

基于分布式并行协商机制的无人机蜂群在线协同任务分配方法

朱宇涛¹, 陈 东¹, 范国梁², 祖 伟²

(1. 中国人民解放军 93114 部队, 北京 100095; 2. 中国科学院自动化研究所, 北京 100190)

摘 要: 无人机蜂群是现代化国际军事发展的主要方向之一。针对无人机蜂群在线协同任务分配这一复杂的多约束组合优化问题, 提出了一种基于分布式并行协商机制的在线协同任务分配方法, 采用多 Agent 并行协商机制, 各无人机根据自身性能和任务属性对待分配任务集合进行自主选择和决策, 无人机蜂群之间以较少能耗、合理行为时间窗及最大化任务收益在线协商任务及目标分配候选解。理论分析和实验结果均表明该方法对于多约束条件下的任务分配问题具有快速收敛性, 计算复杂度低, 能够快速准确地实现无人机蜂群在线协同任务分配。

关键词: 无人机蜂群; 协同; 任务分配; 协商机制

AOnline Coordination Task Assignment Method of UAV Swarm Based on Distributed Parallel Consultative Mechanism

ZHU Yu-tao¹, CHEN Dong¹, FAN Guo-liang², ZU Wei²

(1. 93114 PLA, Beijing 100095; 2. Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract: UAV swarms are one of the main directions in the modern worldwide military development. Aiming at the on-line collaborative task allocation of UAV swarms which is a complex multi-constraint combinatorial optimization problem, an online coordination task allocation method based on distributed parallel consultative mechanism is proposed. The multi-agent parallel consultative mechanism is adopted, and each UAV can choose and make decisions independently according to its own performance and task attributes. In order to reduce energy consumption, reasonable behavior time window and maximize task revenue, the UAV swarm can negotiate tasks and target assignment candidate solutions online. Theoretical analysis and experimental results show that the method has fast convergence and low computational complexity for the task allocation problem under multi-constraint conditions, and can quickly and accurately realize the on-line collaborative task allocation of UAV swarms.

Keywords: UAV swarm; Coordination; Task Assignment; Consultative Mechanism

0 引言

无人机“蜂群”是指将大量无人系统基于开放式体系架构进行综合集成, 以通信网络信息为中心, 以系统的群智涌现为核心, 以平台间协同交互为基础, 以单节点作战能力为支撑, 构建的具有抗毁性、低成本、功能分布等优势的智能作战体系^[1,2]。

无人机“蜂群”作战系统可填补战术与战略之间的空白, 以多元化投送方式快速投送到目标区域

遂行多样化军事任务, 包括与其他武器平台协同攻击海上、空中、地面目标及 ISR 等, 实现对热点地区战略威慑、战役对抗、战术行动等^[3,4] (图 1)。

在线协同任务分配技术是无人机“蜂群”指挥控制的核心技术之一, 是为了实现预期的作战目标, 在满足各项战技指标的前提下为参战的各无人机分配任务的过程, 即确定由哪架无人机在何时执行哪个或哪些任务。当作战过程中出现新任务时, 动态任务分配将新任务快速分配给“蜂群”内的无人机, 并在态势发生变化时对当前任务分配结果进行

作者简介: 朱宇涛 (1980—), 男, 汉族, 湖北襄阳人, 工程师, 博士, 主要研究领域为遥感信息处理、航空侦察、空降和特种侦察等, 邮箱: zhu_yu_tao@126.com。

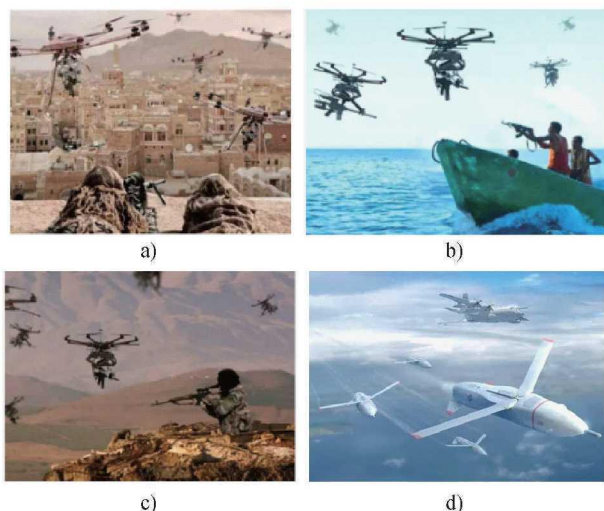


图1 无人机蜂群的典型应用模式

a) 协助狙击; b) 反海盗; c) 反恐; d) 突袭

相应调整,以保证无人机完成任务的收益最大^[5-8]。

无人机“蜂群”在线协同任务分配技术包含任务分配问题建模和任务分配问题求解两大部分。本文提出了一种基于分布式并行协商机制的在线协同任务分配方法,能够快速准确地完成任务分配。

1 无人机蜂群在线任务分配建模

以无人机蜂群典型防空压制任务为例,假设已明确作战区域和目标群,需要无人机蜂群针对目标群执行侦察、打击、毁伤评估等各类任务。无人机执行不同任务间可能需要满足特定时序约束且无人机执行每个任务也需要满足一定时间窗要求。首先定义任务集合 $T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$, 其中每个任务属性包含目标标识、目标位置、时间窗、任务类型等信息,描述如下:

$$T_j = \langle P_{d,T}^j, T_{type}^j, V_{alue}^j, t_{start}^j, t_{end}^j, D_{uration}^j, x_T^j, y_T^j, z_T^j \rangle \quad (1)$$

式中, $P_{d,T}^j \in (1, 2, \dots, M)$ 为任务标识; $T_{type}^j \in (3A, S, C)$ 为任务所需的无人机作战平台类型 (A 侦察, S 打击, C, 评估); $V_{alue}^j > 0$ 为执行该任务的收益, $[t_{start}^j, t_{end}^j]$ 为任务的最早、最晚开始执行时间, 无人机过早或过晚到达目标点位置都无法执行该任务, $[x_T^j, y_T^j, z_T^j]$ 为任务目标的地理坐标。

无人机某一时刻只能执行一项任务, 同一时刻对指定目标仅能执行一个任务, 每个无人机 V_i (集群规模数目 N 个无人机成员) 可描述为:

$$V_i = \langle I_{d,u}^i, T_{type}^i, V_{elocity}^i, F_{uel}^i, x_{ut}^i, y_{ut}^i, z_{ut}^i \rangle \quad (2)$$

式中, $I_{d,u}^i \in (1, 2, \dots, N)$ 为任务标识, $T_{type}^i \in (A, S, C)$ 为无人机作战平台类型, $V_{elocity}^i$ 为无人

机正常巡弋速度, F_{uel}^i 为该无人机单位航程内的燃油惩罚, $[x_{ut}^i, y_{ut}^i, z_{ut}^i]$ 为无人机 t 时刻的地理位置坐标。

无人机“蜂群”的目标分配模型参数包括目标集合、UAV 平台、任务集合以及战场环境信息等, 模型输出为各 UAV 平台的任务计划, 即各 UAV 的活动序列。设无人机 V_i 分配到的任务为包含 n_i 个任务的集合 S_i , S_i 为总任务集合 T 的子集, S_i 中包含了 V_i 将要执行的目标任务及相应的执行顺序。

$$S_i = \{s_1^i, s_2^i, \dots, s_{n_i}^i\} \quad (3)$$

$$s_k^i = \{T_k^i, t_{k_start}^i, t_{k_end}^i, v_{k_award}^i\}, 1 \leq k \leq n_i \quad (4)$$

式中, s_k^i 为无人机 V_i 对其任务序列中的第 k 个任务的具体执行信息; T_k^i 包含该任务的标识及原始约束; $(t_{k_start}^i, t_{k_end}^i)$ 为该任务的具体开始、结束执行时间, $v_{k_award}^i$ 为考虑了原始任务价值及 V_i 执行该任务的动力消耗和任务时间窗契合程度后的收益。

设有无人机蜂群 (N 架) 执行 M 个散布在不同地理位置的目标任务, 考虑航程距离短, 任务执行时间窗最适合, 并且无人机能力与任务类型契合, 给出目标函数如下式所示:

$$\max(f(x))$$

$$= \max \left[\sum_{u=1}^N \left(\sum_{j=1}^{l_u} \sum_{i=1}^M (v(i)Et(u,ij) - d(u,ij)w_u)x(u,ij) \right) \right] \quad (5)$$

其中, n 为参与任务分配的无人机数; m 为待分配任务数; l_u 为无人机 u 的任务序列长度。第一项代表执行任务收益, ∞ 为任务 i 的价值, a_0, a_1, \dots, a_{n-1} 值越大, 表示该目标任务越重要; $f(x) = a_0 \sin(w_0 x) + a_1 \sin(w_1 x) + \dots + a_{n-1} \sin(w_{n-1} x)$ 表示无人机 u 执行其任务序列中第 j 个任务的时间收益; 第二项代表航程代价, $d(u, ij)$ 为航路长度, w_u 为燃油惩罚因数。 $x(u, ij)$ 为决策变量, 决定无人机和任务之间的对应关系, 因此有:

$$x(u, ij) = \begin{cases} 1, & \text{任务 } i \text{ 在 } u \text{ 任务序列的第 } j \text{ 个位置被执行} \\ 0, & \text{任务 } i \text{ 不在 } u \text{ 任务序列的第 } j \text{ 个位置} \end{cases} \quad (6)$$

由以上模型定义, 任务规划问题的约束条件可以表示为:

$$\sum_{j=1}^{l_u} \sum_{i=1}^M x(u, ij) \leq M \quad (7)$$

$$\sum_{u=1}^N \sum_{j=1}^{l_u} x(u, ij) \leq 1 \quad (8)$$

$$t_{imin} \leq t_u(i, j) \leq t_{imax} \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{l_u} d(u, ij) \leq D_{max} \quad (10)$$

式中, 式 (7) 表示无人机 u 的任务序列总长度不超过待分配任务总数; 式 (8) 表示一个待分配任务只能分配给一个无人机, 任务不能被重复分配; 式 (9) 表示任务 i 被执行的时间在该任务规定的时间窗范围内; 式 (10) 表示无人机 u 的航程不能超过其最大航程约束。

2 基于分布式并行协商机制的在线任务分配方法

分布式并行协商机制是求解多自主体/智能体共同完成任务或达到群体优化目标、实现整体资源合理利用的一种求解机制。近年来国内外大力开展了基于竞拍协商的多智能体任务分配方法的研究, 并取得了良好的效果^[9-11]。本文借鉴分布式并行协商机制的快速整体寻优特点, 在无人机编队目标分配问题模型基础上, 提出一种蜂群在线任务分配方法。

基于分布式并行协商机制的在线协同任务分配方法主要包括两个部分: 单 Agent 任务序列构建和多 Agent 任务分配一致性协商。首先每个无人机 Agent 公布所有待分配任务目标信息, 蜂群中各 Agent 根据本身已有任务序列, 对新任务进行评估, 选择合适的任务, 并公布任务的收益, 完成单 Agent 任务束构建; 所有的 Agent 任务序列构建或解算时间阈值达到后, 每个 Agent 根据其他 Agent 公布的任务序列及收益对目前任务分配集合进行协商比较, 分配原则是任务及目标分配给满足时间窗约束且收益最大的 Agent。通过多轮协商后, Agent 群体通过比较发现任务分配结果一致, 结束协商分配 (图 2)。

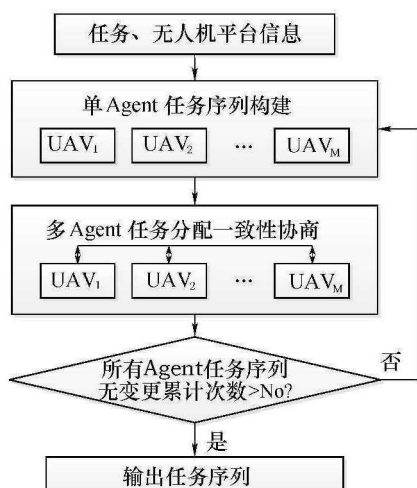


图2 无人机蜂群协同任务分配流程

在任务分配求解过程中, 每个无人机平台携带

的主要信息如下:

(1) $P_u = \{p_{u1}, p_{u2}, \dots, p_{ul_u}\}$: 无人机平台 V_u 的有序任务路径, 它不仅表示了 V_u 分配到的任务, 而且确定了任务的执行顺序, 其中 $p_{uj} \in \{1, 2, \dots, M\}$, $1 \leq j \leq l_u$;

(2) $Time_u = \{t_{u1}, t_{u2}, \dots, t_{ul_u}\}$: 无人机平台 V_u 到达其任务序列中各任务目标点的具体时间;

(3) $Winner_u = \{w_{u1}, w_{u2}, \dots, w_{uM}\}$: 无人机平台 V_u 关于任务 $i (1 \leq i \leq M)$ 分配情况的记录, 其中 $w_{u1} \in \{1, 2, \dots, N\} \cup \emptyset$;

(4) $Winbid_u = \{b_{u1}, b_{u2}, \dots, b_{uM}\}$: 与 $Winner_u$ 中各元素对应的任务收益, 其中 $b_{uj} \in [0, \infty)$ 。

2.1 单 Agent 任务序列构建

在每个目标分配决策周期开始, “蜂群”中的无人机 Agent 根据任务信息和本身能力属性构建初始可行的任务束, 算法过程下 (图 3):

Step1: 定义待评估任务为 T_i , $T_i \in \{T_1, T_2, \dots, T_M\}$, 插入任务序列的位置为 po , $po \in [0, l_u]$, $po=0$ 表示将任务 T_i 插入到 V_u 已有任务序列的第一个任务之前, $po=l_u$ 表示将任务 T_i 插入到 V_u 已有任务序列的最后一个任务之后; 从任务序列的第一个任务开始, 即 $T_i=T_1$ 。

Step2: 判断 V_u 平台类型是否满足任务 T_i 的任务类型要求, 若是, 继续, 若否, 转 Step11。

Step3: 判断任务 T_i 是否已经在 V_u 已有任务序列 P_u 中, 若否, 继续, 若是, 转 Step11。

Step4: 从 V_u 已有任务序列的第一个任务之前位置开始, 即 $po=0$ 。

Step5: 计算将任务 T_i 插入到 V_u 任务序列 P_u 的第 po 个位置处时, V_u 到达任务目标点的时间 $t_u(i, po)$ 。

Step6: 根据 $t_u(i, po)$ 和任务执行时间窗 $[t_{imin}, t_{imax}]$ 求解 V_u 最早、最晚开始执行 T_i 的时间 $minStart$, $maxStart$; 计算将任务 T_i 插入到 V_u 任务序列 P_u 的第 po 个位置处时的收益 $Score_u(i, po)$ 。

Step7: 若出现 $minStart > maxStart$, 则将 $Score_u(i, po)$ 置零, 且将插入点移到下一个位置, $po=po+1$ 。

Step8: 判断插入点是否越界, 即 $po > l_u$ 是否成立, 若成立, 继续, 否则, 转 Step4。

Step9: 选择任务 T_i 在 P_u 中的最佳插入位置, 即求所有插入位置收益的最大值 $\max\{Score_u(i, po), po \in [0, l_u]\}$, 记录此最大值及插入位置点 $Score_u(i, po_i^*)$ 。

Step10: 将 $Score_u(i, po_i^*)$ 与 $Winbid_u$ 中关于任务 T_i 的历史最佳收益 b_{ui} 相比较, 若 $Score_u(i, po_i^*) < b_{ui}$ 则将收益置零; 将待评估任务后移, 即 $T_i = T_i + 1$ 。

Step11: 判断任务 T_i 是否超出任务序列, 即 $T_i > T_M$ 是否成立, 若不成立, 转 Step3, 若成立, 继续。

Step12: 在收益 $Score_u(i, po_i^*)$ 高于 b_{ui} 的任务中选择收益值最大的任务 T_i , 若最大值为零, 则转 Step18, 否则, 将任务 T_i 插入到 P_u 的第 $po_i^* + 1$ 个位置处, 并修改 $Time_u$ 、 $Winner_u$ 和 $Winbid_u$ 中的相应值, P_u 的序列长度加 1。

Step13: 判断 P_u 的序列长度的序列长度是否达到最大值, 若否转 Step2, 否则 V_u 的任务序列构建结束, 保存对序列所做的修改。

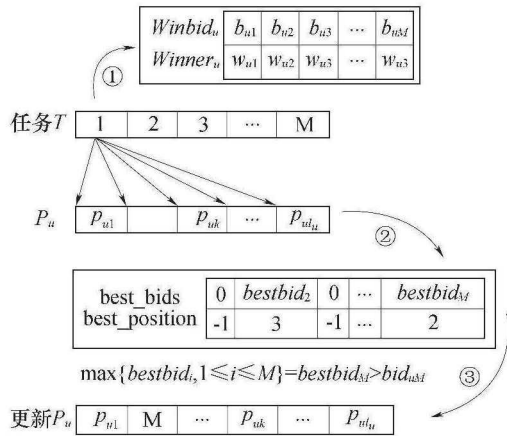


图3 单 Agent 任务序列构建过程

为了满足新任务插入任务序列中不能影响原有任务执行, 给出以下公式:

$$\min Start = \max(t_{imin}, t_{TPrev} + duration_{TPrev} + t_{cost}) \quad (11)$$

$$\max Start = \min(t_{imax}, t_{TNext} - duration_{T_i} - t_{cost}) \quad (12)$$

式 (11) 表明若飞行器到达 T_i 的时间较早, 即执行任务的时间有冗余, 则可以通过降速或盘旋等方式等待, 其最早开始执行时间不会早于任务规定的时间。其中, t_{imin} 为 T_i 任务规定的最早开始时间, $t_{TPrev} + duration_{TPrev} + t_{cost}$ 为前一个任务的开始执行时间、持续时间和与由前一个任务到任务 T_i 位置处所花费的时间之和, V_u 执行 T_i 的最早开始时间为两者中的最大值。式 (12) 表明若飞行器结束执行 T_i 的时间较早, 即执行下一个任务的时间有冗余, 则可以通过降速或盘旋等方式等待, 其最晚开始执行时间不会晚于任务规定的时间, 其中 t_{imax} 为 T_i 任务规定的最晚开始时间, $t_{TNext} - duration_{T_i} - t_{cost}$ 为后一个任务的开始执行时间与 T_i 的持续时间及 T_i 到达后一个任务目标位置处所花费的时间之差, V_u 执行 T_i 的最晚

开始时间为两者中的最小值。收益计算公式如 (13) 所示:

$$Score_u(i, po) = \lambda_1^{\max[0, t_u(i, po) - t_{imin}]} \cdot V_{alue}^i + \lambda_2^{w_u \cdot d_u(i, po)} \cdot V_{alue}^u \quad (13)$$

式 (13) 中, $\lambda_1 (0 \leq \lambda_1 \leq 1)$ 是对过晚到达任务目标点的惩罚因子; $\lambda_2 (0 \leq \lambda_2 \leq 1)$ 是对花费航程过多的惩罚因子; $d_u(i, po)$ 表示 V_u 为执行 T_i 花费的航程; w_u 为燃油惩罚; V_{alue}^u 为飞行器执行任务的奖励, 其值为常量。

2.2 多 Agent 任务分配一致性协商

当蜂群中全部 Agent 完成任务序列构建后, 所有无人机 Agent 对已有的任务分配结果进行比较协商, 过程如图 4 所示, 算法如下:

Step1: 从第一个 Agent 开始主持协商, 即 $host = 1$;

Step2: 除主持协商的 Agent 外其余 Agent 依次作为 guest 参与协商, 令 $guest = 1$;

Step3: 如果 $guest \neq host$, 继续, 否则转 Step8;

Step4: 从第一个任务的分配结果开始对比, 令 $m = 1$;

Step5: 根据 $winner_{host}$ 、 $winner_{guest}$ 、 $winbid_{host}$ 、 $winbid_{guest}$ 和 $ts_{N \times N}$ 对任务分配情况进行协商;

Step6: 两个 Agent 完成对任务 m 的协商后, 更新交流次数矩阵, $ts(host, guest) = ts(host, guest) + 1$, 移向下一个任务, $m = m + 1$;

Step7: 判断是否超出任务序列长度, 即若 $m > M$ 成立, 继续, 否则转 Step5;

Step8: 参与协商 guest 转向下一个 Agent, $guest = guest + 1$;

Step9: 判断 $guest > N$ 是否成立, 若成立, 继续, 否则, 转 Step3;

Step10: 主持协商的 Agent 下移, $host = host + 1$;

Step11: 若 $host > N$ 成立, 继续, 否则, 转 Step2;

Step12: 结束。

2.3 通信受限情况下的中继任务点生成方法

无人机还需要将保持通信连接加入任务分配的约束条件, 进行网络化通信范围约束下的协同任务分配研究^[12-14]。

通过上述过程得到无人机蜂群任务的初始分配后, 还需要对任务执行时刻的通信网络连接情况进行预测。在对网络连接情况进行预测时, 只考虑与

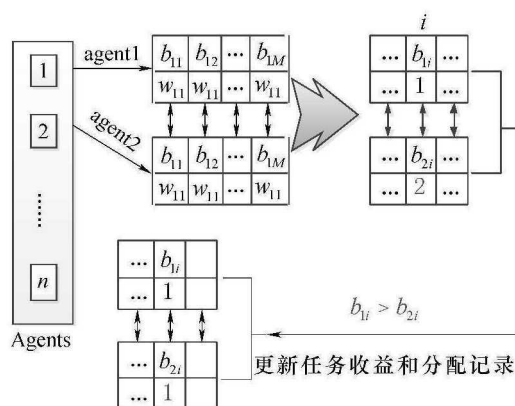


图4 多 Agent 间任务分配一致性协商过程

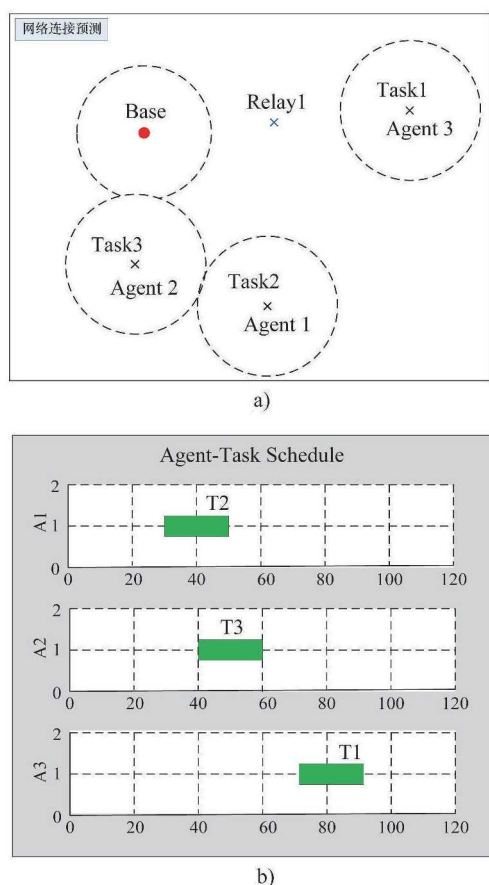


图5 任务执行时刻网络连接情况预测

a) 任务执行时刻网络连接情况图; b) Agent-任务时间表

任务执行时间窗有交叠的任务,如图5所示,Task2与Task3的时间窗有重合,虽然Task2与基地之间的距离超出了通信范围,但是此时Task2的信息可以通过执行Task3任务的Agent2进行传输,则认为通信连接有效;若Task1在任务执行时与基地产生通信中断,同时没有其他Agent可以作为它的中继,则认为需要为其添加中继任务,当该中继任务被合理的分配后Task1才能被有效执行。

3 仿真实验

本文实验场景“蜂群”中的无人机数目为6,其位置坐标、巡航速度、燃油惩罚系数如表1所示。编队需要执行任务数为10,其位置坐标、起止时间、任务持续时间、任务价值如表2所示。多机协同任务分配方法解算结果如图6所示,证明了该算法的有效性。

表1 的参数设置

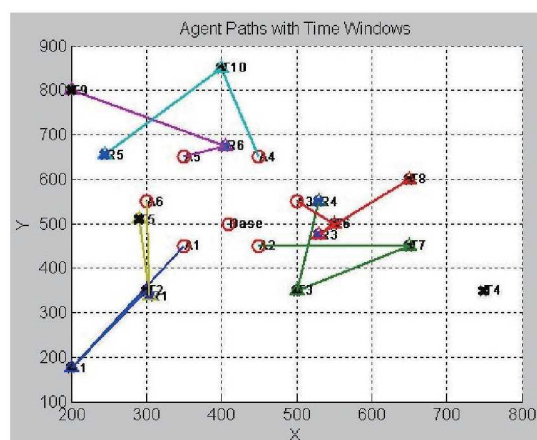
| Agent | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| coord | [350 450] | [450 450] | [500 550] | [450 650] | [350 650] | [300 550] |
| velocity | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| fuel_penalty | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

表2 Task 的参数设置

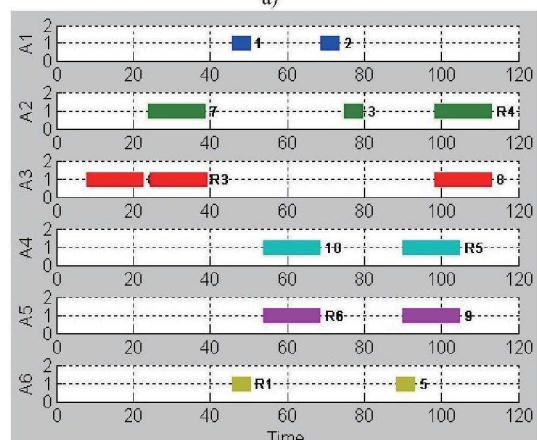
| task | coord | start | end | duration | value |
|------|------------|---------|----------|----------|-------|
| 1 | [300 175] | 45.6339 | 50.6339 | 5 | 500 |
| 2 | [300 350] | 68.6842 | 73.6842 | 5 | 500 |
| 3 | [500 350] | 74.8258 | 79.8258 | 5 | 500 |
| 4 | [750 350] | 96.5305 | 101.5305 | 5 | 500 |
| 5 | [290 510] | 88.4517 | 93.4517 | 5 | 500 |
| 6 | [550 500] | 7.7720 | 22.7720 | 15 | 1000 |
| 7 | [650 450] | 23.9007 | 38.9007 | 15 | 1000 |
| 8 | [650 600] | 98.3394 | 113.3394 | 15 | 1000 |
| 9 | [200 800] | 89.9776 | 104.9776 | 15 | 1000 |
| 10 | [400 850] | 53.7377 | 68.7377 | 15 | 1000 |

图7给出了算法的收敛及单次协商耗时统计结果,可以看出该算法通过较少次协商就可以完成所有的任务及中继任务的分配工作,同时其协商耗时为毫秒级,可以看出该算法收敛速度快,实时性强。

实验针对不同数目无人机编队和不同任务目标群的多个场景进行了算法测试,实验统计结果如表3所示,从中可以看出本文所提方法通过较少的协商次数就可以达到收敛,当Agent数、待分配任务数增多时,算法平均耗时增加明显,可以看出该方法对一定数量级的实时任务分配问题有效,同时也可用在较多任务的离线分配问题上。



a)



b)

图6 任务分配结果

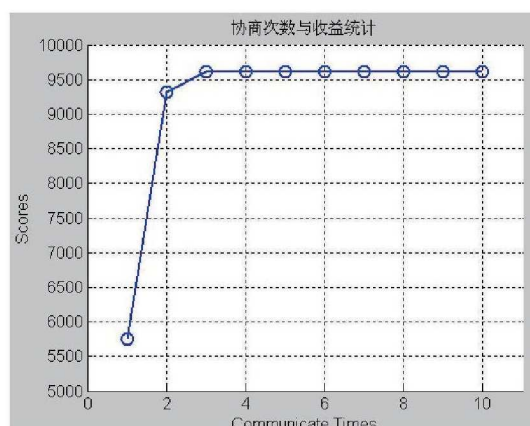
a) Agent-任务分配结果; b) Agent-任务时间表

表3 不同数量级下任务分配实验结果

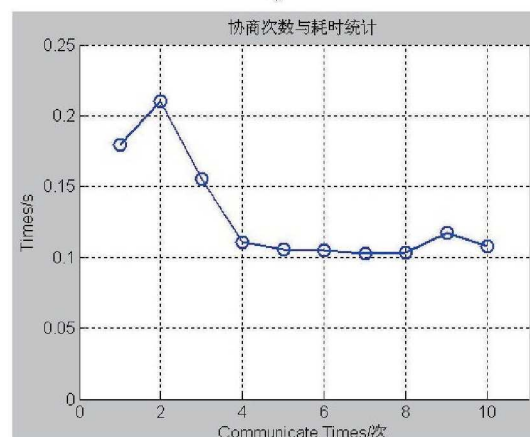
| 序号 | Agent | Task | Relays | 任务完成数 | 收敛协商次数 | 平均协商耗时/s |
|----|-------|------|--------|-------|--------|----------|
| 1 | 4 | 2 | 3 | 2 | 2 | 0.02571 |
| 2 | 6 | 10 | 6 | 9 | 3 | 0.13766 |
| 3 | 10 | 15 | 6 | 15 | 2 | 0.32931 |
| 4 | 13 | 18 | 8 | 18 | 2 | 0.66005 |
| 5 | 18 | 25 | 10 | 25 | 2 | 1.69559 |
| 6 | 18 | 20 | 5 | 20 | 3 | 1.25485 |
| 7 | 18 | 25 | 0 | 25 | 2 | 1.10952 |

4 结束语

任务分配是无人机蜂群执行任务的首要步骤,它需要根据作战环境和一定作战原则将任务分解为一系列无人机能够执行的任务单元,不同的任务分配方法将直接影响无人机蜂群侦察打击执行效果。本文提出一种基于分布式并行协商机制的无人机蜂群在线协同任务分配方法,对于多约束下的多目标



a)



b)

图7 任务分配算法收敛性及耗时统计

a) 协商次数与收益统计; b) 协商次数与耗时统计

任务分配问题具有复杂度低、耗时少、快速收敛等优点,不仅能够用于无人机蜂群的在线协同规划,还可以用于有人/无人机协同任务的在线或离线任务分配。

参考文献

- [1] 柯江宁.“蜂群”攻击:美国获取战场优势的秘密武器[J].现代军事,2015(2):103-105.
- [2] 贾高伟,侯中喜.美军无人机“蜂群”项目发展[J].国防科技,2017,38(4):54-56.
- [3] 梁晓龙.无人机“蜂群”[M].西安:西北工业大学出版社,2018.
- [4] NATO standardization agreement (STANAG) 4586: Standard interfaces of UAV control system (UCS) for NATO UAV interoperability (Ed3) [S]. 2012.
- [5] 张新村,姚雪琛,等.浅析无人机“蜂群”战术[J].航天与航空,2017,12(2).
- [6] 钮伟,黄佳沁,等.无人机蜂群对海作战概念与关键技术研究[J].指挥控制与仿真,2018,40(1):20-27.
- [7] 韩健.基于多Agent的无人机协作控制[D].哈尔

- 滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [8] 王强. UAV 集群自主协同决策控制关键技术研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2015.
- [9] Amr Ahmed, Abhilash Patel, Tom Brown, et al. Task assignment for a physical agent team via a dynamic forward/reverse auction mechanism [C]. *Evolutions and Engineering*, 2005.
- [10] 龙涛, 朱华勇, 沈林成. 多UCAV协同中基于协商的分布式任务分配研究 [J]. *宇航学报*, 27 (3): 457-462.
- [11] Vincent Roberge, Mohammed Tarbouchi, Gilles Labonte. Comparison of parallel genetic algorithm and particle swarm optimization for real-time UAV path planning [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013, 9 (1): 132-141.
- [12] 杨王诗剑. 引领海战革命——浅析无人机“蜂群战术” [J]. *兵器知识*, 2012 (3): 60-63.
- [13] 申超, 武坤琳, 等. 无人机蜂群作战发展重点动态 [J]. *飞航导弹*, 2016 (11): 28-33.
- [14] 王鹏, 崔捷. 战场信息对抗中的无人机作战运用研究 [J]. *空军工程大学学报*, 2017 (3): 52.