\&D-Ob}$	$t_{U\&D-Or}$	$t_{U\&D-A}$	无人 机胜 率/%
				s	s	s	
I	6.5	6.4	0.4	206.5	235.5	455.6	33.3
III-1	30.1	29.9	0.6	184.4	196.0	386.6	53.3
与 I 的 差值	23.6	23.5	0.2	-22.1	-39.5	-69.0	20.0
III-2	4.3	1.9	0.3	233.6	316.6	529.3	26.7
与 I 的 差值	-2.2	-4.5	-0.1	27.1	81.1	142.7	-6.6

仿真实验结果表明, OODA 环对反无人机系统和无人机系统的作战效果产生了重要作用, 验证了反无人机 OODA 体系对抗的作战规律。仿真实验同样反映出无人机作战形成的不对称威胁: 当单个无人机目标的 OODA 处于明显劣势的情况下, 通过集群攻击, 仍然能够对 C2 形成一定的威胁。

5 结论

本文在对不同过程模型进行分析的基础上, 通过无人机系统作战与反无人机系统作战的过程研究, 建立了反无人机的 OODA 体系对抗模型。本文重点基于多主体建模理论, 对建立的反无人机体系对抗模型进行建模, 并通过仿真实验, 从宏观尺度验证了反无人机作战中 OODA 循环对抗的基本规律。

本文通过 NetLogo 可编程建模平台建立的反无人机体系对抗模型仍存在一定的理想化假定,在后续研究工作中有待进一步改进。例如:①当目标与传感器的距离不断减小时,探测概率以一定规律逐渐增加;②增加无人机集群智能行为,例如某无人机发现 C2 目标,立即将信息共享给附近的无人机目标;③建立分布式传感器网络模型,研究分布式、多点位反无人机系统应对无人机集群攻击的能力。

本文建立的模型还可在以下方向开展深入的理论仿真研究:①研究 OODA 不同环节对作战效果的影响程度;②在作战能力不变的条件下,研究反无人机系统最大能够应对的无人机集群规模;③在已知无人机目标作战能力的条件下,分析反无人机系统的优化部署和作战指标分解。

参考文献:

- [1] 祁蒙, 王林, 赵柱, 等. 新型“低慢小”目标探测处置系统的体系建设[J]. 激光与红外, 2019, 49(10): 1155-1158.
Qi Meng, Wang Lin, Zhao Zhu, et al. Advanced Low-slow-small Targets Detection and Disposal System Construction[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(10): 1155-1158.
- [2] 张静, 张科, 王靖宇, 等. 空反无人机技术现状与发展趋势[J]. 航空工程进展, 2018, 9(1): 1-9.
Zhang Jing, Zhang Ke, Wang Jingyu, et al. A Survey on Anti-UAV Technology and its Future Trend[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2018, 9(1): 1-9.
- [3] Azuma R, Daily M, Furmanski C. A Review of Time Critical Decision Making Models and Human Cognitive Processes[C]// 2006 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA: IEEE, 2006.
- [4] 张志鹏, 苏中. 拦截低慢小目标的指控系统建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(11): 4340-4358.
Zhang Zhipeng, Su Zhong. Modeling and Simulation of C2 System for Intercepting LSS Targets[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(11): 4340-4358.
- [5] 孙瑞, 王智学, 姜志平, 等. 外军指挥控制过程模型剖析[J]. 舰船电子工程, 2012, 32(5): 12-42.
Sun Rui, Wang Zhixue, Jiang Zhiping, et al. Analysis of the Foreign Military Command and Control Process Mode[J]. Ship Electronic Engineering, 2012, 32(5): 12-42.
- [6] Silvander J, Angelin L. Introducing Intents to the OODA-loop[J]. Procedia Computer Science (S1877-0509), 2019, 159: 878-883.
- [7] 张明智, 马力, 季明. 网络化体系对抗 OODA 指挥循环时测建模及实验[J]. 指挥与控制学报, 2015, 1(1): 50-55.
Zhang Mingzhi, Ma Li, Ji Ming. Networked System-of-systems Combat OODA Command and Control Time Measuring Modeling and Experiment[J]. Journal of Command and Control, 2015, 1(1): 50-55.
- [8] 张明智, 马力. 体系对抗 OODA 循环鲁棒性建模及仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(9): 1968-1975.
Zhang Mingzhi, Ma Li. System-of-systems Combat OODA Loop Robustness Modeling and Experiment[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(9): 1968-1975.
- [9] 郭勇陈, 沈洋. 中国海上能源通道安全性多主体建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(4): 655-670.
Guo Yongchen, Shen Yang. Multi-Agent Modeling and Simulation on China's Marine Energy Channel Security[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(4): 655-670.
- [10] Railsback S F, N D A, Berger U, et al. Improving Execution Speed of Models Implemented in NetLogo[J]. Journal of Artificial Societies and Social Simulation (S1460-7425), 2017, 20(1): 1-3.