

通信约束下UAV集群协同拦截任务分配算法



卢晓东¹, 王一鸣¹, 王伟²

1. 西北工业大学, 陕西 西安 710072

2. 航空工业自动控制研究所 飞行器控制一体化技术国防科技重点实验室, 陕西 西安 710065

摘要:针对多无人机协同拦截多机动目标的任务分配问题,同时考虑到真实战场环境中存在的通信约束以及探测范围约束条件,本文提出了分步一致性拍卖算法(SCBAA)。首先,对真实战场环境中存在的通信约束以及探测范围约束等问题进行了描述分析,构建了多无人机协同拦截任务分配模型,设计了综合效能函数以及相应约束条件。其次,为解决多无人机协同打击单一目标的不平衡任务分配以及冲突消解问题,将原任务分配过程分为主要任务分配以及次要任务分配两部分,通过多次拍卖以及冲突消解实现多无人机对单一目标的任务分配。仿真结果表明,该算法可有效解决通信约束条件下的分布式多无人机协同拦截问题,并适应动态环境中任务分配对实时性的要求。

关键词:通信约束; 分布式任务分配; 拍卖算法; 实时重分配算法; 无人机集群; 群目标协同拦截

中图分类号: V279

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2024.04.003

随着战场信息化和体系化能力的提升,现代战争呈现出智能化、多样化、高动态、强对抗等特点^[1],作战模式逐渐由单一攻防对抗扩展到集群间的协同对抗和博弈^[2]。其中,无人机集群(UAV Swarm)由于其具有的低成本、高效率、无人员伤亡、操作方便简单、适用范围广、生存能力强等特点^[3],在现代战争中得到了大量应用。目前无人机种类丰富多样,包括察打一体无人机、自杀式无人机以及小型旋翼无人机等;同时,无人机执行的任务也从传统的侦察监视、目标引导等辅助角色,扩展到精确打击、电子干扰、中继通信等多元化作战领域^[4],任务类型不断丰富。然而在真实战场环境中,无人机集群协同作战往往面临着通信受限、目标机动性高、强对抗等诸多挑战^[1]。如何在复杂战场环境中,实现高效任务分配^[5]成为当前无人机集群研究的热点问题。

任务分配根据是否存在中心节点,可分为集中式任务分配和分布式任务分配两种。其中,集中式任务分配^[6-8]依靠中心节点生成任务分配方案,并向集群系统内各节点分发分配结果^[9]。然而,由于存在NP-hard问题,当攻防双

方的规模增加时,集中式任务分配的寻优复杂度会急剧增加^[2]。此外,由于存在中心节点,导致系统抗毁性不足^[9]。

分布式任务分配往往通过集群内个体之间的通信交互、协商等手段解决冲突,以实现群体集体利益最大化^[10]。由于不依赖掌握全局信息的中心节点,因此分布式任务分配成为当前任务分配研究热点。Choi等^[11]首先将拍卖算法和一致性算法相结合,提出了一致性拍卖算法(CBAA)以及一致性包算法(CBBA),保证至少存在50%的最优性;吕晔等^[12]针对异构无人机执行多类型任务时具有的时序约束问题,提出了一种多轮次分布式拍卖算法,可实现异步计算和异步通信,具有较好的求解效率和准确性。曹严等^[13]针对多无人机协同任务分配的时序约束问题,提出了基于非死锁合同网协议的分布式时序任务分配方法,可从理论上避免任务死锁。上述文献均假设无人机本身可与集群内的其他所有无人机进行信息交互,并可实时感知任务区域内所有目标的信息。然而,在真实作战环境中,无人机的通信距离有限,无法实现全局通信。同时,由于通信频率和带宽的限制^[14],无人机无法与相邻无人机建

收稿日期: 2023-09-14; 退修日期: 2024-01-04; 录用日期: 2024-02-05

基金项目: 航空科学基金(20185853040)

引用格式: Lu Xiaodong, Wang Yiming, Wang Wei. Multi-target assignment methods for uav swarm under communication constraints[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(04): 18-24. 卢晓东, 王一鸣, 王伟. 通信约束下UAV集群协同拦截任务分配算法[J]. 航空科学技术, 2024, 35(04): 18-24.

立持续通信。此外,由于战场环境高度对抗,很难在执行任务过程中实时感知全局目标信息^[15]。为解决上述问题,本文在原 CBAA 的基础上提出了分步一致性拍卖算法(SCBAA),可实现在通信约束和探测范围约束条件下的多无人机的局部自主任务分配。本文主要提出了分步一致性拍卖算法 SCBAA,解决了通信约束以及探测约束条件下多无人机对单一目标的不平衡任务分配问题;同时,本文提出了基于交互次数的出价阈值变更机制,保证了在动态环境中仍可获得稳定的任务分配结果,增强了任务分配算法的鲁棒性。

1 问题描述及建模

1.1 问题描述

实际战场环境中,无人机由于探测距离有限,只能获得部分目标信息,此外,由于通信限制,同时考虑到目标信息的实时有效性,无人机无法将感知到的目标信息传递给集群内其他所有无人机。因此,在任务分配初期,无人机只能获得目标群的大致位置信息,无法获知目标群数量以及目标具体机动信息。当目标进入无人机探测范围时,无人机才可以获取目标具体信息,并将其传输给通信范围内的相邻无人机。

为了使信息在无人机之间可控的范围内传播并保证目标信息的实时有效性,本文将通信约束转化为信息传输的跳数(hop)约束^[15]。每个目标信息的传输均存在最大跳数,跳数随着每次信息传输而减少,当跳数为零时,目标信息将无法被转发。可知,在信息传输跳数约束下,可接收目标信息的无人机组成局部通信网络 Q ,目标只能在该局部网络中进行分配优化(见图1)。

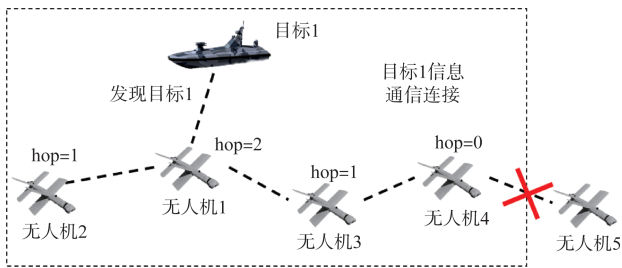


图1 跳数约束下目标信息传输示意图

Fig.1 Target information transmission under hop constraints

1.2 综合效能函数构建

针对具有高动态的多目标任务分配问题,需要根据战场环境进行实时的攻击效能和拦截概率评估。本文综合考

虑攻击优势函数^[2]和拦截效能函数^[16],提出了综合效能函数构建方法。

(1) 攻击优势效能函数构建

攻击优势效能函数是基于当前相对运动信息,对制导难易程度的评价准则。本文中攻击优势函数主要包括视线角速率优势函数、相对距离优势函数以及速度优势函数。

视线角速率优势函数

$$S_{\dot{q}} = e^{-\alpha|\dot{q}|^{\varphi_1} - \beta|\dot{q}|^{\varphi_2}} \quad (1)$$

式中, $\dot{q}$ 为视线角速率; $\alpha, \beta, \varphi_1, \varphi_2$ 为调节参数。

相对距离优势函数

$$S_R = e^{-\frac{|R - R_0|}{R_0}} \quad (2)$$

式中, R 为当前弹目相对距离; R_0 为综合探测能力与机动能力确定的距离参数,其含义为当弹目距离为 R_0 时,距离优势最大。

速度优势函数

$$S_V = e^{-\frac{V_T}{V_M}} \quad (3)$$

式中, V_T 为目标速度大小; V_M 为导弹速度大小。

得到攻击优势函数表达式为

$$S = k_1 S_{\dot{q}} + k_2 S_R + k_3 S_V \quad (4)$$

式中, k_1, k_2, k_3 为各优势函数在综合优势函数中加权系数,可根据当前拦截对象特性进行调节。

(2) 拦截效能函数构建

拦截效能函数是无人机能否对目标进行有效拦截的评价标准。本文在参考文献[16]中拦截效能构造方法的基础上,通过引入修正比例系数 k ,对各无人机的零控脱靶量(ZEM)进行归一化处理,得到拦截效能函数表达式如下

$$p = e^{-\alpha|ZEM_k|^{\varphi_1} - \beta|ZEM_k|^{\varphi_2}} \quad (5)$$

(3) 综合效能函数构建

由于本文中任务分配过程分为主要任务分配及次要任务分配两部分,不同任务分配过程涉及不同的目标价值属性,因此分别给出主要任务分配以及次要任务分配中综合效能函数表达式。其中,主要任务分配中综合效能函数表达式为

$$C_T = \gamma_1 S + \gamma_2 p \cdot Va_T \quad (6)$$

式中, Va_T 为目标真实价值,即目标原本所具有的价值。

次要任务分配中综合效能函数表达式为

$$C_s = \gamma_1 S + \gamma_2 p \cdot Va_s \quad (7)$$

式中, Va_s 为目标剩余价值,其含义为假设存在其他无人机已经竞拍获得该目标,无人机再次竞拍该目标所增加的价值收益。

由于无人机存在通信频率和带宽的限制,无人机之间信息传递存在时间延迟。针对该延迟带来的影响,本文设计了基于信息跳数的出价衰减策略,其表达式如下

$$C = C_T \cdot (e^{\lambda})^{\text{hop}_{\max} - \text{hop}} \quad (8)$$

1.3 约束条件及变量定义

结合综合效能函数,给出本文相关约束条件,并对涉及变量进行定义。

$$(1) \text{任务分配过程中,目标至少被一架无人机探测感知} \quad \sum_{i=1}^{N_m} \text{Sense}_{ij} \geq 1, \forall j \in J \quad (9)$$

(2)每架无人机均要攻击目标,且一架无人机只能攻击一个目标

$$Z_{ij} + z_{ij} = 1, \forall j \in J \quad (10)$$

(3)目标至少由一架无人机攻击,至多由 N 架无人机攻击

$$1 \leq \sum_{i=1}^{N_m} Z_{ij} + z_{ij} \leq N, \forall j \in J \quad (11)$$

(4)所有目标的局部无人机打击群体的联合收益最大

$$\max \sum_{j=1}^{N_t} \sum_{i=1}^{N_m} (Q_{ji} C_{ij} + Q_{ji} c_{ij}), \forall i \in P_j \quad (12)$$

式中, Sense 为感知矢量。

$\text{Sense}_{ik} = 1$ 表示无人机 i 在信息跳数范围内可感知目标 k 信息; Z 为主要获胜者矢量。 $Z_{ik} = m$ 表示无人机 i 认为任务 k 主要获胜者为无人机 m ; Y 为主要获胜者出价矢量。 $Y_{ik} = A$ 表示无人机 i 认为任务 k 主要获胜者出价为 A ; C 为主要任务出价矢量。 $C_{ik} = B$ 表示无人机 i 自身对任务 k 的主要任务出价为 B ; H 为有效主要任务变量。若无人机 i 获得主要任务 k , 则 $H_{ik} = 1$; T 为主要获胜任务出价时间戳矢量。 $T_{ik} = t$ 表示无人机 i 对目标 k 的主要获胜任务出价在时刻 t 更新; S 为交互时间戳矢量。 $S_{im} = t$ 表征无人机 i 和无人机 m 在时刻 t 进行了信息交互; G 为通信矢量。 $g_{im} = 1$ 表示无人机 i 和无人机 m 可进行直接通信。

同理可定义次要任务分配过程变量 z, y, c, h , 在此不再展开论述。

2 分步一致性拍卖算法

分步一致性拍卖算法旨在解决通信约束以及探测范围约束条件下的多无人机对单目标的任务分配以及冲突消解问题,主要包括拍卖环节以及冲突消解环节。

2.1 SCBAA 拍卖环节

SCBAA 第一阶段为拍卖环节。针对动态环境中无人机出价随时间变化问题,为实现最终任务分配结果收敛,本文提出了基于交互次数的出价阈值更新机制,只有前后两

个出价之差满足阈值条件时,主要任务出价 Y 及创建时间 T 才会被更新。基于交互次数的阈值表达式如下

$$\delta(\rho) = e^{\left(\frac{-\omega}{\rho^{\xi}}\right)} \quad (13)$$

式中, $\delta(\rho)$ 表示第 ρ 次交互的出价变更阈值,由式(13)可知,随着交互次数的不断提高,出价变更阈值不断提高,保证了最终可得到稳定的任务分配结果。

针对多无人机对单目标的任务分配问题,本文将任务拍卖阶段分为主要任务拍卖及次要任务拍卖两个部分。其中主要任务拍卖依照目标真实价值 V_{a_T} 进行。无人机首先判断自身是否存在主要获胜任务,若已拥有主要获胜任务,则结合本轮新增感知目标判断是否进行主要任务变更,之后拍卖环节结束;若无主要获胜任务,则进行主要任务出价拍卖,若获得主要任务,则拍卖环节结束。

若无法获得主要任务,则依照目标剩余价值 V_{a_S} 进入次要任务拍卖环节。由综合效能函数构建可知,当主要获胜无人机编号 Z 或主要获胜无人机出价 Y 发生变化时,均会导致目标剩余价值 V_{a_S} 以及出价创建时间 T 发生变化。为保证次要任务出价有效性,次要任务拍卖环节每轮均需重新进行任务拍卖。引入次要任务拍卖环节解决了多智能体对单一目标的任务分配问题。

SCBAA 拍卖算法流程如下:(1)主要出价计算。对于无人机 i 可感知集合 Sense_i 中的任意目标 k , 进行主要任务出价重新计算,得到出价 C_{ik}^* 。(2)基于阈值的主要任务出价更新。若 $|C_{ik}^* - C| > \delta(\rho)$, 满足更新条件,进行主要出价更新, $C = C_{ik}^*, T_{ik} = t$, 转至步骤(3)。(3)判断是否具有主要获胜任务。若 $\sum_k Z_{ik} > 0$, 转至步骤(4), 否则转至步骤(6)。(4)新增目标判断。若 $\sum_k \text{New}_{ik} > 0$, 转至步骤(5), 否则转至步骤(10)。(5)主要任务变更判断。令 $H_{il} = I(C_{il} > Y_{il}, C_{ik} > Y_{ik})$, 其中任意 $l \in \text{New}_i$, 若 $H_{il} = 1$, 满足任务变更条件,进行主要获胜任务变更, $Y_{il} = \arg \max_l C_{il} H_{il}, T_{il} = t$ 。(6)主要任务拍卖。令 $H_{ik} = I(C_{ik} > Y_{ik})$, 若 $H_{ik} = 1$, 则满足主要任务拍卖条件,获得主要任务, $Y_{ik} = \arg \max_k C_{ik} H_{ik}, Z_{ik} = i, T_{ik} = t$ 。(7)次要出价计算。对任意 $k \in \text{Sense}_i$, 进行次要任务出价重新计算,得到出价 c_{ik}^* 。(8)基于阈值的次要任务出价更新。若 $|c_{ik}^* - c| > \delta(\rho)$, 满足更新条件,进行次要任务出价更新, $c = c_{ik}^*$, 转至步骤(9)。(9)次要任务拍卖。令 $h_{ik} = I(c_{ik} > y_{ik})$, 若 $h_{ik} = 1$, 满足主要任务拍卖条件,获得主要任务, $y_{ik} = \arg \max_k c_{ik} h_{ik}, z_{ik} = i$ 。(10)无人机 i 本轮任务拍卖结束,进入下一无人机任务拍卖环节。

重复上述过程,直到所有无人机完成任务拍卖,本轮SCBAA任务拍卖环节结束。

2.2 SCBAA冲突消解环节

SCBAA第二阶段为冲突消解环节,通过引入“主要任务出价创建时间 T ”,将原冲突消解过程分为主要任务冲突消解和次要任务冲突消解两部分。

SCBAA首先进行主要任务冲突消解,主要任务冲突消解遵循CBBA冲突消解规则,即更新、重置和离开。完成主要任务冲突消解后,进入次要任务冲突消解过程。次要任务冲突消解只有在交互双方关于主要获胜者 Z 以及主要获胜出价创建时间 T 达成一致时才会进行,此时双方对于次要任务的出价才有意义。次要任务冲突消解规则同样遵循CBBA的冲突消解规则。

SCBAA冲突消解流程如下:(1)通信连接判断。若 $g_{im} = 1$,无人机 i 和无人机 m 可进行直接的信息交互,转至步骤(2),否则转至步骤(7)。(2)交互信息发送。无人机 i 将信息 $Z_i, Y_i, C_i, T_i, z_i, y_i, c_i$ 发送给无人机 m ,转至步骤(3)。(3)主要获胜者一致性判断。对于无人机 i ,无人机 m 共同可感知目标 k ,若 $Z_{ik} = Z_{mk}$,转至步骤(4),否则转至步骤(5)。(4)主要获胜出价时间一致性判断。若 $T_{ik} = T_{mk}$,则转至步骤(6),否则转至步骤(5)。(5)主要任务冲突消解。依照CBBA冲突消解规则进行,次要冲突消解结果依照主要冲突消解结果进行变更,转至步骤(6)。(6)次要任务冲突消解。主要任务获胜信息不变,次要任务冲突消解依照CBBA冲突消解规则进行,转至步骤(7)。(7)无人机 i 和 m 冲突消解完成,无人机 i 进入下一无人机任务冲突消解。

重复上述环节,直到所有无人机完成任务冲突消解,本轮SCBAA冲突消解环节结束。

3 仿真试验与分析

本节以8架无人机拦截6艘水面机动无人艇的作战场景来验证本文提出的SCBAA算法的有效性,并对仿真结果进行分析。

3.1 仿真初始条件

假设有8架己方拦截无人机和6艘敌方机动无人艇。在感知目标信息之前,无人机平飞,感知目标信息后,采用比例导引。本文无人机性能参数如下:探测范围 $Det_R = 5\text{km}$,通信距离 $Com_R = 2\text{km}$ 。本文算法参数如下: $N_0 = 2$, $\alpha = 0.6$, $\varphi_1 = 0.38$, $\beta = 1.5$, $\varphi_2 = 2$, $k_1 = 0.45$, $k_2 = 0.25$, $k_3 = 0.3$, $\gamma_1 = 0.6$, $\gamma_2 = 0.4$, $\omega = 0.2$, $\xi = 0.1$ 。现给出无人机和目标初始运动信息(见表1、表2)。

表1 无人机初始运动信息

Table 1 Initial motion parameters of the UAV

编号	位置/m	速度/(m/s)	$\theta/(\circ)$	$\varphi_v/(\circ)$
UAV1	(0, 734, 312)	103	0	-90
UAV2	(1304, 708, -98)	109	0	-90
UAV3	(2054, 726, -899)	109	0	-90
UAV4	(2901, 719, -588)	104	0	-90
UAV5	(3504, 719, -1051)	101	0	-90
UAV6	(4703, 722, -274)	107	0	-90
UAV7	(5934, 747, 159.6)	101	0	-90
UAV8	(6577, 725, -372)	106	0	-90

表2 目标初始运动信息

Table 2 Initial motion parameters of the targets

编号	位置/m	速度/(m/s)	$\theta/(\circ)$	$\varphi_v/(\circ)$
UAV1	(1800, 0, 11000)	28	0	90°
UAV2	(4739, 0, 11347)	23	0	90°
UAV3	(6739, 0, 11000)	26	0	90°
UAV4	(8439, 0, 11876)	29	0	90°
UAV5	(10500, 0, 11060)	22	0	90°
UAV6	(12560, 0, 11000)	20	0	90°

3.2 仿真结果及分析

基于上述初始条件对本文所提出的算法进行仿真验证,得到仿真结果,并对仿真结果进行分析。

由仿真结果可知,在2.486s时,UAV1首先探测到目标1,任务分配开始。图2描述了无人机和目标的运动轨迹,其中 $\square$ 代表无人机, $\circ$ 代表目标,即无人艇,由图2可知,所有无人机均实现了对指定目标的打击。

图3描述了无人机群在整个任务分配过程中的总收益变化。由图3可知,在任务分配初期,随着无人机对目标的

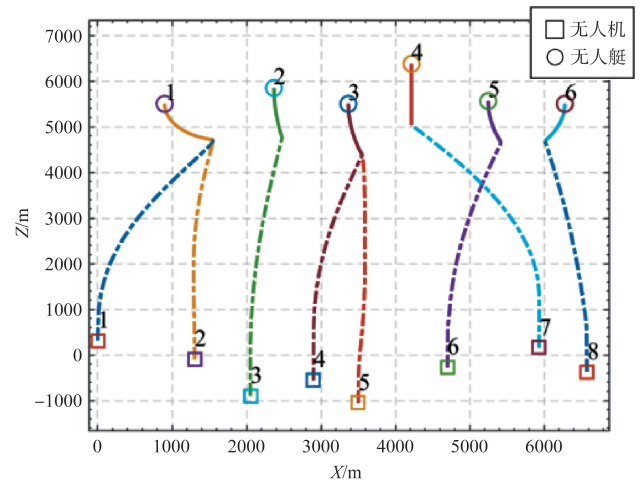


图2 无人机-目标运动轨迹

Fig.2 Motion trajectory of UAV-target

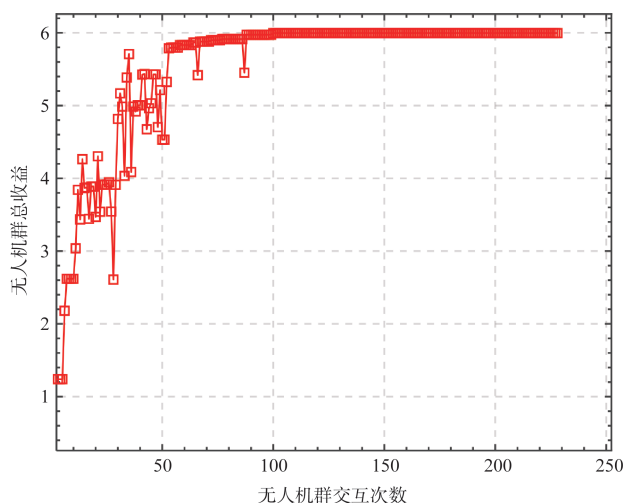


图3 无人机群总收益

Fig.3 Total revenue of UAV swarm

不断探测感知,总收益呈不断上升趋势,过程中出现振荡现象,53次交互后总收益开始稳定。

图4、图5描述了任务分配过程中无人机自身主要任务和次要任务的变更情况。结合图3~图5可知,在任务分配初始阶段,无人机群任务分配结果变更频繁,无法稳定。尤其在次要任务分配方面,如图5所示,UAV1、UAV4、UAV5和UAV8频繁出现次要任务丢失后重新拍卖的情况,这是由于在任务分配初期,交互次数较少,出价更新阈值较低,导致主要获胜任务出价频繁更新,同时该阶段由于不断探测感知到新目标,主要获胜任务结果变更频繁无法稳定。主要任务变更以及出价更新共同导致了目标剩余价值不断更新,次要任务被动进行更新,任务分配结果无法稳定,同时也导致图4中无人机集群总收益出现振荡现象。

随着无人机群对目标的探测感知不断完善、交互次数不断增加、出价变更阈值不断提高,当任务分配进入后期,出价变更阈值达到一定值时,无人机出价不再发生变化,任务分配结果以及总收益达到稳定。由图3~图5可知,经过100轮交互后,无人机群任务分配结果不再发生变化,总收益稳定,保证了无人机最终可命中各自目标。

4 结论

本文针对真实战场环境中存在的高动态、通信约束和探测范围约束等实际问题,提出了分步一致性拍卖算法。首先,将任务分配分为主要任务分配和次要任务分配,实现了多无人机对单目标的任务分配以及冲突消解。之后,引入了基于交互轮数的出价阈值变更机制,以确保即使在动

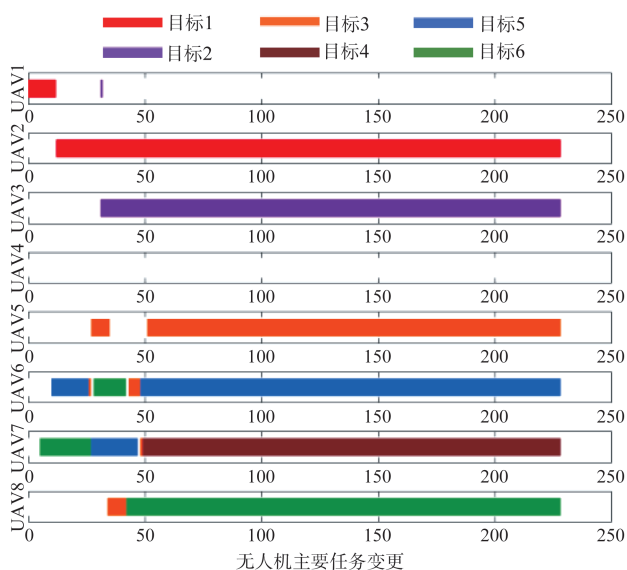


图4 主要任务分配结果

Fig.4 Primary task assignment results

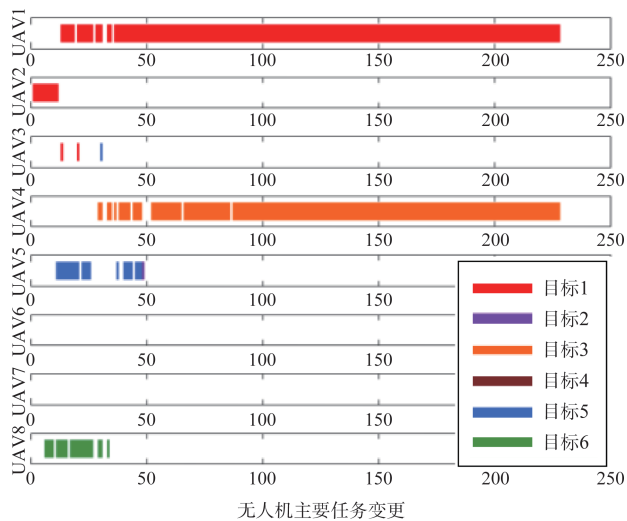


图5 次要任务分配结果

Fig.5 Secondary task assignment results

态环境中也能获得稳定的任务分配结果。通过仿真试验证明了该算法的有效性。

分步一致性拍卖算法仍然面临次要任务分配过程收敛速度慢、任务分配过程中结果不稳定等问题。后续将进一步研究如何提高任务分配的收敛速度,并提高在动态环境中任务分配结果的鲁棒性。

AST

参考文献

- [1] 魏明英,崔正达,李运迁.多弹协同拦截综述与展望[J].航空学报,2020,41(S1): 29-36.

- Wei Mingying, Cui Zhengda, Li Yunqian. Review and future development of multi-missile coordinated interception[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(S1): 29-36. (in Chinese)
- [2] 朱建文, 赵长见, 李小平, 等. 基于强化学习的集群多目标分配与智能决策方法[J]. *兵工学报*, 2021, 42(9): 2040-2048.
- Zhu Jianwen, Zhao Changjian, Li Xiaoping, et al. Multi-target assignment and intelligent decision based on reinforcement learning[J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(9): 2040-2048. (in Chinese)
- [3] 高瑁, 张磊, 胡高歌, 等. 基于平面约束人工势场无人机航迹规划算法[J]. *航空科学技术*, 2023, 34(8): 68-76.
- Gao Xun, Zhang Lei, Hu Gaoge, et al. UAV path planning method based on plane-constrained artificial potential field [J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2023, 34(8): 68-76. (in Chinese)
- [4] 金源, 许吉斌, 展勇忠, 等. 无人机蜂群作战及反制策略研究[J]. *战术导弹技术*, 2023(3): 149-157.
- Jin Yuan, Xu Jibin, Zhan Yongzhong, et al. Research on UAV swarm combat and countermeasure strategy[J]. *Tactical Missile Technology*, 2023(3): 149-157. (in Chinese)
- [5] 毕文豪, 张梦琦, 高飞, 等. 无人机集群任务分配技术研究综述[J]. *系统工程与电子技术*, 2024(3): 158-170.
- Bi Wenhao, Zhang Mengqi, Gao Fei, et al. Review on UAV swarm task allocation technology[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2024(3): 158-170. (in Chinese)
- [6] Deng Guochen, Li Meng, Wang Yan, et al. Multi-UGV cooperative task allocation base on ant colony optimization[C]. 2022 IEEE 10th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC), 2022.
- [7] 马也, 范文慧, 常天庆. 基于智能算法的无人集群防御作战方案优化方法[J]. *兵工学报*, 2022, 43(6): 1415-1425.
- Ma Ye, Fan Wenhui, Chang Tianqing. Optimization method of unmanned swarm defensive combat scheme based on intelligent algorithm[J]. *Acta Armamentarii*, 2022, 43(6): 1415-1425. (in Chinese)
- [8] 胡月, 丁萌, 姜欣言, 等. 一种面向有人/无人直升机协同打击的地面目标任务分配方法[J]. *航空科学技术*, 2019, 30(10): 64-69.
- Hu Yue, Ding Meng, Jiang Xinyan, et al. Ground target assignment of manned/unmanned helicopters for coordinated attack[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2019, 30(10): 64-69. (in Chinese)
- [9] 曹严, 龙腾, 孙景亮, 等. 信息重传与丢包补偿的多无人机分布式任务分配方法[J]. *兵工学报*, 2023, 44(9): 2697-2708.
- Cao Yan, Long Teng, Sun Jingliang, et al. Distributed task allocation algorithm for multiple unmanned aerial vehicle based on information retransmission and package loss compensation[J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44(9): 2697-2708. (in Chinese)
- [10] 翟政, 何明, 徐鹏, 等. 基于市场机制的无人集群任务分配研究综述[J]. *计算机应用研究*, 2023, 40(7): 1921-1928.
- Zhai Zheng, He Ming, Xu Peng, et al. Research review of task allocation for unmanned swarm based on market mechanism [J]. *Application Research of Computers*, 2023, 40(7): 1921-1928. (in Chinese)
- [11] Choi H L, Brunet L, Jonathan P H. Consensus-based decentralized auctions for robust task allocation[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2009, 25(4): 912-926.
- [12] 吕晔, 周锐, 李兴, 等. 基于多轮次分布式拍卖的异构多任务分配算法[J/OL]. *北京航空航天大学学报*. Doi: 10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0156.
- Lyu Ye, Zhou Rui, Li Xing, et al. Multi-task assignment algorithm based on multi-round distributed auction[J/OL]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*. Doi: 10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0156. (in Chinese)
- [13] 曹严, 龙腾, 孙景亮, 等. 非死锁合同网协议驱动的多机分布式时序任务分配[J]. *宇航学报*, 2022, 43(5): 675-684.
- Cao Yan, Long Teng, Sun Jingliang, et al. Multi UAV distributed task allocation with precedence constraints driven by deadlock free contract net protocol[J]. *Journal of Astronautics*, 2022, 43(5): 675-684. (in Chinese)
- [14] 唐苏妍, 朱一凡, 李群, 等. 多Agent系统任务分配方法综述[J]. *系统工程与电子技术*, 2010, 32(10): 2155-2161.
- Tang Suyan, Zhu Yifan, Li Qun, et al. Survey of task allocation in multi agent systems[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(10): 2155-2161. (in Chinese)
- [15] 陈璞, 严飞, 刘钊, 等. 通信约束下异构多无人机任务分配方法[J]. *航空学报*, 2021, 42(8): 313-326.
- Chen Pu, Yan Fei, Liu Zhao, et al. Communication-constrained task allocation of heterogeneous UAVs[J]. *Acta Aeronautica et*

Astronautica Sinica, 2021, 42(8): 313-326. (in Chinese)

- [16] 皇甫逸伦, 凡永华, 李辰璐, 等. 基于综合拦截效能的集群导弹目标分配方法[C]. 第37届中国自动化学会青年学术年会(YAC2022), 2022.

Huangfu Yilun, Fan Yonghua, Li Chenlu, et al. Missile-target assignment based on comprehensive interception effectiveness [C]. 37th Youth Academic Conference of the Chinese Automation Society (YAC2022), 2022. (in Chinese)

Multi-target Assignment Methods for UAV Swarm under Communication Constraints

Lu Xiaodong¹, Wang Yiming¹, Wang Wei²

1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

2. National Key Laboratory of Science and Technology on Aircraft Control, AVIC Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China

Abstract: Considering the constraints of communication range and detection scope in the UAV swarm, this paper proposed the Stepwise Consensus-Based Auction Algorithm (SCBAA) to address the problem of multi-UAV cooperative interception of maneuvering targets. Firstly, the issues caused by the limited communication and detection range between the UAVs in the real battlefield environment are described and analyzed. Then, a localized task assignment model considering the communication constraints is proposed with a comprehensive utility function along with multi-task assignment constraints. Furthermore, to resolve the assignment conflicts of multi-UAVs targeting multi-target, the task assignment processes are divided into the primary and secondary stages, which could achieve the conflict-free assignment by applying a new consensus interaction variable that called the primary task bid creation with time variable. Finally, the mathematical simulation results demonstrated that the proposed algorithm can achieved tasking and coordinated strikes against multiple maneuvering targets even with the constraints of communication and detection range.

Key Words: communication constraints; distributed task assignment; auction algorithm; real-time reallocation algorithm; UAV swarm; multi target cooperative interception

Received: 2023-09-14; Revised: 2024-01-04; Accepted: 2024-02-05

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(20185853040)